อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ของยานยนต์ไฟฟ้า ภายใต้สภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก

วิทยานิพนธ์

ของ

อรัญ ประกอบสัญห์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
พฤษภาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ของยานยนต์ไฟฟ้า
ภายใต้สภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก

วิทยานิพนธ์

ของ

อรัญ ประกอบสัญท์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

พฤษภาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Optimal Power Ratio of Motors in Dual Motor Drive Electric Vehicles under Regenerative Brakings

Aran Prakobsant

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Electrical and Computer Engineering)
May 2024

Copyright of Mahasarakham University

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายอรัญ ประกอบสัญห์ แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ
(ผศ. อดิเรก จันตะคุณ Ph.D.)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รศ. ชลธี โพธิ์ทอง Ph.D.)

....กรรมการ
(รศ. นิวัตร์ อังควิศิษฐพันธ์ Ph.D.)

....กรรมการ
(ผศ. ณัฐวุฒิ สุวรรณทา Ph.D.)

....กรรมการ
(ศ. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล Ph.D.)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

....	....
(รศ. จักรมาส เลาหวณิช Ph.D.)	(รศ. กริสน์ ชัยมูล Ph.D.)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

พหูนํ ปญฺญาโต ชีเว

ชื่อเรื่อง อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก
ผู้วิจัย อรัญ ประกอบสัญท์
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ชลธี โพธิ์ทอง Ph.D.
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีที่พิมพ์** 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนออัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก โดยทำการทดลองตั้งค่าระบบให้มีการปรับระดับการหาค่าอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมของมอเตอร์คู่ในระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก ให้สอดคล้องกับสมรรถนะการประจุกำลังไฟฟ้าและระยะทางที่ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ โดยที่ค่าน้ำหนักของมอเตอร์คู่แต่ละตัวมีอัตราส่วนกำลังแตกต่างกัน เพื่อเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับการใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งการวิจัยนี้เริ่มต้นจากการหาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมจากสมการคณิตศาสตร์ การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทดลองด้วยชุดทดลองจริงเพื่อให้สามารถได้ค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์คู่ในระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก จากการทดลองพบว่างานวิจัยนี้สามารถควบคุมค่าอัตราส่วนการผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรกของมอเตอร์คู่ได้อย่างถูกต้อง และสามารถทำให้ผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้านำไปใช้ในกระบวนการผลิตระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าที่ถูกออกแบบไว้ได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังสามารถลดอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 35 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในอัตราส่วนกำลังและน้ำหนักของมอเตอร์เท่ากัน

คำสำคัญ : ยานยนต์ไฟฟ้า, อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม, มอเตอร์ขับเคลื่อนคู่, การผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก, มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

พหุปญฺญา ชีเว

TITLE	Optimal Power Ratio of Motors in Dual Motor Drive Electric Vehicles under Regenerative Brakings		
AUTHOR	Aran Prakobsant		
ADVISORS	Associate Professor Chonlatee Photong , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Mahasarakham University	YEAR	2024

ABSTRACT

This research presents the optimal power ratio for the three-phase induction motors in the dual-motor drive electric vehicles under regenerative breakings. In this experiment, the system was set up to be adjusted to find the optimum power ratio of dual motors in electric vehicle drive systems under different regenerative braking conditions. The efficiency and performance in terms of power consumption and capability of driving distance were examined and analyzed while the weight of each pair of motors has a different power ratio. In order to examine analyze the efficiency and performance of three-phase induction motors for use in driving electric vehicles. This research started from finding the optimal ratio from the mathematical equations. Simulation by computer program and experiment with a real test set-up. To obtain the optimum ratio for the dual-motor in the electric vehicle drive system under the power generation condition while braking. From the experiment, it was found that this research can accurately control the feedback energy production ratio of a pair of motors. And it can enable electric vehicle manufacturers to use it in the production process of precisely designed electric vehicle drive systems. It is also able to reduce the electric power consumption approximately by 35 percent compared to the power produced at the same motor power and weight ratio.

Keyword : Electric Vehicles, Optimum Power Ratio, Dual Motor Drives, Regenerative Breakings, Three Phase Induction Motors

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจาก รศ.ดร.ชลธี โพธิ์ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำให้การทำงานในวิทยานิพนธ์นี้ผ่านลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณท่าน คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.นิวัตร์ อังควิศิษฐพันธ์, ผศ.ดร. ณัฐวุฒิ สุวรรณทา และ ศ.ดร.วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล ที่ให้คำแนะนำ และชี้แนะแนวทางการทำงานวิจัยในหัวข้อเรื่องที่จะต้องศึกษาวิจัย และดำเนินการ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อดิเรก จันตะคุณ ผู้ทรงคุณวุฒิ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้ความรู้ และคำแนะนำเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณคุณจารุณี สุเทวี เด็กหญิงพิชญาภา ประกอบสัญห์ และเด็กชายพชรพล ประกอบสัญห์ และขอขอบคุณครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจมาโดยตลอด จึงทำให้การศึกษาในระดับปริญญาเอก นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

อรัญ ประกอบสัญห์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ช

สารบัญ .... ซ

สารบัญตาราง .... ฏ

สารบัญภาพประกอบ .... ฐ

บทที่1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.5 องค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ 3

บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล 5

2.1 บทนำ 5

2.2 ระบบยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน 6

2.3 หลักการขับเคลื่อนและการเบรกของยานยนต์ไฟฟ้า 7

2.3.1 กลศาสตร์การเคลื่อนที่ของยานยนต์ 7

2.3.2 สมรรถนะการขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้า 11

2.3.3 การใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า 13

2.4 ยานยนต์ไฟฟ้าและส่วนประกอบ 15

2.4.1 ระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า 15

พหูน ปญฺญาโต ชีเว

2.4.2 ระบบการจัดเก็บและจ่ายพลังงาน 20
2.4.3 ระบบเสริมการควบคุมการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้า 22
2.5 ระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าแบบมอเตอร์คู่ 23
2.6 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า 24
2.6.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 24
2.6.2 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 25
2.6.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 29
2.6.4 กำลังและแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 32
2.6.5 คุณลักษณะของแรงบิดและความเร็วรอบ 36
2.6.6 การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำในโหมดขับเคลื่อน 38
2.6.7 การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำในโหมดเป็นเครื่องกำเนิด 39
2.7 หลักการป้อนกลับกำลังไฟฟ้าขณะเบรกของยานยนต์ไฟฟ้า 41
2.7.1 รูปแบบการเปลี่ยนในโหมดการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า 45
2.7.2 รูปแบบการทำงานในระบบรีเจนเนอเรทีฟของมอเตอร์ไฟฟ้า 47
2.7.3 รูปแบบระบบการจัดเก็บพลังงาน (Energy storage system) 48
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 50
2.9 บทสรุป 55
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 56
3.1 บทนำ 56
3.2 การศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าขณะเบรกด้วยหลักทฤษฎี 57
3.2.1 ทำการศึกษาระบบกำลังขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า 57
3.2.2 ทำการออกแบบการคำนวณค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์คู่ 58
3.2.3 ทำการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าขณะเบรกในระยะความเร็วที่แตกต่างกัน 61
3.2.4 ทำการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการเบรกด้วยวิธีการคำนวณ 62

3.3 การศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกโดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตมอเตอร์ (datasheet) 62
3.3.1 ทำการศึกษารายละเอียดกำลังและน้ำหนักของมอเตอร์โดยรวมจากบริษัทผู้ผลิต 62
3.3.2 ทำการออกแบบการคำนวณและวิเคราะห์ผลการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้า 63
3.3.3 การประมาณค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าเมื่อเทียบกับกำลังและน้ำหนักของมอเตอร์ 64
3.3.4 ทำการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการเบรกด้วยวิธีการคำนวณ 65
3.4 การเก็บข้อมูลการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกจากการทดสอบ 65
3.4.1 ทำการออกแบบโครงสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ 66
3.4.2 ทำการทดสอบระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดคู่ 67
3.5 หลักการเทียบเทียบผลการศึกษาในแต่ละขั้นตอน 72
3.6 วิเคราะห์การศึกษาและผลการทดสอบ 72
3.7 บทสรุป 72
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย 74
4.1 บทนำ 74
4.2 ผลการศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าขณะเบรกด้วยหลักทฤษฎี 74
4.3 ผลการศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกโดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตมอเตอร์ (datasheet) 79
4.4 ผลการทดลองการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกจากการทดสอบ 84
4.5 ผลการเปรียบเทียบของผลการศึกษาการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกในแต่ละขั้นตอน 88
4.6 การอภิปรายผลการทดลอง 89
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 90
5.1 บทนำ 90
5.2 สรุปผลการวิจัย 90
5.3 อภิปรายผลการวิจัย 91

พหุน ปณฺ ฑิโต ชีเว

5.4 ข้อเสนอแนะ 92
บรรณานุกรม 93
ประวัติผู้เขียน 101

พหูน ปณ ฑิโต ชีเว

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการหมุน 8

ตาราง 2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอากาศ 9

ตาราง 3 ปริมาณการใช้พลังงานที่ล้อขับเคลื่อน สำหรับยานยนต์รูปแบบต่าง ๆ 14

ตาราง 4 ค่าพลังงานจำเพาะของแหล่งพลังงานหลายชนิด 21

ตาราง 5 ความหนาแน่นของพลังงานอายุการใช้งานและอุณหภูมิในการทำงานของแบตเตอรี่ 49

ตาราง 6 แสดงเงื่อนไขในการทดสอบอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็วต่าง ๆ 62

ตาราง 7 แสดงเงื่อนไขในการทดสอบความแตกต่างระหว่างน้ำหนักมอเตอร์กับอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็วต่าง ๆ ก่อนการเบรก 65

ตาราง 8 การทดสอบระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดคู่ 67

ตาราง 9 อัตราส่วนสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสคู่ที่โหลด 100% 68

ตาราง 10 อัตราส่วนสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสคู่ที่โหลด 75% 69

ตาราง 11 อัตราส่วนสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสคู่ที่โหลด 50% 70

ตาราง 12 อัตราส่วนสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสคู่ที่โหลด 25% 71

พหูน ปณ ฑิโต ชีเว

สารบัญภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 1 ระบบแรงที่กระทำต่อยานยนต์ที่กำลังเคลื่อนที่ 10

ภาพประกอบ 2 รูปแบบการให้แรงขับและกำลังขับต่อความเร็วจากต้นกำลังที่เหมาะสม 11

ภาพประกอบ 3 แรงลากจูงของมอเตอร์ขับเคลื่อน ความเร็ว และแรงต้านการเคลื่อนที่ 12

ภาพประกอบ 4 ส่วนประกอบของการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า 16

ภาพประกอบ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 17

ภาพประกอบ 6 คุณสมบัติและคุณลักษณะของแบตเตอรี่ 20

ภาพประกอบ 7 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ 23

ภาพประกอบ 8 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 24

ภาพประกอบ 9 การเกิดแรงบิดเหนี่ยวนำในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 26

ภาพประกอบ 10 แสดงความถี่โรเตอร์ 28

ภาพประกอบ 11 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 29

ภาพประกอบ 12 วงจรสมมูลของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 30

ภาพประกอบ 13 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์สำหรับการโอนย้ายไปทางด้านสเตเตอร์ 32

ภาพประกอบ 14 แผนภาพการไหลของกำลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 33

ภาพประกอบ 15 วงจรสมมูลต่อเฟสแสดงกำลังงานที่เกิดขึ้นภายในแต่ละส่วนของมอเตอร์ 36

ภาพประกอบ 16 กราฟลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 37

ภาพประกอบ 17 เส้นโค้งแรงบิด-อัตราความเร็วที่สูงและต่ำกว่าอัตราความเร็วซิงโครนัสในแต่ละทิศทางของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 40

ภาพประกอบ 18 จุดทำงานและเงื่อนไขการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรก 42

ภาพประกอบ 19 การทำงานของมอเตอร์ใน 4 รูปแบบ (Four-quadrant operation) 43

ภาพประกอบ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิด 44

พหุน ปณฺ ฑิโต ชีโว

ภาพประกอบ 21 วงจรควบคุม Drive circuit of Induction motor 45
ภาพประกอบ 22 แสดงวงจร Driving Mode 46
ภาพประกอบ 23 แสดงวงจร Initial Braking mode 46
ภาพประกอบ 24 แสดงวงจร Regenerative braking mode 47
ภาพประกอบ 25 แสดงวงจร Motoring Mode 48
ภาพประกอบ 26 แสดงวงจร Regeneration Mode 48
ภาพประกอบ 27 แสดงวงจร Block diagram of Regenerative braking concept 49
ภาพประกอบ 28 แสดงอัตราเร็วเทียบกับเวลาในระยะการขับขี่ที่ปลอดภัย 61
ภาพประกอบ 29 แสดงไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ 66
ภาพประกอบ 30 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 90 km/hr 75
ภาพประกอบ 31 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 80 km/hr 75
ภาพประกอบ 32 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 70 km/hr 76
ภาพประกอบ 33 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 60 km/hr 76
ภาพประกอบ 34 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 50 km/hr 77
ภาพประกอบ 35 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 40 km/hr 77
ภาพประกอบ 36 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 30 km/hr 78
ภาพประกอบ 37 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 20 km/hr 78
ภาพประกอบ 38 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 10 km/hr 79
ภาพประกอบ 39 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 90 km/hr 80
ภาพประกอบ 40 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 80 km/hr 80
ภาพประกอบ 41 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 70 km/hr 81
ภาพประกอบ 42 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 60 km/hr 81
ภาพประกอบ 43 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 50 km/hr 82
ภาพประกอบ 44 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 40 km/hr 82

พหุน ปณ สิต ชีเว

ภาพประกอบ 45 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 30 km/hr 83
ภาพประกอบ 46 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 20 km/hr 83
ภาพประกอบ 47 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 10 km/hr 84
ภาพประกอบ 48 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 90 km/hr 85
ภาพประกอบ 49 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 80 km/hr 85
ภาพประกอบ 50 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 70 km/hr 86
ภาพประกอบ 51 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 60 km/hr 86
ภาพประกอบ 52 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 50 km/hr 87

พหูน ปญ ญาโต ชีเว

บทที่1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการผลิตยานยนต์ไฟฟ้ามากขึ้น โดยเฉพาะยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicles; BEV) ทั้งนี้เพื่อลดสภาพปัญหามลภาวะทางอากาศที่เกิดจากเครื่องยนต์เผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิง [1] ซึ่งข้อมูลจาก International Energy Agency [2] พบว่าการผลิตยานยนต์ไฟฟ้าทั่วโลกเพิ่มขึ้นจาก 2,500 คัน ในปี พ.ศ. 2551 เป็นมากกว่า 3,000,000 คัน ในปี พ.ศ. 2559 ซึ่งมีอัตราการเติบโตเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 56 การศึกษาด้านยานยนต์ไฟฟ้าจึงเกิดขึ้นอย่างมากมาย [3-7]

อย่างไรก็ตาม การพัฒนาระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้ายังต้องการการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ยังมีปัญหาหลายประการ [8-10] แต่ปัญหาหลัก ได้แก่ การประจุไฟฟ้าลงในแบตเตอรี่ซึ่งใช้เวลานาน ยานยนต์สามารถวิ่งได้ที่ระยะทางสั้นต่อการประจุหนึ่งครั้ง และแบตเตอรี่ส่วนใหญ่มีน้ำหนักมาก มีนักวิจัยจำนวนหนึ่งได้เสนอวิธีการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ไว้หลายแนวทาง [11-15] ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 แนวทางคือ การพัฒนาแบตเตอรี่ เช่น การพัฒนาสารหรือองค์ประกอบของแบตเตอรี่ และการบริหารจัดการแบตเตอรี่ เช่น การสร้างสถานีประจุ หรือใช้วิธีการเปลี่ยนชุดแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตาม การพัฒนาแบตเตอรี่แบบใหม่ที่สามารถทำการประจุเร็วและมีกำลังสูงในขณะที่น้ำหนักเบานั้นยังอยู่ในระหว่างการพัฒนา ดังนั้นส่วนที่สามารถดำเนินการได้ในปัจจุบันจึงเป็นการพัฒนาวิธีการบริหารจัดการแบตเตอรี่

การบริหารจัดการแบตเตอรี่มีหลายวิธีการด้วยกันเพื่อให้การประจุใช้เวลาสั้น ยานยนต์วิ่งได้นานและมีน้ำหนักเบา หนึ่งในวิธีการแก้ไขปัญหาคือ การที่จะสามารถประจุแบตเตอรี่ได้จากยานยนต์โดยไม่ต้องมีการประจุจากสถานีได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีหลายวิธีการด้วยกัน [16-18] ได้แก่ การเพิ่มระบบผลิตกำลังไฟฟ้าเข้าไปที่ตัวยานยนต์ เช่น การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือกังหันลม เป็นต้น และการผลิตกำลังไฟฟ้าภายในตัวยานยนต์ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มระบบผลิตกำลังไฟฟ้าเข้าไปที่ตัวยานยนต์อาจประสบปัญหาเกี่ยวกับ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น หรือ อาจส่งผลต่อสมรรถนะของยานยนต์ได้ ดังนั้นในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยสนใจการผลิตกำลังไฟฟ้าภายในตัวยานยนต์

การผลิตกำลังไฟฟ้าภายในตัวยานยนต์มีหลายวิธีด้วยกัน [19-21] แต่วิธีการที่นิยมได้แก่ การผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับ [22-24] สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามลักษณะระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor drive system) ได้แก่ ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เดี่ยว (Single motor drive system) [25-27] ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ (Two-motor drive system) [28-30] และระบบ

ขับเคลื่อนหลายมอเตอร์ (Multiple-motor drive system) [31-33] เช่น ระบบขับเคลื่อนสามมอเตอร์ (Three-wheel drive system) หรือ ระบบขับเคลื่อนสี่มอเตอร์ (four-wheel drives) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่าระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เดี่ยวจะมีโครงสร้างที่ง่าย แต่สมรรถนะของระบบขับเคลื่อนประเภทนี้ก็ขึ้นอยู่กับประเภทและสมรรถนะของมอเตอร์ โดยไม่สามารถกระจายโหลดให้กับมอเตอร์ขับเคลื่อนอื่นได้ อีกทั้งในสภาวะผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับ หรือรีเจนเนอเรชัน (Regeneration) มีระดับกระแสปรากฏที่มอเตอร์สูงมาก ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการประจุเข้าแบตเตอรี่หรืออาจเกิดความเสียหายต่อระบบขับเคลื่อนได้ง่าย [34, 35] ในขณะที่ระบบขับเคลื่อนหลายมอเตอร์สามารถกระจายโหลดมอเตอร์และสามารถปรับสภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อนกับสภาพโหลดที่แตกต่างหรือมีความผิดปกติเกิดขึ้นได้ดี อีกทั้งการรีเจนเนอเรชันเกิดขึ้นที่ระดับกระแสปรากฏต่อมอเตอร์ต่ำกว่าระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เดี่ยว ทำให้มีความเหมาะสมและมีความยืดหยุ่นในการประจุแบตเตอรี่มากกว่า แต่มีโครงสร้างและการควบคุมที่ซับซ้อน ประกอบด้วยอุปกรณ์จำนวนมากทำให้มีแนวโน้มราคาต้นทุนสูงขึ้น ยากต่อการซ่อมบำรุงอีกด้วย [36, 37] ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างโครงสร้างและสมรรถนะในการผลิตพลังงานป้อนกลับ การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

มีการศึกษาและพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าอยู่จำนวนหนึ่ง [38-40] ซึ่งได้กล่าวถึง การพัฒนาและปรับปรุงอุปกรณ์ [41, 42] หรือการพัฒนาระบบการส่งผ่านกำลังงานของระบบ [43-45] ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การวิจัยในส่วนของการพิจารณาหาค่าอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับนั้น ยังไม่ได้มีผู้ศึกษาวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและสมรรถนะการประจุกำลัง ระยะทางที่ยานยนต์สามารถวิ่งได้และน้ำหนัก เมื่อมอเตอร์คู่แต่ละตัวมีอัตราส่วนกำลังต่างกัน ทั้งในส่วนของการทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดสอบจริง จึงเป็นที่มาของการวิจัยในครั้งนี้

1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์คู่ในระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับในขณะเบรก ด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.2.2 เพื่อศึกษาอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์คู่ในระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับในขณะเบรก ด้วยชุดทดลองจริง

1.2.3 เพื่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและสมรรถนะของมอเตอร์คู่ ในอัตราส่วนกำลังต่างกัน โดยเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับที่ได้จากชุดทดลองจริง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 มอเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาและพัฒนาเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (3-phase induction motors) ทั้งนี้เนื่องจากแนวโน้มการพัฒนาและใช้งานมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคตเป็นมอเตอร์ประเภทนี้

1.3.2 กำลังรวมของระบบขับเคลื่อนที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์คือ 80 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นระดับกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมในการจัดสร้างยานยนต์ไฟฟ้าส่วนบุคคลประเภทขนาดเล็กสี่ล้อ

1.3.3 ศึกษาระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัดรวมของระบบไม่เกิน 4 กิโลวัตต์ ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมด้านงบประมาณและการควบคุมการทดลองในการวิจัย

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ผลการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับของมอเตอร์คู่ที่พิกัดกำลังแตกต่างกัน

1.4.2 ได้ผลการทดสอบและเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับของมอเตอร์คู่ด้วยวิธีการต่างๆ

1.4.3 ได้วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานป้อนกลับของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ภายใต้สภาวะการผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับในขณะเบรก

1.5 องค์ประกอบของวิทยานิพนธ์

ในการศึกษาและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับของมอเตอร์คู่ในขณะเบรกที่พิกัดกำลังแตกต่างกัน นั้นสามารถนำเสนอองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ในแต่ละส่วนดังนี้

บทที่ 1 นำเสนอเกี่ยวกับความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ขอบเขต ขั้นตอนการศึกษา ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 นำเสนอเกี่ยวกับปริทัศน์เอกสารข้อมูล ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งเป็นการทบทวนวรรณกรรมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานและในส่วนของทฤษฎีต่าง ๆ ที่ใช้เป็นพื้นฐานในการวิจัย

บทที่ 3 นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการดำเนินการวิจัย ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน วิธีวิจัย ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกด้วยหลักทฤษฎีคณิตศาสตร์ ขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกโดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตมอเตอร์ (datasheet) ขั้นตอนที่ 3 เป็นการเก็บข้อมูลการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกจากการทดสอบ และขั้นตอนที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบและสรุปผลที่ได้จากการทดสอบในแต่ละขั้นตอน

บทที่ 4 นำเสนอเกี่ยวกับผลการทดลองตามลำดับขั้นการทดลอง

บทที่ 5 นำเสนอเกี่ยวกับสรุปผลการทดลองตามลำดับขั้นตอนในกรณีศึกษาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ในงานวิจัยต่อไป

และในส่วนอื่น ๆ ตอนท้ายเล่มประกอบไปด้วยภาคผนวก และประวัติผู้แต่ง สามารถนำเสนอได้ในลำดับต่อไป

พหูน ปณฺ ฑิโต ชีเว

บทที่ 2
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

2.1 บทนำ

ยานยนต์ไฟฟ้าทั่วโลกในปัจจุบัน พบปัญหาอยู่ 3 ประการคือ ราคา ระยะทาง และความพร้อมของสถานีชาร์ตแบตเตอรี่ การผลิตยานยนต์ไฟฟ้ายังคงมีราคาค่อนข้างสูง ในขณะเดียวกันการศึกษาถึงระยะทางในการขับขี่รวมถึงสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับประเภทและสมรรถนะของมอเตอร์กำลังขับเคลื่อน ทั้งนี้การศึกษาถึงสภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับ หรือรีเจนเนอเรชัน (Regeneration) นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมากของยานยนต์ไฟฟ้าระยะทางของการขับเคลื่อนยังคงเป็นปัจจัยหลักในระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งพลังงานส่วนใหญ่มาจากแบตเตอรี่อย่างเดียว และถ้าหากนำพลังงานจากภายนอกมาใช้กับยานยนต์ก็อาจจะเป็นปัญหาของยานยนต์ในส่วนของการขับเคลื่อนได้ อย่างไรก็ตามระบบขับเคลื่อนที่ใช้หลายมอเตอร์สามารถกระจายโหลดมอเตอร์และสามารถปรับสภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อนกับสภาพโหลดที่แตกต่างได้ดี อีกทั้งการรีเจนเนอเรชันเกิดขึ้นที่ระดับกระแสปรากฏต่อมอเตอร์ต่ำกว่าระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เดี่ยว ทำให้มีความเหมาะสมและมีความยืดหยุ่นในการประจุแบตเตอรี่มากกว่า ซึ่งระบบขับเคลื่อนหลายมอเตอร์นั้นมีโครงสร้างและการควบคุมที่ซับซ้อน ประกอบด้วยอุปกรณ์จำนวนมากทำให้มีแนวโน้มราคาต้นทุนสูงขึ้น ยากต่อการซ่อมบำรุงอีกด้วย ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างโครงสร้างของยานยนต์และสมรรถนะในการผลิตพลังงานป้อนกลับ การศึกษาและพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจึงมีความเหมาะสมและความเป็นไปได้ถึงระบบที่มีความสมดุลของการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าดังกล่าว ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึง ปัจจัยและระบบกลศาสตร์การขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ทฤษฎีที่เกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส การวิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานในโหมดที่เป็นมอเตอร์ (ขับเคลื่อน) และโหมดเครื่องกำเนิด (เบรก) การวิเคราะห์ระบบการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก รวมไปถึงทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบชุดต้นกำลังในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า จากบทนำที่กล่าวมาผู้วิจัยได้นำประเด็นดังกล่าวมาศึกษาในหลักทฤษฎีการคำนวณกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยจึงได้ศึกษา ค้นคว้าและทำการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

2.2 ระบบยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน

การศึกษาพัฒนาและวิจัยด้านยานยนต์ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ทั้งในเทคโนโลยีด้านการขับเคลื่อน เทคโนโลยีด้านวัสดุศาสตร์ มีการปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในสายการผลิต บริษัทผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันจำนวนมาก [46] หันมาผลิตยานยนต์ไฟฟ้ามากขึ้น จากวิวัฒนาการของยานยนต์สันดาปภายในแบบดั้งเดิม ได้ถูกพัฒนาจนกลายมาเป็นยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท [47] ประกอบไปด้วยยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดจ์ (Hybrid Electric Vehicle, HEV) ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดจ์ปลั๊กอิน (Plug-In Hybrid Electric Vehicle, PHEV) ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle, BEV) และยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) นอกจากยานยนต์ไฟฟ้าที่กล่าวมาแล้วนั้นยังมีการพัฒนาต่อไปอีก เพื่อให้เป็นยานยนต์ไฟฟ้าอัจฉริยะ (Intelligence Electric Vehicle) โดยการใช้ระบบพื้นฐานยานยนต์ไฟฟ้า 4 ประเภทข้างต้นซึ่งเพิ่มเติมระบบการสื่อสาร เทคโนโลยีไร้คนขับ เทคโนโลยีประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย [48] เป็นต้น ทำให้ยอดขายของกลุ่มยานยนต์ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและเริ่มเข้ามาแทนที่ยานยนต์แบบดั้งเดิมมากยิ่งขึ้นสอดคล้องกับสถานการณ์ปัจจุบันของยอดขายยานยนต์ในอเมริกา ยุโรปและจีน [49] เป็นต้น

จากการสำรวจพบว่ายานยนต์ไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน (Plug-in Electric Vehicle, PEV) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ ยานยนต์ไฟฟ้าแบบผสมผสาน (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV) และยานยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle, BEV) [50] ซึ่งพบว่ายอดขายยานยนต์ไฟฟ้าของ PHEV มียอดขายที่ดีกว่า BEV เนื่องจากความกังวลใจในด้านการหาสถานีประจุแบตเตอรี่และราคาของแบตเตอรี่ค่อนข้างสูง ทั้งนี้ส่งผลต่อการเพิ่มการพัฒนาและวิจัยยานยนต์มากขึ้นตามไปด้วย [51] ทั้งนี้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าแต่ละผู้ผลิตนั้นจะแตกต่างกัน เช่น ชนิดของแบตเตอรี่ ขนาดของแบตเตอรี่ ระยะทางที่ขับเคลื่อนได้ ขนาดมอเตอร์และระดับการประจุ ส่วนปัจจัยการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของจำนวนยานยนต์ไฟฟ้านั้น มีปัจจัยหลายด้าน เช่น สภาวะเศรษฐกิจโลก นโยบายภาครัฐ และการพัฒนาด้านเทคโนโลยียานยนต์ที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เป็นต้น

การวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาประเภทของยานยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle, BEV) เท่านั้นเพราะมีความเป็นไปได้ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้การประจุจากสถานีให้บริการอยู่บ่อย ๆ ซึ่งการนำพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไปใช้งานโดยผ่านอุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ยานยนต์สามารถขับเคลื่อนไปได้ถึงจุดหมายปลายทาง และการศึกษานี้จะมุ่งเน้นถึงการผลิตพลังงานจากระบบขับเคลื่อนเอง โดยไม่ต้องประจุแบตเตอรี่บ่อยๆ จากสถานีบริการ ซึ่งมีการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ในระบบขับเคลื่อน หรือการพัฒนาระบบการส่งผ่านกำลังงานของระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม จากปัญหาของระยะทางในการขับขี่ สามารถแก้ปัญหาได้หลายทาง แต่สำหรับการวิจัยในส่วนของการพิจารณาหาค่าอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับ

มอเตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับ ทั้งนี้ยานยนต์ไฟฟ้าที่ทำการวิจัยต้องสามารถป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ในขณะที่เบรกและช่วงเวลาของการขับขี่ในที่การจราจรคับคั่งได้อีกด้วย ซึ่งสามารถลดขนาดของแบตเตอรี่และนำไปสู่การบริหารจัดการมอเตอร์ที่ใช้เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าให้สามารถเป็นได้ทั้งมอเตอร์ขับเคลื่อนและเป็นเครื่องกำเนิดในการผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับให้แบตเตอรี่ได้อีกด้วย

2.3 หลักการขับเคลื่อนและการเบรกของยานยนต์ไฟฟ้า

การจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนและการเบรกที่ถูกต้องเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบ การศึกษาลักษณะการใช้พลังงานและกำลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า ผลจากการจำลองสามารถนำไปกำหนดพิกัดของระบบควบคุมในยานยนต์ไฟฟ้าได้ทั้งในระบบขับเคลื่อน ระบบส่งกำลัง ระบบจัดเก็บพลังงานและระบบเสริมความปลอดภัย สำหรับการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้หลักการในการเคลื่อนที่ หรือพลศาสตร์ของยานยนต์ เพื่อประมาณค่ากำลังการลากจูงและความเร็วของยานยนต์ รวมถึงสมรรถนะและแรงขับเคลื่อนรวมไปถึงระบบพลังงานคืนกลับจากการเบรกซึ่งสามารถดำเนินการทดลองในระบบการขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าดังต่อไปนี้

2.3.1 กลศาสตร์การเคลื่อนที่ของยานยนต์

งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกลศาสตร์ยานยนต์ไฟฟ้า โดยจะทำการจำลองยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้งานบนผิวถนนด้วยการหากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรก ดังแสดงในภาพประกอบ 1 เมื่อยานยนต์มีมวล (m) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (v) ทำมุม (α) กับพื้นราบ แรงขับเคลื่อนที่ทำให้ยานยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าคือ F_{te} ซึ่งแรงขับเคลื่อนนี้จะต้องเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่จากการหมุนของล้อ (Rolling resistance) หรือ F_{rr} แรงต้านจากอากาศ (Aerodynamic drag) หรือ F_{ad} และแรงต้านจากการไต่ทางชัน (Gradient resistance) หรือ F_{rg} และแรงที่ทำให้ยานยนต์มีความเร่ง (Acceleration force) ในกรณีที่ความเร็วไม่คงที่ หรือ F_{acc}

แรงต้านการเคลื่อนที่จากการหมุนของล้อเกิดการแรงเสียดทานระหว่างผิวของยางรถยนต์และผิวถนน ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานการหมุนระหว่างยางและผิวถนน (μ_{rr}) แรงที่กระทำในแนวตั้งฉาก (F_N) เนื่องจากน้ำหนักของยานยนต์และแรงโน้มถ่วงของโลก mg เมื่อยานยนต์หยุดนิ่งหรือไม่มีแรงกระทำระหว่างยางของยานยนต์ และผิวถนนก็จะไม่เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ขึ้น ดังนั้นสมการในการคำนวณของแรงต้านการเคลื่อนที่จากการหมุนสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.1 โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน μ_{rr} สามารถพิจารณาของผิวจราจรได้ดังตาราง 1 [52]

$$F_{rr} = \mu_{rr} mg \cos(\alpha) \tag{2.1}$$

โดยที่ F_{rr} คือ แรงต้านทานการหมุน (นิวตัน)

μ_{rr} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน ขึ้นอยู่กับชนิดของยางกับพื้นถนน

m คือ มวลรวมของรถและน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (กิโลกรัม)

g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก เท่ากับ 9.81 m/s^2

α คือ มุมความลาดเอียงของพื้นถนน (เรเดียน)

ตาราง 1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการหมุน

ผิวจราจร	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการหมุน (μ_{rr})
ถนนคอนกรีต	0.013
ถนนลูกรัง	0.020
ถนนลาดยาง	0.025
ถนนดิน	0.050
สนามหญ้า	0.1-0.35
ล้อบนรางเหล็ก	0.001-0.002

แรงต้านอากาศจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอากาศ ρ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอากาศ C_d พื้นที่ด้านหน้าของรถยนต์ A และความเร็วของรถยนต์ v สมการในการคำนวณสำหรับแรงต้านอากาศสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.2 โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอากาศ C_d สามารถพิจารณาได้ดังตาราง 2

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \tag{2.2}$$

โดยที่ F_{ad} คือ แรงต้านทานจากอากาศ (นิวตัน)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรถ (ตารางเมตร)

C_d คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Drag coefficient)

v คือ ความเร็วของอากาศ (เมตรต่อวินาที)

พหูน ปณ ศฺโต ชีเว

ตาราง 2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอากาศ

ชนิดของยานยนต์	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางอากาศ (C_d)
รถยนต์เปิดประทุน	0.5-0.7
รถตู้	0.5-0.7
รถยนต์ส่วนบุคคล	0.4-0.55
รถบรรทุก	0.8-1.5
รถบัส	0.6-0.7
รถจักรยานยนต์	0.6-0.7

แรงที่เกี่ยวข้องกับความลาดเอียงของพื้นผิวจราจรขึ้นอยู่กับมวลของยานยนต์ m มุมของผิวถนนที่กระทำกับพื้นราบ α และความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก g สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการ 2.3

$$F_{rg} = mg\sin(\alpha) \qquad (2.3)$$

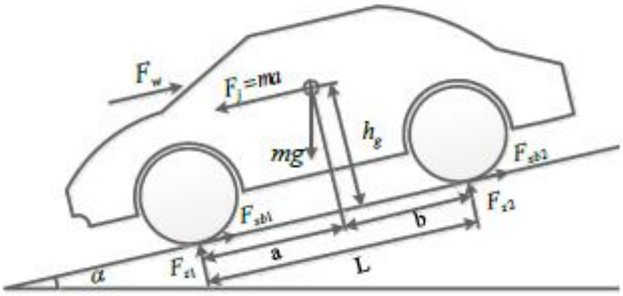
โดยที่ F_{rg} คือ แรงต้านทางลาดชัน (นิวตัน)
m คือ มวลรวมของรถและน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (กิโลกรัม)
g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก เท่ากับ 9.81 m/s^2
α คือ มุมความลาดเอียงของพื้นถนน (เรเดียน)

แรงต้านจากความเร่ง แรงต้านนี้มีผลต่อแรงขับที่จะต้องการจากต้นกำลัง ได้แก่ แรงต้านจากความเร่ง ซึ่งได้แก่ แรงต้านจากความเร่ง (acceleration force) โดยที่ยานยนต์จะขับเคลื่อนได้นั้นหมายถึงการออกตัวจากหยุดนิ่ง รวมทั้งการเร่งตัวเพื่อไปสู่ความเร็วที่สูงขึ้น จากความเร็วหนึ่ง ๆ นอกจากยานยนต์จะต้องการแรงขับที่จะเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ ที่เกิดที่ความเร็วนั้น ยังต้องการแรงขับที่เกินจากแรงต้านการเคลื่อนที่เพื่อสร้างความเร่งด้วย ซึ่งแรงต้านจากความเร่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ แรงเพื่อความเร่งเชิงเส้น และแรงเพื่อความเร่งเชิงมุม สำหรับแรงต้านในขณะขับเคลื่อนสามารถแสดงในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$F_{acc} = ma \qquad (2.4)$$

โดยที่ F_{acc} คือ แรงต้านจากความเร่ง (นิวตัน)
m คือ น้ำหนักรวมของรถยนต์ (กิโลกรัม)
a คือ ความหน่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

ยานยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ได้นั้น เป็นไปตามระบบแรงการเคลื่อนที่ตามกฎของนิวตัน จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงขับเคลื่อน แรงต้านการเคลื่อนที่ มวลของยานยนต์ และความเร่งของการเคลื่อนที่ดังภาพประกอบ 1 [53]



ภาพประกอบ 1 ระบบแรงที่กระทำต่อยานยนต์ที่กำลังเคลื่อนที่

แรงต้านการเคลื่อนที่ ซึ่งในการเคลื่อนที่ของรถยนต์นั้นระบบขับเคลื่อนจะต้องสามารถเร่งขับเคลื่อนเพื่อเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ของรถเพื่อให้รถสามารถเคลื่อนที่ได้ตามความต้องการ ดังนั้นแรงที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์คือผลรวมแรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหมดต่อแรงขับที่ได้จากต้นกำลังระบุถึงสมรรถนะของยานยนต์ที่จะกระทำได้ดังสมการ 2.5

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{rg} + F_{acc} \tag{2.5}$$

จากสมการ 2.5 สามารถคำนวณหากำลังขับเคลื่อนทางไฟฟ้าได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนคูณกับอัตราเร็วของยานยนต์ในขณะนั้นที่ยานยนต์ไฟฟ้าต้องการได้ดังนี้

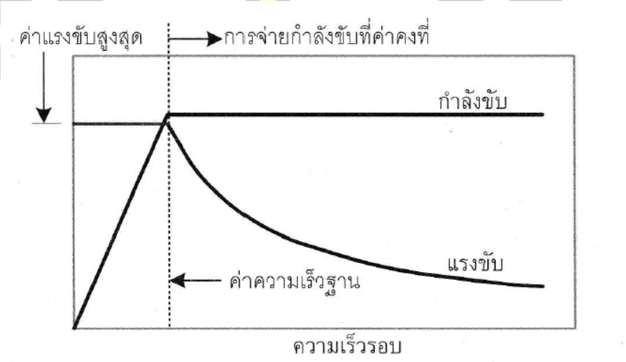
$$P_{te} = F_{te} v \tag{2.6}$$

หรือ

$$P_{te} = \left(F_{rr} + F_{ad} + F_{rg} + F_{acc} \right) v \tag{2.7}$$

แรงขับจากต้นกำลัง จากแรงต้านการเคลื่อนที่และแรงต้านจากความเร่งดังที่กล่าวข้างต้น สมรรถนะของยานยนต์ถูกระบุได้ด้วยการเทียบแรงขับจากต้นกำลังกับผลรวมของแรงต้านที่สองส่วนที่กล่าวข้างต้น ในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ลักษณะการจ่ายแรงขับต่อความเร็วที่เหมาะสมที่สุดคือการจ่ายกำลังขับที่ค่าคงที่ตลอดระยะความเร็วในการขับขี่ ซึ่งจะทำให้การออกตัวและการขึ้นทางลาดชันที่ดีที่ความเร็วต่ำ ในขณะที่ให้ความนุ่มนวลและการประหยัดพลังงานที่ดีที่ความเร็วสูง กล่าวคือมี

การเปลี่ยนแปลงของกำลังขับและแรงขับดังภาพประกอบ 2 จากรูปจะสังเกตได้ว่าที่ความเร็วต่ำ แทนที่จะเป็นการจ่ายกำลังขับที่ค่าคงที่แต่ว่ามีการจำกัดค่าแรงขับสูงสุด ทั้งนี้ก็เพื่อไม่ให้ค่าแรงขับเคลื่อนที่ล้อขณะออกตัวมีค่าสูงเกินที่หน้าสัมผัสระหว่างยางของยานยนต์และพื้นถนนจะรับได้ซึ่งจะเกิดการลื่นไถลของล้อ และหมายถึงการไม่เคลื่อนที่ของตัวยานยนต์และการสูญเสียพลังงานได้



ภาพประกอบ 2 รูปแบบการให้แรงขับและกำลังขับต่อความเร็วจากต้นกำลังที่เหมาะสม

2.3.2 สมรรถนะการขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้า

สมรรถนะของยานยนต์จะบ่งชี้ด้วยค่าความเร็วสูงสุดคงที่ (Maximum Cruising Speed) ค่าสมรรถนะในการไต่ทางชัน (Grade ability) และสมรรถนะในการเร่ง (Acceleration) การประเมินค่าสมรรถนะของยานยนต์ไฟฟ้าอยู่บนพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างแรงลากจูง ความเร็วของยานยนต์ และแรงต้านที่กระทำกับยานยนต์ มีข้อมูลการคำนวณดังต่อไปนี้

1) ความเร็วสูงสุดของยานยนต์ไฟฟ้า สามารถให้คำจำกัดความได้ว่า เป็นความเร็วคงที่ของยานยนต์ ขณะขับเคลื่อนด้วยกำลังสูงสุดของมอเตอร์ขับเคลื่อนบนเส้นทางราบ (Flat Road) ความเร็วสูงสุดของยานยนต์ไฟฟ้าจะถูกกำหนดโดยแรงลากจูงและแรงต้านการเคลื่อนที่ดังสมการ 2.8

$$F_{te} = \mu_{rr} mg \cos\alpha + \tfrac{1}{2}\rho C_d A v^2 \qquad (2.8)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.8 พบว่ายานยนต์ไฟฟ้าจะมีความเร็วสูงที่สุดเมื่อพจน์ด้านซ้ายมือเท่ากับพจน์ด้านขวามือ หรือที่จุดที่แรงลากจูงและแรงต้านมีค่าเท่ากัน นั้นคือจุดตัดของเส้นโค้งของแรงลากจูงและเส้นโค้งของแรงต้านการเคลื่อนที่ ดังภาพประกอบ 3 ซึ่งถ้าหากไม่มีจุดตัดของเส้นโค้งระหว่างเส้นโค้งของแรงลากจูงและเส้นโค้งของแรงต้านการเคลื่อนที่ สาเหตุเนื่องมาจากกำลังของมอเตอร์มีมาก หรือมอเตอร์มีขนาดใหญ่ หรืออัตราทดของเกียร์มีค่าสูง ในกรณีนี้ ความเร็วสูงสุดของ

ยานยนต์ไฟฟ้าจะถูกกำหนดโดยความเร็วของมอเตอร์เมื่อขับด้วยกำลังสูงสุด จากสมการที่ 2.6 ความเร็วสูงสุดของยานยนต์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นดังสมการที่ 2.9 [54]

$$v_{\max} = \frac{2\pi rN}{i_o} \tag{2.9}$$

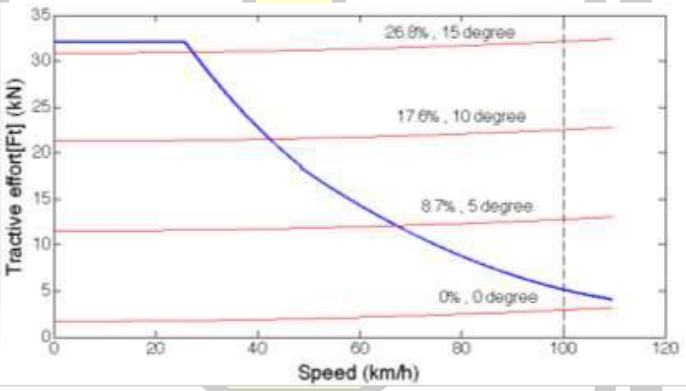
เมื่อ $v_{\max}$ = อัตราเร็วสูงสุดของยานยนต์ มีหน่วยเป็น m/s

r = รัศมีของยางยานยนต์ มีหน่วยเป็น m

N = อัตราความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อน มีหน่วยเป็น rpm

i_o = อัตราทดเฟืองรวมทั้งหมด

ซึ่ง N และ i_o คือความเร็วสูงสุดของมอเตอร์และอัตราทดเฟืองเกียร์ต่ำสุดของระบบส่งกำลังยานยนต์ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3 แรงลากจูงของมอเตอร์ขับเคลื่อน ความเร็ว และแรงต้านการเคลื่อนที่

2) ความสามารถในการไต่ทางชัน ในขณะที่ยานยนต์วิ่งขึ้นทางชัน กำลังจากต้นกำลังบางส่วนต้องถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านทางชัน (Gradient resistance) ทำให้มอเตอร์ขับเคลื่อนต้องทำงานหนักมากกว่าการวิ่งบนถนนระดับแต่ถ้ายานยนต์วิ่งลงทางลาด มอเตอร์ขับเคลื่อนจะทำงานน้อยลงเพราะมีแรงเสริมจากแรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้นแรงต้านทางชันจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับน้ำหนักของยานยนต์และความชันของถนน ซึ่งระดับหรือมุมที่ยานยนต์สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปโดยสามารถรักษาความเร็วให้คงที่ได้ จะเห็นได้ว่าแรงต้านทางชันมีค่าคงที่สม่ำเสมอถ้าหากน้ำหนักของยานยนต์และความชันของพื้นถนนไม่เปลี่ยนแปลง งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบที่ถนนอยู่ในแนวระดับมุมของทางชันมีค่าเป็นศูนย์

สมรรถนะในการเร่ง เวลาที่ใช้ในการเร่งและระยะทาง โดยเริ่มจากหยุดนิ่งไปสู่ความเร็วค่า ๆ หนึ่ง เช่น จาก 0 ถึง 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนพื้นราบ จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน ความเร่งของยานยนต์ไฟฟ้าสามารถเขียนในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2.10

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F_{te} - F_{rr} - F_{ad}}{m} \tag{2.10}$$

จะเห็นได้ว่า m ไม่ใช่มวลของยานยนต์เพียงอย่างเดียว เพราะว่าชิ้นส่วนต่าง ๆ ของยานยนต์ เช่น เพลาข้อมอเตอร์ เพลากลาง เพลาท้าย เป็นต้น ต่างก็ต้องมีความเร่งเชิงมุมเช่นกัน ซึ่งชิ้นส่วนเหล่านี้ต่างก็มีโมเมนต์ความเฉื่อยด้วยเช่นกัน ดังนั้นยานยนต์จะต้องใช้กำลังบางส่วนในการเร่งให้หมุนเร็วขึ้นด้วย เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงเปลี่ยนโมเมนต์ความเฉื่อยไปเป็นมวลที่สมมูลกัน แล้วนำมวลนั้นไปรวมกับมวลยานยนต์ ซึ่งงานวิจัยนี้ เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงใช้มวลรวมของยานยนต์ที่เป็นมวลสมมูลเท่านั้น

2.3.3 การใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า

นอกเหนือจากประเมินสมรรถนะในส่วนของความเร็วหรืออัตราเร่งแล้ว ค่าบ่งชี้สมรรถนะที่สำคัญ คือปริมาณการใช้พลังงานต่อระยะขับขี่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับยานยนต์ไฟฟ้าที่มีปริมาณพลังงานเก็บกักในตัวอย่างจำกัด ค่าปริมาณการใช้พลังงานต่อระยะขับขี่ เช่น ในหน่วยกิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลเมตร (kWh/km) บ่งชี้โดยตรงถึงประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อนนั้น ๆ ซึ่งรวมไปถึงการผลิตพลังงานป้อนกลับให้กับยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อเพิ่มระยะของการขับขี่ให้มากขึ้น

การประเมินแรงต้านการเคลื่อนที่และแรงขับจากต้นกำลัง และการตระหนักถึงความสำคัญของกลไกการทดสอบในการประเมินปริมาณการใช้พลังงาน ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วจำเป็นต้องประเมินปริมาณการใช้พลังงานอย่างรวดเร็วสำหรับยานยนต์รูปแบบหนึ่ง ๆ และยานยนต์คันหนึ่ง ๆ อาจไม่เคยได้ถูกขับขี่ในรูปแบบของความเร็วที่สอดคล้องกับกลไกขับขี่ตามมาตรฐานใดเลยก็ได้ ตาราง 3 แสดงข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานสำหรับยานยนต์รูปแบบต่าง ๆ เพื่อเป็นประโยชน์ในการหาค่าปริมาณการใช้พลังงานต่อระยะการขับขี่ โดยค่าที่ระบุเป็นค่าพลังงานที่ต้องการที่ล้อเพื่อการขับเคลื่อน ดังนั้น หากต้องการประเมินค่าพลังงานที่ต้องการจากแหล่งจ่ายพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ ก็ต้องหารด้วยค่าประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อน ซึ่งในกรณีของยานยนต์ไฟฟ้าตัวเลขโดยประมาณอาจอยู่ที่ 0.8 นอกจากนั้น หากต้องการใช้ข้อมูลนี้เพื่อการประเมินขนาดของแบตเตอรี่ ก็ต้องตระหนักถึงความแตกต่างระหว่างพิกัดความจุพลังงาน (rated capacity) และความจุใช้งาน (usable capacity) เช่น ในแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า ที่พิกัดความจุ 16 กิโลวัตต์ชั่วโมง จะมีความจุใช้งานเพียง 10.4

กิโลวัตต์-ชั่วโมง เท่านั้น ถ้าหากเมื่ออ่านค่าระบุของอัตราการใช้พลังงานจากผู้ผลิต ก็จะอ้างอิงกับพิกัดความจุเช่นกัน ซึ่งในกรณีที่แรงดันถูกระบุอัตราการใช้พลังงานที่ 225 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลเมตร ซึ่งอ้างที่พิกัดความจุและเมื่อคำนวณด้วยความจุใช้งานจะให้ตัวเลขที่ 146 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลเมตร เมื่อคิดรวมกับประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อนที่ 0.8 ก็จะได้ที่ปริมาณพลังงาน 117 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลเมตร ซึ่งสอดคล้องกับตาราง 3 [55]

หากผู้ออกแบบจะนำข้อมูลในตาราง 3 เพื่อใช้กำหนดขนาดของแหล่งพลังงาน จะต้องตระหนักว่าข้อมูลเหล่านี้ระบุเพียงปริมาณการใช้พลังงานสำหรับการขับเคลื่อนเท่านั้น แต่ในการทำงานยานยนต์ยังต้องการพลังงานในปริมาณจำนวนไม่น้อยเพื่อขับอุปกรณ์เสริมการทำงาน โดยเฉพาะในกรณีของเครื่องปรับอากาศ ซึ่งยานยนต์ขับขี่ส่วนบุคคล ในการขับขี่ปกติการเปิดเครื่องปรับอากาศอาจส่งผลให้ใช้พลังงานเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 20 และการขับขี่ที่ความเร็วต่ำอาจต้องการพลังงานจากแบตเตอรี่เพียง 340 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลเมตร แต่หากติดตั้งเครื่องปรับอากาศที่พิกัด 5 กิโลวัตต์ พร้อมการใช้ไฟฟ้าเพื่ออุปกรณ์ต่อพ่วงอื่น ๆ อีกประมาณ 3 กิโลวัตต์ หมายถึงการใช้พลังงานได้มากกว่า 8 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงการทำงาน หรืออาจกล่าวได้ว่าการจอดรถติดเครื่องไว้ 10 นาที จะใช้พลังงานที่เทียบได้กับการใช้พลังงานเพื่อการขับเคลื่อนกว่า 4 กิโลเมตร

ตาราง 3 ปริมาณการใช้พลังงานที่ล้อขับเคลื่อน สำหรับยานยนต์รูปแบบต่าง ๆ

ประเภทยานยนต์	วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลเมตร (Wh/km)
รถยนต์ไฟฟ้าส่วนบุคคลขนาดเล็ก	90
รถยนต์ส่วนบุคคลขนาดเล็ก	130
รถยนต์ส่วนบุคคลขนาดกลาง	150
รถเก๋งเอนกประสงค์ (SUV) ขนาดเล็ก	150
รถเก๋งเอนกประสงค์ (SUV) ขนาดใหญ่	200
รถกระบะ	200
รถกอล์ฟขนาด 4-6 ที่นั่ง	75
รถจักรยานยนต์	28
รถจักรยาน	7
รถโดยสารภายใน ขนาด 10 ที่นั่ง	250
รถโดยสารภายใน ขนาด 16 ที่นั่ง (4.5 ตัน)	350
รถโดยสารภายใน ขนาด 40 ที่นั่ง (13 ตัน)	750

พหูน ปณฺ ฑิโต ชีเว

2.4 ยานยนต์ไฟฟ้าและส่วนประกอบ

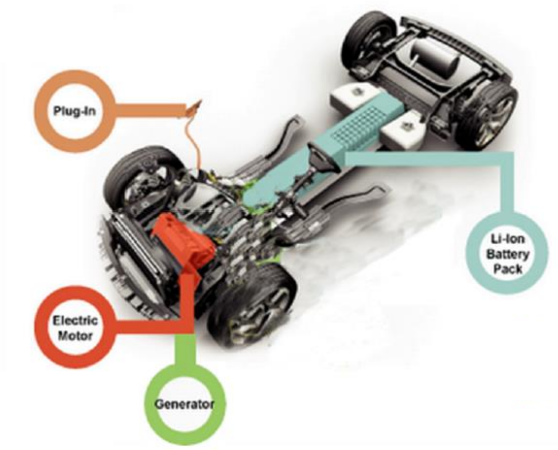
ระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้ามีข้อแตกต่างจากการขับเคลื่อนของยานยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือการใช้พลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บอยู่ในแบตเตอรี่ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งเป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานขับเคลื่อนทางกลแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ดังนั้นการขับเคลื่อนด้วยระบบไฟฟ้าจึงไม่มีการปลดปล่อยมลพิษที่ปลายท่อ (Tailpipe Emissions) หากพิจารณาระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 4 ส่วน ได้แก่มอเตอร์ขับเคลื่อน (Traction Motor), ชุดควบคุมมอเตอร์ (Motor Controller), ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power Electronics) และระบบสนับสนุนย่อย (Supporting Systems) ซึ่งมอเตอร์ขับเคลื่อนจะทำหน้าที่เป็นต้นกำลังหลักแทนเครื่องยนต์ โดยมอเตอร์จะถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมมอเตอร์ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมแรงบิดและกำลังขับโดยใช้การควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังมอเตอร์ให้เหมาะสมกับภาระโหลด ทั้งนี้ ระบบไฟฟ้ากำลังจะทำหน้าที่ปรับระดับพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับคำสั่งจากชุดควบคุมมอเตอร์ตามประเภทของมอเตอร์ ข้อสำคัญอีกประการหนึ่งของระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าที่เหนือกว่าระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ก็คือต้องการชุดเฟืองทดที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า เนื่องจากมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถสร้างแรงบิดที่แปรผันกับความเร็วรอบอย่างเหมาะสมต่อการขับเคลื่อน

ยานยนต์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งเป็นพลังงานไฟฟ้าจะเก็บอยู่ในแบตเตอรี่หรืออุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอื่นๆ และด้วยข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ให้แรงบิดได้ทันทีทำให้ยานยนต์ไฟฟ้ามี อัตราเร่งที่เรียบและรวดเร็ว โดยจะมีชุดอุปกรณ์หลักคือ แบตเตอรี่ที่มีความจุพลังงานไฟฟ้าสูงซึ่งเก็บไว้ในรถ และตัวมอเตอร์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนโดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ส่วนมากเรื่องของระยะเวลาและระยะทางของยานยนต์ไฟฟ้าจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับขนาดความจุของแบตเตอรี่เป็นสำคัญ ปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้านิยมใช้มอเตอร์กระแสสลับ เพราะให้แรงบิดมากแม้ในความเร็วรอบสูงให้กำลังมาก และมีโครงสร้างของมอเตอร์ที่เอื้อต่อการถ่ายเทความร้อนได้ดี จึงเหมาะสมกับการขับเคลื่อน ทั้งนี้มอเตอร์กระแสสลับยังทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระหว่างการเหยียบเบรกชะลอความเร็ว (regenerative braking) เพื่อแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของยานยนต์กลับเข้าไปยังแบตเตอรี่ได้อีกด้วย

2.4.1 ระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า

ปัจจุบันระบบขับเคลื่อนยานยนต์ด้วยการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าได้มีการเปลี่ยนแปลงระบบการขับเคลื่อนจากรูปแบบเดิมไปมากทั้งนี้จากระบบทางกล รวมไปถึงอุปกรณ์ส่งผ่านกำลัง ไปเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและไมโครคอมพิวเตอร์ เนื่องจากการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีการผลิต

สารกึ่งตัวนำและด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้รับการพัฒนาให้มีขีดความสามารถทั้งขนาด กำลัง ความเร็วในการสวิตช์ และมีความสะดวกในการใช้งานมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าจึงส่งผลให้การทำงานของระบบควบคุมมีประสิทธิภาพสูงขึ้น สำหรับส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสามารถแสดงได้ด้วยภาพประกอบ 4 [56] ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้ต่อไปนี้

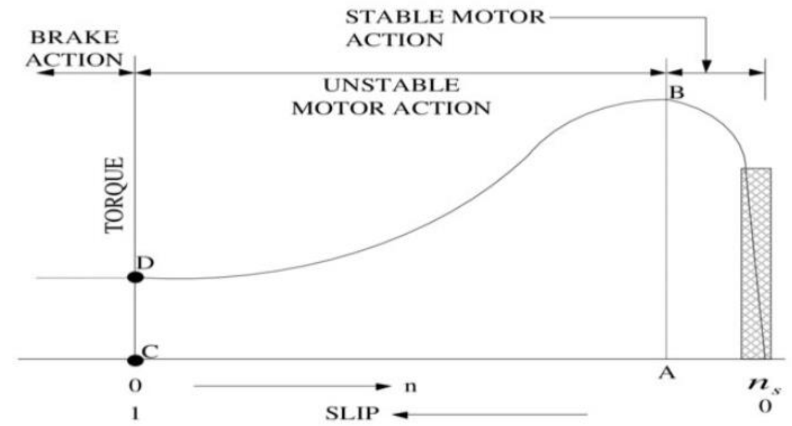


ภาพประกอบ 4 ส่วนประกอบของการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

1) มอเตอร์ขับเคลื่อน การเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้าจะต้องอาศัยแรงขับเคลื่อนที่ถ่ายทอดมาจากมอเตอร์ไฟฟ้าจนถึงล้อของยานยนต์ แรงขับเคลื่อนจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างยางกับผิวถนนซึ่งทำให้ยานยนต์เคลื่อนที่ไปได้ ชุดส่งกำลังขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้า หากพิจารณาประเภทของมอเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า พบว่ามีการใช้งานมอเตอร์ใน 2 รูปแบบ คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) และ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดและประเภทย่อยของมอเตอร์ทั้ง 2 ประเภท คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เป็นรูปแบบของมอเตอร์ที่มีความซับซ้อนในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าน้อย เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงสามารถรับไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่าย เช่น แบตเตอรี่ และสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องการระบบไฟฟ้ากำลังเพิ่มเติม ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับความนิยมนำมาใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าสามารถแบ่งเป็นประเภทย่อยได้อีก 2 ประเภท คือ มอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน และมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) มีโครงสร้างคล้ายกับมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน คือมีขดลวดเหนี่ยวนำอยู่บริเวณสเตเตอร์เพื่อรับพลังงานไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับแล้วแปลงเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนโรเตอร์นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ และ มอเตอร์กระแสสลับแบบ Synchronous ซึ่งงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมาเป็นชุดต้นกำลังในระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้า จึงได้กล่าวรายละเอียดเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม มอเตอร์เหนี่ยวนำถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในยานยนต์ไฟฟ้าเนื่องจากโครงสร้างส่วนประกอบมีความเรียบง่าย มีความทนทานสูงเมื่อเทียบกับมอเตอร์กระแสตรง มีความปลอดภัยเนื่องจากชุดควบคุมมอเตอร์มีหน้าที่เพียงสร้างกำลังขับ ดังนั้น หากชุดควบคุมมอเตอร์เสียมอเตอร์ก็จะหยุดการทำงานเท่านั้นโดยไม่มีแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานจ่ายไปยังมอเตอร์แต่อย่างใด นอกจากนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับขณะเบรก (Regenerative Braking) ได้โดยไม่ต้องการอุปกรณ์พิเศษเพิ่มเติม ซึ่งหากเป็นมอเตอร์กระแสตรงจะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์พิเศษ เพื่อสร้างพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับเพิ่มเติมความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอกในสภาวะที่ขับโหลดเต็มพิกัด ดังแสดงในภาพประกอบ 5 จะพบว่าแรงบิดในสภาวะปกติที่โหลดเต็มพิกัดคือ T และแรงบิดในสภาวะที่โรเตอร์หยุดนิ่งเท่ากับ 1.5 เท่าของแรงบิดเต็มพิกัด สำหรับแรงบิดเบรกดาวน์จะมีค่าประมาณ 2.5 เท่าของแรงบิดเต็มพิกัด [57]



ภาพประกอบ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ข้อดีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่นิยมนำมาใช้เป็นมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า นั้นใช้เงินลงทุนรวมในส่วนกำลังขับเคลื่อนต่อหน่วยและการบำรุงรักษาค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบมอเตอร์ชนิดอื่นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ก็สามารถทำได้ง่ายไม่ซับซ้อนมากนัก โดยสามารถต่อเข้ากับสายป้อนได้โดยตรง

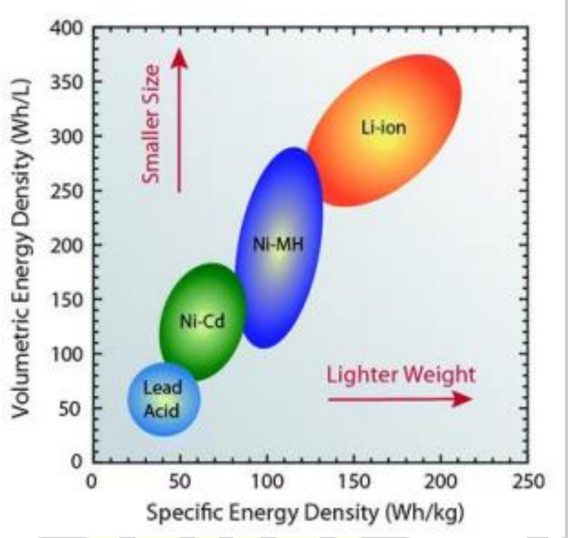
2) ชุดควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากมอเตอร์ที่เป็นอุปกรณ์หลักในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าแล้ว ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังถือเป็นอีกหนึ่งส่วนประกอบสำคัญที่ต้องทำงานผสานกับชุดมอเตอร์ขับเคลื่อน โดยชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังจะทำหน้าที่ปรับสภาวะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับการขับเคลื่อนของมอเตอร์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานระหว่างมอเตอร์ขับเคลื่อน และแบตเตอรี่ ซึ่งในการทำงานร่วมกับมอเตอร์นั้น ชุดควบคุมไฟฟ้ากาลังจะทำงานใน 4 รูปแบบหลัก (Four-Quadrant Operation) ประกอบด้วย การขับเคลื่อนเดินหน้า, การสร้างพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับ (Regenerative Braking) ขณะเดินหน้า, การขับเคลื่อนถอยหลัง และการสร้างพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับ (Regenerative Braking) ขณะถอยหลัง ซึ่งในการทำงานในแต่ละรูปแบบดังกล่าว ยังสามารถปรับแต่งรูปแบบการทำงานย่อยเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการขับขี่หรือการประหยัดพลังงานได้อีก

จากที่กล่าวมาข้างต้น การทำงานของชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ย่อยต่างๆ ประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์และคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้ IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ PWM (Pulse width modulation) ซึ่งหมายถึง การแปรความกว้างของพัลส์ที่ใช้เปิด-ปิดทรานซิสเตอร์ เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับขับมอเตอร์ โดยจะใช้อินเวอร์เตอร์ 1 ชุด ขับมอเตอร์ 1 ตัว ซึ่งชุดอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อน (Cooling System) เพื่อระบายความร้อนออกจากตัวอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากในขณะที่จ่ายกระแส อินเวอร์เตอร์จะเกิดความร้อนสะสมสูงที่ชุด IGBT ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องระบายความร้อนออกจากอินเวอร์เตอร์เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้กันทั่วไปจะเป็นชนิดแหล่งจ่ายแรงดันหรือ Voltage-source inverter ซึ่งอินเวอร์เตอร์แบบนี้สามารถต่อชุดแบตเตอรี่เข้าทางขาเข้า (Input) ของอินเวอร์เตอร์ได้โดยตรง โดยทั่วไปวงจรกำลังจะประกอบขึ้นจากสวิตซ์กาลังชนิด IGBT เป็นหลัก อินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากชุดแบตเตอรี่ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่โดยทั่วไปมีรูปคลื่นเป็นแรงดัน PWM การควบคุมแรงดัน PWM ให้เหมาะสมกับมอเตอร์กระแสสลับนี้เป็นหน้าที่หลักของชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ (Inverter controller) ที่จะประมวลผลสัญญาณเข้าและสัญญาณป้อนกลับต่าง ๆ แล้วสั่งการทำงานวงจรกำลังผ่านทางวงจรขับ IGBT (IGBT driver) ในอินเวอร์เตอร์พิกัดกำลังค่อนข้างสูงที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้านั้น มักจะมีวงจรป้องกันในตัวเองเพื่อไม่ให้สวิตซ์กำลังเกิดความเสียหายโดยง่าย อินเวอร์เตอร์ที่มีสมรรถนะสูง ๆ นั้น โดยทั่วไปใช้หลักการควบคุมแบบเวคเตอร์ (Vector control) เพื่อให้สมรรถนะไดนามิกส์ที่ดี หลักการสำคัญของการควบคุมแบบเวคเตอร์คือการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้ตามต้องการ ซึ่งเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้กับการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า คำสั่งสัญญาณเข้าสำคัญที่จะต้องกล่าวถึงคือ ความต้องการกำลัง (Power request) และ

ความต้องการเบรก (Brake request) ซึ่งสัญญาณนี้อาจส่งมาจาก คันเร่งหรือคันเบรกโดยตรง ซึ่งเหมาะสมกับระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่ไม่ซับซ้อน หรืออาจได้รับจากการสื่อสารผ่านระบบ CAN bus แม้ว่าโครงข่าย CAN bus โดยทั่วไปจะเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญในระบบยานยนต์ไฟฟ้า แต่คาสั่งเร่งและเบรก มักจะถูกส่งมาจากระบบควบคุมยานยนต์หลัก หรือ Supervisory control และชุด DC-DC Converter อุปกรณ์อีกชิ้นหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า คือ DC-DC Converter ซึ่งเป็นอุปกรณ์ปรับแรงดันของไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือต่ำลง โดยอุปกรณ์ดังกล่าวในยานยนต์ไฟฟ้าจะใช้เพื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่มีค่าต่ำให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นก่อนส่งต่อไปยังชุดควบคุมมอเตอร์ ซึ่ง Converter ที่ปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเรียกว่า Boost Converter ในขณะที่ Converter ที่ปรับแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลงเรียกว่า Step Down Converter หรือ Buck Converter

3) แบตเตอรี่สำหรับเก็บพลังงานไฟฟ้า แบตเตอรี่ (Battery) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าเพื่อเอาไว้ใช้งาน เนื่องมาจากแบตเตอรี่มีขนาดและคุณสมบัติที่หลากหลายสามารถเลือกใช้ได้ตามคุณสมบัติที่ต้องการนอกจากนี้แบตเตอรี่ยังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานได้สะดวกอีกด้วย ในปัจจุบันแบตเตอรี่ก็ยังมีการใช้งานอย่างแพร่หลายและยังเป็นที่ต้องการของตลาด หลักการทำงานของแบตเตอรี่นั้นจะเก็บรักษาพลังงานในรูปของพลังงานเคมี เมื่อนำไปใช้งานแบตเตอรี่จะคายพลังงานดังกล่าวเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลด โดยแบตเตอรี่จะทำการเปลี่ยนพลังงานที่เก็บรักษาในรูปของพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วนำไปใช้งาน ซึ่งในปัจจุบันแบตเตอรี่มีหลายชนิดหลายขนาดและมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้น การเลือกใช้แบตเตอรี่ต้องเลือกให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน และจำเป็นต้องรู้จักคุณสมบัติของแบตเตอรี่ในแต่ละชนิด แบตเตอรี่ที่ดีจะต้องออกแบบให้มีขนาดเล็ก มีอายุการใช้งานยาวนาน ความทนทานในการใช้งานตรงกับความต้องการของผู้ใช้ ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วผู้ผลิตสามารถผลิตได้ แต่ราคาของแบตเตอรี่จะแพงตามไปด้วยจึงไม่เหมาะสมกับผู้ใช้ทั่วไป ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ (Primary Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถใช้งานได้ครั้งเดียว เมื่อจ่ายไฟหมดแล้วไม่สามารถนำมาอัดประจุกลับเข้าไปใหม่ได้เนื่องจากไฟฟ้าที่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารเคมี เมื่อสารเคมีเปลี่ยนแปลงหมดพลังงานไฟฟ้าก็จะหมด แบตเตอรี่เหล่านี้เหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์ขนาดเล็กและสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก ใช้ไฟน้อยหรือในพื้นที่ที่ห่างไกลจากพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวอย่างของแบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ เช่น แบตเตอรี่ชนิดคาร์บอนสังกะสี แบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์ เป็นต้น ซึ่งแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ (Secondary Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้หลังจากจ่ายไฟหมดแล้ว เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ทำแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถทำให้กลับไปอยู่ในสภาพเดิมได้โดยการอัดประจุกลับเข้าไปใหม่ทำให้สามารถใช้งานได้นาน ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาแพงกว่าแบตเตอรี่ชนิดปฐมภูมิ ตัวอย่างของแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ เช่น แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออนโพลิเมอร์ เป็นต้น

ในปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยทั่วไปจะแบ่งตามวัสดุที่ใช้ทำ ขั้วบวก ส่วนขั้วลบ ทำมาจากแกรไฟต์เป็นหลัก ทั้งนี้แบตเตอรี่ประเภท LTO (Lithium Titanate) มีความแตกต่าง ออกไปก็คือ มีขั้วลบเป็นลิเทียมไททาเนต แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละประเภทมีสมบัติแตกต่างกัน จึงเหมาะสม ต่อการใช้งานที่แตกต่างกันไปด้วย สำหรับการใช้งานเพื่อเป็น Traction Battery แล้วคุณสมบัติที่ควรคำนึงถึงความจุพลังงานไฟฟ้าต่อน้ำหนัก รวมไปถึงความจุพลังงานไฟฟ้าต่อขนาดของแบตเตอรี่ ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองมีผลโดยต่อการนำไปใช้ติดตั้งบนรถยนต์ ภาพประกอบ 6 แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติและคุณลักษณะของแบตเตอรี่ จากภาพจะเห็นได้ว่าแบตเตอรี่ในกลุ่ม Li-ion สามารถบรรจุพลังงานไฟฟ้าได้มาก โดยที่ยังรักษาขนาดให้เล็กและยังมีน้ำหนักเบา ในทางกลับกัน แบตเตอรี่ Lead Acid มีต้องใช้แบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักที่มากที่สุด แต่ก็ยังมีความสามารถในการบรรจุพลังงานได้น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ประเภทอื่น [58]



ภาพประกอบ 6 คุณสมบัติและคุณลักษณะของแบตเตอรี่

2.4.2 ระบบการจัดเก็บและจ่ายพลังงาน

ระบบสะสมพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งติดตั้งอยู่ภายในยานยนต์ร่วมกับระบบประจุพลังงานไฟฟ้า เพื่อประจุไฟฟ้าจากโครงข่ายไฟฟ้ากำลัง สำหรับแบตเตอรี่จะสะสมพลังงานในรูปพลังงานเคมี แล้วแปลงไปสู่พลังงานไฟฟ้าสำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนต่อไป ซึ่งระบบสะสมพลังงานต้องรองรับการจ่ายคืนพลังงานจากการเบรก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นประสิทธิภาพของยานยนต์ไฟฟ้าจึงขึ้นอยู่กับการจัดการของระบบสะสมพลังงาน ในงานวิจัยนี้เรามุ่งศึกษาเฉพาะการสร้างพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับในขณะเบรกเท่านั้น

กำลังไฟฟ้าจำเพาะและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Specific power and power density) กำลังไฟฟ้าจำเพาะหมายความว่า ปริมาณของกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่สามารถจ่ายได้ต่อน้ำหนักของแบตเตอรี่ในหน่วยกิโลกรัม ค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ซึ่งขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จากให้กับโหลด หน่วย SI ของกำลังไฟฟ้าจำเพาะคือ วัตต์ต่อกิโลกรัม หรือ W/kg ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะก็คือความสามารถของแบตเตอรี่ที่จะจ่ายพลังงานให้กับโหลดนั่นเอง การที่มีค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะสูงก็เป็นการบ่งชี้ว่า แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว ส่วนความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า หรือกำลังไฟฟ้าต่อปริมาตร ถ้าหากแบตเตอรี่มีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่อปริมาตร แต่มีค่ากาลังไฟฟ้าจำเพาะต่ำก็หมายความว่าแบตเตอรี่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มาก แต่มีความสามารถจ่ายพลังงานออกได้ช้า [59]

ตาราง 4 ค่าพลังงานจำเพาะของแหล่งพลังงานหลายชนิด

แหล่งพลังงาน	พลังงานจำเพาะ (Wh/kg)
น้ำมันเชื้อเพลิง	12,500
แก๊สธรรมชาติ	9,350
เมทานอล (Methanol)	6,050
ไฮโดรเจน	33,00
ถ่านหิน	8,200
แบตเตอรี่ตะกั่ว กรด	35
แบตเตอรี่นิเกิล แคดเมียม ไฮดราย	50
แบตเตอรี่ลิเทียม โพลิเมอร์ (Li-P)	200
แบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน (Li-I)	120
ล้อตุนกำลัง (Flywheel)	30
ตัวเก็บประจุยิ่งยวด	3.3

ประสิทธิภาพแอมแปร์ชั่วโมง คืออัตราส่วนระหว่างประจุไฟฟ้าที่ไหลออกระหว่างจ่ายโหลดของแบตเตอรี่ และประจุไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการทำให้แบตเตอรี่มีระดับประจุไฟฟ้ากลับมาเท่ากับประจุไฟฟ้าในช่วงเวลาก่อนการคายประจุ ในทางปฏิบัติทั้ง 2 ค่า จะมีค่าที่ไม่เท่ากันโดยปกติแล้วค่าดังกล่าวจะอยู่ในช่วงร้อยละ 65 - 90 ค่าประสิทธิภาพดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแบตเตอรี่ อุณหภูมิ และอัตราการประจุไฟฟ้า

ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ค่าดังกล่าวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงานของแบตเตอรี่ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยแบตเตอรี่หารด้วยจำนวนพลังงานที่แบตเตอรี่ต้องการเพื่อที่จะให้มีค่า SOC เท่ากับแบตเตอรี่ขณะก่อนการจ่ายโหลด โดยปกติแล้วค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงร้อยละ 55 - 95 จำนวนของดีพไซเคิล (Deep cycle) และวงจรชีวิต (Cycle life) ของแบตเตอรี่ ซึ่งแบตเตอรี่ที่ใช้กับยานยนต์ไฟฟ้ามีค่าดีพไซเคิล หรือค่าความสามารถการใช้ประจุไฟฟ้าที่เก็บไว้ของแบตเตอรี่ จะมีค่าไม่สูงมากโดยประมาณอยู่ที่ 600 ดีพไซเคิล ที่ร้อยละ 80 DOD ของแบตเตอรี่ ดังนั้นกลยุทธ์ของการควบคุมจะต้องพยายามลดจำนวนครั้งของการคายประจุของแบตเตอรี่ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการใช้งาน

นอกจากคุณลักษณะด้านแรงบิดและกำลังที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าแล้ว มอเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจะต้องมีคุณลักษณะอื่นๆ เพื่อความเหมาะในการใช้งาน เช่น สามารถสร้างกระแสไฟฟ้าย้อนกลับขณะเบรก (Regenerative Braking) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งมีความทนทานต่อการใช้งานในสภาวะต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสภาวะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การสั่นสะเทือนการสัมผัสกับน้ำและความชื้น และการขาดการบำรุงรักษา ซึ่งสภาวะการใช้งานดังกล่าวแตกต่างจากการใช้งานของมอเตอร์สำหรับอุตสาหกรรมทั่วไป

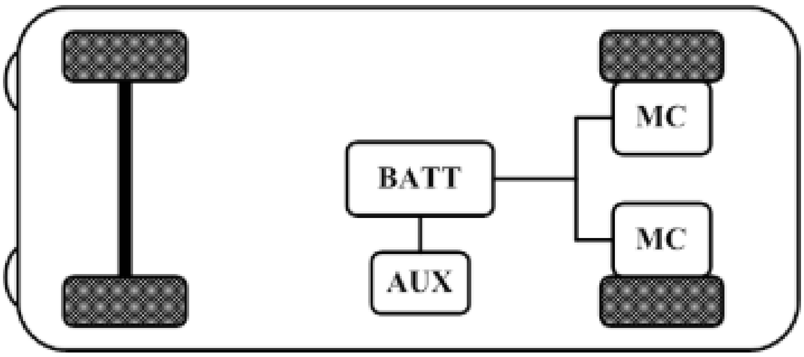
2.4.3 ระบบเสริมการควบคุมการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้า

ระบบเสริมการควบคุมการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้าเป็นส่วนที่สำคัญไม่น้อยกว่าระบบขับเคลื่อน ซึ่งระบบการจัดการพลังงานจะเป็นส่วนที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เพราะจะต้องมีการจัดการพลังงานอย่างรวดเร็ว และต้องเชื่อมต่อกับระบบอื่น ๆ บนยานพาหนะ เช่น ระบบจัดการระบบขับเคลื่อน ระบบปรับอากาศ ระบบสื่อสาร และระบบความปลอดภัย (Safety systems) ด้วยเหตุนี้ระบบการจัดการพลังงานจึงมีความแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน และเส้นทางการขับขี่ ดังนั้นการจะแก้ปัญหาดังกล่าวได้นั้นจำเป็นจะต้องมีระบบการจัดการพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าที่สามารถจ่ายโหลดได้เหมาะสม และเพียงพอ [60] ในขณะที่มีโหลดแต่ละประเภทที่มีลักษณะการทำงานทางไฟฟ้าต่างกัน การจัดการแบตเตอรี่ก็จะต้องแตกต่างกัน ซึ่งระบบการจัดการแบตเตอรี่จะต้องติดตามตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญระหว่าง การจ่ายโหลด (Discharging) และการประจุไฟฟ้า (Charging) ได้แก่ ค่าแรงดัน กระแส รวมถึงอุณหภูมิภายในและภายนอกของแบตเตอรี่ โดยปกติการทำการตรวจสอบมีจุดประสงค์เพื่อใช้สั่งการอุปกรณ์ป้องกัน การแจ้งเตือน (Alarms) การปลดแบตเตอรี่จากโหลด หรือปลดจากการประจุไฟฟ้า เมื่อค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังกล่าวถึงขีดจำกัด ในงานด้านไฟฟ้ากำลังจะใช้แบตเตอรี่ เพื่อสำรองกำลังไฟฟ้าที่ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลัง และระบบสื่อสาร

สำหรับเหตุการณ์การเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง ซึ่งระบบจัดการแบตเตอรี่จะต้องทำงานในสถานการณ์ดังกล่าว โดยระบบการจัดการแบตเตอรี่จะต้องรวบรวมการจัดการทุกอย่างไม่เพียงแต่การติดตามตรวจสอบ และป้องกันแบตเตอรี่เท่านั้น แต่รวมไปถึงการรักษาแบตเตอรี่ให้พร้อมจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างเต็มกำลัง โดยที่จะต้องรักษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะให้ยาวนานที่สุด อีกทั้งการความคุมระบบการประจุไฟฟ้า ไปจนถึงแผนการบำรุงรักษาแบตเตอรี่ การควบคุมแบตเตอรี่อย่างมีประสิทธิภาพ และปลอดภัย จึงจำเป็นจะต้องมีความเข้าใจในการทำงานของแบตเตอรี่ ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องมีการควบคุม และกระบวนการทางเคมี ทั้งคุณลักษณะที่ทำให้แบตเตอรี่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.5 ระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าแบบมอเตอร์คู่

การขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าแบบใช้มอเตอร์คู่ ได้ออกแบบระบบขับเคลื่อนโดยมีต้นแบบ [61] ซึ่งภายภายใต้สภาวะไร้โหลดมอเตอร์ตัวที่หนึ่งจะทำงาน แต่เมื่อมีสภาวะโหลดเพิ่มขึ้น มอเตอร์ทั้งสองตัวจะทำงานพร้อมกัน ได้ออกแบบโครงสร้างของระบบระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ โครงสร้างแสดงดังภาพประกอบ 7 ประกอบด้วยมอเตอร์ ขนาด 746 วัตต์ จำนวน 2 ตัว กำลังงานโดยรวมเท่ากับ 1.5 กิโลวัตต์ ขนาดโครงสร้าง กว้าง 0.5 เมตร ยาว 1 เมตร จากการออกแบบได้ดำเนินการจัดสร้างชุดทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ในการควบคุมจะต้องควบคุมให้มอเตอร์ทั้งสองตัวให้ทำงานพร้อมกันในสภาวะ เมื่อมีการปรับความเร็วหรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลดในสภาวะต่างๆ เพื่อควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ ให้มีเสถียรภาพและสมรรถนะที่ดี [62]



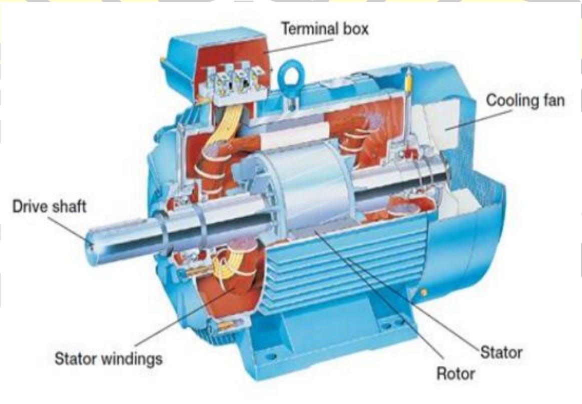
ภาพประกอบ 7 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่

2.6 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า

มอเตอร์เหนี่ยวนำนับเป็นเครื่องต้นกำลังที่มีความสำคัญมากในระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวว่า เครื่องต้นกำลังในยานยนต์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle: BEV) ส่วนใหญ่แล้วเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ และใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าร้อยละ 90 ของที่ใช้สำหรับเครื่องต้นกำลัง เนื่องจากคุณสมบัติที่ดี เช่น โครงสร้างแข็งแรง ทนทาน และบำรุงรักษาง่าย การเริ่มเดินไม่ยุ่งยาก การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าน้อยและมีราคาถูก มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส สามารถกำหนดทิศทางการหมุนได้ เลือกวิธีการควบคุมความเร็วรอบ กำหนดวิธีการต่อขั้วมอเตอร์ กำหนดขนาดสาย อุปกรณ์ป้องกัน รวมถึงการศึกษาโครงสร้าง ส่วนประกอบ สนามแม่เหล็กหมุนและหลักการหมุนด้วยการเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นพื้นฐานของเรื่องสำคัญอื่น ๆ ที่ต่อเนื่องกัน เช่น ความเร็วสลิปและแรงบิด การควบคุมความเร็วแบบต่าง ๆ ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า และรวมไปถึงระบบการผลิตกำลังงานป้อนกลับได้อีกด้วย [63]

2.6.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอรเหนี่ยวนำสามเฟส (3–phase induction motor) ประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ สเตเตอร (stator) และโรเตอร (rotor) โดยสเตเตอรเป็นโครงสร้างในส่วนที่อยู่กับที่ และโรเตอร์นั้นเป็นส่วนที่หมุนเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนโหลด ซึ่งโดยทั่วไปโรเตอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ โรเตอรแบบกรงกระรอก (squirrel cage rotor) และโรเตอรแบบขดลวด (wound rotor) ซึ่งออกแบบมาให้สามารถควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบได้ ดังในภาพประกอบ 8 แสดงโครงสร้างของมอเตอรเหนี่ยวนำ แต่ละส่วนถูกผ่าให้เห็นภายในเด่นชัดในตำแหน่งที่ถูกต้อง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิจัยและทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำมาใช้ในชุดต้นกำลังของยานยนต์ไฟฟ้าต่อไป [64]



ภาพประกอบ 8 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

2.6.2 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเหมือนกับของหม้อแปลงไฟฟ้า กล่าวคือ แบ่งเป็นสองส่วน ได้แก่ ขดลวดทางด้านปฐมภูมิหรือสเตเตอร์ และขดลวดทางด้านทุติยภูมิหรือโรเตอร์ โดยที่สเตเตอร์และโรเตอร์จะถูกแยกออกจากกันเป็นอิสระ กระแสที่เกิดขึ้นในโรเตอร์จะเกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ ดังนั้นพลังงานจะถูกส่งผ่านจากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ในทำนองเดียวกันกับการส่งผ่านพลังงานจากขดลวดปฐมภูมิไปยังทุติยภูมิของหม้อแปลง แต่ต่างกันตรงที่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเคลื่อนที่หรือหมุนได้นั่นเอง

สเตเตอร์ของมอเตอร์จะถูกจ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง เรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (*Synchronous speed*, n_{sync}) เมื่อโรเตอร์ถูกวางอยู่ในสนามแม่เหล็กหมุน เส้นแรงแม่เหล็กจะพุ่งตัดผ่านตัวนำของโรเตอร์และกำเนิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น ที่สภาวะไม่ต่อโหลด โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับสนามแม่เหล็ก และมีกระแสถูกเหนี่ยวนำในตัวนำน้อยมาก แต่เมื่อมอเตอร์ถูกต่อโหลดโรเตอร์จะหมุนช้ากว่าความเร็วของสนามแม่เหล็ก และกระแสจำนวนมากจะถูกเหนี่ยวนำในตัวนำโรเตอร์ [65] มีหลักการทำงานดังนี้

1) แรงบิดเหนี่ยวนำในมอเตอร์เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กหมุน (*rotation magnetic field*, B_S) เกิดจากการป้อนไฟสลับสามเฟสให้กับขดลวดสามเฟสที่พันอยู่ในร่องของสเตเตอร์ โดยที่กระแสแต่ละเฟสจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของแหล่งจ่าย จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กคล้ายกับเกิดการหมุนของสนามแม่เหล็กดังภาพประกอบ 9 (ก) สนามแม่เหล็กหมุน (B_S) ที่เกิดขึ้นนี้จะมีความเร็วคงที่เรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (n_{sync}) มีค่าเท่ากับ

$$n_{sync} = \frac{120 f_e}{P} \tag{2.11}$$

โดยที่ f_e คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ (Hz) และ P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์

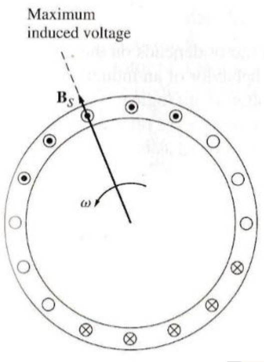
พิจารณาภาพประกอบ 9 (ข) จะเห็นว่าสนามแม่เหล็กหมุน (B_S) ที่สเตเตอร์จะพุ่งตัดผ่านขดลวดตัวนำในโรเตอร์ ซึ่งเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ (e_{ind}) ขึ้นในโรเตอร์มีค่าเท่ากับ

$$e_{\text{ind}} = (v \times B).l \tag{2.12}$$

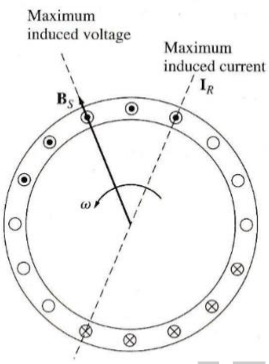
เมื่อ v คือ ความเร็วของลูปขดลวด

l คือ ความยาวของลวดตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก

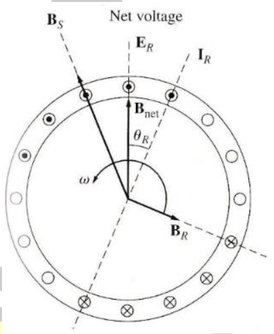
B คือ เวกเตอร์ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก



(ก) สนามแม่เหล็กหมุน(B_S) เหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในโรเตอร์



(ข) แรงดันเหนี่ยวที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดกระแส (I_R) ไหลในโรเตอร์



(ค) ผลการไหลของกระแส I_R จะทำให้สนามแม่เหล็กโรเตอร์ (B_R) เกิดขึ้น

ภาพประกอบ 9 การเกิดแรงบิดเหนี่ยวนำในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ผลการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำ e_{ind} ขึ้นในตัวโรเตอร์นี้ จะทำให้เกิดกระแส (I_R) ไหลขึ้นภายในขดลวดตัวนำของโรเตอร์ดังรูป กระแส I_R จะมีเฟสล้าหลังแรงดันเหนี่ยวนำ e_{ind} เนื่องจากวงจรสมมูลของโรเตอร์เป็นแบบ R_L

การไหลของกระแส IR จะสร้างสนามแม่เหล็กโรเตอร์ (rotor magnetic field, B_R) ขึ้นซึ่งมีเฟสล้าหลัง I_R อยู่ 90° ดังภาพประกอบ 9 (ค) ทำให้เกิดแรงบิดเหนี่ยวนำ (induced torque, τ_{ind})

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_S \qquad (2.13)$$

เมื่อทำการป้อนไฟฟ้าสามเฟสให้กับขดลวดสเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่สเตเตอร์ ซึ่งเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (n_{sync}) สนามแม่เหล็กหมุนนี้จะไปเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสขึ้นที่ตัวโรเตอร์ และสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์จะดึงดูด

ให้สนามแม่เหล็กจากโรเตอร์หมุนตามไปด้วย นั่นก็คือ ทำให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว n_m ไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์ (n_{sync}) ซึ่งความเร็วของโรเตอร์นี้จะมีความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเสมอ $(n_m < n_{sync})$

ถ้าหากโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส จะไม่เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในลวดตัวนำของโรเตอร์ $(e_{ind} = 0)$ ซึ่งส่งผลให้ไม่มีกระแสไหลในโรเตอร์ $(I_R = 0)$ และไม่เกิดแรงบิดเหนี่ยวนำขึ้นที่ตัวโรเตอร์อีกด้วย $(\tau_{ind} = 0)$ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ความเร็วของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำต้องมีค่าต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเสมอ $(n_m < n_{sync})$

2) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์และสลิป จะเห็นได้ว่า e_{ind} เกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเท่านั้น ซึ่งผลต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัส (n_{sync}) กับความเร็วโรเตอร์ (n_m) นี้ถูกนิยามว่า ความเร็วสลิป (slip speed, n_{slip}) หรือกล่าวได้ว่า

$$n_{slip} = n_{sync} - n_m \tag{2.14}$$

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่าง n_m กับ n_{sync} สามารถนิยามในรูปของ สลิป (*slip, s*) ได้ดังนี้

$$s = \frac{n_{slip}}{n_{sync}} \times 100\% \tag{2.15}$$

หรือ

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \times 100\% \tag{2.16}$$

หรือแสดงในรูปความเร็วเชิงมุม ω (radians per second, rps)

$$s = \frac{\omega_{sync} - \omega_m}{\omega_{sync}} \times 100\% \tag{2.17}$$

นอกจากนี้จากสมการ 2.10 และสมการ 2.11 ยังสามารถแสดงความเร็วของโรเตอร์ในรูปของความเร็วซิงโครนัสและสลิปได้ดังนี้

$$n_m = (1 - s)n_{sync} \tag{2.18}$$

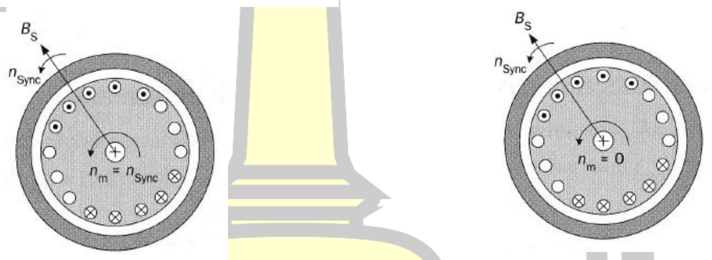
และ

$$\omega_m = (1-s)\,\omega_{sync} \tag{2.19}$$

จากสมการดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปคุณสมบัติความเร็วโรเตอร์ได้เป็น เมื่อ $s=1$ จะได้ $n_m = 0$ และเมื่อ $s=0$ จะได้ $n_m = n_{sync}$

3) ความถี่โรเตอร์ ถ้าโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส $\left(n_m = n_{sync}\right)$ สภาวะเช่นนี้จะไม่เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสขึ้นในโรเตอร์ (ขณะนี้ $s=0$) ดังนั้น ความถี่โรเตอร์จะเป็นศูนย์ ($f_r = 0$) ดังแสดงในภาพประกอบ 10 (ก) แต่ถ้ามอเตอร์หยุดนิ่งอยู่กับที่ $s=1$ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและมีความถี่โรเตอร์เท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ($f_r = f_e$) ดังภาพประกอบ 10 (ข)

โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส โรเตอร์หยุดนิ่ง



(ก) เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส ($s=0 \rightarrow f_r = 0$)

(ข) เมื่อโรเตอร์หยุดนิ่ง ($s=1 \rightarrow f_r = f_e$)

ภาพประกอบ 10 แสดงความถี่โรเตอร์

จากสมการ 2.19 เมื่อสลิปของโรเตอร์ถูกนิยามโดย

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \tag{2.20}$$

ดังนั้น ความถี่โรเตอร์ จึงเขียนอธิบายได้เป็น

$$f_r = s f_e \tag{2.21}$$

หรือจากสมการ 2.20 และสมการ 2.21 สามารถทำให้ได้

$$f_r = \left(\frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}}\right) f_e \quad (2.22)$$

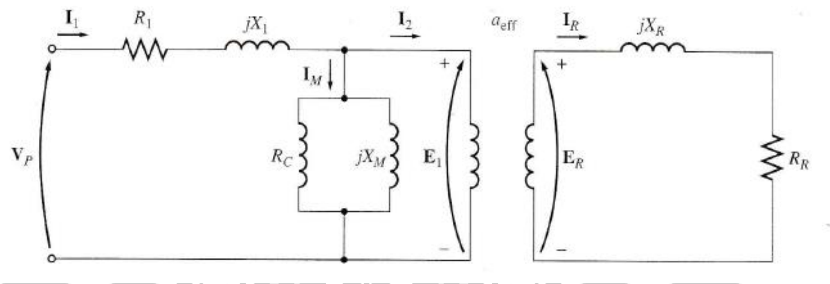
แทนค่า n_{sync} จากสมการ 2.22 จะได้

$$f_r = \left(\frac{P}{120}\right)\left(n_{sync} - n_m\right) \quad (2.23)$$

2.6.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ขึ้นอยู่กับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน และจำนวนรอบของขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งคล้ายกับความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ เมื่อบังคับให้โรเตอร์หยุดนิ่งอยู่กับที่ค่าความเร็วโรเตอร์จะเป็นศูนย์ ความถี่ของโรเตอร์เท่ากับความถี่ของแรงดันในสเตเตอร์ ดังนั้นสลิปจึงมีค่าเท่ากับหนึ่ง (s=1) และเมื่อโรเตอร์เริ่มหมุนค่าสลิปจะลดลง เมื่อพิจารณาผลของความเร็วโรเตอร์ที่มีต่อแรงดันเหนี่ยวนำและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดโรเตอร์ดังนี้

1) ขนาดของ E_R และ F_r จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสลิป s
2) ค่าสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อโรเตอร์หยุดนิ่ง (locked-rotor) หรือนั่นคือ เมื่อ s=1
3) ค่าต่ำสุดเกิดขึ้นเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส หรือเมื่อ s=0



ภาพประกอบ 11 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วที่ค่าสลิปใด ๆ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความถี่โรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าสลิปนั้น และมีค่าดังต่อไปนี้

$$E_R = sE_{R0} \quad (2.24)$$

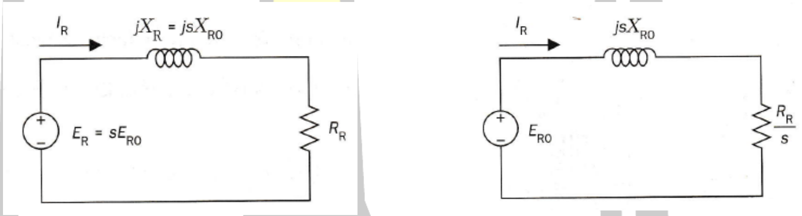
และ

$$f_r = sf_e \tag{2.25}$$

เมื่อ E_{R0} คือ แรงดันเหนี่ยวนำขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่ง และในทำนองเดียวกัน ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์ (L_R) ซึ่งทำให้เกิดค่ารีแอคแตนซ์รั่วซึมของขดลวดโรเตอร์ เท่ากับ
$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R$ ดังนั้น แทนค่า f_r จากสมการ 2.25 จะได้

$$X_{R0} = 2\pi s f_e L_{R0} \tag{2.26}$$

เมื่อ X_{R0} คือรีแอคแตนซ์ขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่ง ดังนั้น จากสมการ 2.25 และสมการ 2.26 จึงสามารถเขียนอธิบายวงจรสมมูลโรเตอร์ได้ดังภาพประกอบ 12 (ก)



(ก) (ข)

ภาพประกอบ 12 วงจรสมมูลของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลของโรเตอร์ในภาพประกอบ 12 (ก) ทำให้ได้กระแสที่ไหลในวงจรโรเตอร์ มีค่าเท่ากับ

$$I_R = \frac{sE_{R0}}{R_R + jX_R} \tag{2.27}$$

$$I_R = \left[\frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \right] = \frac{E_{R0}}{Z_{R,eq}} \tag{2.28}$$

โดยที่ $Z_{R,eq}$ คือ อิมพีแดนซ์สมมูลของโรเตอร์ (equivalent rotor impedance) ดังนั้น จากสมการ 2.28 ทำให้สามารถเขียนวงจรสมมูลของโรเตอร์ได้อีกรูปแบบหนึ่งดังภาพประกอบ 12 (ข)

วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การหาวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เริ่มต้นจากวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นหลัก ดังนั้น หากอาศัยระหว่างคุณสมบัติแรงดันกับกระแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ดังนี้

$$V_P = V_S' = aV_S \tag{2.29}$$

$$I_P = I_S' = \frac{I_S}{a} \tag{2.30}$$

และ

$$Z_S{}' = a^2 Z_S \tag{2.31}$$

ได้ความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังภาพประกอบ 13 เป็นดังนี้

$$E_1 = E_R{}' = a_{eff} E_{R0} \tag{2.32}$$

กระแสโรเตอร์เท่ากับ

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}} \tag{2.33}$$

และอิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์ มีค่าเท่ากับ

$$Z_2 = a_{eff}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \tag{2.34}$$

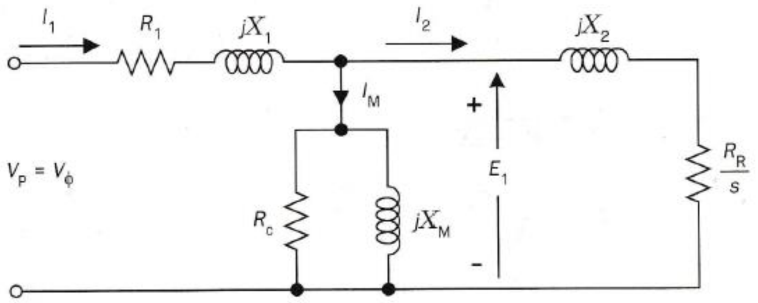
โดยที่

$$R_2 = a_{eff}^2 R_R \tag{2.35}$$

และ

$$X_2 = a_{eff}^2 X_{R0} \tag{2.36}$$

ซึ่งทำให้ได้วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังภาพประกอบ 13



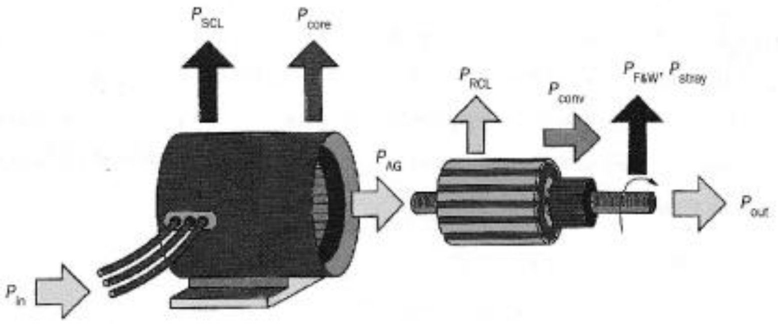
ภาพประกอบ 13 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์สำหรับการโอนย้ายไปทางด้านสเตเตอร์

2.6.4 กำลังและแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

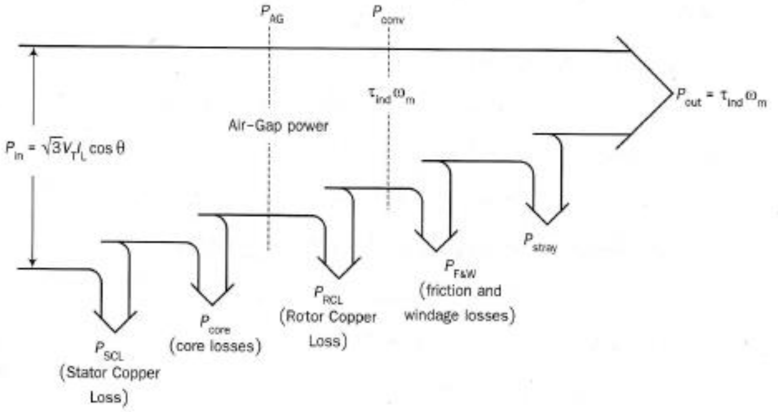
การเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถเกิดขึ้นได้ที่โรเตอร์ในมอเตอร์ กำลังอินพุตของโรเตอร์ไม่ได้เกิดจากการจ่ายไฟฟ้าให้กับโรเตอร์โดยตรง แต่เป็นการถ่ายทอดกำลังผ่านทางช่องว่างอากาศ (air gap) ด้วยการเหนี่ยวนำ ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าและความถี่เกิดขึ้นในโรเตอร์ ซึ่งค่าของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟส ก็คือ $E_R = sE_{R0}$ ถ้านำแรงดันส่วนนี้หารด้วยค่าอิมพีแดนซ์ต่อเฟสที่โรเตอร์ (Z_R) ก็จะได้ค่ากระแสโรเตอร์ต่อเฟส (I_R) ที่ไหลในโรเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานอยู่ที่ค่าสลิป

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส การส่งผ่านของกำลังไฟฟ้าอินพุตจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังเพลาของมอเตอร์นั้นเป็นไปตามลำดับการไหลของกำลังงาน ดังภาพประกอบ 13 กำลังงานอินพุตคือกำลังงานไฟฟ้าอินพุต (P_{in}) ที่มอเตอร์ได้รับจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสผ่านขดลวดสเตเตอร์ โดยที่สเตเตอร์จะมีการสูญเสียสองส่วนคือ กำลังสูญเสียของขดลวดสเตเตอร์ (Stator Copper Loss, P_{SCL}) และกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของสเตเตอร์ (Core losses, P_{core}) กำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือออกมาคือกำลังที่ส่งผ่านช่องอากาศมายังโรเตอร์ (Air-Gap power, P_{AG}) เพื่อเปลี่ยนให้เป็นกำลังงานทางกลที่โรเตอร์

อย่างไรก็ตาม กำลังงานที่ส่งผ่านมายังโรเตอร์จะเกิดการสูญเสียจากขดลวดของโรเตอร์ (Rotor Copper Loss, P_{RCL}) ดังนั้น กำลังทางกลที่ได้จากโรเตอร์ (conversion mechanical power, P_{conv}) จึงเป็นผลต่างระหว่าง P_{AG} กับ P_{RCL} ($P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL}$)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 14 แผนภาพการไหลของกำลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

กำลังงานทางกลส่วนที่เหลือเมื่อหักกำลังสูญเสียทางกลต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย กำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านจากลม (friction and windage losses, $P_{F\&W}$) และกำลังสูญเสียแฝง (stray losses, P_{stray}) ก็จะกลายเป็นกำลังงานทางกลเอาต์พุตที่เพลาของโรเตอร์ (P_{out}) ที่นำไปขับโหลดทางกล จากแผนภาพการไหลของกำลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพและแรงบิดที่เกิดขึ้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้

กำลังและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในภาพประกอบ 14 สามารถหากระแสอินพุตต่อเฟส (I_1) ทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้จากสมการ 2.37

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{eq}} \tag{2.37}$$

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \left[\frac{1}{G_C - jB_M + \left(\frac{1}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \right)} \right] \tag{2.38}$$

ดังนั้น กำลังสูญเสียของขดลวดสเตเตอร์ (P_{SCL}) และกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{core}) จึงสามารถคำนวณได้จาก

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \tag{2.39}$$

และ

$$P_{core} = 3E_1^2 G_C = \frac{3E_1^2}{R_C} \tag{2.40}$$

ทำให้กำลังที่ส่งผ่านช่องอากาศมายังโรเตอร์ (P_{AG}) สามารถคำนวณได้จาก

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core} \tag{2.41}$$

หรือสามารถคำนวณได้จากการพิจารณาวงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ ดังนี้

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \tag{2.42}$$

สำหรับกำลังสูญเสียของขดลวดโรเตอร์ (P_{RCL}) หาได้จาก

$$P_{RCL} = 3I_2^2 R_R \tag{2.43}$$

หรือ

$$P_{RCL} = 3I_2^2 R_2 \tag{2.44}$$

หลังจากคำนึงถึงกำลังสูญเสียของขดลวดโรเตอร์ $\left(P_{RCL}\right)$ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก $\left(P_{core}\right)$ และกำลังสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ $\left(P_{RCL}\right)$ โดยลบออกจากกำลังไฟฟ้าอินพุตของมอเตอร์แล้ว กำลังส่วนที่เหลือจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกำลังทางกล $\left(P_{conv}\right)$ หรือเขียนอธิบายได้เป็น

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} = 3I_2^2\frac{R_2}{s} - 3I_2^2R_2 = 3I_2^2R_2\left(\frac{1-s}{s}\right) \qquad (2.45)$$

นอกจากนี้ หากพิจารณาสมการ 2.44 กับสมการ 2.45 จะพบความสัมพันธ์ว่า

$$P_{RCL} = sP_{AG} \qquad (2.46)$$

ดังนั้น เมื่อแทนสมการ 2.45 ลงในสมการ 2.46 จะได้

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} = P_{AG} - sP_{AG} = (1-s)P_{AG} \qquad (2.47)$$

กำลังทางกลเอาต์พุต $\left(P_{out}\right)$ ที่นำไปขับโหลดนั้น จะเหลือจากหักกำลังสูญเสียทางกลซึ่งประกอบด้วย กำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานและแรงต้านจากลม $\left(P_{F\&W}\right)$ และกำลังสูญเสียแฝง $\left(P_{stray}\right)$ หรือนั่นก็คือ

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{stray} \qquad (2.48)$$

แรงบิดที่เหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ มีค่าเท่ากับ

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \qquad (2.49)$$

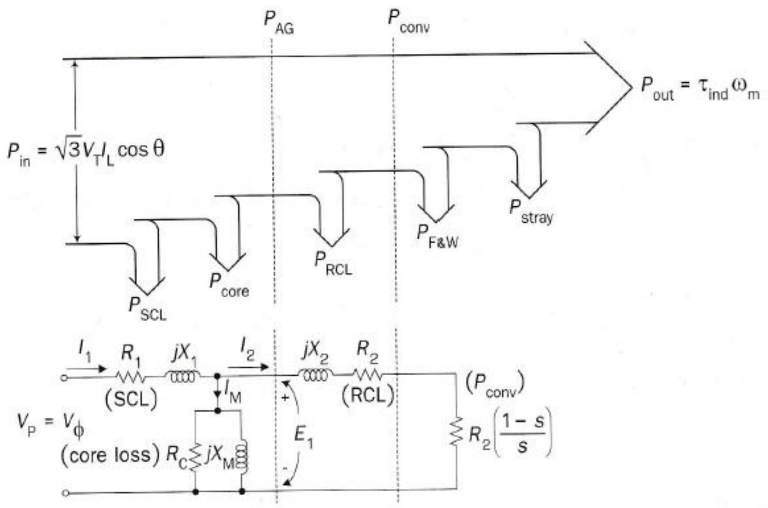
เมื่อแทนค่า P_{conv} จากสมการ 2.47 และ ω_m จากสมการ 2.48 ลงในสมการ 2.49 ทำให้เราได้

$$\tau_{ind} = \frac{(1-s)P_{AG}}{(1-s)\omega_{sync}} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} \qquad (2.50)$$

เมื่อพิจารณาสมการ 2.45 จะเห็นว่าเป็นสมการที่แสดงกำลังที่ส่งผ่านช่องอากาศมายังโรเตอร์ (P_{AG}) ซึ่งอยู่ในรูปกำลังงานที่เกิดขึ้นที่ตัวต้านทาน R_2/s ในขณะที่สมการ 2.50 นั้นแสดงกำลังสูญเสียทั้งหมดของขดลวดโรเตอร์ (P_{RCL}) ซึ่งอยู่ในรูปกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวต้านทาน R_2 และผลต่างระหว่าง P_{AG} กับ P_{RCL} นั่นก็คือ P_{conv} ดังแสดงไว้ในสมการ 2.51 ดังนั้น หมายความว่า กำลังสูญเสียในส่วนนี้เกิดขึ้นที่ตัวต้านทานที่มีค่าเท่ากับ

$$R_{conv} = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2\left(\frac{1-s}{s}\right) \qquad (2.51)$$

และเมื่อเรานำเอาความสัมพันธ์ของกำลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ไปเขียนเป็นวงจรสมมูลต่อเฟส ก็จะได้ดังภาพประกอบ 15

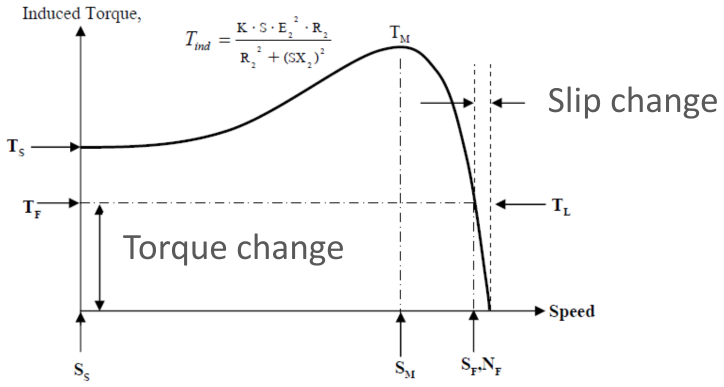


ภาพประกอบ 15 วงจรสมมูลต่อเฟสแสดงกำลังงานที่เกิดขึ้นภายในแต่ละส่วนของมอเตอร์

2.6.5 คุณลักษณะของแรงบิดและความเร็วรอบ

แรงบิดที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับสลิป ดังภาพประกอบ 16 ซึ่งจากภาพแรงบิดที่ควรพิจารณา มี 3 ช่วงขณะ ตามค่าสลิป 3 ตำแหน่ง ดังนี้ ตำแหน่งที่ 1 แรงบิดพิกัด (rated torque, T_F) เป็นแรงบิดขณะมอเตอร์ขับโหลดเต็มพิกัด ที่ค่าสลิปหรือ ความเร็วพิกัด ตำแหน่งที่ 2 แรงบิดขณะสตาร์ท (starting torque, T_S) เกิดขึ้นขณะมอเตอร์กำลังเริ่มเดิน (starting) ที่ค่าสลิปเท่ากับ 1 มอเตอร์ที่ใช้งานโดยทั่วไปจะมีแรงบิดขณะสตาร์ทประมาณ 1.5 เท่าของแรงบิดพิกัดและตำแหน่งที่ 3 แรงบิดสูงสุด (maximum torque, T_M) เป็นค่า

แรงบิดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้สูงสุด หากแรงบิดของโหลดสูงกว่าแรงบิด ณ จุดนี้ จะทำให้มอเตอร์หยุดหมุน จึงเรียกแรงบิดนี้ว่าแรงบิดเบรกดาวน์ (breakdown torque)



ภาพประกอบ 16 กราฟลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เพื่อความเข้าใจยิ่งขึ้น ในช่วงที่ทำงานเป็นมอเตอร์ (motoring) มอเตอร์จะทำงานตามปกติคือรับไฟสามเฟสเข้ามาสร้างสนามแม่เหล็กหมุนและทำให้โรเตอร์หมุนตาม สำหรับช่วงกลับทิศทางการหมุน (plugging) จะเกิดขึ้นได้ในกรณีเช่น มีการกลับลำดับเฟสของระบบไฟสามเฟสที่จ่ายให้กับมอเตอร์แบบทันทีทันใดซึ่งมีผลให้สนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์หมุนทวนกับการหมุนของโรเตอร์ส่งผลให้เกิดการเบรกของโรเตอร์ แต่ผลที่ตามมาอีกประการหนึ่งก็คือ กระแสจะสูงมากอาจทำให้มอเตอร์ร้อนจนเกิดความเสียหายได้ และสำหรับช่วงของการคืนพลังงาน (regeneration) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำให้อัตราเร็วของโรเตอร์มีค่าสูงกว่าอัตราเร็วซิงโครนัสหรืออัตราเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ ผลก็คือ โรเตอร์จะมองว่าสนามแม่เหล็กที่หมุนตัดผ่านตัวมันกลับทิศทางตามหลักการของความเร็วสัมพัทธ์ กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์จึงกลับทิศทางไปด้วยส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์กลับทิศทางทำให้กำลังเป็นลบและมอเตอร์กลายสภาพเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยแปลงพลังงานกลที่นำมาหมุนตัวมันให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าไหลกลับเข้าสู่ระบบ (line) ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นในระบบควบคุมอัตราความเร็วรอบของมอเตอร์อยู่เสมอ เพราะเมื่อใดก็ตามที่เราลดความถี่เพื่อปรับให้มอเตอร์หมุนช้าลง ด้วยผลของความเฉื่อยที่โหลดมีอยู่จึงทำให้โรเตอร์หมุนเร็วกว่าสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่เรากำหนดปรากฏการณ์การคืนพลังงานกลับก็จะเกิดขึ้น

2.6.6 การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำในโหมดขับเคลื่อน

เมื่อทำการต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ากับแหล่งจ่ายแล้วเริ่มทำการออกตัวมอเตอร์จะทำให้มีการดึงกระแสที่สูง ซึ่งส่งผลกระทบถึงโหลดหรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่ต่อร่วมอยู่กับแหล่งจ่ายด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการลดหรือจำกัดกระแสในขณะที่มีการเริ่มออกตัว หรือการกระจายโหลดเพื่อการลดกระแสเริ่มออกตัวของมอเตอร์ด้วย อย่างไรก็ตามหากจะกล่าวไปแล้วการเริ่มออกตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยทั่วไป จึงใช้วิธีการใดการหนึ่งดังต่อไปนี้คือ การออกตัวโดยตรง (Direct on line starting) การออกตัวด้วยระดับแรงดันที่ต่ำ (Low voltage starting) การออกตัวด้วยการปรับค่าความต้านทานของโรเตอร์ (Rotor resistance starting) การออกตัวด้วยโรเตอร์ที่มีโครงสร้างพิเศษ (Special rotor construction) และการออกตัวด้วยระดับความถี่ต่ำ

การออกตัวโดยตรง เป็นการออกตัวด้วยวิธีนี้จะใช้แรงดันพิกัดกับมอเตอร์ที่มีขนาดเล็ก กล่าวคือกระแสในการออกตัวจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ในขณะหยุดนิ่ง (ยังไม่หมุน) โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 6 ถึง 8 เท่าของกระแสพิกัด และแรงบิดในขณะออกตัวมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.5 ถึง 2 เท่าของแรงบิดขณะโหลดเต็มพิกัด

การออกตัวด้วยระดับแรงดันต่ำ เป็นการออกตัวด้วยวิธีนี้ปกติจะใช้กับมอเตอรชนิดโรเตอร์ กรงกระรอกเพื่อจำกัดกระแสในการออกตัว และหลังจากที่มอเตอร์หมุนไปแล้วประมาณร้อยละ 80 ของอัตราความเร็วพิกัดก็จะจ่ายแรงดันพิกัดให้กับมอเตอร์ เช่นการลดระดับแรงดันในการออกตัวอาจจะใช้ ออโต้ทรานสฟอร์เมอร์ (auto-transformer) การออกตัวแบบสตาร์-เดลต้า รวมไปถึงตัวควบคุมแรงดันไฟสลับ (ac voltage controller) สำหรับในการออกตัวแบบสตาร์-เดลต้านั้น มอเตอร์จะถูกออกแบบให้ทำงานปกติด้วยการต่อแบบเดลต้า แต่ถ้าการออกตัวถูกต่อแบบสตาร์จะสามารถลดแรงดันและกระแสลงได้แต่ขณะเดียวกันแรงบิดก็จะลดลงตามไปด้วย

การออกตัวด้วยการควบคุมค่าความต้านทานของโรเตอร์ เป็นการเริ่มออกตัวของมอเตอร์ด้วยวิธีนี้จะใช้กับมอเตอร์ชนิดโรเตอร์พันขดลวด โดยที่ค่าความต้านทานที่นำมาต่อร่วมภายนอกจะให้กระแสและแรงบิดในการออกตัวตามที่ต้องการ การเริ่มออกตัวสามารถกระทำได้โดยตั้งค่าความต้านทานภายนอกไว้ที่ค่าเหมาะสมแล้วค่อย ๆ ปรับลดลงตามอัตราความเร็วที่เพิ่มขึ้นในขณะที่แรงบิดมีค่าคงที่ ความต้านทานจะถูกตัดออกเมื่อมอเตอร์ถึงอัตราความเร็วที่พิกัด

การออกตัวด้วยโรเตอร์ที่มีโครงสร้างพิเศษ เป็นมอเตอร์ที่มีโรเตอร์โครงสร้างพิเศษนี้เป็นมอเตอร์ชนิดกรงกระรอก การออกตัวโดยตรงสามารถนำมาใช้กับมอเตอร์ชนิดนี้ได้ การหมุนในสภาวะปกติจะให้สมรรถนะในการทำงานที่ดีแต่ประสิทธิภาพในขณะขับโหลดเต็มพิกัดและค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ อาจมีค่าที่ด้อยกว่ามอเตอร์ที่มีโรเตอร์เป็นแบบธรรมดา และโรเตอร์ชนิดที่มีโครงสร้างพิเศษจะสามารถลดกระแสในขณะเริ่มออกตัว อันเนื่องมาจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโดยอัตโนมัติ

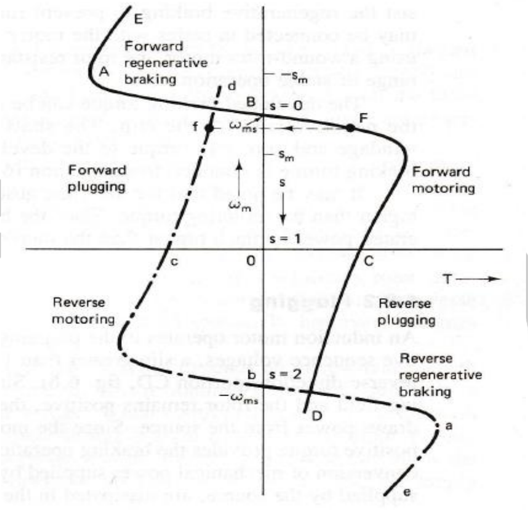
พร้อมกับอัตราความเร็วที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ มันจะให้ค่าความต้านทานสูงสุดตอนอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง และมีค่าลดลงเมื่ออัตราความเร็วเพิ่มขึ้นและมีค่าน้อยที่อัตราความเร็วปกติ ซึ่งในการปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานดังกล่าวสามารถทำได้ด้วยการปรับค่าความถี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์นั่นเอง

การออกตัวด้วยระดับความถี่ต่ำ เป็นการออกตัวมอเตอร์ด้วยวิธีดังกล่าวนี้สามารถทำได้ก็ต่อเมื่อ มอเตอร์ถูกป้อนด้วยคอนเวอร์เตอร์ที่ปรับเปลี่ยนความถี่ได้ (frequency converter) ความถี่ของมอเตอร์จะถูกปรับเปลี่ยนอย่างช้า ๆ โดยให้ความถี่ของสลิปคงที่ ทั้งนี้เพื่อรักษากระแสอินพุตที่สเตเตอร์ให้คงที่เพื่อแรงบิดที่คงที่นั่นเอง ทั้งอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (VSI : voltage source inverter) และอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (CSI : current source inverter) ซึ่งนิยมนำมาใช้ในการขับมอเตอร์ที่ใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน [66]

2.6.7 การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำในโหมดเป็นเครื่องกำเนิด

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ามีหลักการทำงานอยู่ 2 โหมดการทำงาน คือ โหมดที่เป็นมอเตอร์และโหมดที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การเบรกมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นระบบที่ซึ่งทำให้มอเตอร์เปลี่ยนสภาวะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งวิธีการเบรกมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีด้วยกันดังนี้ ได้แก่ การเบรกแบบคืนพลังงาน (Regenerative braking) การเบรกแบบกลับทางหมุนหรือกลับแรงดัน (Plugging or Reverse voltage braking) และการเบรกแบบไดนามิก (Dynamic braking)

การเบรกแบบคืนพลังงาน เมื่อไหร่ก็ตามที่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนด้วยอัตราความเร็วที่สูงกว่าอัตราความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์หรืออัตราเร็วซิงโครนัส จะส่งผลให้โรเตอร์มองว่าสนามแม่เหล็กที่หมุนตัดผ่านตัวมันถูกกลับทิศทางตามหลักการความเร็วสัมพัทธ์ กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์จึงกลับทิศทางไปด้วย จึงส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์กลับทิศทาง ทำให้กำลังเป็นลบและมอเตอร์กลายสภาพเป็นเครื่องกำเนิดโดยการแปลงพลังงานกลที่นำมาหมุนตัวมันให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าไหลกลับเข้าสู่ระบบ ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นในระบบควบคุมอัตราความเร็วของมอเตอร์เสมอ เพราะเมื่อใดก็ตามที่เราลดความถี่เพื่อปรับให้มอเตอร์หมุนช้าลง ด้วยผลของความเฉื่อยที่โหลดมีอยู่จะทำให้โรเตอร์ หมุนเร็วกว่าสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์ปรากฏการณ์คืนพลังงานก็จะเกิดขึ้น



ภาพประกอบ 17 เส้นโค้งแรงบิด-อัตราความเร็วที่สูงและต่ำกว่าอัตราความเร็วซิงโครนัสในแต่ละทิศทางของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การเบรกแบบกลับทิศทางการหมุน การเบรกมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยวิธีนี้ สามารถกระทำได้สองลักษณะด้วยกันคือ การกลับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ ซึ่งอาจได้มาจากโหลดหรือแรงกระทำภายนอก ซึ่งเรียกการเบรกด้วยวิธีนี้ว่า การเบรกแบบกลับแรงบิด (counter-torque breaking) และการเบรกโดยสลับเฟสคู่ใดคู่หนึ่งที่ป้อนเข้าสเตเตอร์ของมอเตอร์เพื่อกลับทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์

สำหรับการกลับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ด้วยโหลดหรือแรงจากภายนอก เช่น รอก เครน สลิปจะมีค่ามากกว่า 1 เนื่องจากมอเตอร์จำเป็นต้องดึงกำลังจากแหล่งจ่ายเพื่อพยายามเอาชนะแรงบิดโหลดบนโรเตอร์ จึงเป็นสาเหตุให้กำลังเหล่านี้ถูกแพร่กระจายอยู่ในค่าความต้านทานของโรเตอร์ซึ่งเป็นที่มาของความร้อน ดังนั้นการเบรกด้วยวิธีดังกล่าวจึงไม่เหมาะสำหรับการนำมาใช้ในการเบรกมอเตอร์ของระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าและสำหรับการเบรกด้วยวิธีการสลับเฟสก็ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับการหยุดการหมุนของระบบขับเคลื่อนยานยนต์ด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า แต่มันจะเหมาะกับการกลับทิศทางการหมุนมากกว่า อันเนื่องมาจากค่าที่สูงของสลิปที่เป็นผลมาจากการเบรกทำให้ค่าความต้านทานเทียบเคียงของโรเตอร์ มีค่าที่ต่ำลงส่งผลให้กระแสที่ไหลมีค่าสูงขึ้น ในกรณีของมอเตอร์มอเตอร์ชนิดโรเตอร์พันขดลวดการต่อความต้านทานภายนอกเข้ากับโรเตอร์จะช่วยลดกระแสดังกล่าวและสามารถควบคุมแรงบิดที่ใช้ในการเบรกได้ [67]

การเบรกแบบไดนามิกด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ในการเบรกด้วยวิธีนี้ มอเตอร์จะถูกตัดออกจากแหล่งจ่ายไฟสลับ หลังจากนั้นจะถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรง เนื่องจากกระแสไฟตรงที่ไหลผ่านจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของสเตเตอร์ซึ่งมีค่าต่ำ เมื่อต้องการการเบรกที่รวดเร็วก็มีความจำเป็น

จะต้องสร้างแรงบิดที่มีค่าสูง ๆ ซึ่งก็คือยอมให้กระแสสเตเตอร์มีค่าสูงเป็นหลายเท่าตัวของกระแสพิกัด แต่หลังจากที่มอเตอร์หยุดหมุนแล้วให้ลดกระแสลงต่ำกว่ากระแสพิกัดทันทีหรือให้ทำการปลดแหล่งจ่ายไฟตรงออก ซึ่งทิศทางการไหลของกระแสไฟตรงที่ผ่านเข้าไปในขดลวดสเตเตอร์จะเป็นการสร้างสนามแม่เหล็กที่อยู่กับที่ ดังนั้นความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์เมื่อเทียบกับโรเตอร์จะมีค่าเป็นลบ ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ถูกกลับขั้วและลำดับเฟสเมื่อเทียบกับการหมุนในทิศทางเดิม ผลของกระแสเหนี่ยวนำในโรเตอร์จะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นซึ่งเคลื่อนที่ด้วยอัตราความเร็วเดียวกับโรเตอร์แต่ทิศทางตรงกันข้ามจึงเหมือนกับเป็นการให้สนามแม่เหล็กที่อยู่กับที่ เนื่องจากทั้งสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์อยู่กับที่ และกระแสของโรเตอร์ไหลกลับทิศทาง ดังนั้นแรงบิดคงตัว (steady torque) ที่ใช้ในการเบรกจึงถูกสร้างขึ้นที่ทุก ๆ อัตราความเร็ว อย่างไรก็ตามมันจะกลายเป็นศูนย์ตอนที่มอเตอร์หยุดหมุน อันเนื่องมาจากกระแสของโรเตอร์มีค่าเป็นศูนย์นั่นเอง

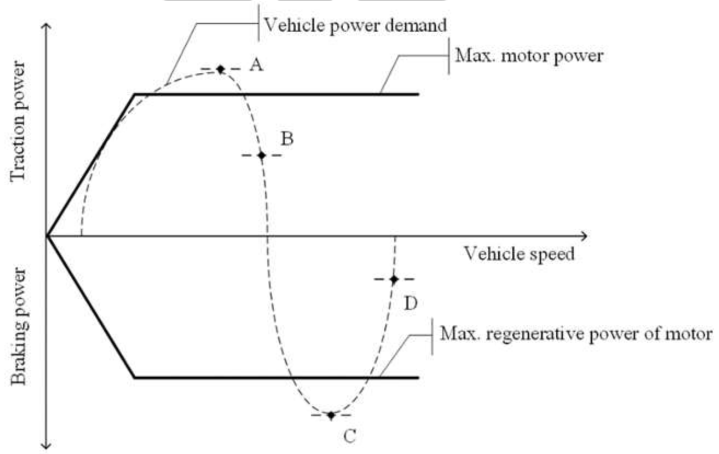
2.7 หลักการป้อนกลับกำลังไฟฟ้าขณะเบรกของยานยนต์ไฟฟ้า

ความสามารถในการเบรกอย่างปลอดภัยและสามารถจ่ายคืนพลังงานเพื่อนำมาใช้ในการขับเคลื่อนได้ สำหรับการขับขี่ในเขตเมืองโดยทั่วไปแล้ว แรงบิดที่ต้องการสำหรับการเบรกจะมีค่ามากกว่าแรงบิดของการขับเคลื่อน หรือในบางกรณีอาจจะมากกว่าแรงบิดที่มอเตอร์ลากจูงจะสามารถจ่ายได้ ในกรณีนี้จะต้องมีการควบคุมในการใช้ระบบเบรกแบบลูกผสมระหว่างเบรกทางไฟฟ้า และระบบเบรกทางกล เพื่อให้ได้แรงบิดในการเบรกที่เพียงพอและสามารถนำพลังงานจากการเบรกกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังภาพประกอบ 18 แสดงจุดทำงานของมอเตอร์ในการขับเคลื่อนและการเบรก จากภาพประกอบ 18 ที่จุด A เป็นจุดทำงานที่มอเตอร์ไม่สามารถให้แรงลากจูงได้เพียงพอ จุดทำงาน B เป็นจุดทำงานที่มอเตอร์สามารถจ่ายกำลังได้ จุด C เป็นจุดที่มอเตอร์ไม่สามารถจ่ายกำลังในการเบรกได้เพียงพอ โดยจุดนี้จะต้องมีการใช้เบรกทางกลร่วมด้วย ส่วนจุดทำงาน D เป็นจุดที่มอเตอร์สามารถมีกำลังในการเบรกได้เพียงพอ และสามารถจ่ายกำลังคืนกลับจากการเบรกได้ ซึ่งในสมการ 2.52 แสดงกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า [68]

$$P_{te} = \frac{v}{1000}\left(mg\left(\mu_{rr}\cos\alpha + \sin\alpha\right) + \tfrac{1}{2}\rho C_d A v^2 + m\tfrac{dv}{dt}\right) \qquad (2.52)$$

เมื่อ $P_{te} > 0$ ที่ล้อได้รับกำลังจากต้นกำลังแล้วทำให้ยานยนต์ขับเคลื่อนไปข้างหน้า ในกรณีนี้กำลังของการเบรกมีค่าเป็น 0 เนื่องจากการเบรก พลังงานจลน์ของยานยนต์จะถูกใช้ไปในระบบเบรก

ในกรณีนี้ กำลังขับเคลื่อนมีค่าเป็น 0 เมื่อทำการหาปริพันธ์ของสมการ 2.52 ตลอดช่วงเวลาในการขับขี่ ก็จะได้พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนและพลังงานที่ใช้ในการเบรก

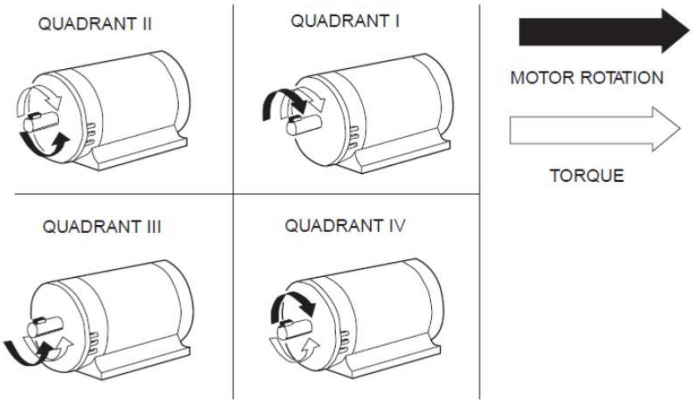


ภาพประกอบ 18 จุดทำงานและเงื่อนไขการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรก

พลังงานกลับคืนจากการเบรกมีความสัมพันธ์กับความเร็วของยานยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะการขับขี่ในเขตเมืองที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วและเบรกบ่อยครั้ง โดยทั่วไปจะไม่สามารถคืนพลังงานกลับจากการเบรกได้ที่ความเร็วต่ำ เนื่องจากที่ความเร็วต่ำจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force, EMF) หรือแรงดันที่โรเตอร์มีค่าต่ำเกินกว่าที่จะจ่ายพลังงานคืนกับจากการเบรกได้ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่มีการจ่ายพลังงานคืนกลับจากการเบรกที่ความเร็วต่ำ กว่า 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังนั้นจึงไม่มีการนำกำลังจากการเบรกที่ต่ำ กว่า 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มาพิจารณา ดังนั้นที่ความเร็วต่ำกว่า 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ระบบเบรกทางกลจะทำงานแทนที่ระบบเบรกทางไฟฟ้า

โดยในขณะมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหมุนด้วยแรงเฉื่อย (Inertia) หรือมอเตอร์ใกล้หยุดหมุนจะเกิดแรงดันต้านกลับอาร์เมเจอร์ ซึ่งเรียกว่า รีเจนเนอเรทีฟ ลักษณะเช่นนี้มอเตอร์จึงทำงานเป็นเครื่องกำเนิดป้อนพลังงานรีเจนเนอเรทีฟกลับมายังแหล่งจ่ายไฟและทำให้มีแรงต้านในมอเตอร์นั้นส่งผลให้มอเตอร์ลดความเร็วลง ซึ่งการเบรกเมื่อมอเตอร์หมุนที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน สามารถทำได้โดยการต่อคาปาซิเตอร์ (Capacitor bank) เข้าไปให้กับขั้วของมอเตอร์เป็นช่วง ๆ ทำให้เกิดการจ่ายพลังงานเป็นสนามแม่เหล็กหมุน ที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ต่ำ ๆ การเบรกเกิดขึ้นจากสาเหตุการจ่ายกระแสรีแอ็คทีป (Reactive) จากการต่อคาปาซิเตอร์นั่นเอง การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟจะทำให้ระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าทั้งระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

โดยการขับเคลื่อนล้อหน้าเป็นเพียงรูปแบบหนึ่งของการทำงานของมอเตอร์ใน 4 รูปแบบหลักที่เรียกว่า Four-Quadrant Operator ประกอบด้วย



ภาพประกอบ 19 การทำงานของมอเตอร์ใน 4 รูปแบบ (Four-quadrant operation)

1) การขับเดินหน้า: ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังจะควบคุมรูปแบบของแรงดัน (หรือกระแส) ให้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่โดยจะถูกกำหนดให้เป็นมอเตอร์โหมด ซึ่งหมายความว่าความเร็วและแรงบิดเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

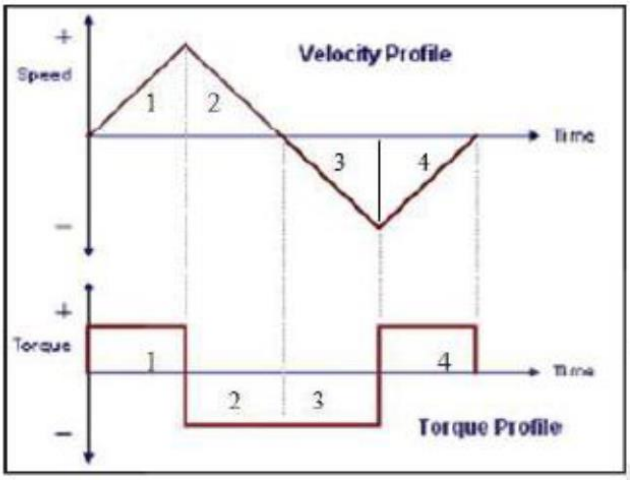
2) การทำ Regenerative braking ขณะเดินหน้า: เป็นจังหวะที่ลดความเร็วของยานยนต์ลง หรือการเบรกมอเตอร์ไฟฟ้าจะกลายสภาพเป็นเครื่องกำเนิด หรือบางครั้งเรียกว่า รีเจนเนอเรทีฟโหมด (Regenerative mode)

3) การขับถอยหลัง: ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังจะควบคุมรูปแบบของแรงดัน (หรือกระแส) ให้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ โดยจะถูกกำหนดให้เป็นมอเตอร์โหมดและเป็นรูปแบบที่ทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทาง ซึ่งหมายความว่า ความเร็วและแรงบิดเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

4) การทำ Regenerative braking ขณะถอยหลัง: เป็นจังหวะที่ลดความเร็วของยานยนต์ลง หรือการเบรกมอเตอร์ไฟฟ้าจะกลายสภาพเป็นเครื่องกำเนิด หรือบางครั้งเรียกว่า รีเจนเนอเรทีฟโหมด (Regenerative mode) [69]

จากภาพประกอบ 19 อธิบายได้ดังนี้ First quadrant ความเร็วของมอเตอร์มากกว่าความเร็วของยานยนต์ เมื่อยานยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Driving mode) Second quadrant ความเร็วของยานยนต์มากกว่ามอเตอร์ เมื่อยานยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Braking mode) Third quadrant ความเร็วของมอเตอร์มากกว่าความเร็วของยานยนต์ เมื่อยานยนต์ถอยหลัง (Driving mode) Fourth quadrant ความเร็วของยานยนต์มากกว่ามอเตอร์เมื่อยานยนต์เคลื่อนที่ถอยหลัง (Braking mode) จะเห็นได้ว่า ใน First quadrant และ Fourth quadrant (Driving mode) ยาน

ยนต์ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนแต่ใน Second quadrant และ Third quadrant (Braking mode) ยานยนต์สามารถขับเคลื่อนเองได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากมอเตอร์จึงไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ Second quadrant และThird quadrant เพลาของมอเตอร์สามารถหมุนได้โดยไม่ใช้พลังงานไฟฟ้า ถ้าใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร มอเตอร์จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าป้อนกลับจากโหมดการทำงานดังกล่าวได้ ซึ่งเรียกว่ารีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative) การกลายสภาพเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของมอเตอร์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ด้วย 4 Quadrant โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุมความเร็ว (Speeds) และแรงบิด (Torque) ในทิศทางบวกและทิศทางลบ ซึ่งหมายความว่าความเร็วและแรงบิดอยู่ในทิศทางตรงข้ามกัน กล่าวคือ แรงบิดของมอเตอร์มีทิศทางสวนกลับกับทิศทางการหมุนหรือความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้มอเตอร์สร้างพลังงานนออกมา พลังงานนี้สามารถเข้าสู่ระบบของพลังงานไฟฟ้าได้ต่อไป หรือสามารถนำพลังงานนี้มาใช้ประโยชน์อีกครั้งหนึ่ง [70]



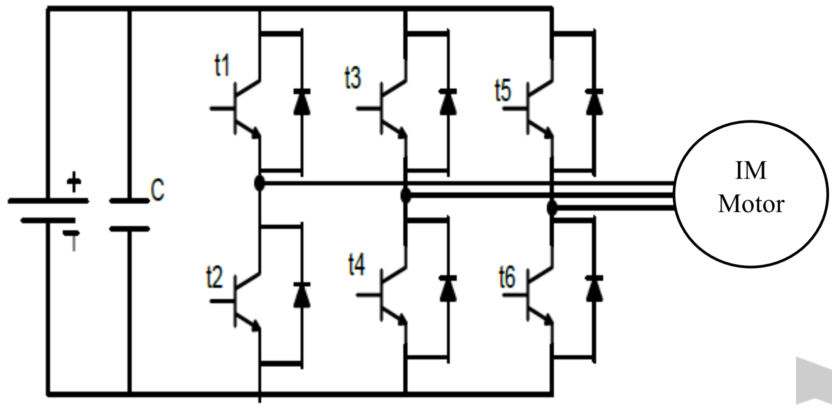
ภาพประกอบ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิด

จากภาพประกอบ 20 การทำงานในช่วงที่ 1 แสดงให้เห็นถึงการทำงานของมอเตอร์ซึ่งจะถูกเร่งด้วยความเร็วและแรงบิดในทิศทางบวก ส่วนการทำงานในช่วงที่ 2 ความเร็วยังมีค่าเป็นบวกและแรงบิดเป็นลบซึ่งจะทำให้การทำงานของมอเตอร์หยุดลงแต่จะกลายเป็นเครื่องกำเนิดแทน และส่วนการทำงานในช่วงที่ 3 จะมีการทำงานคล้ายกับช่วงที่ 1 แต่ทิศทางตรงข้ามกันคือเป็นลบซึ่งจะยังคงมีการทำงานเป็นมอเตอร์ ช่วงที่ 4 จะคล้ายกับช่วงที่ 2 แต่มีทิศทางตรงกันข้าม นั้นหมายถึงเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์สนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์จะมีการสร้างแรงบิดขึ้นด้วยแรงบิดนี้จะทำให้เพลามอเตอร์หมุน การทำงานในลักษณะนี้เรียกว่า Motoring ซึ่งความเร็วรอบของเพลาและแรงบิด

ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์ไปในทิศทางเดียวกันส่วนการทำงานลักษณะหนึ่งคือ มีการหมุนเพลามอเตอร์ ถูกสนามแม่เหล็กวิ่งผ่านเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และถ้ามีการต่อโหลดเข้ากับขั้วไฟฟ้าของมอเตอร์ เกิดกระแสไฟฟ้าไหล ก็จะเกิดแรงบิดต้านการหมุนของเพลามอเตอร์ขึ้น การทำงานในลักษณะนี้เรียกว่า Generating ซึ่งความเร็วรอบของเพลาขับมอเตอร์และแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์จะเป็นไปในทิศทางตรงข้ามกัน

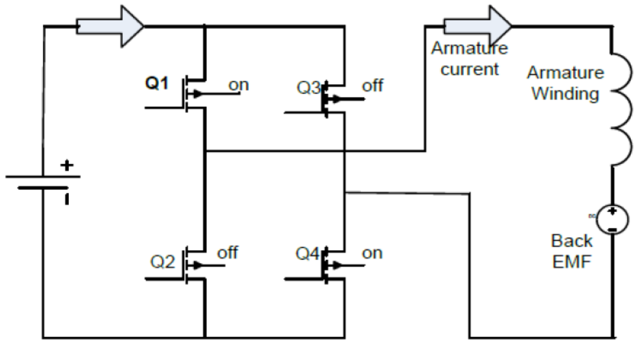
2.7.1 รูปแบบการเปลี่ยนในโหมดการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า

จากภาพประกอบ 21 สามารถแสดงถึงวงจรพื้นฐานของอินดักชั่นมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ป้อนจากแบตเตอรี่ต้นทาง ซึ่งเป็นวงจรการขับมอเตอร์ประกอบไปด้วยกระแสไฟฟ้า 360° ประกอบด้วยระยะห่างเท่ากัน 6 ช่วง สวิตช์ S1 ถึง S6 จะทำงานตามลำดับโดยใช้วงจรควบคุมตามตำแหน่งที่ได้รับจากเซ็นเซอร์ตำแหน่งใบพัดควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ควบคุมโดยวงจรอินเวอร์เตอร์ สำหรับกระบวนการเบรกที่เกิดขึ้นในโหมดรีเจนเนอเรชันจะผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับผ่านไดโอดที่ขนานกับ IGBT จะทำการเปิด-ปิดของสวิตช์ซึ่งจะสอดคล้องกับโหมดการทำงานของมอเตอร์ [71]



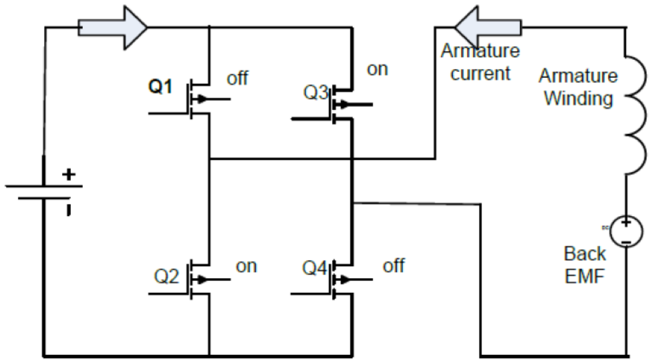
ภาพประกอบ 21 วงจรควบคุม Drive circuit of Induction motor

ภาพประกอบ 21 แสดงโหมดการทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสจะไหลผ่านด้านบวกไปยังด้านลบของแบตเตอรี่ ไดโอดจะเชื่อมโยงแบบขนานกับ MOSFET ทุกตัว ไดโอดเหล่านั้นสามารถนำมาใช้เป็น freewheeling



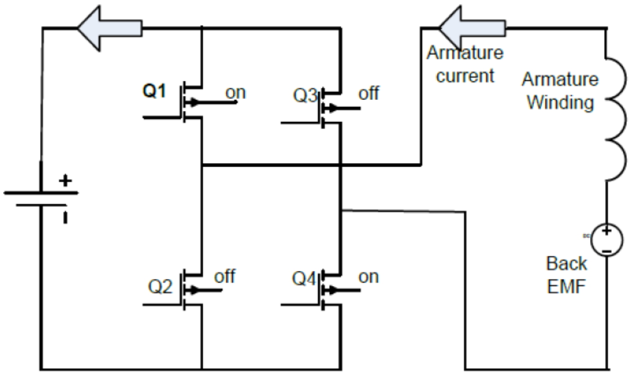
ภาพประกอบ 22 แสดงวงจร Driving Mode

เมื่อเบรกยานพาหนะขณะมีการเคลื่อนที่ของรถยนต์ระบบจะเปลี่ยนเป็นโหมดเบรก ซึ่งโหมดเบรกจะถูกแปลงเป็นสองขั้นตอนการดำเนินการดังนี้ ขั้นตอนแรกของเบรก emf จะมีทิศทางย้อนกลับและทิศทางของกระแสจากแบตเตอรี่ยังมีทิศทางไปยังมอเตอร์



ภาพประกอบ 23 แสดงวงจร Initial Braking mode

และสุดท้าย สถานะของมอสเฟต (MOSFET) จะกลับมาสู่ตำแหน่งเดิมอัตโนมัติตามที่แสดงในภาพประกอบ 23 และแบตเตอรี่ประจุกระแสไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ

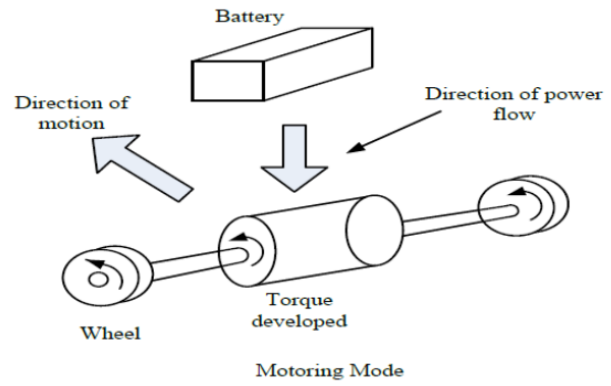


ภาพประกอบ 24 แสดงวงจร Regenerative braking mode

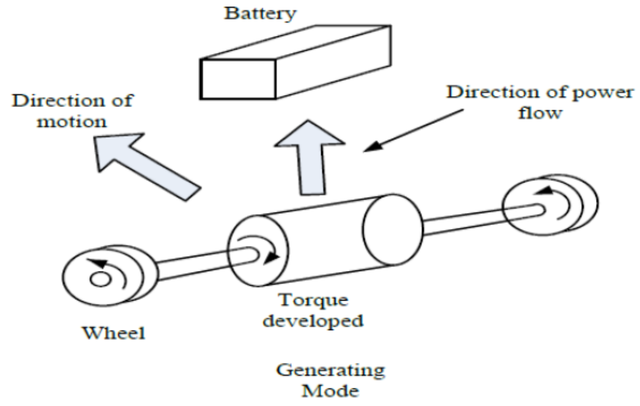
2.7.2 รูปแบบการทำงานในระบบรีเจนเนอเรทีฟของมอเตอร์ไฟฟ้า

การเบรกรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Brake) ใช้หลักการเดียวกันกับไดนามิคเบรก เพียงแต่ไม่เป่าความร้อนที่เกิดขึ้นทิ้งไปในอากาศแต่นำพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปขับเคลื่อนขบวนรถอื่นที่อยู่ใกล้เคียงซึ่งกำลังอยู่ในช่วงการขับ (Traction) และต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ากล่าวคือ ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าไม่เกิน 900 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าดังกล่าวจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบ การเบรกด้วยวิธีนี้ทำได้โดยการขับมอเตอร์ที่ต่อกับเครื่องจักรหมุนซึ่งเป็นโหลดให้มีความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส หรือความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน ทำให้มอเตอร์เกิดการเบรก และจ่ายพลังงานกลับคืนสู่แหล่งจ่ายของระบบ หรือ รีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative) [72]

ความสามารถในการเบรกอย่างปลอดภัยและสามารถจ่ายคืนพลังงานเพื่อนำมาใช้ในการขับเคลื่อนได้ สำหรับการขับขี่ในเขตเมืองโดยทั่วไปแล้ว แรงบิดที่ต้องการสำหรับการเบรกจะมีค่ามากกว่าแรงบิดของการขับเคลื่อน หรือในบางกรณีอาจจะมากกว่าแรงบิดที่มอเตอร์ขับเคลื่อนจะสามารถจ่ายได้ ในกรณีนี้จะต้องมีการควบคุมในการใช้ระบบเบรกแบบลูกผสมระหว่างเบรกทางไฟฟ้าและระบบเบรกทางกล เพื่อให้ได้แรงบิดในการเบรกที่เพียงพอและสามารถนำพลังงานจากการเบรกกลับมาใช้ใหม่ได้นั้น ระบบรีเจนเนอเรชันเป็นวิธีการเบรกเพื่อใช้พลังงานกลจากมอเตอร์เปลี่ยนพลังงานจลน์ เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยยานยนต์ที่อยู่ในโหมดมอเตอร์จะได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่ ดังแสดงในภาพประกอบ 25 และโหมดรีเจนเนอเรชันมอเตอร์จะมีสภาพกลายเป็นเครื่องกำเนิดผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับคืนสู่แบตเตอรี่ ดังภาพประกอบ 26



ภาพประกอบ 25 แสดงวงจร Motoring Mode



ภาพประกอบ 26 แสดงวงจร Regeneration Mode

2.7.3 รูปแบบระบบการจัดเก็บพลังงาน (Energy storage system)

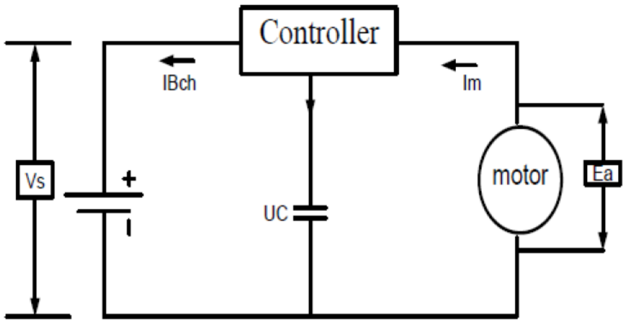
ความจุของพลังงานมีความเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีใหม่ ๆ โดยเน้นที่ตัวเก็บประจุแบตเตอรี่และตัวแปลงไฟฟ้าที่จำเป็นสำหรับการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้า ที่มีแบตเตอรี่ประเภทตะกั่ว เช่น นิกเกิลแคดเมียม นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ นิกเกิลสังกะสี เป็นต้น หากต้องการใช้แบตเตอรี่อย่างถูกต้องและเหมาะสม เพื่อไม่ให้ระบบการทำงานเกิดความเสียหายจึงต้องทำการการศึกษาเปรียบเทียบขั้นพื้นฐานดังแสดงในตาราง 5 เพื่อให้สามารถระบุชนิดของแบตเตอรี่ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมกับยานยนต์ไฟฟ้า [73]

ตาราง 5 ความหนาแน่นของพลังงานอายุการใช้งานและอุณหภูมิในการทำงานของแบตเตอรี่

Battery Type	Energy Density (Wh/kg)	Cycle life number of cycles	Operating Rang Temperature (^{0}C)
Lead acid battery	80-50	400-1200	20 - 60
Ni-Cd	45-80	200	40 - 60
Ni-Zn	60-85	100	20 - 60
Ion-Li	110-160	500-1000	20 - 60
Li-polymer	100-130	3000-4000	20 - 60

ตัวเก็บประจุแบบพิเศษ (Ultra) มีบทบาทสำคัญอย่างมากในระบบทั้งหมดเพื่อให้เทคโนโลยีสมัยใหม่ มีความสามารถในการควบคุมดังกล่าว ในระบบตัวเก็บประจุแบบพิเศษนี้มีความสำคัญ คือ ตัวแปลง DC-DC บนทรานซิสเตอร์ขั้วบวก IGBT ที่หุ้มฉนวน ความราบเรียบของตัวเหนี่ยวนำอะลูมิเนียม ตัวเก็บประจุแบบพิเศษและชุดแบตเตอรี่ในระหว่างการเร่งแรงดัน ตัวเก็บประจุแบบพิเศษได้รับการยินยอมให้ตั้งค่าจากอัตราการบรรจุที่บรรจุให้เป็นหนึ่งในสามของแรงดันไฟฟ้าที่ระบุ ในระหว่างการชะลอตัวพลังงานของตัวเก็บประจุที่ปล่อยออกมาในช่วงการเร่งความเร็วจะดีขึ้นและชาร์จประจุอีกครั้ง ส่วนใหญ่จะใช้ตัวเก็บประจุแบบพิเศษเนื่องจากเก็บพลังงานได้มากขึ้นถึง 20 เท่าเมื่อเทียบกับตัวเก็บประจุแบบทั่วไป ตัวเก็บประจุแบบพิเศษ นี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ EVs ในการเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุแบบพิเศษ จะเพิ่มแหล่งจ่ายไฟให้กับยานยนต์ไฟฟ้าและยังเพิ่มระยะทางได้อีกด้วย

การจ่ายพลังงานให้กับตัวเก็บประจุ คอนโทรลเลอร์ DC-DC converter ซึ่งทำงานเป็นตัวแปลงสัญญาณแบบ buck-boost การดำเนินการเพิ่มจะใช้สำหรับการเร่งความเร็วขณะที่การดำเนินการของบั๊กถูกใช้เพื่อชะลอการทำงานซึ่งจะช่วยสำหรับการชาร์จประจุได้



ภาพประกอบ 27 แสดงวงจร Block diagram of Regenerative braking concept

การเบรกแบบรีเจเนอเรทีฟเป็นระบบที่สำคัญที่สุดในการผลิตยานยนต์ไฟฟ้า การเบรกกลับมีความสามารถในการประหยัดพลังงานได้ถึงร้อยละ 8 ถึงร้อยละ 25 ระบบเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟที่พัฒนาขึ้นโดยเทคโนโลยีขั้นสูงของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นตัวเก็บประจุแบบพิเศษ และตัวแปลงสัญญาณ DC-DC ในการวิจัยกล่าวว่าการเบรกคืนค่าพลังงานกลับนั้นมีอยู่แล้วในการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าทั่วไป ทั้งนี้เนื่องมาจากการขึ้นราคาน้ำมันทำให้เกิดการวิจัยและความคืบหน้าในการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงลงได้ [74]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในระบบขับเคลื่อนยายนต์ไฟฟ้า สามารถสรุปทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ใช้วิเคราะห์การขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ชนิดต่าง ๆ และส่วนประกอบของยานยนต์ไฟฟ้าที่สมบูรณ์ไม่ได้มีส่วนประกอบเพียง วงจรการขับมอเตอร์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับการขับเคลื่อนเท่านั้น แต่ยังต้องประกอบด้วยระบบย่อยอื่น ๆ เพื่อที่จะสามารถทำให้ระบบขับเคลื่อนทำงานได้นั้นระบบจะต้องมีอุปกรณ์สะสมพลังงานซึ่งก็คือแบตเตอรี่ เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับบัสแรงดันสูงและส่งให้อุปกรณ์การขับมอเตอร์ มอเตอร์จะเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการส่งกำลังของยานยนต์ไฟฟ้า (Electric vehicle power train) และการที่ระบบขับเคลื่อนจะสามารถทำงานได้ประหยัดยิ่งขึ้นและสามารถวิ่งได้ไกลขึ้นนั้นสามารถทำได้ด้วยการติดตั้งระบบรีเจนเนอเรทีฟในขณะเบรกของยานยนต์ไฟฟ้านั่นเองซึ่งสามารถค้นหาข้อมูลต่างๆ จากผลงานการวิจัยของนักวิจัยต่าง ๆ ได้ดังนี้

S.M.Reza Tousi และคณะ [75] ได้นำเสนอกลยุทธ์การควบคุมแรงเบรกเพื่อป้องกันล้อล็อคตายในระบบเบรก รีเจนเนอเรทีฟทำงานร่วมกับระบบเบรกไฮดรอลิคในรถไฟฟ้า โดยการปรับสัดส่วนแรงที่ได้จากเบรกไฮดรอลิคและการเบรกรีเจนเนอเรทีฟให้พอเหมาะ สมรรถนะของระบบดังกล่าวถูกประเมินโดยการจำลองสภาพของพื้นถนนทำการทดสอบ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สมรรถนะของระบบเบรกเป็นไปตามคุณลักษณะเฉพาะของการเบรกที่เหมาะสมในหลาย ๆ ลักษณะการขับขี่และเงื่อนไขการขับขี่

Patel และคณะ [76] ได้ทำการสร้างระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ ที่ปรับให้เข้ากับมอเตอร์ชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ โดยการควบคุมความเร็วเป็นแบบ PID ซึ่งถูกใช้เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์และระบบฟัชซี่ลอจิกถูกใช้ควบคุมการกระจายแรงเบรก การทดสอบสมรรถนะใช้การจำลองสภาพเพื่อตรวจสอบสถานะภาพประจุและการจ่ายไฟของแบตเตอรี่ แรงเบรกและกระแสที่ไหลในระบบ การทดสอบการใช้งานจริงทำได้โดยต่อเพลาของระบบเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ ต่อเข้ากับเพลามอเตอร์ที่

ทำหน้าที่จำลองสภาพการขับขี่โดยตรง ระบบดังกล่าวสามารถเพิ่มระยะทางในการขับขี่ และสามารถนำไปใช้งานได้จริง

Jino Joy and S. Ushakumari [77] ได้นำเสนอวิธีการจัดการการสะสมพลังงานในระบบกักเก็บพลังงานร่วมแบตเตอรี่ ล้อช่วยแรง ในระบบเบรกรีเจนเนอเรทฟี ที่ความเร็วต่ำ ชุดตัวต้านทานสำหรับการกำจัดพลังงานเหลือใช้ ถูกใช้เพื่อป้องกันกระแสเกินและศักย์ไฟฟ้าเกิน ระบบควบคุมแรงบิดสูงสุด โดยการจำกัดกระแสและความต่างศักย์ ถูกใช้เพื่อจำกัดความเร็ว ที่ความเร็วสูงสมรรถนะของระบบดังกล่าวถูกประเมินโดยใช้การจำลองสภาพ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ระบบดังกล่าวสามารถทำงานได้ดีโดยทั่วไปมอเตอร์ไร้แปรงถ่านจะมีชุดขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก 3 ชุด ขณะทำงาน จะมีขดลวด 2 ชุดถูกกระตุ้นสลับกันไปเพื่อให้มอเตอร์หมุน โดยจะมีขดลวดอีก 1 ชุด ที่ไม่ได้ใช้งานซึ่งสามารถใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟได้

Zhao และคณะ [78] ได้นำเสนอการควบคุมมอเตอร์แบบซิงโครนัสให้สามารถทำหน้าที่มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟในเวลาเดียวกัน การทดสอบสมรรถนะใช้การจำลองสภาพ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าร้อยละ 75 ของแรงดันที่ใช้ป้อนให้ระบบสามารถนำกลับมาประจุตัวสะสมพลังงานแบบตัวเก็บประจุได้

Guo และคณะ [79] ได้นำเสนอวิธีการใหม่ที่มีความเรียบง่ายและประหยัดสำหรับการควบคุมเบรกรีเจนเนอเรทีฟในช่วงขับเคลื่อน ตัวขับมอเตอร์จะทำงานตามฟังก์ชันปกติ แต่เมื่อมีการเบรกตัวขับมอเตอร์จะทำหน้าที่ ปิด-เปิด ชุด PWM เพื่อให้กระแสที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไหลกลับไปชาร์ตแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการตรวจวัดและการควบคุมกระแสเพื่อให้ผู้ขับขี่รู้สึกสบายและเพิ่มประสิทธิภาพในการชาร์ตแบตเตอรี่ และทำการทดสอบการใช้งานจริงทำได้โดยต่อเพลาของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ เข้ากับเพลามอเตอร์ที่ทำหน้าที่จำลองสภาพการขับขี่โดยตรง ระบบดังกล่าวสามารถเพิ่มระยะทางในการขับขี่

suchaneck และคณะ [80] ได้พัฒนาแบบจำลองและนำเสนอกลยุทธ์การควบคุมเบรกรีเจนเนอเรทีฟสำหรับรถไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ดุมล้อที่กำลังเคลื่อนที่ในแนวตรงเพื่อให้การเบรกมีความปลอดภัยและสามารถนำพลังงานกลับมาใช้ได้มากที่สุด สำหรับการคบคุมสมรรถนะในการเบรกสัดส่วนแรงเบรกที่กระทำกับล้อหน้าและล้อหลังจะอ้างอิงกับภาระโหลดที่ล้อ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นถนนมากที่สุด สำหรับการนำพลังงานกลับมาใช้ให้มากที่สุด ตัวควบคุมถูกออกแบบโดยอ้างอิงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อจำลองการทำงานร่วมกันของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟกับระบบเบรกไฮดรอลิคโดยที่จะกระจายแรงในระบบเบรกทั้งสองให้เหมาะสมแก่การนำพลังงานกลับมาใช้ ประสิทธิผลของระบบดังกล่าวถูกยืนยันจากผลการศึกษาจากการจำลองสภาพการทำงาน

Li และคณะ [81] ได้การออกแบบมอเตอร์ดุมล้อสำหรับใช้กับรถไฟฟ้า ขนาด 350 วัตต์ เมื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยสมมุติว่ารถรับภาระโหลด 70 กิโลกรัม วิ่งด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากการทดสอบพบว่ามอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 82.56 ที่แรงบิด 2.5 นิวตันเมตร และสร้างแรงบิดสูงสุดได้ถึง 6.25 นิวตันเมตร ที่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ 348.76 วัตต์ โดยทั่วไปมอเตอร์ไร้แปรงถ่านจะมีชุดขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก 3 ชุด ขณะทำงานจะมีขดลวด 2 ชุดถูกกระตุ้นสลับกันไปเพื่อให้มอเตอร์หมุน โดยจะมีขดลวดอีก 1 ชุด ซึ่งสามารถใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

Yan Chen and Junmin Wang [82] ได้ทำการทดลองใช้ระบบควบคุมเสถียรภาพการกระจายแรงบิดที่เหมาะสมสำหรับการขับเคลื่อนสี่ล้อในรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งได้ทำการทดลองโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าติดกับเพลาทั้งสี่ล้อขับเคลื่อนด้วยความอิสระโดยใช้แรงบิดฉุดและเบรกโดยควบคุมมอเตอร์ตามคำสั่งสัญญาณชุดควบคุมยานพาหนะ VCU ผ่าน CAN bus และ VCU จะสามารถประมวลผลไดร์ฟเวอร์ได้ แล้วต่อสัญญาณ Input ให้กับมุมเลี้ยวพวงมาลัย, สัญญาณเหยียบเร่ง, และแจกจ่ายแรงบิดฉุดกับแรงจากการเบรก สำหรับตัวควบคุมมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวบน รถไฟฟ้า 4 ล้อนั้น จะเลือกรถยนต์ แบบ hatchback Class B ซึ่งได้ผลตามความคาดหมาย คือรักษาความเร็วได้ดีและควบคุมแรงบิดให้คงที่ด้วย

Xudong Zhang and Dietmar Göhlich [83] ได้นำเสนอ โครงสร้างระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้าไฮบริดจ์ด้วยมอเตอร์ เครื่องกำเนิด ที่สามารถใช้แรงบิดหรือได้แรงบิดในการเบรกเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ขับขี่และตรรกะในการจัดการพลังงาน คุณลักษณะสำคัญของเครื่องกำเนิด/มอเตอร์เหล่านี้คือความสามารถในการกู้คืนพลังงานจลน์ ผ่านเบรกรีเจนเนอเรทีฟที่อาจจะถูกกระจายไปเป็นความร้อน โดยในบทความนี้จะชี้แจงและแก้ไขปัญหาที่สำคัญหลายที่เกี่ยวข้องกับการเบรกรีเจนเนอเรทีฟที่ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร รวมถึงข้อจำจัดของความเร็วกับแรงบิดที่กำหนดสมรรถนะในการเบรกรีเจนเนอเรทีฟและการกำหนดเรื่องปฏิบัติการที่เป็นไปได้ด้วยสมรรถนะที่จะได้กระแสให้กับชุดแบตเตอรี่ได้สูงสุด

Kanarachos และคณะ [84] ได้อธิบายถึงรูปแบบการควบคุมการขับขี่ปลอดภัยแบบใหม่สำหรับรถเข็นที่ใช้พลังงานไฟฟ้าโดยใช้ระบบเบรกรีเจนเนอเรชัน และการสลับโหมดควบคุมการขับขี่ รถเข็นไฟฟ้า ใช้กำลังขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าคาดว่าจะใช้กันอย่างแพร่หลายในฐานะระบบสนับสนุนการเคลื่อนย้ายสำหรับผู้สูงอายุ และคนพิการ อย่างไรก็ตามไม่มีระบบเบรกเพื่อลดความเร็วของรถเข็นคนพิการและนำไปสู่การขับขี่ที่เป็นอันตรายและน่ากลัวบนถนนบนเนิน บทความนี้เสนอแนวทางการควบคุมการขับขี่ปลอดภัยแบบใหม่บนพื้นฐานเบรกรีเจนเนอเรทีฟและการเปลี่ยนโหมดการขับขี่ ระบบนี้ใช้ระบบเบรกรีเจนเนอเรชันที่มีอัตราการทำงานที่เปลี่ยนแปลงได้โดยเปลี่ยนจาก

"โหมดการขับขี่" เป็น "โหมดเบรก" เมื่อความเร็วของรถเข็นคนพิการเพิ่มขึ้นบนถนนบนเนิน การทดลองขับขี่บนถนนจริงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่เสนอไปข้างต้น

Jeongwoo Lee and Douglas J. Nelson [85] ได้นำเสนอ หนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญของยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดจ์และยานยนต์ไฟฟ้าคือการเก็บพลังงาน การเก็บพลังงานที่นิยมมากที่สุดในระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นอยู่กับมอเตอร์ เนื่องจากพลังงานโดยทั่วไปของแบตเตอรี่มีค่าน้อยเทคโนโลยีไฮบริดจ์มีการจัดเก็บพลังงานที่มีลักษณะเฉพาะ อาทิเช่น ตัวเก็บประจุชนิดพิเศษ (Ultra-Capacitors) ในการเก็บพลังงานแบบไฮบริดจ์ซึ่งได้พลังงานจากการเรื่องความเร็วของเครื่องยนต์และการเบรกรีเจนเนอเรทีฟ

A. Ostadi และคณะ [86] ได้นำเสนอระบบการจัดเก็บพลังงานรูปแบบใหม่รวมถึงการออกแบบแบตเตอรี่และ Ultra capacitors (UC) ในรถไฮบริดจ์ไฟฟ้าและการประยุกต์ยานยนต์ไฟฟ้ากำรออกแบบตัวแปลง dc-dc ตามที่ต้องการเพื่อเชื่อมต่อกับ Ultra capacitors (UC) สามารถเปลี่ยนได้โดยตรงที่แตกต่างจากการขับเคลื่อนมอเตอร์ แบบ dc-link ในช่วงที่มีการใช้พลังงานสูงสุด การแปรปรวนอย่างกว้างของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการถ่ายโอนกำลังของ Ultra capacitors (UC) ซึ่งกำหนดด้วย modulator อย่างง่ายซึ่งจะเสนอในบทความนี้ ดังนั้น การขับเคลื่อนของมอเตอร์จะไม่ถูกทำให้เสียระบบขึ้นอยู่กับวิธีการใหม่นั้นซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอสองโหมดคือระบบการจัดเก็บพลังงานกับรูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายที่แตกต่าง UC rating และควบคุมการไหลของพลังงานที่สามารถใช้ได้กับรถไฮบริดจ์ไฟฟ้าที่น้ำหนักเบาและหนักได้ทั้งสองโหมดนี้มีประสิทธิภาพสูงเหมือนกันและมีต้นทุนต่ำ

Guanfeng Li and Hongxia Wang [87] ได้นำเสนอถึงการอธิบายลักษณะพิเศษบางอย่างเกี่ยวกับประสิทธิภาพการทำงานแบบไดนามิกของรถยนต์ที่มีระบบ Regenerative Breaking และการทำงานเบื้องต้นเพื่อสร้างรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อการพาณิชย์ที่ใช้งานได้จริง ในช่วงการชะลอตัวยานพาหนะเหล่านี้สามารถคืนพลังงานจากการเคลื่อนที่เป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าในตัว ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าจะถูกเก็บไว้ในแบตเตอรี่ในรถยนต์และแปลงพลังงานจลน์โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในระหว่างการเร่งความเร็วตามการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้า

Zou และคณะ [88] อธิบายว่าเนื่องจากแรงบิดมอเตอร์ AC ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในช่วงต้นปี 1990 ระบบลำเลียงแบบกระจายได้รับความนิยมมากขึ้นโดยใช้ลักษณะการเบรกที่ดีกว่าและมีข้อเสียน้อยลงเนื่องจากมอเตอร์หลายตัวที่มีกำลังไฟน้อยกว่าโดยส่วนใหญ่ไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษา แต่ถ้าเทียบกับเบรกแบบห้ามล้อกำลังเบรกสูงสุดต้องน้อยลงอย่างมากเนื่องจากต้องใช้แรงดันมาก ในทางกลับกันในการใช้งานยานยนต์ บนถนนเรียกว่ารถไฮบริดจ์ ซึ่งใช้ทั้งมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่และเครื่องยนต์เผาไหม้สันดาปภายในได้รับความนิยมอย่างมาก อันเนื่องมาจากมีอัตราการใช้น้ำมันที่มากกว่าสำหรับการประยุกต์นี้อุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ electric

energy storage devices (ESD) ได้มีการปรับปรุงอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ เช่น แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและตัวเก็บประจุแบบสองชั้นแบบไฟฟ้า electric double-layer capacitor (EDLC) นักวิจัยได้นำเสนอเทคโนโลยีที่ทันสมัยที่สุดในสองหัวข้อนี้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศญี่ปุ่น และเสนอการรวมกันของสององค์ประกอบที่สำคัญเหล่านี้พร้อมกับข้อดีต่าง ๆ ของ regenerative braking และ electric energy storage devices (ESD) คุณลักษณะที่สำคัญที่สุดของการรวมกันเป็นเรื่องง่ายในการฟื้นฟูพลังงานโดยไม่ต้องมีภาระมากในระบบโซ่และติดตั้งแรงฉุดซึ่งสามารถรับรู้ได้โดยการใช้คุณสมบัติ Overvoltage ของมอเตอร์และโดยการชาร์จหรือปล่อยกระแสไฟฟ้าส่วนเกินไปยังทั้งสองด้านคือ on-board หรือช่องทาง electric energy storage devices (ESD)

จากการศึกษาวิจัยของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเด็นของการศึกษาเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันซึ่งพบว่าด้วยเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle, EV) เป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจเป็นการประยุกต์จากแนวคิดของเทคโนโลยีขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าที่มีอยู่ด้วยการติดตั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดคู่ เพื่อทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานสูง เพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าชาร์จเข้ามาเก็บในแบตเตอรี่ ลดการพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก แต่ยังให้พลังงานไฟฟ้าในขนาดใกล้เคียงกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเดี่ยว ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่จะประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) และอินเวอร์เตอร์ (Inverter) จากมอเตอร์ไฟฟ้า 2 ตัวที่สามารถทำงานคู่กันได้ในกรณีที่ต้องการกำลังขับเคลื่อนสูง ๆ และอีกช่วงเวลาหนึ่งก็จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ โดยยานยนต์จะถูกขับเคลื่อนด้วยกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าหลักเท่านั้น ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ถูกส่งมาที่มอเตอร์ไฟฟ้า จะถูกเก็บอยู่ในแบตเตอรี่กำลังสูง ที่มีมอเตอร์อีกตัวหนึ่งคอยทำหน้าที่สร้างกระแสไฟฟ้าเข้ามาเก็บอยู่ตลอดเวลา มอเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะไม่เชื่อมต่อเข้ากับชุดส่งกำลังหรือเกียร์โดยตรง แต่จะทำงานเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าและชาร์จเข้ามาเก็บในแบตเตอรี่ก่อนที่กระแสไฟฟ้านี้จะถูกส่งไปสู่มอเตอร์ไฟฟ้าในการสร้างกำลังเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนตัวรถ ระบบมอเตอร์คู่ นี้จะต่างจากระบบไฮบริดจ์ เพราะในระบบไฮบริดจ์ ทั่วไปมอเตอร์ไฟฟ้า จะไม่ทำงานในภาวะที่แบตเตอรี่มีกำลังไฟฟ้าต่ำ หรือในย่านความเร็วสูงขณะเดียวกันระบบมอเตอร์ไฟฟ้าคู่ ยังแตกต่างกับรถยนต์ไฟฟ้าที่ได้รับพลังงานไฟฟ้าจากการชาร์จ แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว สำหรับโครงสร้างของระบบรถยนต์ไฟฟ้าแบบมอเตอร์คู่ ไม่จำเป็นต้องใช้แบตเตอรี่ขนาดใหญ่เป็นแหล่งกำลังหลักในการขับเคลื่อน ซึ่งทำให้ง่ายต่อการพัฒนาเรื่องของระยะทางที่ไกลขึ้นและน้ำหนักของตัวรถยนต์ก็สามารถทำให้เบาลงได้ รวมไปถึงการพัฒนาวิธีควบคุมมอเตอร์และจัดการพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งผลที่ได้ทำให้ชาร์จพลังงานได้มากขึ้น และมีแบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็กลง แต่ให้ความรู้สึกในการขับขี่เช่นเดียวกับรถยนต์ไฟฟ้าทั่วไป แต่สามารถลดความวิตกกังวลเมื่อต้องหาสถานีชาร์จไฟฟ้าได้อีกด้วย

2.9 บทสรุป

บทนี้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า กลศาสตร์การเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า มอเตอร์สำหรับการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ประเภทและโครงสร้างของระบบการขับเคลื่อน หลักการทำงานรวมไปถึง แบตเตอรี่ ชุดควบคุมระบบกำลังไฟฟ้ากำลังสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยกล่าวถึงประเภท โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทั้งการทำงานในโหมดที่เป็นมอเตอร์ (ขับเคลื่อน) และโหมดที่เป็นเครื่องกำเนิด (เบรก) ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์คู่ของยานยนต์ไฟฟ้า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การประหยัดพลังงานโดยเน้นไปที่การผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งเป็นพื้นฐานที่จะนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้

พหูนํ ปณฺฑิโต ชีเว

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

การศึกษาคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อนำมาใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ต้องศึกษาคุณสมบัติแรงบิดและความเร็วรอบเป็นสำคัญ เนื่องจากงานระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าเป็นงานที่ต้องใช้แรงฉุดในการเริ่มออกตัว การเร่งความเร็วเพื่อไต่ทางลาดชันหรือฉุดโหลดในการแซง การวิ่งที่ความเร็วคงที่ หรือวิ่งในชุมชนเมือง และการเบรกคืนค่าพลังงานให้กับแหล่งจ่ายได้อีกด้วย ซึ่งคณะผู้วิจัยจะทำการจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์คู่ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะของระบบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดคู่ ทั้งในโหมดที่เป็นมอเตอร์(ขับโหลด) และโหมดที่เป็นเครื่องกำเนิด(การเบรก) ดังกล่าวแล้วนั้น สำหรับรายละเอียดในบทนี้จะแสดงถึงโครงสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ วิธีการดำเนินการวิจัยและการวิเคราะห์สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก หลังจากที่ได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับหลักการออกแบบระบบขับเคลื่อนแล้วนั้น ลำดับถัดมาจะเป็นการสร้างขั้นตอนวิธีการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วนำมาสร้างชุดทดลองจริงและทดสอบในลำดับถัดไป เพื่อให้ได้งานออกมาตามขอบเขตที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

จากโครงสร้างของวงจรภาคกำลังในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ ทำให้สามารถควบคุมทิศทางการไหลของพลังงานให้ไหลเข้าหรือไหลออกได้ตามความต้องการ ซึ่งการนำเสนอวิธีการดำเนินการวิจัยเรื่องอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนวิธีวิจัย ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกด้วยหลักทฤษฎี

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกโดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตมอเตอร์ (datasheet)

ขั้นตอนที่ 3 การเก็บข้อมูลการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกจากการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 4 การเปรียบเทียบและสรุปผลที่ได้จากการทดสอบในแต่ละขั้นตอน

โดยสามารถนำเสนอการศึกษาวิจัยหลักการและวิธีการดำเนินงานวิจัยสำหรับการศึกษาถึงอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรกดังต่อไปนี้

พหุนาม ชีเว

3.2 การศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าขณะเบรกด้วยหลักทฤษฎี

การเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้าจะต้องอาศัยแรงขับเคลื่อนที่ถ่ายทอดมาจากมอเตอร์ไฟฟ้าจนถึงล้อยานยนต์ แรงขับเคลื่อนจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างยางกับถนนซึ่งจะส่งผลให้ยานยนต์เคลื่อนที่ไปได้เมื่อนำแรงขับเคลื่อนมาพิจารณาพร้อมกับอัตราเร็วของยานยนต์ จะได้เป็นกำลังขับเคลื่อนในการส่งกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นการศึกษาและการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากมอเตอร์ไฟฟ้ารวมไปถึงการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกของยานยนต์ไฟฟ้าดังต่อไปนี้

3.2.1 ทำการศึกษาระบบกำลังขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า

ระบบการขับเคลื่อนของยานยนต์นั้น มีปัจจัยและตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญเกี่ยวกับการขับเคลื่อนยานยนต์ จึงมีความจำเป็นต้องมีการประเมินถึงระบบแรงเคลื่อน แรงต้านการเคลื่อนที่ มวลของรถ และความเร่งของการเคลื่อนที่ รวมไปถึงการประเมินการใช้พลังงานต่อระยะการขับขี่ ซึ่งการผลิตพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าเองได้นั้น ทั้งนี้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อที่จะช่วยให้การประเมินพิกัดกำลังของต้นกำลังและพิกัดกำลังงานของแหล่งพลังงานที่ป้อน และพิกัดการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก รวมไปถึงระยะทางในการขับขี่อ้างถึงสมการกำลังของยานยนต์ในบทที่ 2 ดังต่อไปนี้

$$F_{rr} = \mu_{rr} N = \mu_{rr} mg \cos(\alpha) \tag{3.1}$$

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \tag{3.2}$$

$$F_{rg} = mg \sin(\alpha) \tag{3.3}$$

$$F_{acc} = ma \tag{3.4}$$

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{rg} + F_{acc} \tag{3.5}$$

ซึ่งค่ากำลังขับเคลื่อนยานยนต์สามารถหาค่าได้จากสมการดังนี้

$$P_{te} = F_{te} v \tag{3.6}$$

เมื่อใช้มาตรฐานพื้นผิวการทดสอบรถยนต์ตามมาตรฐานของกรมการขนส่งทางบก ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและพิจารณาการทดสอบบนถนนราบ ซึ่งให้ค่ามุมความลาดเอียงของพื้น

พหุน ปณ สิต ชีเว

ถนน ทดสอบในทางราบปกติ ให้ความหนาแน่นของอากาศเป็นสภาพอากาศปรกติ พื้นที่หน้าตัดรถยนต์ส่วนบุคคลเป็นไปตามขนาดมาตรฐานและพิจารณาชั่วขณะเวลาก่อนทำการเบรกซึ่งจะได้ ดังในสมการ 3.5 จะได้ว่า

$$F_{te} = \left[\mu_{rr} mg \cos(\alpha) + \frac{1}{2}\rho C_d A v^2 + mg \sin\alpha + ma \right] \quad (3.7)$$

จากสมการ 3.6 จะได้

$$P_{te} = \left[\mu_{rr} mg \cos(\alpha) + \frac{1}{2}\rho C_d A v^2 + mg \sin(\alpha) + ma \right] v \quad (3.8)$$

แทนค่าคงที่ให้กับตัวแปรต่างๆ ในการหาค่ากำลังขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งใช้มาตรฐานพื้นผิวการทดสอบค่า μ_{rr} = 0.012 ค่ามุมความลาดเอียงของพื้นถนน Alpha α = 0 องศา ความหนาแน่นของอากาศเป็นสภาพอากาศปรกติ ρ = 1.225 kg.m^{-3} พื้นที่หน้าตัดรถยนต์ส่วนบุคคลขนาดมาตรฐาน A = 1.9 m^2 และพิจารณาชั่วขณะเวลาก่อนทำการเบรกซึ่งจะได้ว่า a = 0 แทนค่าตัวแปร μ_{rr} = 0.012, Alpha(α)=0, air ρ =1.225, A = 1.9, C_d =0.3 และ a = 0 ลงในสมการ 3.8 จะได้ว่า

$$P_{te} = \left[0.118m + 0.349v^2 + ma \right] v \quad (3.9)$$

กำหนดให้ a = 0 ในสภาวะก่อนทำการเบรก จะได้

$$m = \frac{1}{0.118}\left(\frac{P_{te}}{v} - 0.349v^2 \right) \quad (3.10)$$

ทำการแปลงสมการให้อยู่ในรูป $m = f(P)$ เมื่อ v คืออัตราเร็วขณะพิจารณาใด ๆ จะได้ว่า

$$m = aP + b \quad (3.11)$$

3.2.2 ทำการออกแบบการคำนวณค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์คู่

เมื่อพิจารณาให้ $P = P1 + P2$ เป็นค่ากำลังของมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งมีน้ำหนัก m_1 และ m_2 ตามลำดับ จากสมการ 3.8 เพื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเบรก

พหุน ปญ ศึโต ชีเว

จากสมการ $P_{te}=\left[\mu_{rr}mg\cos\alpha+\frac{1}{2}\rho C_d Av^2+mg\sin\alpha+ma\right]v$ แล้วทำการหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะเบรก (G_{te}) เมื่อกำหนดให้ $G_{te}=-P_{te}$ จะได้ว่า

$$G_{te}=-\left[\mu_{rr}mg\cos\alpha+\frac{1}{2}\rho C_d Av^2+mg\sin\alpha+ma\right]v \tag{3.12}$$

แทนค่าลงในสมการ 3.12 จะได้ว่า

$$G_{te}=-\left[0.118m+0.349v^2+ma\right]v \tag{3.13}$$

แทนค่า $m=\frac{1}{0.118}\left(\frac{P_{te}}{v}-0.349v^2\right)$ ลงในสมการ 3.13 จะได้ว่า

$$G_{te}=-\left[\left(P_{te}-0.349v^3\right)+0.349v^3+\left(\frac{P_{te}}{0.118}-2.958v^3\right)a\right] \tag{3.14}$$

จากสมการ

$$G_{te}=G_{m1}+G_{m2} \tag{3.15}$$

และสมการ

$$P_{te}=P_{m1}+P_{m2} \tag{3.16}$$

ดังนั้นทำการกำหนดค่า G_{m1} และ G_{m2} แทน G_{te} ในสมการ 3.14 จะได้ว่า

$$G_{m1}=-\left[\left(P_{m1}-0.349v^3\right)+0.349v^3+\left(\frac{P_{m1}}{0.118}-2.958v^3\right)a\right] \tag{3.17}$$

และ

$$G_{m2}=-\left[\left(P_{m2}-0.349v^3\right)+0.349v^3+\left(\frac{P_{m2}}{0.118}-2.958v^3\right)a\right] \tag{3.18}$$

เมื่อกำหนดอัตราส่วน $K_t=P_{m2}/P_{m1}$ แทนค่าลงในสมการ 3.16 จะได้ว่า

$$P_{m2} = K_t P_{m1} \tag{3.19}$$

เนื่องจากกำหนดให้ มอเตอร์ตัวที่ 1 เป็นมอเตอร์หลัก ในการขับโหลดและมอเตอร์ตัวที่ 2 เป็นมอเตอร์ช่วยในการขับเคลื่อน จะได้ว่า

$$G_{m2} = -\left[\left(K_t P_{m1} - 0.349v^3\right) + 0.349v^3 + \left(\frac{K_t P_{m1}}{0.118} - 2.958v^3\right)a\right] \tag{3.20}$$

จากสมการ $P_{te} = P_{m1} + P_{m2}$ จะได้ว่า

$$P_{te} = P_{m1} + K_t(P_{m1}) \tag{3.21}$$

เพราะฉะนั้น

$$P_{te} = P_{m1}\left(1 + K_t\right) \tag{3.22}$$

จะได้ว่า

$$P_{m1} = \frac{P_{te}}{\left(1 + K_t\right)} \tag{3.23}$$

จากสมการ 3.23 แทนค่าลงในสมการ 3.17 จะได้ว่า

$$G_{m1} = -\left[\left(\frac{P_{te}}{\left(1 + K_t\right)} - 0.349v^3\right) + 0.349v^3 + \left(\frac{P_{te}}{\left(1 + K_t\right)0.118} - 2.958\,\mathrm{v}^3\right)a\right] \tag{3.24}$$

และสมการ 3.23 แทนค่าลงในสมการ 3.20 จะได้ว่า

$$G_{m2} = -\left[\left(\frac{K_t P_{te}}{\left(1 + K_t\right)} - 0.349v^3\right) + 0.349v^3 + \left(\frac{K_t P_{te}}{\left(1 + K_t\right)0.118} - 2.958\,\mathrm{v}^3\right)a\right] \tag{3.25}$$

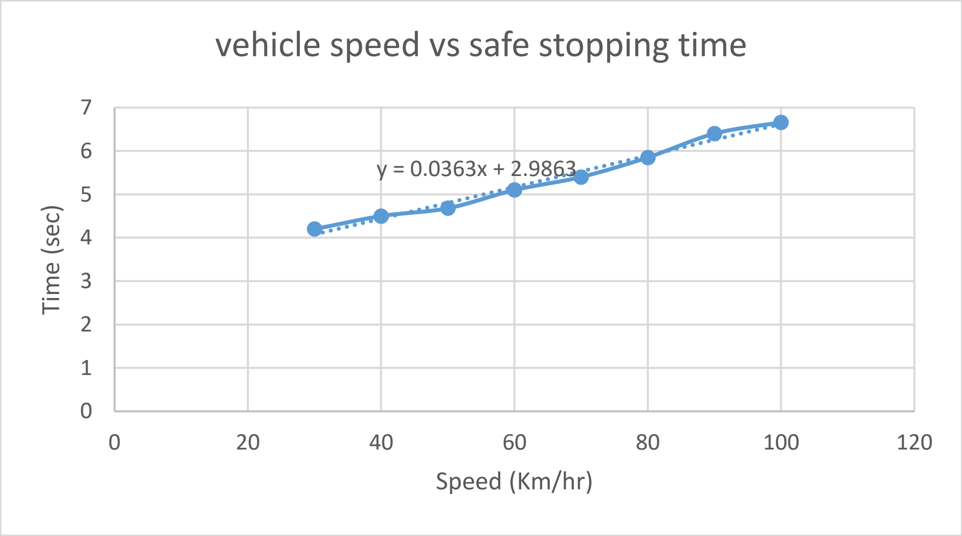
กำหนดให้ อัตราหน่วง (a) เป็นแบบเชิงเส้น จนกระทั่งรถหยุด

$$a = \frac{\left(v_2 - v_1\right)}{t} \tag{3.26}$$

และกำหนดให้ $v_2 = 0$ จะได้ว่า

$$a = \frac{-v_1}{t} \tag{3.27}$$

เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัย กำหนดให้มีอัตราหน่วง ในลักษณะเชิงเส้น จากสมการ 3.23 และสมการ 3.24 นำมาวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งหาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งสามารถหาอัตราเร็วของยานยนต์เมื่อเทียบกับเวลาของระยะขับขี่ที่ปลอดภัยดังภาพประกอบ 28 ซึ่งจะทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของยานยนต์ไฟฟ้าดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 28 แสดงอัตราเร็วเทียบกับเวลาในระยะการขับขี่ที่ปลอดภัย

3.2.3 ทำการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าขณะเบรกในระยะความเร็วที่แตกต่างกัน

การทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการเบรกในระยะความเร็วที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลถึงการผลิตกำลังไฟฟ้าจากการที่หยุดจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า ช่วงเวลาการเบรกนี้การเคลื่อนที่ของยานยนต์นั้นจะส่งผลให้มอเตอร์จะเปลี่ยนสถานะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากการหมุนด้วยแรงเฉื่อยของยานยนต์ จึงสามารถประมาณค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกได้ดังต่อไปนี้

ตาราง 6 แสดงเงื่อนไขในการทดสอบอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็วต่าง ๆ

กรณีทดสอบ	เงื่อนไขการทดสอบ
90 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
80 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
70 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
60 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
50 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
40 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
30 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
20 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
10 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่

3.2.4 ทำการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการเบรกด้วยวิธีการคำนวณ

โดยผลการศึกษาและผลการทดสอบสามารถนำเสนอได้ในบทถัดไปในส่วนของการวิเคราะห์จากการศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกด้วยหลักทฤษฎีตามหลักการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะทำให้ทราบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของมอเตอร์คู่ ซึ่งในแต่ละกรณีของน้ำหนักของมอเตอร์กับกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละตัว สำหรับการหาค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์ทั้งสองตัวในแต่ละกรณีในการนำมาทดสอบและวิเคราะห์อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ได้จากการเบรกสำหรับการนำมาใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า

3.3 การศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกโดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตมอเตอร์ (datasheet)

การศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะรถเบรกในส่วนนี้จะเหมือนกับหัวข้อ 3.2 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังงาน (P) กับน้ำหนัก (m), กำลังไฟฟ้าป้อนกลับ (G) กับน้ำหนัก (m) และกำลังป้อนกลับขณะเบรก ($G_{m1,2}$) และกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรกรวม ($G_{\max}$) นำมาจากการเก็บรวบรวมข้อมูล datasheet ของมอเตอร์เหนี่ยวนำของผู้ผลิต

3.3.1 ทำการศึกษารายละเอียดกำลังและน้ำหนักของมอเตอร์โดยรวมจากบริษัทผู้ผลิต

การศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะรถเบรกในส่วนนี้เหมือนกับหัวข้อ 3.2.1 แต่ความสัมพันธ์ระหว่าง (P และ m), (G และ m), ($G_{m1,2}$ และ $G_{\max}$) นำมาจากการเก็บ

รวบรวมข้อมูล datasheet ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสของผู้ผลิตมอเตอร์จะได้ค่าน้ำหนักของมอเตอร์จากโดยทำการแปลงสมการในรูปสมการ $m = aP^2 + bP + c$ จะได้ดังสมการดังนี้

$$m = -0.0058P^2 + 7.7536P + 10.61 \tag{3.28}$$

3.3.2 ทำการออกแบบการคำนวณและวิเคราะห์ผลการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาให้ $G_{te} = G_{m1} + G_{m2}$ เป็นค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งมีน้ำหนัก m_1 และ m_2 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการผลิตกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเบรก จากสมการ $P_{te} = \left[\mu_{rr} mg\cos\alpha + \frac{1}{2}\rho C_d A v^2 + mg\sin\alpha + ma\right]v$ แล้วทำการหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะเบรก (G_{te}) ซึ่งกำหนดให้ $G_{te} = -P_{te}$ จะได้ว่า

$$G_{te} = -\left[\mu_{rr} mg\cos\alpha + \frac{1}{2}\rho C_d A v^2 + mg\sin\alpha + ma\right]v \tag{3.29}$$

แทนค่าในสมการ 3.29 จะได้ว่า

$$G_{te} = -\left[0.118m + 0.349v^2 + ma\right]v \tag{3.30}$$

แทนค่า $m = -0.0058P^2 + 7.7536P + 10.61$ ลงในสมการ 3.30 จะได้ว่า

$$G_{te} = -\left[\begin{array}{l}\left(-0.000684P^2 + 0.9149P + 1.2519\right)v + 0.349v^3 \\ +\left(-0.0058P^2 + 7.7536P + 10.61\right)av\end{array}\right] \tag{3.31}$$

จากสมการ $G_{te} = G_{m1} + G_{m2}$ แล้วทำการกำหนดค่า กำหนดค่า G_{m1} และ G_{m2} แทนค่า G_{te} ลงในสมการ 3.31 จะได้ว่า

$$G_{m1} = -\left[\begin{array}{l}\left(-0.000684P_{m1}^{\ 2} + 0.9149P_{m1} + 1.2519\right)v + 0.349v^3 \\ +\left(-0.0058P_{m1}^{\ 2} + 7.7536P_{m1} + 10.61\right)av\end{array}\right] \tag{3.32}$$

และสมการ

$$G_{m2} = -\begin{bmatrix} \left(-0.000684 P_{m2}{}^{2} + 0.9149 P_{m2} + 1.2519\right) v + 0.349 v^{3} \\ + \left(-0.0058 P_{m2}{}^{2} + 7.7536 P_{m2} + 10.61\right) av \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

จากสมการ $P_{te} = P_{m1} + P_{m2}$ เมื่อทำการกำหนดอัตราส่วน $K_t = P_{m2} / P_{m1}$ แทนลงในสมการจะได้ว่า $P_{m2} = K_t P_{m1}$ เนื่องจากกำหนดให้ มอเตอร์ตัวที่ 1 เป็นมอเตอร์หลัก ในการขับโหลด และมอเตอร์ตัวที่ 2 เป็นมอเตอร์ช่วยขับ ซึ่งจะได้ว่า

$$G_{m2} = -\begin{bmatrix} \left(-0.000684 (K_t P_{m1})^{2} + 0.9149 (K_t P_{m1}) + 1.2519\right) v + 0.349 v^{3} \\ + \left(-0.0058 (K_t P_{m1})^{2} + 7.7536 (K_t P_{m1}) + 10.61\right) av \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

จากสมการ $P_{te} = P_{m1} + P_{m2}$ แทนค่า $P_{m2} = K_t P_{m1}$ จะได้ $P_{te} = P_{m1} + K_t P_{m1}$ เพราะฉะนั้นจะได้ $P_{te} = P_{m1}(1 + K_t)$ ซึ่งจะได้ว่า $P_{m1} = \dfrac{P_{te}}{(1 + K_t)}$ ดังนั้นแทนค่าลงในสมการ 3.32 จะได้ว่า

$$G_{m1} = -\begin{bmatrix} \left(-0.000684 \left(\dfrac{P_{te}}{1+K_t}\right)^{2} + 0.9149 \left(\dfrac{P_{te}}{1+K_t}\right) + 1.2519\right) v + 0.349 v^{3} \\ + \left(-0.0058 \left(\dfrac{P_{te}}{1+K_t}\right)^{2} + 7.7536 \left(\dfrac{P_{te}}{1+K_t}\right) + 10.61\right) av \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

จากสมการ $P_{m1} = \dfrac{P_{te}}{(1 + K_t)}$ แทนค่าลงในสมการ 3.34 จะได้ว่า

$$G_{m2} = -\begin{bmatrix} \left(-0.000684 \left(\dfrac{K_t P_{te}}{1+K_t}\right)^{2} + 0.9149 \left(\dfrac{K_t P_{te}}{1+K_t}\right) + 1.2519\right) v + 0.349 v^{3} \\ + \left(-0.0058 \left(\dfrac{K_t P_{te}}{1+K_t}\right)^{2} + 7.7536 \left(\dfrac{K_t P_{te}}{1+K_t}\right) + 10.61\right) av \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

3.3.3 การประมาณค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าเมื่อเทียบกับกำลังและน้ำหนักของมอเตอร์

การทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการเบรกในระยะความเร็วที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลถึงการผลิตกำลังไฟฟ้าจากการที่หยุดจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า ช่วงเวลาการเบรกนี้การ

เคลื่อนที่ของยานยนต์นั้นจะส่งผลให้มอเตอร์จะเปลี่ยนสถานะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากการหมุนด้วยแรงเฉื่อยของยานยนต์ จึงสามารถประมาณค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกได้ดังต่อไปนี้

ตาราง 7 แสดงเงื่อนไขในการทดสอบความแตกต่างระหว่างน้ำหนักมอเตอร์กับอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็วต่าง ๆ ก่อนการเบรก

กรณีทดสอบ	เงื่อนไขการทดสอบ
90 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
80 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
70 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
60 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
50 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
40 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
30 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
20 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่
10 km/hr	ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์คู่

3.3.4 ทำการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการเบรกด้วยวิธีการคำนวณ

โดยผลการศึกษาและผลการทดสอบสามารถนำเสนอได้ในบทถัดไปในส่วนของการวิเคราะห์จากการศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกด้วยการประเมินจากข้อมูลของผู้ผลิตมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้ทราบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของมอเตอร์คู่ ในแต่ละกรณีของน้ำหนักของมอเตอร์กับกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละตัว สำหรับการหาค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์ทั้งสองตัวในแต่ละกรณีในการนำมาทดสอบและวิเคราะห์อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ได้จากการเบรกสำหรับการนำมาใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าได้อีกรูปแบบหนึ่ง

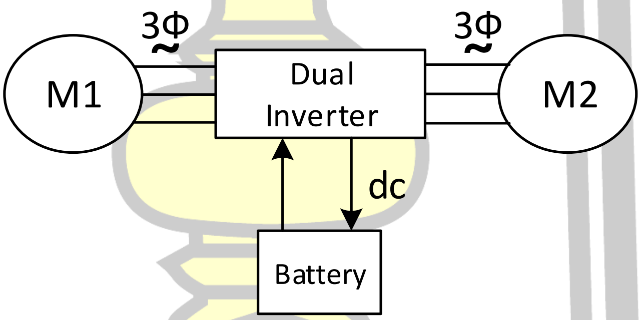
3.4 การเก็บข้อมูลการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกจากการทดสอบ

เนื่องจากในปัจจุบันรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเดี่ยวนั้นยังคงมีข้อด้อยด้วยการเป็นตัวขับเคลื่อนหลักการชาร์ตพลังงานให้กับแบตเตอรี่ต้องอาศัยหลักการเบรกรีเจนเนอเรทีฟเป็นหลักเท่านั้นการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสคู่ จะสามารถแก้ปัญหา

ดังกล่าวได้ผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดที่จะทำการออกแบบและติดตั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสคู่ ด้วยการใช้งานมอเตอร์ที่มีพิกัดกำลังต่างกันทำงานแยกอิสระจากกันและสามารถควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสคู่ มอเตอร์หลักใช้สำหรับการขับเคลื่อนปกติและสามารถรีเจนเนอเรทีฟในช่วงของการเบรก หรือช่วงเวลาที่ชะลอความเร็วในการขับขี่ ส่วนมอเตอร์อีกหนึ่งตัวจะทำการจ่ายพลังงานคืนกลับหรือที่เรียกว่า ระบบพลังงานรีเจนเนอเรทีฟ โดยการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสคู่นี้ ให้การทำงานอิสระต่อกันโดยการนำวงจรแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์คู่มาใช้ในการควบคุมระบบของยานยนต์ไฟฟ้า

3.4.1 ทำการออกแบบโครงสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสถูกนำมาใช้ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ของยานยนต์ไฟฟ้าดังแสดงในภาพประกอบ 29 เป็นการแสดงไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จำนวน 2 ตัว (Motor1 และ Motor2), อินเวอร์เตอร์ จำนวน 1 ชุด (Dual-inverter) และ ชุดจัดเก็บพลังงาน จำนวน 1 ชุดซึ่งในที่นี้เป็น แบตเตอรี่ (Battery)



ภาพประกอบ 29 แสดงไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่

ซึ่งทั้งสองมอเตอร์มีลักษณะทางกลเหมือนกัน แต่มีสัดส่วนค่าพิกัดกำลังเป็นอัตราส่วนโดยตรง สำหรับอินเวอร์เตอร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้อินเวอร์เตอร์เป็นแบบ Dual inverter ที่สามารถทำงานได้ทั้งในโหมด 4 รูปแบบหลัก (Four-Quadrant Operation) ได้ ในงานวิจัยนี้ได้นำทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์ในบทที่ 2 มาประยุกต์ใช้งานเป็นอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current-source inverter: CSI) ทั้งนี้เพื่อให้สามารถควบคุมกระแสได้โดยตรงส่วนโครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมคู่สามเฟส (Three Phase Dual Inverter) วงจรประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส จำนวน 2 วงจรต่อขนานกันอยู่โดยกลับทิศทางการวางตัวของชุดวงจร ส่วนแบตเตอรี่ (battery) จะเป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าและจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนในยานยนต์ไฟฟ้า โดยมี

อินเวอร์เตอร์ (inverter) เป็นตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากแบตเตอรี่ไปเป็นกระแสสลับ เพื่อจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แบตเตอรี่ที่นิยมนำมาใช้งานเป็นชุดพลังงานสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าทั่ว ๆ ไป โดยต้องมีแผงวงจรสำหรับเก็บประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้กำหนดให้สามารถมีค่ากระแสป้อนได้ไม่จำกัด แต่มีค่าระดับแรงดันตั้งแต่ 48 โวลต์ ขึ้นไปซึ่งเป็นระดับแรงดันที่นิยมใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน

3.4.2 ทำการทดสอบระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดคู่

ทำการทดสอบพิกัดมอเตอร์ในการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะรถเบรกจริง เพื่อให้การวิจัยเป็นไปตามวิธีการออกแบบสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ 100% อย่างอิสระ ซึ่งจะสมมติให้ค่าพิกัดของมอเตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดในช่วง 0% - 100% โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้ 1) มอเตอร์ขณะทำงานในสภาวะปกติต้องใช้กำลัง (P=75%) และอีก 25% สามารถขับกลับได้ 2) หากมอเตอร์ 1 ตัวมีค่าพิกัดสูงกว่า 75% ที่เหลืออีก 25% สามารถเป็นเครื่องกำเนิดได้ทันทีดังแสดงในตารางการทดสอบหาอัตราส่วนสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสคู่สามารถทำการทดสอบดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 8 การทดสอบระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดคู่

กรณีทดสอบ	รูปแบบการทดสอบ	พิกัดของมอเตอร์
การทดสอบที่ 1	Full load (100%)	4000 W
การทดสอบที่ 2	High load (75%)	3000 W
การทดสอบที่ 3	Half load (50%)	2000 W
การทดสอบที่ 4	Light load (25%)	1000 W

ซึ่งกรณีการทดสอบที่ 1 จะทำการทดสอบที่ Full load (100%) ของพิกัดมอเตอร์ทั้งสองรวมกันมีค่าเท่ากับ 4 kW ในกรณีการทดสอบที่ 2 จะทำการทดสอบที่ High load (75%) ของพิกัดมอเตอร์ทั้งสองรวมกันเท่ากับ 3 kW ในกรณีการทดสอบที่ 3 จะทำการทดสอบที่ Half load (50%) ของพิกัดมอเตอร์ทั้งสองรวมกันเท่ากับ 2 kW และในกรณีการทดสอบที่ 4 จะทำการทดสอบที่ Light load (25%) ของพิกัดมอเตอร์ทั้งสองรวมกัน เท่ากับ 1 kW

การทดสอบที่ 1 ทดสอบที่ Full load (100%) ของพิกัดมอเตอร์ เท่ากับ 4 kW

นำมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จำนวน 2 ตัว มาทำการทดสอบหาค่าพลังงานที่เกิดขึ้นในขณะเบรกคืนพลังงานตามพิกัดมอเตอร์ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 9 อัตราส่วนสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสคู่ที่โหลด 100%

พิกัดมอเตอร์	ขณะวิ่ง		ขณะเบรก		พิกัดมอเตอร์	ขณะวิ่ง		ขณะเบรก	
	M1	M2	M1	M2		M1	M2	M1	M2
100 : 0	M	G	G	G	**75 : 25**	M	M	G	G
99 : 1	M	M	G	G	**74 : 26**	M	M	G	G
98 : 2	M	M	G	G	**73 : 27**	M	M	G	G
97 : 3	M	M	G	G	**72 : 28**	M	M	G	G
96 : 4	M	M	G	G	**71 : 29**	M	M	G	G
95 : 5	M	M	G	G	**70 : 30**	M	M	G	G
94 : 6	M	M	G	G	**60 : 31**	M	M	G	G
93 : 7	M	M	G	G	**68 : 32**	M	M	G	G
92 : 8	M	M	G	G	**67 : 33**	M	M	G	G
91 : 9	M	M	G	G	**66 : 34**	M	M	G	G
90 : 10	M	M	G	G	**65 : 35**	M	M	G	G
89 : 11	M	M	G	G	**64 : 36**	M	M	G	G
88 : 12	M	M	G	G	**63 : 37**	M	M	G	G
87 : 13	M	M	G	G	**62 : 38**	M	M	G	G
86 : 14	M	M	G	G	**61 : 39**	M	M	G	G
85 : 15	M	M	G	G	**60 : 40**	M	M	G	G
84 : 16	M	M	G	G	**59 : 41**	M	M	G	G
83 : 17	M	M	G	G	**58 : 42**	M	M	G	G
82 : 18	M	M	G	G	**57 : 43**	M	M	G	G
81 : 19	M	M	G	G	**56 : 44**	M	M	G	G
80 : 20	M	M	G	G	**55 : 45**	M	M	G	G
79 : 21	M	M	G	G	**54 : 46**	M	M	G	G
78 : 22	M	M	G	G	**53 : 47**	M	M	G	G
77 : 23	M	M	G	G	**52 : 48**	M	M	G	G
76 : 24	M	M	G	G	**51 : 49**	M	M	G	G
75 : 25	M	M	G	G	**50 : 50**	M	M	G	G

หมายเหตุ : M1 คือ มอเตอร์ตัวที่1, M2 คือ มอเตอร์ตัวที่2, M คือ ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ และ G คือ ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิด

การทดสอบที่ 2 ทดสอบที่ High load (75%) ของพิกัดมอเตอร์ เท่ากับ 3 kW

นำมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จำนวน 2 ตัว มาทำการทดสอบหาค่าพลังงานที่เกิดขึ้นในขณะเบรกคืนพลังงานตามพิกัดมอเตอร์ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 10 อัตราส่วนสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสคู่ที่โหลด 75%

พิกัด	ขณะวิ่ง		ขณะเบรก		พิกัด	ขณะวิ่ง		ขณะเบรก	
มอเตอร์	M1	M2	M1	M2	มอเตอร์	M1	M2	M1	M2
100 : 0	M	G	G	G	**75 : 25**	M	M	G	G
99 : 1	M	M	G	G	**74 : 26**	M	M	G	G
98 : 2	M	M	G	G	**73 : 27**	M	M	G	G
97 : 3	M	M	G	G	**72 : 28**	M	M	G	G
96 : 4	M	M	G	G	**71 : 29**	M	M	G	G
95 : 5	M	M	G	G	**70 : 30**	M	M	G	G
94 : 6	M	M	G	G	**60 : 31**	M	M	G	G
93 : 7	M	M	G	G	**68 : 32**	M	M	G	G
92 : 8	M	M	G	G	**67 : 33**	M	M	G	G
91 : 9	M	M	G	G	**66 : 34**	M	M	G	G
90 : 10	M	M	G	G	**65 : 35**	M	M	G	G
89 : 11	M	M	G	G	**64 : 36**	M	M	G	G
88 : 12	M	M	G	G	**63 : 37**	M	M	G	G
87 : 13	M	M	G	G	**62 : 38**	M	M	G	G
86 : 14	M	M	G	G	**61 : 39**	M	M	G	G
85 : 15	M	M	G	G	**60 : 40**	M	M	G	G
84 : 16	M	M	G	G	**59 : 41**	M	M	G	G
83 : 17	M	M	G	G	**58 : 42**	M	M	G	G
82 : 18	M	M	G	G	**57 : 43**	M	M	G	G
81 : 19	M	M	G	G	**56 : 44**	M	M	G	G
80 : 20	M	M	G	G	**55 : 45**	M	M	G	G
79 : 21	M	M	G	G	**54 : 46**	M	M	G	G
78 : 22	M	M	G	G	**53 : 47**	M	M	G	G
77 : 23	M	M	G	G	**52 : 48**	M	M	G	G
76 : 24	M	M	G	G	**51 : 49**	M	M	G	G
75 : 25	M	M	G	G	**50 : 50**	M	M	G	G

หมายเหตุ : M1 คือ มอเตอร์ตัวที่1, M2 คือ มอเตอร์ตัวที่2, M คือ ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ และ G คือ ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิด

การทดสอบที่ 3 ทดสอบที่ half load (50%) ของพิกัดมอเตอร์ เท่ากับ 2 kW

นำมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จำนวน 2 ตัว มาทำการทดสอบหาค่าพลังงานที่เกิดขึ้นในขณะเบรกคืนพลังงานตามพิกัดมอเตอร์ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 11 อัตราส่วนสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสคู่ที่โหลด 50%

พิกัด	ขณะวิ่ง		ขณะเบรก		พิกัด	ขณะวิ่ง		ขณะเบรก	
มอเตอร์	M1	M2	M1	M2	มอเตอร์	M1	M2	M1	M2
100 : 0	M	G	G	G	**75 : 25**	M	M	G	G
99 : 1	M	M	G	G	**74 : 26**	M	M	G	G
98 : 2	M	M	G	G	**73 : 27**	M	M	G	G
97 : 3	M	M	G	G	**72 : 28**	M	M	G	G
96 : 4	M	M	G	G	**71 : 29**	M	M	G	G
95 : 5	M	M	G	G	**70 : 30**	M	M	G	G
94 : 6	M	M	G	G	**60 : 31**	M	M	G	G
93 : 7	M	M	G	G	**68 : 32**	M	M	G	G
92 : 8	M	M	G	G	**67 : 33**	M	M	G	G
91 : 9	M	M	G	G	**66 : 34**	M	M	G	G
90 : 10	M	M	G	G	**65 : 35**	M	M	G	G
89 : 11	M	M	G	G	**64 : 36**	M	M	G	G
88 : 12	M	M	G	G	**63 : 37**	M	M	G	G
87 : 13	M	M	G	G	**62 : 38**	M	M	G	G
86 : 14	M	M	G	G	**61 : 39**	M	M	G	G
85 : 15	M	M	G	G	**60 : 40**	M	M	G	G
84 : 16	M	M	G	G	**59 : 41**	M	M	G	G
83 : 17	M	M	G	G	**58 : 42**	M	M	G	G
82 : 18	M	M	G	G	**57 : 43**	M	M	G	G
81 : 19	M	M	G	G	**56 : 44**	M	M	G	G
80 : 20	M	M	G	G	**55 : 45**	M	M	G	G
79 : 21	M	M	G	G	**54 : 46**	M	M	G	G
78 : 22	M	M	G	G	**53 : 47**	M	M	G	G
77 : 23	M	M	G	G	**52 : 48**	M	M	G	G
76 : 24	M	M	G	G	**51 : 49**	M	M	G	G
75 : 25	M	M	G	G	**50 : 50**	M	M	G	G

หมายเหตุ : M1 คือ มอเตอร์ตัวที่1, M2 คือ มอเตอร์ตัวที่2, M คือ ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ และ G คือ ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิด

การทดสอบที่ 4 ทดสอบที่ Light load (25%) ของพิกัดมอเตอร์ เท่ากับ 1 kW

นำมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จำนวน 2 ตัว มาทำการทดสอบหาค่าพลังงานที่เกิดขึ้นในขณะเบรกคืนพลังงานตามพิกัดมอเตอร์ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 12 อัตราส่วนสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสคู่ที่โหลด 25%

พิกัด	ขณะวิ่ง		ขณะเบรก		พิกัด	ขณะวิ่ง		ขณะเบรก	
มอเตอร์	M1	M2	M1	M2	มอเตอร์	M1	M2	M1	M2
100 : 0	M	G	G	G	**75 : 25**	M	M	G	G
99 : 1	M	M	G	G	**74 : 26**	M	M	G	G
98 : 2	M	M	G	G	**73 : 27**	M	M	G	G
97 : 3	M	M	G	G	**72 : 28**	M	M	G	G
96 : 4	M	M	G	G	**71 : 29**	M	M	G	G
95 : 5	M	M	G	G	**70 : 30**	M	M	G	G
94 : 6	M	M	G	G	**60 : 31**	M	M	G	G
93 : 7	M	M	G	G	**68 : 32**	M	M	G	G
92 : 8	M	M	G	G	**67 : 33**	M	M	G	G
91 : 9	M	M	G	G	**66 : 34**	M	M	G	G
90 : 10	M	M	G	G	**65 : 35**	M	M	G	G
89 : 11	M	M	G	G	**64 : 36**	M	M	G	G
88 : 12	M	M	G	G	**63 : 37**	M	M	G	G
87 : 13	M	M	G	G	**62 : 38**	M	M	G	G
86 : 14	M	M	G	G	**61 : 39**	M	M	G	G
85 : 15	M	M	G	G	**60 : 40**	M	M	G	G
84 : 16	M	M	G	G	**59 : 41**	M	M	G	G
83 : 17	M	M	G	G	**58 : 42**	M	M	G	G
82 : 18	M	M	G	G	**57 : 43**	M	M	G	G
81 : 19	M	M	G	G	**56 : 44**	M	M	G	G
80 : 20	M	M	G	G	**55 : 45**	M	M	G	G
79 : 21	M	M	G	G	**54 : 46**	M	M	G	G
78 : 22	M	M	G	G	**53 : 47**	M	M	G	G
77 : 23	M	M	G	G	**52 : 48**	M	M	G	G
76 : 24	M	M	G	G	**51 : 49**	M	M	G	G
75 : 25	M	M	G	G	**50 : 50**	M	M	G	G

หมายเหตุ : M1 คือ มอเตอร์ตัวที่1, M2 คือ มอเตอร์ตัวที่2, M คือ ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ และ G คือ ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิด

3.5 หลักการเทียบเทียบผลการศึกษาในแต่ละขั้นตอน

ขั้นตอนนี้เป็นการเปรียบเทียบในการดำเนินการขั้นตอนที่ 1 การศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะรถเบรกด้วยหลักทฤษฎีโดยใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์มาทำการหาค่ากำลังงานที่ออกมาจากมอเตอร์ในขณะเบรกคืนพลังงาน ลำดับขั้นตอนที่ 2 การศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะรถเบรกโดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตมอเตอร์ (datasheet) โดยทำการหาข้อมูลจากป้ายบอกกำลังงานของมอเตอร์แล้วทำการคำนวณหาค่ากำลังงานที่ได้จากมอเตอร์ในขณะเบรกคืนพลังงาน และเปรียบเทียบกับลำดับขั้นตอนที่ 3 การเก็บข้อมูลการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกคืนพลังงานจากการทดลองจริงในห้องทดสอบ แล้วทำการสรุปผลที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการทดลอง

3.6 วิเคราะห์การศึกษาและผลการทดสอบ

เก็บรวมรวบข้อมูลที่ได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ แรงบิด ความเร็ว กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ ในกรณี ที่มอเตอร์คู่ทำงานเป็นมอเตอร์ในการขับเคลื่อน มีโหลดที่ 100% 75% 50% และ25% ตามลำดับของกำลังไฟฟ้ารวมของมอเตอร์ทั้งสองตัว ทดสอบการปรับโหลดที่จ่ายให้กับมอเตอร์และทำการเบรก ที่โหลด 25% 50% 75% และ100% ตามลำดับของความเร็วพิกัด เพื่อมาวิเคราะห์สัดส่วนของมอเตอร์ในการสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรกรวมถึงวิเคราะห์สมรรถนะของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่เพื่อใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ตามที่ได้ออกแบบไว้และสรุปผลการทดสอบ

3.7 บทสรุป

จากการศึกษาคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อที่จะนำมาใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งมีความจำเป็นต้องศึกษาถึงกำลังไฟฟ้า น้ำหนัก คุณสมบัติแรงบิดและความเร็วรอบเป็นสำคัญ อันเนื่องมาจากงานระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าเป็นงานที่ต้องใช้แรงฉุดในการเริ่มออกตัว การเร่งความเร็วเพื่อไต่ทางลาดชัน หรือฉุดโหลดในการแซง การวิ่งที่ความเร็วคงที่หรือวิ่งในชุมชนเมือง ดังนั้นต้องมีระบบควบคุมทางระบบไฟฟ้าเป็นสำคัญ และสามารถทำการเบรกคืนค่าพลังงานให้กับแหล่งจ่ายได้อีกด้วย ซึ่งผู้วิจัยจะทำการทดสอบการทำงานของระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์คู่ เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดคู่ ที่ทำงานได้ทั้งในโหมดที่เป็นมอเตอร์ (ขับโหลด) และโหมดที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (การเบรก) สำหรับการคืนค่าพลังงานให้กับแบตเตอรี่ต่อไป

ทั้งนี้ผลการศึกษาและผลการทดลองสามารถทำได้ทั้งส่วนของการคำนวณจากสมการทางคณิตศาสตร์ วิเคราะห์จากการศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกด้วยการประเมินจากข้อมูลของผู้ผลิตมอเตอร์ และการทดลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดคู่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อศึกษาการทำงานและสมรรถนะของระบบ ซึ่งจะทำให้ทราบค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของมอเตอร์ทั้งสองตัวในแต่ละกรณีในการนำมาทดสอบและวิเคราะห์อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในการประจุแรงดันไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ได้อีกรูปแบบหนึ่งของการชาร์จกลับด้วยการคืนค่าพลังงานให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า

พหูน ปณฺ ฑิโต ชีเว

บาทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปราย

4.1 บทนำ

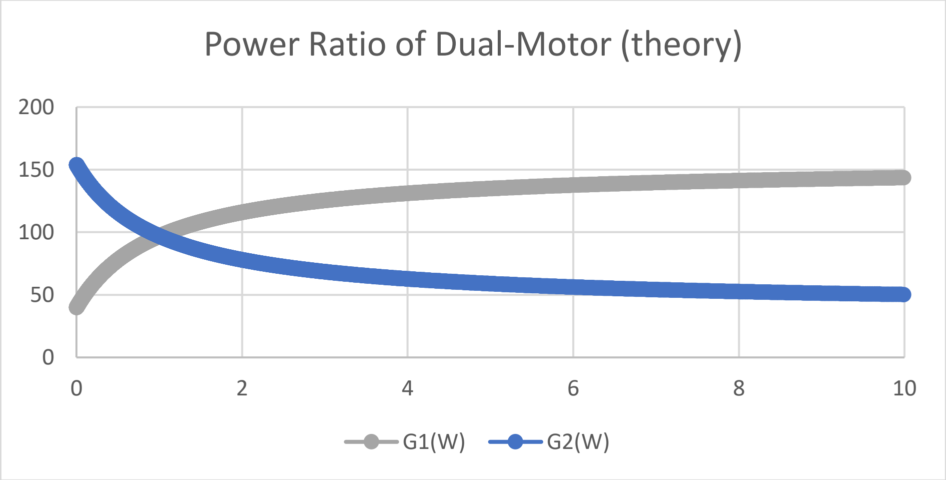
บทนี้นำเสนอถึงผลการศึกษา การทดลองและวิเคราะห์ระบบการผลิตกำลังไฟฟ้าในขณะเบรกของมอเตอร์ของมอเตอร์ขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าชนิดคู่ ซึ่งในการวิเคราะห์ผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์ การประเมินค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกของยานยนต์ ตามหลักทฤษฎี การประเมินการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกโดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตมอเตอร์ รวมถึงการจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์คู่ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะของระบบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดคู่ ทั้งในโหมดที่เป็นมอเตอร์(ขับโหลด) และโหมดที่เป็นเครื่องกำเนิด(การเบรก) ดังกล่าวแล้วนั้น สำหรับรายละเอียดในบทนี้จะแสดงถึงผลลัพธ์ของการวิเคราะห์สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าป้อนกลับในขณะเบรกของมอเตอร์ชนิดคู่ หลังจากที่ได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับหลักการออกแบบระบบขับเคลื่อนในระเบียบวิธีวิจัยแล้วนั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมาตามขอบเขตที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการดำเนินการวิจัยจึงจะได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

4.2 ผลการศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าขณะเบรกด้วยหลักทฤษฎี

ผลจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการประเมินค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกของยานยนต์ ตามหลักทฤษฎี เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในโหมดที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ได้จากการเบรก ผลของการวิเคราะห์สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก หลังจากที่ได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับหลักการออกแบบระบบขับเคลื่อนแล้วนั้น ทำให้ทราบผลการวิจัยในการศึกษาการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าขณะเบรกในระยะความเร็วที่แตกต่างกัน จากการเบรกของยานยนต์ไฟฟ้านั้นจะส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนสถานะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากการหมุนด้วยแรงเฉื่อยของยานยนต์ ด้วยสภาวะความเร็วของยานยนต์ที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้การผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะการขับขี่ด้วยอัตราความเร็วที่ปลอดภัย ในการศึกษานี้จึงใช้ความเร็วไม่เกิน 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นเงื่อนไขในการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็วต่าง ๆ ก่อนการเบรก ซึ่งสามารถประมาณค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกคืนพลังงานได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 90 km/hr

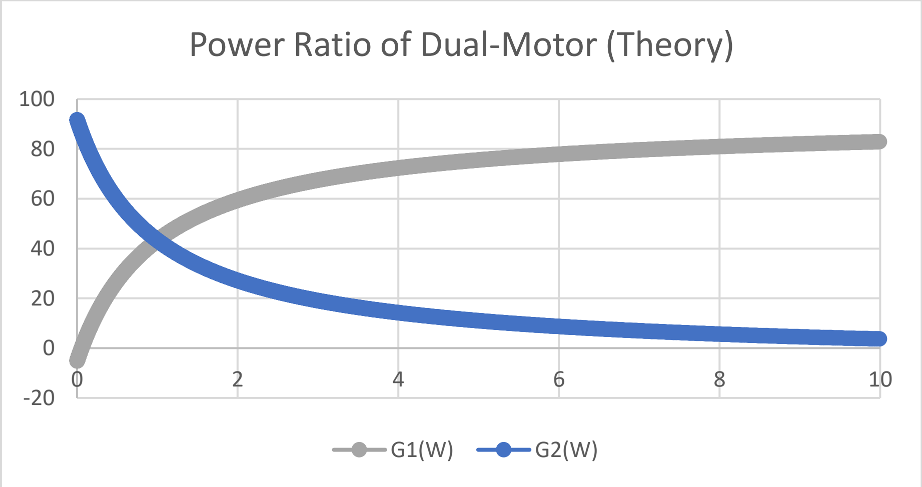
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 90 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 30 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 90 km/hr

ขั้นตอนที่ 2 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 80 km/hr

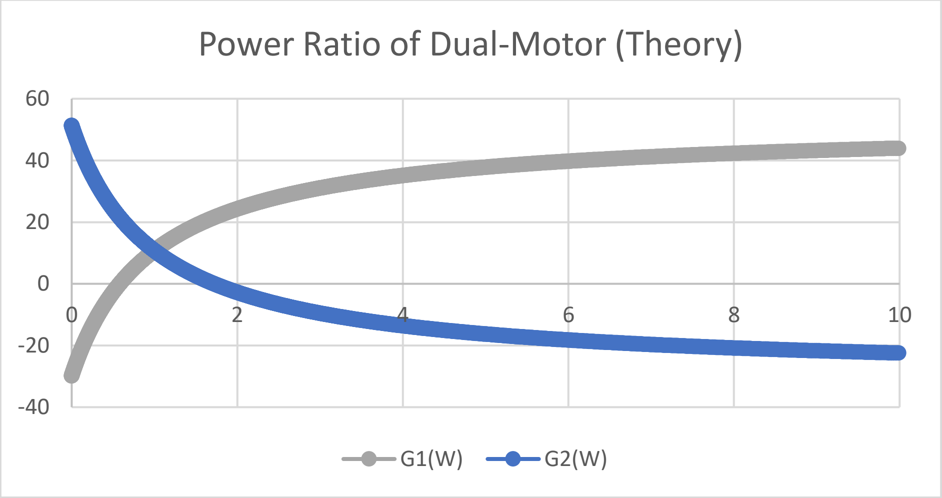
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 80 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 31 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 80 km/hr

ขั้นตอนที่ 3 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 70 km/hr

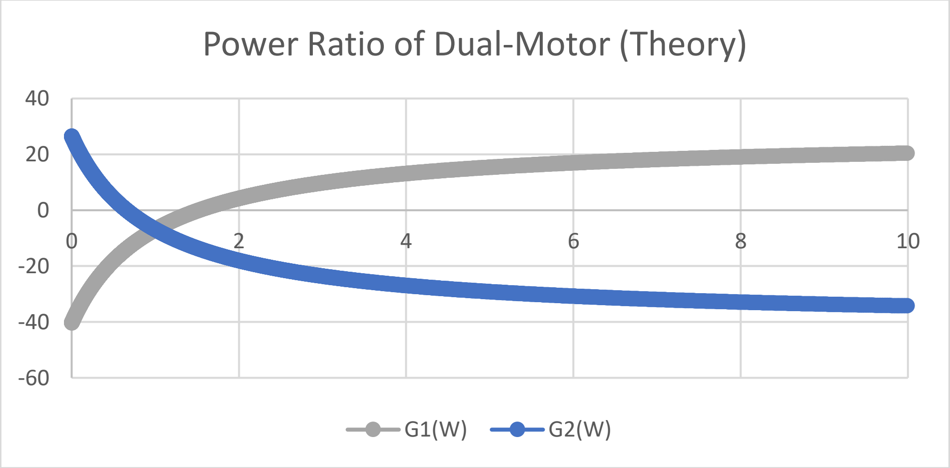
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 70 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 32 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 70 km/hr

ขั้นตอนที่ 4 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 60 km/hr

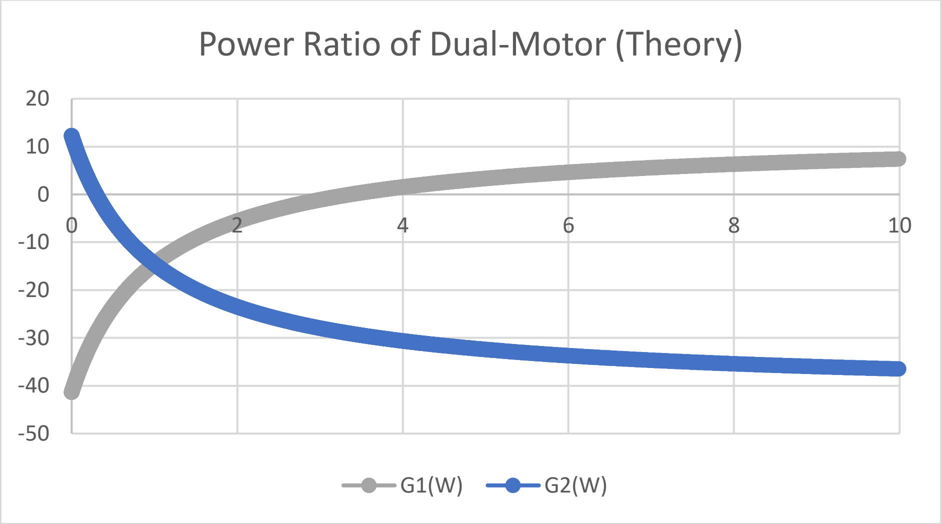
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 60 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 33 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 60 km/hr

ขั้นตอนที่ 5 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 50 km/hr

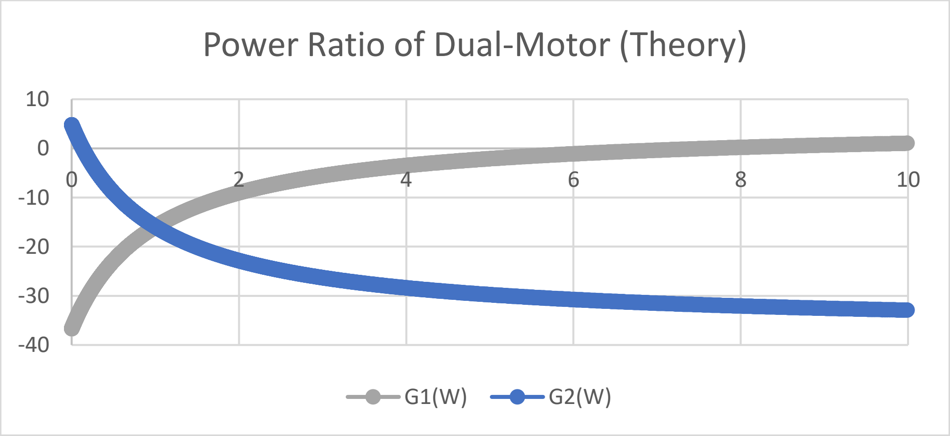
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 50 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 34 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 50 km/hr

ขั้นตอนที่ 6 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 40 km/hr

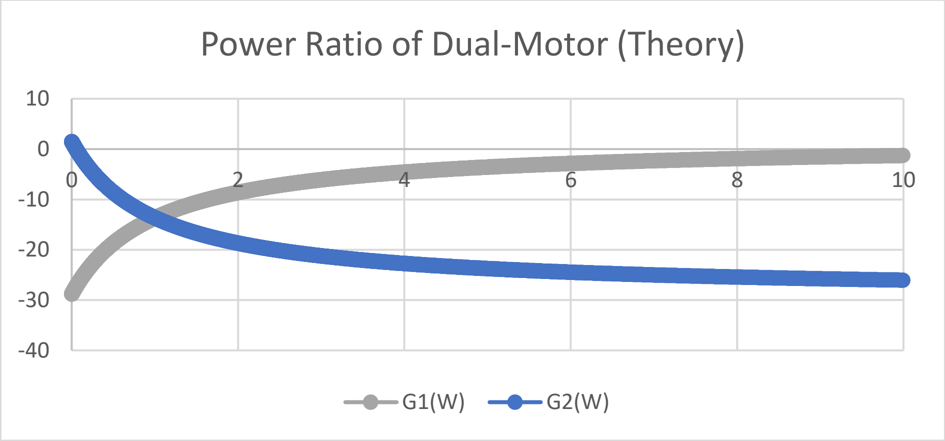
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 40 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 35 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 40 km/hr

ขั้นตอนที่ 7 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 30 km/hr

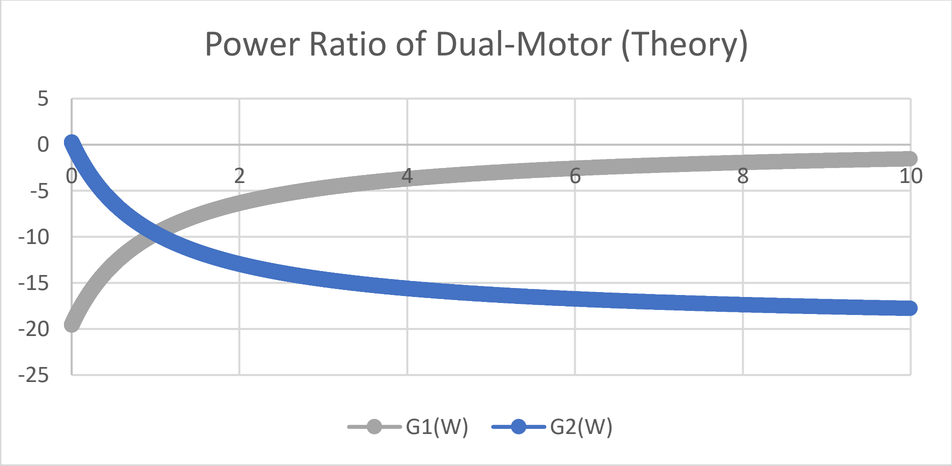
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 30 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 36 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 30 km/hr

ขั้นตอนที่ 8 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 20 km/hr

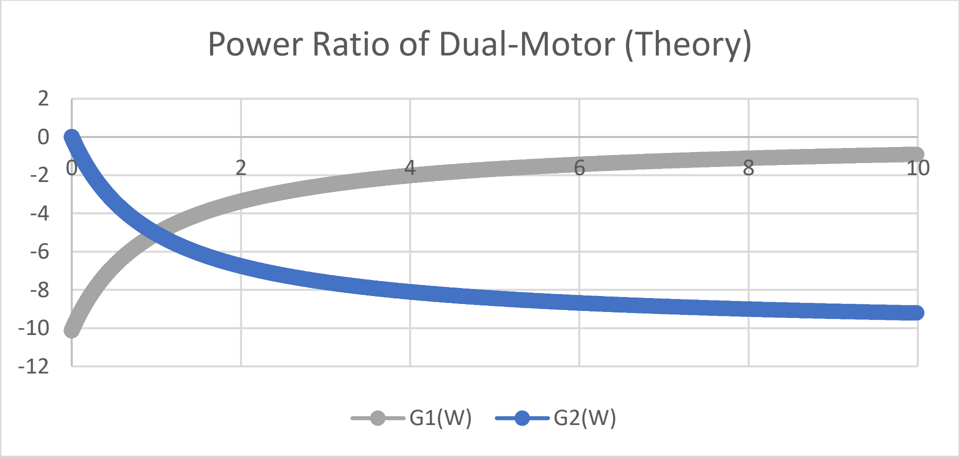
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 20 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 37 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 20 km/hr

ขั้นตอนที่ 9 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 10 km/hr

เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 10 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 38 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 10 km/hr

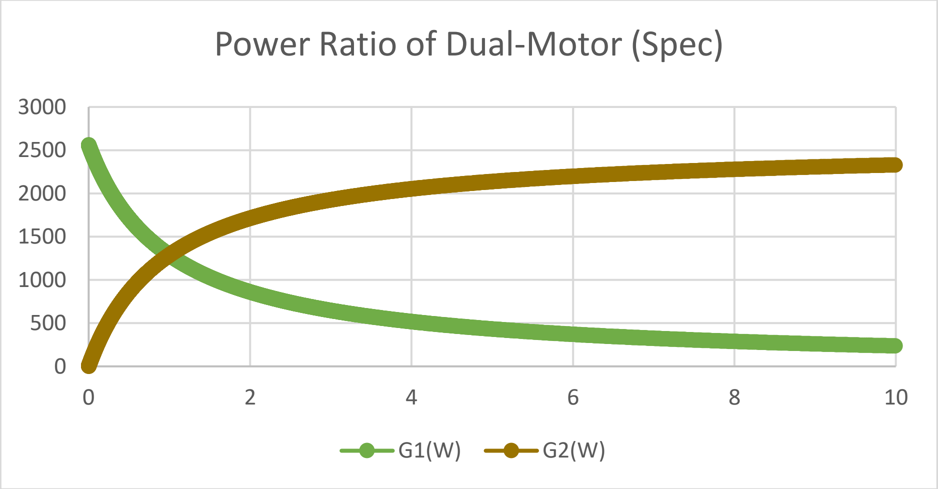
ผลการวิจัยในการศึกษาการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าขณะเบรกในระยะความเร็วที่แตกต่างกัน จากการเบรกของยานยนต์ไฟฟ้านั้นจะส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนสถานะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากการหมุนด้วยแรงเฉื่อยของยานยนต์ ด้วยสภาวะความเร็วของยานยนต์ที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้การผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะการขับขี่ด้วยอัตราความเร็วที่ปลอดภัย ซึ่งทำการทดสอบที่ Full load (100%) จนถึง Light load (25%) ของพิกัดมอเตอร์รวมเท่ากับ 4,000 W ก่อนการหยุดที่ความเร็ว 90 km/hr จนถึง ความเร็ว 10 km/hr เพื่อหาค่าพลังงานที่มอเตอร์จ่ายพลังงานออกมาโดยการคำนวณทางคณิตศาสตร์

4.3 ผลการศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกโดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตมอเตอร์ (datasheet)

ผลจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการประเมินค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกของยานยนต์ ตามข้อมูลจำเพาะจากบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในโหมดที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ได้จากการเบรก ผลของการวิเคราะห์สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก หลังจากที่ได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับหลักการออกแบบระบบขับเคลื่อนแล้วนั้น ทำให้ทราบผลการวิจัยดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 90 km/hr

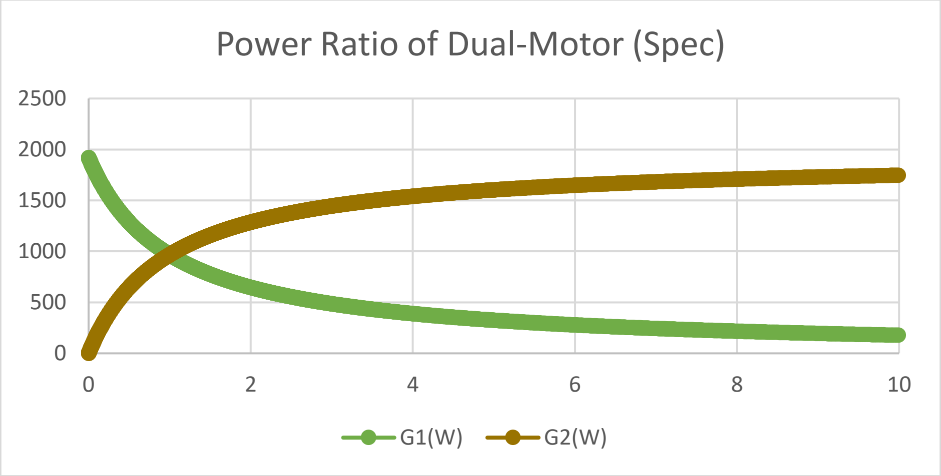
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 90 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 39 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 90 km/hr

ขั้นตอนที่ 2 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 80 km/hr

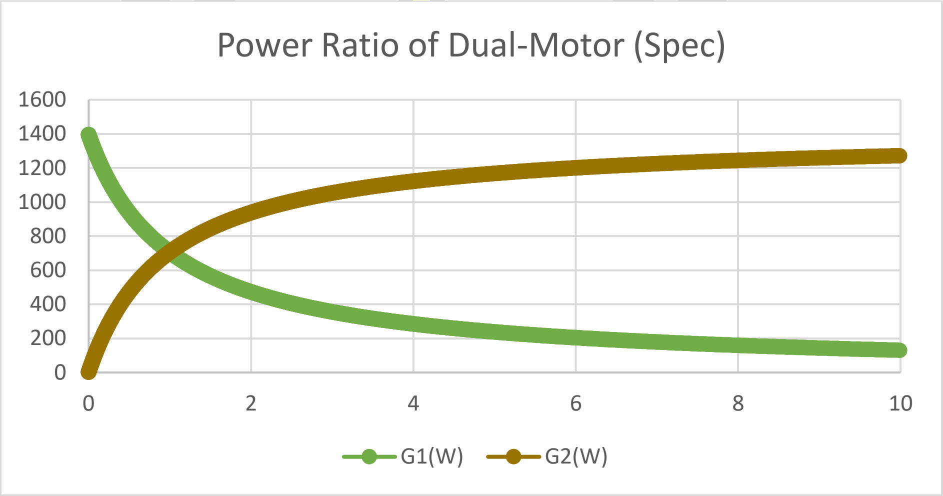
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 80 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 40 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 80 km/hr

ขั้นตอนที่ 3 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 70 km/hr

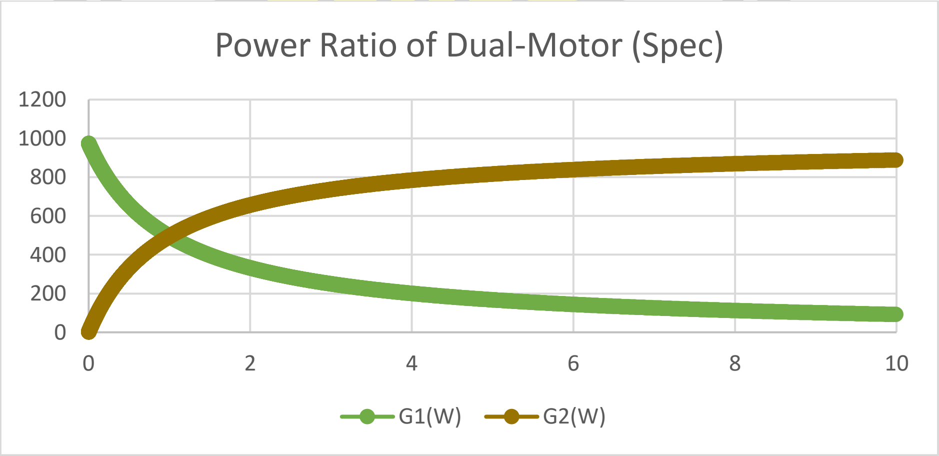
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 70 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 41 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 70 km/hr

ขั้นตอนที่ 4 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 60 km/hr

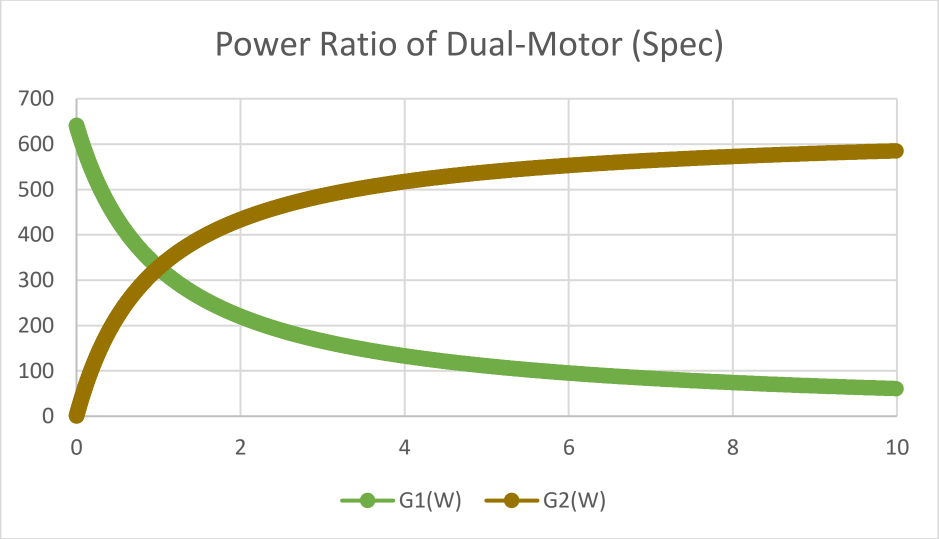
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 60 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 42 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 60 km/hr

ขั้นตอนที่ 5 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 50 km/hr

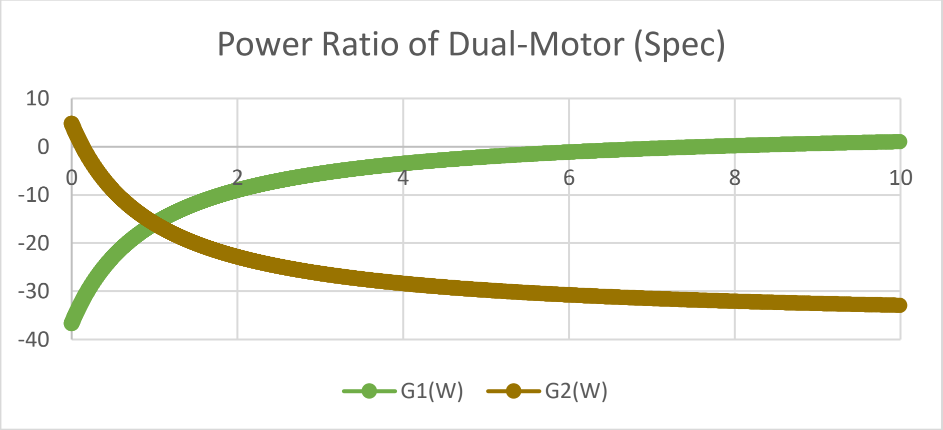
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 50 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 43 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 50 km/hr

ขั้นตอนที่ 6 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 40 km/hr

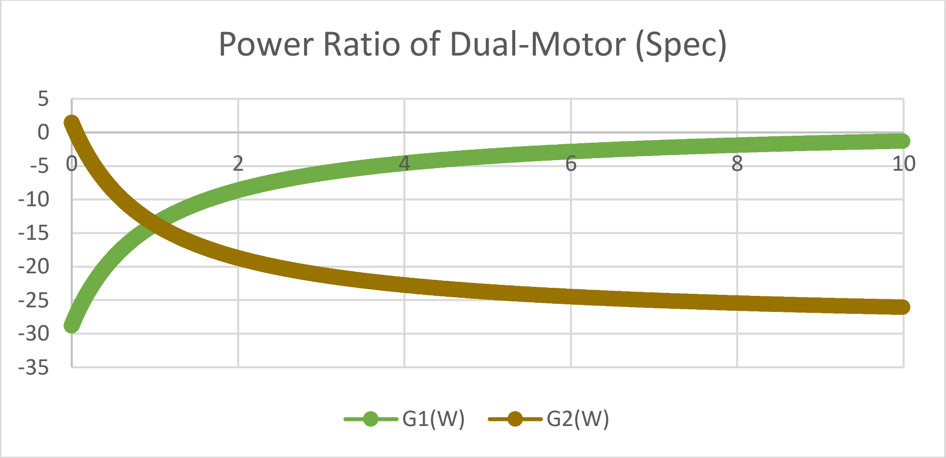
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 40 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 44 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 40 km/hr

ขั้นตอนที่ 7 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 30 km/hr

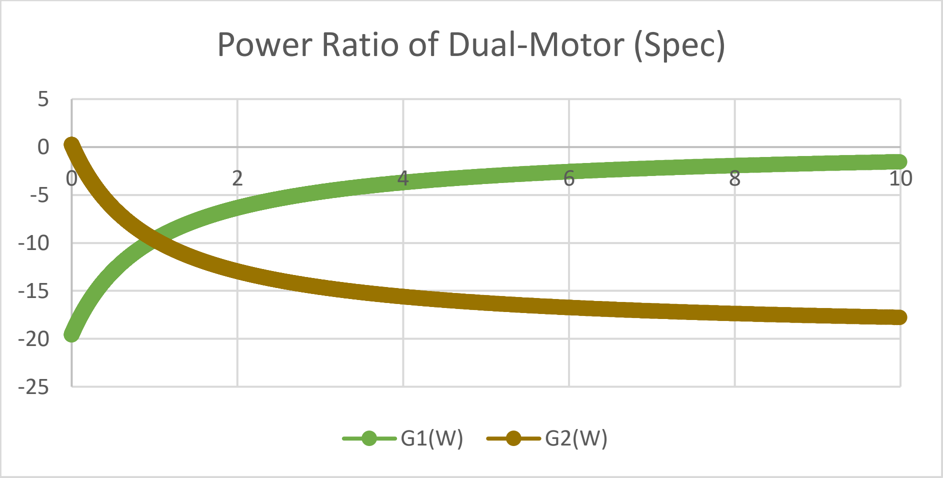
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 30 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 45 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 30 km/hr

ขั้นตอนที่ 8 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 20 km/hr

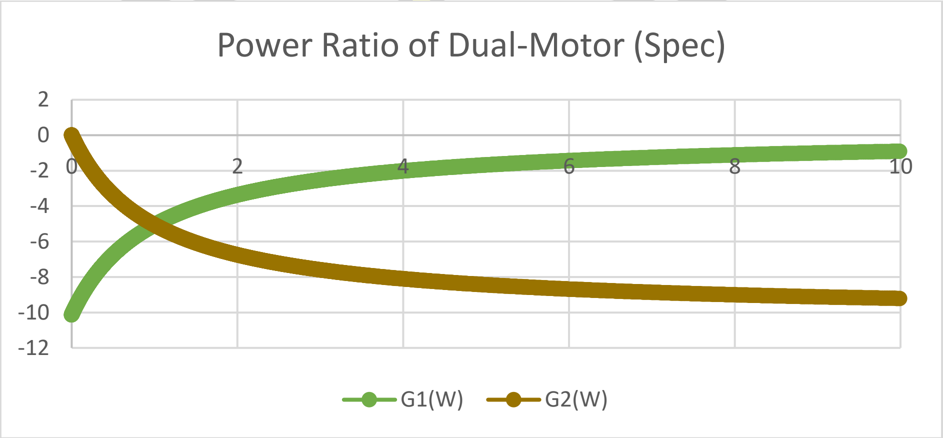
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 20 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 46 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 20 km/hr

ขั้นตอนที่ 9 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 10 km/hr

เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในลักษณะเชิงเส้น จากสมการคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง K_t, P_{te} และ v ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 10 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 47 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 10 km/hr

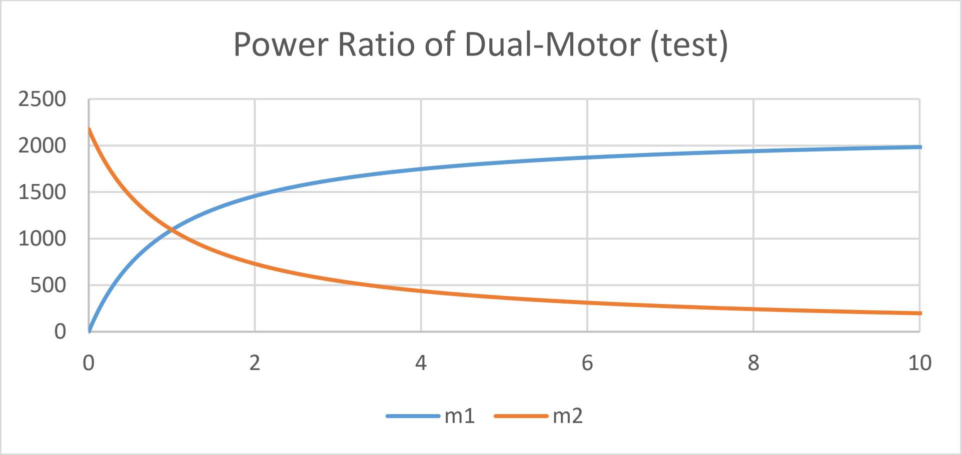
ผลการวิจัยในการศึกษาการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าขณะเบรกในระยะความเร็วที่แตกต่างกัน จากการเบรกของยานยนต์ไฟฟ้านั้นจะส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนสถานะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากการหมุนด้วยแรงเฉื่อยของยานยนต์ ด้วยสภาวะความเร็วของยานยนต์ที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้การผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะการขับขี่ด้วยอัตราความเร็วที่ปลอดภัย ซึ่งทำการทดสอบที่ Full load (100%) จนถึง Light load (25%) ของพิกัดมอเตอร์รวมเท่ากับ 4000 W ก่อนการหยุดที่ความเร็ว 90 km/hr จนถึง ความเร็ว 10 km/hr เพื่อหาค่าพลังงานที่มอเตอร์จ่ายพลังงานออกมาโดยการทดสอบจากข้อมูลของผู้ผลิตมอเตอร์

4.4 ผลการทดลองการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกจากการทดสอบ

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรกคืนพลังงาน ในขณะเบรกมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์ไม่ต้องการพลังงานจากแหล่งจ่าย ทำให้มีความเร็วจากแรงเฉื่อยของมอเตอร์ขณะเบรก ส่งผลให้ชุดผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับทั้งคู่อยู่ในโหมดเบรกรีเจนเนอเรชัน โดยที่มอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยความเร็วที่พิกัดของมอเตอร์และเบรกคืนพลังงานแล้วหยุดภายใน 15 วินาที มอเตอร์ทั้ง 2 ตัว ช่วยกันจ่ายพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับได้ ทำให้ทราบผลการวิจัยดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเบรกในระยะความเร็ว 90 km/hr

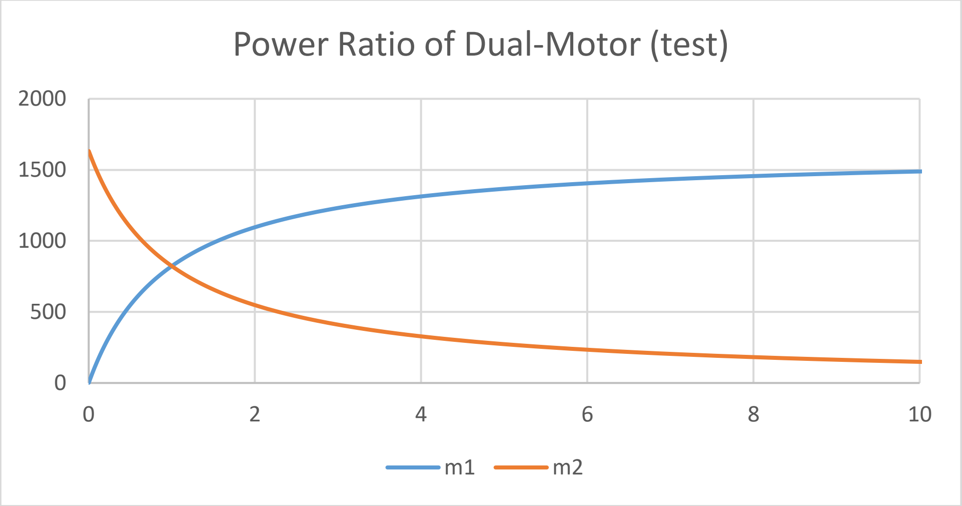
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในการเบรกในระยะความเร็วที่กำหนด สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งทำให้ทราบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 90 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 48 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 90 km/hr

ขั้นตอนที่ 2 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเบรกในระยะความเร็ว 80 km/hr

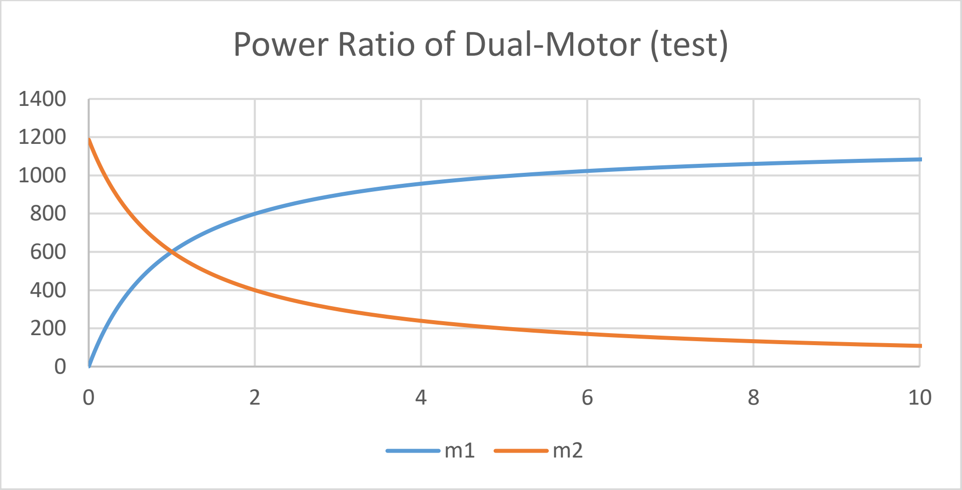
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในการเบรกในระยะความเร็วที่กำหนด สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งทำให้ทราบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 80 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 49 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 80 km/hr

ขั้นตอนที่ 3 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเบรกในระยะความเร็ว 70 km/hr

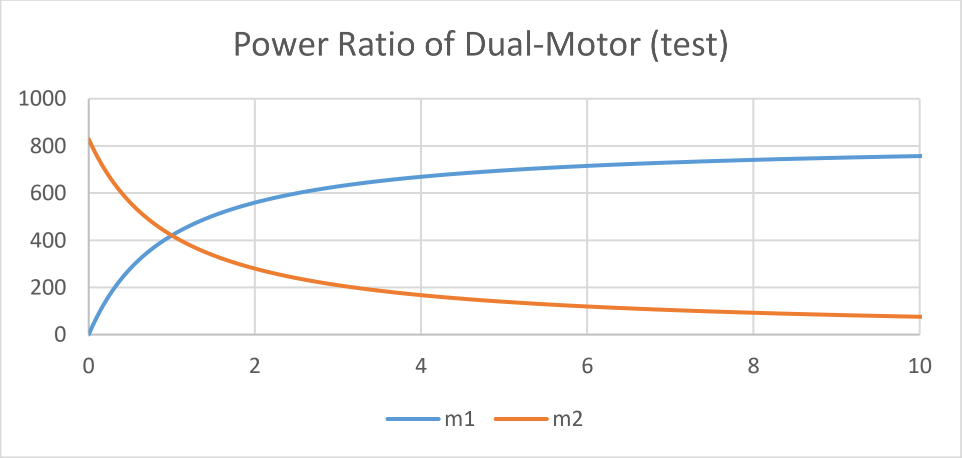
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในการเบรกในระยะความเร็วที่กำหนด สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 70 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 50 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 70 km/hr

ขั้นตอนที่ 4 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเบรกในระยะความเร็ว 60 km/hr

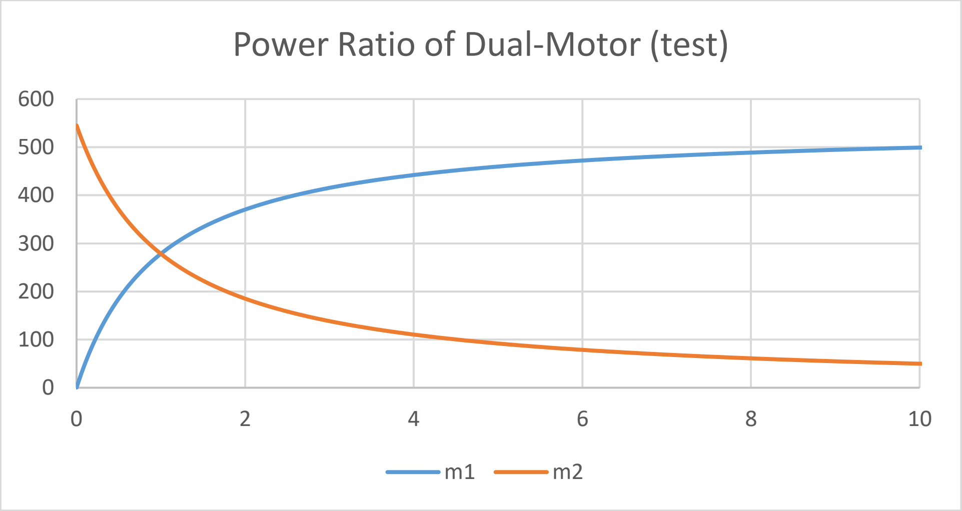
เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในการเบรกในระยะความเร็วที่กำหนด สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 60 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 51 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 60 km/hr

ขั้นตอนที่ 5 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเบรกในระยะความเร็ว 50 km/hr

เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในการเบรกในระยะความเร็วที่กำหนด สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งทำให้ทราบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 50 km/hr ก่อนการเบรกดังนี้



ภาพประกอบ 52 อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็ว 50 km/hr

ขั้นตอนที่ 6 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเบรกในระยะความเร็ว 40 km/hr

เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในการเบรกในระยะความเร็วที่กำหนด สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งทำให้ทราบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 40 km/hr ผลปรากฏว่าค่าความเร็วในการขับโหลดมีไม่มากพอที่จะทำให้เครื่องกำเนิดจ่ายพลังงานออกมาได้

ขั้นตอนที่ 7 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเบรกในระยะความเร็ว 30 km/hr

เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในการเบรกในระยะความเร็วที่กำหนด สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งทำให้ทราบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 30 km/hr ผลปรากฏว่าค่าความเร็วในการขับโหลดมีไม่มากพอที่จะทำให้เครื่องกำเนิดจ่ายพลังงานออกมาได้

ขั้นตอนที่ 8 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเบรกในระยะความเร็ว 20 km/hr

เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในการเบรกในระยะความเร็วที่กำหนด สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งทำให้ทราบว่า

ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 20 km/hr ผลปรากฏว่าค่าความเร็วในการขับโหลดมีไม่มากพอที่จะทำให้เครื่องกำเนิดจ่ายพลังงานออกมาได้

ขั้นตอนที่ 9 การหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเบรกในระยะความเร็ว 10 km/hr

เมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยกำหนดให้มีอัตราหน่วงในการเบรกในระยะความเร็วที่กำหนด สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกในระยะความเร็ว 10 km/hr ผลปรากฏว่าค่าความเร็วในการขับโหลดมีไม่มากพอที่จะทำให้เครื่องกำเนิดจ่ายพลังงานออกมาได้

จากผลการวิจัยในการทดลองหาค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าขณะเบรกในระยะความเร็วที่แตกต่างกัน จากการเบรกของยานยนต์ไฟฟ้านั้นจะส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนสถานะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากการหมุนด้วยแรงเฉื่อยของยานยนต์ ด้วยสภาวะความเร็วของยานยนต์ที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้การผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะการขับขี่ด้วยอัตราความเร็วที่ปลอดภัย ซึ่งทำการทดสอบที่ Full load (100%) จนถึง Light load (25%) ของพิกัดมอเตอร์รวมเท่ากับ 4,000 W ก่อนการหยุดที่ความเร็ว 40 km/hr จนถึง ความเร็ว 10 km/hr เพื่อหาค่าพลังงานที่มอเตอร์จ่ายพลังงานออกมาโดยการทดสอบจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

4.5 ผลการเปรียบเทียบของผลการศึกษาการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกในแต่ละขั้นตอน

จากการเบรกของยานยนต์ไฟฟ้านั้นจะส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนสถานะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากการหมุนด้วยแรงเฉื่อยของยานยนต์ ด้วยสภาวะความเร็วของยานยนต์ที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้การผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะการขับขี่ด้วยอัตราความเร็วที่ปลอดภัย ในการศึกษาใช้ความเร็วไม่เกิน 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นเงื่อนไขในการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะความเร็วต่าง ๆ ก่อนการเบรก ซึ่งสามารถประมาณค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกได้ ซึ่งเมื่อเทียบกับผลจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการประเมินค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกของยานยนต์ ตามข้อมูลจำเพาะจากบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในโหมดที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ได้จากการเบรกคืนพลังงาน ผลของการวิเคราะห์สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก จากสมการการหาอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก จะได้อัตราส่วนมอเตอร์ 1 ต่อมอเตอร์ 2 ที่ร้อยละ 50.76 : 49.24 ดีที่สุด

4.6 การอภิปรายผลการทดลอง

ภายใต้สภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก ให้สอดคล้องกับสมรรถนะการประจุกำลังไฟฟ้าและระยะทางที่ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ โดยที่ค่าน้ำหนักของมอเตอร์คู่แต่ละตัวมีอัตราส่วนกำลังแตกต่างกัน เพื่อเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับการใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งการวิจัยนี้เริ่มต้นจากการหาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมจากสมการคณิตศาสตร์ การประเมินค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกของยานยนต์ตามข้อมูลจำเพาะจากบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ และทดลองด้วยชุดทดลองจริงเพื่อให้สามารถได้ค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์คู่ในระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก จากการทดลองพบว่างานวิจัยนี้สามารถควบคุมค่าอัตราส่วนการผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรกของมอเตอร์คู่ได้อย่างถูกต้อง

พหูน ปณ ฑิโต ชีเว

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก โดยทำการทดลองตั้งค่าระบบให้มีการปรับระดับการหาค่าอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมของมอเตอร์คู่ในระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก ให้สอดคล้องกับสมรรถนะการประจุกำลังไฟฟ้าและระยะทางที่ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ โดยที่ค่าน้ำหนักของมอเตอร์คู่แต่ละตัวมีอัตราส่วนกำลังแตกต่างกัน เพื่อเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับการใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งการวิจัยนี้เริ่มต้นจากการหาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมจากสมการคณิตศาสตร์ การคำนวณจากการกำหนดค่าคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าจากบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ไฟฟ้า และทดลองด้วยชุดทดลองจริงเพื่อให้สามารถได้ค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์คู่ในระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก จากการทดลองพบว่างานวิจัยนี้สามารถควบคุมค่าอัตราส่วนการผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรกของมอเตอร์คู่ได้อย่างถูกต้อง และสามารถทำให้ผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้านำไปใช้ในกระบวนการผลิตระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าที่ถูกออกแบบไว้ได้อย่างแม่นยำ

5.2 สรุปผลการวิจัย

จากการหาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมจากสมการคณิตศาสตร์ การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทดลองด้วยชุดทดลองจริงเพื่อให้สามารถได้ค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์คู่ในระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก จากการทดลอง ซึ่งเริ่มต้นด้วยการหาค่าที่เหมาะสมจากทฤษฎีกลศาสตร์การเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้า การคำนวณจากการกำหนดค่าคุณสมบัติจากบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ไฟฟ้ารายใหญ่ที่มีกำลังการผลิตค่อนข้างมาก และทำการทดลองชุดผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก ทั้งนี้เนื่องจากการทำงานในโหมดรีเจนเนอเรชันของมอเตอร์ในยานยนต์ไฟฟ้าชนิดคู่ซึ่งทำให้มอเตอร์สองตัว ที่ใช้ในชุดทดลองจริงเพื่อให้ได้การผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชุดผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับทั้งสอง โดยแบ่งการทดลองเปรียบเทียบออกเป็น 4 การทดลอง ดังนี้

1) ผลการศึกษาและประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าขณะเบรกด้วยหลักทฤษฎี ผลลัพธ์ที่ได้คือการทดสอบเปรียบเทียบค่าผลิตกำลังไฟฟ้า ทำให้ทราบผลการวิจัยในการศึกษาการประมาณค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าขณะเบรกในระยะความเร็วที่แตกต่างกัน จากการเบรกของยานยนต์ไฟฟ้านั้นจะส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนสถานะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากการหมุนด้วยแรงเฉื่อยของยานยนต์ ด้วยสภาวะความเร็วของยานยนต์ที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้การผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกในระยะการขับขี่ด้วยอัตราความเร็วที่ปลอดภัย ในการศึกษานี้จึงใช้ความเร็วไม่เกิน 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

2) ผลการศึกษาและประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกโดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตมอเตอร์ (datasheet) ผลจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการประเมินค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกของยานยนต์ ตามข้อมูลจำเพาะจากบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในโหมดที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ได้จากการเบรก ผลของการวิเคราะห์สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก

3) จากการทดสอบหาประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรก มอเตอร์ไม่ต้องการแรงดันจากแหล่งจ่าย ซึ่งมอเตอร์มีความเร็วจากแรงเฉื่อยทำให้มอเตอร์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับที่อยู่ในโหมดรีเจนเนอเรชั่น โดยที่ขับที่ความเร็วพิกัดของมอเตอร์และเบรกแล้วมอเตอร์ทั้งสองตัวสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับออกมาได้ซึ่งสามารถป้อนกลับพลังงานเข้าสู่แบตเตอรี่ได้

4) ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้ง 3 รูปแบบแล้วนำผลมาทำการวิเคราะห์ในการหาอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรกได้

5.3 อภิปรายผลการวิจัย

ทำการทดสอบพิกัดมอเตอร์ในการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะรถเบรกจริงในห้องทดสอบ เพื่อให้การวิจัยเป็นไปตามวิธีการออกแบบสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ 100% อย่างอิสระ ซึ่งจะสมมติให้ค่าพิกัดของมอเตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดในช่วง 0% - 100% โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้ 1) มอเตอร์ขณะทำงานในสภาวะปกติต้องใช้กำลัง (P=75%) และอีก 25% สามารถขับโหลดได้ 2) หากมอเตอร์ 1 ตัวมีค่าพิกัดสูงกว่า 75% ที่เหลืออีก 25% สามารถเป็นเครื่องกำเนิดในสภาวะเบรกคืนพลังงานได้ทันทีดังแสดงในตารางการทดสอบหาอัตราส่วนสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสคู่ ซึ่งสามารถทำการทดสอบดังต่อไปนี้ กรณีการทดสอบที่ Full load (100%) ของพิกัดมอเตอร์ เท่ากับ 4 kW กรณีการทดสอบที่ High load (75%) ของพิกัดมอเตอร์

เท่ากับ 3 kW กรณีการทดสอบที่ half load (50%) ของพิกัดมอเตอร์ เท่ากับ 2 kW และกรณีการทดสอบที่ Light load (25%) ของพิกัดมอเตอร์ เท่ากับ 1 kW ซึ่งกำลังของมอเตอร์ที่นำมาทำการทดสอบสามารถเทียบเคียงในการนำมอเตอร์ที่ใช้งานจริงของยานยนต์ไฟฟ้าได้

5.4 ข้อเสนอแนะ

1) หากสามารถใช้ โปรแกรม MATLAB/Simulink ทำการจำลองผลการผลิตกำลังไฟฟ้าขณะเบรกคืนพลังงานได้ในทุกมิติจะสามารถศึกษา วางแผนและตรวจสอบผลของทฤษฎีได้ด้วยการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2) ผลการศึกษาการจำลองเพื่อหาประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าป้อนกลับขณะเบรกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นไม่เพียงพอ ควรศึกษาด้วยมอเตอร์จริง เพื่อยืนยันผลลัพธ์ถึงลักษณะการทำงานของมอเตอร์ที่ใช้งานจริงด้วยจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

พหูน ปณฺ ฑิโต ชีเว

บรรณานุกรม

1. Olivier, J.G.J. and J.A.H.W. Peters, *Trends In Global Co_2 And Total Greenhouse Gas Emissions*. 2018.
2. IEA, *Global EV Outlook2016 Beyond one million electric cars*. 2016: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY.
3. Nur, A., *An Overview of Battery Electric Vehicles and Plug-in Hybrid Electric Vehicles.* International Journal of Advances on Automotive and Technology, 2017.
4. Aziz, M., *Advanced Charging System for Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Battery Electric Vehicles*, in *Hybrid Electric Vehicles*. 2017.
5. Jeddi, N. and L.E. Amraoui, *Modelling and simulation of a BLDC motor speed control system for electric vehicles.* Int. J. Electric and Hybrid Vehicles, 2016. **8**.
6. Chen, Q., et al., *Research and development of in-wheel motor driving technology for electric vehicles.* Int. J. Electric and Hybrid Vehicles, 2016. **8**.
7. Koten, H. and S.B. BİLal, *Recent Developments in Electric Vehicles.* International Journal of Advances on Automotive and Technology, 2018.
8. Wu, X. and H. Chen, *Comparative study on energy consumption for plug-in hybrid electric vehicles based on trip characteristics.* Int. J. Electric and Hybrid Vehicles, 2016. **8**.
9. Molenda, J., *Li-ion batteries for electric vehicles.* VERSITA, 2011.
10. Peter, K. and J. Andreas, *Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Impact of Regenerative Braking.* World Electric Vehicle Journal, 2015.
11. Lu, J.M. and X.K. Wang, *Study on the Lithium-Ion Batteries Performance of Electric Vehicles.* Advanced Materials Research, 2014. **986-987**: p. 1869-1872.
12. Kim, T., W. Qiao, and L. Qu, *A Multicell Battery System Design for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles.* IEEE Access, 2012.
13. Goodenough, J.B. and M.H. Braga, *Batteries for electric road vehicles.* Dalton Trans, 2018. **47**(3): p. 645-648.
14. Liu, Y.-C., *Battery Management Systems for Improving Battery Efficiency in*

Electric Vehicles. World Electric Vehicle Journal 2010.
15. Shao, S., S. Guo, and X. Qiu, *A Mobile Battery Swapping Service for Electric Vehicles Based on a Battery Swapping Van.* Energies, 2017. **10**(10).
16. Wang, C., *SOC estimation algorithm for Li-ion battery in electric or hybrid vehicles.* Int. J. Electric and Hybrid Vehicles, 2016.
17. Raghuvir, P.B., et al., *Lithium-Ion Battery Management System: A Lifecycle Evaluation Model for the Use in the Development of Electric Vehicles.* MATEC Web of Conferences, 2018. **144**.
18. Lu, J., et al., *The role of nanotechnology in the development of battery materials for electric vehicles.* Nat Nanotechnol, 2016. **11**(12): p. 1031-1038.
19. Zhang, X. and K.T. Chau, *Design and Implementation of a New Thermoelectric-Photovoltaic Hybrid Energy System for Hybrid Electric Vehicles.* Electric Power Components and Systems, 2011. **39**(6): p. 511-525.
20. Atieh, A. and S. Al Shariff, *Hybrid Wind/Electric Powered Vehicle.* International Journal of Energy Optimization and Engineering, 2015. **4**(4): p. 21-28.
21. Fathabadi, H., *Plug-In Hybrid Electric Vehicles: Replacing Internal Combustion Engine With Clean and Renewable Energy Based Auxiliary Power Sources.* IEEE Transactions on Power Electronics, 2018. **33**(11): p. 9611-9618.
22. Zhai, Z.Q. and X.N. Zhang, *Study on Control Strategy for Regenerative Braking of Electric Vehicles.* Applied Mechanics and Materials, 2013. **273**: p. 669-672.
23. Wang, J., et al., *Evaluation Method of Regenerative Braking for Electric Vehicles.* Advanced Materials Research, 2013. **805-806**: p. 1678-1684.
24. Lin, C.-L., H.-C. Hung, and J.-C. Li, *Active Control of Regenerative Brake for Electric Vehicles.* Actuators, 2018. **7**(4).
25. Nikam, S., V. R, and B.G. Fernandes, *A high torque density permanent magnet free motor for in-wheel electric vehicle application.* IEEE Access, 2012.
26. Zhang, C., et al., *System Efficiency Improvement for Electric Vehicles Adopting a Permanent Magnet Synchronous Motor Direct Drive System.* Energies, 2017. **10**(12).
27. Zhao, L., et al., *Analysis of Wheel Hub Motor Drive Application in Electric Vehicles.* MATEC Web of Conferences, 2017. **100**.

พหุน ปณฺ ตา กิโต ชีวา

28. Khessam, M., A. Hazzab, and A. Boucha, *Stability Control of Electric Vehicles with Two-Motor-Wheel Drive.* Applied Mechanics and Materials, 2015. **789-790**: p. 795-802.

29. Panmuang, P., et al., *A novel dual motor drive system for three wheel electric vehicles.* 2018.

30. Ruan, J. and Q. Song, *A Novel Dual-Motor Two-Speed Direct Drive Battery Electric Vehicle Drivetrain.* IEEE Access, 2019. **7**: p. 54330-54342.

31. Suchaneck, A., *Regenerative braking in electric vehicles with all-wheel drive.* Int. J. Electric and Hybrid Vehicles, 2011.

32. Lin, C. and Z. Xu, *Wheel Torque Distribution of Four-Wheel-Drive Electric Vehicles Based on Multi-Objective Optimization.* Energies, 2015. **8**(5): p. 3815-3831.

33. Sebastian, C.Z., V.C. Carlos, and R.M. Edgar, *Development of a Multi-Motor Power System for Vehicles Converted to Electric.* International Journal of Engineering & Technology, 2018. **7**: p. 188-192.

34. Khanra, M., D. Chakraborty, and A.K. Nandi, *Improvement of Regenerative Braking Energy of Fully Battery Electric Vehicle Through Optimal Driving.* Journal of Asian Electric Vehicles, 2018. **16**.

35. Bahrami, M., H. Mokhtari, and A. Dindar, *Energy regeneration technique for electric vehicles driven by a brushless DC motor.* IET Power Electronics, 2019. **12**(13): p. 3397-3402.

36. Zhang, X., et al., *Electric drive system control strategies of articulated vehicles with four motor driven wheels.* Int. J. Vehicle Design, 2015. **69**.

37. Mutoh, N., *Running performance of front-and-rear-wheelindependent-drive-type electric vehicle suitable for next-generation electric vehicles.* Int. J. Power Electronics, 2013. **5**.

38. Wang, W.W., et al., *Design of New Dual-Motor Independent Drive System for Electric Vehicle.* Advanced Materials Research, 2012. **591-593**: p. 251-258.

39. Zhang, S., et al., *Optimal control strategy design based on dynamic programming for a dual-motor coupling-propulsion system.* ScientificWorldJournal, 2014. **2014**: p. 958239.

พหูน ปญฺ ติโต ชีเว

40. Zou, Y., et al., *Power control of dual-motor electric drive for tracked vehicles.* Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2009. **5**(1): p. 67-72.

41. Akhondi, H. and J. Milimonfared, *Design and Optimization of Tubular Permanent Magnet Linear Motor for Electric Power Steering System.* Journal of Asian Electric Vehicles, 2009. **7**.

42. Faiz, J. and M.B.B. Sharifian, *Optimal design of an induction motor for an electric vehicle.* European Transactions on Electrical Power, 2005. **16**(1): p. 15-33.

43. Faiz, M.G.A.K.A.B.J., *Optimum Design of Induction Motors for Electric Vehicles.* Electric Machines & Power Systems, 2010. **28**(12): p. 1177-1194.

44. Wang, B., et al., *A novel multimode hybrid energy storage system and its energy management strategy for electric vehicles.* Journal of Power Sources, 2015. **281**: p. 432-443.

45. Florescu, A., et al., *Adaptive frequency-separation-based energy management system for electric vehicles.* Journal of Power Sources, 2015. **280**: p. 410-421.

46. James, L. and L. John, *Electric Vehicle Technology Explained*. 2003.

47. Chauhan, V.S., *Simulation of Electric Vehicle Including Different Power Train Components*, in *Department of Electric Drives and Tractions*. 2017.

48. IEA, *Technology Roadmap Electric and plug-in hybrid electric vehicles*. 2011.

49. S.AHMED and F.M. Dow, *Electric Vehicle Technology as an Exploit for Cyber Attacl(s on the Next Generation of Electric Power Systems.* International Conference on Control Engineering & Information Technology, 2016.

50. Raisemche, A. and M. Boukhnifer, *Two Active Fault Tolerant Control Schemes of Induction Motor Drive in EV or HEV.* IEEE Access, 2012.

51. Masuta, T., A. Murata, and E. Endo, *Electric vehicle charge patterns and the electricity generation mix and competitiveness of next generation vehicles.* Energy Conversion and Management, 2014. **83**: p. 337-346.

52. Johannes, H., W. Erik, and S. Warren, *Optimal Lightweighting in Battery Electric Vehicles.* World Electric Vehicle Journal 2012. **5**.

53. Liang, Z. and C. Xue, *Control strategy of regenerative braking system in electric vehicles.* Energy Procedia, 2018.

พหูน ปณฺ ตา เจดีย์ ชีเว

54. Mehrdad, E., et al., *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. 2004.
55. Varocky, B.J., *Benchmarking of Regenerative Braking for a Fully Electric Car*. 2011.
56. Chapman, S.J., *ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS*. 2005.
57. Zeraoulia, M., M.E.H. Benbouzid, and D. Diallo, *Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study.* IEEE Access, 2010.
58. Gage, T.B., *Lead-Acid Batteries: Key to Electric Vehicle Commercialization Experience with Design, Manufacture, and Use of EVs.* IEEE Access, 2000.
59. Wang, W., et al., *Optimization of a Dual-Motor Coupled Powertrain Energy Management Strategy for a Battery Electric Bus Based on Dynamic Programming Method.* IEEE Access, 2018. **6**: p. 32899-32909.
60. Xin, X. and Z. Chengning, *Optimal Design of Electric Vehicle Power System with the Principle of Minimum Curb Mass.* Energy Procedia, 2017. **105**: p. 2629-2634.
61. Rahman, Z., M. Ehsani, and K.L. Butler, *An Investigation of Electric Motor Drive Characteristics for EV and HEV Propulsion Systems.* Society of Automotive Engineers, 2018.
62. Wang, H. and H. Wu, *Implementation of an Energy Management Strategy with Drivability Constraints for a Dual-Motor Electric Vehicle.* World Electric Vehicle Journal, 2019. **10**(2).
63. Steve, E. and S. Rich, *Direct-Drive Induction Motor*, in *IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE*. 2005.
64. Tabbache, B., et al., *Direct torque control of five-leg inverter-dual induction motor powertrain for electric vehicles.* Electrical Engineering, 2016. **99**(3): p. 1073-1085.
65. Chapman, S.J., *Electric Machinery Fundamentals*. 2012.
66. Kim, J., J. Jung, and K. Nam, *Dual-Inverter Control Strategy for High-Speed Operation of EV Induction Motors.* IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004. **51**(2): p. 312-320.
67. Baiju, M.R., et al., *A Dual Two-Level Inverter Scheme With Common Mode Voltage Elimination for an Induction Motor Drive.* IEEE Transactions on Power

พหูน ปณฺ ตาโต ชีเว

Electronics, 2004. **19**(3): p. 794-805.

68. Chen, Z., et al., *A Novel Emergency Braking Control Strategy for Dual-Motor Electric Drive Tracked Vehicles Based on Regenerative Braking.* Applied Sciences, 2019. **9**(12).

69. Zhu, Y., H. Wu, and J. Zhang, *Regenerative Braking Control Strategy for Electric Vehicles Based on Optimization of Switched Reluctance Generator Drive System.* IEEE Access, 2020. **8**: p. 76671-76682.

70. Shen, P., et al., *Study on Power Ratio Between the Front Motor and Rear Motor of Distributed Drive Electric Vehicle Based on Energy Efficiency Optimization*, in *SAE Technical Paper Series*. 2016.

71. Un-Noor, F., et al., *A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development.* Energies, 2017. **10**(8).

72. Ma, Z. and D. Sun, *Energy Recovery Strategy Based on Ideal Braking Force Distribution for Regenerative Braking System of a Four-Wheel Drive Electric Vehicle.* IEEE Access, 2020. **8**: p. 136234-136242.

73. Chen, A. and P.K. Sen, *Advancement in Battery Technology: A State-of-the-Art Review.* IEEE Access, 2016.

74. Hongping, L., *Research and Implementation on Control Strategy of Regenerative Braking for Pure Electric Vehicle.* IERI Procedia, 2012. **3**: p. 121-125.

75. Tousi, S.M.R., S.O. Golpayegani, and E. Sharifian, *Anti-Lock Regenerative Braking Torque Control Strategy for Electric Vehicle.* IEEE Access, 2016.

76. Nikunj, R.P., A.S. Varsha, and M.L. Makarand, *A Mathematical and FEM Design of Novel Axial Field Switched Reluctance Motor for Electrical Vehicle (EV) Application.* World Electric Vehicle Journal, 2016. **8**.

77. Joy, J. and S. Ushakumari, *Regenerative Braking Mode Operation of a Three-Phase H-Bridge Inverter Fed PMBLDC Motor Generator Drive in an Electric Bike.* Electric Power Components and Systems, 2018. **46**(19-20): p. 2174-2188.

78. Pinzhi, Z., Y. Guijie, and L. Jiaxi, *Multi-unit Motor Parallel Drive System for Electric Vehicle Application.* IEEE Access, 2008.

79. Jingang, G., W. Junping, and B. Cao, *Regenerative Braking Strategy for Electric*

Vehicles. IEEE Access, 2009.

80. Andre, S., Z. Bo, and P.L. Fernando, *Regenerative braking in electric vehicles with all-wheel drive.* Int. J. Electric and Hybrid Vehicles, 2011. **3**.

81. Li, B., et al., *An optimal torque distribution control strategy for four-independent wheel drive electric vehicles.* Vehicle System Dynamics, 2015. **53**(8): p. 1172-1189.

82. Chen, Y. and J. Wang, *Design and Evaluation on Electric Differentials for Overactuated Electric Ground Vehicles With Four Independent In-Wheel Motors.* IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012. **61**(4): p. 1534-1542.

83. Xudong, Z. and G. Dietmar, *A Novel Driving and Regenerative Braking Regulation Design Based on Distributed Drive Electric Vehicles.* IEEE Access, 2016.

84. Kanarachos, S., et al., *Control allocation for regenerative braking of electric vehicles with an electric motor at the front axle using the state-dependent Riccati equation control technique.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2013. **228**(2): p. 129-143.

85. Jeongwoo, L. and J.N. Douglas, *Rotating Inertia Impact on Propulsion and Regenerative Braking for Electric Motor Driven Vehicles.* IEEE Access, 2005.

86. Ostadi, A., M. Kazerani, and S.-K. Chen, *Hybrid Energy Storage System (HESS) in Vehicular Applications: A Review on*

Interfacing Battery and Ultra-capacitor Units. IEEE Access, 2013.

87. Li, G.F. and H.X. Wang, *Study on Regenerative Braking Control Strategy for EV Based on the Vehicle Braking Mechanics.* Advanced Materials Research, 2012. **490-495**: p. 1783-1787.

88. Lu, S., K.A. Corzine, and M. Ferdowsi, *High Efficiency Energy Storage System Design for Hybrid Electric Vehicle with Motor Drive Integration.* IEEE Access, 2006.

พหูน ปณ ฑิโต ชีโว

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	อรัญ ประกอบสัญห์
วันเกิด	9 พฤษภาคม 2522
สถานที่เกิด	จังหวัดสกลนคร ประเทศไทย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	71 หมู่ 7 ตำบลหนองแวงใต้ อำเภอวานรนิวาส จังหวัดสกลนคร 47120
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	พนักงานในสถาบันอุดมศึกษา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ตำบลเชียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2553 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2560 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2567 ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	ทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา (ปริญญาเอก) ประจำปีงบประมาณ 2564
ผลงานวิจัย	Prakobsant, A., Prastiyantoet, D. and Photong, C. "Optimum Power-Weight Ratio for Dual 3-Phase Induction Motor Drives for Regenerative Power Maximization", Przeglad Elektrotechniczny Journal. 2024(7), p. 260-266.