



วิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถจักรยานไฟฟ้า
ด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



กันตภณ โส่นพันธ์

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถจักรยานไฟฟ้า
ด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "วิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถจักรยานไฟฟ้า
ด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์"
ของ กันตภณ โฉนพันธ์
ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤติเดช บัวใหญ่)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัครพันธ์ วงศ์กั้งแห)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(รองศาสตราจารย์ ดร.พนัส นัถฤทธิ์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร เดชะศิลารักษ์)

อนุมัติ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรรองกาญจน์ ชูทิพย์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	วิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถจักรยานไฟฟ้า ด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ผู้วิจัย	กันตภณ โล่พันธ์
ประธานที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ ปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2564
คำสำคัญ	ยานยนต์ไฟฟ้า, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถจักรยานไฟฟ้าด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับเป้าหมายงานวิจัยนี้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของรถจักรยานไฟฟ้าควรมีสมรรถภาพที่ดี ในปัจจุบันวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถถูกใช้เพื่อช่วยในออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบให้มีสมรรถภาพที่ดี โดยมอเตอร์ต้นแบบเดิมเป็นชนิดมอเตอร์กระแสตรงแบบแปรงถ่านขนาด 350 วัตต์ แรงดัน 24 โวลต์ ด้วยแม่เหล็กถาวรชนิดเพอร์โรต์ การออกแบบมอเตอร์ถูกประยุกต์ด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยมุ่งเน้นที่โครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ โดยทั่วไปแม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียมมีความเข้มสูงมากและถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ในมอเตอร์ โดยมีลักษณะความยาว 50 มม. ความหนา 5 มม. เท่ากันทุกชิ้น โดยเปลี่ยนความกว้างจำนวน 6 ขนาด ได้แก่ 25 มม. 30 มม. 35 มม. 40 มม. 45 มม. และ 50 มม. ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ มอเตอร์ที่มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงจะส่งผลทำให้แรงบิดของมอเตอร์สูงขึ้น จากนั้นมอเตอร์ที่น่าสนใจได้ถูกทำการสร้างและทดสอบสมรรถภาพมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการทดสอบดังนี้ มอเตอร์ต้นแบบมีค่าแรงบิดสูงสุด 9.74 นิวตันเมตร และกำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด 291 วัตต์ และประสิทธิภาพสูงสุดที่ 74.68 เปอร์เซ็นต์ และในส่วนของมอเตอร์แม่เหล็กถาวร ขนาด 25 x 50 x 5 มม. ที่ถูกพัฒนาขึ้น มีค่าแรงบิดสูงสุด 9.87 นิวตันเมตร และกำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด 295 วัตต์ และประสิทธิภาพสูงสุดที่ 73.57 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งในส่วนของมอเตอร์แม่เหล็กถาวรขนาด 50 x 50 x 5 มม. มีค่าแรงบิดสูงสุด 13.00 นิวตันเมตร กำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด 304 วัตต์ และประสิทธิภาพสูงสุดที่ 76.67 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดสอบ พบว่ามอเตอร์แม่เหล็กถาวรขนาด 50 x 50 x 5 มม. มีสมรรถภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบกับมอเตอร์ต้นแบบ เช่น

แรงบิดสูงสุดเพิ่มขึ้น 33.47 เปอร์เซ็นต์ กำลังไฟฟ้าด้านออกเพิ่มขึ้น 4.46 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณ 1.99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อีกทั้งมอเตอร์ต่างๆได้ถูกประยุกต์ใช้ในจักรยานเพื่อทดสอบการขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้าในระยะทางประมาณ 25 กิโลเมตรด้วยสภาพต่างๆที่เท่ากัน พบว่า มอเตอร์ต่างๆสามารถนำไปใช้งานตามสถานการณ์การขับเคลื่อนได้ และการวิเคราะห์ด้วยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบและพัฒนาสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า



Title	ANALYZE PERFORMANCE OF DC MOTORS FOR ELECTRIC BICYCLE BY USING FINITE ELEMENT METHOD
Author	KANTAPHON LONPHAN
Advisor	Associate Professor Somporn Ruangsinchaiwanich, Ph.D.
Co-Advisor	Assistant Professor Akaraphunt Vongkunghae, Ph.D.
Academic Paper	Ph.D. Dissertation in Electrical Engineering - (Type 2.1), Naresuan University, 2021
Keywords	Electric Vehicle, DC Motor, Finite Element Method

ABSTRACT

This thesis presents the performance analysis of direct current motors for electric bicycles with using the finite element method. For this research propose, a direct current electric motor of an electric bicycle should be decent performed. Recently the finite element method can be applied to support for a prototype of the direct current motor with good performance. The original motor is a 350 Watt with a brushed DC motor type, 24 Volt, with ferrite permanent magnet. The designs of motors are applied by using the finite element method with focusing to stator dimension of the motor. Generally, neodymium permanent magnet has high density and is applied for analysis of the motors. There have 50 mm long and 5 mm thick and have 6 sizes of wide, for example, 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm and 50 mm respectively.

As the analysis result, a motor with higher maximum magnetic flux density, it has higher motor torque performance. Therefore, the fascinating motors are then built and tested in the laboratory. The original motor has a maximum torque of 9.74 Nm, a maximum output power of 291 Watt and a peak efficiency of 74.68 percent. The 25 x 50 x 5 mm permanent magnet developed motor has a maximum torque of 9.87 Nm, a maximum output power of 295 Watt and the maximum efficiency is 73.57 percent. Moreover, the 50 x 50 x 5 mm permanent magnet developed motor has a maximum torque of 13.00 Nm, a maximum output power of 304 Watt, and a maximum

efficiency of 76.67 percent. From the test results, it was found that a 50 x 50 x 5 mm permanent magnet motor has the highest efficiency compared with the original motor that for example maximum torque increasing 33.47 percent, output power growing to 4.46 percent and efficiency upturning near 1.99 percent respectively. Furthermore, the motors are employed to an electric bike for testing to drive with nearly distance of 25 kilometers with the same conditions. It is found that the original motor and the built motor can be used in actual drive situations. Therefore, analysis of the finite element method is helpful for designing and optimizing electric motor performance.



ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัศรพันธ์ วงศ์กังแห กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นທີ່ปรึกษา พร้อมทั้งให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านอันประกอบไปด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤติเดช บัวใหญ่ รองศาสตราจารย์ ดร.พนัส นัถฤทธิ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร เตชะศิลารักษ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัยที่ให้อำนาจใจและให้การสนับสนุน ในทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบ และอุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน และผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจทุกท่าน

กัณฑ์ภณ โสณพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุุณุปการ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา.....	1
จุดมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
คำสำคัญหรือคำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ปรัชศน์วรรณกรรมและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ปรัชศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	49
ยานยนต์ไฟฟ้า.....	49
รถจักรยานไฟฟ้า.....	54

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปรงถ่าน.....	71
แม่เหล็กถาวร.....	74
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	77
บทที่ 4 การออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	81
การศึกษาพารามิเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย.....	81
การออกแบบพัฒนาโครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	86
การวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	87
บทที่ 5 การสร้างและทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	101
การสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจริงที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	101
การทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	106
การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขับเคลื่อนรถจักรยานไฟฟ้า.....	117
บทที่ 6 บทสรุป.....	126
สรุปผลการวิจัย.....	126
อภิปรายผลการวิจัย.....	129
ข้อเสนอแนะการวิจัย.....	130
บรรณานุกรม.....	132
ประวัติผู้วิจัย.....	143

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ค่าความเหนียวนำสำหรับการทดสอบมอเตอร์แบบ PMBDC.....	6
ตาราง 2 การคำนวณสมรรถภาพของผลการทดสอบมอเตอร์ด้วยการใช้การจำลองไฟไนต์ เอลิเมนต์และการวัดค่าจริง	8
ตาราง 3 ข้อมูลมอเตอร์ต้นแบบและมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้น	8
ตาราง 4 พารามิเตอร์แกนขั้ว.....	11
ตาราง 5 ผลเปรียบเทียบการจำลอง.....	12
ตาราง 6 พารามิเตอร์ของมอเตอร์	13
ตาราง 7 ผลของการคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนียวนำ	16
ตาราง 8 ผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์การออกแบบของมอเตอร์เหนียวนำกรงกระรอก ต้นแบบและ IMRW สำหรับ $P = 1$	19
ตาราง 9 ทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	39
ตาราง 10 เปรียบเทียบสมบัติด้านต่าง ๆ ของเบตเตอร์ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า	70
ตาราง 11 คุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในงานเครื่องกลไฟฟ้า	76
ตาราง 12 ข้อมูลมอเตอร์รุ่น MY1016Z3 จากผู้ผลิต.....	82
ตาราง 13 พารามิเตอร์โรเตอร์ของมอเตอร์ต้นแบบ	83
ตาราง 14 พารามิเตอร์สเตเตอร์ของมอเตอร์ต้นแบบ	85
ตาราง 15 พารามิเตอร์ของการออกแบบโครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	86
ตาราง 16 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	99
ตาราง 17 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .	102

ตาราง 18 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ	108
ตาราง 19 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นแม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม.....	109
ตาราง 20 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นแม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม.....	110
ตาราง 21 ผลการทดสอบรถจักรยานไฟฟ้า.....	121



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 แบบจำลองของมอเตอร์แบบ PMBDC	5
ภาพ 2 ความหนาแน่นฟลักซ์ของอากาศกับตำแหน่งโรเตอร์	5
ภาพ 3 โปรไฟล์การเหนี่ยวนำ.....	5
ภาพ 4 โรเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ	6
ภาพ 5 ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ภายในขั้วแม่เหล็ก	7
ภาพ 6 ฟลักซ์แม่เหล็กรั่วเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กสเตเตอร์	7
ภาพ 7 ผลการจำลองแรงบิดเทียบกับเวลาของมอเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้น	9
ภาพ 8 ผลการจำลองกระแสด้านเข้าเทียบกับเวลาของมอเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้น	9
ภาพ 9 มอเตอร์กระแสตรงแบบแปรงถ่านต้นแบบ	10
ภาพ 10 แกนขั้วมอเตอร์กระแสตรงแบบแปรงถ่านที่นำเสนอ	10
ภาพ 11 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Maxwell โดยอัลกอริทึม Taguchi	11
ภาพ 12 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Maxwell.....	14
ภาพ 13 การกระจายของฟลักซ์แม่เหล็ก	14
ภาพ 14 โครงสร้างของมอเตอร์แบบ IMRW.....	17
ภาพ 15 ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กในโครงสเตเตอร์.....	17
ภาพ 16 การจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำอนุกรมแบบพื้นฐาน.....	18
ภาพ 17 ยานยนต์ไฟฟ้า.....	50
ภาพ 18 จำนวนยานยนต์ไฟฟ้าสะสมในประเทศไทย ตั้งแต่ พ.ศ. 2558 – 31 พ.ศ. 2563	52

ภาพ 19 จำแนกจำนวนยานยนต์ไฟฟ้าสะสมในประเทศไทย ข้อมูล ณ วันที่ 31 พ.ค. 2563	53
ภาพ 20 จำนวนยานยนต์ไฟฟ้าที่จดทะเบียนใหม่ในประเทศไทย ตั้งแต่ พ.ค. 2558 – 31 พ.ค. 2563	54
ภาพ 21 รถจักรยานไฟฟ้า.....	54
ภาพ 22 โครงสร้างภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน.....	55
ภาพ 23 โครงสร้างภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน.....	57
ภาพ 24 ลักษณะรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมของวงจรรูป PWM.....	59
ภาพ 25 วงจรชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน	59
ภาพ 26 วงจร IC MC33033 ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน	60
ภาพ 27 ชุดคันเร่ง	61
ภาพ 28 ภาพหลักการทำงานของแบตเตอรี่.....	61
ภาพ 29 สมรรถนะแบตเตอรี่ในมิติต่าง ๆ.....	62
ภาพ 30 คุณลักษณะด้าน C-Rate, SOC และ %DOD ของแบตเตอรี่ ที่จำเป็นสำหรับการใช้ งานในยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ.....	64
ภาพ 31 วิวัฒนาการของการพัฒนาแบตเตอรี่ด้านความหนาแน่นพลังงานและราคา	70
ภาพ 32 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปรงถ่าน.....	71
ภาพ 33 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน.....	71
ภาพ 34 การสูญเสียและกำลังในส่วนต่าง ๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปรงถ่าน	73
ภาพ 35 เส้นโค้งการทำแม่เหล็กกระแสตรงสำหรับวัสดุแม่เหล็กถาวร.....	77
ภาพ 36 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย	81
ภาพ 37 ส่วนประกอบของมอเตอร์.....	82

ภาพ 38 ส่วนประกอบของโรเตอร์	83
ภาพ 39 การต่อขดลวดอาร์เมเจอร์แบบ Simplex Lab Winding.....	84
ภาพ 40 วงจรไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์	84
ภาพ 41 ส่วนประกอบของสเตเตอร์	85
ภาพ 42 ตัวอย่างโครงสร้างสเตเตอร์สี่เหลี่ยมและแม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม.....	87
ภาพ 43 โครงสร้างสามมิติของสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์.....	88
ภาพ 44 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ต้นแบบ	90
ภาพ 45 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม.....	91
ภาพ 46 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 30 x 50 x 5 มม.....	92
ภาพ 47 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 35 x 50 x 5 มม.....	93
ภาพ 48 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 40 x 50 x 5 มม.....	94
ภาพ 49 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 45 x 50 x 5 มม.....	95
ภาพ 50 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม.....	96
ภาพ 51 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของมอเตอร์	97
ภาพ 52 ผลการวิเคราะห์ฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์	98
ภาพ 53 กราฟเปรียบเทียบการจำลองค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	100

ภาพ 54 ขนาดโครงสร้างสเตเตอร์สี่เหลี่ยมและแม่เหล็ก	102
ภาพ 55 สเตเตอร์สี่เหลี่ยม	103
ภาพ 56 แม่เหล็กแรงสูงชนิดนีโอไคเมียม	103
ภาพ 57 กาวอีพ็อกซี.....	103
ภาพ 58 โครงสร้างสเตเตอร์สี่เหลี่ยมและแม่เหล็กจริง.....	104
ภาพ 59 ขั้นตอนการประกอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	105
ภาพ 60 มอเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์จากการเปลี่ยนสเตเตอร์และแม่เหล็ก	105
ภาพ 61 การทดสอบมอเตอร์กระแสตรงในห้องปฏิบัติการ.....	106
ภาพ 62 ค่าที่แสดงผลจากเซนเซอร์วัดแรงบิด.....	107
ภาพ 63 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงบิดกับความเร็วรอบ	111
ภาพ 64 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกกับความเร็วรอบ	112
ภาพ 65 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้ากับความเร็วรอบ	113
ภาพ 66 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าประสิทธิภาพกับความเร็วรอบ.....	114
ภาพ 67 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าประสิทธิภาพกับแรงบิด	115
ภาพ 68 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงบิดกับกำลังไฟฟ้าด้านออก	116
ภาพ 69 จักรยานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ	117
ภาพ 70 เฟืองและขนาดล้อจักรยานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ	118
ภาพ 71 ไดอะแกรมของจักรยานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ.....	118
ภาพ 72 ค่าที่แสดงผลจากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง.....	119
ภาพ 73 ค่าที่แสดงผลจากแอปพลิเคชัน Speedometer.....	119
ภาพ 74 ภาพภูมิศาสตร์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ส่วนทะเลแก้ว.....	120
ภาพ 75 กราฟความเร็วของของจักรยานไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ต้นแบบ	123

ภาพ 76 กราฟความเร็วของจักรยานไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แม่เหล็ก 25 x 50 x 5 มม..... 123

ภาพ 77 กราฟความเร็วของจักรยานไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แม่เหล็ก 50 x 50 x 5 มม..... 123

ภาพ 78 กราฟแรงดันและกระแสของมอเตอร์ต้นแบบ..... 124

ภาพ 79 กราฟแรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็ก 25 x 50 x 5 มม..... 124

ภาพ 80 กราฟแรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็ก 50 x 50 x 5 มม..... 125



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันรถพลังงานไฟฟ้ามีการเติบโตและเริ่มเป็นที่รู้จักของประชาชนมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2018 รถยนต์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าทั่วโลกมีจำนวนมากกว่า 5.1 ล้านคัน เพิ่มขึ้น 2 ล้านคันจากปี 2017 และมีรถยนต์ไฟฟ้าจดทะเบียนใหม่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า โดยสาธารณรัฐประชาชนจีนเป็นตลาดรถยนต์ไฟฟ้าที่ใหญ่ที่สุดในโลก ตามด้วยยุโรปและสหรัฐอเมริกา โดยในปี 2018 มีรถไฟฟ้าสองล้อทั่วโลกประมาณ 260 ล้านคัน และมีรถบัสไฟฟ้าประมาณ 460,000 คัน และสำหรับอุตสาหกรรมขนส่งสินค้า รถยนต์ไฟฟ้า (EVs) ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นการบรรทุกขนาดเล็ก (Light-Commercial Vehicles : LCVs) ซึ่งมีมากถึง 250,000 คัน ซึ่งในปี 2018 มีบริการที่เกี่ยวข้องกับ รถ EV ทั่วโลก ได้แก่ บริการที่ชาร์จรถยนต์ขนาดเล็ก (Light-Duty Vehicle : LDV) ประมาณ 5.2 ล้านเครื่อง (เป็นบริการสาธารณะสำหรับบุคคลทั่วไปประมาณ 540,000 เครื่อง) บริการที่ชาร์จด่วนสำหรับรถโดยสารประมาณ 157,000 เครื่อง โดยพบว่าในปี 2018 รถพลังงานไฟฟ้าบนท้องถนนใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 58 เทราวัตต์ชั่วโมง (TWh) (ส่วนใหญ่เป็นรถไฟฟ้าสองล้อในจีน) และสามารถลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ลงได้เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายในที่มีขนาดเครื่องยนต์เท่ากัน โดยที่ปัจจุบันค่าใช้จ่ายในการพัฒนาเทคโนโลยีกำลังลดลงอย่างมาก เช่นเดียวกับเทคโนโลยีแบตเตอรี่ไฟฟ้าที่มีต้นทุนลดลงอย่างต่อเนื่อง สืบเนื่องมาจากการพัฒนาทางเคมีของแบตเตอรี่และการขยายกำลังการผลิต ประกอบกับการพัฒนาเทคโนโลยีอื่นๆ ที่คาดว่าจะมีส่วนทำให้รถพลังงานไฟฟ้าสามารถลดต้นทุนและขยายกำลังการผลิตได้ รวมถึงการออกแบบแพลตฟอร์มการผลิตรถยนต์ใหม่โดยใช้สถาปัตยกรรมการออกแบบที่เรียบง่าย สร้างสรรค์ มีความยืดหยุ่น และมีการใช้ปริมาณข้อมูลที่มาก (Big Data) เพื่อปรับปรุงแบตเตอรี่ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งานในรถแต่ละประเภท

เทคโนโลยีจักรยานไฟฟ้า (E-Bike) มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและได้รับความนิยมอย่างรวดเร็ว จากข้อมูลที่ผ่านมาในประเทศสมาชิกของสหภาพยุโรปมีผลิตรถจักรยานไฟฟ้ามากกว่า 1 ล้านคันต่อปี และในปัจจุบันมีบริษัทและกิจการขนาดเล็ก (SME) ที่เกี่ยวกับจักรยานไฟฟ้ากว่า 600 กิจการ และมีการสร้างงานกว่า 70,000 ตำแหน่ง และมีการคาดการณ์ว่าขนาดของตลาดจักรยานไฟฟ้าจะโตเป็นสามเท่าภายใน 5 ปี [1] และทั่วโลก รถจักรยานไฟฟ้ากำลังเป็นยานพาหนะทางเลือกที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย [2-3] และสามารถทำได้ด้วยความเร็วในการเดินทางได้ประมาณ 25 – 32 กิโลเมตรต่อ

ชั่วโมง [4] โดยเฉพาะอย่างยิ่งจักรยานไฟฟ้ามีข้อดีกว่ารถจักรยานยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงหลายอย่าง [5-7] เช่น ไม่มีไอเสียทำให้ลดการเกิดมลพิษทางอากาศ (Air Pollution) ไม่มีมลภาวะทางเสียง (Noise Pollution) ตัวรถมีน้ำหนักเบา ราคาไม่แพง และมีค่าบำรุงรักษาต่ำ (Low Maintenance) ทั้งนี้ศักยภาพที่สำคัญของการพัฒนาจักรยานไฟฟ้าในการแข่งขันของต่างประเทศจะคำนึงถึงองค์ประกอบ เช่น ใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยีในการผลิตหรือการสร้างองค์ความรู้ด้านการออกแบบให้เหมาะกับการใช้งานและระบบความปลอดภัยและอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆ

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาด้านวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง ซึ่งเป็นกระบวนการเชิงตัวเลขเพื่อหาผลลัพธ์โดยประมาณสำหรับแก้ปัญหาที่ประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบหลัก คือ สมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขขอบเขต และรูปร่างของปัญหา ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนใดๆก็ได้ แนวความคิดหลักของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ จากนั้นจึงสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ จากสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับเอลิเมนต์เหล่านั้น ก่อนนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกอย่างมารวมกัน เพื่อก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตลงบนระบบสมการใหญ่เพื่อแก้ปัญหาผลลัพธ์ ซึ่งในงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าสามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการประยุกต์การวิเคราะห์สมรรถนะของมอเตอร์ เช่น แรงบิด ประสิทธิภาพ กำลังไฟฟ้านำออก ฟลักซ์แม่เหล็ก เป็นต้น จึงช่วยในการออกแบบระบบการทำงานของมอเตอร์ เพื่อการลดระยะเวลาในการคำนวณที่ซับซ้อนลง และช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดลองจริงได้

ดังนั้นจึงนำมาสู่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ โดยงานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถจักรยานไฟฟ้าด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อช่วยในการออกแบบแม่เหล็กถาวรและสเตเตอร์ของมอเตอร์ทำให้เพิ่มสมรรถภาพของมอเตอร์สำหรับรถจักรยานไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น

จุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถจักรยานไฟฟ้า
2. เพื่อเป็นต้นแบบแนวทางในการช่วยวิเคราะห์โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถจักรยานไฟฟ้าเพื่อเพิ่มสมรรถภาพให้สูงขึ้น

กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก สำหรับการวิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถจักรยานไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาพารามิเตอร์ของแม่เหล็กถาวรและสเตเตอร์ เพื่อเป็นต้นแบบแนวทางในการช่วยการพัฒนาโครงสร้างของ สเตเตอร์ในการเพิ่มสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างเหมาะสม โดยการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก และทำการทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ เช่น แรงบิด ประสิทธิภาพ กำลังไฟฟ้าด้านออก เป็นต้น

ขอบเขตของการวิจัย

การเสนอแนวทางการวิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถจักรยานไฟฟ้าด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อการพัฒนาแม่เหล็กถาวรและโครงสร้างมอเตอร์กระแสตรงแบบแปร่งถ่านที่มีขนาดตามท้องตลาด ขนาด 350W ให้มีสมรรถภาพให้สูงขึ้น เหมาะสมกับเงื่อนไขการใช้งานจริง เช่น แรงบิด กำลังด้านออก และประสิทธิภาพ เป็นต้น

สมมุติฐานของการวิจัย

มอเตอร์ที่ได้พัฒนาโครงสร้างจากการวิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถจักรยานไฟฟ้าด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีสมรรถภาพที่สูงขึ้นและความเหมาะสมกับการใช้งานจริง

คำสำคัญหรือคำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

1. มอเตอร์กระแสตรง คือ เป็นเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล
2. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ เทคนิควิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการหาคำตอบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยพร้อมๆกับสมการปริพันธ์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้องค์ความรู้สำหรับการออกแบบพัฒนาโครงสร้างของมอเตอร์ที่มีขายตามท้องตลาดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นความเหมาะสมกับการใช้งานจริง จากการวิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถจักรยานไฟฟ้าด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

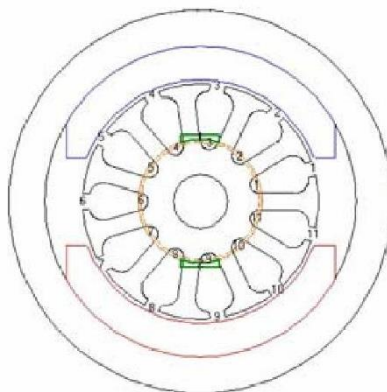
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์มอเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการออกแบบและพัฒนาสมรรถภาพของมอเตอร์ เพื่อให้ทราบถึงความสำคัญและแนวทางในการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่แตกต่างกัน ซึ่งการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการสร้างแบบจำลองของมอเตอร์เพื่อจำลองผลการทำงานก่อนที่จะสร้างจริงจะช่วยให้ได้ค่าพารามิเตอร์ในการสร้างมอเตอร์ที่เหมาะสม เช่น โครงสร้าง ขนาด รูปทรง วัสดุของสเตเตอร์ โรเตอร์ อาร์เมเจอร์ ตัวนำ แม่เหล็กถาวร แปรปร่งถ่าน คอมมิวเตเตอร์ เป็นต้น จึงส่งผลให้ประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายของวัสดุต้นแบบได้

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

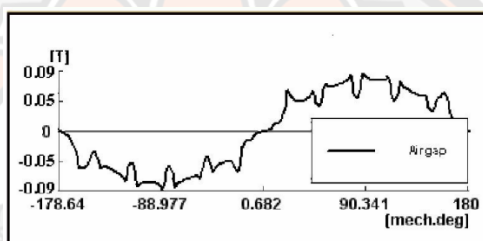
มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นหัวใจสำคัญสำหรับการเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบสร้างมอเตอร์โดยทั่วไป จะพัฒนาหลายด้าน เช่น การเพิ่มสมรรถนะ การเพิ่มประสิทธิภาพ การลดการสูญเสีย การลดขนาด การลดต้นทุนการผลิต เป็นต้น ซึ่งจะเป็นการพัฒนาในส่วนของ โครงสร้าง ขนาด รูปร่าง วัสดุ จำนวนของอุปกรณ์มอเตอร์ โดยที่ผ่านมามีผู้วิจัยหลายท่านได้เสนอวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์

ในปี 2005 Zaki และ Ibrahim [8] ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์มอเตอร์กระแสตรงแบบแปรปร่งถ่านแม่เหล็กถาวร (PMBDCM) โดยใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อใช้ทำนายค่าความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์และฟลักซ์แม่เหล็กช่องว่างอากาศ ซึ่งการเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์มีความสำคัญ เนื่องจากมีผลต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยมอเตอร์ที่ทำการทดสอบเป็นรุ่น PM3-CLW พิกัด 2.4 แอมป์ 50 โวลต์ และ 4,000 รอบต่อนาที ซึ่งถูกควบคุมแรงดันด้วยคอนเวอร์เตอร์

การประมาณค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์รวม L_o และฟลักซ์ของช่องว่างอากาศที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อน เพื่อให้ได้คำตอบของสนามแม่เหล็กในอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแม่เหล็กถาวรเป็นองค์ประกอบจำกัด โดยการสร้างแบบจำลองตามภาพ 1 แสดงภาพตัดของมอเตอร์ซึ่งมีแม่เหล็กถาวร จำนวน 2 ขั้ว ติดตั้งอยู่บนสเตเตอร์ และภาพ 2 แสดงการคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์ของอากาศกับตำแหน่งโรเตอร์ที่เกิดจากเทคนิค FEM ซึ่งมีค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดที่ประมาณ 0.8 T

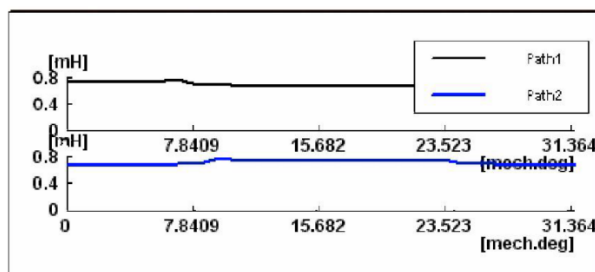


ภาพ 1 แบบจำลองของมอเตอร์แบบ PMBDC



ภาพ 2 ความหนาแน่นฟลักซ์ของอากาศกับตำแหน่งโรเตอร์

ในการพิจารณาความไม่เชิงเส้นของแม่เหล็กถาวร สามารถทำการวิเคราะห์โดยคำนึงถึงแม่เหล็กก่อน จากนั้นบันทึกการซึมผ่านที่รวมโดยความไม่เป็นเชิงเส้นลงในแต่ละองค์ประกอบแล้วเอาแม่เหล็กออก หลังจากนั้นป้อนกระแสในขดลวดเพื่อทำการวิเคราะห์อีกครั้ง ในเวลานี้ การเหนี่ยวนำจะถูกคำนวณตามพลังงานสนาม ภาพ 3 แสดงโปรไฟล์การเหนี่ยวนำเทียบกับตำแหน่งของโรเตอร์ใน ความแตกต่างสองเส้นทาง ซึ่งมีค่าการเหนี่ยวนำใกล้เคียงกันอยู่ระหว่างค่าประมาณ 0.7 - 0.8 mH



ภาพ 3 โปรไฟล์การเหนี่ยวนำ

ผลการทดสอบความเหนียวนำของอาร์เมเจอร์ได้มาจากการทดสอบมอเตอร์แบบ PMBDC รุ่น PM3-CLW แบบ 2 ขั้ว ที่มีกระแสอาร์เมเจอร์ 2.4 A แรงดันไฟฟ้า 50 V และความเร็ว 4000 รอบต่อนาที แสดงในตาราง 1 โดยมีการทดสอบ 3 วิธี คือ วิธีที่ 1 การคำนวณแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ วิธีที่ 2 การวัดโดยใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสอาร์เมเจอร์ (di/dt) และวิธีที่ 3 เครื่องวัดความเหนียวนำ

ตาราง 1 ค่าความเหนียวนำสำหรับการทดสอบมอเตอร์แบบ PMBDC

วิธีการ	ค่าความเหนียวนำ (mH)
การคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์	0.8
การวัดโดยใช้อัตราการเพิ่มขึ้น(di/dt)	0.88
การวัดด้วยเครื่องวัดความเหนียวนำ	0.86

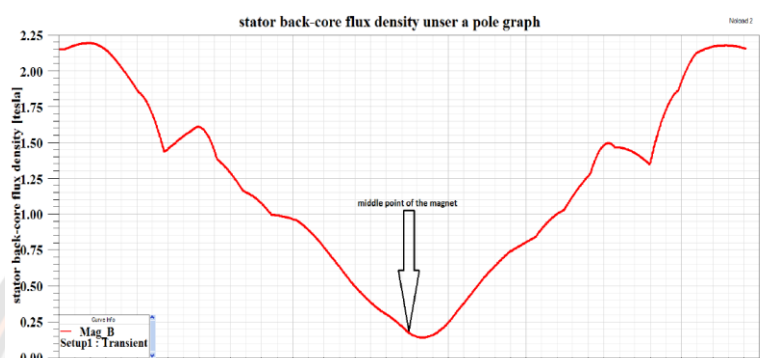
จากการศึกษา พบว่า เทคนิคการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติใช้เพื่อทำนายประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยการคำนวณโปรไฟล์การเหนียวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์และฟลักซ์แม่เหล็กช่องว่างอากาศซึ่งมีผลสอดคล้องกับคุณลักษณะของมอเตอร์แบบ PMBDC

ในปี 2017 Tarvirdilu-Asl, Zeinali และ Ertan [9] ได้ศึกษาการออกแบบปรับเปลี่ยนโครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงแบบแปรงถ่าน โดยวิธีการจำลองด้วยการใช้ซอฟต์แวร์ที่ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบผลการวัดและการจำลอง โดยการลดการใช้วัสดุในการผลิตมอเตอร์ เพื่อพัฒนาแรงบิดที่ต้องการด้วยประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ซึ่งมอเตอร์ต้นแบบที่ใช้ทดสอบเป็นมอเตอร์กระแสตรงแบบแปรงถ่าน ขนาด 225 วัตต์ แรงดัน 26 โวลต์ แรงบิด 0.825 นิวตัน-เมตร ความเร็วรอบโหลดเต็มพิกัดที่ 2,761 รอบต่อนาที แสดงภาพโรเตอร์ของมอเตอร์ในภาพ 4



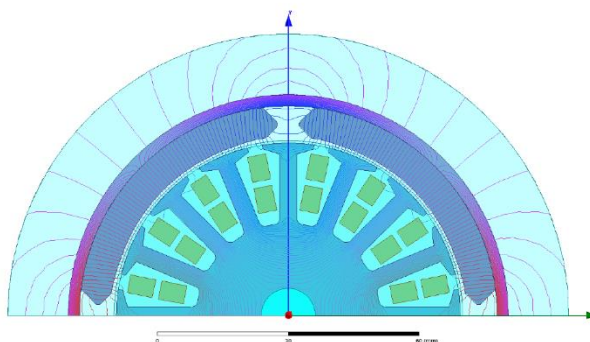
ภาพ 4 โรเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ

จากการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบพบว่า ความหนาแน่นสูงสุดของสเตเตอร์เท่ากับ 2.2 เทสลา ซึ่งมีค่าสูงกว่าลักษณะของเส้นโค้ง B-H ที่มีประมาณ $B = 1.8$ เทสลา จึงส่งผลกระทบต่อการทำงานของสเตเตอร์ ผลของการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยการวิเคราะห์ที่ชั่วไต้แสดงในภาพ 5 สังเกตว่ามุม 45 องศาบนแกน คือ จุดกึ่งกลางของขั้วไต้แม่เหล็ก



ภาพ 5 ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ภายในขั้วแม่เหล็ก

ภาพ 6 แสดงฟลักซ์แม่เหล็กรั่วเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กสเตเตอร์ซึ่งเกิดจากโครงสร้างสเตเตอร์ที่บางเกินไป โดยในการจำลองใช้ขอบเขตขนาด 140 มม. ในขณะที่เส้นผ่าศูนย์กลางของมอเตอร์มีขนาด 102 มม.



ภาพ 6 ฟลักซ์แม่เหล็กรั่วเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กสเตเตอร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบสมรรถภาพจริงของมอเตอร์ต้นแบบ สรุปไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นความแตกต่างมีค่าเล็กน้อย

ตาราง 2 การคำนวณสมรรถภาพของผลการทดสอบมอเตอร์ด้วยการใช้การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และการวัดค่าจริง

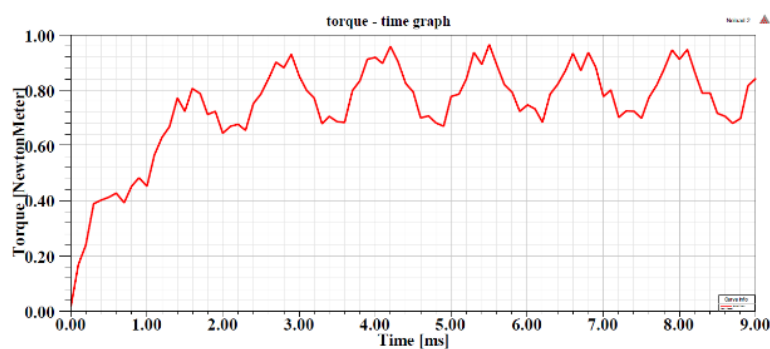
พารามิเตอร์	ความเร็ว (rpm)	แรงบิด (N.m.)	กระแสเข้า (A)	กำลังเข้า (W)	กำลังออก (W)	สูญเสียแกนเหล็ก (W)	สูญเสียทองแดง (W)	สูญเสียทางกล (W)	สูญเสียรวม (W)	ประสิทธิภาพ (%)
FEM	2761	0.833	13.75	357.5	230.15	14.8	101.85	10.7	127.35	64.38
การวัด	2761	0.825	13.58	360.05	227.77	13.4	108.18	10.7	132.28	63.3
ความผิดพลาด (%)	0	0.97	0.72	0.71	1.04	10.45	5.85	0	3.73	1.71

ทางผู้วิจัยได้พัฒนาโครงสร้างของมอเตอร์ใหม่โดยการเพิ่มความหนาของโครงสเตเตอร์จากเดิม 2.5 มม. เป็น 4 มม. ทำให้ลดการอิ่มตัวของแกนเหล็กของสเตเตอร์และความหนาของโครงสเตเตอร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าต้านกับลดลงทำให้แรงดันด้านเข้าและแรงบิดลดลง จึงจำเป็นต้องทำการปรับจำนวนรอบของขดลวดของอาร์เมเจอร์จากเดิม 30 รอบ ลดลงเหลือ 27 รอบ เพื่อให้ได้ค่าแรงบิดใกล้เคียงกับมอเตอร์ต้นแบบ และส่งผลให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบเพิ่มเป็น 2,890 รอบต่อนาที ข้อมูลของมอเตอร์ต้นแบบกับมอเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นแสดงในตารางที่ 3

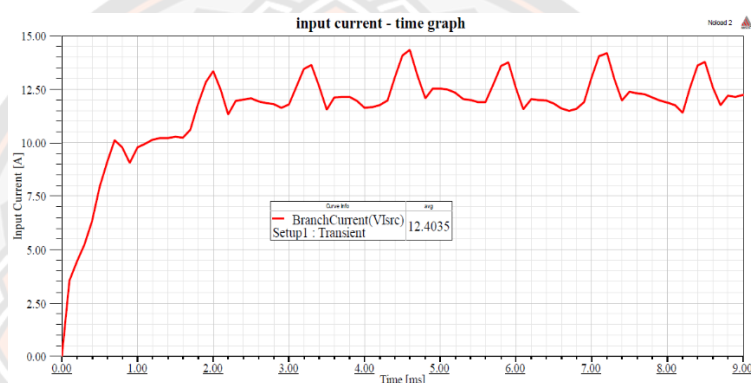
ตาราง 3 ข้อมูลมอเตอร์ต้นแบบและมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

ชนิดมอเตอร์	ความยาวโรเตอร์ (มม.)	ความยาวแม่เหล็ก (มม.)	ความยาวสเตเตอร์ (มม.)	จำนวนขดลวด	ขนาดตัวนำ (มม.)	ขนาดภายนอกสเตเตอร์ (มม.)	ความต้านทานขดลวด (Ω)
มอเตอร์ต้นแบบ	22.7	39	44	30	0.5	102	0.38
มอเตอร์พัฒนา	22.7	39	44	27	0.5	105	0.349

ผลของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแรงบิดและกระแสด้านเข้าของมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นแสดงในภาพ 7 และภาพ 8



ภาพ 7 ผลการจำลองแรงบิดเทียบกับเวลาของมอเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้น



ภาพ 8 ผลการจำลองกระแสต้านเข้าเทียบกับเวลาของมอเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้น

ผลของการพัฒนามอเตอร์จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า มอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมีแรงบิดที่ดีและมีความเร็วรอบที่สูงขึ้นกว่าเดิม ยิ่งไปกว่านั้นจะเห็นได้ว่ากระแสต้านเข้ามีค่าลดลงจากเดิม 13.75 แอมป์ ลดลงเหลือ 12.40 แอมป์ และประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 71.2 เปอร์เซ็นต์ซึ่งสูงกว่ามอเตอร์ต้นแบบถึง 7 เปอร์เซ็นต์

ในปี 2019 Hsiao, Hsiao และ Chen [10] ได้ศึกษามอเตอร์กระแสตรงแบบแปร่งถ่านสำหรับงานสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเป็น ซึ่งมีโครงสร้างภายในแบบ 4 ขั้ว 21 ช่อง โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ห้วงจรแม่เหล็กไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย RMxprt และ Maxwell 2D ของ ANSYS ใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ลักษณะสนามแม่เหล็กชั่วคราว โดยวิเคราะห์ลักษณะทางไฟฟ้าและแม่เหล็กรวมทั้งแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กระแสอาร์เมเจอร์ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า ความเร็วพิกัด ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก และการกระจายสนามแม่เหล็กของวงจรมอเตอร์ต้นแบบแสดงในภาพ 9

ในงานวิจัยนี้การเสนอการพัฒนา 2 วิธีการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแกนขั้ว วิธีที่ 1 การตัดแกนขั้วแม่เหล็กออกเป็นสองส่วนโดยใช้วัสดุที่แตกต่างกันเป็นแกนขั้วแม่เหล็กซึ่งสามารถลดปรากฏการณ์อิ่มตัวของแม่เหล็กที่ส่วนปลายของแกนขั้วแสดงในภาพ 10(ก) ในส่วนของวิธีที่ 2 คือการขุดรูที่ปลายขั้วด้านหน้าบังคับให้กระจายแม่เหล็กไปที่ปลายขั้วด้านหลังเพื่อปรับปรุงปรากฏการณ์ความอิ่มตัวของแม่เหล็ก แสดงในภาพ 10(ข) โดยที่ A คือ ความหนาโครงสเตเตอร์ ในส่วนของ B คือ ความกว้างของขั้ว และในส่วนของ C คือ ความสูงฐานส่วนปลายของขั้ว



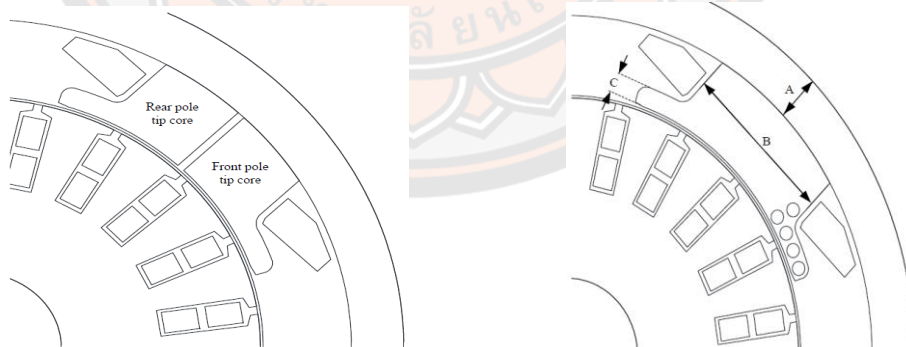
(ก)

(ข)

ภาพ 9 มอเตอร์กระแสตรงแบบแปรงถ่านต้นแบบ

(ก) โรเตอร์

(ข) สเตเตอร์



ภาพ 10 แกนขั้วมอเตอร์กระแสตรงแบบแปรงถ่านที่นำเสนอ

(ก) วิธีที่ 1 การตัดแกนขั้วออกเป็นสองส่วนโดยใช้วัสดุที่แตกต่างกัน

(ข) วิธีที่ 2 การขุดรูที่ปลายขั้วด้านหน้า

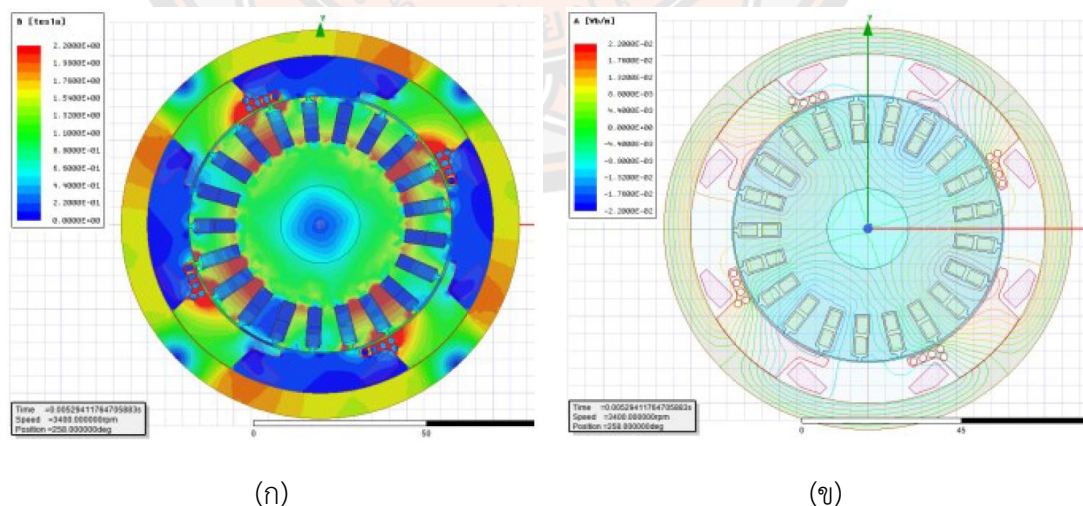
ในการพัฒนาโครงสร้างแกนขั้วสเตเตอร์ของมอเตอร์ แบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ

- แบบ Type 1 การแบ่งแกนขั้วสองส่วน ส่วนหน้าใช้วัสดุ 50H470 และส่วนหลังใช้วัสดุ S10C
- แบบ Type 2 การแบ่งแกนขั้วสองส่วน ส่วนหน้าใช้วัสดุ S10C และส่วนหลังใช้วัสดุ 50H470
- แบบ Type 3 การขุดรูที่ปลายขั้วด้านหน้า แกนขั้วใช้วัสดุ S10C
- แบบ Taguchi การพัฒนาแบบ Type 3 โดยปรับโครงสร้างแกนขั้ว ตามตาราง 4

ตาราง 4 พารามิเตอร์แกนขั้ว

พารามิเตอร์	แบบ Type 3	แบบ Taguchi
ความหนาโครงสเตเตอร์ (mm)	7	7.5
ความกว้างของขั้ว (mm)	25.1	24
ความสูงฐานส่วนปลายของขั้ว (mm)	3	2.8

ภาพ 11 แสดงผลการจำลองโปรแกรมการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ Maxwell 2D แสดงความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ปรับให้เหมาะสมด้วยอัลกอริทึม Taguchi จะเห็นว่าค่าสูงสุดของสเกลสีมอเตอร์ต้นแบบลดลงจาก 1.972 Wb/m เป็น 1.925 Wb/m



ภาพ 11 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Maxwell โดยอัลกอริทึม Taguchi

(ก) แผนภาพบล็อกลูกความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

(ข) การกระจายฟลักซ์แม่เหล็ก

ในการศึกษานี้ พบว่า กำลังด้านออกและแรงบิดได้รับการพัฒนาโดยการปรับปรุงปรากฏการณ์ความอืดตัวของแม่เหล็กเพื่อให้บรรลุเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งโครงสร้างของส่วนสเตเตอร์ได้รับการปรับปรุงที่ดีที่สุดด้วยการใช้อัลกอริทึม Taguchi ผลการจำลองอยู่ที่ 3,400 รอบต่อนาที ที่แรงบิดด้านออก คือ 73.44 N-m และกำลังขับคือ 7.69 kW ตาราง 5 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเพิ่มประสิทธิภาพประเภทต่างๆ

ตาราง 5 ผลเปรียบเทียบการจำลอง

รายการ	ต้นแบบ	แบบ 1	แบบ 2	แบบ 3	Taguchi
แรงดันที่ขั้วมอเตอร์ (V)	15.75	15.5	15.6	15.4	15.38
กระแสอาร์เมเจอร์ (A)	1,035	1,060	1,045	1,068	1,080
แรงบิด (Nm)	66.71	69.46	68.85	70.38	73.44
กำลัง (kW)	6.98	7.27	7.21	7.37	7.69

สรุปในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การค้นหาวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดความอืดตัวของแม่เหล็ก เพื่อปรับปรุงการกระจายฟลักซ์แม่เหล็กที่มีประสิทธิภาพและสม่ำเสมอ และเพิ่มกำลังขับโดยรวมของมอเตอร์ โดยการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของรูที่ส่วนด้านหน้าของแกนขั้ว โครงสร้างสเตเตอร์ได้รับการปรับให้เหมาะสมโดยอัลกอริทึม Taguchi สำหรับกำลังขับสูงสุด ที่ความเร็วพิกัด 3,400 รอบต่อนาที ทำให้สมรรถนะเพิ่มขึ้นที่แรงบิดเอาต์พุต 73.44 นิวตัน – เมตร กำลังขับอาจสูงถึง 7.69 กิโลวัตต์ ซึ่งมีค่ามากกว่ามอเตอร์ต้นแบบ คือ 66.71 นิวตันเมตร กำลังขับคือ 6.98 กิโลวัตต์

ในปี 2019 Mithunraj, Gayathri, Prasanth, Kanagalakshmi, และ Archana [11] ได้ศึกษาการออกแบบและการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยใช้ ANSYS Maxwell ด้วยเครื่องมือซอฟต์แวร์ RMxprt ของ ANSYS Maxwell โดยมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน (BLDC) มีข้อดีของความเร็วที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับลักษณะแรงบิด การตอบสนองแบบไดนามิกสูง ประสิทธิภาพสูง อายุการใช้งานยาวนาน การทำงานที่ไร้เสียงรบกวน ช่วงความเร็วสูงกว่า เหนือกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านและมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในกระบวนการออกแบบมอเตอร์ โดยทั่วไปจะมี 2 ชุดตัวแปร คือ ชุดตัวแปรอิสระหรืออินพุต และตัวแปรตามหรือเอาต์พุต ตัวแปรอิสระมักจะเป็นมิติการหมุนของขดลวดและคุณสมบัติของวัสดุ ในส่วนตัวแปรตาม คือ ตัวเลขสมรรถนะ เช่น แรงบิด ประสิทธิภาพ เป็นต้น ตัวแปรตามได้รับคงค่าไว้ ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์แบบ BLDC ต้นแบบ ขนาดกำลัง 550 วัตต์ แรงดัน 220

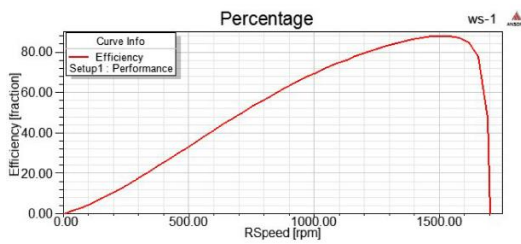
โวลต์ ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที แรงบิด 3.5 นิว-ตัน โรเตอร์ชนิดภายใน จำนวน 3 เฟส และ พารามิเตอร์ที่ออกแบบจะแสดงในตาราง 6

ตาราง 6 พารามิเตอร์ของมอเตอร์

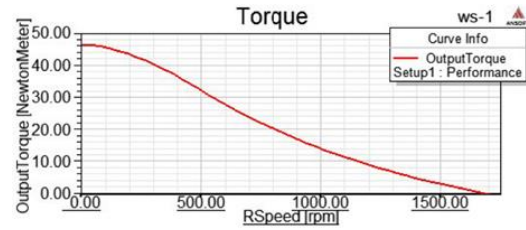
พารามิเตอร์	ค่า
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกสเตเตอร์	130 มม.
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในสเตเตอร์	75 มม.
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในโรเตอร์	25 มม.
ความยาวโรเตอร์	60 มม.
ความยาวสเตเตอร์	60 มม.
ความยาวช่องว่างอากาศ	0.6 มม.
ชนิดเหล็ก	M19-24G
ชนิดแม่เหล็ก	XG196/96

ผลของการออกแบบเชิงวิเคราะห์จะถูกนำไปใช้ใน Maxwell 2D เพื่อการวิเคราะห์การจำลอง แสดงในภาพที่ 12 ได้แก่ 1) กราฟประสิทธิภาพเทียบกับความเร็วรอบ 2) กราฟแรงบิดเทียบกับความเร็วรอบ 3) กราฟวิเคราะห์ช่วงขณะของกระแสขดลวด 4) แรงบิดการเคลื่อนที่ ผลการจำลองที่บรรลุคุณสมบัติการทำงาน มอเตอร์ที่ออกแบบมามีประสิทธิภาพ 87% และสามารถตอบสนองค่าแรงบิดที่ออกแบบไว้

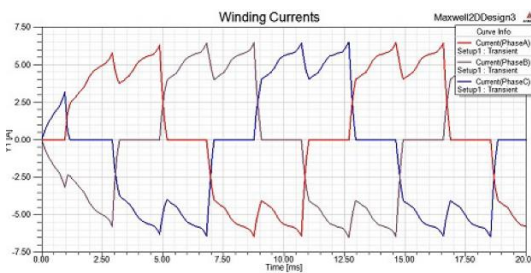
การวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์ ดำเนินการเพื่อกำหนดสถานะของความอิ่มตัวของวัสดุ วัสดุสเตเตอร์จะมีขีดจำกัดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ดังนั้นความหนาแน่นของฟลักซ์ในสเตเตอร์จึงไม่ควรเกินขีดจำกัดนี้ ภาพ 13 แสดงการกระจายฟลักซ์แม่เหล็กในมอเตอร์ ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กในสเตเตอร์และโรเตอร์ควรมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดที่วัสดุสามารถทนต่อได้ คือ 1.39 เทสลา มิฉะนั้นความอิ่มตัวของแม่เหล็กจะเกิดขึ้น จากภาพจะเห็นได้ชัดว่าความหนาแน่นของฟลักซ์น้อยกว่า 1.39 เทสลา



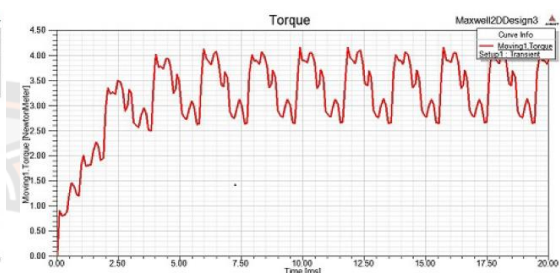
(ก)



(ข)



(ค)

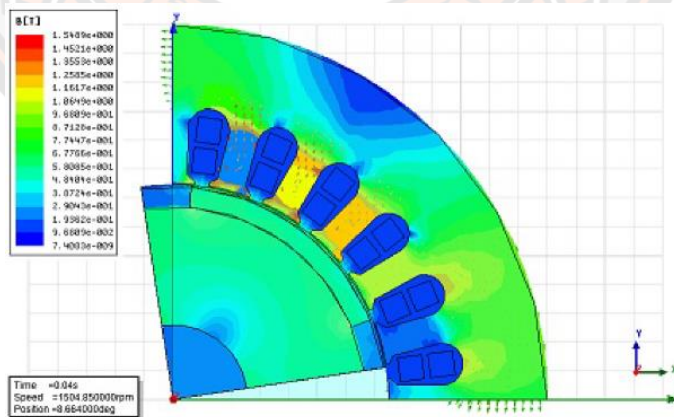


(ง)

ภาพ 12 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Maxwell

(ก) กราฟประสิทธิภาพเทียบกับความเร็วรอบ (ข) กราฟแรงบิดเทียบกับความเร็วรอบ

(ค) กราฟวิเคราะห์ชั่วขณะของกระแสขดลวด (ง) แรงบิดการเคลื่อนที่



ภาพ 13 การกระจายของฟลักซ์แม่เหล็ก

สรุปผลการจำลองของมอเตอร์แบบ BLDC ซึ่งการออกแบบโดยใช้ ANSYS maxwell ดำเนินการวิเคราะห์ห้วงประกอบชั่วคราวและไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ออกแบบ การวิเคราะห์ห้วงประกอบไฟไนต์แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของฟลักซ์ในวัสดุสเตเตอร์ อยู่ภายในขีดจำกัด การวิเคราะห์ชั่วคราวคือการตรวจสอบพฤติกรรมของมอเตอร์ภายใต้สภาวะชั่วคราว ยังให้ผลที่ยอมรับได้

ในปี 2014 Mukherjee และ Sengupta [12] ได้ศึกษาการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงแบบไร้แปรงแม่เหล็กถาวร (PMBLDC) สำหรับมอเตอร์ 4 ขั้ว 0.75 แรงม้า 1,500 รอบต่อ นาที ขั้นแรกให้ทำการออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องด้วยการคำนวณด้วยมือ จากนั้นผลลัพธ์จะได้รับการปรับแต่งและตรวจสอบโดยใช้ซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) และมีการคำนวณพารามิเตอร์ของเครื่อง มอเตอร์แบบ BLDC ที่ได้รับการออกแบบยังได้รับการประดิษฐ์ขึ้น ผลจากการพัฒนามอเตอร์ทำให้เกิดความสะดวกในการประดิษฐ์และลดต้นทุนการออกแบบปั๊มสเตเตอร์ ซึ่งนำมาใช้สำหรับการผลิตสเตเตอร์ โดยที่มอเตอร์ที่ออกแบบยังได้รับการประดิษฐ์ขึ้นอย่างสมบูรณ์โดยบริษัทผลิตมอเตอร์

ในปี 2018 Tikhonova และ Plastun [13] ได้ศึกษาการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดย "ANSYS Maxwell" โดยแสดงวิธีการคำนวณเพื่อหาค่าการเหนี่ยวนำในช่องว่างของอากาศ การไหลของฟลักซ์แม่เหล็ก หลักวิธีการคำนวณและสร้างลักษณะทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยโรเตอร์กรงกระรอก นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอกราฟของลักษณะต่างๆและถูกเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์จริงเพื่อดูความแม่นยำของการคำนวณ โปรแกรม "ANSYS Maxwell" ซึ่งผลของการคำนวณสนามแม่เหล็กเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลมอเตอร์กับการคำนวณ ANSYS Maxwell แสดงในตาราง 7

ผลการศึกษาพบว่า "ANSYS Maxwell" สามารถคำนวณกระแส แรงบิด การสูญเสีย และพารามิเตอร์อื่น ๆ ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐาน แต่ในการคำนวณด้วยโปรแกรมมีคลาดเคลื่อน ดังนี้

- ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนแรงบิดสูงสุดคือ 15%
- ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนแรงบิดเริ่มต้นคือ 8%
- ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนกระแสขณะสตาร์ทเริ่มต้นคือ 13%

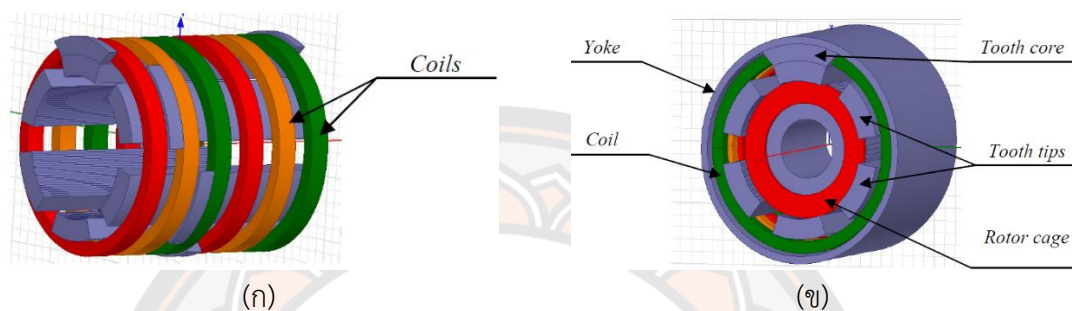
เนื่องจากกระแสที่เพิ่มขึ้นในแถบโรเตอร์: 444 A แทนที่จะเป็น 417 A ที่ระบุไว้จากเนมเพลท ซึ่งความหนาแน่นกระแสในขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ใน "ANSYS Maxwell" นั้นสูงกว่าในเทคนิคพื้นฐาน ผลจากการคำนวณเกิดข้อผิดพลาดที่ได้นั้นยอมรับได้

ตาราง 7 ผลของการคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

พารามิเตอร์	ข้อมูลมอเตอร์	ข้อมูล ANSYS Maxwell
กระแสเดเตอร์	29.3 A	28 A
ฟลักซ์แม่เหล็ก	9.7×10^{-3} Wb	9.8×10^{-3} Wb
ความหนาแน่นกระแสเดเตอร์	5.53×10^6 A/mm ²	6×10^6 A/mm ²
ความหนาแน่นกระแสโรเตอร์	2.5×10^6 A/mm ²	3.3×10^6 A/mm ²
กระแสโรเตอร์	417 A	444 A
อัตราส่วนแรงบิดสูงสุด	2.59	3
อัตราส่วนแรงบิดเริ่มหมุน	1.43	1.54
อัตราส่วนกระแสเริ่มหมุน	6.2	7
แรงบิด	95.5 Nm	100 Nm
การสูญเสียแกนเหล็ก	276 W	291 W
การสูญเสียทางไฟฟ้า	861 W	811 W
ตัวประกอบกำลัง	0.89	0.89

ในปี 2017 Tikhonova, Malygin และ Plastun [14] ได้ศึกษาการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีขดลวดวงแหวน (Induction Motor with Ring Windings : IMRW) ด้วย “ANSYS Maxwell” โดยที่มอเตอร์แบบ IMRW เป็นดีไซน์ใหม่ล่าสุดที่คิดค้นโดยแผนกเครื่องจักรกลไฟฟ้าของ มหาวิทยาลัย Ural Federal ที่ถูกออกแบบสำหรับงาน เช่น ขยะกากกัมมันตภาพรังสี พลูโทเนียมหรือยูเรเนียม ซึ่งต้องทำงานในสภาพแวดล้อมนี้มีกัมมันตภาพรังสีและอุณหภูมิสูงในระดับสูง โดยตามปกติมอเตอร์มาตรฐานฉนวนทั่วไปสามารถทำงานได้ประมาณ 2-3 เดือน หลังจากนั้นจะต้องเปลี่ยนมอเตอร์ แต่ถ้าใช้มอเตอร์แบบ IMRW ที่มีฉนวนเป็นเซรามิกแบบใหม่ทำให้สามารถยืดอายุของมอเตอร์ได้ถึง 2-3 ปี มอเตอร์แบบ IMRW เนื่องจากเป็นมอเตอร์แบบใหม่จึงยังไม่มีพารามิเตอร์ต้นแบบจึงใช้วิธีการคำนวณกำหนดพารามิเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าตามรูปทรงเรขาคณิตของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบพื้นฐานที่มีโรเตอร์กรงกระรอก และงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลองของมอเตอร์แบบ IMRW ให้มีแรงบิดใกล้เคียงกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบพื้นฐาน โดยทำการเลือกพารามิเตอร์ เช่น จำนวนรอบของขดลวด สเตเตอร์และแรงดันไฟฟ้าเฟสให้มี ความเหมาะสม

การสร้างมอเตอร์แบบ IMRW ถูกออกแบบให้ทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีระดับรังสีสูงและอุณหภูมิสูงกว่า 200 °C แกนของสเตเตอร์มีคุณสมบัติที่โดดเด่นในลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีขดลวดวงแหวน ประกอบด้วย ส่วนปลายของฟัน แกนฟันที่ติดอยู่กับฟัน และโครงปิดเส้นทางการไหล โมเดลการสร้างแกนแม่เหล็กยึดตามขนาดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์กรงกระรอก จากรุ่น AO2 ที่กำลัง 2.2 กิโลวัตต์ โครงสร้างของมอเตอร์แบบ IMRW แสดงในภาพ 14

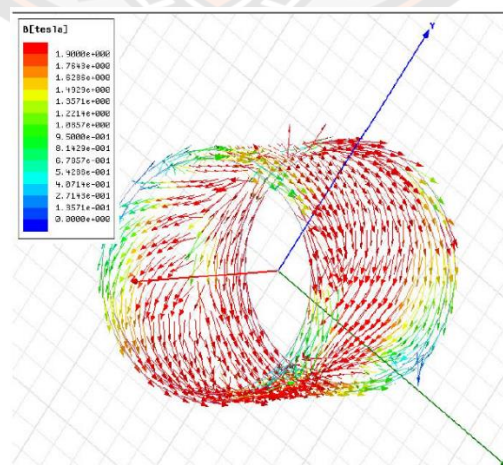


ภาพ 14 โครงสร้างของมอเตอร์แบบ IMRW

(ก) ขดลวดสเตเตอร์แบบวงแหวน

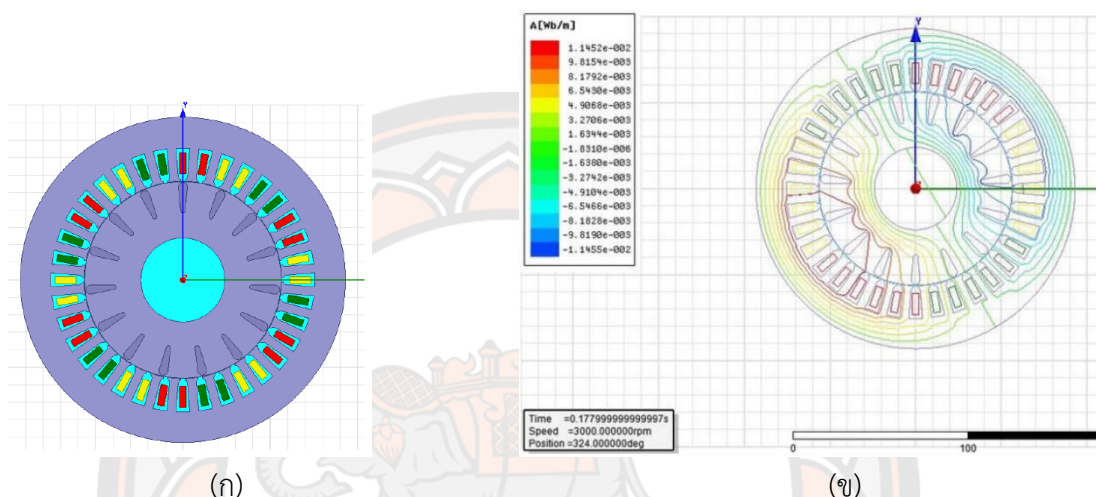
(ข) ระบบแม่เหล็ก

ผลการจำลองทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์แบบ IMRW แสดงในภาพ 15 จะเห็นได้ว่าปลายฟัน แกนฟันสองซี่ และโครงสเตเตอร์เกิดวงปิด กระแสสลับในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่เป็นรูปคลื่นพัลส์ ซึ่งเกิดจากแกนที่จัดเรียงเป็นเกลียวจากปลายฟันไปยังปลายฟัน และสร้างสนามแม่เหล็กหมุนได้ มอเตอร์ทำงานตามการเปลี่ยนแปลงสองระดับของสนามแม่เหล็กจากพัลส์เป็นจังหวะเป็นสกรู



ภาพ 15 ทิศทางของเส้นแวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กในโครงสเตเตอร์

การคำนวณทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำอนุกรมแบบพื้นฐาน เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำอนุกรมที่มีโรเตอร์กรงกระรอกถูกใช้เป็นตัวแบบของมอเตอร์แบบ IMRW จึงใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเพื่อประเมินการคำนวณมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบพื้นฐานกับกรงกระรอกที่มีจำนวนขั้วคู่ $p = 1$ ซึ่งถูกจัดขึ้นในโหมด 2 มิติใน "ANSYS Maxwell" ผลการจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำอนุกรมแบบพื้นฐานแสดงในภาพ 16



(ก)

(ข)

ภาพ 16 การจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำอนุกรมแบบพื้นฐาน

(ก) แบบจำลองแบบ 1 ขั้ว

(ข) ฟลักซ์สนามแม่เหล็กแบบ 1 ขั้ว

จากนั้นจึงทำการประมวลผลค่าแรงบิดและกระแสขณะสตาร์ทเพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำอนุกรมแบบพื้นฐานกับแบบจำลองของมอเตอร์แบบ IMRW โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์และแรงดันไฟฟ้าเฟส ตามตาราง 8 โดยผลที่ได้จากการเปรียบเทียบที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ของแรงบิดและกระแสขณะสตาร์ทที่คล้ายคลึงกันที่ค่าพารามิเตอร์จำนวนรอบในขดลวดของสเตเตอร์ $W1 = 31$ รอบ ที่แรงดัน 220 โวลต์

ตาราง 8 ผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์การออกแบบของมอเตอร์เหนี่ยวนำกรงกระรอกต้นแบบ และ IMRW สำหรับ $P = 1$

รายการ	มอเตอร์ต้นแบบ		IMRW	
แรงดันเฟส (V)	220	380	220	220
จำนวนรอบขดลวด W_1 (รอบ)	44	44	25	31
อัตราส่วนแรงบิดเริ่มต้น M_S^*	1.1	1.2	1.2	1.13
อัตราส่วนแรงบิดสูงสุด M_{MAX}^*	1.9	2.1	1.9	1.9
อัตราส่วนกระแสเริ่มหมุน I_S^*	6	6	10	7

ในปี 2010 Ho, Chen และ Fu [15] ได้ศึกษาการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แก้ปัญหาของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร โดยพิจารณาจากการค้นหาวิธีแก้ปัญหาพื้นฐานของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรแบ่งเป็นชั้นๆ แล้วนำมารวมกันเป็นวิธีแก้ปัญหาสำหรับมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรตามความเหมาะสม จากนั้นจึงนำไปใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายในพื้นที่ผิวโค้งตามแกนโรเตอร์ของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร เพื่อลดแรงบิดฟันเฟือง (Cogging Torque) ซึ่งเวลาในการคำนวณของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เสนอสำหรับการแก้ปัญหานี้ลดลงอย่างมากเหลือเพียง 0.06% ของเวลาที่กำหนดโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ทั่วไป โดยมีการใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ในการเพิ่มประสิทธิภาพและหลังจากปรับตำแหน่งของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรให้เหมาะสมแล้ว แรงบิดสูงสุดของฟันเฟืองจะลดลงเหลือประมาณ 24.7% ของมอเตอร์ที่มีการกระจายของแม่เหล็กถาวรอย่างสม่ำเสมอ การทดลองเชิงตัวเลขยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อแม่เหล็กถาวรอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ฟลักซ์แม่เหล็กเฉลี่ยเกือบจะเหมือนกับในมอเตอร์ที่มีแม่เหล็กถาวรอยู่ในตำแหน่งทั่วไป

ในปี 2010 Chen, Ho และ Fu [16] ได้ศึกษาการใช้อัลกอริทึมที่ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาวิธีแก้ปัญหาพื้นฐานของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร จากนั้นจึงสร้างวิธีการแก้ปัญหาสำหรับรูปร่างแม่เหล็กถาวรเพื่อนำไปใช้เพื่อปรับรูปร่างของแม่เหล็กถาวรในมอเตอร์แม่เหล็กถาวร ที่ติดตั้งบนพื้นผิวโค้งตามแกนโรเตอร์เพื่อลดแรงบิดฟันเฟือง (Cogging Torque) ซึ่งเวลาคำนวณของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เสนอสำหรับการแก้ปัญหานี้ลดลงอย่างมากเหลือเพียง 0.017% ของเวลาที่กำหนดโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ทั่วไป โดยนำอัลกอริทึมทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm) มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพ หลังจากปรับรูปร่าง แม่เหล็กถาวรในมอเตอร์แล้ว แรงบิดฟันเฟืองสูงสุดจะลดลงเหลือประมาณ 40.7% ของแรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์ที่มีรูปร่างทั่วไปของแม่เหล็กถาวร

ในปี 2012 Cao, Mi และ Cheng [17] ได้ศึกษาการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ตรวจสอบเปรียบเทียบมอเตอร์แม่เหล็กถาวรสลัฟลักซ์ (FSPM) กับมอเตอร์แม่เหล็กถาวรภายใน (IPM) ที่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าไฮบริด Prius ปี 2547 (HEV) โดยทำการออกแบบปรับ FSPM ให้เหมาะสม เมื่อใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์กับมอเตอร์ทั้งสองจะถูกเปรียบเทียบโดยพิจารณาจากขนาดโดยรวม กระแสเฟส และความหนาแน่นกระแสเดียวกัน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า FSPM มีข้อดีบางประการ เช่น back-EMF แบบไซน์มากกว่า แรงบิดกระเพื่อมที่น้อยกว่า และความสมบูรณ์ทางกลที่ดีซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานที่ความเร็วสูง อย่างไรก็ตาม FSPM ยังมีข้อเสียเปรียบหลักของอัตราส่วนการใช้วัสดุแม่เหล็กถาวรที่ต่ำกว่า ซึ่งจะทำให้ต้นทุนของมอเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างมาก

ในปี 2014 Zhao, Ji, Liu, Du และ Cheng [18] ได้ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์มอเตอร์แม่เหล็กถาวรพลิกกลับเชิงเส้นฟลักซ์โมดูล (M-LFRPM) แบบใหม่ ซึ่งนำโครงสร้างและคุณสมบัติของมอเตอร์และดำเนินการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด โดยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ และการเปรียบเทียบมอเตอร์ M-LFRPM ที่เสนอและมอเตอร์ C-LFRPM ที่มีอยู่ จากผลการทดลองเมื่อเทียบกับมอเตอร์ C-LFRPM มอเตอร์ M-LFRPM ที่เสนอต้องการวัสดุ PM เพียง 50% ซึ่งให้แรงขับเฉลี่ยที่สูงขึ้นต่อปริมาตรของวัสดุ PM ในขณะเดียวกัน อัตราส่วนของการเหนี่ยวนำร่วมกันต่อการเหนี่ยวนำตนเองของมอเตอร์ M-LFRPM ที่เสนอนั้นลดลงเกือบ 90% ของมอเตอร์ C-LFRPM ที่ให้เฟสอิสระที่ดีกว่า ความหนาแน่นของแม่เหล็กของเครื่องที่นำเสนอได้รับการปรับให้เหมาะสม ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์ M-LFRPM ที่เสนอไม่เพียงรักษาข้อดีของมอเตอร์ C-LFRPM ไว้เท่านั้น แต่ยังปรับปรุงความสามารถในการทนต่อข้อผิดพลาดและลดต้นทุนอีกด้วย

ในปี 2014 Zhao, Lipo และ Kwon [19] ได้ศึกษาการออกแบบมอเตอร์สำหรับงานอุตสาหกรรมแบบใหม่สองตัวที่มีแม่เหล็กเฟอร์ไรต์สำหรับรถยนต์ไฟฟ้าไฮบริด (HEV) ซึ่งมีความหนาแน่นและประสิทธิภาพของแรงบิดที่ใช้ใน Toyota Prius รุ่นที่สาม ซึ่งเป็นรถเชิงพาณิชย์ ซึ่งมอเตอร์อุตสาหกรรมที่เสนอทั้งสองตัว ได้แก่ ตัวที่ 1 มอเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบเรเดียลฟลักซ์แบบสเตเตอร์คู่ (DSRFPM) และมอเตอร์ตัวที่ 2 มอเตอร์แม่เหล็กถาวรฟลักซ์ตามแนวแกนแบบสเตเตอร์คู่ (DSAFPMM) ใช้แนวคิดการออกแบบเดียวกัน ซึ่งรวมถึงการจัดวางสเตเตอร์สองตัวแบบไม่เรียงแนวร่วมกับการใช้ก้าน-ประเภทแม่เหล็กอาร์เรย์และขดลวดเข้มข้นแบบกลุ่มเฟสเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของแรงบิดและลดการกระเพื่อมของแรงบิด วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้สำหรับทำนายลักษณะสำคัญ เช่น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเคลื่อนกลับ แรงบิดพื้นเพื่อง แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า การสูญเสียเหล็ก และประสิทธิภาพ เป็นต้น ซึ่งผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง DSRFPM ที่เสนอและ DSAFPMM พบว่า มีประสิทธิภาพที่ดีเกี่ยวกับความหนาแน่นของแรงบิด กำลังสูง และประสิทธิภาพที่ นอกจากนี้ยังพบว่ามอเตอร์ทั้งสองที่เสนอมีความทนทานที่ดีต่อการขจัดสถานะแม่เหล็กที่กลับไม่ได้ของแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ ด้วยเหตุนี้ คาดว่ามอเตอร์แม่เหล็กเฟอร์ไรต์ที่เสนอจะเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการใช้แรงอุตสาหกรรม

ในปี 2015 Zhao, Lipo และ Kwon [20] ได้ศึกษาการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของ โครงสร้างโรเตอร์สมมาตรแบบใหม่สำหรับมอเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบฝังที่พื้นผิว เพื่อให้ได้แรงบิด และการปรับปรุงประสิทธิภาพ แตกต่างจากแนวทางทั่วไป การออกแบบที่เสนอของโครงสร้างโรเตอร์ แบบสมมาตรนั้นใช้เพื่อปรับปรุงการผลิตแรงบิดโดยการสร้างความไม่สมมาตรของโรเตอร์เพื่อให้ แรงบิดแบบความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance Torque) และแรงบิดแม่เหล็กถึงค่าสูงสุดที่มุมเฟส ปัจจุบันเดียวกัน การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดโดยการคำนวณซ้ำจะต้องดำเนินการโดยใช้วิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์ก่อน ตามเกณฑ์ที่ได้รับ การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดโดยอัลกอริทึม เช่น วิธี Kriging และ อัลกอริทึมทางพันธุกรรม ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงแรงบิดและประสิทธิภาพต่อไป ด้วยเหตุนี้ ประสิทธิภาพของมอเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบฝังพื้นผิวที่เสนอ โดยการปรับให้เหมาะสม สองขั้นตอนจึง ได้รับการปรับปรุงอย่างมากเมื่อเทียบกับมอเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบฝังพื้นผิวทั่วไป จากผลลัพธ์ที่ได้ แสดง มอเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่เสนอแสดงสมรรถนะที่ดีด้วยแรงบิดและประสิทธิภาพที่ดีขึ้น รวมทั้ง แรงบิดกระเพื่อมที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ทั่วไป นอกจากนี้ มอเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่เสนอ สามารถประหยัดปริมาณแม่เหล็กได้อย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์แม่เหล็กถาวรติดตั้งบน พื้นผิวทั่วไปสำหรับการผลิตแรงบิดเอาต์พุตที่เท่ากัน โดยสมมติให้ใช้สภาพการทำงานเดียวกัน

ในปี 2016 Lu และ Fu [21] ได้ศึกษาแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการออกแบบ มอเตอร์แม่เหล็กถาวรอย่างเหมาะสมของมอเตอร์ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรกระตุ้นแยก กลยุทธ์ที่ เสนอใช้วิธีการแบบจำลองการตอบสนององผิว (RSM) เพื่อสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ขึ้นใหม่แบบ ไดนามิกตามผลลัพธ์ของการจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วสร้างฟังก์ชันข้อผิดพลาดระหว่าง แบบจำลองที่เหมาะสมกับการจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดขั้นสุดท้ายจะถูกรวมเข้ากับ ผลลัพธ์จากสองส่วนก่อนหน้านี้นี้ ฟังก์ชันการวิเคราะห์ที่ใช้เพื่อทดสอบว่าวิธีการที่เสนอนั้นเป็นไปได้และ สามารถลดเวลาในการคำนวณได้ ตัวอย่างเชิงตัวเลขของการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของมอเตอร์ แบบแม่เหล็กถาวร แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นตามอัลกอริทึมที่เสนอสามารถลด เวลาของการจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้อย่างมากและเร่งกระบวนการปรับให้เหมาะสมในขณะที่ รับรองความถูกต้องของแบบจำลองการตอบสนององผิวคู่ (dual-RSM)

ในปี 2003 Wang, Hahh และ Jung [22] ได้ศึกษาการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและการปรับ ให้เหมาะสมของมอเตอร์สตาร์ทแม่เหล็กถาวรด้วยขั้วเสริม(PMSMAP) โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากมอเตอร์สตาร์ทแบบแม่เหล็กถาวรที่มีขั้วเสริมมีโครงสร้างพิเศษทำให้การกระจายของ สนามแม่เหล็กจึงซับซ้อนและได้รับผลกระทบจากตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ มากกว่าในมอเตอร์สตาร์ทแม่เหล็กถาวรทั่วไป มีการเสนอวิธีการสองมิติไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยคำนึงถึง ผลกระทบของตำแหน่งสัมพัทธ์และการสับเปลี่ยน เพื่อปรับปรุงความแม่นยำของการวิเคราะห์ ประสิทธิภาพ การปรับขั้วแม่เหล็กให้เหมาะสมที่สุดดำเนินการโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เสนอ เพื่อลด

ต้นทุนของขั้วแม่เหล็กให้เหลือน้อยที่สุด วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และอัลกอริทึม TABU จะถูกนำไปใช้กับการปรับให้เหมาะสมของ PMSMAP ค่าใช้จ่ายของขั้วแม่เหล็กถูกนำมาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และส่วนโค้งของขั้วหลักและขั้วเสริมจะถูกนำมาเป็นตัวแปรการออกแบบ ค่าใช้จ่ายของขั้วแม่เหล็กลดลงอย่างมากผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพ ขณะที่ประสิทธิภาพก็ดีขึ้น

ในปี 2011 Zheng, Sui, Tong, Lipo และ Wang [23] ได้ศึกษาการตรวจสอบมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรแบบหลายเฟสที่ทนต่อข้อบกพร่อง (PMSM) ด้วยการใช่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยปรับปรุงช่องหรือขั้วที่ใช้งานได้สำหรับ PMSM แบบ 5 เฟส และเลือกแบบ 40 ช่อง/42 ขั้ว โครงสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าได้รับการออกแบบ และพื้นที่ทนต่อข้อผิดพลาดได้รับการปรับปรุงเพื่อให้ได้เส้นโค้งแรงบิดที่ดีขึ้น ความสามารถในการทนต่อข้อผิดพลาดได้รับการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะความผิดปกติบางอย่าง รวมถึงเฟสเดียวแบบเปิด สองเฟสที่อยู่ติดกันแบบเปิด สองเฟสที่ไม่อยู่ติดกันแบบเปิด และหนึ่งเฟสลัดวงจรหนึ่งเฟส ผลลัพธ์ระบุว่าระบบขับเคลื่อนสามารถอยู่รอดได้ในสภาวะผิดปกติเหล่านี้ ผ่านกลยุทธ์การควบคุมปัจจุบันที่เหมาะสม สามารถรับประสิทธิภาพการทนต่อข้อผิดพลาดที่แตกต่างกันได้ โครงการที่เสนอนี้ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความมีประสิทธิภาพด้านแม่เหล็กไฟฟ้าและทนต่อข้อผิดพลาดได้อย่างน่าพอใจ

ในปี 2012 Rezal และ Ishak [24] ได้ศึกษาการวิเคราะห์การหมุนของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร(PMSM) แบบ 18 ช่อง/16 ขั้ว โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ PMSM ใช้กับรถยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก (LEV) ซึ่งมีมวลสุทธิประมาณ 200 กก. ที่ความเร็วสูงสุด 30 กม./ชม. มอเตอร์อยู่ในล้อของ LEV มอเตอร์สร้างขึ้นโดยใช้ส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ เหล็กเคลือบลามิเนต ขดลวด และแม่เหล็กถาวรนีโอไดเมียม-เหล็ก-โบรอน แม่เหล็กถาวรติดอยู่กับพื้นผิวของโรเตอร์ มอเตอร์หมุนได้ 360 รอบต่อเฟสและกระแสไหลเข้าสู่ขดลวด สูงสุด 10 A โดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถใช้ตรวจสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์ก่อนที่จะถูกประดิษฐ์ขึ้น และใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์เพื่อจำลอง PMSM ผลการวิจัยพบว่า มอเตอร์สามารถสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับได้ประมาณ 550 V, แรงบิดพื้นเพ็องน้อยกว่า 0.5 Nm, กำลังสูงสุด 5.5 kW และแรงบิดเฉื่อย 81 Nm โดยที่ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับสามารถปรับได้โดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของมอเตอร์ เช่น รอบคอยล์ต่อเฟส รัศมีของโรเตอร์ ความยาวแกน หรือความหนาของแม่เหล็ก

ในปี 2014 Kim [25] ได้ศึกษาวิธีการคำนวณแบบใหม่เกี่ยวกับข้อมูลกระแสของอินเวอร์เตอร์แบบเวกเตอร์สำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายในสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการใช้งานรถยนต์ ข้อมูลกระแสควรได้รับการคำนวณอย่างมีประสิทธิภาพภายในระยะเวลาการขับขึ้น ในขณะที่มีค่าขีดจำกัดของแรงดันแบตเตอรี่ นอกจากนี้ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลกระแสและแรงดันมีลักษณะไม่เชิงเส้น เนื่องจากความหนาแน่นกำลังสูงขณะมอเตอร์หยุด ซึ่งการใช่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณวิธีแก้ปัญหานั้นแน่นอนโดยพิจารณาจากคุณสมบัติไม่เชิงเส้น

วิธีการที่เสนอสำหรับกระแสอ้างอิงใช้เฉพาะเส้นโค้งมุมโพลดหลายเส้นของมอเตอร์ฉุดลาก โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามค่ากระแสที่ระบุ ด้วยการใช้เส้นโค้งมุมโพลด รวมถึงวิเคราะห์ผลของความอึดตัวของแม่เหล็กในแกนกลางได้ ขนาดกระแสและมุมกระแสได้รับการวิเคราะห์และคำนวณอย่างมีประสิทธิภาพ โดยแยกขอบเขตการขับออกเป็นขอบเขตแรงบิดคงที่และขอบเขตกำลังคงที่ โดยใช้ข้อมูลกระแสนี้ IPMSM สำหรับรถยนต์ไฟฟ้าสามารถควบคุมได้ด้วยแรงบิดที่เหมาะสมซึ่งเป็นไปตามข้อจำกัดของแรงดันแบตเตอรี่โดยพิจารณาจากความอึดตัวของแม่เหล็กในมอเตอร์

ในปี 2015 Fu, Chen และ Guo [26] ได้ศึกษาการนำเสนอมอเตอร์ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรกระตุ้นแยกแบบสองชั้นและสามชั้นแบบใหม่ โดยมอเตอร์ซิงโครนัสแบบกระตุ้นแยกแบบแม่เหล็กถาวรสองชั้นแบบใหม่ (DPME) จะมีชุดขั้วเหล็กพิเศษที่ใช้ใน สเตเตอร์ด้านในระหว่างโรเตอร์แม่เหล็กถาวรกับเพลา โดยทำการเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมของการความต้านทานแม่เหล็กตามทิศทางเส้นรอบวงของช่องว่างอากาศ และความแรงของการปรับฟลักซ์ในสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดอาร์เมเจอร์ และแม่เหล็กถาวรจะดีขึ้น มอเตอร์ที่เสนอได้รวมมอเตอร์มอดูเลตแบบปรับฟลักซ์สองคู่เข้าด้วยกันอย่างแนบเนียนภายในโครงสร้างเดียว ด้วยชุดขดลวดอาร์เมเจอร์ที่ใช้ร่วมกันชุดเดียว ข้อดีของมอเตอร์ DPME ที่เสนอ คือ ให้แรงบิดที่สูงกว่ามอเตอร์แบบเดิมมาก ทำให้สามารถแข่งขันกับการใช้งานแรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำได้ นอกจากนี้ยังนำเสนอ มอเตอร์ซิงโครนัสแบบกระตุ้นแยกแบบแม่เหล็กถาวรสองชั้นแบบใหม่ (TPME) ซึ่งหลักการการทำงานที่คล้ายคลึงกันของ DPME และมีชั้นแม่เหล็กถาวรสามชั้นภายในโครงสร้าง โดยในการออกแบบและวิเคราะห์ด้วยการใช้วิธีการแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของสนามแม่เหล็กพร้อมการคำนวณแบบเคลื่อนที่เชิงกลไกเพื่อประเมินแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างแม่นยำ แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์ DPME ที่เสนอสามารถให้แรงบิดเพิ่มขึ้น 37.5% เมื่อเทียบกับมอเตอร์ซิงโครนัสทั่วไป และมอเตอร์ TPME ที่เสนอสามารถส่งออก แรงบิดเพิ่มขึ้น 70% พร้อมประสิทธิภาพกำลังที่ใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ซิงโครนัส PM แบบทั่วไป

ในปี 2017 Nakata, Sanada, Morimoto และ Inoue [27] ได้ศึกษาการออกแบบอัตโนมัติของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน (IPMSM) โดยใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรมร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบตาข่ายหยาบเพื่อขยายพื้นที่ปฏิบัติการที่มีประสิทธิภาพสูงผลลัพธ์ที่ได้ คือ การลดเวลาที่ต้องใช้ในกระบวนการออกแบบลงอย่างมาก แนวทางนี้ตั้งใจไว้ว่าจะเป็นประโยชน์และนำไปปฏิบัติได้จริง GA ถูกรวมเข้ากับ FEM แบบตาข่ายหยาบเพื่อออกแบบรุ่น GA-1 โดยใช้ข้อกำหนดมาตรฐานที่กำหนด ประโยชน์ของวิธีการนี้ได้รับการยืนยัน โดยใช้ตารางจุดเพื่อขยายพื้นที่การทำงานที่มีประสิทธิภาพสูง โดยการออกแบบรุ่น GA-2 และเปรียบเทียบกับรุ่น GA-2 กับรุ่นมาตรฐาน ได้รับการยืนยันแล้วว่ารุ่น GA-3 สามารถออกแบบโดยใช้จุดอ้างอิงได้ รุ่น GA-3 มีพื้นที่การทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงครอบคลุมพื้นที่ของรุ่นมาตรฐาน ประโยชน์ของข้อกำหนดที่เสนอและประโยชน์ของกระบวนการออกแบบที่รวม GA กับ FEM แบบตาข่ายหยาบได้รับการยืนยันแล้ว

ในปี 2017 Huang, Zhu, Chen, Zhang และ Fang [28] ได้ศึกษาแบบจำลองตาข่ายรีลัคแตนซ์แบบไดนามิก (DRM) ร่วมกับแบบจำลองการคาดการณ์ปรับปรุงการสูญเสียแกนเหล็กของมอเตอร์จุดแม่เหล็กถาวร เพื่อให้เป็นวิธีที่รวดเร็วและแม่นยำในการประเมินการสูญเสียแกนเหล็กสำหรับมอเตอร์แม่เหล็กถาวร (PM) ที่มีแหล่งจ่ายไฟแบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) โดยที่ DRM สำหรับมอเตอร์จุดแม่เหล็กถาวร ของรถไฟความเร็วสูงได้ถูกสร้างขึ้นครั้งแรก จากนั้นจะได้รับการกระจายสนามแม่เหล็กสำหรับหนึ่งรอบโดยใช้วิธี DRM ใช้แบบจำลองทางวิศวกรรมที่ปรับปรุงแล้วของการทำนายการสูญเสียแกนเหล็ก ผลการทดลองสำหรับต้นแบบได้รับการพิสูจน์เพื่อแสดงให้เห็นว่าการใช้แบบจำลองที่เสนอสามารถบรรลุผลการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่แม่นยำพร้อมผลการสูญเสียแกนเหล็กที่ยอมรับได้ โมเดลที่เสนอนี้เป็นวิธีที่เร็วกว่าสำหรับการออกแบบเริ่มต้นและการปรับ PMSM ให้เหมาะสมกับแหล่งจ่ายไฟแบบปรับ มอดูเลตความกว้างพัลส์

ในปี 2018 Wu, Wang, Gan, Sun และ Kong [29] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (PMSM) โดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) แบบคู่ วงจรภาคสนามสำหรับงานรถยนต์ไฟฟ้า (EV) และรถยนต์ไฟฟ้าไฮบริด (HEV) โดยพิจารณาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพโดยใช้ใช้มุมฟลักซ์อ่อนตัว (FW) กระแสที่เปลี่ยนแปลงได้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ ด้วยการปรับมุม FW ให้เหมาะสมที่สุด สามารถรับคำสั่งกระแสที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตารางค้นหา (LUT) การควบคุมกระแส ระบบการจำลองแบบคู่วงจรสนามได้รับการพัฒนาโดยการประกบแบบจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 2 มิติของ PMSM ใน ANSYS Maxwell และแบบจำลองวงจรควบคุมใน ANSYS Simplorer ทำการทดลองกับ PMSM ที่ใช้ EV ขนาด 15 กิโลวัตต์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองและประสิทธิภาพของวิธีการที่เสนอ ประสิทธิภาพของระบบสามารถปรับปรุงได้ 5% โดยใช้โครงร่างที่เสนอเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทั่วไป ผลงานหลักของบทความนี้มีดังนี้ ขั้นแรก ใช้มุมที่ทำให้ฟลักซ์อ่อนตัวที่เปลี่ยนแปลงได้ผ่านการเลือกล่วงหน้าสำหรับการดำเนินการลดแรงของฟลักซ์ของ PMSM ประการที่สอง ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบก้าวข้ามเวลาควบคู่ไปกับวงจรภาคสนามเพื่อออกแบบ LUT กระแสสำหรับขับเคลื่อน PMSM ซึ่งสามารถบรรลุการวิเคราะห์ที่แม่นยำยิ่งขึ้น กลยุทธ์ SVPWM ถูกนำมาใช้ในวิธีนี้ ซึ่งทำให้อุปกรณ์กระแสมีความสอดคล้องกับการควบคุม PMSM ที่ใช้งานได้จริงมากกว่าวิธีการทั่วไปที่ตั้งค่าการกระตุ้นกระแสไซน์ที่สมบูรณ์แบบโดยตรง ประการที่สาม มีการเสนอวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมตาม LUT สำหรับขับเคลื่อน PMSM สำหรับการใช้งาน EV/HEV ซึ่งสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบได้อย่างมาก วิธีการออกแบบคู่วงจรภาคสนามที่เสนอจะช่วยปรับปรุงกระบวนการพัฒนา LUT การควบคุมกระแสสำหรับระบบ PMSM

ในปี 2019 Zhin, Sun, Ma, Han และ Luo [30] ได้ศึกษาการวิเคราะห์การเข้ากันทางโครงสร้างทางความร้อนและการปรับให้เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ของโรเตอร์ของมอเตอร์

ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่ถูกระงับด้วยแม่เหล็ก (MSPMSM) ในการทำงานด้วยความเร็วสูง MSPMSM จะรับความเค้นจากความร้อนและความเค้นทางกลที่เกิดจากปัญหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่เกิดจากการสูญเสียโรเตอร์ ซึ่งนำไปสู่ความไม่เสถียรและประสิทธิภาพ ผลการวิเคราะห์การเชื่อมต่อโครงสร้างทางความร้อนและการปรับให้เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ของโรเตอร์มอเตอร์ใน MSPMSM ได้รับการเสนอเพื่อวิเคราะห์และลดอิทธิพลของคุณสมบัติทางกลของโรเตอร์ที่เกิดจากปัญหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ตลอดจนรับรองความปลอดภัยด้านความแข็งแรง ข้อสรุปบางประการสามารถสรุปได้ดังนี้:

1) การวิเคราะห์อุณหภูมิของ MSPMSM แสดงว่าโรเตอร์ของมอเตอร์จะไปถึงอุณหภูมิสูงสุด 86.5– 98.2 °C ในสถานะคงตัวจากความร้อน นอกจากนี้ วิธีการใช้ผลอุณหภูมิที่คำนวณโดยโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ 2D กับ 3D อย่างเท่าเทียมกันนั้นสมเหตุสมผล

2) ผลการวิเคราะห์การเข้ากันทางระหว่างโครงสร้างความร้อนที่คำนวณผ่านแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่แม่นยำบ่งชี้ว่าสนามอุณหภูมิไม่ได้สร้างความเสียหายต่อความแข็งแรงของส่วนประกอบเสมอไป ด้านหนึ่งจะเพิ่มความเค้นของปลอกสวมและแม่เหล็กถาวร ในทางกลับกัน มันช่วยลดความเครียดของปลอกหุ้ม

3) ผลกระทบที่เกิดจากการแทรกแซงและการเว้นระยะเริ่มต้นต่อความแข็งแรงของส่วนประกอบจะได้รับการวิเคราะห์และผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการรบกวนที่เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของปลอกหุ้มและแม่เหล็กถาวรจะเพิ่มขึ้น และปลอกสวมจะลดลง

4) ผลการเพิ่มประสิทธิภาพตามจอแสดงผล iSIGHT และ ANSYS ที่ส่วนประกอบทั้งหมด บรรลุข้อกำหนดด้านการออกแบบของความแข็งแรงเชิงกล ปัจจัยด้านความปลอดภัยด้านความแข็งแรงของปลอกหุ้มเพิ่มขึ้น 71.6% และปัจจัยด้านความปลอดภัยด้านความแข็งแรงของแม่เหล็กถาวรเพิ่มขึ้นกว่าเท่าตัวเมื่อเทียบกับแม่เหล็กเริ่มต้น

ในปี 2020 Fitouri, Bensalem และ Abdelkrim [31] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างการสร้างแบบจำลอง 2 มิติและ 3 มิติของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรโดยใช้การจำลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (PMSM) โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยเน้นที่ความแตกต่างระหว่างรูปคลื่นของกระแสมอเตอร์และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าจากทั้งสองรุ่น โดยใช้ซอฟต์แวร์ Ansys Maxwell ผลการเปรียบเทียบรูปคลื่นของกระแส แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า และการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์ เป็นที่ชัดเจนว่าผลต่างระหว่างผลลัพธ์ของแบบจำลองสองมิติและสามมิตินั้นค่อนข้างเล็ก แต่ต้องพิจารณาด้วย ในกรณีเบื้องต้น การคำนวณแบบจำลองสองมิติให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจ จึงถือเป็นการจำลอง PMSM พลังงานต่ำโดยใช้ Maxwell 2D เนื่องจากแบบจำลองสามมิติมีความเหมาะสมสำหรับการคำนวณมากกว่า จึงไม่เพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ในช่วงเดียวกัน เนื่องจากขยายเวลาการคำนวณ

ในปี 2009 Adnan และ Ishak [32] ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และการวิเคราะห์มอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน (BLDC) ชนิด 3 เฟส สำหรับการใช้งานขับเคลื่อนด้วยความเร็วต่ำและแรงบิดสูง มอเตอร์นี้มีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นตัวขับเคลื่อนในรถจักรยานไฟฟ้า มอเตอร์ที่เสนอมีการกำหนดค่าโรเตอร์ภายนอกพร้อมแม่เหล็ก NdFeB ที่ติดตั้งบนพื้นผิว การทรอบของมอเตอร์เป็นแบบไม่มีเกียร์ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์และลดน้ำหนักโดยรวมของระบบ การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ทำได้โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น ซอฟต์แวร์ Opera2d โครงการนี้พิจารณาการออกแบบมอเตอร์สามแบบที่มีช่องเศษส่วนและหมายเลขขั้ว ลักษณะทางแม่เหล็กไฟฟ้าและการแสดง เช่น แรงบิดพื้นเพื่อง แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับไลน์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเฟส แรงบิดด้านนอก แรงบิดกระแสเพื่่อม ความเหนี่ยวนำ ระดับความอิ่มตัวของเหล็กและปัญหาการล้าอำนาจแม่เหล็กของแม่เหล็ก จากผลลัพธ์ระบุว่ามอเตอร์ 9 สล็อต/10 ขั้ว pm เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบมอเตอร์จักรยานไฟฟ้าที่เสนอ เนื่องจากความอิ่มตัวของ ฟลักซ์ ดีกว่า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของเฟสเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูมากที่สุดเมื่อเทียบกับการออกแบบมอเตอร์อื่นๆ ซึ่งเอื้อต่อการทำงานของ BLDC มาก โหมด. พื้นเพื่องสูงสุดสำหรับ 12 ช่อง/10 ขั้ว 9 ช่อง/10 ขั้ว และ 9 ช่อง/8 ขั้ว คือ 0.11 Nm, 0.10 Nm และ 0.08 Nm ตามลำดับ ความแตกต่างนั้นแทบไม่มีนัยสำคัญ จึงเลือก 9 ช่อง/10 ขั้วสำหรับต้นแบบ

ในปี 2019 Gottipati และ Mendrela [33] ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อเปรียบเทียบมอเตอร์ไร้แปรงถ่านแม่เหล็กถาวรแบบไม่มีแปรงถ่านแบบโรเตอร์คู่ (TRPMBL) แบบฟลักซ์ตามแนวแกนและเรเดียลฟลักซ์ที่มีสเตเตอร์แบบไม่มีช่องสำหรับการประยุกต์ใช้มอเตอร์ในล้อสำหรับการขับเคลื่อนแบบไม่มีเกียร์ของรถยนต์ไฟฟ้า วิธีนี้ช่วยให้สามารถพิสูจน์ได้ว่ามอเตอร์สองตัวนี้ตัวใดที่มีคุณสมบัติการโหลดแม่เหล็กและกระแสเท่ากัน และมีรัศมีและความยาวแกนเท่ากัน เมื่อติดตั้งไว้ในล้อจะให้แรงบิดที่มากกว่า ผลการวิเคราะห์หามาจากมอเตอร์ไร้แปรงถ่านแม่เหล็กถาวรแบบไม่มีช่องโรเตอร์คู่แบบฟลักซ์ตามแนวแกนและแบบเรเดียล-ฟลักซ์ และอัตราส่วนแรงบิดแสดงในแง่ของความยาวแกนและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของมอเตอร์ สำหรับการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า อัตราแรงบิดจะถูกพล็อตเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางล้อ ซึ่งช่วยให้สามารถเปรียบเทียบมอเตอร์ทั้งสองตัวและรับข้อมูลได้ว่ามอเตอร์ใดที่มีปริมาตรเท่ากันให้แรงบิดมากกว่า ตัวอย่างเช่น มอเตอร์สองตัวถูกสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ใน FEM เพื่อตรวจสอบอัตราส่วนแรงบิด สำหรับความยาวมอเตอร์ 82 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางล้อ 334 มม. อัตราส่วนของแรงบิดที่ได้จากมอเตอร์ฟลักซ์แนวรัศมีต่อฟลักซ์ตามแนวแกนจะเท่ากับ 1.412 จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของมอเตอร์ทั้งสองรุ่น พบว่า อัตราส่วนนี้อยู่ที่ 1.383 ข้อผิดพลาดของวิธีการที่เสนอคือ 2% ซึ่งการวิเคราะห์ที่ได้รับนั้นใช้ได้กับมอเตอร์ฟลักซ์แนวแกนและเรเดียลฟลักซ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง

ภายนอกและความยาวแกนเท่ากัน ผลการวิจัยพบว่าสำหรับล้อยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 170 มม. สามารถบรรจุแรงบิดที่มากขึ้นจากมอเตอร์ TRPMBL แบบเรเดียลฟลักซ์

ในปี 2010 Gottipati, Dobzhanskyi และ Mendrela [34] ได้ศึกษามีการนำเสนอระบบขับเคลื่อนแบบไร้เกียร์สำหรับวีลแชร์ที่ใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน มอเตอร์มีโรเตอร์ภายนอกที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรแบบนีโอไดเมียมและสเตเตอร์ด้านในติดอยู่กับเพลาล้อ สมรรถนะของมอเตอร์กำหนดโดยใช้แบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) สามมิติ ในการตรวจสอบโดยการวัดทดลองที่ดำเนินการกับต้นแบบมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์ในล้อยสำหรับการใช้งานรถเข็นต้องการทำงานที่ราบรื่น กล่าวคือ แรงบิดกระแสเพื่อมต่ำและความหนาแน่นของแรงบิดสูง มอเตอร์ในล้อยได้รับการออกแบบ สร้างแบบจำลอง และวิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์ FEM นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาผลกระทบของสล็อตเบตต่อแรงบิดพื้นผิวและกระแสเพื่อมของแรงบิด มอเตอร์ต้นแบบถูกสร้างขึ้นและทดสอบเพื่อให้ได้คุณสมบัติของมอเตอร์และเพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จาก FEM ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบไม่แตกต่างจากผลลัพธ์ที่กำหนดไว้ในการจำลองมากนัก มอเตอร์ส่งแรงบิดด้วยการกระแสเพื่อมที่ค่อนข้างต่ำซึ่งทำให้ใช้ได้กับระบบขับเคลื่อนวีลแชร์

ในปี 2010 Chiu, Chiu, Liang และ Liang [35] ได้ศึกษาการออกแบบประสิทธิภาพการขับเคลื่อนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับมอเตอร์พัฒนกระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) แบบเฟสเดียว โดยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อจำลองการเลื้อนมุมที่เหมาะสมที่สุดของมอเตอร์ BLDC แบบเฟสเดียว รวมทั้งใช้ PSPICE เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลอง FEM อุปกรณ์ต้นแบบประกอบด้วย ไมโครชิป dsPIC30F4011 โปรเซสเซอร์สัญญาณดิจิทัล (DSP) และพัฒน Delta FFB1212EHE โดยทำการศึกษาการสังเกตเฉพาะระดับความเรียบของกระแสมอเตอร์ที่สามารถใช้ในการหามุมเปลี่ยนเกียร์ที่เหมาะสมที่สุดได้ จากนั้น ไม่เพียงแต่อัตราการทับซ้อนกันระหว่างกระแสคอล์ยและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะสูงเท่านั้น แต่ประสิทธิภาพยังได้รับการปรับปรุงอีกด้วย ขั้นตอนการเขียนซอฟต์แวร์สะดวกกว่า ไม่จำเป็นต้องใช้เวลามากในการค้นหามุมเปลี่ยนเกียร์ที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ยังวิเคราะห์เสียงและความสั่นสะเทือน มอเตอร์ BLDC แบบเฟสเดียวมีสัญญาณรบกวนต่ำกว่าผลิตภัณฑ์มาตรฐาน การสั่นสะเทือนพร้อมการเปลี่ยนเฟสที่เหมาะสมที่สุดโดยรวมจะต่ำกว่าในช่วงความเร็วที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2011 Chen, Chiu, Tang, Liang และ Liang [36] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการขับเคลื่อนที่ประกอบด้วยเฟสล็อก (PLL) สำหรับมอเตอร์พัฒนกระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านแบบเฟสเดียว ที่ประกอบด้วย PLL โดยวงจรฮาร์ดแวร์เพื่อใช้การเลื่อนเฟสล่วงหน้า วงจร PLL จะตรวจจับความแตกต่างของเฟสระหว่างสัญญาณฮอลล์ (back-EMF) และกระแสไฟที่คดเคี้ยว จากนั้นจะปรับระยะเวลาในการเปลี่ยนของสวิตซ์เพื่อให้ได้เฟสล่วงหน้าที่เพียงพอ จากนั้นทำการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับและกระแสไฟที่คดเคี้ยวทับซ้อนกัน มอเตอร์จะ

ได้รับประสิทธิภาพการขับเคลื่อนที่เหมาะสมที่สุด วงจร PLL สามารถบรรลุประสิทธิภาพการทำงานที่ปรับให้เหมาะสมได้อย่างรวดเร็วและอัตโนมัติโดยใช้ไอซี CD4046 และส่วนประกอบบางอย่างเท่านั้น วงจรฮาร์ดแวร์ออกแบบได้ง่ายโดยไม่ต้องเขียนโปรแกรม และค่าใช้จ่ายถูกกว่าวิธีซอฟต์แวร์ ดังนั้นการประหยัดต้นทุนก็ทำได้สำเร็จเช่นกัน สุดท้าย ผลการทดลองของประสิทธิภาพโดยรวมโดยวิธีการที่เสนอนั้นเกือบจะสัมพันธ์กับผลการทดลองโดยวิธีซอฟต์แวร์

ในปี 2014 Abirami, Bala และ Priya [37] ได้ศึกษาออกแบบแบบจำลองเพื่อการจำลองของกระแสตรงไร้แปรงถ่านแม่เหล็กถาวร (PMBLDC) และวิเคราะห์ขณะไม่มีโหลด คุณลักษณะการขับเคลื่อน และแรงบิดของฟันเฟืองของมอเตอร์ฮับกระแสตรงไร้แปรงถ่าน มอเตอร์จะต้องได้รับการออกแบบในขนาดที่เหมาะสมเท่านั้น จึงจะสามารถใช้มอเตอร์สำหรับการใช้งานเฉพาะได้ ก่อนการผลิตมอเตอร์ แรงบิดและแรงบิดฟันเฟืองของมอเตอร์ต้องเรียกว่าแรงบิดฟันเฟืองควรน้อยกว่าแรงบิดสุทธิเสมอ หากไม่เป็นเช่นนั้น มอเตอร์จะไม่หมุนอย่างอิสระและดึงกระแสไฟออกมาเป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้เป็นการหาค่าแรงบิดและแรงบิดของฟันเฟืองด้วยใช้การวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ผ่านการจำลองโดยใช้ซอฟต์แวร์แม่เหล็ก เวอร์ชัน 7.4.1 (FEM ANALYSIS) ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การกระจายฟลักซ์และความอิ่มตัว (ความหนาแน่นของฟลักซ์) ในแกนเหล็ก ผลลัพธ์ที่ได้รับสรุปได้ว่ามอเตอร์ฮับกระแสตรงไร้แปรงถ่าน สามารถผลิตและใช้งานสำหรับการใช้งานได้ เนื่องจากแรงบิดของฟันเฟืองนั้นน้อยกว่าแรงบิดสุทธิ

ในปี 2014 Stoica, Dumitru และ Melcescu [38] ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) แบบ 2 มิติสำหรับมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านพลังงานต่ำ โดยทำการศึกษาเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีแม่เหล็กถาวร ซึ่งใช้สำหรับจ่ายไฟให้กับพัดลมในเครื่องใช้ในครัวเรือน จุดเริ่มต้นคือความสมมาตรและคาบของแกนแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองตัวเลข 2 มิติสำหรับสนามแม่เหล็ก การวิเคราะห์นี้กำหนดประสิทธิภาพโดยรวมของมอเตอร์และการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบ เพื่อลดปริมาตรและลดแรงบิดฟันเฟือง แบบจำลองเชิงตัวเลข 2 มิติที่พัฒนาขึ้นโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการศึกษาในระบอบการปกครองแบบชั่วคราว ในการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลข ส่วนสำคัญในการคำนวณปริมาณไฟฟ้าที่คำนวณได้นั้นเกิดจากคุณสมบัติของวัสดุของแกนกลางและของแม่เหล็กถาวร แต่ยังคงรวมถึงลักษณะเฉพาะของการออกแบบของแบบจำลองทางกายภาพของมอเตอร์ด้วย ผลการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้และค่าที่คำนวณได้จะนำไปสู่การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตัวเลขไฟไนต์เอลิเมนต์ของมอเตอร์ โมเดลนี้สามารถใช้สำหรับการจำลองระบบการทำงานอื่นๆ ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ไม่มีโหลดและกรณีโหลด

ในปี 2014 Dwivedi, Singh และ Srivastava [39] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบสมรรถนะของโทโพโลยีต่างๆ ของมอเตอร์แม่เหล็กถาวรไร้แปรงถ่าน โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยการ

เปรียบเทียบพารามิเตอร์ด้านประสิทธิภาพ เช่น การกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์ แรงบิดเฉลี่ย ฯลฯ ของมอเตอร์ไร้แปรงแม่เหล็กถาวร (PMBL) แบบ 6 ขั้ว 8 ช่อง กับวิธีการ ติดตั้งบนพื้นผิว (SMPM) ส่วนแทรกที่พื้นผิว (SIPM) และแม่เหล็กถาวรภายใน (IPM) ของโรเตอร์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) การทำงานที่ประสบความสำเร็จของมอเตอร์แม่เหล็กถาวร (PM) ที่มีแรงบิดพื้นเพื่อ/ไม่มีคลื่นกระเพื่อมขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของฟลักซ์ไซน์ ศึกษาของแรงบิดพื้นเพื่อ เนื่องจากสเตเตอร์แบบร่องในมอเตอร์ SMPM, SIPM และ IPM การศึกษานี้จะช่วยในการเลือก โทโพโลยีต่างๆ ของมอเตอร์ PMBL เนื่องจากการกระจายฟลักซ์ ความเหมาะสมที่ความเร็วสูงและการผลิตแรงบิด จากการศึกษาโทโพโลยีของโรเตอร์สามตัวสำหรับมอเตอร์ PMBL ที่มีปริมาตรแม่เหล็กเท่ากันจะถูกเปรียบเทียบในแง่ของความหนาแน่นของ ฟลักซ์ที่ไม่มีโหลดและศักยภาพเวกเตอร์แม่เหล็ก การกระจายฟลักซ์แสดงให้เห็นว่าโทโพโลยี SMPM ให้ความหนาแน่นของฟลักซ์ที่สูงขึ้น จึงมีแรงบิดที่สูงขึ้น แต่ปริมาณการกระเพื่อมใน ฟลักซ์จะสูงกว่า ในขณะที่มอเตอร์ IPM ผลิต EMF ความหนาแน่นของฟลักซ์น้อยกว่าเล็กน้อย แต่มอเตอร์ IPM ที่มีตัวกันฟลักซ์ดูเหมือนจะเป็นตัวเลือกที่ดีกว่าสำหรับการใช้งานความเร็วสูงที่หลากหลาย ดังนั้น มอเตอร์ IPM-FB จึงเป็นตัวเลือกที่ดีกว่าสำหรับการใช้งานที่มีแรงบิดต่ำความเร็วสูง ในขณะที่ SMPM เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานที่มีแรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ ความหนาแน่นของขั้วเหล็กต้องได้รับการปรับให้เหมาะสมสำหรับบริเวณที่ทำให้ฟลักซ์อ่อนตัวลงอย่างเหมาะสม แต่มอเตอร์ IPM ที่มีความหนาแน่นของ ฟลักซ์ที่ควบคุมได้โดยใช้ความหนาแน่นที่เหมาะสมของขั้วเหล็กและซีโรกร สามารถใช้กับการทำงานที่ทำให้ ฟลักซ์อ่อนลงได้ สำหรับการใช้งานช่วงความเร็วกว้างที่แรงบิดต่ำ

ในปี 2015 Sim, Niguchi และ Hirata [40] ได้ศึกษาการจำลองที่ปรับปรุงการวิเคราะห์ของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC) โดยการเข้ากันได้ของมอเตอร์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) กับรูปแบบการสวิตช์แบบต่างๆ ในงานวิจัยนี้ แบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC) 8 ขั้ว 12 ช่อง และเชื่อมต่อกับตัวควบคุมมอเตอร์ BLDC แบบ 3 เฟส เพื่อควบคุมการกำหนดลักษณะทางกลและทางไฟฟ้าของมอเตอร์ BLDC ในการวิเคราะห์รูปแบบการสวิตช์แบบต่างๆ ถูกจำลองภายใต้โหลด 0.5 นิวตันเมตร เพื่อกำหนดและเปรียบเทียบผลกระทบต่อมอเตอร์ BLDC ผลการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบการสลับที่ 3 ซึ่งมีการสลับที่ด้านสูงและต่ำก่อนและหลังช่วงการสลับที่ด้านสูงมีประสิทธิภาพผลมากที่สุด ด้วยการใช้อุปกรณ์การสลับที่นี้ เราสามารถบรรลุกระแสต่ำ แรงบิดกระเพื่อมต่ำ และการทำงานที่ความเร็วสูง ในทางกลับกัน รูปแบบการสลับที่ 1 ซึ่งไม่มีการสลับที่ก่อนและหลังช่วงการสลับที่ด้านสูงแสดงค่ากระแสที่สูงมาก นอกจากนี้ ด้วยการวิเคราะห์คู่ตามการจำลอง เป็นไปได้ที่จะกำหนดรูปแบบการสลับที่ไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งไม่ง่ายที่จะนำไปใช้โดยการทดลองจริง นอกจากนี้ การวิเคราะห์ที่ใช้การจำลองแบบนี้จะช่วยลดต้นทุนและเวลาในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ซึ่งรวมถึงระบบควบคุมมอเตอร์ ในอนาคต การทดลองจะดำเนินการกับ

มอเตอร์ BLDC 8 ขั้ว 12 ช่องที่มีตัวควบคุมมอเตอร์ BLDC 3 เฟสสำหรับการตรวจสอบที่เชื่อถือได้ของผลการวิเคราะห์ที่เป็นคู่

ในปี 2019 Usman และ Rajpurohit [41] ได้ศึกษาการวิเคราะห์ข้อบกพร่องการล้างอำนาจแม่เหล็กอย่างครอบคลุมในมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) โดยใช้วงจรสมมูลไฟฟ้าไฮบริดแบบใหม่และวิธีการที่ใช้ตัวเลข มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC) เป็นประเภทของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (PMSM) ที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับแบบสี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากมอเตอร์ BLDC มีการขยายตัวสูงในงานอุตสาหกรรม มอเตอร์เหล่านี้จึงได้รับการใช้งานอย่างกว้างขวางในระยะเวลาที่นานขึ้น ในระหว่างการทำงานหนักอย่างต่อเนื่อง มอเตอร์เหล่านี้ต้องเผชิญกับความเครียดจากสภาพแวดล้อม ทางกายภาพ และจากความร้อน ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ ความผิดปกติอาจเกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์หรือบนแม่เหล็กถาวร (PM) ของโรเตอร์ของเครื่อง ซึ่งสามารถแสดงเป็นปริมาณไฟฟ้า เช่น กระแสหรือแรงดันไฟฟ้า ปริมาณแม่เหล็ก เช่น ความหนาแน่นของฟลักซ์และลักษณะทางความร้อนของเครื่อง การวิเคราะห์ที่ครอบคลุมของความผิดพลาดในการล้างอำนาจแม่เหล็กในมอเตอร์ BLDC ได้ดำเนินการแล้วในงานวิจัยนี้ มีการเสนอเทคนิคเชิงวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบไฮบริดสำหรับการสร้างแบบจำลองของผลกระทบจากความผิดพลาดในการลดอำนาจแม่เหล็กของมอเตอร์ BLDC การใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองไฮบริดที่เสนอ การตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องจักรทำขึ้นภายใต้สภาวะที่สมบูรณ์และผิดปกติ คุณลักษณะด้านประสิทธิภาพ เช่น แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของมอเตอร์ กระแสเฟส แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า ความเร็วทางกล และความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้รับมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากแสดงให้เห็นและคาดการณ์พฤติกรรมของเครื่องจักรเมื่อผ่านสภาวะความผิดปกติในการล้างอำนาจแม่เหล็ก นอกจากนี้ การตรวจสอบผลลัพธ์โดยใช้การใช้เครื่องมือ Maxwell 2D รุ่น Finite Element (FE) เพื่อยืนยันถึงความสำคัญของเทคนิคแบบจำลองไฮบริด ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าการวิเคราะห์ FE และความแม่นยำมากกว่าเทคนิคที่ใช้ EEC ทำให้วิธีการวิเคราะห์และตัวเลขแบบผสมมีความโดดเด่นมากขึ้นในขอบเขตการวิจัยของการสร้างแบบจำลองข้อบกพร่องของแม่เหล็กถาวรของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน นอกจากนี้ การตรวจสอบเชิงทดลองได้ตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการจำลองที่เสนอ การจำลองความบกพร่องของขดลวดสเตเตอร์ ในเครื่องเดียวกันเป็นงานต่อเนื่องซึ่งอยู่ในขอบเขตในอนาคตของงานวิจัยชิ้นนี้ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและการทำแผนที่ของความผิดปกติจะต้องดำเนินการเพื่อสร้างดัชนีระบุข้อผิดพลาดที่เป็นผลสืบเนื่อง

ในปี 2019 Hwang และ Kwon [42] ได้ศึกษาการออกแบบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) ราคาประหยัดสำหรับระบบเบรกไฟฟ้าในตัว ในระหว่างกระบวนการผลิตมอเตอร์ ต้นทุนของเครื่องมือในการผลิตมอเตอร์ที่มีต่อราคามอเตอร์นั้นแทบไม่มีนัยสำคัญและถือว่าไม่มีนัยสำคัญ ต้นทุนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้นทุนการขึ้นรูป อาจไม่ใช่ปัญหาสำคัญสำหรับการผลิตจำนวนมาก แต่จะ

กลายเป็นปัญหาสำคัญสำหรับการออกแบบที่เน้นการใช้งานขนาดเล็กที่ทันสมัย เมื่อจำนวนมอเตอร์ทั้งหมดที่ผลิตต่อเครื่องมือการผลิตมอเตอร์ เช่น เครื่องมือกดสเตเตอร์และโรเตอร์ลดลง ผลกระทบของต้นทุนเครื่องมือในการผลิตมอเตอร์ที่มีต่อราคามอเตอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก เพื่อลดต้นทุน โดยนำเสนอแนวทางการออกแบบใหม่ของมอเตอร์กระแสสลับแบบไม่มีแปรงถ่าน (BLAC) ที่ใช้เครื่องมือในการผลิตมอเตอร์ร่วมกัน แนวทางการออกแบบของมอเตอร์ BLAC ถูกนำไปใช้กับระบบเบรกไฟฟ้าแบบบูรณาการ (IEB) ที่มีคุณสมบัติหลากหลาย นอกจากนี้ ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์ในระบบ IEB จะใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ BLAC, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM), การออกแบบการทดลอง และวิธีการเคลื่อนย้ายกำลังสองน้อยที่สุด นอกจากนี้ ในการทำนายเวลาการทำงานที่มีอยู่ของมอเตอร์ จะมีการเสนอค่าสัมประสิทธิ์การชดเชยความร้อนที่ใช้ข้อมูลการทดลองของมอเตอร์ที่มีอยู่ ด้วยการใช้แนวทางการออกแบบนี้ เราได้ออกแบบมอเตอร์อย่างมีประสิทธิภาพที่ตอบสนองความต้องการด้านประสิทธิภาพ เช่น การตอบสนองความเร็ว เวลาทำงานที่มีอยู่ และการบิดเบือนฮาร์มอนิกรวม (THD) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับกับปริมาณแกนสเตเตอร์ขั้นต่ำ ในระบบ IEB และบรรลุ 25.5% ในการลดต้นทุนด้วยการแบ่งปันเครื่องมือในการผลิตมอเตอร์

ในปี 2011 Yanawati, Halim, Daut, Shafiqin, Pungut, Syatirah, Gomesh และ Abdullah [43] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 0.5 แรงม้า โดยใช้ความหนาที่แตกต่างกันของแผ่นเหล็กเคลือบโรเตอร์ผ่านวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับสามเฟสได้รับการตรวจสอบและวิเคราะห์อย่างละเอียดในแง่ของพารามิเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ ประสิทธิภาพ และการแยกการสูญเสีย ตลอดโครงการนี้ โรเตอร์ใหม่ที่มีแผ่นเหล็กเคลือบ 0.35 มม. และขนาดโรเตอร์บาร์ 10 มม. ถูกประดิษฐ์ขึ้นและเปรียบเทียบกับโรเตอร์ที่มีอยู่ซึ่งมีขนาดโรเตอร์บาร์ 0.50 มม. และ 10 มม. การเปรียบเทียบทำได้โดยการจำลองซอฟต์แวร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ Motorsolve (IM) ระหว่างแถบโรเตอร์ที่มีอยู่กับแถบโรเตอร์แบบใหม่สำหรับการออกแบบช่องสเตเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า และการกำหนดค่าขดลวด ซอฟต์แวร์ Motorsolve (IM) ถูกเปรียบเทียบในแง่ของประสิทธิภาพ ตัวประกอบกำลัง และด้านการสูญเสีย ผลการวิเคราะห์ พบว่า แผ่นเหล็กความหนา 0.35 มม. มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 1.82% ตัวประกอบกำลังเพิ่มขึ้น 0.03 และการสูญเสียกระแสหมนวน 19.52% เมื่อเทียบกับแผ่นเหล็ก 0.50 มม. ประสิทธิภาพสูงและตัวประกอบกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถลดการสูญเสียพลังงานฮาร์มอนิกและมอเตอร์ได้ การเคลือบเหล็กแผ่นที่ลดลงสามารถลดการสูญเสียกระแสวนได้ การสูญเสียแกนแม่เหล็กสามารถลดลงได้โดยใช้การเคลือบทินเนอร์ในโครงสร้างแม่เหล็ก ดังนั้น การใช้เฟรมโรเตอร์ความหนา 0.35 มม. สล็อตโรเตอร์ 10 มม. ด้วยทองแดงเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการใช้งานในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในปี 2013 Kamoun, Hadj, Chabchoub, Neji และ Ghariani [44] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยส่วนประกอบที่สำคัญที่สุด

ของโซ่ชุดไฟฟ้า คือ มอเตอร์ชุด โดยเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำ (IM) เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ความน่าเชื่อถือที่ดีที่สุด การบำรุงรักษาต้นทุนที่ลดลง ความทนทาน ประสิทธิภาพสูงกว่า ลดเวลาการสตาร์ทเมื่อเทียบกับการลากมอเตอร์ด้วยความร้อนและแรงบิดการสตาร์ทสูง โดยการออกแบบสล็อตโรเตอร์ของ IM สำหรับขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าได้รับการตรวจสอบ ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากการออกแบบสล็อตโรเตอร์ที่ไม่เหมาะสมจะนำไปสู่ประสิทธิภาพแรงบิดที่ไม่ดีของ IM การคำนวณโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) สำหรับวิเคราะห์ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและฟลักซ์แม่เหล็ก โดยการจำลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ FEMM เพื่อระบุพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ งานวิจัยนี้นำเสนอข้อมูลจำเพาะของโทโพโลยีทั้งสองแบบของ IM ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างสล็อตโรเตอร์บนเส้นฟลักซ์และระลอกของแรงบิด การใช้การวิเคราะห์เปรียบเทียบ FEM ระหว่างทั้งแรงบิดกระเป๋มของ IM กับช่องโรเตอร์สี่เหลี่ยมและ IM ที่มีช่องโรเตอร์แบบกลม จะเห็นได้ชัดว่ารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของช่องโรเตอร์ คือ รูปทรงกลม อันที่จริง อัตราขยายสูงสุดของการกระเป๋มของแรงบิดไปยังจุดสูงสุดอาจสูงถึง 40% เมื่อเทียบกับแบบสี่เหลี่ยม นอกจากนี้ เราแสดงให้เห็นด้วยว่าแบบจำลองที่เสนอปรับปรุงเส้นฟลักซ์ไซน์สามเส้นโดยยกเลิกการบิดเบือนในโรเตอร์ช่องสี่เหลี่ยม

ในปี 2013 Pallis, Gyftakis และ Kappatou [45] ได้ศึกษาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ของจำนวนบาร์ที่ส่งผลกระทบต่อการสูญเสียแกนสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรง ซึ่งเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงที่สำคัญ เนื่องจากส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของมอเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จำนวนช่องโรเตอร์ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากสัมพันธ์กับดัชนีฮาร์โมนิกที่สูงขึ้นของสนามแม่เหล็ก ในงานนี้ มอเตอร์เหนี่ยวนำสามตัวที่มี สเตเตอร์เดียวกันและจำนวนบาร์ของกรงต่างกัน ซึ่งถูกเลือกอย่างเหมาะสม จะถูกจำลองด้วย FEM จุดมุ่งหมายคือเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบของจำนวนช่องโรเตอร์เฉพาะต่อการสูญเสียแกน สเตเตอร์ ผลลัพธ์ระบุว่า การเลือกจำนวนสล็อตของโรเตอร์ที่เหมาะสมทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กผิดเพี้ยนน้อยลง รวมถึงการสูญเสียเหล็กสเตเตอร์น้อยลง เครื่องที่มีแท่งโรเตอร์ 48 แท่งแสดงดัชนีฮาร์โมนิกที่ต่ำที่สุดของฟลักซ์แม่เหล็ก ส่งผลให้การสูญเสียธาตุเหล็กทั้งหมดรวมถึงความเครียดจากความร้อนที่ปลายฟันลดลง

ในปี 2014 Haisen, Yilong, Yuhan, Yang และ Guorui [46] ได้ศึกษาการวิเคราะห์การสูญเสียและแรงช่องว่างอากาศของมอเตอร์เหนี่ยวนำกรงด้วยแท่งโรเตอร์อสมมาตรที่ไม่บิดเบี้ยวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ซึ่งแท่งโรเตอร์แบบอสมมาตรที่ไม่บิดเบี้ยวสามารถใช้เพื่อขจัดช่องฮาร์โมนิกของช่องสัญญาณ และเสียงรบกวนและการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรง อย่างไรก็ตาม เป็นการยากที่จะระบุการกระจายเชิงพื้นที่ของแท่งโรเตอร์แบบอสมมาตรและการรวมสล็อต ซึ่งอาจส่งผลต่อการสูญเสียและแรงช่องว่างอากาศอย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยได้ศึกษาลักษณะการสูญเสียและแรงช่องว่างอากาศของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงที่มีโรเตอร์ที่ไม่เอียง โดยวิธี

ไฟไนต์ เอลิเมนต์เวลาก้าว (T-S FEM) การวิเคราะห์การรวมสล็อตแบบต่างๆ และการกระจายเชิงพื้นที่ของแรงแม่เหล็กของมอเตอร์แบบสมมาตรนั้นดำเนินการโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 4 ขั้วขนาด 5.5 กิโลวัตต์ มีการผลิตต้นแบบที่มีแรงแม่เหล็กของมอเตอร์แบบสมมาตร และดำเนินการทดสอบการสูญเสียและเสียงรบกวนเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าฮาร์โมนิกของสล็อตถูกกำจัดได้สำเร็จโดยใช้แรงแม่เหล็กของมอเตอร์แบบสมมาตร

ในปี 2014 Ahn, Lee, Park, Kim, Kim และ Jung [47] ได้ศึกษาการออกแบบเชิงตัวเลขที่เข้ากันได้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เกี่ยวข้องกับแรงดันและแหล่งกระแส โดยเลือกจุดขับเคลื่อนที่เหมาะสมที่สุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อรับประกันการผลิตแรงบิด ซึ่งป้องกันโดยการรวมกระแส $d-q$ และความเข้ากันได้ของการออกแบบเชิงตัวเลขโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ในการตรวจสอบแหล่งกระแสเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การควบคุมเวกเตอร์โดยพิจารณาจากข้อจำกัดของแรงดันและกระแสได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวเลขด้วย FEM เมื่อเลือกจุดขับเคลื่อนที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ จะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อผลลัพธ์การออกแบบ เช่น ความอึดตัวของแม่เหล็กและการสูญเสียแกนเหล็ก ในงานวิจัยนี้ มีการตรวจสอบลักษณะการออกแบบโดยพิจารณาจากข้อจำกัดของแรงดันและกระแสโดย FEM ที่เกี่ยวข้องกับแหล่งกระแสและแรงดันไฟฟ้า นอกเหนือจากวิธีวงจรสมมูล (ECM) ที่มีแหล่งกำเนิดแรงดันไฟแบบไซน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จุดปฏิบัติการที่ควบคุมโดยเวกเตอร์นั้นได้รับการตรวจสอบในแง่ของลักษณะการทำงาน เช่น ความอึดตัวของแม่เหล็กและการสูญเสียแกนเหล็ก มีข้อสังเกตว่า FEM ที่เสนอพร้อมแหล่งกำเนิดกระแสที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์และออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยไม่คำนึงถึงวิธีการควบคุม

ในปี 2021 Seyedshenava และ Ahmadpour [48] ได้ศึกษาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการเชื่อมต่อหม้อแปลงที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากการวิเคราะห์คุณลักษณะมอเตอร์เหนี่ยวนำ (IM) โดยการจำแนกประเภทแรงดันตกคร่อมแบบใหม่ โดยพิจารณาจากผลลัพธ์ของ FEM ในขั้นตอนแรกหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายและ IM ได้รับการสร้างแบบจำลอง จากนั้นจึงใช้การลัดวงจรต่างๆ ในหม้อแปลงหลักของหม้อแปลงที่มีการกำหนดค่าการเชื่อมต่อต่างๆ นอกจากนี้ สำหรับคำอธิบายที่แท้จริงของประสิทธิภาพแกนเหล็ก การสร้างแบบจำลองพฤติกรรมแม่เหล็กจะดำเนินการโดยแบบจำลอง Jiles-Atherton (J-A) ในขั้นตอนที่สอง มีการจัดประเภทแรงดันตกคร่อมใหม่และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีอื่นๆ สำหรับการวิเคราะห์แรงดันตกคร่อมเพิ่มเติมและอิทธิพลของมันที่โหลดที่ละเอียดอ่อน IM ขนาดเล็ก จากนั้นจึงกำหนดการเชื่อมต่อที่ดีที่สุดของขดลวดหม้อแปลงตามความเร็วของมอเตอร์ การเปรียบเทียบระหว่างมาตรฐาน IEC กับวิธีการที่แตกต่างกันและการจำแนกประเภทที่เสนอได้นำเสนอว่าข้อผิดพลาดของวิธีการที่เสนอนั้นต่ำกว่า 6% ในขณะที่ข้อผิดพลาดของวิธีการอื่นคำนวณได้มากกว่า 9% ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ IM แสดงให้เห็นว่าคลาส 1 และ 2 เป็นคลาสที่ดีที่สุดสำหรับการทำงานของ IM เนื่องจากมีการลดความเร็วต่ำสุด คลาสเหล่านี้เกี่ยวข้องกับ

กับการเชื่อมต่อกับด้านหลักของ Y หรือ Yn และประเภทการลัดวงจร คือ เฟสเดียวถึงกราวด์ นอกจากนี้คลาส 3 ยังมีเคสที่ตึกว่า อย่างไรก็ตาม ผลกระทบต่อการลดความเร็วมากกว่าคลาส 1 และ 2 เท่ากับ 1,012 และ 1,006 องศา/วินาที ตามลำดับ

ในปี 2020 Naderi, Heidary และ Vahedi [49] ได้ศึกษาการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นขั้นบันไดทุติยภูมิที่มีสองประเภททุติยภูมิที่แตกต่างกันโดยใช้วงจรสมมูลแม่เหล็กโดยเสนอวิธีวงจรสมมูลแม่เหล็ก (MEC) เพื่อสร้างแบบจำลองเครื่องเหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบขั้นบันไดทุติยภูมิ (LS-LIM) ซึ่งสามารถกำหนดความแม่นยำของแบบจำลองได้ตามต้องการ โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เนื่องจากทำให้ง่ายต่อการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของมอเตอร์ รวมทั้งจำนวนขั้วและช่องตลอดจนขนาด ในงานวิจัยนี้ LS-LIM ถูกจำลองโดยวิธี MEC ที่เสนอในกรณีต่างๆ (จำนวนขั้ว) และประเภททุติยภูมิที่แตกต่างกัน (โครงสร้างของแผ่นงานทุติยภูมิ) ผลกระทบสุดท้ายยังถูกนำมาพิจารณาด้วยการใช้โซนเสมือนที่ปลายทั้งสองของหลักสำหรับ LS-LIM ที่อิมิต์ สมการไฟฟ้าและแม่เหล็กได้รับการแก้ไขพร้อมกันโดยใช้เทคนิคสี่เหลี่ยมคางหมูเพื่อแสดงแบบจำลองไดนามิกที่ครอบคลุม แสดงให้เห็นว่าประเภทที่สองของทุติยภูมิ (แถบอากาศระหว่างอากาศ) มีกำลังสูงสุดที่ต่ำกว่า แรงขับสูงสุด และแรงขับเริ่มต้นเมื่อเปรียบเทียบกับอันแรก (เหล็กคั่นระหว่างเหล็ก) จากผลการวิจัยพบว่ากำลังเล็กน้อยและแรงขับเริ่มต้นดีขึ้นโดยใช้แท่งทองแดงแทนอลูมิเนียม ยิ่งไปกว่านั้นกำลังมอเตอร์เล็กน้อยยังได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มความกว้างของแท่ง สุดท้าย การตรวจสอบความถูกต้องที่ดำเนินการโดย FEM และผลการทดลองแสดงความถูกต้องของแบบจำลอง รวมถึงเวลาดำเนินการที่สั้นกว่ามากของ MEC ที่เสนอเมื่อเปรียบเทียบกับ FEM

ในปี 2019 Hasegawa, Nakamura และ Ichinokura [50] ได้ศึกษามอเตอร์รีลักแตนซ์แบบสวิตช์แบบใหม่ที่มีขดลวดเสริมและแม่เหล็กถาวรบนโครงสร้างสเตเตอร์ สามารถขับเคลื่อนด้วยตัวแปลงฮาล์ฟบริดจ์แบบบอสมาตรในลักษณะเดียวกับมอเตอร์รีลักแตนซ์ทั่วไป และประสิทธิภาพก็ดีขึ้นด้วยขดลวดเสริมและแม่เหล็ก ลักษณะของมอเตอร์รีลักแตนซ์ที่เสนอนั้นแสดงให้เห็นโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) และการทดลอง เป็นผลให้เห็นได้ชัดว่าแรงบิดของมอเตอร์รีลักแตนซ์ที่เสนอได้รับการปรับปรุงโดยขดลวดเสริมที่น่าตื่นเต้นและประสิทธิภาพก็เพิ่มขึ้น 3% ด้วย นอกจากนี้ ยังระบุด้วยว่าเครื่องที่นำเสนอสามารถทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง

ในปี 2013 Kiyota, Kakishima, Sugimoto และ Chiba [51] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบผลการทดสอบและการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) แบบ 3 มิติ ที่จุดเข้าของมอเตอร์แบบรีลักแตนซ์แบบสวิตช์ (SRM) 60 kW สำหรับรถยนต์ไฮบริดที่ใช้กับรถยนต์ Toyota Prius ปี 2009 โดยทำการเปรียบเทียบการเชื่อมโยงฟลักซ์และแรงบิดใน 3D-FEM และเครื่องทดสอบ การตั้งค่าที่เหมาะสมของเส้นโค้ง B-H และปัจจัยการวางซ้อนของเหล็กเป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์ที่แม่นยำ ใน 3D-FEM ข้อผิดพลาดของแรงบิดที่จุดเข้าเทียบกับผลการทดสอบจะพบว่า มีขนาดเล็กเพียง 5.0%

นอกจากนี้ยังพบว่าข้อผิดพลาดของแรงบิดสามารถลดลงเหลือ 3.1% ถ้ารูปคลื่นปัจจุบันถูกประมาณอย่างถูกต้อง อัตราการประจุกระแสไฟสูงใน FEM จึงมีแรงบิดเพิ่มขึ้น โดยเวลาในการคำนวณของการวิเคราะห์ 2D-FEM ใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง และในส่วนของ 3D-FEM เวลาประมาณ 3 วัน ดังนั้นการวิเคราะห์ 2D-FEM จึงเหมาะสำหรับการออกแบบคร่าวๆ และ 3D-FEM ใช้สำหรับการยืนยันที่แม่นยำ ข้อผิดพลาด 5.0% ใน 3D-FEM ที่แสดงที่นี้เป็นหนึ่งในตัวอย่างหนึ่งของมอเตอร์รีลัคแตนซ์ สวิตซ์ขนาด 60 กิโลวัตต์ 207 นิวตันเมตรที่มีความหนาแน่นแรงบิดค่อนข้างสูง 35 นิวตันเมตร/ลิตร และมีประสิทธิภาพสูงสุดมากกว่า 95% SRM ที่ออกแบบมีสมรรถนะที่แข่งขันได้กับมอเตอร์ PM หายากใน HEV ในการผลิตจำนวนมาก

ในปี 2014 Navardi, Babaghorbani และ Ketabi [52] ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์รีลัคแตนซ์สวิตซ์ (SRM) ถูกกำหนดโดยอัลกอริทึมการเพิ่มประสิทธิภาพผู้ค้นหา (SOA) เป้าหมายที่มีประสิทธิภาพสูงสุดของอัลกอริทึมถูกพบสำหรับค่าแรงบิดสูงสุดที่มวลต่ำสุดของโครงสร้างทั้งหมด หลังจากเปลี่ยนพารามิเตอร์ทางเรขาคณิต กระบวนการปรับให้เหมาะสมได้ดำเนินการโดยใช้อัลกอริทึมการเพิ่มประสิทธิภาพผู้ค้นหา และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ FEM สำหรับการคำนวณแรงบิด เมื่อใช้การแก้ไขเส้นโค้ง เส้นโค้งต่อเนื่องจะพอดีกับจุดมุมพลังงาน จากนั้นจึงคำนวณแรงบิดโดยการสร้างความแตกต่าง หลังจากเลือกตัวแปรทางเรขาคณิตอิสระที่เหมาะสมสำหรับการปรับมอเตอร์ให้เหมาะสมแล้ว ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมจะถูกนำเสนอ การใช้ SOA ซึ่งเป็นเทคนิคการคำนวณเชิงวิวัฒนาการที่มีประสิทธิภาพ SRM ได้รับการปรับให้เหมาะสมร่วมกับ FEM ซึ่งอัลกอริทึมทั้งหมดจะถูกนำไปใช้ในสภาพแวดล้อม MATLAB วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพที่เสนอได้รับการตรวจสอบในกรณีศึกษาที่ได้รับการปรับให้เหมาะสมก่อนหน้านี้ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นและค่ามวลลดลงเมื่อเทียบกับมอเตอร์ที่ปรับให้เหมาะสมรุ่นก่อนหน้าบางตัว ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการออกแบบ SRM แนวทางนี้สามารถนำไปใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี

ในปี 2016 Wu, Ding และ Hu [53] ได้ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์มอเตอร์รีลัคแตนซ์สวิตซ์ (SRM) แบบโรเตอร์ภายนอกสำหรับรถจักรยานไฟฟ้าในปัจจุบันมอเตอร์รีลัคแตนซ์สวิตซ์ (SRM) มีลักษณะที่ดีของการบำรุงรักษาง่าย แรงบิดเริ่มต้นสูง และประสิทธิภาพที่ดีในทุกความเร็ว จึงเป็นตัวเลือกที่แข็งแกร่งสำหรับรถจักรยานไฟฟ้า งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบ SRM แบบโรเตอร์ภายนอกแบบ 3 เฟสที่มีขั้วสเตเตอร์ 18 ขั้วและขั้วโรเตอร์ 24 ขั้ว สำหรับการใช้งานจักรยานไฟฟ้า และ SRM โรเตอร์ภายนอกจำลองโดย ANSYS พร้อมการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) การจำลองได้ผลลัพธ์ของเส้นฟลักซ์ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก เส้นโค้งมุมกับแรงบิด เส้นโค้งตัวเหนี่ยวนำกับมุม เส้นโค้งกระแสในสภาวะคงตัว และความคุ่มค่า โดยการจำลอง และประดิษฐ์ SRM แบบโรเตอร์ภายนอกที่มีขั้วสเตเตอร์ 18 ขั้วและขั้วโรเตอร์ 24 ขั้ว ในห้องปฏิบัติการ มีการสร้างแบบจำลอง

2D FEM และคุณลักษณะแม่เหล็กคองที่ที่ได้รับจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของการออกแบบ มีการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลอง จากผลการทดลอง SRM โรเตอร์ภายนอกที่ประดิษฐ์ขึ้นเป็นแบบจำลองสามารถตอบสนองความต้องการของรถจักรยานไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้เรายังสามารถเห็นการทำงานที่ราบรื่นเมื่อความเร็วแตกต่างกันไป และคาดว่า SRM ภายนอกของโรเตอร์จะมีอนาคตที่สดใสในการประยุกต์ใช้จักรยานไฟฟ้า

ในปี 2017 Roy, Mainuddin และ Sengupta [54] ได้ศึกษาการออกแบบ วิเคราะห์ การตรวจสอบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) และการผลิตของมอเตอร์รีลัคแตนซ์สวิตช์ (SRM) โดยการวิเคราะห์การออกแบบผลิตมอเตอร์รีลัคแตนซ์สวิตช์ (SRM) 4 เฟส 48 V 1 แรงม้า 3000 รอบต่อนาที ซึ่งได้รับการตรวจสอบด้วย FEM มาตรฐาน แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ของ SRM ได้รับการพัฒนาโดยพิจารณาจากคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นของมอเตอร์ เพื่อคาดการณ์ประสิทธิภาพการทำงานที่โหลดที่กำหนด การเปรียบเทียบสั้นๆ ระหว่าง "วิธีคาบเกี่ยวกัน" กับ "วิธีของโพห์ล" ถูกนำเสนอ พบว่าวิธีการคำนวณความเหนี่ยวนำของ Pohl นั้นใช้ได้จริงมากกว่าและมีข้อตกลงที่ดีกับการเหนี่ยวนำที่ได้จากการวิเคราะห์ FE ผลลัพธ์การวิเคราะห์จะถูกเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ FE และแสดงความคล้ายคลึงอย่างใกล้ชิด นอกจากนี้ยังมีการทดสอบการประเมินพารามิเตอร์ของมอเตอร์อีกด้วย

ในปี 2016 Wang, Fu และ Niu [55] ได้ศึกษาการออกแบบโครงสร้างใหม่ของมอเตอร์ซิงโครนัสแบบกระตุ้นสองสเตเตอร์แบบไฮบริด (DSHESM) ในงานวิจัยนี้ ซึ่งรวมข้อดีของทั้งมอเตอร์แม่เหล็กถาวร (PM) และมอเตอร์ซิงโครนัส ภัยแล้งสำคัญคือการหาตำแหน่งขดลวดควบคุมภาคสนามบนสเตเตอร์ภายใน และการดำเนินการลดแรงของสนามที่ดีจะเกิดขึ้น โครงสร้างใหม่นี้สามารถขยายช่วงความเร็วกำลังคองที่ของมอเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบพื้นผิวทั่วไปได้สำเร็จ ในงานวิจัยนี้ มีการนำเสนอโครงสร้างใหม่ DSHESM ด้วยขดลวดอ่อนตัวลงของสนามบนสเตเตอร์ด้านใน เครื่องสามารถรับรู้การทำงานของการลดกำลังภาคสนามได้ร้อยเปอร์เซ็นต์ หลักการทำงานของ DSHESM สว่างขึ้นและต้นแบบจำลองโดย TS-FEM และผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า DS-HESM มีความสามารถในการควบคุมภาคสนามที่ยืดหยุ่น และเป็นตัวเลือกที่มีศักยภาพสำหรับการใช้งานช่วงความเร็วที่กว้าง

ในปี 2017 Cha, Son, Yoo และ Jeon [56] ได้ศึกษาวิธีการกำหนดความยาวแกนที่เท่ากันของมอเตอร์ซิงโครนัสขนาดใหญ่ที่มีท่อลมแบบเรเดียล ซึ่งวิธีการให้ความยาวแกนที่เทียบเท่าที่แม่นยำยิ่งขึ้นผ่านวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แม่เหล็กไฟฟ้า 3 มิติ (3D FEM) ถูกนำเสนอในบทความนี้ การประมวลผล 3D FEM ใช้เวลาในการประมวลผลแบบ 2D FEM จำนวน 106 เท่า ตามข้อมูลการจำลองในงานวิจัยนี้ มอเตอร์มีท่อระบายความร้อนด้วยอากาศเรเดียลในสเตเตอร์ การใช้ท่อระบายความร้อนด้วยอากาศในแนวรัศมีมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเครื่องเนื่องจากผลกระทบจากแนวท่อระหว่างท่อ วิธีพิจารณาผลกระทบ คือ ต้องแทนที่ความยาวแกนจริงด้วยความยาวแกนที่เท่ากันเพื่อสะท้อน

วงจรมแม่เหล็กของเปอร์สเปคทีฟ 2 มิติ อย่างไรก็ตาม มีข้อผิดพลาด 12% ของค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสขณะไม่มีโหลดระหว่าง 2D FEM และ 3D FEM ของมอเตอร์ซิงโครนัสแบบขั้วยื่น 16 MVA สาเหตุของข้อผิดพลาด คือ ความยาวแกนที่เทียบเท่ากันที่คำนวณผิดพลาดใน 2D FEM บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสาเหตุของข้อผิดพลาดผ่าน 3D FEM เพื่อให้ได้ความยาวแกนที่เทียบเท่าที่แม่นยำยิ่งขึ้นใน 2D FEM สุดท้าย การทดสอบลักษณะวงจรมเปิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังดำเนินการเพื่อตรวจสอบแรงดันไฟที่ไม่มีโหลดของ FEM แบบ 2D และ 3D มีกรณีรูปทรง 5 รูปทรงที่ความยาวช่องว่างอากาศเปลี่ยนจาก 4 เป็น 28 มม. มีการยืนยันว่าความยาวช่องว่างอากาศเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาด 5% ถึง 10% กล่าวอีกนัยหนึ่ง อัตราความผิดพลาดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความอึดตัวของแม่เหล็กในฟัน สเตเตอร์พร้อมๆ กัน อัตราความผิดพลาดของฟันจะเพิ่มขึ้นมากขึ้น

ในปี 2016 Kocman, Hruby, Pečinka และ Neumann [57] ได้ศึกษาแบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) สำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์มอเตอร์ซิงโครนัสแบบกรงกระรอกสามเฟสโดยใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics การจำลองถูกสร้างขึ้นสำหรับความเร็วการหมุนคงที่ที่ปรับให้เข้ากับค่าที่ระบุของมอเตอร์ที่ทดสอบแล้ว แสดงกระแสสเตเตอร์และแรงบิดของมอเตอร์ และเปรียบเทียบค่ากับค่าในแค็ตตาล็อกและค่าที่ได้จากการวัดมอเตอร์ ผลที่ได้จากการจำลองตรงกับค่าแค็ตตาล็อกหรือผลที่วัดได้ค่อนข้างดี ค่าจำลองของกระแสสเตเตอร์และแรงบิดเกินค่าแค็ตตาล็อกในระดับปานกลางเท่านั้น ซึ่งค่าเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความถูกต้องของการระบุและการคำนวณพารามิเตอร์มอเตอร์แบบซิงโครนัส รูปทรงและคุณสมบัติของวัสดุ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของแรงบิดมอเตอร์ภายในที่สัมพันธ์กันอย่างเหมาะสมของช่องว่างอากาศของมอเตอร์และขั้นตอนเวลาของการจำลอง โดยแบบจำลองสองมิติในซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics เป็นเครื่องมือที่ดีสำหรับการศึกษาพฤติกรรมมอเตอร์แบบซิงโครนัสภายใต้สภาวะต่างๆ ของมอเตอร์ที่ผ่านการทดสอบทั้งทางไฟฟ้าและทางกล การวิเคราะห์เพิ่มเติมจะดำเนินการสำหรับการศึกษาต่อไป

ในปี 2010 Zhang, Tseng และ Nguyen [58] ได้ศึกษาการวิเคราะห์และเปรียบเทียบมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรฟลักซ์แนวแกนและมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการออกแบบมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรและมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีช่องว่างอากาศคู่และการกำหนดค่าฟลักซ์ตามแนวแกน ซึ่งมอเตอร์ทั้งสองประเภทนี้จะมีสเตเตอร์คู่และโรเตอร์เดี่ยวสองด้านประกบระหว่างสเตเตอร์ทั้งสองนี้ บนพื้นผิวคู่ของโรเตอร์แบบดีสก์ทั้งคู่ แม่เหล็กถาวรจะถูกติดตั้งและโรเตอร์บาร์ทองแดงจะถูกเติมในช่องตามลำดับ มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรแบบซิงโครนัสแบบช่องว่างอากาศคู่และมอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับการออกแบบในงานวิจัยนี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ทั้งสองชนิดนี้ได้รับมา ทำการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ (3D FEM) ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์ และทำการเปรียบเทียบระหว่างกัน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า มอเตอร์ซิงโครนัส

แม่เหล็กถาวรฟลักซ์แนวแกน (AFPMSM) มีความหนาแน่นของแรงบิด ความหนาแน่นของกำลัง ความหนาแน่นของพลังงาน และประสิทธิภาพที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำฟลักซ์แนวแกน (AFIM) เมื่อกำหนดขนาดโครงสร้างเดียวกันให้กับมอเตอร์ทั้งสองนี้

ในปี 2017 Padilha, Peng, Sadowski และ Batistela [59] ได้ศึกษาแบบจำลองมอเตอร์ฮิสเทรีซิสที่เกี่ยวข้องกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ในการสร้างแบบจำลองมอเตอร์ฮิสเทรีซิส เพื่อจำลองมอเตอร์ฮิสเทรีซิสที่ออกแบบและสร้างขึ้นเป็นพิเศษซึ่งป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้าสองเฟสและเฟสเดียว ในกรณีเฟสเดียว สมการสนามและวงจรไฟฟ้าภายนอกจะถูกรวมเข้าด้วยกัน สำหรับการจำลองชั่วคราวทางไฟฟ้าเครื่องกลที่เกี่ยวข้องกับการสตาร์ทมอเตอร์และการเปลี่ยนแปลงโหลดกะทันหัน สมการทางกลถูกเพิ่มเข้ามาซึ่งต้องการการคำนวณแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าในทันที สำหรับการคำนวณแรงบิด จำเป็นต้องมีการแสดงปรากฏการณ์ฮิสเทรีซิสอย่างแม่นยำ และแบบจำลองมอเตอร์ Jiles–Atherton (JA) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีมาก เปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองโดยแสดงประสิทธิภาพของวิธีการจำลองที่เสนอ

ในปี 2018 Tao, Li, Ju, Zhou และ Hu [60] ได้ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์มอเตอร์ทรงกลมแบบสามองศาอิสระ (3-DOF) แบบใหม่ที่อิงตามหลักการของรีลักแตนซ์ของแม่เหล็กขั้นต่ำ โดยโครงสร้างลามิเนตใหม่ของมอเตอร์ทรงกลมแบบสามองศาอิสระ (3-DOF) โดยมอเตอร์ที่นำเสนอนี้ค่อนข้างง่ายในการผลิตและมีข้อดีของต้นทุนต่ำ เนื่องจากไม่มีแม่เหล็กถาวร จากนั้นทำการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีอย่างง่ายของมอเตอร์และให้สูตรการคำนวณของแรงบิด การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและแรงบิดคงที่ของมอเตอร์จะถูกจำลองและวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ผลการวิจัย พบว่าวงจรแม่เหล็กไม่เป็นเชิงเส้นและสนามแม่เหล็กของมอเตอร์อิมตัวเมื่อมอเตอร์ทำงานตามปกติ ผลการวิเคราะห์ 3D FEM ยังยืนยันว่าแรงบิดจับเกิดขึ้นในทุกขั้นตอนของการหมุนและการเอียง และพิสูจน์ประสิทธิภาพของโครงสร้างที่เสนอ

ในปี 2017 Timimy, Giangrande, Degano, Galea และ Gerada [61] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร และมอเตอร์สวิตชิงฟลักซ์แม่เหล็กถาวรสำหรับแรงบิดสูงกับการใช้งานเฉื่อยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยได้รับการตรวจสอบและเปรียบเทียบในแง่ของอัตราส่วนแรงบิดต่อความเฉื่อย (โดยมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพไดนามิก) และอิทธิพลที่มีต่อพารามิเตอร์การออกแบบเครื่องจักร มีการวิเคราะห์ความไวโดยละเอียดสำหรับตัวแปรทางเรขาคณิตต่างๆ ของ PMFS และเปรียบเทียบกับเครื่องอ้างอิงที่ปรับให้เหมาะสม PMSM การวิเคราะห์เพิ่มเติมที่เน้นไปที่การนำแม่เหล็กมาใช้สำหรับมอเตอร์ PMFS ได้ดำเนินการเพื่อตรวจสอบผลกระทบทั้งสองต่อการสูญเสียของแรงลมและแรงบิดต่อแรงเฉื่อย สำหรับการใช้งานภายใต้การศึกษา เครื่อง PMSF มีความหนาแน่นของแรงบิดต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง PMSM (ที่ปริมาตรเท่ากัน) อย่างไรก็ตาม เครื่อง PMSF สามารถเร่งความเร็วได้เร็วกว่าเนื่องจากความเฉื่อยของ โรเตอร์ที่ต่ำกว่า งานนี้เสนอ

การออกแบบเครื่องจักรทางเลือกให้กับ PMSM โดยใช้เครื่อง PMFS ที่มีซีโครงแม่เหล็ก ในทางกลับกัน ช่วยให้มั่นใจได้ถึงสมรรถนะแบบไดนามิกที่ดีขึ้น (อัตราส่วนแรงบิดต่อความเฉื่อยที่ต่ำกว่า) เมื่อเปรียบเทียบกับ PMSM ที่ออกแบบไว้ก่อนหน้านี้

งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์เนื่องจากการเลือกพารามิเตอร์ เช่น จำนวนรอบของขดลวด สเตเตอร์และแรงดันเฟส ซึ่งได้ผลของกระแสและแรงบิดซึ่งสอดคล้องกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรง กระจรอกต้นแบบ

จากการทบทวนวรรณกรรมจากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้ว สามารถสรุปเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ที่ได้แสดงใน ตาราง 9

ตาราง 9 ทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ชื่อผู้วิจัย	ชนิดมอเตอร์	วิธีการ	วัตถุประสงค์การวิเคราะห์
Zaki, A. and Ibrahim, S. (2005) [8]	มอเตอร์กระแสตรงแปรปรวนแม่เหล็กถาวร	- FEM	คำนวณค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ และฟลักซ์แม่เหล็กช่องว่างอากาศ
Tarvirdilu-Asl, R., Zeinali, R. and Ertan, H. (2017) [9]	มอเตอร์กระแสตรงแปรปรวนแม่เหล็กถาวร	- FEM	ออกแบบจำลองการพัฒนาโครงสร้างสเตเตอร์และจำนวนรอบของอาร์เมเจอร์ วิเคราะห์ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ภายในขั้วแม่เหล็ก แรงบิดกระแสต้านเข้า ประสิทธิภาพมอเตอร์
Hsiao, H., Hsiao, C. and Chen, G. (2019) [10]	มอเตอร์กระแสตรงแปรปรวนแม่เหล็กถาวร	-RMxprt -ANSYS Maxwell 2D	ออกแบบจำลองการพัฒนาขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ วิเคราะห์ความหนาแน่นและการกระจายฟลักซ์แม่เหล็ก

ชื่อผู้วิจัย	ชนิดมอเตอร์	วิธีการ	วัตถุประสงค์การวิเคราะห์
			แรงบิด ความเร็วรอบ ประสิทธิภาพมอเตอร์
Mithunraj, M., Gayathri, W., Prasanth, P., Kanagalakshmi, S. and Archana, R. (2019) [11]	มอเตอร์กระแส ตรงไร้แปรงถ่าน	-RMxprt -ANSYS Maxwell 2D	วิเคราะห์ความหนาแน่นและ การกระจายฟลักซ์แม่เหล็ก ของ สเตเตอร์และโรเตอร์ แรงบิด ความเร็วรอบ กระแส ขดลวด ประสิทธิภาพ มอเตอร์
Mukherjee, P., and Sengupta, M. (2014) [12]	มอเตอร์กระแส ตรงไร้แปรงถ่าน	- FEM	ออกแบบจำลองการพัฒนา สเตเตอร์ วิเคราะห์ความ หนาแน่นและการกระจาย ฟลักซ์แม่เหล็ก สเตเตอร์และ โรเตอร์
Tikhonova, O. V. and Plastun, A. T. (2018) [13]	มอเตอร์เหนี่ยวนำ	-ANSYS Maxwell 3D	การคำนวณฟลักซ์แม่เหล็ก กระแส แรงบิด การสูญเสีย ตัวประกอบกำลัง
Tikhonova, O., Malygin, I. and Plastun, A. (2017) [14]	มอเตอร์เหนี่ยวนำ แบบขดลวดวง แหวน	-ANSYS Maxwell 2D -ANSYS Maxwell 3D	สร้างแบบจำลองเพื่อ ออกแบบจำนวนรอบของ ขดลวดสเตเตอร์และแรงดัน เฟส ทิศทางสนามแม่เหล็กใน โครงสเตเตอร์ ค่าแรงบิดและ กระแสขณะสตาร์ท
Ho, S. L., Chen, N. and Fu, W. N. (2010) [15]	มอเตอร์แบบ แม่เหล็กถาวร	- FEM	สร้างแบบจำลองเพื่อลด แรงบิดพื้นเพื่อง
Chen, N., Ho, S. L. and Fu, W. N. (2010) [16]	มอเตอร์กระแส ตรงไร้แปรงถ่าน	- FEM	สร้างแบบจำลองเพื่อลด แรงบิดพื้นเพื่อง

ชื่อผู้วิจัย	ชนิดมอเตอร์	วิธีการ	วัตถุประสงค์การวิเคราะห์
Cao, R., Mi, C. and Cheng, M. (2012) [17]	มอเตอร์แม่เหล็ก ถาวรสลับฟลักซ์ และ มอเตอร์ แม่เหล็กถาวร ภายใน	- FEM	ตรวจสอบเปรียบเทียบ สมรรถนะมอเตอร์แม่เหล็ก ถาวรสลับฟลักซ์ (FSPM) กับ มอเตอร์แม่เหล็กถาวรภายใน (IPM)
Zhao, W., Ji, J., Liu, G., Du, Y. and Cheng, M. (2014) [18]	แม่เหล็กถาวร พลิกกลับเชิง เส้นฟลักซ์โมดูล	- FEM	การออกแบบและวิเคราะห์ มอเตอร์แม่เหล็กถาวรพลิก กลับเชิงเส้นฟลักซ์โมดูล
Zhao, W., Lipo, T. A. and Kwon, B. (2014) [19]	มอเตอร์แม่เหล็ก ถาวรแบบ เรเดียลฟลักซ์ แบบสเตเตอร์คู่ และ มอเตอร์ แม่เหล็กถาวร ฟลักซ์ตามแนว แกนแบบ สเตเตอร์คู่	- FEM	การออกแบบและวิเคราะห์ มอเตอร์ เช่น แรงเคลื่อน ไฟฟ้าเคลื่อนกลับ แรงบิด พื้นเพื่อ แรงบิด การสูญเสีย และประสิทธิภาพ เป็นต้น
Zhao, W., Lipo, T. A. and Kwon, B. (2015) [20]	มอเตอร์แม่เหล็ก ถาวรแบบฝังที่ พื้นผิว	- FEM	การออกแบบและวิเคราะห์ มอเตอร์ เช่น แรงบิด และ ประสิทธิภาพ เป็นต้น
Liu, X. and Fu, W. N. (2016) [21]	มอเตอร์ซิงโครนัส แบบแม่เหล็ก ถาวรกระตุ้นแยก	- FEM	การออกแบบและวิเคราะห์ มอเตอร์ เช่น แรงบิด การ สูญเสีย และประสิทธิภาพ เป็นต้น
Wang, X., Hahh, S. and Jung, H. (2003) [22]	มอเตอร์สตาร์ท แม่เหล็กถาวรด้วย ขั้วเสริม	- FEM	การปรับปรุงการออกแบบ และวิเคราะห์มอเตอร์ เช่น แรงบิด การกระแสอาร์ เมเจอร์ ฟลักซ์แม่เหล็ก และ ความเร็วรอบ

ชื่อผู้วิจัย	ชนิดมอเตอร์	วิธีการ	วัตถุประสงค์การวิเคราะห์
Zheng, P., Sui, Y., Tong, C., Lipo, T. A. and Wang, A. (2011) [23]	มอเตอร์ซิงโครนัส แม่เหล็กถาวร แบบหลายเฟส	- FEM	การปรับปรุงการออกแบบ และวิเคราะห์แรงบิดมอเตอร์
Rezal, M. and Ishak, D. (2012) [24]	มอเตอร์ซิงโครนัส แม่เหล็กถาวร	- Opera 2D	วิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้า ย้อนกลับที่เหนี่ยวนำ แรงบิด ฟลักซ์แม่เหล็ก ของมอเตอร์
Kim, K. (2014) [25]	มอเตอร์ซิงโครนัส แม่เหล็กถาวร ภายใน	- FEM	วิเคราะห์ผลของความอึดตัวของแม่เหล็กในแกนกลางได้ ขนาดกระแสและมุม แรงดัน แรงบิด ความเร็ว
Fu, W. N., Chen, Y. and Guo, X. (2015) [26]	มอเตอร์ซิงโครนัส แบบกระตุ้นแยก แบบ แม่เหล็ก ถาวรสองชั้นแบบ ใหม่ และ มอเตอร์ ซิงโครนัสแบบ กระตุ้นแยกแบบ แม่เหล็กถาวรสาม ชั้นแบบใหม่	- FEM	วิเคราะห์สนามแม่เหล็ก แรงบิด
Nakata, T., Sanada, M., Morimoto, S. and Inoue, Y. (2017) [27]	มอเตอร์ซิงโครนัส แม่เหล็กถาวร ภายใน	- FEM -Genetic Algorithm	ออกแบบอัตโนมัติของ มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็ก ถาวรภายใน วิเคราะห์ ความเร็ว แรงบิด
Huang, X., Zhu, M., Chen, W., Zhang, J. and Fang, Y. (2017) [28]	มอเตอร์แม่เหล็ก ถาวร	- FEM	วิเคราะห์ความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก การสูญเสีย แกนเหล็ก

ชื่อผู้วิจัย	ชนิดมอเตอร์	วิธีการ	วัตถุประสงค์การวิเคราะห์
Wu, J., Wang, J., Gan, C., Sun, Q. and Kong, W. (2018) [29]	มอเตอร์ซิงโครนัส แบบแม่เหล็กถาวร	-ANSYS Maxwell 2D	วิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกระแสประสิทธิภาพของระบบแรงบิด ความเร็วรอบ
Zhin, L., Sun, J., Ma, X., Han, W. and Luo, X. (2019) [30]	มอเตอร์ซิงโครนัส แม่เหล็กถาวร	- ANSYS Maxwell 2D - ANSYS Maxwell 3D	วิเคราะห์ความเค้น อุณหภูมิ
Fitouri, M., Bensalem, Y. and Abdelkrim, M. N. (2020).[31]	มอเตอร์ซิงโครนัส แม่เหล็กถาวร	- ANSYS Maxwell 2D	วิเคราะห์กระแส แรงบิด และความหนาแน่นของ ฟลักซ์
Adnan, A. and Ishak, D. (2009) [32]	มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	- Opera2d	วิเคราะห์แรงบิดฟันเฟือง แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ โลชั่น แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเฟส แรงบิดด้านออก แรงบิดกระเพื่อม ความเหนียวนำ ระดับความอึดตัวของเหล็กและปัญหาการล้างอำนาจแม่เหล็กของแม่เหล็ก
Gottipati, P. and Mendrela, E. A. (2010) [33]	มอเตอร์ไร้แปรงถ่านแม่เหล็กถาวรแบบไม่มีแปรงถ่านแบบโรเตอร์คู่	- FEM	วิเคราะห์แรงบิด และความหนาแน่นของฟลักซ์
Gottipati, P., Dobzhanskyi, O. and Mendrela, E. A. (2010) [34]	มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	- FEM	วิเคราะห์กระแส แรงบิด และความหนาแน่นของ ฟลักซ์

ชื่อผู้วิจัย	ชนิดมอเตอร์	วิธีการ	วัตถุประสงค์การวิเคราะห์
Chiu, C., Chiu, Y., Liang, Y. and Liang, R. (2010) [35]	มอเตอร์พัดลม กระแสตรงไร้ แปรงถ่านแบบ เฟสเดียว	- FEM	วิเคราะห์กระแสคอปล์และ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ
Chen, Y., Chiu, C., Tang, Z., Liang, Y. and Liang, R. (2011) [36]	มอเตอร์พัดลม กระแสตรงแบบไร้ แปรงถ่านแบบ เฟสเดียว	- FEM	วิเคราะห์กระแสคอปล์และ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ
Abirami, S., Bala, S. M. and Priya, R. J. (2014) [37]	มอเตอร์ฮับ กระแสตรงไร้ แปรงถ่าน	- FEM	วิเคราะห์แรงบิดและแรงบิด ของฟันเฟือง
Stoica, C., Dumitru, C. and Melcescu, L. (2014) [38]	มอเตอร์กระแส ตรงแบบไร้แปรง ถ่านพลังงานต่ำ	- FEM	วิเคราะห์แรงบิดและความ หนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
Dwivedi, A., Singh, S. K. and Srivastava, R. K. (2014) [39]	มอเตอร์กระแส ตรงแบบไร้แปรง ถ่าน	- FEM	วิเคราะห์แรงบิดและความ หนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
Sim, Y., Niguchi, N. and Hirata, K. (2015) [40]	มอเตอร์กระแส ตรงแบบไร้แปรง ถ่าน	- FEM	วิเคราะห์แรงบิด กระแสและ แรงดัน
Usman, A. and Rajpurohit, B. S. (2019) [41]	มอเตอร์กระแส ตรงแบบไร้แปรง ถ่าน	- ANSYS Maxwell 2D	วิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้า ย้อนกลับของมอเตอร์ กระแสเฟส แรงบิด แม่เหล็กไฟฟ้า ความเร็วทาง กล และความหนาแน่นของ ฟลักซ์แม่เหล็ก
Hwang, K. and Kwon, B. (2019) [42]	มอเตอร์กระแส ตรงแบบไร้แปรง ถ่าน	- FEM	วิเคราะห์แรงบิด กำลังและ ความเร็วรอบ

ชื่อผู้วิจัย	ชนิดมอเตอร์	วิธีการ	วัตถุประสงค์การวิเคราะห์
Yanawati, Y., Halim, N. H., Daut, I., Shafiqin, S. N., Pungut, I., Syatirah, M. N., Gomesh, N. and Abdullah, M. (2011) [43]	มอเตอร์เหนี่ยวนำ	- Motorsolve	วิเคราะห์พารามิเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ การสูญเสีย และประสิทธิภาพ
Kamoun, J. K., Hadj, N. B., Chabchoub, M., Neji, R. and Ghariani, M. (2013) [44]	มอเตอร์เหนี่ยวนำ	- FEMM	วิเคราะห์เส้นฟลักซ์และระลอกของแรงบิด
Pallis, I. K., Gyftakis, K. N. and Kappatou, J. C. (2013) [45]	มอเตอร์เหนี่ยวนำ	- FEM	วิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กและการสูญเสีย
Haisen, Z., Yilong, W., Yuhan, W., Yang, Z. and Guorui, X. (2014) [46]	มอเตอร์เหนี่ยวนำ	- T-S FEM	วิเคราะห์กำลังการสูญเสีย
Ahn, J., Lee, D., Park, G., Kim, Y., Kim, J. and Jung, S. (2014) [47]	มอเตอร์เหนี่ยวนำ	- FEM	วิเคราะห์ความอิมิตัวของแม่เหล็กและการสูญเสียแกนเหล็ก
Seyedshenava, S. and Ahmadpour, A. (2021) [48]	มอเตอร์เหนี่ยวนำ	- FEM	วิเคราะห์ความเร็วและแรงบิด
Naderi, P., Heidary, M. and Vahedi, M. (2020) [49]	มอเตอร์เหนี่ยวนำ เชิงเส้น	- ANSYS Maxwell	วิเคราะห์ความเร็วและความหนาแน่นของฟลักซ์

ชื่อผู้วิจัย	ชนิดมอเตอร์	วิธีการ	วัตถุประสงค์การวิเคราะห์
Hasegawa, Y., Nakamura, K. and Ichinokura, Q. (2012) [50]	มอเตอร์รีลัก - FEM แทนซ์		วิเคราะห์แรงบิด กำลังและ ประสิทธิภาพ
Kiyota, K., Kakishima, T., Sugimoto, H. and Chiba, A. (2013) [51]	มอเตอร์แบบรีลัก - FEM แทนซ์แบบสวิตซ์		วิเคราะห์แรงบิด กระแสและ การเชื่อมโยงฟลักซ์
Navardi, M. J., Babaghorbani, B. and Ketabi, A. (2014) [52]	มอเตอร์แบบรีลัก - FEM แทนซ์แบบสวิตซ์		วิเคราะห์แรงบิด กระแสและ การเชื่อมโยงฟลักซ์
Wu, L., Ding, W. and Hu, Y. (2016) [53]	มอเตอร์รีลัก - FEM แทนซ์สวิตซ์		วิเคราะห์เส้นฟลักซ์ ความ หนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก เส้นโค้งมุมกับแรงบิด เส้นโค้ง ตัวเหนี่ยวนำกับมุม เส้นโค้ง กระแสในสภาวะคงตัว
Roy, D., Mainuddin, D. and Sengupta, M. (2017) [54]	มอเตอร์รีลัก - FEM แทนซ์สวิตซ์		วิเคราะห์ความเหนี่ยวนำ แรงบิด ความเร็วรอบ กระแส และความหนาแน่น ฟลักซ์ แม่เหล็ก
Wang, Y., Fu, W. N. and Niu, S. (2016) [55]	มอเตอร์ซิงโครนัส - TS-FEM แบบกระตุ้นสอง สเตเตอร์แบบ ไฮบริด		วิเคราะห์แรงบิด และความ หนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
Cha, J., Son, R., Yoo, G. and Jeon, M. (2017) [56]	มอเตอร์ซิงโครนัส - FEM แบบขั้วยื่น - ANSYS Maxwell		วิเคราะห์แรงดัน การอิมิตัว ของสนามแม่เหล็ก

ชื่อผู้วิจัย	ชนิดมอเตอร์	วิธีการ	วัตถุประสงค์การวิเคราะห์
Kocman, S., Hrubý, T., Pečínka, P. and Neumann, A. (2016) [57]	มอเตอร์อชิงโครนัสแบบกรงกระรอกสามเฟส	- COMSOL Multiphysics	วิเคราะห์กระแสเตเตอร์และแรงบิด
Zhang, C., Tseng, K. J. and Nguyen, T. D. (2010) [58]	มอเตอร์ชิงโครนัสแม่เหล็กถาวรฟลักซ์แนวแกนและมอเตอร์เหนี่ยวนำฟลักซ์แนวแกน	- FEM	วิเคราะห์แรงบิด กำลัง และประสิทธิภาพ
Padilha, J. B., Peng, P. K., Sadowski, N. and Batistela, N. J. (2017) [59]	มอเตอร์ฮิสเทรีซิส	- FEM	วิเคราะห์แรงบิด ความเร็ว และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
Tao, W., Li, G., Ju, L., Zhou, R. and Hu, C. (2018) [60]	มอเตอร์ทรงกลม	- FEM	วิเคราะห์แรงบิด และสนามแม่เหล็ก
Timimy, A., Giangrande, P., Degano, M., Galea, M. and Gerada, C. (2017) [61]	มอเตอร์ชิงโครนัสแม่เหล็กถาวรและมอเตอร์สวิตชิงฟลักซ์แม่เหล็กถาวร	- FEM	วิเคราะห์แรงบิด และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

จากการทบทวนวรรณกรรมจะเห็นได้ว่าการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมสำหรับการวิเคราะห์การออกแบบและการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ได้หลากหลายประเภท โดยการสร้างแบบจำลองของมอเตอร์ทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เพื่อจำลองผลการทำงานก่อนที่จะสร้างจริงจะช่วยให้ได้ค่าพารามิเตอร์ในการสร้างมอเตอร์ที่เหมาะสม เช่น โครงสร้าง ขนาด รูปทรง วัสดุของ สเตเตอร์ โรเตอร์ อาร์เมเจอร์ ตัวนำ แม่เหล็กถาวร แปร่งถ่าน คอสมิวเตเตอร์ เป็นต้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ ได้แก่ การออกแบบสร้างมอเตอร์ การพัฒนาโครงสร้าง

มอเตอร์ ทิศทางและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก กระแส แรงดัน ความเร็วรอบ แรงบิด การสูญเสีย ประสิทธิภาพ เป็นต้น จากหลักการที่ได้ศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการดำเนินงานวิจัย การออกแบบและวิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์กระแสตรงแบบแปร่งถ่าน ในลำดับต่อไป



บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ขอกล่าวถึงการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ไฟฟ้า รถจักรยานไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปร่งถ่าน เพื่อให้ทราบถึงประเภทและสถานการณ์ของยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนประกอบของรถจักรยานไฟฟ้า ซึ่งมีอุปกรณ์สำคัญ คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถจักรยานไฟฟ้า เพื่อช่วยในการออกแบบแม่เหล็กถาวรและโครงสร้างของมอเตอร์ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์สำหรับรถจักรยานไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งแสดงรายละเอียดตามหัวข้อดังต่อไปนี้

ยานยนต์ไฟฟ้า

1. ประเภทยานยนต์ไฟฟ้า [62]

ยานยนต์ไฟฟ้า หมายถึง ยานยนต์ที่มีการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าอย่างเดียว หรือยานยนต์ที่อาศัยเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในมาใช้ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งในส่วนของ การขับเคลื่อนและผลิตไฟฟ้าเก็บสะสมในแบตเตอรี่ หรือเทคโนโลยีการใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อนำมาเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนก็ถือว่าเป็นยานยนต์ไฟฟ้าด้วย ดังนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ตามภาพ 17 ดังนี้

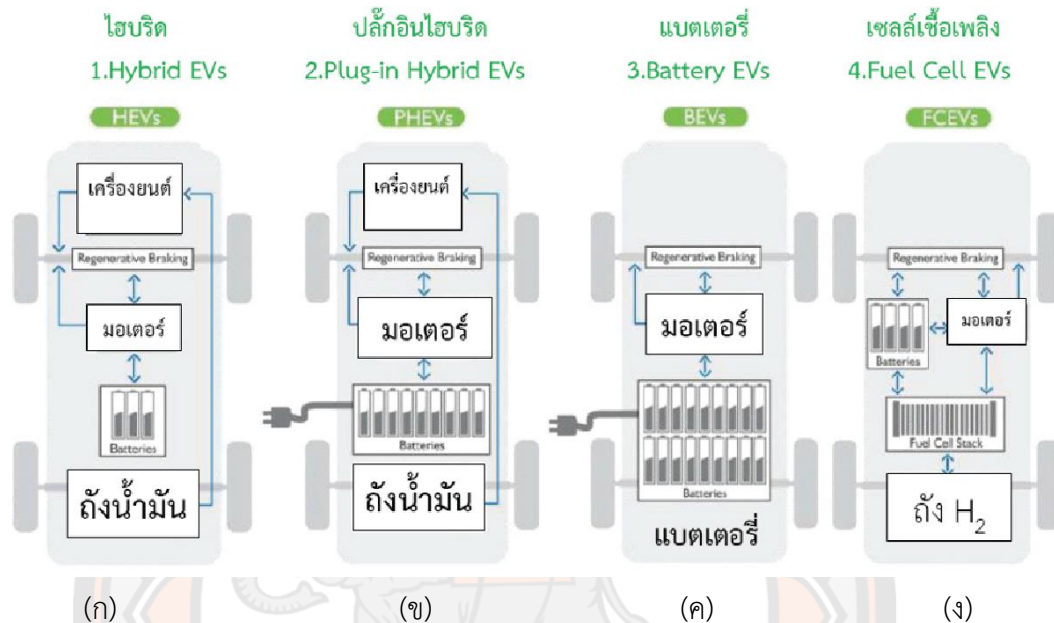
1.1 ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด (Hybrid Electric Vehicle, HEV)

ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด ประกอบด้วยเครื่องยนต์ลูกสูบเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนหลัก ซึ่งใช้เชื้อเพลิงที่บรรจุในยานยนต์ทำงานร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อเพิ่มกำลังของยานยนต์ให้เคลื่อนที่ซึ่งทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น รวมทั้งยังสามารถนำพลังกลที่เหลือหรือไม่ใช้ประโยชน์เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเก็บในแบตเตอรี่ เพื่อใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้าต่อไป จึงมีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่ายานยนต์ปกติ ซึ่งกำลังที่ได้จากการจากเครื่องยนต์และมอเตอร์ไฟฟ้าทำให้อัตราเร่งของยานยนต์สูงกว่ายานยนต์ที่มีเครื่องยนต์ลูกสูบขนาดเดียวกัน

1.2 ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดปลั๊กอิน (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)

เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่พัฒนาต่อมาจากยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด โดยสามารถประจุพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟนอก (Plug-In) ทำใหยานยนต์สามารถใช้พลังงานพร้อมกันจาก 2 แหล่ง จึงสามารถวิ่งระยะทางและความเร็วที่เพิ่มขึ้นด้วยพลังงานจากไฟฟ้าโดยตรง ยานยนต์แบบ PHEV มีการออกแบบอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ แบบ Extended range EV (EREV) และแบบ Blended

PHEV โดยแบบ EREV การเน้นทำงานโดยใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลักก่อน แต่แบบ Blended PHEV มีการทำงานผสมผสานระหว่างเครื่องยนต์และไฟฟ้า ดังนั้นยานยนต์ไฟฟ้าแบบ EREV สามารถวิ่งด้วยพลังงานไฟฟ้าอย่างเดียวนานกว่าแบบ Blended PHEV



ภาพ 17 ยานยนต์ไฟฟ้า

(ก) ไฮบริด (ข) ไฮบริดปลั๊กอิน (ค) แบตเตอรี่ (ง) เซลล์เชื้อเพลิง [15]

1.3 ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle, BEV)

เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่มีเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังให้ยานยนต์เคลื่อนที่และใช้พลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในแบตเตอรี่เท่านั้น ไม่มีเครื่องยนต์อื่นในยานยนต์ ดังนั้นระยะทางวิ่งของยานยนต์จึงขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของแบตเตอรี่รวมทั้งน้ำหนักการบรรทุก

1.4 ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)

เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่มีเซลล์เชื้อเพลิงที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยตรงจากไฮโดรเจน ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความจุพลังงานจำเพาะที่สูงกว่าแบตเตอรี่ที่มีอยู่ในปัจจุบัน ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นเทคโนโลยีที่บริษัทรถยนต์เชื่อว่าเป็นคำตอบที่แท้จริงของพลังงานสะอาดในอนาคต อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดในเรื่องการผลิตไฮโดรเจนและโครงสร้างพื้นฐาน

2. สถานการณ์ยานยนต์ไฟฟ้าโลก

2.1 ตลาดรถยนต์ไฟฟ้าโลก (Electronic Vehicle Market) [63]

องค์การพลังงานนานาชาติ (International Energy Agency: IEA) ได้รายงานภาพรวมยานยนต์ไฟฟ้าของโลกเป็นประจำทุกปี โดยรวบรวมสถานะการพัฒนาในปัจจุบันและข้อมูลในอดีต เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการเติบโตของยานยนต์ไฟฟ้าจนถึงปีพ.ศ. 2573 (ค.ศ. 2030) ในประเด็นที่สำคัญ ได้แก่ (1) การเติบโตของยานยนต์ไฟฟ้า และสถานีอัดประจุไฟฟ้า (2) ราคาของยานยนต์ไฟฟ้า (3) การใช้พลังงานไฟฟ้า (4) การปลดปล่อยมลพิษ และ (5) ความต้องการใช้แบตเตอรี่โดย IEA ได้เผยแพร่รายงานภาพรวมยานยนต์ไฟฟ้า พ.ศ. 2562 (ค.ศ. 2019) เมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม 2562 สรุปการเติบโตของยานยนต์ไฟฟ้าและสถานีอัดประจุไฟฟ้า ดังนี้

1) รถยนต์ไฟฟ้า ปีพ.ศ. 2561 (ค.ศ. 2018) มีทั้งหมดมากกว่า 5.1 ล้านคัน เพิ่มขึ้นประมาณ 2 ล้านคัน จากปีพ.ศ. 2560 โดยพิจารณาตลาดรถยนต์ไฟฟ้าในปีพ.ศ. 2561 ตามการขยายตัว 3 ลำดับ ได้ดังนี้

1.1) ประเทศจีนเป็นตลาดรถยนต์ไฟฟ้าใหญ่ที่สุดในโลก สามารถขายรถยนต์ไฟฟ้าได้ประมาณ 1.1 ล้านคัน ทำให้มีรถยนต์ไฟฟ้าทั้งหมด 2.3 ล้านคัน ซึ่งเกือบจะเป็นครึ่งหนึ่งของรถยนต์ไฟฟ้าทั่วโลก

1.2) สหภาพยุโรปสามารถขายรถยนต์ไฟฟ้าได้ประมาณ 385,000 คัน ทำให้มีรถยนต์ไฟฟ้าประมาณ 1.2 ล้านคัน

1.3) สหรัฐอเมริกาสามารถขายรถยนต์ไฟฟ้าได้ประมาณ 361,000 คัน ทำให้มีรถยนต์ไฟฟ้าประมาณ 1.1 ล้านคัน

2) รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าและรถสามล้อไฟฟ้า จำนวน 300 ล้านคัน ส่วนใหญ่อยู่ในประเทศจีนเพิ่มขึ้นประมาณ 10 ล้านคันต่อปีซึ่งตลาดรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศจีนใหญ่มากกว่าประเทศอื่นรวมกันมากกว่า 100 เท่า

3) รถโดยสารไฟฟ้า ในปีพ.ศ. 2561 มีมากกว่า 460,000 คัน เพิ่มขึ้นประมาณ 100,000 คัน จากปีพ.ศ. 2560

4) จำนวนสถานีอัดประจุไฟฟ้า สถานีสำหรับรถยนต์ขนาดเล็กมีจำนวนเพิ่มขึ้นเป็น 5.2 ล้านสถานี สถานีส่วนใหญ่เป็นการเติมประจุแบบช้า (Normal Charging) ติดตั้งที่บ้านและที่ทำงาน สถานีอัดประจุสาธารณะประมาณ 540,000 สถานีเป็นสถานีอัดประจุไฟฟ้าแบบเร็ว (Quick Charging) จำนวน 150,000 สถานีส่วนสถานีอัดประจุไฟฟ้าสำหรับรถโดยสาร ซึ่งเป็นสถานีอัดประจุไฟฟ้าแบบเร็วมีจำนวน 156,000 สถานี

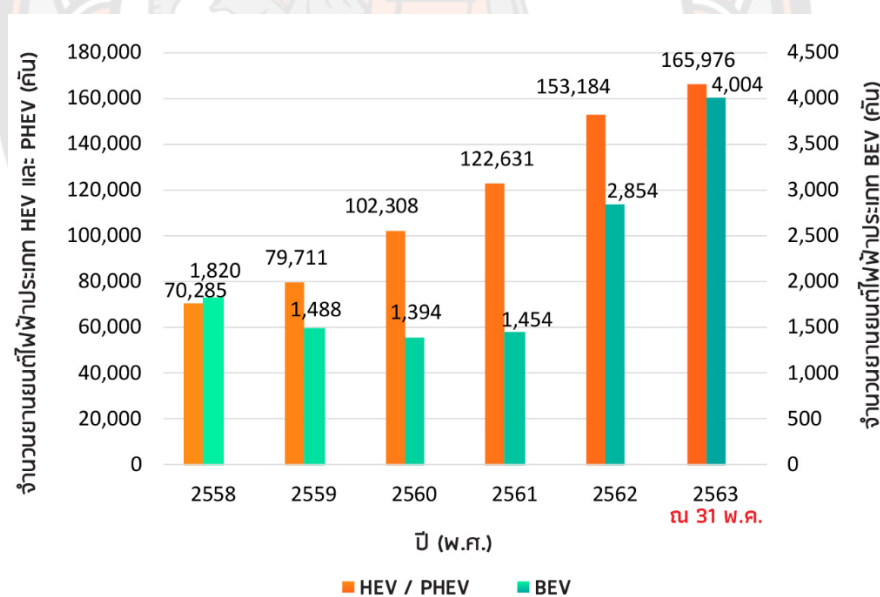
5) การใช้พลังงานไฟฟ้า ยานยนต์ไฟฟ้าบนท้องถนนในปีพ.ศ. 2561 ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 58 เทราวัตต์ชั่วโมง (TWh) และปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก 41 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 36 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

3. สถานการณ์ยานยนต์ไฟฟ้าในไทย

3.1 การใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า [64]

การใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าภายในประเทศในภาพรวมมีทิศทางเพิ่มขึ้น พิจารณาได้จากสถิติข้อมูลการ ของกรมการขนส่งทางบก ตั้งแต่ พ.ศ.2558 ถึง วันที่ 31 พ.ค. 2563 ดังนี้

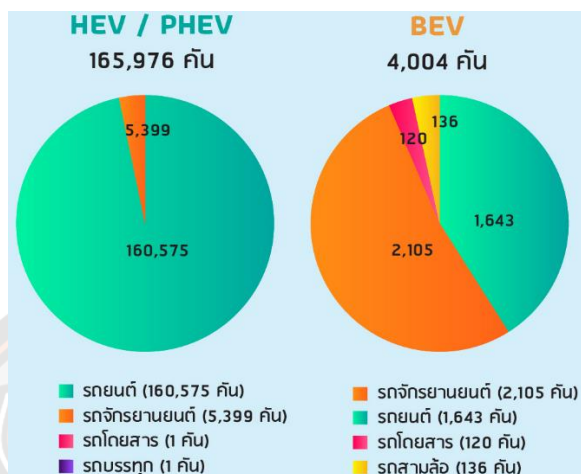
ข้อมูลจำนวนยานยนต์ไฟฟ้าสะสมในประเทศไทย ตั้งแต่ พ.ศ.2558 ถึง วันที่ 31 พ.ค. 2563 แสดงในภาพ 18 พบว่า ในกลุ่มของรถไฮบริด (HEV) และปลั๊กอินไฮบริด (PHEV) มียอดจดทะเบียนสะสมกว่า 165,976 คัน และในกลุ่มของรถแบตเตอรี่ (BEV) มียอดจดทะเบียนสะสมกว่า 4,004 คัน



ภาพ 18 จำนวนยานยนต์ไฟฟ้าสะสมในประเทศไทย ตั้งแต่ พ.ศ. 2558 – 31 พ.ค. 2563

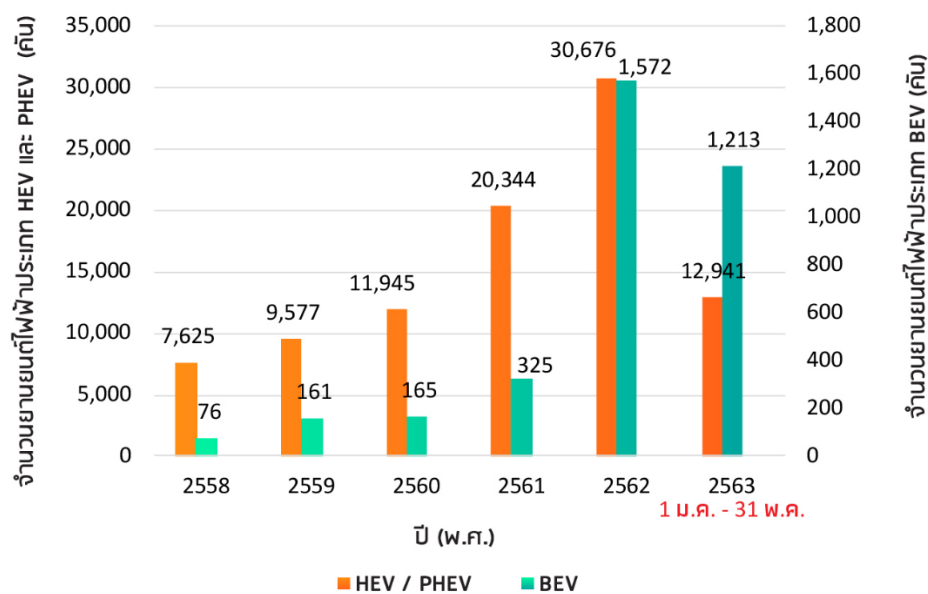
ข้อมูลการจำแนกจำนวนยานยนต์ไฟฟ้าสะสมในประเทศไทย ข้อมูล ณ วันที่ 31 พ.ค. 2563 แสดงในภาพ 19 พบว่าในกลุ่มของรถไฮบริด (HEV) และปลั๊กอินไฮบริด (PHEV) แบ่งออกเป็น รถยนต์จำนวน 160,575 คัน รถจักรยานยนต์ จำนวน 5,399 คัน รถโดยสาร จำนวน 1คัน และรถบรรทุก จำนวน 1 คัน และในส่วนกลุ่มของรถแบตเตอรี่ (BEV) แบ่งออกเป็น รถยนต์จำนวน

1,643 คัน รถจักรยานยนต์ จำนวน 2,105 คัน รถโดยสาร จำนวน 120 คัน และรถสามล้อ จำนวน 136 คัน



ภาพ 19 จำแนกจำนวนยานยนต์ไฟฟ้าสะสมในประเทศไทย
ข้อมูล ณ วันที่ 31 พ.ค. 2563

ข้อมูลจำนวนยานยนต์ไฟฟ้าที่จดทะเบียนใหม่ในประเทศไทย ตั้งแต่ ปี 2558 จนถึง 31 พ.ค. 2563 แสดงในภาพ 20 พบว่า โดยในกลุ่มของรถไฮบริด (HEV) และปลั๊กอินไฮบริด (PHEV) มีแนวโน้มจดทะเบียนใหม่เพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งในปี 2562 มีการจดทะเบียนจำนวน 30,676 คัน เมื่อเทียบกับปี 2561 การจดทะเบียนจำนวน 20,344 คัน จะเห็นได้ว่าเพิ่มขึ้นกว่า 51% และในส่วนกลุ่มของรถแบตเตอรี่ (BEV) มีแนวโน้มจดทะเบียนใหม่เพิ่มขึ้นทุกปีเช่นกัน ซึ่งในปี 2562 มีการจดทะเบียนจำนวน 1,572 คัน เมื่อเทียบกับปี 2561 การจดทะเบียนจำนวนเพียง 325 คัน จะเห็นได้ว่าเพิ่มขึ้นกว่า 380%



ภาพ 20 จำนวนยานยนต์ไฟฟ้าที่จดทะเบียนใหม่ในประเทศไทย
ตั้งแต่ พ.ศ. 2558 – 31 พ.ศ. 2563

รถจักรยานไฟฟ้า

จักรยานไฟฟ้า (E-Bike) หมายถึง จักรยานที่ใช้มอเตอร์เป็นกำลังในการขับเคลื่อนและจะใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานเพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ ส่วนประกอบที่สำคัญของจักรยานไฟฟ้าประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้า ชุดวงจรควบคุม ชุดคันเร่ง และแบตเตอรี่ เป็นต้น โดยจักรยานไฟฟ้าที่ขายตามท้องตลาดแสดงในภาพ 21



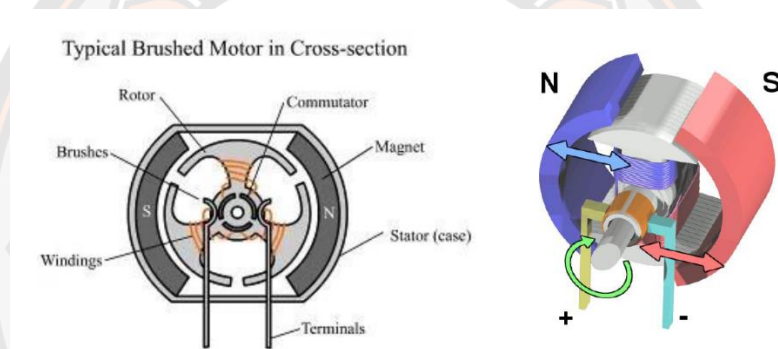
ภาพ 21 รถจักรยานไฟฟ้า

1. มอเตอร์ไฟฟ้า [65]

มอเตอร์ที่นิยมใช้จัดสร้างจักรยานไฟฟ้าจะมีอยู่ 2 แบบคือ มอเตอร์แบบมีแปรงถ่านและไม่มีแปรงถ่าน โดยทั้งสองแบบจะเป็นมอเตอร์ชนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) ซึ่งจะรับพลังงานจากแบตเตอรี่

1.1 มอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน (Brushed DC Motor)

มอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านประกอบด้วยแกนหมุน (Rotor) โดยมีขดลวดเหนี่ยวนำ (Armature) หลายชุดอยู่รอบ ๆ เพื่อรับกระแสไฟฟ้าจากคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ที่ต่ออยู่กับปลายของขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กผลัดหรือติดกับแม่เหล็กถาวรบนสเตเตอร์ (Stator) ทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ ดังแสดงในภาพที่ 22 โดยคอมมิวเตเตอร์นั้นมีหน้าสัมผัสกับแปรงถ่านเพื่อรับกระแสไฟจากสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงจากภายนอก



ภาพ 22 โครงสร้างภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน

การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน เริ่มจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายไฟฟ้าผ่านขั้วที่ต่ออยู่กับแปรงถ่านไปยังขดลวด เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งหากมีขั้วตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กที่ติดอยู่กับสเตเตอร์ก็จะติดกัน แต่หากมีขั้วเหมือนกันจะผลัดกันส่งผลให้เกิดแรงบิดและทำให้แกนหมุน ทั้งนี้ การจัดวางแปรงถ่านที่สัมผัสกับการหมุนของคอมมิวเตเตอร์ ทำให้เมื่อแกนหมุนเคลื่อนที่ แปรงถ่านจะสัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ชุดใหม่ ซึ่งจะสร้างสนามแม่เหล็กในทิศทางใหม่ ส่งผลให้เกิดการหมุนของแกนอย่างต่อเนื่อง

มอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านมีข้อดีคือมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน แข็งแรงและเชื่อถือได้ สามารถต่อกับแบตเตอรี่ได้โดยตรง มีสายไฟเพียง 2 เส้นที่ต่อเข้าไปยังมอเตอร์ทำให้จัดระเบียบสายไฟได้ง่าย และทนทานต่อการใช้งานในสภาวะสั่นสะเทือน จึงได้รับความนิยมถูกนำมาใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าความเร็วต่ำ เช่น รถกอล์ฟไฟฟ้า เป็นต้น อย่างไรก็ตามมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านนั้นมีข้อเสียบางประการ ได้แก่ แปรงถ่านจะยึดตัวได้น้อยลงเนื่องมาจากการสึกกร่อนของ

คอมมิวเตเตอร์ นอกจากนี้มอเตอร์ประเภทดังกล่าวยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำลงเมื่อใช้งานที่ความเร็วรอบสูง เนื่องจากการเสียดสีระหว่างคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน นอกจากนี้การใช้สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขดลวดในแกนหมุนจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back Voltage) ขึ้นในขดลวดต้านกับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายได้ ซึ่งมีผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดลดลงด้วย ส่งผลให้แรงบิดลดลง ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งคือ สำหรับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน แรงบิดแปรผันตรงกับกระแส และความเร็วรอบแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นค่าแรงบิดสูงสุดจะถูกจำกัดไว้เพื่อจำกัดพิกัดของกระแสในระบบ ทั้งจากระบบควบคุมมอเตอร์ และความต้านทานภายในของแบตเตอรี่

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน มีดังต่อไปนี้

ข้อดี

- มีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และแข็งแรง สามารถใช้งานโดยต่อกับแบตเตอรี่ ต่อหมุนกลับทางโดยการกลับขั้วได้
- ใช้งานที่สั้นสะดวก และมีความชื้นได้โดยไม่มีปัญหามากนัก
- มีสายเพียงแค่สองเส้นที่เข้ามอเตอร์ ทำให้ง่ายต่อการจัดสาย บางบริษัทผู้ผลิตใช้มอเตอร์ประเภทนี้เพื่อให้ถอดล้อออกได้เร็ว และเปลี่ยนชุดควบคุมง่ายและรวดเร็ว

ข้อด้อย

- มีฝุ่นที่เกิดจากการสึกหรอของแปรงถ่าน
- เกิดประกายไฟจากกระบวนการ Commutation
- เกิดการรบกวนทางสนามแม่เหล็ก
- เกิดเสียงรบกวนทางกล
- อายุสั้นและประสิทธิภาพต่ำ
- มีขีดจำกัดเรื่องความเร็ว

1.2 มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor หรือ BLDC)

ด้วยราคาของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ลดต่ำลง ส่งผลให้ราคาของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านสูงกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านเล็กน้อย จึงทำให้มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านได้รับความนิยมนำมาใช้เพื่อขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านมีโครงสร้างตรงข้ามกับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน โดยมีแกนหมุน (Rotor) เป็นแม่เหล็กถาวร และมีขดลวดเหนี่ยวนำอยู่ที่สเตเตอร์ โดยขดลวดเหนี่ยวนำมีจำนวนไม่น้อยกว่าสามชุด มอเตอร์ชนิดนี้จึงสามารถทำงานได้โดยการจ่ายไฟฟ้าไปยังขดลวดแต่ละชุดเป็นเฟสสลับกันไปเรื่อย ๆ เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กดึงและผลักแกนหมุนอย่างต่อเนื่อง โดยมีการตรวจจับตำแหน่งเพื่อเริ่มทำงานโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall Sensor) ดังแสดงในภาพ 23 มอเตอร์ชนิดนี้สามารถปรับแรงบิดได้โดยปรับการจ่ายกระแสไฟฟ้า และ

ปรับความเร็วรอบได้โดยการปรับความถี่ในการสลับกระแสไฟฟ้าของขดลวด ซึ่งสามารถเรียกการทำงานของมอเตอร์ที่มีความเร็วในการหมุนตรงกับความเร็วของการหมุนของสนามแม่เหล็กว่าเป็นการทำงานแบบ Synchronous นั่นเอง ถึงแม้ว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจะมีข้อดีคือมีประสิทธิภาพที่สูง และไม่ต้องมีแปรงถ่านซึ่งจะสึกหรอเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียคือต้องมีชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อน สามารถทำงานในสภาวะการใช้งานต่าง ๆ ของยานยนต์ได้ เช่น สามารถกันน้ำ ทนต่อการสั่นสะเทือนและความร้อนได้ เป็นต้น นอกจากนี้สายไฟที่ต่อเข้ามอเตอร์และชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ยังมีหลายสาย ต่างกับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านที่เพียงจ่ายไฟที่สายไฟทั้งสองด้านก็ทำงานได้ ดังนั้นการติดตั้งสายไฟจึงต้องระมัดระวังเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรขึ้น



ภาพ 23 โครงสร้างภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

ในการใช้งานมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน พบว่ามีลักษณะการสร้างแรงบิดและกำลังคล้ายกับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน และจากการที่แกนหมุนเป็นแม่เหล็กถาวร จึงทำให้เกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อใช้งานมอเตอร์ที่ความเร็วสูง

เมื่อพิจารณาตัวโรเตอร์ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก 4 ส่วนด้วยกัน คือ

1) แกนเฟลา (Shaft) เป็นตัวสำหรับยึดคอมมิวเตเตอร์ และยึดแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ (Armature Core) ประกอบเป็นตัวโรเตอร์แกนเฟลาจะวางอยู่บนแปรงเพื่อบังคับให้หมุนอยู่ในแนวหนึ่งไม่มีการสั่นสะเทือนได้

2) แกนเหล็กอาร์เมเจอร์ (Armature Core) ทำด้วยแผ่นเหล็กบางอาบฉนวน (Laminated Sheet Steel) เป็นที่สำหรับพันขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งสร้างแรงบิด (Torque)

3) คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ทำด้วยทองแดงออกแบบเป็นซี่แต่ละซี่มีฉนวนไมก้า (Mica) คั่นระหว่างซี่ของคอมมิวเตเตอร์ ส่วนหัวซี่ของคอมมิวเตเตอร์จะมีร่องสำหรับใส่ปลายสายของขดลวดอาร์เมเจอร์ ตัวคอมมิวเตเตอร์นี้อัดแน่นติดกับแกนเพลลาเป็นรูปกลมทรงกระบอกมีหน้าที่สัมผัสกับแปรงถ่าน (Carbon Brushes) เพื่อรับกระแสจากสายป้อนเข้าไปยังขดลวดอาร์เมเจอร์ เพื่อสร้างฟลักซ์แม่เหล็กอีกส่วนหนึ่งให้เกิดการหักล้างและเสริมกันกับฟลักซ์แม่เหล็กอีกส่วน ซึ่งเกิดจากขดลวดขั้วแม่เหล็กดังกล่าวมาแล้วเรียกว่าปฏิกิริยามอเตอร์ (Motor Action)

4) ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding) เป็นขดลวดพันอยู่ในร่องสลอท (Slot) ของแกนอาร์เมเจอร์ขนาดของลวดจะเล็กหรือใหญ่และจำนวนรอบจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการออกแบบของตัวมอเตอร์ ให้เหมาะสมกับงานต่าง ๆ ในการใช้งานมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน พบว่ามีลักษณะการสร้างแรงบิด และกำลังคล้ายกับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน และจากการที่แกนหมุนเป็นแม่เหล็กถาวร จึงทำให้เกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อใช้งานมอเตอร์ที่ความเร็วสูง

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน มีดังต่อไปนี้

ข้อดี

- ใช้งานได้ในช่วงความเร็ว 0 – 100,000 รอบต่อนาที
- ให้แรงบิดดีที่ความเร็วสูง
- แรงบิดและขนาดดีกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน
- การกระจายความร้อนในขดลวดสเตเตอร์ดีกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน
- ประสิทธิภาพสูงเหมาะกับการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน

ข้อด้อย

- มีค่าใช้จ่ายจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สูงกว่า
- ชุดควบคุมการขับเคลื่อนยุ่งยากกว่า

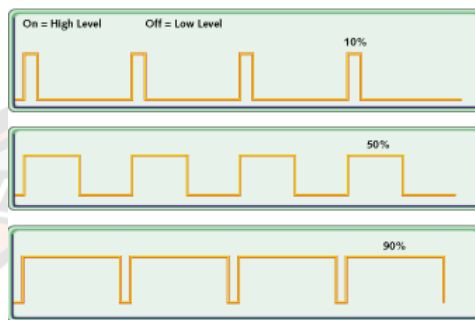
2. ชุดวงจรควบคุม [66]

ชุดวงจรควบคุม จะแบ่งเป็นชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน และชุดควบคุม มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

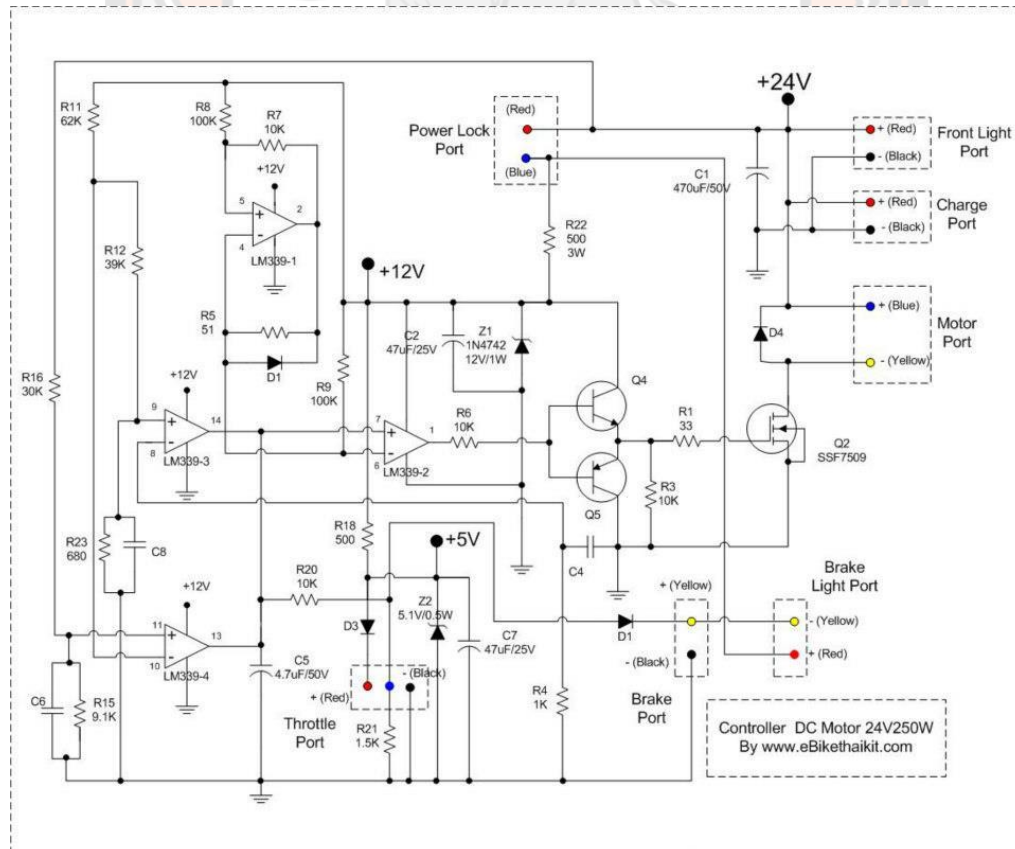
2.1 ชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน

ชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน ที่นิยมใช้ คือ วงจรแบบ PWM (Plus with Modulation) วงจรลักษณะนี้จะดีกว่าวงจรควบคุมมอเตอร์แบบลิเนียร์ทั่วไป คือ ขณะทำงานจะสูญเสียพลังงานต่ำและมีความร้อนน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการทำงานจะเป็นลักษณะรูปคลื่น

พัลส์สี่เหลี่ยมดังภาพ 24 ซึ่งสามารถปรับช่วง On-Off ได้ หรือที่เรียกว่า Duty Cycle เช่น ถ้า Duty Cycle มีค่า 100% สัญญาณที่ปล่อยก็จะเป็นลักษณะเส้นตรงเสมือนกับการปล่อยแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์แบบเต็มกำลัง และหาก Duty Cycle ลดลงเหลือ 50 % สัญญาณที่ได้ก็จะเป็นลักษณะ 1/2 ของสัญญาณทั้งหมดใน 1 คาบเวลา ส่งผลให้มีแรงดันไฟฟ้าออกเพียง 50% ของแหล่งจ่ายทั้งหมด การทำงานในลักษณะนี้ทำให้สูญเสียพลังงานต่ำเนื่องจากภาค Output ไม่ต้องทำงานตลอดเวลา โดยวงจรชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน แสดงในภาพ 25



ภาพ 24 ลักษณะรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมของวงจรแบบ PWM



ภาพ 25 วงจรชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน

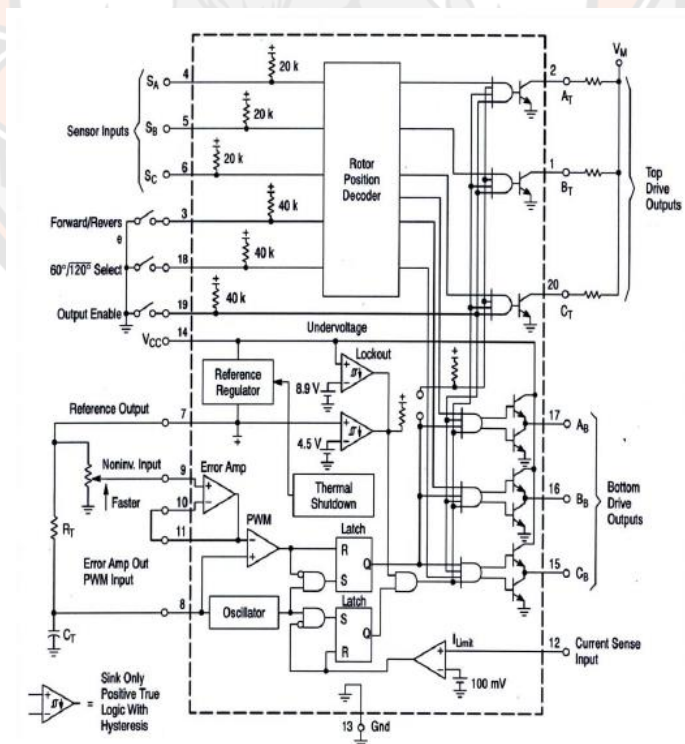
2.2 ชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

ส่วนในชุดควบคุมของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ในภาค Driver จะนิยมใช้ไอซี เบอร์ MC 33033 ซึ่งเป็นไอซีสำเร็จรูปที่ถูกรอกออกมาเพื่อใช้งานกับมอเตอร์ชนิดไร้แปรงถ่าน วิธีการใช้งานไอซีดังกล่าว สามารถดูได้จากคุณสมบัติของไอซี หรือ Data Sheet เป็นหลัก โดยสรุปลักษณะการทำงานของไอซีเบอร์ MC33033 ดังนี้

- ขา 4, 5, 6 คือ Hall Sensor Encoder
- ขา 2, 1, 20 เป็นขาขั้วเกทชุดบนของภาค Power Output
- ขา 15, 16, 17 เป็นขาขั้วเกทชุดล่างของภาค Power Output
- ขา 9 เป็นขาต่อกับคั่นแรง
- ขา 14 เป็นไฟบวก 30V
- ขา 13 เป็นกราวด์
- ขา 18 เป็น Option (เดินหน้า/ถอยหลัง)
- ขา 19 เป็น Output Enable Active Low ต่อลงกราวด์

ลักษณะวงจร IC MC33033 ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน แสดงในภาพ

26



ภาพ 26 วงจร IC MC33033 ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน

3. ชุดคันเร่ง [66]

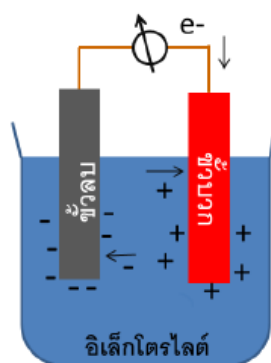
หลักการทำงานของคันเร่ง คล้ายกับตัวต้านทานปรับค่าได้ทั่วไป คือ สามารถปรับค่าความต้านทานเพื่อแบ่งแรงดันต้านออก แต่ภายในจะใช้ เซนเซอร์แบบฮอลล์ (Hall Sensor) แทน เนื่องจากคงทนและแม่นยำ ซึ่ง Hall Sensor มีลักษณะเหมือนทรานซิสเตอร์มี 3 ขาคือ ขาไฟเลี้ยง 5 โวลต์ ขากราวด์ และขาไฟออก ซึ่งภายในคันเร่งจะมีแม่เหล็กลักษณะทรงโค้งฝังอยู่ในตัวบิต เมื่อทำการบิดคันเร่งก็จะเกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ต่างกันไป ให้ Hall sensor แปรผันเป็นแรงดันไฟฟ้าส่งไปให้ชุดควบคุมรับรู้อีกทีหนึ่ง โดยชุดคันเร่ง แสดงในภาพ 27



ภาพ 27 ชุดคันเร่ง

4. แบตเตอรี่ [65]

แบตเตอรี่ถือเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่สำคัญชิ้นหนึ่งของยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าที่เก็บพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน โดยส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ขั้วบวก (แคโทด) ขั้วลบ (แอโนด) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้งาน ขั้วลบหรือขั้วแอโนดเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาเคมีส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) และขั้วบวก หรือขั้วแคโทดเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาเคมีที่รับอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยารีดักชัน) โดยอิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะวิ่งผ่านลวดโลหะก่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น โดยอิเล็กโทรไลต์เป็นสารละลายที่ไม่นำอิเล็กตรอนแต่มีหน้าที่ส่งผ่านไอออนที่จำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้อย่างต่อเนื่องจนกว่าแบตเตอรี่จะหมด ดังแสดงในภาพ 28



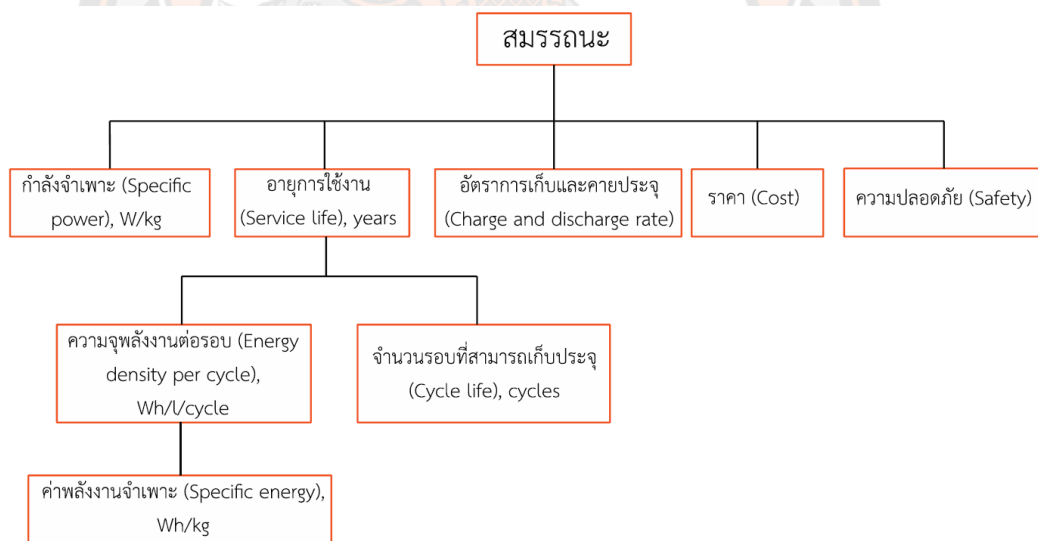
ภาพ 28 ภาพหลักการทำงานของแบตเตอรี่

เมื่อพิจารณาประเภทของแบตเตอรี่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) แบตเตอรี่แบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง หรือ แบตเตอรี่ชนิดปฐมภูมิ (Primary Batteries)

2) แบตเตอรี่แบบอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ หรือ แบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ (Rechargeable Batteries) โดยแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าจะเป็นแบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีของขั้วแคโทดและแอโนดที่แตกต่างกันหลายประเภท ดังจะได้กล่าวต่อไป

การวัดสมรรถนะของแบตเตอรี่สามารถวัดได้หลายมิติ โดยมีมิติที่สำคัญได้แก่ กำลังจำเพาะ (Specific Power, W/kg) อายุการใช้งาน (Service Life) อัตราการเก็บและคายประจุ (Charge and Discharge Rate) ราคาและความปลอดภัย (Cost and Safety) อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ขึ้นกับความจุ (Capacity, Ah) และจำนวนรอบที่สามารถเก็บประจุ (Charge Cycles) ซึ่งค่าความจุจะขึ้นกับค่าพลังงานจำเพาะ (Specific Energy, Wh/kg) หรือค่าความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density, Wh/L) ดังนั้นองค์ประกอบในการพิจารณาสมรรถนะของแบตเตอรี่จึงเขียนได้ดังภาพ 29



ภาพ 29 สมรรถนะแบตเตอรี่ในมิติต่าง ๆ

นอกจากนี้ คำจำกัดความอื่น ๆ ที่ใช้สำหรับแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้า มีดังต่อไปนี้

1) C-Rate (Charge Rate) ซึ่งบ่งบอกถึงอัตราการอัดประจุหรืออัตราการจ่ายไฟของแบตเตอรี่เทียบกับปริมาณความจุของแบตเตอรี่ที่เต็ม โดย

(h)C หมายถึง แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสออกไปโดยใช้เวลา 1/h ชั่วโมงกว่าจะหมด หรือแบตเตอรี่จะถูกอัดประจุด้วยอัตราการกระแสที่ทำให้แบตเตอรี่เต็มภายในเวลา 1/h ชั่วโมง ตัวอย่างเช่น

1C หมายถึง แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสออกไปโดยใช้เวลา 1 ชั่วโมงกว่าจะหมด หรือ แบตเตอรี่จะถูกอัดประจุด้วยอัตราการกระแสที่ทำให้แบตเตอรี่เต็มภายในเวลา 1 ชั่วโมง

2C หมายถึง แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสออกไปโดยใช้เวลา 1/2 ชั่วโมงกว่าจะหมด หรือ แบตเตอรี่จะถูกอัดประจุด้วยอัตราการกระแสที่ทำให้แบตเตอรี่เต็มภายในเวลา 1/2 ชั่วโมง

C/4 หมายถึง แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสออกไปโดยใช้เวลา 4 ชั่วโมงกว่าจะหมด หรือ แบตเตอรี่จะถูกอัดประจุด้วยอัตราการกระแสที่ทำให้แบตเตอรี่เต็มภายในเวลา 4 ชั่วโมง

2) DOD (Depth of Discharge) ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณความจุที่แบตเตอรี่ถูกใช้ไปเทียบกับความจุทั้งหมด เช่น

10% DOD หมายถึง แบตเตอรี่ถูกใช้งานไป 10% และเหลือความจุอยู่ 90%

80% DOD หมายถึง แบตเตอรี่ถูกใช้งานไป 80% และเหลือความจุอยู่ 20% เป็น

ต้น

โดยการใช้งานแบตเตอรี่ในงานแต่ละประเภท DOD ที่แบตเตอรี่ต้องเจอบ่อย ๆ นั้นจะอยู่ในระดับที่ไม่เท่ากัน เช่น ในยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ขับเคลื่อนทั้งหมด DOD จะอยู่ระหว่าง 20% ในขณะที่รถประเภทไฮบริดนั้น DOD ของแบตเตอรี่จะอยู่ที่ 40%

3) SOC (State of Charge) ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณความจุที่แบตเตอรี่มีอยู่ เช่น

10% SOC หมายถึง แบตเตอรี่มีความจุอยู่ 10%

80% SOC หมายถึง แบตเตอรี่มีความจุอยู่ 80%

โดยการใช้งานแบตเตอรี่ในงานแต่ละประเภท SOC ที่แบตเตอรี่ต้องเจอบ่อย ๆ นั้นจะอยู่ในระดับที่ไม่เท่ากันเช่นเดียวกับ DOD เช่นยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ขับเคลื่อนทั้งหมด SOC จะอยู่ระหว่าง 20-95% ในขณะที่รถประเภทไฮบริด นั้น SOC ของแบตเตอรี่จะอยู่ที่ระดับ 40-80%

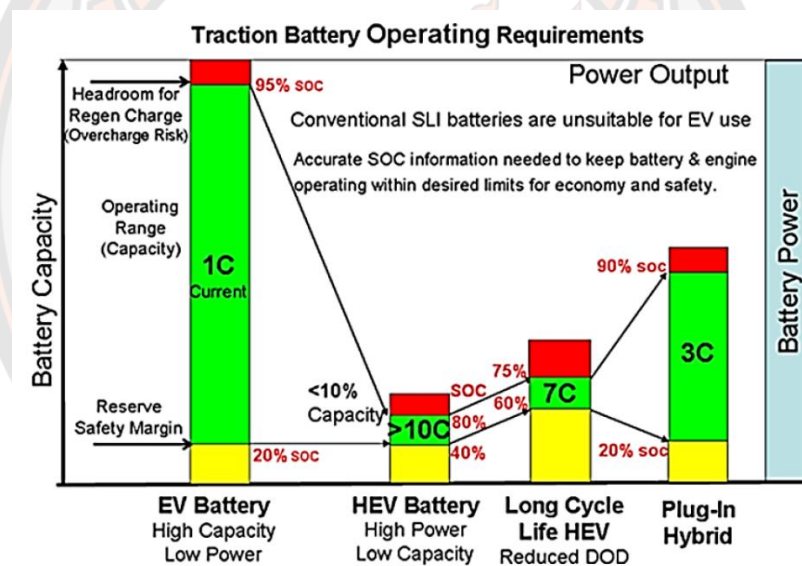
4) P/E Ratio (Power to Energy Ratio) ซึ่งบ่งบอกถึงกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ให้ได้เทียบกับความจุของพลังงานทั้งแบตเตอรี่ เช่น

$P/E = 2:1$ ของแบตเตอรี่ 1 kWh หมายความว่า แบตเตอรี่จะมีศักยภาพในการให้กำลังไฟฟ้าเป็น 2 kW

$P/E = 1:3$ ของแบตเตอรี่ 1 kWh หมายความว่า แบตเตอรี่จะมีศักยภาพในการให้กำลังไฟฟ้าเป็น 1/3 kW

ทั้งนี้แบตเตอรี่ที่มีค่า P/E ratio สูงจะเรียกแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็น High Power Battery ซึ่งมักจะถูกใช้สำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงเป็นช่วงสั้นๆ เช่น ใช้สำหรับการติดเครื่องยนต์ หรือสำหรับการเร่งเครื่องยนต์เท่านั้น แต่ไม่ใช่เป็นแหล่งพลังงานหลักในการขับเคลื่อน

การใช้งานแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ นั้นจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้า ดังแสดงในภาพ 30 โดยแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ จะมีความแตกต่างกันในด้านต่าง ๆ เช่น วัสดุที่ใช้สร้างแบตเตอรี่ โครงสร้างของแบตเตอรี่ ความจุประจุและค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกและขั้วลบของแบตเตอรี่ชนิดนั้น ๆ รวมไปถึงลักษณะการใช้งาน เช่น อุณหภูมิที่ใช้ หรือปริมาณไฟที่ถูกใช้ไป หรืออัตราการอัดประจุ (C-Rate) หรือปริมาณประจุของแบตเตอรี่ (SOC) ณ ขณะนั้น ส่วนอายุการใช้งานแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้งาน ความรวดเร็วในการดึงพลังงานไปใช้ (Load Level) ชนิดและลักษณะอนุภาคของส่วนประกอบขั้ว ชนิดของอิเล็กโทรไลต์ และ %DOD เป็นต้น



ภาพ 30 คุณลักษณะด้าน C-Rate, SOC และ %DOD ของแบตเตอรี่ที่จำเป็นสำหรับการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ

ในช่วงปี ค.ศ. 1880 การใช้แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเกิดขึ้นประมาณ 20 ปี หลังจากการค้นพบแบตเตอรี่กรดตะกั่วขึ้นเป็นครั้งแรก ถึงแม้ว่ายานยนต์ไฟฟ้าจะได้รับความนิยมลดลงหลังจากมีการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในที่มีประสิทธิภาพสูงเพิ่มขึ้น ประกอบกับราคาของน้ำมันที่ถูกลง และระยะทางขับเคลื่อนที่ไกลขึ้น อย่างไรก็ตามในช่วงปี ค.ศ. 1970 พบว่ามีการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะประเภทแบตเตอรี่ที่ใช้ยังเป็นประเภทกรดตะกั่วเช่นเดิม จนกระทั่ง

วิวัฒนาการของแบตเตอรี่ได้รับการพัฒนาเพิ่มขึ้นอีกหลายประเภท โดยแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมสำหรับใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน ได้แก่

4.1. แบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว (Lead Acid Battery)

แบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่วถูกคิดค้นขึ้นมาครั้งแรกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1859 โดย Gaston Plante และได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 19 โดยปัจจุบันเป็นแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้งานมากที่สุดในยานยนต์ โดยใช้เป็นแบตเตอรี่สำหรับติดเครื่องยนต์เป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากแบตเตอรี่ประเภทนี้มีราคาถูก เนื่องจากวัสดุที่ใช้สามารถหาได้ง่ายและมีกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน แบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่วมีขั้วลบทำจากตะกั่วที่มีลักษณะพรุน (Porous Lead) ส่วนขั้วบวกเป็นตะกั่วออกไซด์ที่มีลักษณะพรุนเช่นเดียวกัน โดยมีกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟิวริกเข้มข้นเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และมีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดบนขั้วทั้งสองในระหว่างการใช้งาน (จ่ายประจุ)

โดยแบตเตอรี่กรดตะกั่วสามารถแบ่งประเภทย่อยได้อีก 3 ประเภท คือ

1) แบตเตอรี่กรดตะกั่ว สำหรับติดเครื่องยนต์ (Starting Lighting Ignition หรือ SLI Battery) ซึ่งเป็นแบตเตอรี่กรดตะกั่วที่มีสัดส่วนการใช้งานมากที่สุด โดยถูกใช้สำหรับงานที่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูง เป็นระยะสั้น เช่น สำหรับติดเครื่องยนต์ในรถยนต์ หรือติดเครื่องยนต์สำหรับเครื่องจักร ทั้งนี้ แบตเตอรี่สำหรับติดเครื่องยนต์จะมีอายุการใช้งานสั้น ประมาณ 1.5 - 3 ปี

2) แบตเตอรี่กรดตะกั่ว แบบ Deep Cycle หรือ Traction Battery ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่สำหรับใช้งานที่ต้องมีการจ่ายกระแสต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน โดยมีการใช้งานอยู่หลายประเภท เช่น สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า รถกอล์ฟ รถ Forklift อุปกรณ์ทางการแพทย์ หรือสำหรับเก็บไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนอื่น เช่น จากเซลล์แสงอาทิตย์ หรือจากกังหันลม เป็นต้น

3) แบตเตอรี่กรดตะกั่ว แบบ Stationary ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่ถูกออกแบบมาให้สามารถจ่ายกระแสต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน แต่แบตเตอรี่ชนิดนี้ต่างจากแบตเตอรี่ประเภท deep cycle โดยที่มักใช้งานในสถานะประจุถูกอัดอยู่เต็มอยู่ตลอดเวลา และมีการใช้งานเป็นครั้งคราวเท่านั้น มักใช้เพื่อการสำรองไฟฟ้าเวลาฉุกเฉิน (UPS) และใช้งานอยู่กับที่ ดังนั้น ความจุพลังงานต่อน้ำหนักจึงไม่มีความสำคัญเท่าแบตเตอรี่ประเภท Deep Cycle ที่ต้องมีการเคลื่อนที่จึงมีขนาดค่อนข้างใหญ่กว่าแบตเตอรี่ประเภทอื่นที่ความจุเดียวกัน แบตเตอรี่ชนิดนี้ได้ถูกออกแบบให้มีอายุการใช้งานนานกว่า 3 ปี และอาจจะใช้งานได้ยาวนานถึง 5-10 ปี

โดยสรุป แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วมีข้อดีและข้อด้อยดังต่อไปนี้

ข้อดี

- มีราคาถูกกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นและมีความซับซ้อนน้อยจึงสามารถผลิตได้

ง่าย

- มีการพัฒนามานานแล้ว จึงมีความเชื่อถือได้และหาข้อมูลต่าง ๆ ได้ง่าย
- มีความทนทานหากใช้งานอย่างถูกต้อง
- มีระดับการคายประจุด้วยตัวเอง (Self-Discharge) ต่ำ
- ไม่ต้องการการบำรุงรักษามากนักโดยเฉพาะแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วแบบ

แห้ง

- ไม่เกิดปัญหา Memory Effect
- สามารถคายประจุ (Discharge) ได้มาก
- มีขนาดให้เลือกหลากหลาย

ข้อด้อย

- ความจุของพลังงานต่อน้ำหนักต่ำทำให้มีน้ำหนักมาก
- แบตเตอรี่จะเสื่อมสภาพเร็วหากไม่มีประจุ
- ตะกั่วและกรดซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักเป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม
- มีระเบียบที่เข้มงวดในการขนส่งโดยเฉพาะแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วแบบ

เปียก เพราะอาจเกิดการรั่วซึมของกรดออกจากแบตเตอรี่ได้

4.2 แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิล-แคดเมียม (Nickel-Cadmium)

แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียมเป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิชนิดอัลคาไลน์ชนิดแรก โดยชื่ออัลคาไลน์นั้นมาจากสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ซึ่งมีธาตุในหมู่อัลคาไลน์เป็นส่วนประกอบ เช่น สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ (KOH) เป็นต้น แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นที่รู้จักในนาม “ไนแคด” โดยไนแคดได้ถูกค้นพบมานานกว่าศตวรรษโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดน แต่ไม่ได้นำเข้าสู่ตลาดจนกระทั่งช่วงเวลา 40 ปีที่ผ่านมา โดยข้อดีของแบตเตอรี่ชนิดนี้อยู่ที่ไม่ต้องการการดูแลรักษา เช่น การเติมน้ำกลั่น เก็บไว้ได้นานไม่ว่าจะอยู่ในสถานะที่มีประจุไฟฟ้าเต็มหรือไม่ สามารถอัดประจุไฟฟ้าได้เร็ว ใช้ได้ที่อุณหภูมิต่ำและค่าความต่างศักย์ขณะใช้งานคงที่ อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ประเภทนี้มีข้อเสียคือราคาวัตถุดิบและราคาการผลิตที่สูงกว่าแบตเตอรี่แบบกรดตะกั่วมาก อีกทั้งแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมี Memory Effect ซึ่งหมายถึงสภาวะที่แบตเตอรี่เสื่อมเนื่องจากการถูกใช้งานไม่หมดก่อนถูกอัดประจุไฟฟ้าอีกครั้งและมีความสูญเสียทางประจุไฟฟ้ามากกว่าแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว

องค์ประกอบหลักของแบตเตอรี่ชนิดนี้มี ขั้วลบซึ่งเป็นแคดเมียม (Cd) ขั้วบวกเป็น นิกเกิลออกไซด์ (NiO(OH)) โดยมีสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ (KOH) เป็นอิเล็กโทรไลต์ของแบตเตอรี่แบบอัลคาไลน์นี้ ซึ่งต่างจากแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วตรงที่อิเล็กโทรไลต์ไม่ได้ร่วมทำปฏิกิริยากับขั้วแบตเตอรี่โดยตรงเพียงแต่เป็นตัวนำไอออนเท่านั้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแคดเมียมเป็นสารมีพิษที่ค่อนข้างร้ายแรง การใช้งานและพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนี้จึงไม่ได้รับการสนับสนุนมากนัก

โดยสรุป แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม มีข้อดีและข้อด้อยดังต่อไปนี้

ข้อดี

- กำลังไฟสูง

ข้อด้อย

- แคดเมียมที่ใช้เป็นส่วนประกอบ เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม
- มีปัญหา Memory Effect จึงไม่สามารถอัดประจุในขณะที่แบตเตอรี่ยังมี

ประจุ เนื่องจากจะทำให้แบตเตอรี่ไม่จดจำระดับการอัดประจุสูงสุดได้

4.3 แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ (Ni-MH Battery)

แบตเตอรี่ชนิดนี้อาศัยปฏิกิริยาเคมีที่มีขั้วลบซึ่งเป็นโลหะผสม (M) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเกิดเป็นเมทัลไฮไดรด์ได้ โดยโลหะพวกนี้มักมีตัวย่องทางเคมีอยู่ในรูปแบบของ AB_2 หรือ AB_5 เช่น $ZrNi_2$ หรือ $LaNi_5$ ส่งผลให้แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์มีความจุพลังงานสูงกว่าแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่วมาก

การพัฒนาด้านอายุการใช้งานและความปลอดภัยทำให้แบตเตอรี่แบบนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ได้ถูกนำไปใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริดในยุคแรกๆ ที่ผลิตโดยบริษัท โตโยต้า จำกัด ซึ่งพัฒนาร่วมกับบริษัท Panasonic EV Energy จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทลูกของบริษัท พานาโซนิค จำกัด อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก เนื่องจากราคาแพงเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว ในขณะเดียวกันประสิทธิภาพโดยรวม เช่น ความจุพลังงาน อายุการใช้งาน และการบำรุงรักษา นั้นยังคงด้อยกว่าแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนซึ่งขณะนี้ เป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด เนื่องจากแบตเตอรี่ประเภทนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ จะเสื่อมสภาพหากไม่ถูกใช้งาน

โดยสรุป แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ มีข้อดีและข้อด้อยดังต่อไปนี้

ข้อดี

- กำลังไฟสูง
- ใช้เมทัลไฮไดรด์ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
- มีความหนาแน่นพลังงานหรือค่าพลังงานต่อน้ำหนักสูง
- อายุการใช้งานนาน มีจำนวนวัฏจักรการอัดประจุ (Charge) และคาย

ประจุ (Discharge) สูง

ข้อด้อย

- ราคาค่อนข้างสูง
- มีปัญหา Memory Effect จึงไม่สามารถอัดประจุในขณะที่แบตเตอรี่ยังมี

ประจุ เนื่องจากจะทำให้แบตเตอรี่ไม่จดจำระดับการอัดประจุสูงสุดได้

4.4 แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน (Li-ion Battery)

เนื่องจากข้อจำกัดทางความจุพลังงานของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ ข้างต้น การพัฒนาแบตเตอรี่จึงมุ่งไปสู่การคิดค้นแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดยแร่ลิเทียมมีข้อได้เปรียบกว่าสารที่ใช้ในแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ ในด้านพลังงานต่อน้ำหนักเนื่องจากลิเทียมเป็นธาตุที่มีน้ำหนักเบาเกือบที่สุดในตารางธาตุและมีค่าความเสถียรต่ำ ซึ่งทำให้แบตเตอรี่ประเภทนี้มีค่าความต่างศักย์และความจุพลังงานมากที่สุดเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ประเภทอื่น ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนยังไม่มีปัญหาเรื่อง Memory Effect อีกทั้งยังมีความสูญเสียทางประจุไฟฟ้าต่ำในขณะไม่ใช้งาน ทั้งนี้ บริษัท Sony จำกัด ได้นำเสนอแบตเตอรี่ชนิดนี้ออกสู่ตลาดเมื่อปี ค.ศ. 1991 และภายในระยะเวลาอันสั้นความต้องการของตลาดได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะการใช้งานสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบพกพา แม้ว่าแบตเตอรี่ชนิดนี้จะใช้ได้ไม่ดีเทียบเท่ากับแบตเตอรี่ประเภทไนแคดหรือนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ในช่วงอุณหภูมิต่ำและค่ากำลังต่อน้ำหนักและปริมาตรจะไม่สูงนักก็ตาม ในปัจจุบันส่วนแบ่งตลาดของแบตเตอรี่ชนิดนี้มีมากที่สุดในกลุ่มของแบตเตอรี่แบบอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ทั้งหมด

ในปัจจุบันแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนนิยมนำมาใช้ในการเก็บและให้พลังงานในยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อจำกัดเรื่องช่วงเวลาในการใช้งานและการประจุไฟ เนื่องจากต้องใช้เวลาในการประจุไฟฟ้าใหม่นานและให้พลังงานไม่เพียงพอต่อความต้องการ ดังนั้นหลายปีที่ผ่านมาจึงได้มีการวิจัยพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดใหม่ที่จะใช้ทดแทนแบตเตอรี่ประเภทเดิม เช่น การพัฒนาแบตเตอรี่ประเภทลิเทียม-แอร์ (Lithium-air) แบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถเพิ่มช่วงเวลาการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากความหนาแน่นพลังงานสูง โดยตามทฤษฎีแล้ว จะเทียบเท่ากับความหนาแน่นพลังงานของน้ำมันเชื้อเพลิง

โดยสรุป แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน มีข้อดีและข้อด้อยดังต่อไปนี้

ข้อดี

- มีค่าพลังงานต่อน้ำหนักสูง
- ไม่มีปัญหา Memory Effect
- มีอัตราการคายประจุตามธรรมชาติเมื่อไม่ได้ใช้งาน (Self-Discharge) ต่ำกว่าแบตเตอรี่ประเภทอื่น

ข้อด้อย

- อายุการใช้งานค่อนข้างสั้น
- ความต้านทานภายในเซลล์ (Cell Internal Resistance) จะเพิ่มขึ้นตามรอบการอัดประจุ และตามอายุของแบตเตอรี่ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการคายประจุลดลงเรื่อย ๆ

- ต้องมีอุปกรณ์และโครงสร้างด้านความปลอดภัย จึงทำให้แบตเตอรี่ชนิด ลิเทียมไอออนไม่ทนทานเท่ากับแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม หรือนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์

4.5 แบตเตอรี่ประเภทเมทัล-แอร์ (Metal-Air Battery)

แบตเตอรี่ประเภท Metal-Air ถูกพัฒนามาอย่างยาวนานตั้งแต่ช่วงทศวรรษที่ 1960 เนื่องจากในทางทฤษฎีแบตเตอรี่ประเภทนี้มีค่าความหนาแน่นพลังงานสูง ทั้งนี้ความพยายามในการพัฒนาแบตเตอรี่ประเภท Metal-air เพื่อใช้ในยานยนต์มีมาตั้งแต่ก่อนปี ค.ศ. 1979 ไม่ว่าจะเป็น Li-Air, Mg-Air, Al-Air หรือ Zn-Air แต่จนถึงปัจจุบันมีเพียงแบตเตอรี่ Zn-Air เท่านั้นที่ได้รับการพัฒนาและทดสอบจริงกับยานยนต์ไฟฟ้า

4.6 การเปรียบเทียบสมบัติของแบตเตอรี่

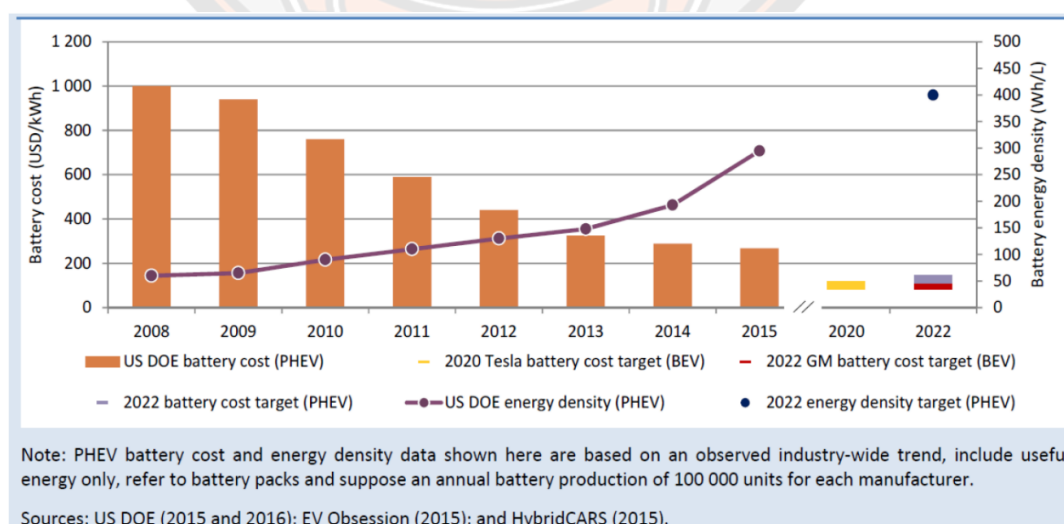
โดยสรุป หากพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติของแบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ดังแสดงในตาราง 10 พบว่ามีเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่มีความเหมาะสมกว่าแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว เช่น แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน ซึ่งมีค่าความจุพลังงานสูงสุดเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่นิยมใช้ในยานยนต์ทั้งหมด มีอายุการใช้งานนานกว่า อัตราประจุไฟฟ้าได้รวดเร็วกว่า ความต่างศักย์สูงกว่าซึ่งส่งผลให้ไม่จำเป็นต้องต่อแบตเตอรี่หลายเซลล์ และต้องการการดูแลรักษาที่น้อยกว่าแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่วและแบตเตอรี่ประเภทนิกเกิล ทำให้แบตเตอรี่ประเภทนี้เป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบันสำหรับการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าทั่วไป อย่างไรก็ตามปัจจุบันแบตเตอรี่กรดตะกั่วยังคงได้รับความนิยมสำหรับการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยเฉพาะรถจักรยานไฟฟ้า ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากลักษณะของการใช้และกลุ่มผู้ซื้อซึ่งมักขับเคลื่อนในระยะใกล้ และเป็นตลาดซึ่งคำนึงถึงราคาและค่าใช้จ่ายเมื่อซื้อเป็นหลัก แม้ว่าหากคำนึงถึงระยะยาวแล้วราคาของแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนต่อจำนวนครั้งในการใช้งานจะถูกกว่าเมื่อใช้งานในเขตร้อนชื้น เช่น ประเทศไทย

ในอดีต แบตเตอรี่สำหรับขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้ามีราคาสูงถึง 1,000 เหรียญสหรัฐต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง (USD/kWh) อย่างไรก็ตาม การวิจัยและพัฒนาแบตเตอรี่อย่างต่อเนื่อง ประกอบกับการขยายตัวของตลาดยานยนต์ไฟฟ้าทั่วโลกส่งผลให้ราคาของแบตเตอรี่ลดลงอย่างมากในปัจจุบันและยังมีสมรรถนะดีขึ้นอีกด้วย ซึ่งจากข้อมูลของกระทรวงพลังงานสหรัฐอเมริกา พบว่า ในปี ค.ศ. 2008 ราคาของแบตเตอรี่สำหรับขับเคลื่อนสูงถึง 1,000 USD/kWh และปรับตัวลดลงเหลือเพียง 268 USD/kWh ในปี ค.ศ. 2015 คิดเป็นร้อยละ 73 นอกจากนี้กระทรวงพลังงานสหรัฐอเมริกายังคาดการณ์ว่าราคาของแบตเตอรี่ขับเคลื่อนจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีการตั้งเป้าหมายราคาของแบตเตอรี่ในปี ค.ศ. 2022 เหลือเพียง 125 USD/kWh เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 31 อย่างไรก็ตามตัวเลขดังกล่าวยังคงสูงเมื่อเทียบกับการคาดการณ์ราคาของผู้ผลิตรายอื่น เช่น บริษัท General Motors จำกัด คาดว่าราคาของแบตเตอรี่จะเหลือเพียง 100 USD/kWh ในปี ค.ศ. 2022

ในขณะที่ บริษัท Tesla จำกัด คาดการณ์ราคาของแบตเตอรี่ขับเคลื่อนจะเหลือเพียง 100 USD/kWh ในปี ค.ศ. 2020

ตาราง 10 เปรียบเทียบสมบัติด้านต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า

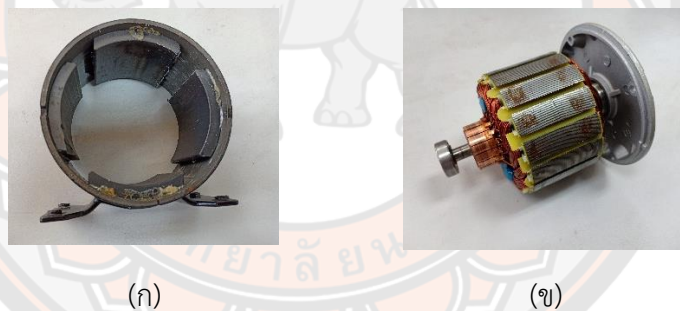
Specifications	Lead Acid	NiCd	NiCH	Li-ion		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
Specific Energy density (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	150-190	100-135	90-120
Internal Resistance (mΩ)	< 100	100-200	200-300	150-300	25-75	25-50
Cycle Life (80% discharge)	12V pack	6V pack	6V pack	7.2V	Per cell	Per cell
Fast-Charge Time	8-16h	1h typical	2-4h	2-4h	1h or less	1h or less
Cell Voltage (normal)	2V	1.2V	1.2V	3.6V	3.8V	3.3V
Maintenance Requirement	3-6 months	1-2 months	1-2 months	Not Required	Not Required	Not Required
In Use Since	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999



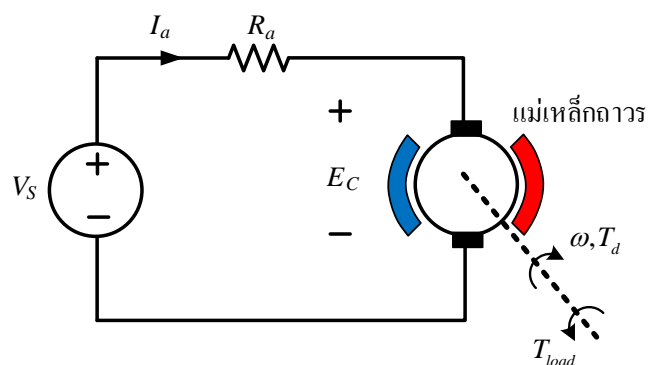
ภาพ 31 วิวัฒนาการของการพัฒนาแบตเตอรี่ด้านความหนาแน่นพลังงานและราคา

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปรงถ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปรงถ่าน มีโครงสร้างไม่ยุ่งยากและมีขนาดกระทัดรัดมีแรงบิดและประสิทธิภาพสูง โครงสร้างประกอบด้วย 2 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 32 คือ 1) สเตเตอร์ (Stator) เป็นส่วนที่ไม่มีเคลื่อนที่และอยู่นอก จะมีแม่เหล็กถาวรจำนวน 1 คู่หรือมากกว่าก็ได้ 2) โรเตอร์ (Rotor) เป็นชิ้นส่วนที่มีการหมุน ถูกติดตั้งอยู่ด้านใน โดยโรเตอร์ประกอบด้วยขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งมักทำด้วยทองแดงพันเป็นวงรอบแกนเหล็กอ่อน (Iron) ตามความยาวมอเตอร์ และเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟเข้าไป จะเกิดสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดแรงบิดส่งผลให้โรเตอร์หมุนได้ โดยที่คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) เป็นชิ้นส่วนที่ติดกับโรเตอร์ ทำจากโลหะแยกเป็นส่วนๆ คั่นด้วยฉนวน ขดลวดของโรเตอร์แต่ละขดจะต่อเข้ากับชุดของคอมมิวเตเตอร์ เพื่อรับกระแสไฟจากแปรงถ่านที่สัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์โดยตรง หน้าที่ของคอมมิวเตเตอร์ คือ จ่ายไฟเข้าไปยังแต่ละขดของขดลวด เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟในขดลวด ซึ่งส่งผลถึงทิศในการหมุนของมอเตอร์ การควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปรงถ่าน จะถูกควบคุมโดยการปรับแรงดันของอาร์เมเจอร์



ภาพ 32 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปรงถ่าน
(ก) สเตเตอร์และแม่เหล็กถาวร (ข) โรเตอร์ อาร์เมเจอร์และคอมมิวเตเตอร์



ภาพ 33 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน

จากภาพ 33 เป็นวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (E_c) และกระแสของอาร์เมเจอร์ (I_a) หาได้จากสมการที่ (1) และ (2)

$$E_c = k_c \omega \quad (1)$$

$$I_a = \frac{V_L - E_c}{R_a} \quad (2)$$

โดยที่ k_c คือ เป็นค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (V/rad/s)

แรงบิดของมอเตอร์หาได้จาก

$$T_d = k_c \phi I_a \quad (3)$$

โดยที่ ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Wb)

กำลังต้านออกและกำลังกลที่ใช้ในการขับโหลด

$$P_{out} = P_d = \omega T \quad (4)$$

กำลังต้านเข้าจากแหล่งจ่ายพลังงาน

$$P_{in} = V_s \times I_a \quad (5)$$

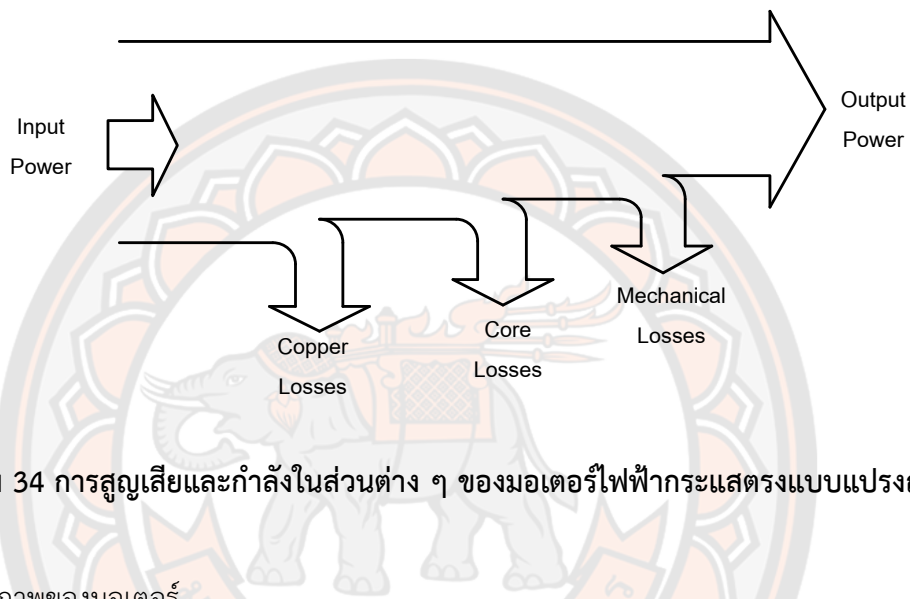
หรือ

$$P_{in} = P_{out} + \text{Losses}_{total} \quad (6)$$

กำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังแสดงในภาพ 34 ส่วนที่ 1 การสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Losses) เป็นกำลังสูญเสียในรูปของความร้อน เนื่องจากกระแสไหลผ่านค่าความต้านทานของขดลวดทองแดง การสูญเสียนี้อาจเป็นปฏิภาคโดยตรงกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดยกกำลังสองและค่าความต้านทานของขดลวด ส่วนที่ 2 การสูญเสียทางแกนเหล็ก (Core Losses) การสูญเสียส่วนใหญ่เกิดขึ้น ในแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ เมื่ออาร์เมเจอร์หมุนแกนเหล็กจะเคลื่อนที่ผ่านขั้วเหนือและขั้วใต้ของขั้วแม่เหล็ก ทำให้สนามแม่เหล็กที่ผ่านแกนเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสและกระแสไหลวน และส่วนที่ 3 การ

สูญเสียทางกล (Mechanical Losses) ประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากการเสียดสีหรือความฝืด (Friction Loss) ของตลับลูกปืนและบริเวณแปร่งถ่านกับคอมมิวเตเตอร์ และการสูญเสียเนื่องจากแรงต้านลม (Windage Loss) คือการสูญเสียที่เกิดจากการหมุนปะทะลมของตัวอาร์เมเจอร์และใบพัด สำหรับระบายความร้อน โดยกำลังสูญเสียรวมหาได้จากสมการที่ (6)

$$\text{Losses}_{\text{Total}} = \text{Copper Losses} + \text{Core Loss} + \text{Mechanical Losses} \quad (6)$$



ภาพ 34 การสูญเสียและกำลังในส่วนต่าง ๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปร่งถ่าน

ประสิทธิภาพของมอเตอร์

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \quad (7)$$

พลังงานของมอเตอร์ที่ใช้

$$\text{Energy Consumption} = P_{\text{in}} \times t \quad (8)$$

แม่เหล็กถาวร

แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) คือ แม่เหล็กที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กตลอดไป ถ้าได้รับอำนาจแม่เหล็กด้วยวิธีที่ถูกต้อง ซึ่งแม่เหล็กถาวรนี้จะทำมาจากโลหะแข็งผสมเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ เหล็กผสมนิเกิล และโคบอลต์ผสมนิเกิลและอลูมิเนียม เป็นต้น

1. แม่เหล็กถาวรชนิดเซรามิก หรือเฟอร์ไรต์ (Ceramic Magnet or Ferrite Magnet)

ในปี 1952 แม่เหล็กถูกสร้างขึ้นจากเซรามิกเป็นครั้งแรก ด้วยการผลิตแม่เหล็กจากเซรามิก วิศวกรจึงสามารถสร้างแม่เหล็กให้เป็นรูปทรงใดก็ได้ตามต้องการ การทำแม่เหล็กเซรามิกจากส่วนผสมที่สร้างขึ้นอย่างประณีต สามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่ทรงพลังกว่าที่เป็นธรรมชาติได้ แม่เหล็กเซรามิกมีราคาถูกกว่าและมีประสิทธิภาพมากกว่าและได้รับความนิยมอย่างรวดเร็ว แม่เหล็กเซรามิก เรียกอีกอย่างว่าแม่เหล็กเซรามิกแข็งหรือแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ พวกเขาทำจากสตรอนเทียมหรือแบเรียมเฟอร์ไรต์

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของแม่เหล็กถาวรชนิดเซรามิก หรือเฟอร์ไรต์ มีดังต่อไปนี้

ข้อดี

- อนุภูมิการทำงานสูงปานกลาง
- ความต้านทานสูงเป็นพิเศษต่อการถูกล้างอำนาจแม่เหล็ก
- ราคาถูก

ข้อด้อย

- แรงแม่เหล็กค่อนข้างต่ำ

2. แม่เหล็กถาวรชนิดซามาเรียมโคบอลต์ (Samarium Cobalt Magnet, SmCo Magnet)

แม่เหล็กถาวรชนิดโคบอลต์ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการใช้งานสำหรับอุตสาหกรรม การทหาร การบินและอวกาศ ทางทะเล และยานยนต์ แม่เหล็กชนิดซามาเรียมโคบอลต์ มีความทนทานต่อการกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันโดยไม่จำเป็นต้องเคลือบพิเศษ ซึ่งรวมถึงความทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำเค็ม ทำให้แม่เหล็กชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้งานในทะเลและนอกชายฝั่ง นอกจากนี้ แม่เหล็กซามาเรียมโคบอลต์ ยังคงรักษาประสิทธิภาพแม่เหล็กที่แข็งแกร่งแม้ที่อุณหภูมิสูงถึง 350 °C

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของแม่เหล็กถาวรชนิดซามาเรียมโคบอลต์ มีดังต่อไปนี้

ข้อดี

- แรงแม่เหล็กระดับปานกลาง

- ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี
- อุณหภูมิการทำงานสูงปานกลาง
- ความต้านทานสูงเป็นพิเศษต่อการถูกล้างอำนาจแม่เหล็ก

ข้อด้อย

- ราคาแพง

3. แม่เหล็กชนิดนีโอดิเมียม (Neodymium Magnet)

แม่เหล็กชนิดนีโอดิเมียม ค้นพบในปี 2525 โดยเจนเนอร์ล มอเตอร์ส เป็นแม่เหล็กถาวรที่มีความเข้มข้นแม่เหล็กที่สุดในเชิงพาณิชย์ ได้มาจากการพัฒนาวัสดุแม่เหล็กถาวรหายากของโลก เรียกว่า "ราชาแม่เหล็ก" เนื่องจากมีฟังก์ชันแม่เหล็กที่ยอดเยี่ยม แม่เหล็กชนิดนีโอดิเมียม มีธาตุหายากจำนวนมาก ได้แก่ Nd, Fe และ B ซึ่งแข็งและเปราะ ทำให้พื้นผิวถูกกัดเซาะได้ง่ายจากการเกิดออกซิเดชัน แต่แม่เหล็กนีโอดิเมียมจึงต้องเคลือบแม่เหล็กด้วย NiCuNi เพื่อการป้องกัน ในปัจจุบันนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมสมัยใหม่และเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ มอเตอร์ เซนเซอร์ โทรศัพท์มือถือและฮาร์ดไดรฟ์ของคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของแม่เหล็กถาวรชนิดนีโอดิเมียม มีดังต่อไปนี้

ข้อดี

- แรงแม่เหล็กสูง
- ความต้านทานสูงเป็นพิเศษต่อการถูกล้างอำนาจแม่เหล็ก
- กำลังสูงเมื่อเทียบกับปริมาตร

ข้อด้อย

- อุณหภูมิการทำงานไม่สูงมาก
- ทนต่อการกัดกร่อนได้ไม่ดี

4. แม่เหล็กชนิดอัลนิโก (Alnico Magnet)

แม่เหล็กชนิดอัลนิโก มีส่วนประกอบพื้นฐานคือ นิกเกิล, โคบอลต์, อลูมิเนียม และเหล็ก มีคุณสมบัติทนการกัดกร่อน และมีเสถียรภาพสูง มีความแข็งแต่เปราะ แต่สามารถผลิตรูปแบบที่ซับซ้อนได้ ซึ่งวัสดุดิบแม่เหล็กชนิดอื่นไม่สามารถทำได้ มีลักษณะพิเศษ คือ มีค่าพลังงานจำเพาะ และการผันแปรของอุณหภูมิแม่เหล็กต่ำ สามารถใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง ใช้กันอย่างแพร่หลายในมอเตอร์, มิเตอร์, แม่เหล็กเครื่องคิดแยก, ลำโพง, ระบบการจับยึด, ฯลฯ

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของแม่เหล็กถาวรชนิดอัลนิโก มีดังต่อไปนี้

ข้อดี

- อุณหภูมิการทำงานที่สูง

- ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี
- งานใช้งานระยะยาวมีความเสถียร

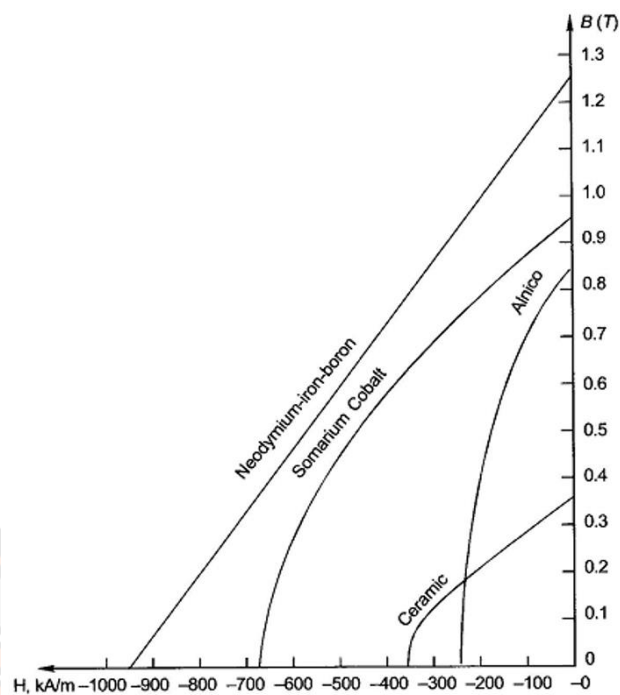
ข้อด้อย

- ความต้านทานต่อการล้าอำนาจแม่เหล็ก
- ราคาแพง

ตาราง 11 คุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในงานเครื่องกลไฟฟ้า

Quantity	NdFeB	SMCo	Ferrite	Alnico
Remanence, B_r (T)	1.08-1.49	0.87-1.19	0.20-0.46	0.55-1.37
Intrinsic Coercivity, H_{ci} (kA/m)	876-2710	1350-2400	140-405	38-151
Relative Permeability, μ_r	1.0-1.1	1.0-1.1	1.05-1.2	1.3-6.2
Energy Product, BH_{max} (kJ/m ³)	220-430	143-251	6.4-41.8	10.7-83.6
Density, D (kg/dm ³)	7.4-7.5	8.2-8.5	4.9-5.1	6.8-7.3
Electrical resistivity (n Ω m)	12-16	50-60 or 530-900	10^7 - 10^{11}	470-750
Curie Temperature, T_c (°C)	310	720-820	450	800
Maximum Operation Temperature, T_{max} (°C)	150	250-350	300	500

ตาราง 11 แสดงข้อมูลคุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในงานเครื่องกลไฟฟ้าของแม่เหล็กถาวรทั้ง 4 ชนิด และแสดงกราฟเปรียบเทียบเส้นโค้งการทำแม่เหล็กกระแสดตรงสำหรับวัสดุแม่เหล็กถาวร ดังภาพ 35 จะเห็นได้ว่าแม่เหล็กชนิดนีโอดีเมียมมีประสิทธิภาพด้านการทำแม่เหล็กสูงที่สุด



ภาพ 35 เส้นโค้งการทำแม่เหล็กกระแสดตรงสำหรับวัสดุแม่เหล็กถาวร

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นกระบวนการเชิงตัวเลขเพื่อหาผลลัพธ์โดยประมาณ สำหรับปัญหาที่ประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบหลัก คือ สมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขขอบเขต และรูปร่างของปัญหา เนื่องจากปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ รวมทั้งศาสตร์อื่นๆ มักถูกรวมด้วยองค์ประกอบทั้ง 3 นี้ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกประยุกต์นำมาใช้แก้ปัญหาได้หลากหลายทำให้นิยมใช้กันโดยแพร่หลายก่อให้เกิดซอฟต์แวร์ตามขึ้นมาเป็นจำนวนมากเช่นกัน

แนวความคิดหลักของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ จากนั้นจึงสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ จากสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับเอลิเมนต์เหล่านั้น ก่อนนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกอย่างมารวมกัน เพื่อก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตลงบนระบบสมการใหญ่นี้เพื่อแก้ปัญหาผลลัพธ์

1. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับงานวิเคราะห์หม้อเตอร์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) คือ การจำลองที่หลากหลายของปรากฏการณ์ทางกายภาพที่กำหนดโดยใช้เทคนิคตัวเลข วิศวกรหลายคนใช้มันเพื่อลดจำนวนของต้นแบบและการทดลองทางกายภาพและวิเคราะห์ส่วนประกอบในขั้นตอนการออกแบบเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ดีขึ้น การวิเคราะห์

องค์ประกอบ จำกัด 2 มิติชั่วคราวใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์ ส่วนหลักอย่างหนึ่งของการวิเคราะห์องค์ประกอบ จำกัดชั่วคราวของมอเตอร์กระแสตรง คือ สูตรองค์ประกอบ จำกัด แม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการเคลื่อนที่ สำหรับปัญหาแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่การแนะนำของระยะความเร็วจะนำไปสู่สมการต่อไปสำหรับการอ้างอิงคงที่ [68-69] ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) \right) = \vec{J}_0 \quad (9)$$

โดยที่ \vec{A} คือ เวกเตอร์แม่เหล็ก, \vec{J}_0 คือ ความหนาแน่นกระแสของแหล่งจ่าย และ \vec{v} คือ ความเร็ว

ในการกำจัดระยะความเร็วสามารถเคลื่อนย้ายตาข่ายองค์ประกอบจำกัดของโรเตอร์ได้จากนั้นความเร็วจะกลายเป็นศูนย์ในโครงอ้างอิงการเคลื่อนที่ที่กำหนดไว้และ (9) มีรูปแบบทั่วไปดังต่อไปนี้ในโครงอ้างอิงแบบคงที่ (สเตเตอร์) และในโครงอ้างอิงเคลื่อนที่ (โรเตอร์) ซึ่งสามารถตรวจสอบได้เป็น [68-69]:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \approx \vec{J}_0 \quad (10)$$

วิธีการของน้ำหนักคงเหลือถูกนำไปใช้กับสมการสนามแม่เหล็กต้านบนกับโดเมนที่แยกออกจากกัน เพื่อให้ได้สมการเมทริกซ์ขององค์ประกอบจำกัด สมการสนามแม่เหล็ก สมการวงจรและสมการของการเคลื่อนที่ที่ถูกแยกออกจากโดเมนเวลาด้วย

การกำหนดการแก้ปัญหาโดยประมาณโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดเมนหรือพื้นที่พื้นผิวของรูปทรงเรขาคณิตของมอเตอร์บนระนาบ x-y จะถูกตรวจสอบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับคาร์ทีเซียน 2 มิติเชิงเส้นสามารถแสดงได้ในสมการเชิงอนุพันธ์ลำดับที่สอง [70] เป็น:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - i\omega\sigma A = -J_0 \quad (11)$$

โดยที่ A คือ เวกเตอร์แม่เหล็ก, μ คือ การซึมซาบของแม่เหล็ก, σ คือ การนำไฟฟ้า, ω คือ ความเร็วเชิงมุม, J_0 คือ ความหนาแน่นกระแสจากแหล่งจ่ายไฟภายนอก และ i คือ ส่วนจินตภาพ

2. ขั้นตอนในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์

กระบวนการแก้ปัญหาภายในซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ [71] ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนนี้เริ่มจากการสร้างโมเดลรูปร่างของปัญหาซึ่งอาจประกอบด้วย พื้นผิวขอบตรง ขอบโค้ง ซอฟต์แวร์ส่วนใหญ่จึงมีวิธีการสร้างรูปทรงทางเรขาคณิตที่มีขั้นตอนจำเพาะในตัวเอง จากนั้นซอฟต์แวร์จะแบ่งโดเมนรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ต่อกันที่จุดต่อ (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะหาตัวไม่รู้ค่า (Unknow)

ขั้นตอนที่ 2 เอลิเมนต์ย่อย ๆ ที่เกิดขึ้นอาจเป็นรูปสามมิติ สามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าเป็นปัญหาใน 2 มิติจะเป็นรูปสามเหลี่ยมอาจจะประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มุมทั้ง 3 หรือ 6 จุดต่อคือ ที่มุมทั้งสามและจุดกึ่งกลางของด้านทั้งสาม ด้วยจำนวนจุดต่อเหล่านี้มีผลโดยตรงสู่ลักษณะการกระจายของผลลัพธ์บนเอลิเมนต์ๆ ที่เราเรียกว่าฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบ 6 จุดต่อ ซึ่งมีฟังก์ชันการประมาณภายในพื้นที่ซับซ้อนกว่าเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบ 3 จุดต่อ ดังนั้นจึงให้ผลลัพธ์ที่เที่ยงตรงมากกว่าแต่ในทางตรงกันข้ามก็จะใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น เพราะจำนวนจุดต่อบ่งบอกจำนวนตัวไม่รู้ค่าของปัญหานั้นมีมากขึ้น ในทำนองเดียวกันโดเมนของปัญหาในสามมิติถูกแบ่งออกเป็นทรงตันย่อย ๆ เช่น รูปทรงลูกบาศก์คล้ายลูกเต๋าแต่ละด้านนั้นไม่ขนานกัน เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ อาจจะประกอบด้วย 8 จุดต่อที่มุมทั้ง 8 หรือ 20 จุดต่ออาร์คมีจุดต่อที่ศูนย์กลางของสัน ขอบด้วย

ขั้นตอนที่ 3 ประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการอนุพันธ์ของปัญหานั้น ขั้นตอนนี้เกี่ยวข้องกับคณิตศาสตร์และวิชาการโดยละเอียดในการเรียนวิชาไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกิดขึ้นเป็นสมการทางคณิตซึ่งประกอบด้วยกระบวนการทำบวก ลบ คูณ และหารตัวเลขเป็นจำนวนมาก จึงสามารถนำไปประดิษฐ์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์เหล่านี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของเอลิเมนต์ที่เลือกใช้ซึ่งมีฟังก์ชันการประมาณภายในที่แตกต่างกัน

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากทุกเอลิเมนต์มารวมกันขึ้นเป็นระบบสมการทางพีชคณิตขนาดใหญ่ การรวมสมการทางเอลิเมนต์ย่อยเข้าด้วยกันต้องทำอย่างเหมาะสมเปรียบเสมือนการประกอบตัวต่อขึ้นเป็นรูปภาพใหญ่ ตัวต่อแต่ละตัวจำเป็นต้องอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องจึงจะนำมาสู่รูปภาพใหญ่ที่ถูกต้องสมบูรณ์ขึ้นมาได้

ขั้นตอนที่ 5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาเข้ากับระบบสมการพีชคณิตขนาดใหญ่นี้แล้ว จึงแก้เพื่อหาผลลัพธ์ที่จุดต่าง ๆ ขั้นตอนนี้จัดว่าใช้เวลาในการคำนวณมากโดยเฉพาะหากเป็นปัญหาขนาดใหญ่ซึ่งอาจประกอบไปด้วยหลายแสนหลายล้านสมการหรือเป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้นซึ่งระบบสมการทางคณิตขนาดใหญ่จะต้องถูกแก้ซ้ำแล้วซ้ำอีกหลายครั้ง

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อได้ผลลัพธ์ที่จุดต่อจากขั้นตอนที่ 5 แล้วค่าอื่น ๆ ที่มีความสำคัญเช่นกัน จึงสามารถหาตามมาได้ ทำให้การแก้ปัญหาสำเร็จเสร็จสิ้นโดยสมบูรณ์ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อได้ค่าการเสียรูป (Displacements) ตามจุดต่าง ๆ ของโครงสร้างแล้ว ก็สามารถคำนวณหาค่าความเครียด (Strains) และค่าความเค้น (Stresses) ที่เกิดขึ้นตามมาได้ตามลำดับ

จากขั้นตอนทั้ง 6 จะเห็นได้ว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีกระบวนการที่เป็นขั้นตอนอย่างชัดเจนทำให้ได้ผลลัพธ์โดยสมบูรณ์ และสามารถประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาโดยทั่วไปได้โดยองค์ประกอบที่สำคัญของปัญหาคือ สมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขขอบเขต และรูปร่างของปัญหา ได้ถูกจัดการดูแลโดยครบถ้วนในขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนที่ 5 และขั้นตอนที่ 1 ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามลำดับ

3. ประโยชน์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปัจจุบันวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปใช้วิเคราะห์งานหลากหลายชนิดเป็นจำนวนมากจนกลายเป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับกันทั่วโลก ส่งผลให้ซอฟต์แวร์ที่จำหน่ายกันในราคาสูง ซึ่งงานต่าง ๆ ที่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์ได้ ประกอบไปด้วย

- 1) วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถยนต์ เครื่องบิน รถไฟ เรือ อาคารสูง สะพาน ไปถึงงานขนาดเล็ก เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ มอเตอร์ เก้าอี้ ขวดน้ำ และภาชนะต่าง ๆ
- 2) การวิเคราะห์การสั่นไหวของเสาไฟฟ้าแรงสูงและป้ายทางด่วนจากแรงลม การยุบตัวของโครงสร้างรถยนต์ขณะเกิดการชน ความเค้นจากอุณหภูมิสูงของกังหันใบพัดเทอร์ไบน์
- 3) การวิเคราะห์การไหลของอากาศผ่านบ้านและอาคารในเมืองขนาดใหญ่ การหมุนเวียนของอากาศภายในอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน การทำนายสภาวะอากาศการเคลื่อนตัวของอากาศเย็นผ่านทวีป ทิศทางการไหลท่วมของน้ำเมื่อเกิดอุทกภัย
- 4) การวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับเสาส่งสัญญาณทางอากาศ ทรานซิสเตอร์ มอเตอร์และสายไฟฟ้าแรงสูง
- 5) การวิเคราะห์การไหลในเส้นเลือดตามร่างกายและหัวใจ ไปจนถึงอุปกรณ์ทางการแพทย์กระดูกข้อต่อเทียม หัวเทียม รากฟันเทียม
- 6) งานอื่น ๆ ที่ไม่สามารถทดลองได้ เพราะอาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์หรือมีค่าใช้จ่ายสูง เช่น อนุภาคการระเบิดของชิปนาอูร์ การไหลของแก๊สที่เป็นพิษต่อมนุษย์ในโรงงานอุตสาหกรรม

บทที่ 4

การออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการวิจัยของการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ สเตเตอร์และแม่เหล็กถาวร โดยเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองโครงสร้างของมอเตอร์ต้นแบบเพื่อวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก จากนั้นจึงทำการสร้างแบบจำลองใหม่ขึ้นมาโดยการปรับเปลี่ยนวัสดุและขนาดของแม่เหล็กถาวรที่มีขายตามท้องตลาดมาแทนแม่เหล็กถาวรต้นแบบให้มีความเข้มสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นและออกแบบโครงสร้างของสเตเตอร์ให้เหมาะสมกับติดตั้งแม่เหล็กถาวรใหม่ และทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเพื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ต้นแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบไปสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจริง

การศึกษาพารามิเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย

มอเตอร์กระแสตรงแบบแปรงถ่านต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์ทรงรอบ รุ่น MY1016Z3 ขนาด 350 W แรงดัน 24 V ซึ่งนิยมใช้เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้าแสดงในภาพ 36 โดยข้อมูลจากผู้ผลิตแสดงในตารางที่ 12

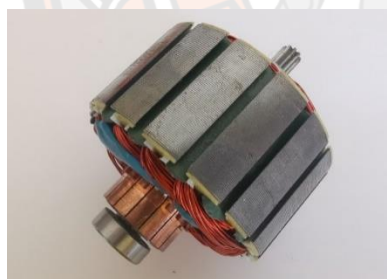


ภาพ 36 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย

ตาราง 12 ข้อมูลมอเตอร์รุ่น MY1016Z3 จากผู้ผลิต

พารามิเตอร์	ค่า
อัตรากำลังด้านออก (W)	350
อัตราแรงดัน (V)	24
อัตราความเร็ว (RPM)	3000
ความเร็วขณะไม่มีโหลด (RPM)	3850
กระแสขณะขับโหลดเต็มพิกัด (A)	17.00
กระแสขณะไม่ขับโหลด (A)	2.20
อัตราแรงบิด (Nm)	1.11
ประสิทธิภาพ (%)	78
อัตราการทดรอบ	1 : 9.78

ส่วนประกอบของมอเตอร์แสดงในภาพ 37 ประกอบด้วย ส่วนโรเตอร์ที่มีอาร์เมเจอร์ จำนวน 16 ร่องและคอมมิวเตเตอร์ จำนวน 16 ซี ส่วนสเตเตอร์มีแม่เหล็กถาวร จำนวน 4 ขั้ว ส่วนแปรงถ่านมีจำนวน 4 อัน และส่วนชุดทดรอบและฝาครอบ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

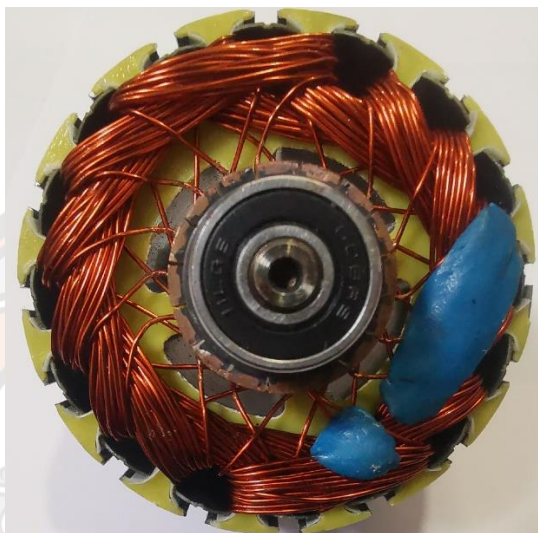
ภาพ 37 ส่วนประกอบของมอเตอร์

(ก) โรเตอร์ อาร์เมเจอร์และคอมมิวเตเตอร์ (ข) สเตเตอร์และแม่เหล็กถาวร

(ค) แปรงถ่านและฝาครอบ (ง) ชุดทดรอบและฝาครอบ

1. พารามิเตอร์โรเตอร์ของมอเตอร์ต้นแบบ

การหาค่าพารามิเตอร์ของโรเตอร์โดยการถอดชิ้นส่วนมอเตอร์ จากนั้นพิจารณาในส่วนของโรเตอร์ แสดงในภาพ 38 ได้แก่ การตรวจสอบอาร์เมเจอร์ ขดลวด และคอมมิวเตเตอร์ เป็นต้น โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้แสดงในตาราง 13

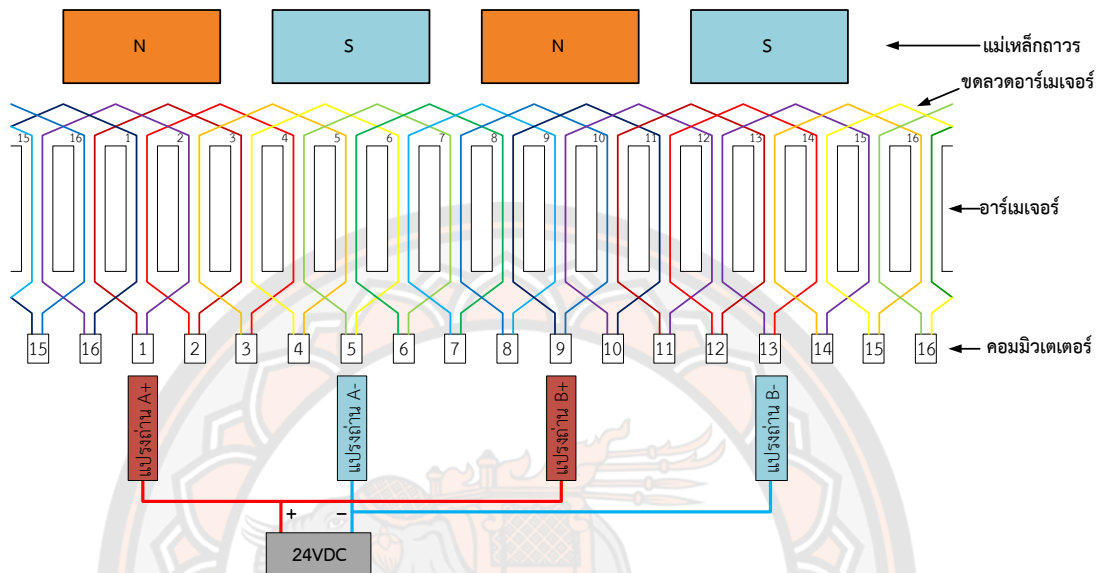


ภาพ 38 ส่วนประกอบของโรเตอร์

ตาราง 13 พารามิเตอร์โรเตอร์ของมอเตอร์ต้นแบบ

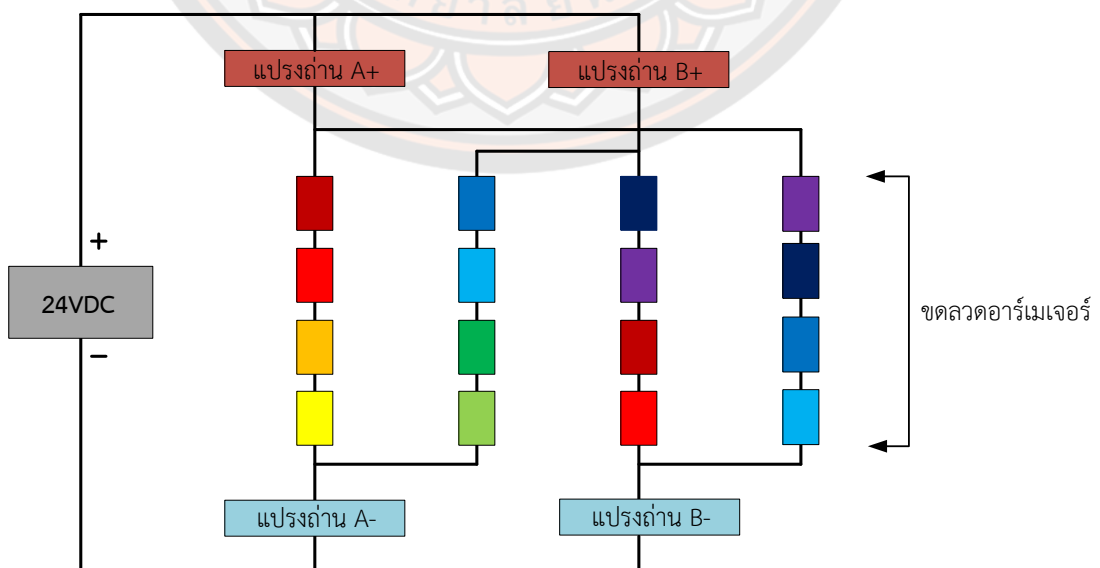
พารามิเตอร์	ค่า
ขนาดภายนอกโรเตอร์ (มม.)	78
ความยาวของแกนเหล็กโรเตอร์ (มม.)	40
จำนวนร่องอาร์เมเจอร์ (ร่อง)	16
จำนวนคอมมิวเตเตอร์ (ซี่)	16
จำนวนชุดขดลวด (ชุด)	16
จำนวนรอบขดลวดต่อชุด (รอบ)	21
ขนาดขดลวด (มม.)	0.4

พิจารณาขดลวดอาร์เมเจอร์ มีทั้งหมด 16 ชุด แต่ละชุดพันด้วยขดลวดทองแดง เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.4 มม. (เบอร์ 26 AWG) ซึ่งปลายขดลวดทั้ง 16 ชุด ต่อเข้ากับคอมมิวเตเตอร์ จำนวน 16 ซี โดยมีลักษณะการต่อแบบ Simplex Lab Winding แสดงดังภาพ 39



ภาพ 39 การต่อขดลวดอาร์เมเจอร์แบบ Simplex Lab Winding

ลักษณะวงจรไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์แสดงในภาพ 40 โดยกระตุ้นกระแสเข้าขดลวดที่ต่ออนุกรม 4 ชุดจากแปรงถ่านบวกไปยังแปรงถ่านลบ



ภาพ 40 วงจรไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์

2. พารามิเตอร์สเตเตอร์ของมอเตอร์ต้นแบบ

การหาค่าพารามิเตอร์ของสเตเตอร์โดยการถอดชิ้นส่วนมอเตอร์ จากนั้นพิจารณาในส่วนของสเตเตอร์ แสดงในภาพ 41 ได้แก่ โครงสเตเตอร์ และแม่เหล็กถาวรชนิดเฟอร์ไรต์ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้แสดงในตาราง 14



ภาพ 41 ส่วนประกอบของสเตเตอร์

ตาราง 14 พารามิเตอร์สเตเตอร์ของมอเตอร์ต้นแบบ

พารามิเตอร์	ค่า
ขนาดภายนอกสเตเตอร์ (มม.)	100
ขนาดภายในสเตเตอร์ (มม.)	94
ความยาวสเตเตอร์ (มม.)	60
ความหนาสเตเตอร์ (มม.)	3
จำนวนแม่เหล็กถาวร (ขั้ว)	4
ชนิดแม่เหล็กถาวร	FB9N
ความกว้างแม่เหล็กถาวร (มม.)	50
ความยาวแม่เหล็กถาวร (มม.)	50
ความหนาแม่เหล็กถาวร (มม.)	5

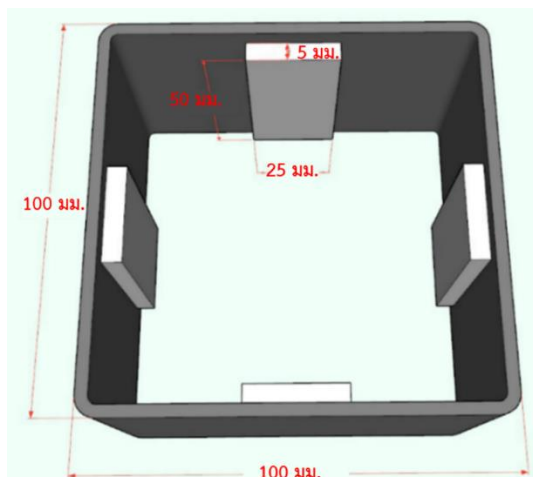
การออกแบบพัฒนาโครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการที่ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแม่เหล็กถาวรในบทที่ 3 ซึ่งแม่เหล็กถาวรที่นิยมใช้กับงานมอเตอร์ไฟฟ้า ได้แก่ เฟอร์ไรต์ ซามาเรียมโคบอลต์ นีโอโดเมียม อัลนิโก เป็นต้น โดยคุณสมบัติของแม่เหล็กทั้งหมด พบว่า แม่เหล็กถาวรชนิดนีโอโดเมียมมีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงที่สุดในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยจึงเลือกแม่เหล็กถาวรชนิดนีโอโดเมียม ในการพัฒนาโครงสร้างสเตเตอร์ เนื่องจากความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงที่สุดและสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด โดยเลือกใช้แม่เหล็กถาวรชนิดนีโอโดเมียม รุ่น N35 ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม

ในงานวิจัยได้วิเคราะห์โครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ด้วยการปรับขนาดของแม่เหล็กถาวรชนิดนีโอโดเมียม ที่มีความยาว 50 มม. ความหนา 5 มม. เท่ากันทุกชิ้น โดยปรับเปลี่ยนความกว้างจำนวน 6 ขนาด ตั้งแต่ความกว้าง 25 มม. 30 มม. 35 มม. 40 มม. 45 มม. และ 50 มม. เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบโครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังตาราง 15 ซึ่งมอเตอร์ทั้ง 6 ตัว ใช้โครงสร้างสเตเตอร์ลักษณะสี่เหลี่ยมเพื่อให้สามารถติดตั้งแม่เหล็กถาวรแบบระนาบได้ ในภาพ 42 แสดงตัวอย่างโครงสร้างสเตเตอร์สี่เหลี่ยมและแม่เหล็กขนาด 25 x 50 X 5 มม.

ตาราง 15 พารามิเตอร์ของการออกแบบโครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

พารามิเตอร์	มอเตอร์	มอเตอร์	มอเตอร์	มอเตอร์	มอเตอร์	มอเตอร์	มอเตอร์
	แม่เหล็ก	แม่เหล็ก	แม่เหล็ก	แม่เหล็ก	แม่เหล็ก	แม่เหล็ก	แม่เหล็ก
ต้นแบบ	25x50x5	30x50x5	35x50x5	40x50x5	45x50x5	50x50x5	50x50x5
	มม.	มม.	มม.	มม.	มม.	มม.	มม.
รูปทรงสเตเตอร์	ทรงกระบอก	ทรงสี่เหลี่ยม	ทรงสี่เหลี่ยม	ทรงสี่เหลี่ยม	ทรงสี่เหลี่ยม	ทรงสี่เหลี่ยม	ทรงสี่เหลี่ยม
ขนาดภายนอกสเตเตอร์ (มม.)	100	100	100	100	100	100	100
ขนาดภายในสเตเตอร์ (มม.)	94	94	94	94	94	94	94
ความยาวสเตเตอร์ (มม.)	60	60	60	60	60	60	60
ความหนาสเตเตอร์ (มม.)	3	3	3	3	3	3	3
ชนิดแม่เหล็กถาวร	FB9N	N35	N35	N35	N35	N35	N35
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)	0.46	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
แรงบังคับ (kA/m)	278.5	907	907	907	907	907	907
จำนวนแม่เหล็กถาวร (ชิ้น)	4	4	4	4	4	4	4
ความกว้างแม่เหล็กถาวร (มม.)	50	25	30	35	40	45	50
ความยาวแม่เหล็กถาวร (มม.)	50	50	50	50	50	50	50
ความหนาแม่เหล็กถาวร (มม.)	5	5	5	5	5	5	5



ภาพ 42 ตัวอย่างโครงสร้างสเตเตอร์สี่เหลี่ยมและแม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม.

การวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

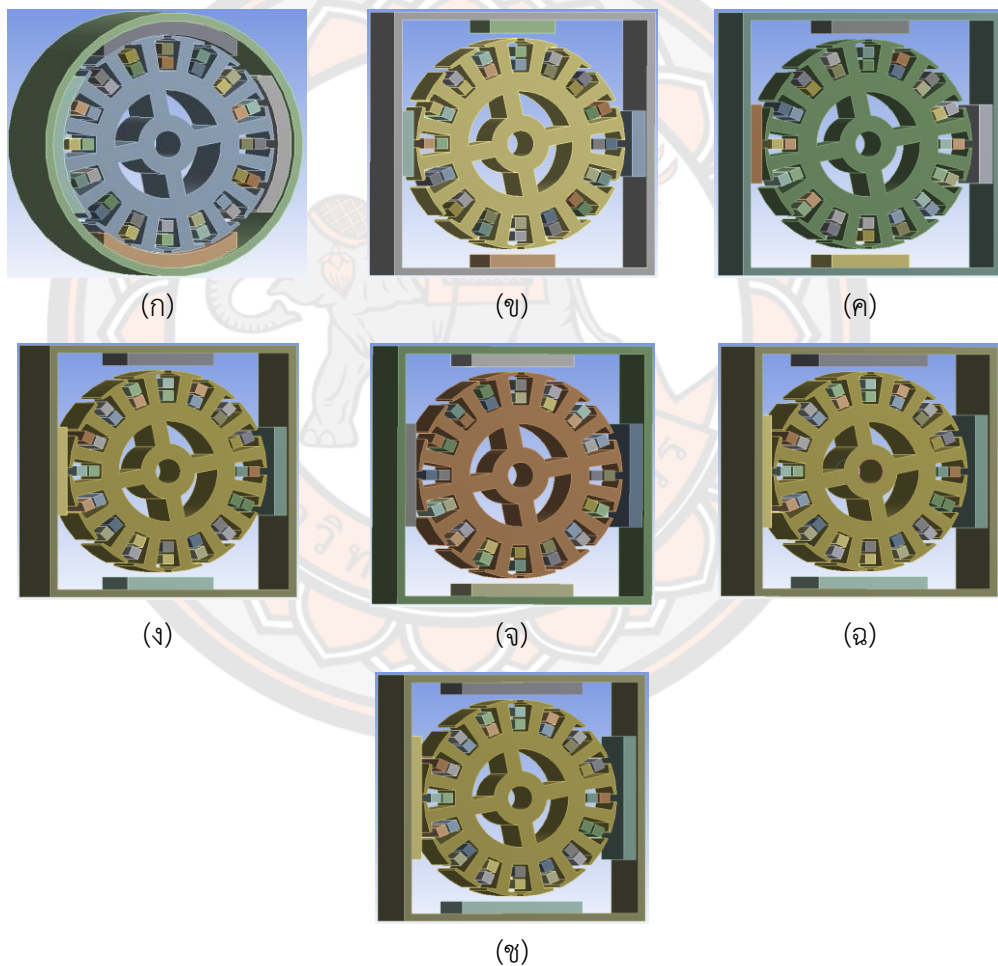
จากการที่ได้ออกแบบพัฒนามอเตอร์จำนวน 6 ตัว ในลำดับต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ เปรียบเทียบกับมอเตอร์ที่ได้ถูกออกแบบพัฒนาขึ้นทั้ง 6 ตัว ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench (Release 16.0) เนื่องจากผลของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สูงขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับตามแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งส่งผลต่อสมรรถภาพของมอเตอร์ที่สูงขึ้นตามไปด้วย

1. การวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench ดังนี้

- 1) ทำการสร้างโมเดลรูปร่างภาพ 3 มิติ ของมอเตอร์ทุกตัว ดังภาพ 43 เพื่อเป็นการกำหนดรูปร่าง และขนาดของแม่เหล็กถาวร สเตเตอร์ โรเตอร์ให้ตรงกับลักษณะของมอเตอร์ของจริง
- 2) กำหนดค่าพารามิเตอร์ของวัสดุของมอเตอร์ ดังนี้
 - 2.1) โครงสเตเตอร์ ใช้ข้อมูล (Engineering Data) ของโปรแกรม คือ Structural Steel
 - 2.2) แกนเหล็กโรเตอร์ ใช้ข้อมูล (Engineering Data) ของโปรแกรม คือ 1018 Steel
 - 2.3) แม่เหล็กถาวรมอเตอร์ต้นแบบ ใช้ข้อมูลจริงของแม่เหล็กถาวรชนิดเฟอร์ไรต์ FB9N และแม่เหล็กถาวรของมอเตอร์ที่พัฒนา ใช้ข้อมูลจริงแม่เหล็กถาวรนีโอไดเมียม N35

- 2.4) ตัวนำขดลวดอาร์เมเจอร์ ใช้ข้อมูลของโปรแกรม คือ Copper Alloy
 2.5) อากาศ ใช้ข้อมูล (Engineering Data) ของโปรแกรม คือ Air
- 3) กำหนดพื้นที่เอลิเมนต์ย่อย ๆ ของของวัสดุ
 - 4) กำหนดค่าทิศทางกระแสในการกระตุ้นเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์ รวมทั้งกำหนดทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดอาร์เมเจอร์และแม่เหล็กถาวร
 - 5) กำหนดค่าพื้นที่หน้าตัดตัวนำ จำนวนตัวนำ และค่ากระแสที่จ่ายขดลวดอาร์เมเจอร์
 - 6) ทำการวิเคราะห์ผลรวมความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ (Total Magnetic Flux Density) ของมอเตอร์ทั้ง 7 ตัว



ภาพ 43 โครงสร้างสามมิติของสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์

- (ก) ต้นแบบ (ข) แม่เหล็กขนาด $25 \times 50 \times 5$ มม. (ค) แม่เหล็กขนาด $30 \times 50 \times 5$ มม.
 (ง) แม่เหล็กขนาด $35 \times 50 \times 5$ มม. (จ) แม่เหล็กขนาด $40 \times 50 \times 5$ มม.
 (ฉ) แม่เหล็กขนาด $45 \times 50 \times 5$ มม. (ช) แม่เหล็กขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม.

2. ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ผลรวมความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Total magnetic flux density) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench (Release 16.0) โดยกำหนดเงื่อนไขการวิเคราะห์ด้วยการกระตุ้นปริมาณกระแสเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์ 10 A ซึ่งผลการวิเคราะห์มอเตอร์ทั้ง 7 ตัว พบว่า

มอเตอร์ต้นแบบมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 2.8843 T แสดงในภาพ 44 โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 0.8083 T

มอเตอร์ที่ถูกพัฒนาแม่เหล็กถาวรขนาด 25 x 50 x 5 มม. มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 3.1554 T แสดงในภาพ 45 โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 0.7982 T

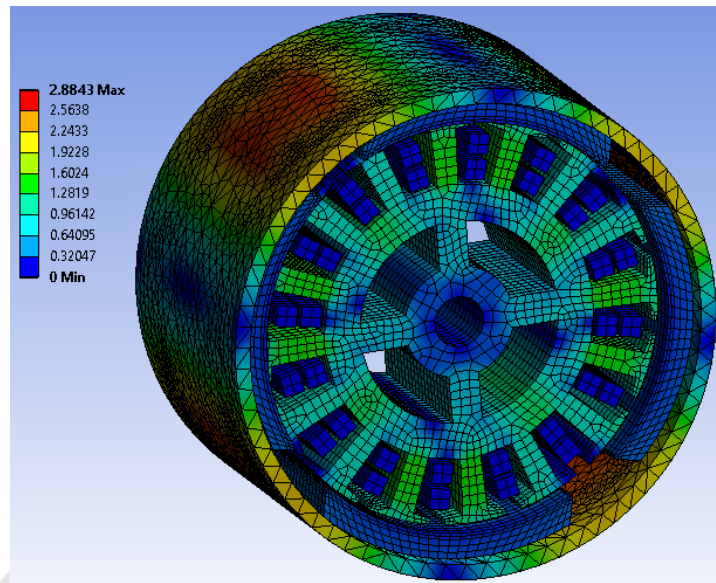
มอเตอร์ที่ถูกพัฒนาแม่เหล็กถาวรขนาด 30 x 50 x 5 มม. มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 3.5915 T แสดงในภาพ 46 โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 0.8737 T

มอเตอร์ที่ถูกพัฒนาแม่เหล็กถาวรขนาด 35 x 50 x 5 มม. มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 3.7976 T แสดงในภาพ 47 โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 0.9365 T

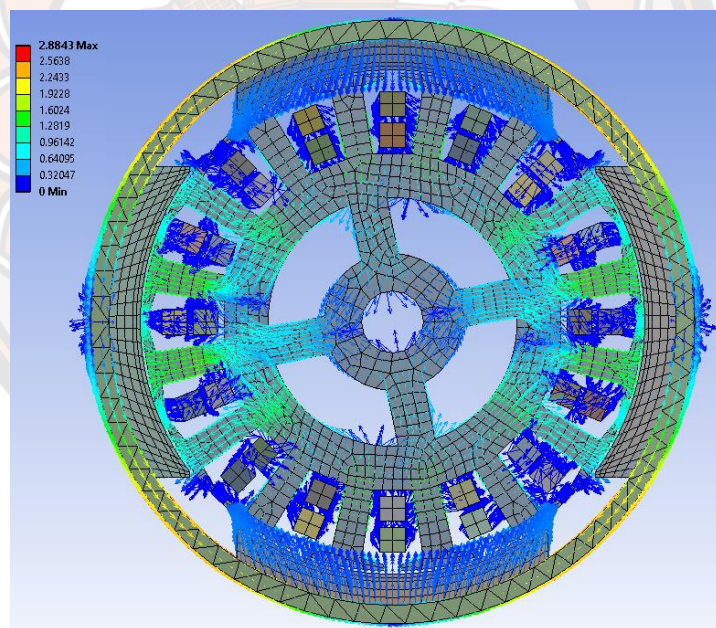
มอเตอร์ที่ถูกพัฒนาแม่เหล็กถาวรขนาด 40 x 50 x 5 มม. มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 4.1888 T แสดงในภาพ 48 โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 0.9887 T

มอเตอร์ที่ถูกพัฒนาแม่เหล็กถาวรขนาด 45 x 50 x 5 มม. มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 4.4198 T แสดงในภาพ 49 โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 1.0432 T

และในส่วนของมอเตอร์ที่ถูกพัฒนาแม่เหล็กถาวรขนาด 50 x 50 x 5 มม. มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 4.7917 T แสดงในภาพ 50 โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 1.0879 T



(ก)

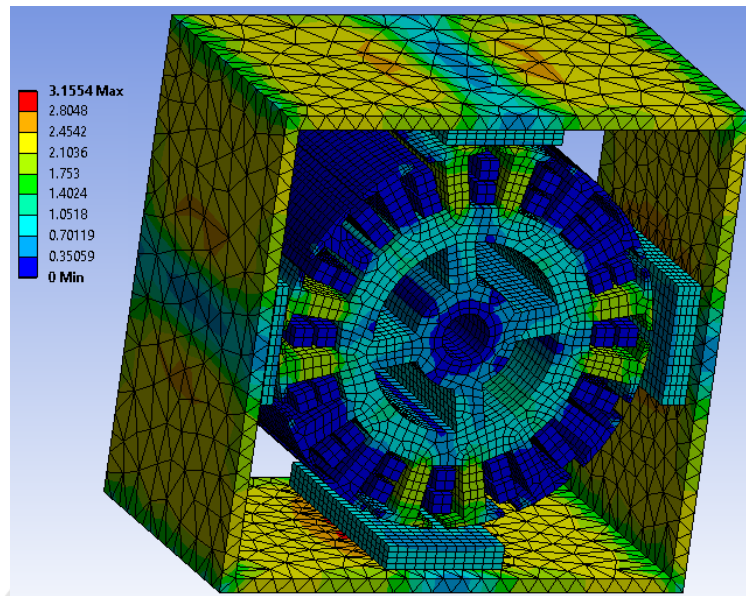


(ข)

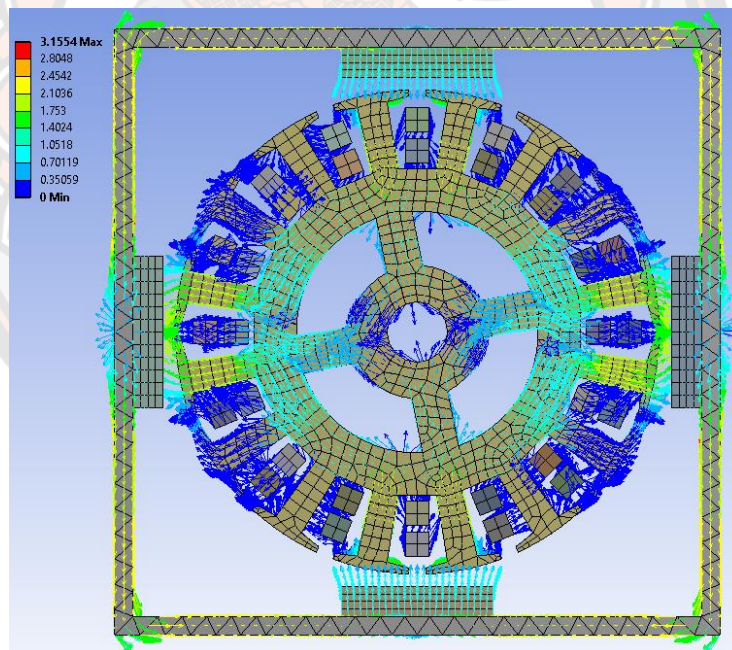
ภาพ 44 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ต้นแบบ

(ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

(ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก



(ก)

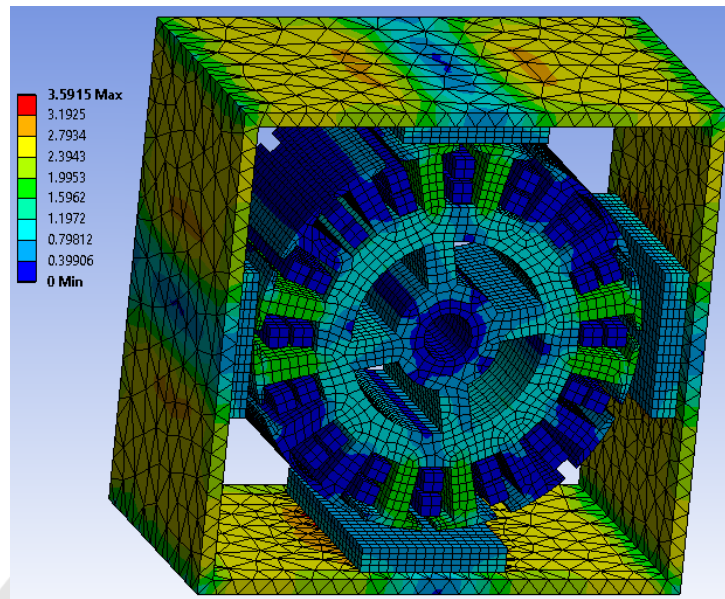


(ข)

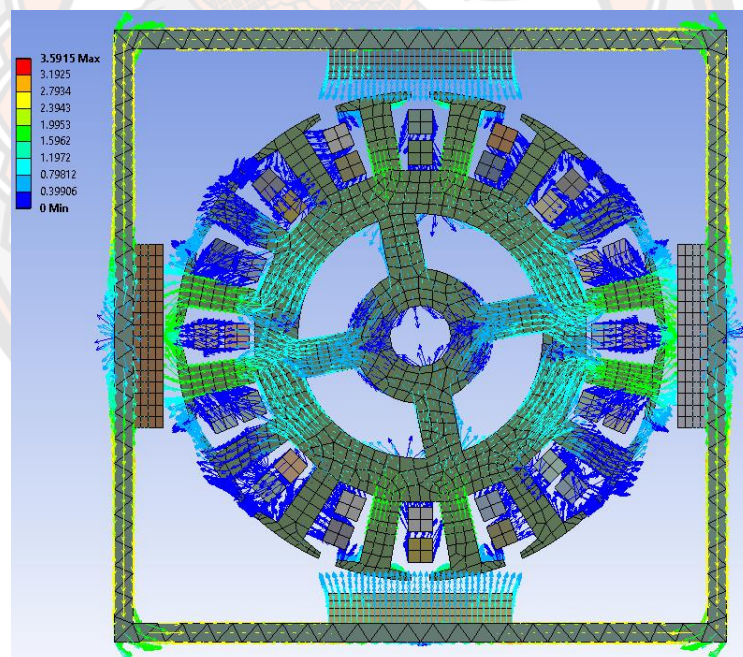
ภาพ 45 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
ของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม.

(ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

(ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก



(ก)

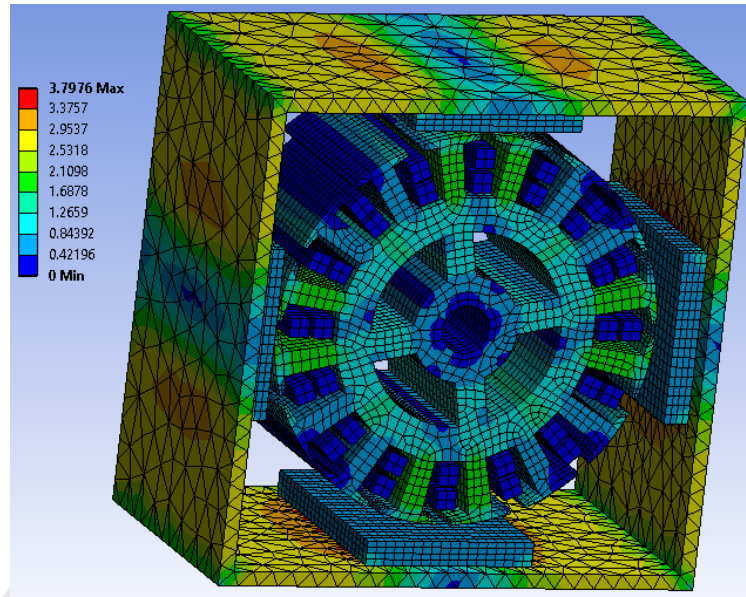


(ข)

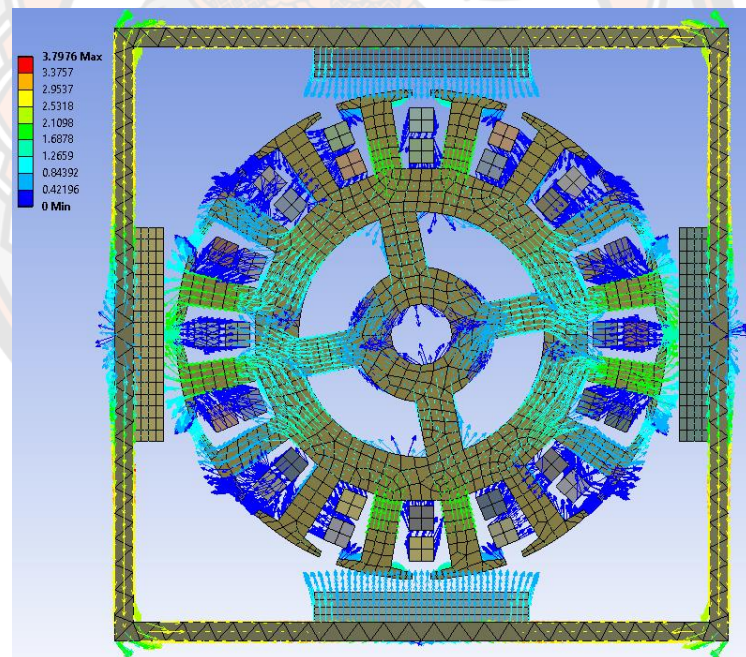
ภาพ 46 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
ของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 30 x 50 x 5 มม.

(ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

(ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก



(ก)

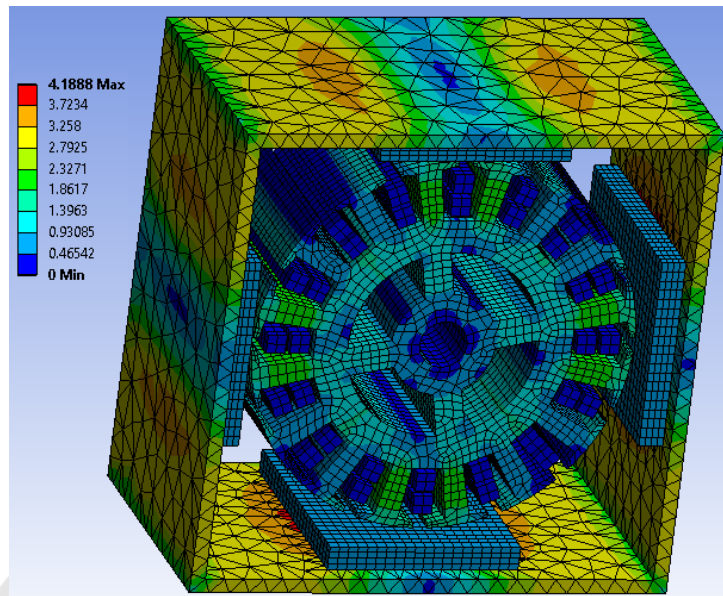


(ข)

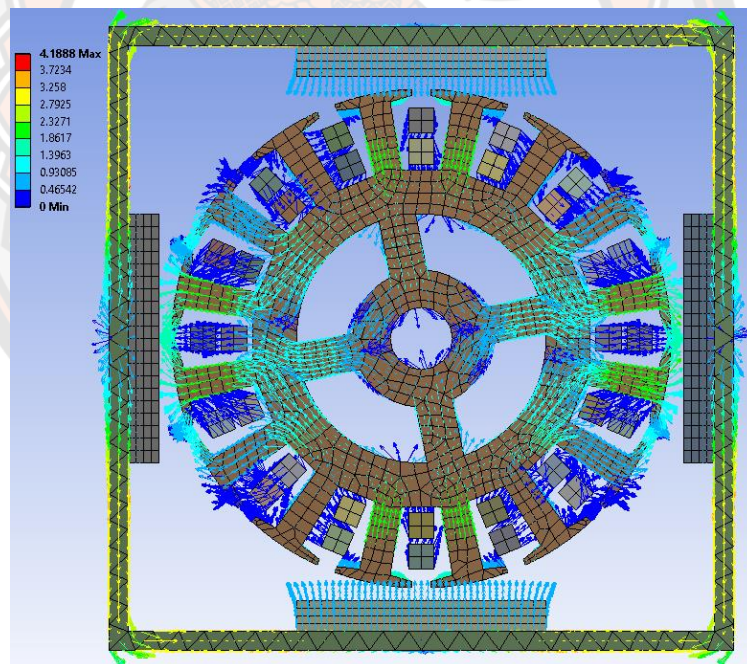
ภาพ 47 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
ของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 35 x 50 x 5 มม.

(ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

(ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก



(ก)

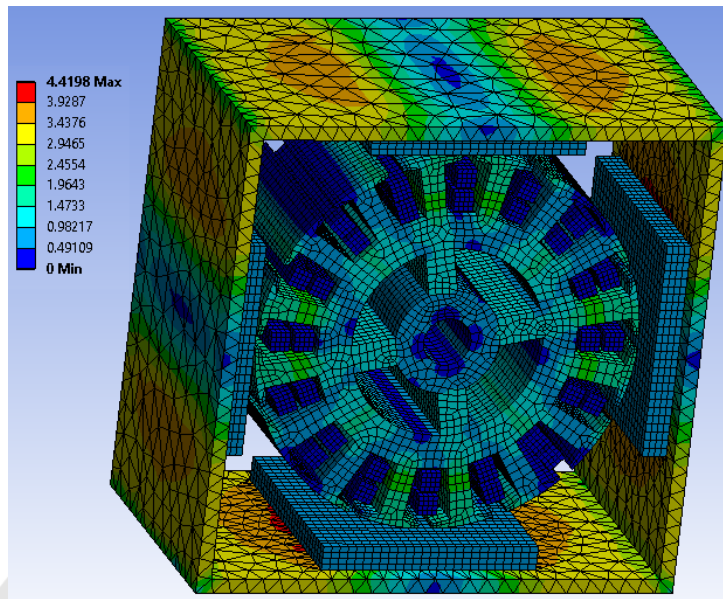


(ข)

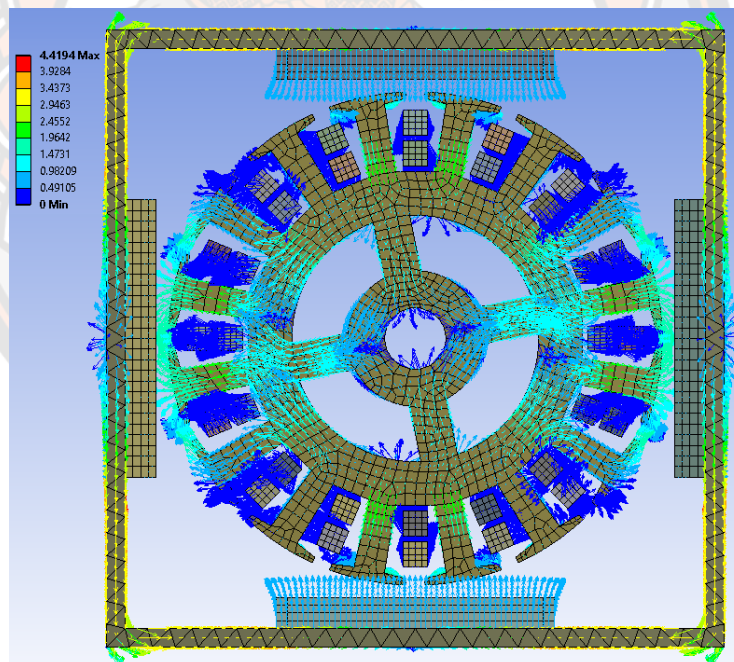
ภาพ 48 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
ของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด $40 \times 50 \times 5$ มม.

(ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

(ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก



(ก)

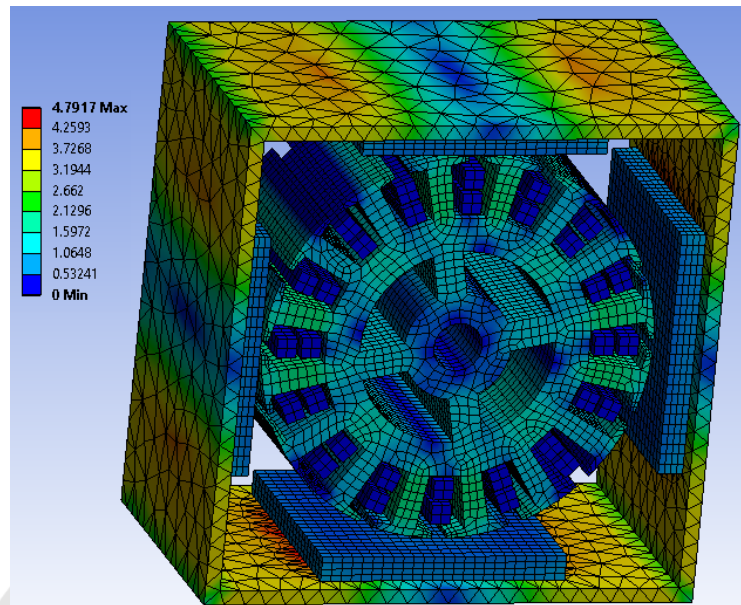


(ข)

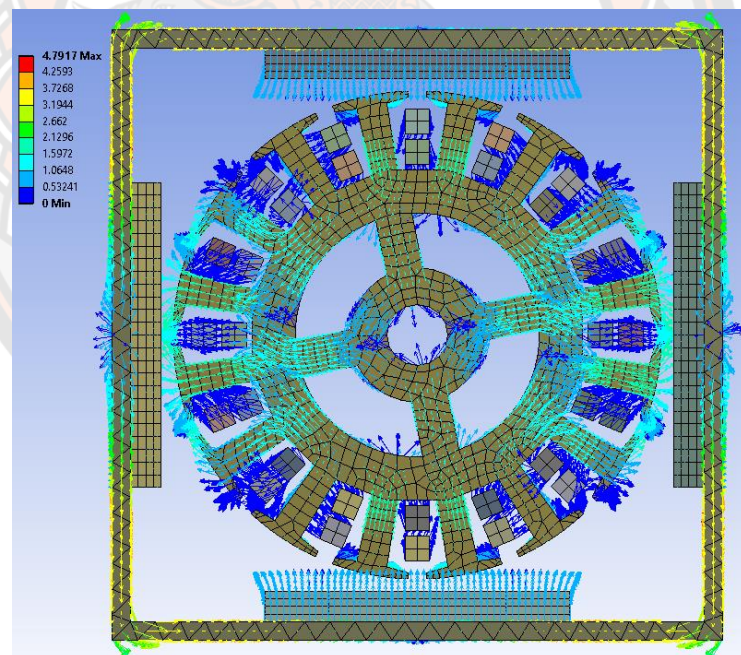
ภาพ 49 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
ของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด $45 \times 50 \times 5$ มม.

(ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

(ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก



(ก)



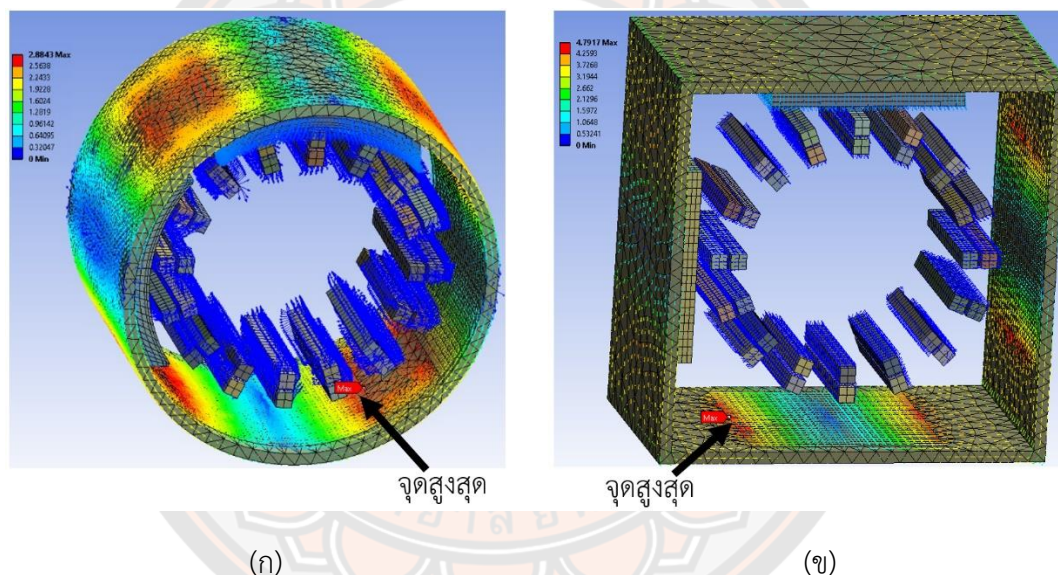
(ข)

ภาพ 50 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
ของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม.

(ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

(ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก

การวิเคราะห์ฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของมอเตอร์ต้นแบบที่มีลักษณะโครงสร้างสเตเตอร์ทรงกระบอก แสดงในภาพ 51(ก) และมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วยแม่เหล็กถาวรขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม. ที่เป็นตัวแทนของมอเตอร์ที่มีลักษณะโครงสร้างสเตเตอร์สี่เหลี่ยมแสดงในภาพ 51(ข) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว พบว่า มอเตอร์ทั้ง 2 ตัว จะมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ผิวด้านในของสเตเตอร์ซึ่งอยู่ติดกับขอบด้านข้างของแม่เหล็กถาวรเช่นเดียวกัน (โดยในภาพได้ทำการซ่อนชิ้นส่วนของแม่เหล็กถาวร และแกนโรเตอร์ เพื่อให้สามารถเห็นฟลักซ์แม่เหล็กที่โครงสร้างสเตเตอร์ได้ชัดเจนขึ้น) เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กส่วนใหญ่จากแกนโรเตอร์ไหลผ่านไปยังแม่เหล็กถาวรและผ่านไปยังแกนเหล็กสเตเตอร์ซึ่งบริเวณนั้นมีพื้นที่แคบและอยู่ติดกับแม่เหล็กถาวรจึงทำให้มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงมาก



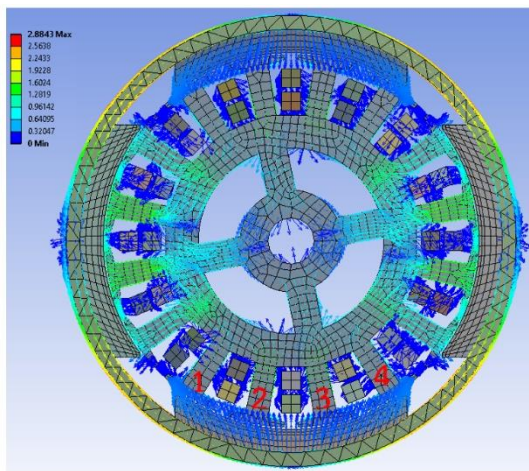
ภาพ 51 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของมอเตอร์

(ก) ต้นแบบ

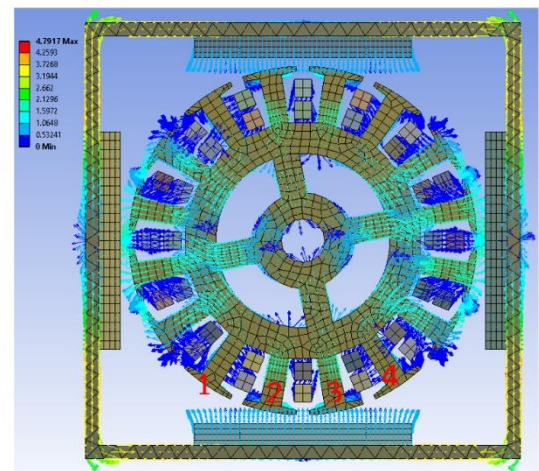
(ข) แม่เหล็กขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม.

การวิเคราะห์ผลของช่องว่างอากาศ (Air Gab) ของมอเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างสเตเตอร์เป็นแบบสี่เหลี่ยมและติดตั้งแม่เหล็กถาวรแบบสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นแนวระนาบ จึงทำให้เกิดช่องว่างอากาศมากกว่ามอเตอร์ต้นแบบ โดยได้ทำการเปรียบเทียบมอเตอร์ต้นแบบ แสดงในภาพ 52(ก) กับมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วยแม่เหล็กขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม. (ความกว้างมากที่สุด) แสดงในภาพ 52(ข) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บริเวณโรเตอร์กับแม่เหล็กถาวรชิ้นด้านข้างของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว พบว่า มอเตอร์ต้นแบบแสดงในภาพ 52 (ก) ฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่านกระจายบริเวณซี่โรเตอร์หมายเลขที่ 1 2 3 และ 4 กับแม่เหล็กถาวรได้ดีและค่อนข้างสมดุล และในส่วนของมอเตอร์ที่

พัฒนาขึ้นด้วยแม่เหล็กขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม. แสดงในภาพ 52 (ข) บริเวณซีโรเตอร์หมายเลข 2 และ 3 ฟลักซ์แม่เหล็กสามารถไหลผ่านไปยังแม่เหล็กถาวรได้ดีและมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูง เนื่องจากมีช่องว่างอากาศน้อย แต่บริเวณซีโรเตอร์ตำแหน่งที่ 1 และ 4 จะมีฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่านได้น้อย เนื่องจากมีระยะห่างจากแม่เหล็กถาวรมาก จึงส่งผลต่อการเชื่อมโยงทางแม่เหล็กมีประสิทธิภาพโดยรวมของมอเตอร์ที่มีโครงสร้างสเตเตอร์และแม่เหล็กแบบสี่เหลี่ยมลดลงได้



(ก)



(ข)

ภาพ 52 ผลการวิเคราะห์ฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์

(ก) แม่เหล็กขนาด $25 \times 50 \times 5$ มม.

(ข) แม่เหล็กขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม.

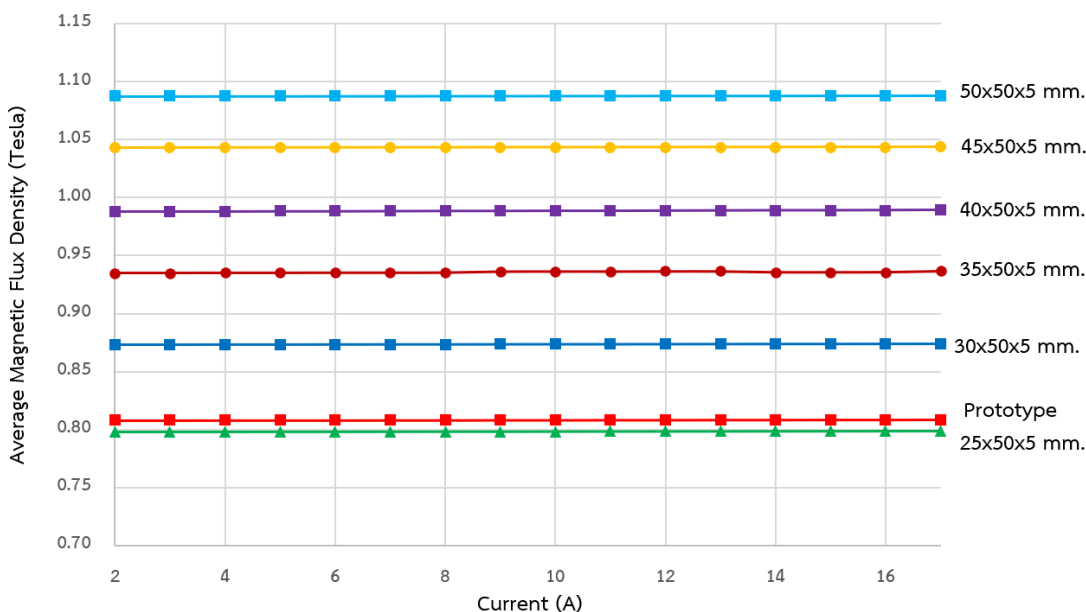
การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ทั้ง 7 ตัว ได้ทำการปรับค่าการกระตุ้นปริมาณกระแสเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์ตามเงื่อนไขกระแสขณะไม่มีโหลดจนถึงโหลดเต็มพิกัด ตั้งแต่ 2 - 17 A แสดงในตารางที่ 16 โดยจากการวิเคราะห์ พบว่า มอเตอร์ต้นแบบมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดตั้งแต่ 0.8080 T จนถึง 0.8087 T ในส่วนของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด $25 \times 50 \times 5$ มม. มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดตั้งแต่ 0.7977 T จนถึง 0.7989 T ในส่วนของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด $30 \times 50 \times 5$ มม. มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดตั้งแต่ 0.8732 T จนถึง 0.8742 T ในส่วนของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด $35 \times 50 \times 5$ มม. มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดตั้งแต่ 0.9350 T จนถึง 0.9369 T ในส่วนของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด $40 \times 50 \times 5$ มม. มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดตั้งแต่ 0.9883 T จนถึง 0.9892 T ในส่วนของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด $45 \times 50 \times 5$ มม. มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดตั้งแต่ 1.0428 T จนถึง 1.0436 T และในส่วนของมอเตอร์แม่เหล็กขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม. มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดตั้งแต่ 1.0875 T จนถึง 1.0882 T

ตาราง 16 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

กระแส (A)	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Tesla)						
	แม่เหล็ก	แม่เหล็ก	แม่เหล็ก	แม่เหล็ก	แม่เหล็ก	แม่เหล็ก	แม่เหล็ก
	ต้นแบบ	25x50x5 มม.	30x50x5 มม.	35x50x5 มม.	40x50x5 มม.	45x50x5 มม.	50x50x5 มม.
2	0.8080	0.7977	0.8732	0.9350	0.9883	1.0428	1.0875
3	0.8080	0.7978	0.8732	0.9350	0.9883	1.0429	1.0875
4	0.8081	0.7978	0.8733	0.9351	0.9883	1.0429	1.0876
5	0.8081	0.7979	0.8733	0.9351	0.9884	1.0430	1.0876
6	0.8081	0.7979	0.8734	0.9352	0.9884	1.0430	1.0877
7	0.8082	0.7980	0.8735	0.9352	0.9885	1.0431	1.0877
8	0.8082	0.7981	0.8735	0.9353	0.9886	1.0431	1.0878
9	0.8083	0.7981	0.8736	0.9364	0.9886	1.0432	1.0878
10	0.8083	0.7982	0.8737	0.9365	0.9887	1.0432	1.0879
11	0.8084	0.7983	0.8737	0.9365	0.9887	1.0433	1.0879
12	0.8084	0.7984	0.8738	0.9366	0.9888	1.0433	1.0880
13	0.8085	0.7985	0.8739	0.9366	0.9889	1.0434	1.0880
14	0.8085	0.7986	0.8740	0.9357	0.9890	1.0434	1.0880
15	0.8086	0.7987	0.8740	0.9357	0.9890	1.0435	1.0881
16	0.8086	0.7988	0.8741	0.9358	0.9891	1.0435	1.0881
17	0.8087	0.7989	0.8742	0.9369	0.9892	1.0436	1.0882

3. เปรียบเทียบการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบและมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้น โดยทำการปรับค่าการกระตุ้นปริมาณกระแสเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์ตามเงื่อนไขกระแสขณะไม่มีโหลดจนถึงโหลดเต็มพิกัด ตั้งแต่ 2 - 17 A จากผลการวิเคราะห์ตารางที่ 16 โดยกำหนดให้กราฟเส้น จำนวน 7 เส้น แสดงในภาพ 53



ภาพ 53 กราฟเปรียบเทียบการจำลองค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการวิเคราะห์ภาพ 53 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ที่ถูกออกแบบพัฒนาขึ้นทั้ง 6 ตัว พบว่า มอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็กถาวรที่มีความกว้างมากจะมีแนวโน้มค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นไปด้วย โดยเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ต้นแบบ จะเห็นได้ว่ามอเตอร์แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม. (ความกว้างแม่เหล็กน้อยที่สุด) มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใกล้เคียงกับมอเตอร์ต้นแบบ แต่ในส่วนของมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นอีก 5 ตัวที่เหลือมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่ามอเตอร์ต้นแบบทั้งหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่ามอเตอร์ต้นแบบที่ประมาณ 34.591 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่า มอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วยแม่เหล็กชนิดนีโอไดเมียมค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สูงขึ้น จึงคาดการณ์ว่าจะส่งผลทำให้แรงบิดของมอเตอร์สูงขึ้น ตามสมการ $T_d = k_c \phi I_a$ ซึ่งส่งผลต่อสมรรถภาพของมอเตอร์ที่สูงขึ้นตามไปด้วย แต่เนื่องจากข้อจำกัดของแม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม รุ่น N35 มีขายในท้องตลาดเพียง 2 ขนาด คือ 25 x 50 x 5 มม. และ 50 x 50 x 5 มม. ในบทที่ 5 จึงทำการสร้างมอเตอร์ 2 ตัว เพื่อเปรียบเทียบสมรรถภาพกับมอเตอร์ต้นแบบต่อไป

บทที่ 5

การสร้างและทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

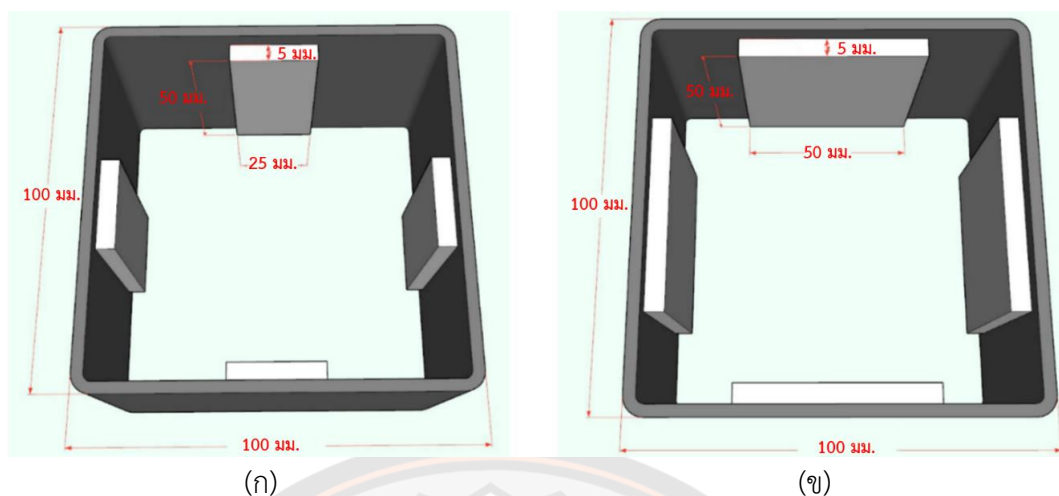
ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงตามค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการปรับเปลี่ยนวัสดุและขนาดและแม่เหล็กถาวร รวมถึงโครงสร้าง สเตเตอร์ และทำการทดสอบสมรรถภาพด้วยเครื่องวัดแรงบิดในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อเปรียบเทียบมอเตอร์กระแสตรงต้นแบบ ได้แก่ ความเร็วรอบ แรงบิด กำลังด้านเข้า กำลังด้านออก ประสิทธิภาพ และการทดสอบมอเตอร์ในการขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้าในสถานการณ์จริงเพื่อทดสอบ ความเร็ว ระยะทาง และพลังงานที่ใช้

การสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจริงที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ห่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสมด้วยการสร้างแบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในบทที่ 4 แล้ว โดยทำการสร้างมอเตอร์จำนวน 2 ตัว เนื่องจากข้อจำกัดของแม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม รุ่น N35 มีขายในท้องตลาดเพียง 2 ขนาด คือ $25 \times 50 \times 5$ มม. และ $50 \times 50 \times 5$ มม. จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์จากมาทำการสร้างสเตเตอร์ และนำสเตเตอร์ที่สร้างเสร็จมาประกอบเข้ากับอุปกรณ์ของมอเตอร์ต้นแบบ ได้แก่ โรเตอร์ แปรงถ่าน ฝาครอบ และชุดเฟืองทดรอบ จึงจะได้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เสร็จสมบูรณ์

1. วัสดุอุปกรณ์และค่าพารามิเตอร์สำหรับการสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

วัสดุสำหรับการสร้างสเตเตอร์และแม่เหล็กถาวรเป็นขนาดที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมี 2 แบบ คือ แบบที่ 1 แม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม รุ่น N35 ขนาด $25 \times 50 \times 5$ มม. และแบบที่ 2 แม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม รุ่น N35 ขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม. แสดงในภาพ 54 และแสดงรายละเอียดดังตาราง 17



ภาพ 54 ขนาดโครงสร้างสเตเตอร์สี่เหลี่ยมและแม่เหล็ก

(ก) แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม.

(ข) แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม.

ตาราง 17 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

พารามิเตอร์	แม่เหล็กขนาด 25x50x5 มม.	แม่เหล็กขนาด 50x50x5 มม.
ความกว้างของสเตเตอร์ (มม.)	100	100
ความสูงของสเตเตอร์ (มม.)	100	100
ความยาวของสเตเตอร์ (มม.)	60	60
ความหนาของสเตเตอร์ (มม.)	3	3
ความกว้างของแม่เหล็ก (มม.)	25	50
ความยาวของแม่เหล็ก (มม.)	50	50
ความหนาของแม่เหล็ก (มม.)	5	5

วัสดุในการสร้างจริงประกอบด้วย โครงสเตเตอร์ แม่เหล็กถาวร และกาวอีพ็อกซี่ แสดงในภาพ 55 – 57 โดยทำการนำแม่เหล็กถาวรติดที่ด้านของโครงสเตเตอร์ทั้ง 4 ด้าน โดยวางชิ้นเนื้อ 2 ด้าน และขั้วใต้ 2 ด้าน โดยในแต่ละด้านต้องสลักขั้วแม่เหล็ก จากนั้นยึดด้วยกาวอีพ็อกซี่ให้แน่น โดยสเตเตอร์ที่ประกอบเสร็จ แสดงในภาพ 58



ภาพ 55 สเตเตอร์สี่เหลี่ยม



(ก)

(ข)

ภาพ 56 แม่เหล็กแรงสูงชนิดนีโอไดเมียม

(ก) ขนาด 25 x 50 x 5 มม.

(ข) ขนาด 50 x 50 x 5 มม.



ภาพ 57 กาวอีพ็อกซี



ภาพ 58 โครงสร้างสเตเตอร์สี่เหลี่ยมและแม่เหล็กจริง

(ก) แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม.

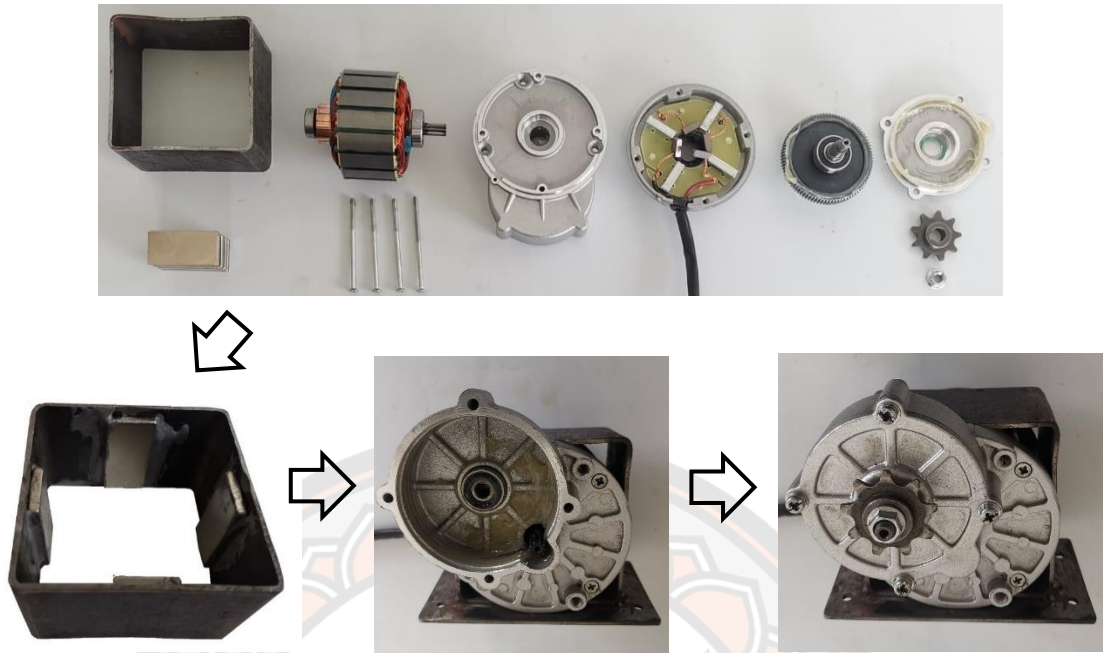
(ข) แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม.

2. ขั้นตอนการประกอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์

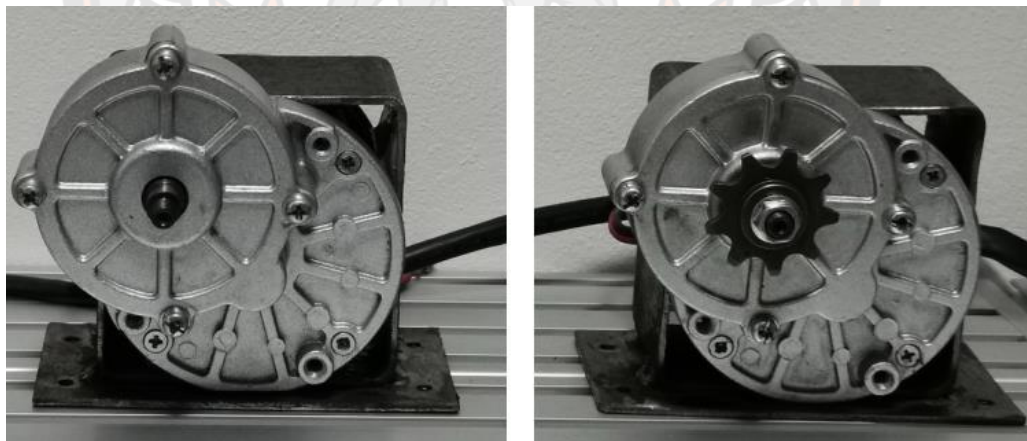
ขั้นตอนการประกอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์
เอลิเมนต์ ดังนี้

- 1) ทำการสร้างสเตเตอร์และขั้วแม่เหล็กถาวร ดังภาพที่ 58
- 2) นำโรเตอร์ ใส่ฝาครอบด้านหน้าและด้านหลัง แปรรงถ่าน และประกอบเข้าไปใน
สเตเตอร์
- 3) ประกอบชุดเฟืองทดรอบ ฝาครอบ และประกอบเฟืองจักรยานเข้ากับปลายเพลลาของ
โรเตอร์

แสดงขั้นตอนการประกอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงดังในภาพ 59 และมอเตอร์เตอร์
กระแสตรง ที่ประกอบเสร็จแสดงในภาพ 60



ภาพ 59 ขั้นตอนการประกอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



(ก)

(ข)

ภาพ 60 มอเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์จากการเปลี่ยนสเตเตอร์และแม่เหล็ก

(ก) แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม.

(ข) แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม.

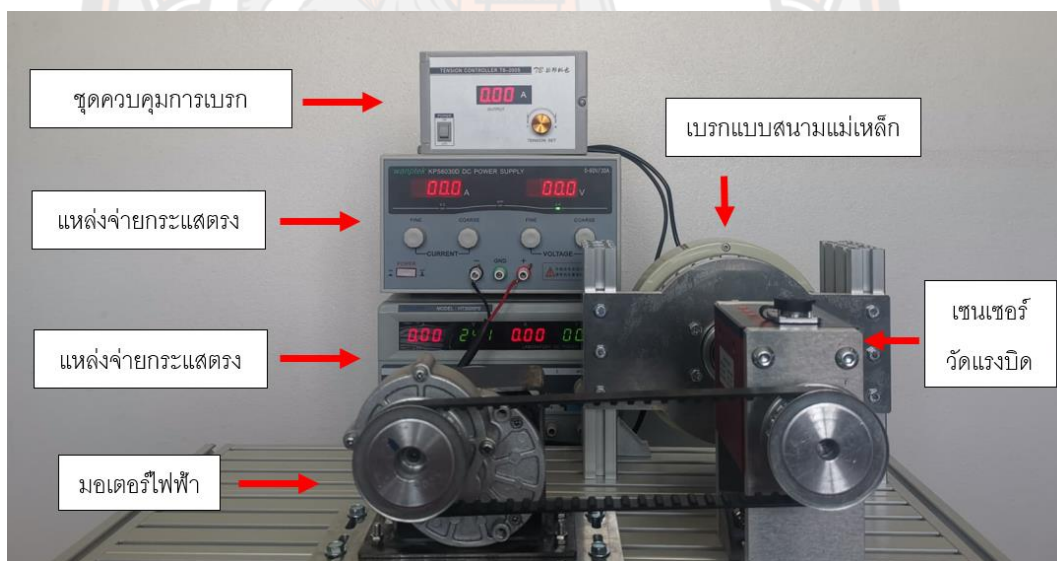
การทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถภาพของมอเตอร์ ได้แก่ ความเร็วรอบ แรงบิด กำลังด้านออก กำลังด้านเข้า ประสิทธิภาพ เป็นต้น

1. เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

แสดงการติดตั้งเครื่องมือและเครื่องวัดการทดสอบสมรรถภาพมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในห้องปฏิบัติการดังในภาพ 61 ประกอบด้วย

- 1) เซนเซอร์วัดแรงบิด พิกัด 30 Nm
- 2) เบรกมอเตอร์แบบสนามแม่เหล็ก พิกัด 25 Nm
- 3) ชุดควบคุมเบรกมอเตอร์แบบสนามแม่เหล็ก พิกัด 0-3 A
- 4) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับค่าได้ พิกัด 0-30 V 5 A
- 5) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับค่าได้ พิกัด 0-60 V 30 A



ภาพ 61 การทดสอบมอเตอร์กระแสตรงในห้องปฏิบัติการ

การแสดงผลจากเซนเซอร์วัดแรงบิด ประกอบด้วย ค่าแรงบิด ค่ากำลังด้านออก และ ความเร็วรอบ แสดงในภาพ 62



ภาพ 62 ค่าที่แสดงผลจากเซนเซอร์วัดแรงบิด

2. ผลการทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มี 3 การทดสอบ คือ

การทดสอบที่ 1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ

การทดสอบที่ 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม.

การทดสอบที่ 3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม.

การทดสอบเริ่มจากจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 24.0 V ให้กับมอเตอร์ และทำการวัดค่า แรงดันด้านเข้า กระแสด้านเข้า ความเร็วรอบ แรงบิด กำลังด้านออก จากนั้นคำนวณค่ากำลังด้านเข้า ประสิทธิภาพ โดยในการทดสอบจะทำการการควบคุมปรับภาระโหลดแบบเบรกด้วยสนามแม่เหล็กที่ต่อร่วมอยู่กับเพลลาของมอเตอร์ ซึ่งในระหว่างการทดสอบจะปรับภาระโหลดเริ่มจากจากขณะไม่มีโหลดไปจนถึงที่โหลดเต็มพิกัดที่กระแสด้านเข้ามอเตอร์ 17.0 A โดยผลการทดสอบทั้ง 3 การทดสอบ แสดงในตาราง 18 ถึง ตาราง 20 ตามลำดับ

ตาราง 18 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ

ลำดับ	ค่าที่ได้จากการวัด					ค่าการคำนวณ	
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	ความเร็ว (RPM)	แรงบิด (Nm)	กำลังด้าน ออก (W)	กำลังด้าน เข้า (W)	ประสิทธิ ภาพ (%)
1	24.0	1.7	349	0.06	2.00	40.80	4.90
2	24.0	2.0	348	0.24	8.00	48.00	16.67
3	24.0	2.9	344	0.85	30.00	69.60	43.10
4	24.0	4.0	340	1.57	55.00	96.00	57.29
5	24.0	5.0	335	2.24	78.00	120.00	65.00
6	24.0	6.1	329	2.93	100.00	146.40	68.31
7	24.0	7.3	324	3.63	123.00	175.20	70.21
8	24.0	8.1	321	4.15	139.00	194.40	71.50
9	24.0	9.0	316	4.77	157.00	216.00	72.69
10	24.0	10.0	312	5.40	176.00	240.00	73.33
11	24.0	11.0	309	6.01	194.00	264.00	73.48
12	24.0	12.0	304	6.76	215.00	288.00	74.65
13	24.0	13.0	301	7.41	233.00	312.00	74.68
14	24.0	14.1	297	8.08	250.00	338.40	73.88
15	24.0	15.2	292	8.83	269.00	364.80	73.74
16	24.0	16.1	289	9.58	286.00	386.40	74.02
17	24.0	17.0	286	9.74	291.00	408.00	71.32

จากการทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ พบว่า ความเร็วรอบสูงสุดที่ขณะไม่มีโหลด 349 รอบต่อนาที และลดลงต่ำสุดที่โหลดเต็มพิกัด 286 รอบต่อนาที แรงบิดสูงสุดที่ 9.74 นิวตัน-เมตร กำลังด้านออกสูงสุดที่ 291.00 วัตต์ และประสิทธิภาพสูงสุดที่ 74.68 เปอร์เซ็นต์ (ที่ความเร็วรอบ 301 รอบต่อนาที)

ตาราง 19 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นแม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม.

ลำดับ	ค่าที่ได้จากการวัด					ค่าการคำนวณ	
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	ความเร็ว (RPM)	แรงบิด (Nm)	กำลังด้าน ออก (W)	กำลังด้าน เข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
1	24.0	1.7	343	0.06	2.00	40.80	4.90
2	24.0	2.0	340	0.26	8.00	48.00	16.67
3	24.0	3.0	336	0.87	32.44	72.00	45.06
4	24.0	3.9	332	1.49	52.00	93.60	55.56
5	24.0	5.0	328	2.23	76.00	120.00	63.33
6	24.0	6.0	325	2.82	95.00	144.00	65.97
7	24.0	7.0	321	3.51	117.00	168.00	69.64
8	24.0	8.0	318	4.12	136.00	192.00	70.83
9	24.0	9.2	314	4.86	160.00	220.80	72.46
10	24.0	10.2	310	5.53	179.00	244.80	73.12
11	24.0	11.1	307	6.11	196.00	266.40	73.57
12	24.0	12.0	305	6.56	211.00	288.00	73.26
13	24.0	12.9	302	7.19	227.00	309.60	73.32
14	24.0	14.1	297	7.94	246.00	338.40	72.70
15	24.0	15.3	293	8.74	268.00	367.20	72.98
16	24.0	16.0	290	9.11	280.00	384.00	72.92
17	24.0	17.0	286	9.87	295.00	408.00	72.30

จากการทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม. พบว่า ความเร็วรอบสูงสุดที่ขณะไม่มีโหลด 343 รอบต่อนาที และลดลงต่ำสุดที่โหลดเต็ม พิกัด 286 รอบต่อนาที แรงบิดสูงสุดที่ 9.87 นิวตัน-เมตร กำลังด้านออกสูงสุดที่ 295.00 วัตต์ และ ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 73.57 เปอร์เซ็นต์ (ที่ความเร็วรอบ 307 รอบต่อนาที)

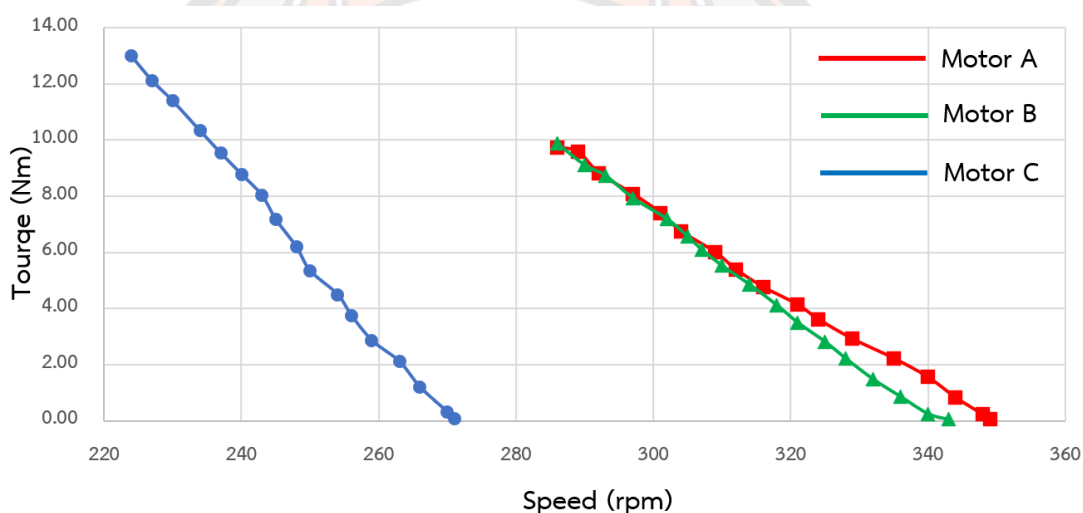
ตาราง 20 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นแม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม.

ลำดับ	ค่าที่ได้จากการวัด					ค่าการคำนวณ	
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	ความเร็ว (RPM)	แรงบิด (Nm)	กำลังด้าน ออก (W)	กำลังด้าน เข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
1	24.0	1.7	271	0.07	1.00	40.80	2.45
2	24.0	2.0	270	0.31	9.00	48.00	18.75
3	24.0	3.0	266	1.20	33.00	72.00	45.83
4	24.0	4.0	263	2.11	58.00	96.00	60.42
5	24.0	5.0	259	2.86	79.00	120.00	65.83
6	24.0	6.0	256	3.76	100.00	144.00	69.44
7	24.0	7.0	254	4.50	119.00	168.00	70.83
8	24.0	8.0	250	5.35	139.00	192.00	72.40
9	24.0	9.0	248	6.20	161.00	216.00	74.54
10	24.0	10.0	245	7.18	184.00	240.00	76.67
11	24.0	11.1	243	8.03	204.00	266.40	76.58
12	24.0	12.0	240	8.79	220.00	288.00	76.39
13	24.0	13.0	237	9.54	236.00	312.00	75.64
14	24.0	14.0	234	10.33	254.00	336.00	75.60
15	24.0	15.1	230	11.40	274.00	362.40	75.61
16	24.0	16.0	227	12.12	288.00	384.00	75.00
17	24.0	17.0	224	13.00	304.00	408.00	74.51

จากการทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. พบว่า ความเร็วรอบสูงสุดที่ขณะไม่มีโหลด 271 รอบต่อนาที และลดลงต่ำสุดที่โหลดเต็ม พิกัด 224 รอบต่อนาที แรงบิดสูงสุดที่ 13.00 นิวตัน-เมตร กำลังด้านออกสูงสุดที่ 304.00 วัตต์ และ ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 76.67 เปอร์เซ็นต์ (ที่ความเร็วรอบ 245 รอบต่อนาที)

3. เปรียบเทียบผลการทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

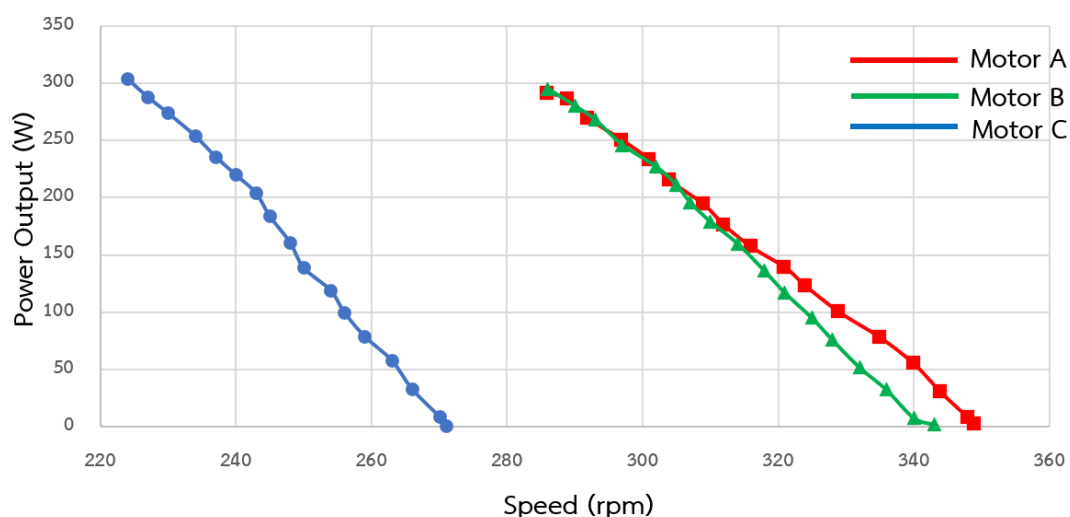
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นจากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้ง 2 ตัว ได้ผลการเปรียบเทียบดังภาพ 63 ถึงภาพ 67 ตามลำดับ โดยกำหนดให้กราฟเส้น จำนวน 3 เส้น ประกอบด้วย Motor A (เส้นสีแดง) คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ Motor B (เส้นสีเขียว) คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด $25 \times 50 \times 5$ มม. และ Motor C (เส้นสีฟ้า) คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม.



ภาพ 63 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงบิดกับความเร็วรอบ

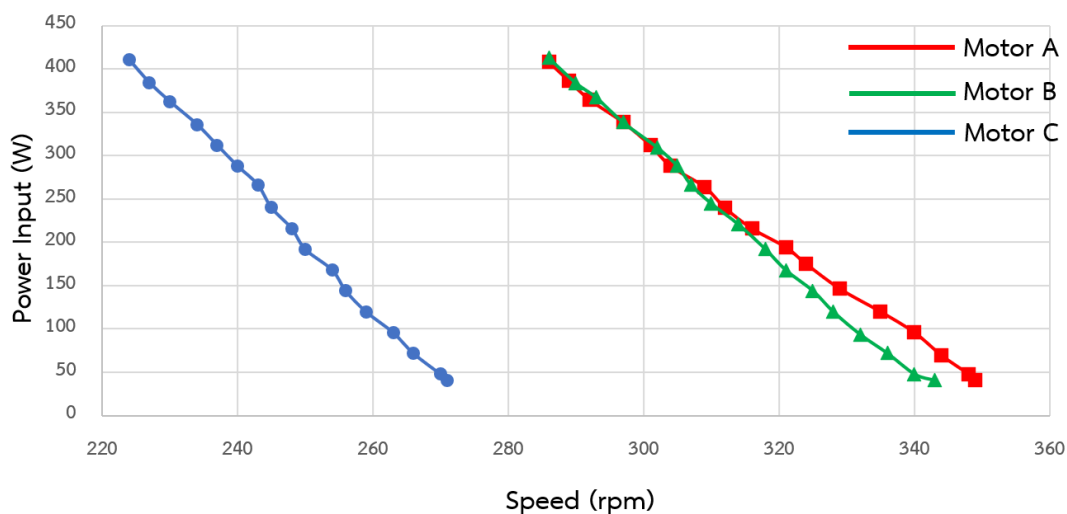
ภาพ 63 แสดงกราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ (Motor A) มีความเร็วรอบสูงสุดที่ขณะไม่มีโหลด 349 รอบต่อ นาที และลดลงต่ำสุดที่โหลดเต็มพิกัด 286 รอบต่อ นาที แรงบิดสูงสุดที่ 9.74 นิวตัน-เมตร ในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด $25 \times 50 \times 5$ มม. (Motor B) มีความเร็วรอบสูงสุดที่ขณะไม่มีโหลด 343 รอบต่อ นาที และลดลงต่ำสุดที่โหลดเต็มพิกัด 286 รอบต่อ นาที แรงบิดสูงสุดที่ 9.87 นิวตัน-เมตร และในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม. (Motor C) มีความเร็วรอบสูงสุดที่ขณะไม่มีโหลด 271 รอบต่อ นาที และลดลงต่ำสุดที่โหลดเต็มพิกัด 224 รอบต่อ นาที แรงบิดสูงสุดที่ 13.00 นิวตัน-เมตร เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบของแรงบิด พบว่า Motor C มีแรงบิดสูงสุดที่มากกว่า Motor A เท่ากับ 33.47 เปอร์เซ็นต์ และ Motor C

มีแรงบิดสูงสุดที่มากกว่า Motor B เท่ากับ 31.71 เปอร์เซ็นต์ และในส่วนของการเปรียบเทียบผลการทดสอบความเร็วรอบ พบว่า Motor C มีความเร็วรอบสูงสุดที่น้อยกว่า Motor A และ Motor B เท่ากันที่ 27.67 เปอร์เซ็นต์



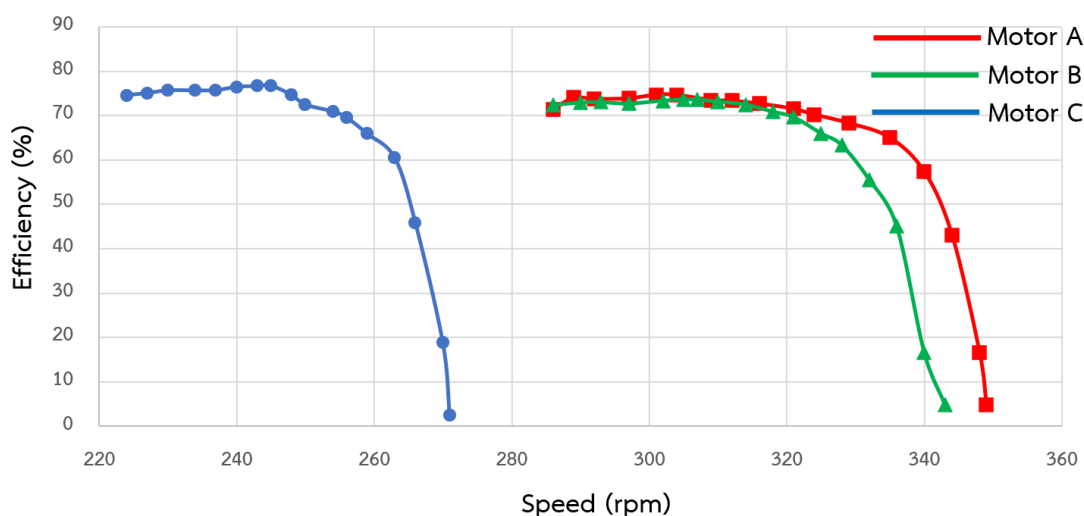
ภาพ 64 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าต้านออกกับความเร็วยรอบ

ภาพ 64 แสดงกราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าต้านออกกับความเร็วยรอบของมอเตอร์ โดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ (Motor A) มีกำลังต้านออกสูงสุด 291.00 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 286 รอบต่อนาที ในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม. (Motor B) มีกำลังต้านออกสูงสุด 295.00 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 286 รอบต่อนาที และในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. (Motor C) มีกำลังต้านออกสูงสุด 304.00 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 286 รอบต่อนาที เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบของกำลังต้านออก พบว่า Motor C มีกำลังต้านออกสูงสุดที่มากกว่า Motor A เท่ากับ 4.47 เปอร์เซ็นต์ และ Motor C มีแรงบิดสูงสุดที่มากกว่า Motor B เท่ากับ 1.37 เปอร์เซ็นต์



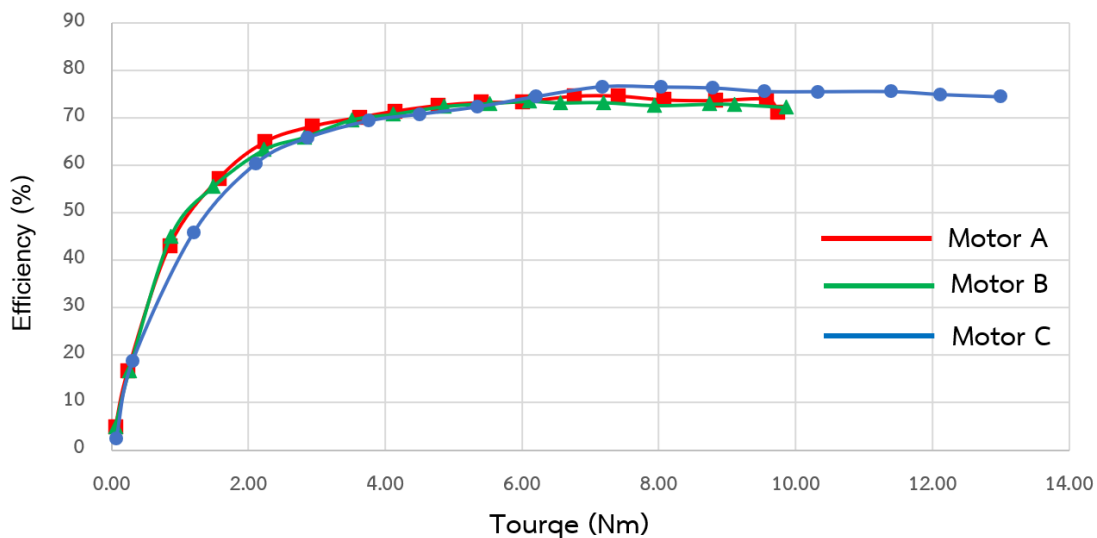
ภาพ 65 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้ากับความเร็วรอบ

ภาพ 65 แสดงกราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้ากับความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ (Motor A) มีกำลังด้านเข้าสูงสุด 408.00 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 286 รอบต่อนาที ในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม. (Motor B) มีกำลังด้านเข้าสูงสุด 408.00 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 286 รอบต่อนาที และในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. (Motor C) มีกำลังด้านออกสูงสุด 408.00 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 286 รอบต่อนาที เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบของกำลังด้านออก พบว่า มอเตอร์ทั้ง 3 ตัว มีกำลังด้านเข้าสูงสุดเท่ากันที่ 408.00 วัตต์ เนื่องจากในการทดสอบได้กำหนดกระแสด้านเข้าสูงสุดที่ 17.0 แอมแปร์ และแรงดันด้านเข้า 24.0 โวลต์



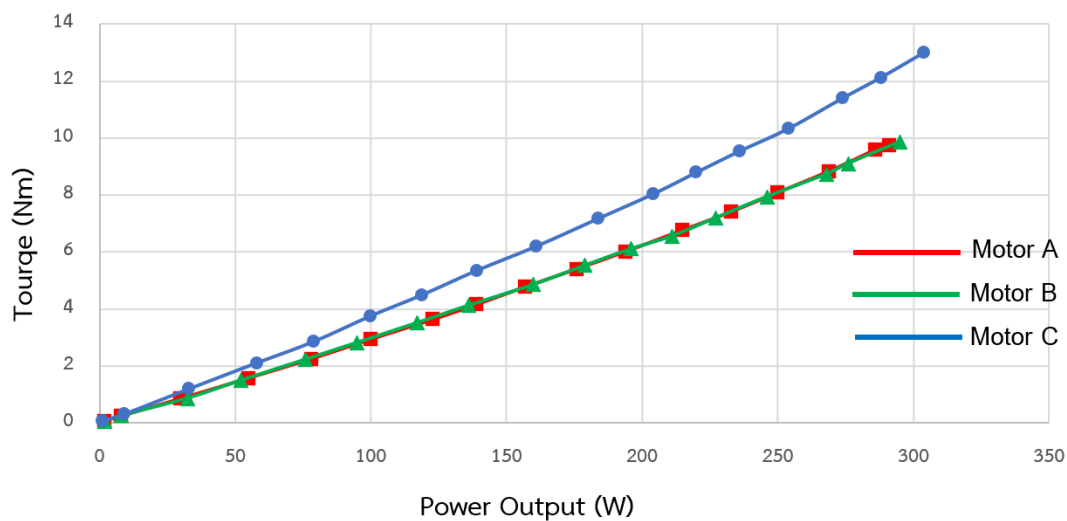
ภาพ 66 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าประสิทธิภาพกับความเร็วรอบ

ภาพ 66 แสดงกราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าประสิทธิภาพกับความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ (Motor A) มีประสิทธิภาพสูงสุด 74.68 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 301 รอบต่อนาที ในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม. (Motor B) มีประสิทธิภาพสูงสุด 73.57 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 307 รอบต่อนาที และในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. (Motor C) มีประสิทธิภาพสูงสุด 76.67 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 245 รอบต่อนาที เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบของประสิทธิภาพ พบว่า Motor C มีประสิทธิภาพสูงสุดที่มากกว่า Motor A เท่ากับ 2.66 เปอร์เซ็นต์ และ Motor C มีประสิทธิภาพสูงสุดที่มากกว่า Motor B เท่ากับ 4.33 เปอร์เซ็นต์



ภาพ 67 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าประสิทธิภาพกับแรงบิด

ภาพ 67 แสดงกราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าประสิทธิภาพกับแรงบิดของมอเตอร์ โดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ (Motor A) มีประสิทธิภาพสูงสุด 74.68 เปอร์เซ็นต์ ที่แรงบิดที่ 7.41 นิวตัน-เมตร ในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม. (Motor B) มีประสิทธิภาพสูงสุด 73.57 เปอร์เซ็นต์ ที่แรงบิดที่ 6.11 นิวตัน-เมตร และในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. (Motor C) มีประสิทธิภาพสูงสุด 76.67 เปอร์เซ็นต์ แรงบิดที่ 7.18 นิวตัน-เมตร เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบของประสิทธิภาพพบว่า Motor C มีประสิทธิภาพสูงสุดที่มากกว่า Motor A เท่ากับ 2.66 เปอร์เซ็นต์ และ Motor C มีประสิทธิภาพสูงสุดที่มากกว่า Motor B เท่ากับ 4.33 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบของแรงบิด พบว่า Motor C มีแรงบิดสูงสุดที่มากกว่า Motor A เท่ากับ 33.47 เปอร์เซ็นต์ และ Motor C มีแรงบิดสูงสุดที่มากกว่า Motor B เท่ากับ 31.71 เปอร์เซ็นต์



ภาพ 68 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงบิดกับกำลังไฟฟ้าด้านออก

ภาพ 68 แสดงกราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงบิดกับกำลังไฟฟ้าด้านออก เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังด้านออกที่เท่ากัน พบว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. (Motor C) มีแรงบิดสูงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ (Motor A) กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม. (Motor B) อยู่ที่ประมาณ 1.2 เท่า

การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขับเคลื่อนรถจักรยานไฟฟ้า

การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับรถจักรยานไฟฟ้า โดยการนำทั้ง 3 ตัวมาติดตั้งเพื่อขับเคลื่อนในรถจักรยานไฟฟ้าดังแสดงในภาพ 69 เพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการขับขี่

1. เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) แบตเตอรี่ตะกั่วกรด พิกัด 12 V 21 Ah จำนวน 2 ลูก
- 2) ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ พิกัด 24 V 350 W
- 3) เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ยี่ห้อ ATORCH รุ่น DT24
- 4) รถจักรยานเสือภูเขา ยี่ห้อ SEEFAR ขนาด 24 นิ้ว
- 5) สมาร์ทโฟน ติดตั้งแอปพลิเคชัน Speedometer



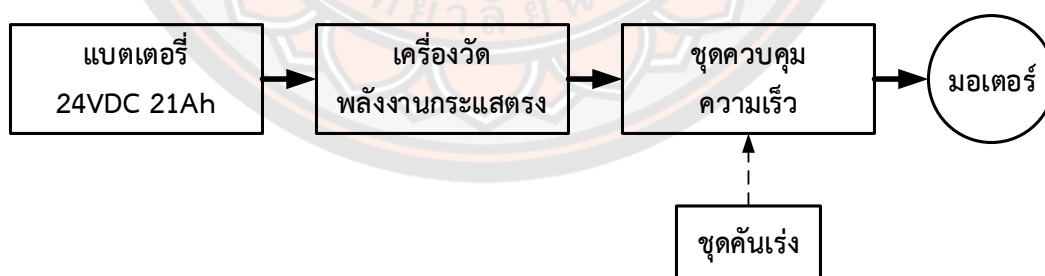
ภาพ 69 จักรยานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพ 70 แสดงมีอัตราส่วนการทดรอบจากมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านโซ่ ขับเฟืองไปยังล้อรถจักรยานไฟฟ้า ล้อจักรยานมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 66 เซนติเมตร เฟืองหน้าที่แกนมอเตอร์มีจำนวน 9 ฟัน และเฟืองหลังสามารถปรับได้จำนวน 14 18 20 22 และ 24 ฟัน ตามลำดับ



ภาพ 70 เฟืองและขนาดล้อจักรยานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพ 71 แสดงไดอะแกรมของการทดสอบรถจักรยานไฟฟ้า ประกอบด้วย แบตเตอรี่ 12 โวลต์ 21 แอมแปร์ จำนวน 2 ลูกต่ออนุกรมกัน ต่อเข้ากับด้านเข้าของเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า กระแสตรง เพื่อวัดค่าแรงดัน กระแส และพลังงานไฟฟ้า ที่จ่ายให้กับชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ ขนาด 24 โวลต์ 350 วัตต์ ซึ่งควบคุมถูกควบคุมด้วยชุดคั่นเร่ง เพื่อปรับแรงดันด้านออกให้ได้ ความเร็วที่เหมาะสมสำหรับจ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพ 71 ไดอะแกรมของจักรยานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพ 72 แสดงผลของเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วย แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า และในภาพ 73 แสดงผลของแอปพลิเคชัน Speedometer ประกอบด้วย ความเร็วสูงสุด ความเร็วเฉลี่ย ระยะทาง และเวลาในการเดินทาง



ภาพ 72 ค่าที่แสดงผลจากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพ 73 ค่าที่แสดงผลจากแอปพลิเคชัน Speedometer

2. การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้า

ในการทดสอบการใช้พลังงานของรถจักรยานไฟฟ้า พื้นที่ในการทดสอบการขับขี่ตามเส้นทางอาคารเรียนภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จ.พิษณุโลก พื้นที่ 1,000 ไร่ โดยมีถนนรอบมหาวิทยาลัย ประมาณ 5.012 กิโลเมตร แสดงแผนที่ทางภูมิศาสตร์แสดงในภาพที่ 74

จักรยานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบเป็นจักรยานเสือภูเขา โดยผู้ขับขี่มีน้ำหนัก 65 กิโลกรัม โดยเส้นทางใช้ถนนรอบมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม โดยได้ทำการทดสอบเปลี่ยนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการขับเคลื่อน โดยทำการทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มี 3 การทดสอบ คือ

การทดสอบที่ 1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ

การทดสอบที่ 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม.

การทดสอบที่ 3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม.



ภาพ 74 ภาพภูมิศาสตร์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ ส่วนทะเลแก้ว

3. ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขับเคลื่อนรถจักรยานไฟฟ้า

การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการขับเคลื่อนรถจักรยานไฟฟ้า โดยใช้เส้นทางการขับขี่จักรยานระหว่างอาคารเรียนภายในมหาวิทยาลัย ซึ่งเงื่อนไขการทดลองที่ระยะทาง 25 กิโลเมตร ที่ความเร็วตามสถานการณ์จริง โดยในระหว่างการทดสอบจะทำการการบันทึกค่าระยะทาง เวลา ความเร็วเฉลี่ย ความเร็วสูงสุด ความเร็วมอเตอร์เฉลี่ย แรงดัน กระแส กำลัง และพลังงานที่แบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยผลการทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของทั้ง 3 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบที่ 1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ การทดสอบที่ 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม. และการทดสอบที่ 3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. แสดงในตาราง 21

ตาราง 21 ผลการทดสอบรถจักรยานไฟฟ้า

พารามิเตอร์	มอเตอร์ต้นแบบ	มอเตอร์แม่เหล็ก	มอเตอร์แม่เหล็ก
		25x50x5 มม.	50x50x5 มม.
ระยะทาง (km)	25	25	25
เวลา (s)	4,714	4,732	4,797
ความเร็วเฉลี่ย (km/h)	19.18	19.10	18.92
ความเร็วสูงสุด (km/h)	22.75	22.09	22.58
ความเร็วมอเตอร์เฉลี่ย (rpm)	308.34	307.05	236.57
แรงดันเฉลี่ย (V)	23.97	23.88	24.01
กระแสเฉลี่ย (A)	7.21	6.02	7.24
กำลังต้านเข้าเฉลี่ย (W)	171.15	166.91	173.17
พลังงานที่ใช้ (kWh)	0.224	0.219	0.230

จากตาราง 21 ความเร็วมอเตอร์เฉลี่ยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (12) โดยคำนวณแปลงกลับจากความเร็วเฉลี่ย ผ่านเส้นรอบวงล้อรถจักรยาน ผ่านเฟืองหลังและเฟืองหน้า

$$\text{ความเร็วรอบมอเตอร์เกียร์} = \frac{\text{ความเร็วเฉลี่ย(km/h)} \times 1000 \text{ (m)}}{60 \text{ (นาทิจ)} \times \text{เส้นรอบวงล้อ (m)}} \times \frac{\text{เฟืองหลัง}}{\text{เฟืองหน้า}} \quad (12)$$

$$\text{ความเร็วรอบมอเตอร์เกียร์ต้นแบบ} = \frac{19.18 \times 1000}{60 \times \pi \times 0.66} \times \frac{18}{9} = 308.34 \text{ rpm}$$

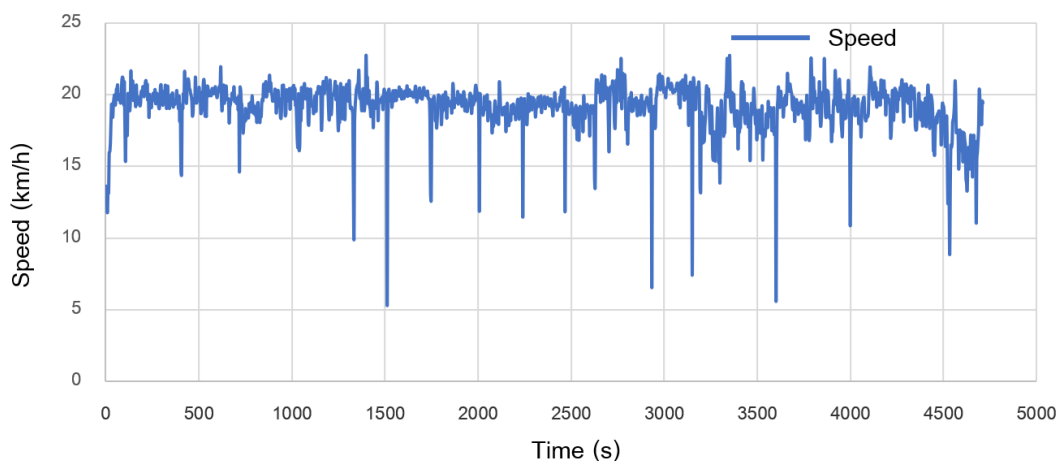
$$\text{ความเร็วรอบมอเตอร์เกียร์ 25x50x5 มม.} = \frac{19.10 \times 1000}{60 \times \pi \times 0.66} \times \frac{18}{9} = 307.05 \text{ rpm}$$

$$\text{ความเร็วรอบมอเตอร์เกียร์ 50x50x5 มม.} = \frac{18.92 \times 1000}{60 \times \pi \times 0.66} \times \frac{14}{9} = 236.57 \text{ rpm}$$

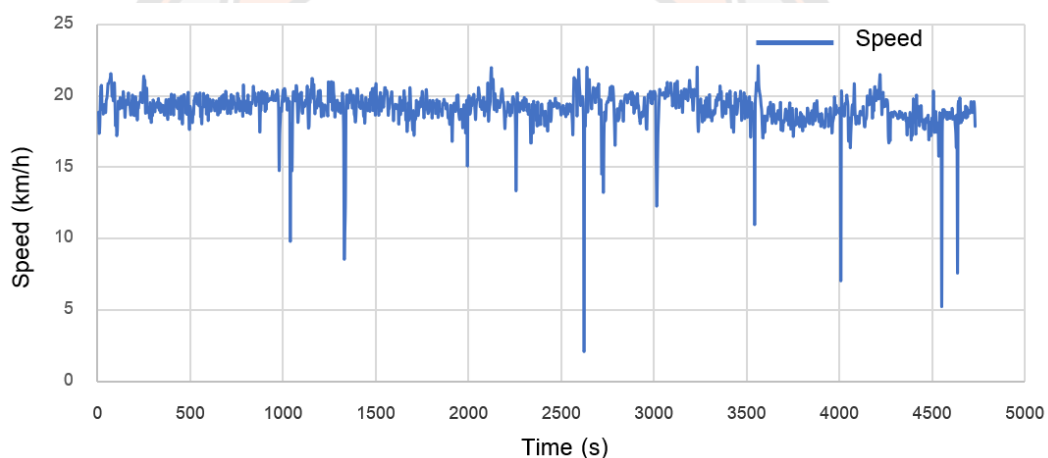
จากตาราง 21 ผลการทดสอบที่ 1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ ใช้เวลาในการเดินทาง 4,714 วินาที ความเร็วเฉลี่ย 19.18 km/h ความเร็วสูงสุด 22.75 km/h ความเร็วมอเตอร์เฉลี่ย 274 แรงดันที่ใช้เฉลี่ย 23.97 V กระแสที่ใช้เฉลี่ย 7.21 A กำลังด้านเข้ามอเตอร์เฉลี่ย 171.15 W และพลังงานที่แบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ 0.224 kWh ในส่วนของผลการทดสอบที่ 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม. ใช้เวลาในการเดินทาง 4,732 วินาที ความเร็วเฉลี่ย 19.10 km/h ความเร็วสูงสุด 22.09 km/h ความเร็วมอเตอร์เฉลี่ย 239 แรงดันที่ใช้เฉลี่ย 23.88 V กระแสที่ใช้เฉลี่ย 6.02 A กำลังด้านเข้ามอเตอร์เฉลี่ย 166.91 W และพลังงานที่แบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ 0.219 kWh และผลการทดสอบที่ 3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. ใช้เวลาในการเดินทาง 4,797 วินาที ความเร็วเฉลี่ย 18.92 km/h ความเร็วสูงสุด 22.58 km/h ความเร็วมอเตอร์เฉลี่ย 236 แรงดันที่ใช้เฉลี่ย 24.01 V กระแสที่ใช้เฉลี่ย 7.24 A กำลังด้านเข้ามอเตอร์เฉลี่ย 173.17 W และพลังงานที่แบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ 0.230 kWh

ผลของการเปรียบเทียบด้านการใช้พลังงานที่ระยะทางการทดสอบ 25 กิโลเมตร เท่ากัน พบว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม. ใช้พลังงานต่ำที่สุด คือ 0.219 kWh ซึ่งต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ 2.23 เปอร์เซ็นต์ และต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. ที่ 4.78 เปอร์เซ็นต์ โดยสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในบทที่ 4 ซึ่งมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม. มีค่าต่ำสุดจึงส่งผลต่อการใช้พลังงานต่ำสุดเช่นเดียวกัน และในทำนองเดียวกันมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงที่สุดจึงทำให้ใช้พลังงานสูงที่สุดตามไปด้วย

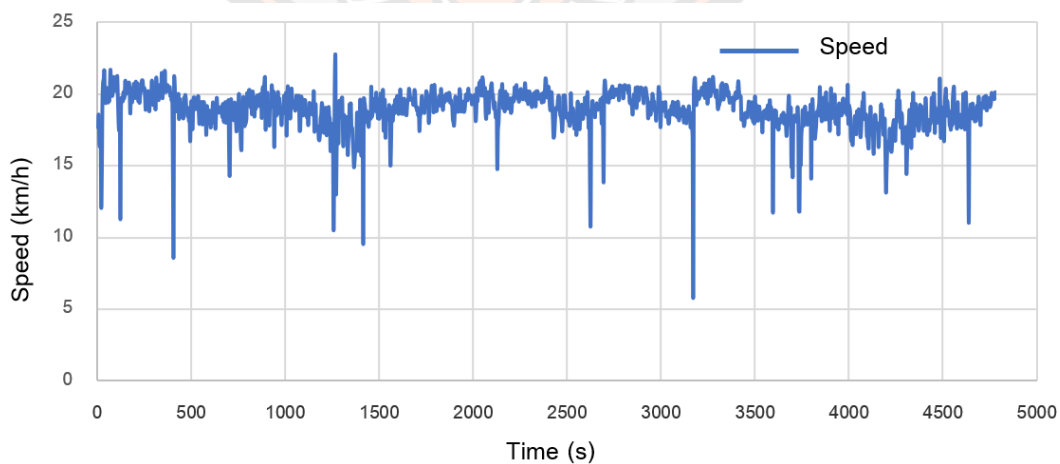
ภาพ 75 ถึง ภาพ 77 แสดงผลการบันทึกความเร็วขณะขับขี่ของทั้ง 3 การทดสอบ จากแอปพลิเคชัน Speedometer ที่ระยะทางในการทดสอบ 25 กิโลเมตร



ภาพ 75 กราฟความเร็วของของจักรยานไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ต้นแบบ

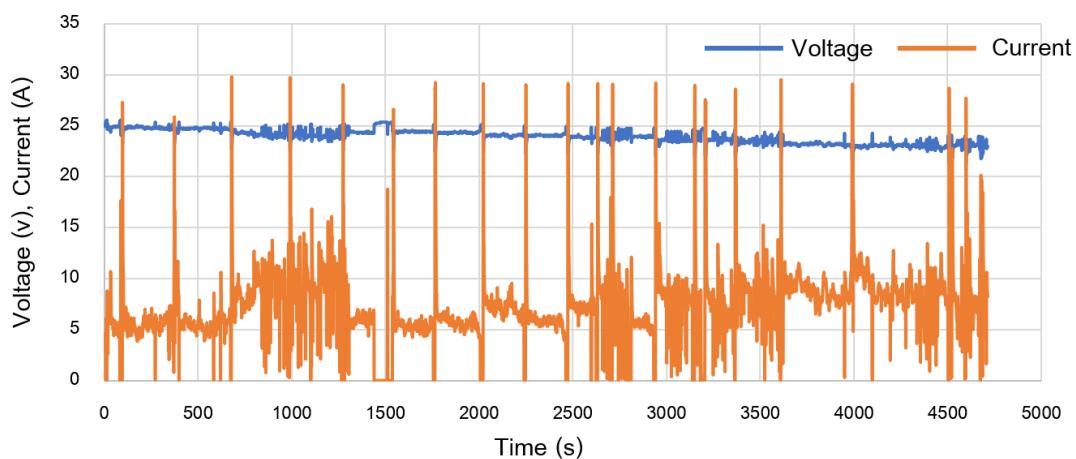


ภาพ 76 กราฟความเร็วของจักรยานไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แม่เหล็ก 25 x 50 x 5 มม.

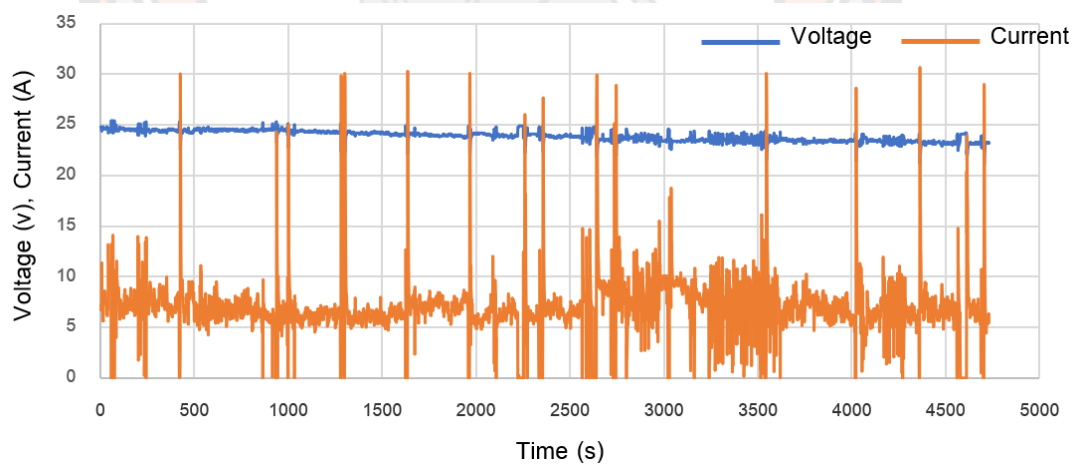


ภาพ 77 กราฟความเร็วของจักรยานไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แม่เหล็ก 50 x 50 x 5 มม.

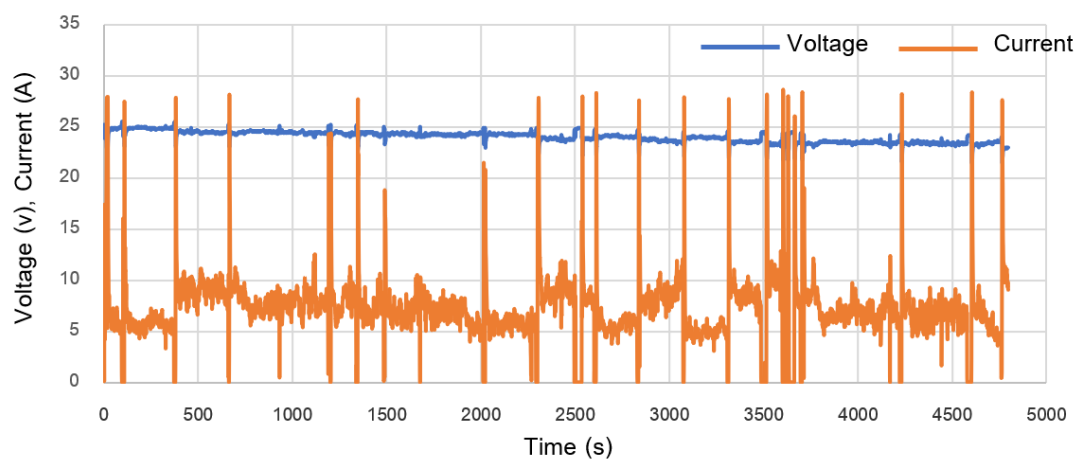
ภาพ 78 ถึง ภาพ 80 แสดงผลการบันทึกแรงดันที่แบตเตอรี่และกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ขณะขับขึ้นของทั้ง 3 การทดสอบจากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะทางในการทดสอบ 25 กิโลเมตร



ภาพ 78 กราฟแรงดันและกระแสของมอเตอร์ต้นแบบ



ภาพ 79 กราฟแรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็ก 25 x 50 x 5 มม.



ภาพ 80 กราฟแรงดันและกระแสของมอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็ก 50 x 50 x 5 มม.



บทที่ 6

บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์สมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถจักรยานไฟฟ้าด้วยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อออกแบบพัฒนาและสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีสมรรถภาพสูงขึ้น โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์สร้างแบบจำลองมอเตอร์ของมอเตอร์เพื่อปรับวัสดุและโครงสร้างเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทำให้ช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายก่อนการสร้างจริง จากนั้นทำการทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ต้นแบบและมอเตอร์ที่สร้างขึ้นและนำมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ รวมถึงการทดสอบมอเตอร์ในการขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้าในสถานการณ์จริง โดยผลการศึกษาที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังนี้

สรุปผลการวิจัย

การสรุปผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตามผลการวิจัยที่ได้ศึกษา ได้แก่ ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขับเคลื่อนรถจักรยานไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench (Release 16.0) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ถูกออกแบบพัฒนาขึ้นทั้ง 6 ตัว ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ด้วยการปรับขนาดของแม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม ที่มีความยาว 50 มม. ความหนา 5 มม. เท่ากันทุกชิ้น โดยปรับเปลี่ยนความกว้างจำนวน 6 ขนาด ตั้งแต่ความกว้าง 25 มม. 30 มม. 35 มม. 40 มม. 45 มม. และ 50 มม. จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า มอเตอร์ที่ถูกออกแบบขึ้นด้วยการใช้แม่เหล็กถาวรที่มีความกว้างมากจะมีแนวโน้มค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ต้นแบบ จะเห็นได้ว่ามอเตอร์แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม. (ความกว้างแม่เหล็กน้อยที่สุด) มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใกล้เคียงกับมอเตอร์ต้นแบบ แต่ในส่วนของมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นอีก 5 ตัวที่เหลือมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่ามอเตอร์ต้นแบบทั้งหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่ามอเตอร์ต้นแบบที่ประมาณ 34.591 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่า มอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วยแม่เหล็กชนิด

นีโอไดเมียมค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สูงขึ้น จึงคาดการณ์ว่าจะส่งผลทำให้แรงบิดของมอเตอร์สูงขึ้น ตามสมการ $T_d = k_c \phi I_a$ ซึ่งส่งผลต่อสมรรถภาพของมอเตอร์ที่สูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากผลของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สูงขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับตามแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งส่งผลต่อสมรรถภาพของมอเตอร์ที่สูงขึ้นตามไปด้วย

ผลการทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในห้องปฏิบัติการ เมื่อได้ทำการออกแบบและสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นทั้ง 2 ตัว ได้แก่ มอเตอร์ตัวที่ 1 ใช้แม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม รุ่น N35 ขนาด 25 x 50 x 5 มม. และมอเตอร์ตัวที่ 2 ใช้แม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม รุ่น N35 ขนาด 50 x 50 x 5 มม. จากนั้นทำการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถภาพของมอเตอร์ ได้แก่ ความเร็วรอบ แรงบิด กำลังด้านออก กำลังด้านเข้า ประสิทธิภาพ เป็นต้น โดยการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ เซนเซอร์วัดแรงบิด เบรกมอเตอร์แบบสนามแม่เหล็ก ชุดควบคุมเบรกมอเตอร์แบบสนามแม่เหล็ก แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับค่าได้ เป็นต้น โดยในการทดสอบเริ่มจากจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 24.0 V ให้กับมอเตอร์ และทำการวัดค่า แรงดันด้านเข้า กระแสด้านเข้า ความเร็วรอบ แรงบิด กำลังด้านออก จากนั้นคำนวณค่ากำลังด้านเข้า ประสิทธิภาพ โดยในการทดสอบจะทำการควบคุมปรับภาระโหลดแบบเบรกด้วยสนามแม่เหล็กที่ต่อรวมอยู่กับเพลลาของมอเตอร์ ซึ่งในระหว่างการทดสอบจะปรับภาระโหลดเริ่มจากจากขณะไม่มีโหลดไปจนถึงที่โหลดเต็มพิกัดที่กระแสด้านเข้ามอเตอร์ 17.0 A โดยผลการทดสอบมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ได้ผลการทดสอบดังนี้ ผลการทดสอบที่ 1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบมีความเร็วรอบสูงสุดที่ขณะไม่มีโหลด 349 รอบต่อนาที และลดลงต่ำสุดที่โหลดเต็มพิกัด 286 รอบต่อนาที แรงบิดสูงสุดที่ 9.74 นิวตัน-เมตร มีกำลังด้านออกสูงสุด 291.00 วัตต์ มีประสิทธิภาพสูงสุด 74.68 เปอร์เซ็นต์ (ที่ความเร็วรอบ 301 รอบต่อนาที) ในส่วนของผลการทดสอบที่ 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม. มีความเร็วรอบสูงสุดที่ขณะไม่มีโหลด 343 รอบต่อนาที และลดลงต่ำสุดที่โหลดเต็มพิกัด 286 รอบต่อนาที แรงบิดสูงสุดที่ 9.87 นิวตัน-เมตร มีกำลังด้านออกสูงสุด 295.00 วัตต์ มีประสิทธิภาพสูงสุด 73.57 เปอร์เซ็นต์ (ที่ความเร็วรอบ 307 รอบต่อนาที) และในส่วนของผลการทดสอบที่ 3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. มีความเร็วรอบสูงสุดที่ขณะไม่มีโหลด 271 รอบต่อนาที และลดลงต่ำสุดที่โหลดเต็มพิกัด 224 รอบต่อนาที แรงบิดสูงสุดที่ 13.00 นิวตัน-เมตร กำลังด้านออกสูงสุด 304.00 วัตต์ มีประสิทธิภาพสูงสุด 76.67 เปอร์เซ็นต์ (ที่ความเร็วรอบ 245 รอบต่อนาที) เมื่อสรุปเปรียบเทียบผลการทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว พบว่า มอเตอร์ตัวที่สร้างขึ้นด้วยแม่เหล็ก ขนาด 50 x 50 x 5 มม. มีค่าแรงบิด กำลังไฟฟ้าด้านออก และประสิทธิภาพที่สูงที่สุด โดยเปรียบเทียบกับกำลังด้านออกที่เท่ากัน จะเห็นได้ว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้น

ใช้แม่เหล็กขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม. มีแรงบิดสูงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด $25 \times 50 \times 5$ มม. อยู่ที่ประมาณ 1.2 เท่า โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dwivedi, Singh และ Srivastava [39] ที่อธิบายว่ามอเตอร์ที่พัฒนาให้มีความหนาแน่นของฟลักซ์ที่สูงขึ้น จึงส่งผลให้มีแรงบิดที่สูงขึ้น แต่ความเร็วรอบจะลดลง

ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขับเคลื่อนรถจักรยานไฟฟ้า โดยการนำทั้ง 3 ตัวมาติดตั้งเพื่อขับเคลื่อนในรถจักรยานไฟฟ้า ซึ่งมีเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ แบตเตอรี่ตะกั่วกรด ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง รถจักรยานเสือภูเขา และแอปพลิเคชัน Speedometer เป็นต้น โดยในการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการขับเคลื่อนรถจักรยานไฟฟ้า โดยใช้เส้นทางการขับขี่จักรยานระหว่างอาคารเรียนภายในมหาวิทยาลัย ซึ่งเงื่อนไขการทดลองที่ระยะทาง 25 กิโลเมตร ที่ความเร็วตามสถานการณ์จริง โดยในระหว่างการทดสอบจะทำการการบันทึกค่าระยะทาง เวลา ความเร็วเฉลี่ย ความเร็วสูงสุด ความเร็วมอเตอร์เฉลี่ย แรงดัน กระแส กำลัง และพลังงานที่แบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยผลการทดสอบมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ได้ผลการทดสอบดังนี้ ผลการทดสอบที่ 1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ ใช้เวลาในการเดินทาง 4,714 วินาที ความเร็วเฉลี่ย 19.18 km/h ความเร็วสูงสุด 22.75 km/h ความเร็วมอเตอร์เฉลี่ย 274 แรงดันที่ใช้เฉลี่ย 23.97 V กระแสที่ใช้เฉลี่ย 7.21 A กำลังด้านเข้ามอเตอร์เฉลี่ย 171.15 W และพลังงานที่แบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ 0.224 kWh ในส่วนของผลการทดสอบที่ 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด $25 \times 50 \times 5$ มม. ใช้เวลาในการเดินทาง 4,732 วินาที ความเร็วเฉลี่ย 19.10 km/h ความเร็วสูงสุด 22.09 km/h ความเร็วมอเตอร์เฉลี่ย 239 แรงดันที่ใช้เฉลี่ย 23.88 V กระแสที่ใช้เฉลี่ย 6.02 A กำลังด้านเข้ามอเตอร์เฉลี่ย 166.91 W และพลังงานที่แบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ 0.219 kWh และผลการทดสอบที่ 3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม. ใช้เวลาในการเดินทาง 4,797 วินาที ความเร็วเฉลี่ย 18.92 km/h ความเร็วสูงสุด 22.58 km/h ความเร็วมอเตอร์เฉลี่ย 236 แรงดันที่ใช้เฉลี่ย 24.01 V กระแสที่ใช้เฉลี่ย 7.24 A กำลังด้านเข้ามอเตอร์เฉลี่ย 173.17 W และพลังงานที่แบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ 0.230 kWh โดยผลของการเปรียบเทียบมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ในด้านการใช้พลังงานที่ระยะทางการทดสอบ 25 กิโลเมตรเท่ากัน พบว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด $25 \times 50 \times 5$ มม. ใช้พลังงานต่ำที่สุด คือ 0.219 kWh ซึ่งต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ 2.23 เปอร์เซ็นต์ และต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม. ที่ 4.78 เปอร์เซ็นต์ โดยสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในบทที่ 4 ซึ่งมอเตอร์แม่เหล็กขนาด $25 \times 50 \times 5$ มม. มีค่าต่ำสุดจึงส่งผลต่อการใช้พลังงานต่ำสุดเช่นเดียวกัน และใน

ทำนองเดียวกันมอเตอร์แม่เหล็กขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม. มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงที่สุดจึงทำให้ใช้พลังงานสูงที่สุดตามไปด้วย

อภิปรายผลการวิจัย

งานวิทยานิพนธ์นี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อสร้างแบบจำลองมอเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก เพื่อช่วยการพัฒนาแม่เหล็กถาวรและสเตเตอร์ในการเพิ่มสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างเหมาะสม จากนั้นทำการสร้างและทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ เช่น แรงบิด ประสิทธิภาพ กำลังไฟฟ้าด้านออก เป็นต้น รวมถึงการใช้ทดสอบมอเตอร์ที่สร้างขึ้นในการเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้า

ทางผู้วิจัยได้นำเสนอการพัฒนามอเตอร์กระแสตรงแบบแปรงถ่านต้นแบบที่ใช้แม่เหล็กถาวรชนิดเฟอร์ไรต์ ซึ่งมีข้อเสียคือแรงแม่เหล็กค่อนข้างต่ำ โดยทำการปรับเปลี่ยนเปลี่ยนชนิดแม่เหล็กถาวรที่สเตเตอร์เป็นชนิดนีโอไดเมียมซึ่งมีคุณสมบัติของแรงแม่เหล็กสูงเหมาะสมกับงานมอเตอร์ และปรับโครงสร้างสเตเตอร์เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมเพื่อให้สามารถติดตั้งแม่เหล็กถาวรลักษณะแผ่นสี่เหลี่ยมได้ จากนั้นทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ห่อมอเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงขึ้น โดยที่มอเตอร์ที่ออกแบบใช้แม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม รุ่น N35 ขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม. มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงที่สุดประมาณ 1.0875 T จนถึง 1.0882 T รองลงมา คือ มอเตอร์ต้นแบบมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอยู่ที่ประมาณ 0.8080 T จนถึง 0.8087 T โดยที่มอเตอร์ที่ออกแบบใช้แม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม รุ่น N35 ขนาด $25 \times 50 \times 5$ มม. ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กต่ำที่สุดอยู่ที่ประมาณ 0.7977 T จนถึง 0.7989 T จึงสรุปได้ว่า ชนิดของแม่เหล็กแบบนีโอไดเมียมส่งผลต่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ที่สูงขึ้น รวมทั้งขนาดของแม่เหล็กที่ใหญ่ขึ้นก็ส่งผลให้ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

การทดสอบสมรรถภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในห้องปฏิบัติการ มีผลการทดสอบที่สอดคล้องกับสมมุติฐานของงานวิจัย คือ มอเตอร์ที่ออกแบบใช้แม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม รุ่น N35 ขนาด $50 \times 50 \times 5$ มม. มีค่า สมรรถภาพสูงสุด ได้แก่ ค่าแรงบิด กำลังด้านออก และประสิทธิภาพ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบกับมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขับเคลื่อนรถจักรยานไฟฟ้าในสถานการณ์จริง มอเตอร์ที่ออกแบบใช้แม่เหล็ก

ถาวรชนิดนีโอไดเมียม รุ่น N35 ขนาด 25 x 50 x 5 มม. มีค่าการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ต่ำที่สุด คือ 0.219 kWh ซึ่งต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบ 2.23 เปอร์เซ็นต์ และต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นใช้แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. ที่ 4.78 เปอร์เซ็นต์ โดยสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในบพทที่ 4 ซึ่งมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 25 x 50 x 5 มม. มีค่าต่ำสุดจึงส่งผลต่อการใช้พลังงานต่ำสุดเช่นเดียวกัน และในทำนองเดียวกันมอเตอร์แม่เหล็กขนาด 50 x 50 x 5 มม. มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงที่สุดจึงทำให้ใช้พลังงานสูงที่สุดตามไปด้วย อย่างไรก็ตามผลการทดสอบนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนได้ถึงแม้ว่าในการทดสอบนี้จะใช้ผู้ขับขึ้นคนเดียวในระยะทางที่เท่ากัน แต่เนื่องจากปัจจัยภายนอกเข้ามามีผลกระทบซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ เช่น การทดสอบในช่วงวันและเวลาที่ไม่ตรงกันส่งผลต่อสภาพความหนาแน่นของการจราจร รวมถึงปัจจัยในการจอดและชะลอความเร็วรถจักรยานซึ่งในการออกตัวเริ่มหมุนของมอเตอร์มีผลอย่างยิ่งในการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ ซึ่งการทดสอบนี้สามารถพิสูจน์ได้ว่ามอเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้นทั้ง 2 ตัว รวมทั้งมอเตอร์ต้นแบบสามารถทำงานเป็นตัวต้นกำลังขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้าได้ตามสถานการณ์จริง

การเปรียบเทียบด้านเศรษฐศาสตร์จากการสร้างมอเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยการสืบราคาของแม่เหล็กถาวรจากร้านค้าภายในประเทศไทย พบว่า มอเตอร์ต้นแบบใช้แม่เหล็กถาวรชนิดเฟอร์ไรต์แบบโค้ง ขนาด 50 x 50 x 5 มม. ใช้จำนวน 4 ชิ้น ชิ้นละประมาณ 46 บาท รวมเป็นเงิน 184 บาท ในส่วนของมอเตอร์ที่ออกแบบใช้แม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม รุ่น N35 ขนาด 25 x 50 x 5 มม. ใช้จำนวน 4 ชิ้น ชิ้นละ 130 บาท รวมเป็นเงิน 520 บาท และในส่วนของมอเตอร์ที่ออกแบบใช้แม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม รุ่น N35 ขนาด 50 x 50 x 5 มม. ใช้จำนวน 4 ชิ้น ชิ้นละ 379 บาท รวมเป็นเงิน 1,516 บาท ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงการลงทุนการใช้แม่เหล็กชนิดนีโอไดเมียมมีราคาที่สูงกว่าแม่เหล็กถาวรชนิดเฟอร์ไรต์ ดังนั้น แม่เหล็กชนิดนีโอไดเมียมจึงเหมาะสมกับงานใช้พื้นที่จำกัดที่ต้องการความเข้มของสนามแม่เหล็กสูง

ข้อเสนอแนะการวิจัย

ข้อเสนอแนะในการนำผลงานวิจัยนำไปใช้

1. การนำงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เป็นแนวทางการพัฒนาโครงสร้างมอเตอร์ประเภทต่าง ๆ ได้ เช่น วัสดุและขนาดของสเตเตอร์ โรเตอร์ รวมถึงขนาดและจำนวนของตัวนำขดลวด เป็นต้น

2. การนำงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เป็นแนวทางการวิเคราะห์การอ้อมตัวของสนามแม่เหล็กสำหรับ
โครงสร้างมอเตอร์ประเภทต่าง ๆ ได้

ข้อเสนอแนะการวิจัยครั้งต่อไป

1. ในการวิจัยในอนาคตควรพัฒนาแม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม ให้มีลักษณะโค้งเข้ารูป
กับโรเตอร์ เพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กสามารถเดินทางให้ดียิ่งขึ้น



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- [1] **อุตสาหกรรมจักรยานในสหภาพยุโรป – ช่องทางเศรษฐกิจสีเขียว.** สืบค้นเมื่อ 15 เมษายน พ.ศ.2563 จาก <https://thaiindustrialoffice.wordpress.com>
- [2] Weinert, J., Ma, C. and Cherry, C. (2007). The transition to electric bikes in China: history and key reasons for rapid growth. **Transportation**, 34, 301-318.
- [3] Muetze, A. and Tan, Y. C. (2007). Electric bicycles - A performance evaluation. **IEEE Industry Applications Magazine**, 13(4), 12–21.
DOI: 10.1109/MIA.2007.4283505
- [4] Florez, D., Carrillo, H., Gonzalez, R., Herrera, M., Hurtado-Velasco, R., Cano, M., Roa, S. and Manrique, T. (2018). Development of a Bike-Sharing System Based on Pedal-Assisted Electric Bicycles for Bogota City. **Electronics**, 7(11).
DOI: 10.3390/electronics7110337
- [5] **Electric bicycle.** สืบค้นเมื่อ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2562, จาก https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_bicycle,
- [6] Koosalapeerom, T., Satiennam, T., Satiennam, W., Leelapatra, W., Seedam, A. and Rakpukdee, T. (2019). Comparative Study of Real-World Driving Cycles, Energy Consumption, and CO₂ Emissions of Electric and Gasoline Motorcycles Driving in a Congested Urban Corridor. **Sustainable Cities and Society**, 45, 619-627. DOI: 10.1016/j.scs.2018.12.031
- [7] Kerdlap, P. and Gheewala, S. H. (2016). Electric motorcycles in Thailand: A life cycle perspective. **Journal of Industrial Ecology**, 20, 1399–1411.
DOI: 10.1111/jiec.12406
- [8] Zaki, A. and Ibrahim, S. (2005). Modeling and analysis of PM brushed DC motor using FEM. In 2005 European Conference on Power Electronics and Applications. Dresden, Germany: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/EPE.2005.219461
- [9] Tarvirdilu-Asl, R., Zeinali, R. and Ertan, H. (2017). FEM-based design modifications and efficiency improvements of a brushed permanent magnet DC motor. In 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical

- Machines and Power Electronics (ACEMP) (pp. 401–407). Brasov, Romania: Institute of Electrical and Electronic Engineering.
DOI: 10.1109/OPTIM.2017.7975003
- [10] Hsiao, H., Hsiao, C. and Chen, G. (2019). Finite Element Analysis and Optimal Design of DC Brush Motor for Automotive Engine Start Applications. In 2019 IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems (SCEMS 2019). Busan, Korea (South): Institute of Electrical and Electronic Engineering.
DOI: 10.1109/SCEMS201947376.2019.8972634
- [11] Mithunraj, M., Gayathri, W., Prasanth, P., Kanagalakshmi, S. and Archana, R. (2019). Design and Performance Analysis of Brushless DC Motor Using ANSYS Maxwell. In 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT) (pp. 1049–1052). Kannur, India: Institute of Electrical and Electronic Engineering.
DOI: 10.1109/ICICT46008.2019.8993368
- [12] Mukherjee, P., and Sengupta, M. (2014). Design, analysis and fabrication of a brush-less DC motor. In 2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). Mumbai, India: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/PEDES.2014.7042056
- [13] Tikhonova, O. V. and Plastun, A. T. (2018). Electromagnetic calculation of induction motor by “ANSYS Maxwell”. In 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) (pp. 822–826). Moscow and St. Petersburg, Russia: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317216
- [14] Tikhonova, O., Malygin, I. and Plastun, A. (2017). Electromagnetic calculation for induction motors of various designs by “ANSYS maxwell”. In 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). St. Petersburg, Russia: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076294
- [15] Ho, S. L., Chen, N. and Fu, W. N. (2010). An Optimal Design Method for the Minimization of Cogging Torques of a Permanent Magnet Motor Using FEM and

- Genetic Algorithm. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 20(3), 861–864. DOI: 10.1109/TASC.2009.2038717
- [16] Chen, N., Ho, S. L. and Fu, W. N. (2010). Optimization of Permanent Magnet Surface Shapes of Electric Motors for Minimization of Cogging Torque Using FEM. **IEEE Transactions on Magnetics**, 46(6), 2478 – 2481.
DOI: 10.1109/TMAG.2010.2044764
- [17] Cao, R., Mi, C. and Cheng, M. (2012). Quantitative Comparison of Flux-Switching Permanent-Magnet Motors with Interior Permanent Magnet Motor for EV, HEV, and PHEV Applications. **IEEE Transactions on Magnetics**, 48(8), 2374 – 2384.
DOI: 10.1109/TMAG.2012.2190614
- [18] Zhao, W., Ji, J., Liu, G., Du, Y. and Cheng, M. (2014). Design and Analysis of a New Modular Linear Flux-Reversal Permanent-Magnet Motor. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 24(3).
DOI: 10.1109/TASC.2013.2282505
- [19] Zhao, W., Lipo, T. A. and Kwon, B. (2014). Comparative Study on Novel Dual Stator Radial Flux and Axial Flux Permanent Magnet Motors With Ferrite Magnets for Traction Application. **IEEE Transactions on Magnetics**, 50(11).
DOI: 10.1109/TASC.2013.2282505
- [20] Zhao, W., Lipo, T. A. and Kwon, B. (2015). Optimal Design of a Novel Asymmetrical Rotor Structure to Obtain Torque and Efficiency Improvement in Surface Inset PM Motors. **IEEE Transactions on Magnetics**, 51(3).
DOI: 10.1109/TMAG.2014.2362146
- [21] Liu, X. and Fu, W. N. (2016). A Dynamic Dual-Response-Surface Methodology for Optimal Design of a Permanent-Magnet Motor Using Finite-Element Method. **IEEE Transactions on Magnetics**, 52(3).
DOI: 10.1109/TMAG.2015.2481608
- [22] Wang, X., Hahh, S. and Jung, H. (2003). Performance analysis and optimization of a permanent-magnet starter motor with auxiliary poles by FEM. **IEEE Transactions on Magnetics**, 39(3), 1476 – 1479.
DOI: 10.1109/TMAG.2003.810222

- [23] Zheng, P., Sui, Y., Tong, C., Lipo, T. A. and Wang, A. (2011). Investigation of a Novel Five-Phase Modular Permanent-Magnet In-Wheel Motor. **IEEE Transactions on Magnetics**, 47(10), 4084 – 4087.
DOI: 10.1109/TMAG.2011.2150207
- [24] Rezal, M. and Ishak, D. (2012). Rotating analysis of 18-slot/16-pole Permanent Magnet Synchronous Motor for Light Electric Vehicle using FEM. In 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon) (pp. 946-949). Kota Kinabalu, Malaysia: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/PECon.2012.6450354
- [25] Kim, K. (2014). A Novel Calculation Method on the Current Information of Vector Inverter for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle. **IEEE Transactions on Magnetics**, 50(2).
DOI: 10.1109/TMAG.2013.2279555
- [26] Fu, W. N., Chen, Y. and Guo, X. (2015). Novel Dual-Layer and Triple-Layer Permanent-Magnet-Excited Synchronous Motors. **IEEE Transactions on Magnetics**, 51(11). DOI: 10.1109/TMAG.2015.2435795
- [27] Nakata, T., Sanada, M., Morimoto, S. and Inoue, Y. (2017). Automatic Design of IPMSMs Using a Genetic Algorithm Combined with the Coarse-Mesh FEM for Enlarging the High-Efficiency Operation Area. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 64(12), 9721 – 9728. DOI: 10.1109/TIE.2017.2714133
- [28] Huang, X., Zhu, M., Chen, W., Zhang, J. and Fang, Y. (2017). Dynamic Reluctance Mesh Modeling and Losses Evaluation of Permanent Magnet Traction Motor. **IEEE Transactions on Magnetics**, 53(6).
DOI: 10.1109/TMAG.2017.2659800
- [29] Wu, J., Wang, J., Gan, C., Sun, Q. and Kong, W. (2018). Efficiency Optimization of PMSM Drives Using Field-Circuit Coupled FEM for EV/HEV Applications. **IEEE Access**, 53(6), 15192 - 15201. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2813987
- [30] Zhin, L., Sun, J., Ma, X., Han, W. and Luo, X. (2019). Thermal–Structure Coupling Analysis and Multi-Objective Optimization of Motor Rotor in MSPMSM. **Chinese Journal of Aeronautics**, 32(7), 1733-1747.
DOI: 10.1016/j.cja.2018.09.008

- [31] Fitouri, M., Bensalem, Y. and Abdelkrim, M. N. (2020). Comparison Between 2D and 3D Modeling of Permanent Magnet Synchronous Motor Using FEM Simulations. In 2020 17th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD) (pp. 681-685). Monastir, Tunisia: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/SSD49366.2020.9364256
- [32] Adnan, A. and Ishak, D. (2009). Finite element modeling and analysis of external rotor brushless DC motor for electric bicycle. In 2009 IEEE Student Conference on Research and Development (SCoReD) (pp. 376-379). Serdang, Malaysia: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/SSD49366.2020.9364256
- [33] Gottipati, P. and Mendrela, E. A. (2010). Comparative method for twin-rotor PM brushless motors applied as in-wheel motors. In 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India. New Delhi, India: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 0.1109/PEDES.2010.5712391
- [34] Gottipati, P., Dobzhanskyi, O. and Mendrela, E. A. (2010). In-wheel brushless DC motor for a wheel chair drive. In 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India. New Delhi, India: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/PEDES.2010.5712392
- [35] Chiu, C., Chiu, Y., Liang, Y. and Liang, R. (2010). Optimal Driving Efficiency Design for the Single-Phase Brushless DC Fan Motor. **IEEE Transactions on Magnetics**, 46(4), 1123 - 1130. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2035051
- [36] Chen, Y., Chiu, C., Tang, Z., Liang, Y. and Liang, R. (2011). Optimizing Efficiency Driver Comprising Phase-Locked Loop for the Single-Phase Brushless DC Fan Motor. **IEEE Transactions on Magnetics**, 48(5), 1937 - 1942. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2177853
- [37] Abirami, S., Bala, S. M. and Priya, R. J. (2014). Design of BLDC Hub Motor using FEM analysis. In 2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE). Coimbatore, India: Institute of Electrical and Electronic Engineering.

- DOI: 10.1109/ICGCCEE.2014.6922417
- [38] Stoica, C., Dumitru, C. and Melcescu, L. (2014). Numerical modeling using 2D FEM for a low power DC brushless motor. In the 2014 6th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). Bucharest, Romania: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/ECAI.2014.7090197
- [39] Dwivedi, A., Singh, S. K. and Srivastava, R. K. (2014). Performance Comparison of Different Topologies of PMBLAC Motor using FEM. In 2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). Mumbai, India: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/PEDES.2014.7042114
- [40] Sim, Y., Niguchi, N. and Hirata, K. (2015). Simulation based improved analysis of BLDC motor by coupling FEM motor model with various switching patterns. In 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (pp. 1064-1069). Sydney, NSW, Australia: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/PEDS.2015.7203580
- [41] Usman, A. and Rajpurohit, B. S. (2019). Comprehensive Analysis of Demagnetization Faults in BLDC Motors Using Novel Hybrid Electrical Equivalent Circuit and Numerical Based Approach. **IEEE Access**, 7, 147542 - 147552. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2946694
- [42] Hwang, K. and Kwon, B. (2019). Design of Low-Cost BLAC Motors for Integrated Electric Brake Systems. **IEEE Access**, 7, 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2960290
- [43] Yanawati, Y., Halim, N. H., Daut, I., Shafiqin, S. N., Pungut, I., Syatirah, M. N., Gomesh, N. and Abdullah, M. (2011). Efficiency increment of 0.5hp induction motor by using different thickness of rotor lamination steel sheet via FEM. In 2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference (pp. 188-192). Shah Alam, Malaysia: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/PEOCO.2011.5970407
- [44] Kamoun, J. K., Hadj, N. B., Chabchoub, M., Neji, R. and Ghariani, M. (2013). An induction motor FEM-based comparative study: Analysis of two topologies. In

- 2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). Monte Carlo, Monaco: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/EVER.2013.6521610
- [45] Pallis, I. K., Gyftakis, K. N. and Kappatou, J. C. (2013). FEM study of the bar number impact on the stator core losses of the cage induction motor. In IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 2863-2868). Vienna, Austria: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/IECON.2013.6699585
- [46] Haisen, Z., Yilong, W., Yuhan, W., Yang, Z. and Guorui, X. (2014). Loss and Air-gap Force Analysis of Cage Induction Motors with Non-skewed Asymmetrical Rotor Bars Based on FEM. **IEEE Transactions on Magnetics**, 53(6), 2169-3536. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2660762
- [47] Ahn, J., Lee, D., Park, G., Kim, Y., Kim, J. and Jung, S. (2014). Numerical Design Compatibility of Induction Motor with Respect to Voltage and Current Sources. **IEEE Transactions on Magnetics**, 50(2). DOI: 10.1109/TMAG.2013.2279717
- [48] Seyedshenava, S. and Ahmadpour, A. (2021). Finite Element Method for Optimal Transformer Connection Based on Induction Motor Characteristics Analysis. **Ain Shams Engineering Journal**, 12(2), 1943-1957. DOI: 10.1016/j.asej.2020.12.008
- [49] Naderi, P., Heidary, M. and Vahedi, M. (2020). Performance analysis of ladder-secondary-linear induction motor with two different secondary types using Magnetic Equivalent Circuit. **ISA Transactions**, 130, 355-365. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.03.013
- [50] Hasegawa, Y., Nakamura, K. and Ichinokura, Q. (2012). A Novel Switched Reluctance Motor with the Auxiliary Windings and Permanent Magnets. **IEEE Transactions on Magnetics**, 48(11). DOI: 10.1109/TMAG.2012.2197734
- [51] Kiyota, K., Kakishima, T., Sugimoto, H. and Chiba, A. (2013). Comparison of the Test Result and 3D-FEM Analysis at the Knee Point of a 60 kW SRM for a HEV. **IEEE Transactions on Magnetics**, 49(5). DOI: 10.1109/TMAG.2013.2242453

- [52] Navardi, M. J., Babaghorbani, B. and Ketabi, A. (2014). Efficiency improvement and torque ripple minimization of Switched Reluctance Motor using FEM and Seeker Optimization Algorithm. **Energy Conversion and Management**, 78, 237-244. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.11.001
- [53] Wu, L., Ding, W. and Hu, Y. (2016). Design and analysis of an external-rotor switched reluctance machine for electric bicycle. In 2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). Monte Carlo, Monaco: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/EVER.2016.7491875
- [54] Roy, D., Mainuddin, D. and Sengupta, M. (2017). Design, analysis, FEM validation and fabrication of a switched reluctance motor. In 2017 National Power Electronics Conference (NPEC) (pp. 160-165). Pune, India: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/NPEC.2017.8310452
- [55] Wang, Y., Fu, W. N. and Niu, S. (2016). A Novel Structure of Dual-Stator Hybrid Excitation Synchronous Motor. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 26(4). DOI: 10.1109/TASC.2016.2533263
- [56] Cha, J., Son, R., Yoo, G. and Jeon, M. (2017). A Method of Determining the Equivalent Core Length of the Large Synchronous Motor with Radial Air Ducts. **IEEE Transactions on Magnetics**, 53(6). DOI:10.1109/TMAG.2017.2666139
- [57] Kocman, S., Hrubý, T., Pečinka, P. and Neumann, A. (2016). FEM model of asynchronous motor for analysis of its parameters. In 2016 ELEKTRO (pp. 315-319). Strbske Pleso, Slovakia: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512088
- [58] Zhang, C., Tseng, K. J. and Nguyen, T. D. (2010). Analysis and comparison of axial flux PM synchronous motor and induction motor. In 2010 Conference Proceedings IPEC (pp. 572-577). Singapore: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512088
- [59] Padilha, J. B., Peng, P. K., Sadowski, N. and Batistela, N. J. (2017). Vector Hysteresis Model Associated to FEM in a Hysteresis Motor Modeling. **IEEE Transactions on Magnetics**, 53(6). DOI: 10.1109/TMAG.2017.2664582

- [60] Tao, W., Li, G., Ju, L., Zhou, R. and Hu, C. (2018). Design and Analysis of a Novel Spherical Motor Based on the Principle of Reluctance. In 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). Shenzhen, China: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/PEAC.2018.8590483
- [61] Timimy, A., Giangrande, P., Degano, M., Galea, M. and Gerada, C. (2017). Comparative study of permanent magnet-synchronous and permanent magnet-flux switching machines for high torque to inertia applications. In 2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD) (pp. 45-51). Nottingham, UK: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/WEMDCD.2017.7947722
- [62] **เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า**. สืบค้นเมื่อ 1 กรกฎาคม 2563, จาก http://www.evat.or.th/15708266/ev-technology?fbclid=IwAR2px1oU649Pkcoyh_CukvzKOYnfbI6iSiXNm28Xc-GtMIDZNSN92RsTQ1Qw
- [63] **ภาพรวมสถานะยานยนต์ไฟฟ้า**. สืบค้นเมื่อ 1 กรกฎาคม 2563, จาก http://www.otp.go.th/uploads/tiny_uploads/PDF/2562-07/25620704-EV.pdf
- [64] **สถานการณ์ยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทย**. สืบค้นเมื่อ 1 กรกฎาคม 2563, จาก <http://www.evat.or.th/15708256/current-status>
- [65] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. (2560). รายงานฉบับสมบูรณ์ การศึกษาเทคโนโลยีและนวัตกรรมยานยนต์ไฟฟ้า โครงการ “การศึกษาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า” ภายใต้ศูนย์การเรียนรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรม เพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [66] **จักรยานไฟฟ้า**. สืบค้นเมื่อ 1 กรกฎาคม 2563, จาก <https://www.ebikethaikit.com/%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%99%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B9%89%E0%B8%AA%E0%B8%A3%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%A3%E0%B8%96%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B8%9F%E0%B9%89%E0%B8%B2-980.page>
- [67] **แม่เหล็กถาวร**. สืบค้นเมื่อ 10 กรกฎาคม 2563, จาก <https://www.eeeguide.com/application-of-permanent-magnet-motor/>
- [68] Srikomkham, P. and Ruangsinchaiwanich, S. (2010). Optimal rotor bar design of a PSC motor using taguchi method and FEM. In 2010 International

- Conference on Electrical Machines and Systems. Incheon, Korea: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/PECon.2012.6450354
- [69] Pham, T. H., Wendling, P. F., Salon, S. J. and Acikgoz, H. (1999). Transient Finite Element Analysis for an Induction Motor with External Circuit Connections and Electromechanical Coupling. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 14(4), 1407-1412. DOI: 10.1109/60.815081
- [70] Gros, J., Sincero, G. C. R. and Viarouge, P. (2009). Design method for brush permanent magnet dc motors. In 009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (pp. 1625-1632). Miami, FL, USA: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075421
- [71] ปราโมทย์ เตชะอำไธ และเสฏฐวรรธ สจจรตภวตสภท. (2560). **การวเคราะหไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโซลิตเวอรกส์**. กรุงเทพฯ: บริษัท บุญภุศลการพมพ์ จำกัด



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล	กันตภณ โล่นพันธ์
วัน เดือน ปี เกิด	21 ธันวาคม 2527
ที่อยู่ปัจจุบัน	4/23 หมู่ที่5 ตำบลบ้านคลอง อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000
ที่ทำงานปัจจุบัน	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ.2556 - ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม พ.ศ.2553 - พ.ศ.2556 อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและ คอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา พิษณุโลก
ประวัติการศึกษา	ปริญญาโท วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี ปริญญาตรี ค.อ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผลงานตีพิมพ์	Lonphan, K and Ruangsinchaiwanich, S. (2022). Energy Estimation of Brushed DC Motor in Electric Vehicle by Finite Element. GMSARN International Journal, 17(4), 1-5.

