

การออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับใช้ขับเคลื่อนจักรยาน



นาย ปภาศิต เกิดเกลื่อน

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-1858-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN INDUCTION MOTOR
FOR DRIVING A BICYCLE

Mr. Pakasit Koedkluan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2005

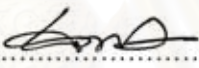
ISBN 974-53-1858-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับใช้ขับเคลื่อนจักรยาน
โดย นาย ปกาศิต เกิดเกลื่อน
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ สถาพร สุปรีชากร

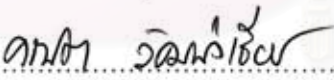
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ .


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฉัตรชัย หงษ์อุเทน)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ สถาพร สุปรีชากร)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คณิต วัฒนวิเชียร)


..... กรรมการ
(ดร.วิศณุ พงศ์พิพัฒน์)

สถาบันช่วยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปกาคิต เกิดเคลื่อน : การออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับใช้ขับเคลื่อนรถจักรยาน
(THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN INDUCTION MOTOR FOR DRIVING
A BICYCLE) อ.ที่ปรึกษา : รศ.สถาพร สุปรีชากร , 142 หน้า. ISBN 974-53-1858-2

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อใช้สำหรับขับเคลื่อนรถจักรยาน ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำไว้ 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เป็นมอเตอร์ 3 เฟส 18 โพล 50 เฮิร์ต 48 โวลต์ เชื่อมต่อแบบ series-star ส่วนแบบที่ 2 เป็นมอเตอร์ 3 เฟส 8 โพล 50 เฮิร์ต 36 โวลต์ เชื่อมต่อแบบ two parallel-delta

จากผลการทดสอบ พบว่า Pull-out torque ของมอเตอร์ทั้ง 2 แบบที่สร้างได้มีค่าเท่ากันคือ 3.5 นิวตัน-เมตร และเมื่อกำหนดแรงบิดพิกัดไว้ที่ 1.27 นิวตัน-เมตร จะทำให้มอเตอร์แบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีกำลังพิกัดเท่ากับ 34.86 วัตต์ และ 87.43 วัตต์ ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพที่ค่าพิกัดของมอเตอร์แบบที่ 1 และแบบที่ 2 เท่ากับ 33.46% และ 23.36% ตามลำดับ แต่สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้นำมอเตอร์แบบที่ 2 มาติดตั้งกับรถจักรยาน เนื่องจากมอเตอร์แบบที่ 2 มีโครงสร้างที่แข็งแรงทนทาน มีกำลังพิกัดสูงและมีการระบายความร้อนที่ดีกว่า เมื่อนำมอเตอร์แบบที่ 2 มาติดตั้งกับรถจักรยานโดยได้ทำการทดรอบมอเตอร์ 4 : 1 ทำให้รถจักรยานสามารถวิ่งด้วยความเร็วประมาณ 13 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่น้ำหนักกรดยรวม 90 กิโลกรัม

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2548.....

4570395021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD : INDUCTION MOTOR / 3-PHASES MOTOR/ DESIGN MOTOR

PAKASIT KOEDKLUAN : THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN INDUCTION
MOTOR FOR DRIVE A BICYCLE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.STAPORN
SUPRICHAKORN., 142 pp. ISBN 974-53-1858-2

This thesis is concerned with the design and construction of an induction motor suitable for driving a bicycle. Two types of motors were designed for comparison. One of which was a three-phase motor 18 pole 50 Hz 48 Volt series-star connection, and the other was a three-phase motor 8 pole 50 Hz 36 Volt two parallel-delta connection.

From the test results, both possessed identical pull-out torque of 3.5 N-m. With 1.27 N-m rated torque set in both, outputs of 34.86 W and 87.43 W were achieved with 33.46% and 23.36% efficiency respectively. The type 2 motor was chosen as a bicycle drive because of its more rigid structure, better rated power and cooling but a reduction ratio of 4:1 was needed to propel a 90 kg overall weight bicycle to 13 km/hr on level pavement.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department..... Mechanical Engineering..... Student' signature.....

Field of study..... Mechanical Engineering..... Advisor' signature.....

Academic year..... 2005.....

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์สถาพร สุปรีชากร อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ตั้งแต่เริ่มทำการศึกษา การออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ การทดสอบมอเตอร์และการนำไปติดตั้งกับรถจักรยานเพื่อทดสอบการทำงานจริง ตลอดจนการแก้ไขปัญหาต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การสนับสนุนทางด้านทุนทรัพย์ ค่าปรึกษา แนะนำและกำลังใจเสมอมาจนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณผู้มีได้กล่าวนามทุกท่านที่มีส่วนให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและเป็นเกียรติอย่างสูงที่ได้รับความกรุณาจากทุกๆ ท่าน จึงขอโอกาสขอพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
สารบัญคำย่อและสัญลักษณ์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีใช้ในการออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	3
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้า.....	3
2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	6
2.2.1 แรงสนามแม่เหล็ก.....	6
2.2.2 ฟลักซ์แม่เหล็กและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก.....	7
2.2.3 แรงบนตัวนำ.....	8
2.2.4 วงจรแม่เหล็ก.....	8
2.2.5 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก.....	9
2.2.6 การเปรียบเทียบวงจรไฟฟ้าและความต้านทานแม่เหล็ก.....	9
2.2.7 ช่องอากาศ.....	11
2.2.8 ความหนาแน่นของช่องอากาศ.....	11

	หน้า
2.2.9 สภาวะการฉีกตัว.....	13
2.2.10 การสร้างแรงบิด.....	14
2.2.11 สลัด.....	14
2.2.12 โหลดจำเพาะและปริมาตรจำเพาะ.....	15
2.2.13 แรงบิดและปริมาตรของมอเตอร์.....	15
2.2.14 กำลังขาออกจำเพาะ.....	16
2.2.15 ความสัมพันธ์ของกำลัง.....	17
2.2.16 วงจรสมมูล.....	18
2.2.17 ภาวะการทำงานเป็นมอเตอร์.....	19
2.2.18 ขนาดของความต่างศักย์ แรงเคลื่อนไฟฟ้า และประสิทธิภาพสัมพัทธ์.....	21
2.3 ทฤษฎีการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	22
2.3.1 สนามแม่เหล็กหมุน.....	22
2.3.2 สนามแม่เหล็กที่สร้างโดยขดลวด.....	23
2.3.3 ทิศทางของการหมุน.....	25
2.3.4 ฟลักซ์ช่องอากาศและฟลักซ์รั่ว.....	25
2.3.5 ขนาดของคลื่นฟลักซ์หมุน.....	25
2.3.6 โวลต์-แอมแปร์.....	27
2.3.7 โรเตอร์กรงกระรอก.....	28
2.3.8 สลิป.....	29
2.3.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์.....	29
2.3.10 กระแสโรเตอร์และแรงบิด (ในกรณีที่สลิปต่ำ).....	30
2.3.11 กระแสโรเตอร์และแรงบิด (ในกรณีที่สลิปสูง).....	31
2.3.12 ลักษณะของกระแสเตเตอร์และความเร็ว.....	32
2.4 ลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	33
2.4.1 การสตาร์ทมอเตอร์กรงกระรอก.....	33
2.4.2 การเดินเครื่องขึ้นและขอบเขตการทำงานที่เสถียร.....	34
2.4.3 โหลดที่มีความเฉื่อยสูง – ความร้อนเกิน.....	35
2.4.4 การสูญเสียของโรเตอร์ที่สถานะคงตัวและประสิทธิภาพ.....	35
2.4.5 สถานะคงตัวเสถียรภาพ Pull-out torque และการหยุด.....	36

2.4.6	เส้นโค้งแรงบิดกับความเร็ว-อิทธิพลของพารามิเตอร์ของโรเตอร์.....	36
2.4.6.1	โรเตอร์แบบกรงคู้.....	38
2.4.6.2	โรเตอร์แบบแท่งลึก.....	38
2.4.7	อิทธิพลของความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายต่อเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็ว.....	39
2.4.8	การควบคุมความเร็ว.....	40
2.4.9	การควบคุมความต่างศักย์ของมอเตอร์กรงกระรอก.....	41
2.4.10	การควบคุมตัวประกอบกำลังและพลังงานเหมาะสม.....	42
2.5	ทฤษฎีการผันและการต่อมอเตอร์ 3 เฟส.....	43
2.5.1	การผันมอเตอร์ 3 เฟส.....	48
2.5.2	การต่อมอเตอร์แบบสตาร์.....	52
2.5.3	การต่อมอเตอร์แบบเดลต้า.....	57
2.5.4	การต่อมอเตอร์แบบขนาน.....	60
2.5.5	การต่อมอเตอร์ 3 เฟส – แรงเคลื่อนไฟฟ้า.....	63
บทที่ 3	การออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับขั้วรถจักรยาน	66
3.1	การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์.....	67
3.1.1	การคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์.....	67
3.1.1.1	การคำนวณหาแรงเสียดทานจากการกลิ้งและแรงบิดจากแรงเสียดทานจากการกลิ้ง.....	68
3.1.1.2	การคำนวณหาแรงต้านจากอากาศและแรงบิดที่เกิดจากแรงต้านอากาศ.....	68
3.1.1.3	การคำนวณหาแรงจากน้ำหนักรถในทางลาดเอียงและแรงบิดที่ทำให้รถไหลลงในกรณีที่อยู่บนทางลาดเอียง.....	68
3.1.2	การคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์.....	69
3.1.3	การคำนวณหากำลังของมอเตอร์.....	69
3.2	การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	70
3.2.1	การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบที่ 1.....	70
3.2.2	การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบที่ 2.....	77
3.3	สรุปผลการออกแบบมอเตอร์.....	86

	หน้า
บทที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	88
4.1 การดำเนินงานออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	89
4.1.1 มอเตอร์แบบที่ 1.....	89
4.1.2 มอเตอร์แบบที่ 2.....	91
4.2 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	94
บทที่ 5 ผลการทดสอบ	98
5.1 มอเตอร์แบบที่ 1.....	98
5.1.1 ขั้นตอนการทดสอบมอเตอร์แบบที่ 1.....	98
5.1.2 การทดสอบมอเตอร์แบบที่ 1.....	99
5.1.2.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ที่ค่าความต่างศักย์	
ของแหล่งจ่ายไฟ 36 โวลต์.....	99
5.1.2.2 ผลการทดสอบมอเตอร์ที่ค่าความต่างศักย์	
ของแหล่งจ่ายไฟ 48 โวลต์.....	99
5.2 มอเตอร์แบบที่ 2.....	104
5.2.1 ขั้นตอนการทดสอบมอเตอร์แบบที่ 2.....	104
5.2.2 การทดสอบมอเตอร์แบบที่ 2.....	105
5.2.2.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ที่ค่าความต่างศักย์	
ของแหล่งจ่ายไฟ 24 โวลต์.....	105
5.2.2.2 ผลการทดสอบมอเตอร์ที่ค่าความต่างศักย์	
ของแหล่งจ่ายไฟ 36 โวลต์.....	106
5.3 สรุปผลการทดสอบมอเตอร์.....	111
บทที่ 6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ	114
6.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	114
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	116
6.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงและออกแบบ.....	116
6.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไปในอนาคต.....	117

รายการอ้างอิง.....	118
ภาคผนวก.....	120
ภาคผนวก ก-1 ตารางการใช้ลวด.....	121
ภาคผนวก ก-2 คำอธิบายการใช้ลวด.....	123
ภาคผนวก ข Lamination magnetization curve $B_m(H_m)$	124
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณหาขนาดมอเตอร์และออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	125
ภาคผนวก ง ตารางเปรียบเทียบผลการออกแบบและผลการสร้างมอเตอร์.....	141
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	142



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
5-1 แสดงค่าแรงบิด ความเร็วรอบและกระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสาย ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 36 V (มอเตอร์แบบที่ 1).....	99
5-2 แสดงค่าแรงบิด ความเร็วรอบและกระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสาย ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 48 V (มอเตอร์แบบที่ 1).....	100
5-3 แสดงค่าแรงบิด ความเร็วรอบและกระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสาย ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 24 V (มอเตอร์แบบที่ 2).....	105
5-4 แสดงค่าแรงบิด ความเร็วรอบและกระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสาย ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 36 V (มอเตอร์แบบที่ 2).....	106
5-5 เปรียบเทียบคุณสมบัติของมอเตอร์แบบที่ 1 และมอเตอร์แบบที่ 2 เมื่อแรงบิดที่จ่ายออกมาที่เพลาเท่ากับ 1.27 N-m	113

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2-1 สเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส.....	5
2-2 (a) โรเตอร์แบบกรงกระรอก.....	6
(b) โรเตอร์แบบพันด้วยขดลวด.....	6
2-3 แรงสนามแม่เหล็กที่เกิดบนตัวนำที่กระแสไหลผ่านในสนามแม่เหล็ก.....	7
2-4 ฟลักซ์แม่เหล็กรอบแท่งแม่เหล็ก.....	7
2-5 สนามแม่เหล็กของโซเลนอยด์.....	8
2-6 แสดงวงจรแม่เหล็กกับช่องอากาศ.....	10
2-7 ขอบเขตช่องอากาศและแรงเคลื่อนแม่เหล็ก.....	11
2-8 ความต้านทานแม่เหล็กของเหล็กเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่สภาวะความหนาแน่น ฟลักซ์อิ่มตัว.....	13
2.9 ตัวนำบนโรเตอร์และตำแหน่งที่เกิดแรงบิด.....	14
2-10 การเหนี่ยวนำของฟลักซ์เมื่อผิวโรเตอร์เป็นสลีตและบรรจุตัวนำในสลีต.....	15
2-11 วงจรสมมูลของมอเตอร์.....	18
2-12 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เมื่อไม่มีโหลดทางกล.....	19
2-13 ผลกระทบจากฟลักซ์ภายใต้ความเร่งและความเร็วคงที่.....	20
2-14 ผลกระทบของความต้านทานต่อความเร็วและโหลด.....	20
2-15 ผลกระทบของฟลักซ์เกี่ยวกับความเร็วและโหลด.....	21
2-16 (a) รูปแบบของฟลักซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 4 Pole.....	22
(b) การกระจายความหนาแน่นฟลักซ์ในแนวรัศมีของช่องอากาศ.....	22
2-17 แผนภาพของมอเตอร์ 4 Pole ลงร่อง 1 ขดลวดต่อโพล พันแบบชั้นเดียว.....	23
2-18 แผนภาพของมอเตอร์ 4 Pole ลงร่อง 3 ขดลวดต่อโพล พันแบบชั้นเดียว.....	24
2-19 แผนภาพการจัดวางขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole พันขดลวดแบบ 2 ชั้น.....	24
2-20 รูปแบบของคลื่นฟลักซ์ทั้ง 3 เฟส.....	25
2-21 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	26
2-22 โครงสร้างโรเตอร์กรงกระรอก.....	28
2-23 รูปแบบแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว sN_s	29
2-24 รูปแบบของวงจรกระแสในตัวนำโรเตอร์และแหวนปลาย.....	30

ภาพประกอบ	หน้า
2-25 รูปแบบของความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องอากาศ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ และกระแสในตัวนำโรเตอร์ (ในกรณีทีสลลิปต่ำ).....	30
2-26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว(ในกรณีทีสลลิปต่ำ).....	31
2-27 ขนาดของกระแสเหนี่ยวนำในโรเตอร์.....	31
2-28 รูปแบบของความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องอากาศ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ และกระแสในตัวนำโรเตอร์ (ในกรณีทีสลลิปสูง).....	32
2-29 แผนภาพเฟเซอร์แสดงกระแสสเตเตอร์ในสภาวะไม่มีโหลด มีโหลดบางส่วนและมีโหลดเต็มพิกัด.....	32
2-30 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของแรงบิดกับความเร็วและกระแสกับความเร็วสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก.....	33
2-31 รูปแบบของเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็ว ที่โหลดต่างกัน 2 ชนิดซึ่งมีบริเวณความเร็วดังตัวเหมือนกัน.....	34
2-32 เส้นโค้งในระหว่างเดินเครื่องขึ้น(run-up) ของมอเตอร์และโหลด.....	35
2-33 เส้นโค้งแรงบิดกับความเร็วแสดงการทำงานในขอบเขตที่เสถียร (OXYZ).....	36
2-34 อิทธิพลของความต้านทานโรเตอร์ต่อเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็วของโรเตอร์กรงกระรอก (เส้นประในแนวตั้งแสดงความเร็วที่โหลดเต็มที่).....	37
2-35 รูปแบบการจัดเรียงตัวนำของโรเตอร์ชนิดกรงคู้ ซึ่งกรงชั้นนอกมีความต้านทานสูง (เช่น บรอนซ์) และกรงชั้นในมีความต้านทานต่ำ (เช่น ทองแดง).....	38
2-36 รูปแบบโครงสร้างของโรเตอร์แบบแท่งล็ก.....	38
2-37 รูปแบบของเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็วและกระแสกับความเร็วสำหรับมอเตอร์แบบกรงกระรอกที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม.....	39
2-38 อิทธิพลของความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายต่อเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็ว.....	40
2-39 (a) การควบคุมความเร็วมอเตอร์กรงกระรอกโดยวิธีการปรับความต่างศักย์ที่ให้แก่ขดลวดสเตเตอร์ (โรเตอร์มีความต้านทานต่ำ).....	41
(b) การควบคุมความเร็วมอเตอร์กรงกระรอกโดยวิธีการปรับความต่างศักย์ที่ให้แก่ขดลวดสเตเตอร์ (โรเตอร์มีความต้านทานสูง).....	41
2-40 แผนภาพเฟเซอร์แสดงการปรับปรุงตัวประกอบกำลังโดยการลดความต่างศักย์ที่ให้แก่ขดลวดสเตเตอร์.....	42
2-41 การต่อขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส.....	43

ภาพประกอบ	หน้า
2-42 มอเตอร์ 4 Pole 36 สลิต พันแบบร่วมศูนย์กลาง แสดงตำแหน่งสลิตที่ 90° และ 120° แต่ละร่องสลิตห่างกัน 20° ตำแหน่งที่ 120° จะบรรจุขดลวดที่หนึ่งใหม่ของอีกเฟสซึ่งมีขั้วเหมือนกัน.....	43
2-43 มอเตอร์ 4 Pole 36 สลิต พันแบบแลปและแสดงตำแหน่งสลิตที่ 90° และ 120° ตำแหน่งสลิตที่ 120° จะบรรจุขดลวดที่หนึ่งใหม่ของอีกเฟสซึ่งมีขั้วเหมือนกัน.....	44
2-44 การบรรจุขดลวดแบบร่วมศูนย์กลางและแบบแลปเริ่มที่ 120° ของร่องสลิต แต่ละหมู่ขดลวดของในแต่ละเฟสต้องมีขั้วเหมือนกัน.....	44
2-45 รูปคลื่นขายน้ของความต่างศักย์ในเฟสเดียว.....	45
2-46 รูปคลื่นขายน้ของความต่างศักย์ใน 3 เฟส.....	45
2-47 แสดงขั้วแม่เหล็กในแต่ละเฟสกับคลื่นความต่างศักย์ที่เป็นรูปขายน้ของสเตเตอร์ 3 เฟส.....	46
2-48 (a) แสดงแผนภาพการป้อนกระแสให้แก่เฟส A เพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์.....	46
(b) แสดงแผนภาพการป้อนกระแสให้แก่เฟส B เพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์.....	47
(c) แสดงแผนภาพการป้อนกระแสให้แก่เฟส C เพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์.....	47
(d) แสดงแผนภาพการป้อนกระแสให้แก่เฟส A เหมือนรูปที่ 2.48 (a) เพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์.....	48
2-49 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อแบบสตาร์.....	49
2-50 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อแบบเดลต้า.....	49
2-51 จำนวนขดลวดในแต่ละโพลของมอเตอร์ 3 เฟส 36 ขดลวด 4 Pole.....	49
2-52 แสดงรูปร่างจริงของขดลวด.....	50
2-53 แผนภาพอย่างง่ายของขดลวดในมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole.....	50
2-54 แสดงหมู่ขดลวดทั้ง 3 หมู่ของ 1 Pole และในแต่ละหมู่ประกอบด้วย 3 ขดลวด.....	51
2-55 แสดงการต่อขดลวดใน 1 หมู่.....	51
2-56 แสดงรูปด้านข้างของการต่อขดลวด.....	51
2-57 แสดงการต่อหมู่ขดลวด 12 หมู่ ที่มี 3 ขดลวดต่อหมู่.....	52
2-58 แสดงการต่อหมู่ขดลวดของเฟส A เข้าด้วยกัน.....	52
2-59 แสดงการต่อเฟส C ซึ่งมีวิธีการต่อเหมือนกับเฟส A โดยในการต่อจะข้ามเฟส B.....	53
2-60 การไหลของกระแสในเฟส B ตรงข้ามกับการไหลของกระแสในเฟส A และ C.....	53

ภาพประกอบ	หน้า
2-61 (a) แสดงการต่อหมุ่ขดลวดของเฟส A เข้าด้วยกัน.....	54
(b) แสดงการต่อเฟส C ที่มีวิธีการต่อเหมือนกับเฟส A โดยในการต่อ จะข้ามเฟส B ไปก่อน.....	54
(c) แสดงการไหลของกระแสในเฟส B ซึ่งจะมีทิศทางการไหลตรงข้าม กับเฟส A และเฟส C.....	54
(d) แผนภาพแสดงการต่อมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole แบบสตาร์.....	54
2.62 (a) แผนภาพวงกลมแสดงการต่อเฟส A.....	55
(b) แผนภาพวงกลมแสดงการต่อเฟส C ซึ่งคล้ายกับการต่อของเฟส A.....	55
(c) แสดงการไหลของกระแสในเฟส B จะมีทิศทางการไหลตรงข้ามกับเฟส A และเฟส C.....	56
(d) แผนภาพวงกลมแสดงการต่อมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole แบบสตาร์.....	56
2-63 แสดงแผนภาพของมอเตอร์ 3 เฟส 4 โพล ต่อแบบสตาร์และขดลวดในแต่ละเฟส ต่อแบบอนุกรม(1-star).....	56
2-64 แผนภาพแสดงการต่อมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole แบบอนุกรมเดลต้า.....	57
2-65 (a) การต่อหมุ่ขดลวดของเฟส A เข้าด้วยกันแบบอนุกรมเดลต้าสำหรับมอเตอร์ 4 Pole.....	57
(b) การต่อหมุ่ขดลวดของเฟส C เข้าด้วยกันเหมือนการต่อแบบเฟส A.....	58
(c) การต่อหมุ่ขดลวดของเฟส B ซึ่งมีขั้วตรงกันข้ามกับเฟส A และเฟส C.....	58
(d) แผนภาพของมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole ต่อแบบเดลต้า.....	58
2-66 (a) แผนภาพวงกลมแสดงการต่อเฟส A.....	59
(b) แผนภาพวงกลมแสดงการต่อเฟส C ที่มีลักษณะการต่อเหมือนเฟส A.....	59
(c) แผนภาพวงกลมแสดงการต่อเฟส B ซึ่งมีขั้วต่างกับเฟส A และ เฟส C.....	59
(d) แผนภาพวงกลมแสดงการต่อมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole แบบเดลต้า.....	60
2-67 การต่อมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole แบบสตาร์โดยที่ต่อเฟส B โดยไม่ใช้วิธีต่อแบบข้ามหมุ่ ส่วนการต่อเฟส A และ เฟส C ใช้วิธีต่อเหมือนการต่อแบบข้ามหมุ่.....	60
2-68 มอเตอร์ 4 Pole ต่อแบบอนุกรมสตาร์(1-star) ในการต่อแบบนี้กระแสจะไหล ทางเดียว.....	61
2-69 มอเตอร์ 4 Pole ต่อแบบสตาร์และแต่ละเฟสต่อขนานกัน 2 ชุด (2-star) ในการต่อแบบนี้ กระแสจะไหลสองทาง.....	61

ภาพประกอบ	หน้า
2-70 (a) การต่อเฟส A แบบขนานกัน 2 ชุดของมอเตอร์ 4 Pole.....	62
(b) การต่อเฟส C แบบขนานกัน 2 ชุดของมอเตอร์ 4 Pole.....	62
(c) การต่อเฟส B แบบขนานกัน 2 ชุดของมอเตอร์ 4 Pole.....	62
(d) การต่อมอเตอร์ 4 Pole แบบขนานกัน 2 ชุด.....	62
2-71 แผนภาพวงกลมของการต่อมอเตอร์ 4 Pole แบบขนานกัน 2 ชุด.....	63
2-72 ขดลวด 4 ชุดต่อแบบอนุกรมสำหรับความต่างศักย์ของแหล่งจ่าย 460 V โดยที่ความต่างศักย์ของขดลวดเท่ากับ 115 V.....	63
2-73 ขดลวด 4 ชุดต่อแบบขนาน 2 ชุดสำหรับความต่างศักย์ของแหล่งจ่าย 230 V โดยที่ความต่างศักย์ของขดลวดเท่ากับ 115 V.....	64
2-74 ขดลวด 4 ชุดต่อแบบขนาน 4 ชุดสำหรับความต่างศักย์ของแหล่งจ่าย 115 V โดยที่ความต่างศักย์ของขดลวดเท่ากับ 115 V.....	64
2-75 มอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole ต่อแบบอนุกรมสตาร์.....	64
2-76 มอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole ต่อแบบสตาร์และขนานกัน 2 ชุด.....	65
3-1 แสดงขนาดของสเตเตอร์ (มอเตอร์แบบที่ 1).....	77
3-2 แสดงมุมทางไฟฟ้า.....	79
3-3 แสดงขนาดของสเตเตอร์ (มอเตอร์แบบที่ 2).....	85
4-1 โรเตอร์ของมอเตอร์พัดลมเพดานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 56 inches.....	89
4-2 แสดงสเตเตอร์ 3 เฟส 54 สลิต 18 Pole และพันขดลวดแบบแลป 2 ชั้น.....	90
4-3 แสดงมอเตอร์ 3 เฟส 18 Pole 54 สลิต.....	90
4-4 โรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส 8 Pole ขนาด 0.5 hp.....	91
4-5 แผ่นซิลิกอนที่วางอัดซ้อนในตัวจับยึด.....	92
4-6 ชิ้นงานที่ผ่านการ Wire Cut.....	92
4-7 แผ่นสเตเตอร์ที่อัดเข้ากับเรื่อนมอเตอร์.....	93
4-8 มอเตอร์ 3 เฟส 8 Pole 24 สลิต ต่อแบบ two parallel delta.....	93
4-9 Variable Voltage Transformer ชนิด 3 เฟส.....	94
4-10 แสดงการต่อสายไฟจากแหล่งจ่ายไฟ 380 V เข้ากับ Variable Voltage Transformer และ DOL Starter.....	95
4-11 วัดตมิตอร์.....	95
4-12 แสดงเครื่องวัดความเร็วรอบแบบแสง.....	96
4-13 แสดงการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบที่ 1.....	96

ภาพประกอบ	หน้า
4-14 แสดงการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบที่ 2.....	97
5-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 36 V และ 48 V (มอเตอร์แบบที่ 1).....	101
5-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสายและความเร็ว ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 36 V และ 48 V (มอเตอร์แบบที่ 1).....	102
5-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและความเร็ว ที่ความต่างศักย์ของแหล่ง จ่ายไฟ 36 V และ 48 V (มอเตอร์แบบที่ 1).....	103
5-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็ว ที่ความต่างศักย์ของแหล่ง จ่ายไฟ 36 V และ 48 V (มอเตอร์แบบที่ 1).....	104
5-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบ ที่ความต่างศักย์ของแหล่ง จ่ายไฟ 24 V และ 36 V (มอเตอร์แบบที่ 2).....	107
5-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสายและความเร็วรอบ ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 24 V และ 36 V (มอเตอร์แบบที่ 2).....	108
5-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาออกและความเร็วรอบ ที่ความต่างศักย์ของแหล่ง จ่ายไฟ 24 V และ 36 V (มอเตอร์แบบที่ 2).....	109
5-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบ ที่ความต่างศักย์ของแหล่ง จ่ายไฟ 24 V และ 36 V (มอเตอร์แบบที่ 2).....	110
6-1 กราฟเปรียบเทียบแรงบิด กระแสและความเร็วต่อหน่วยที่แรงบิดพิกัด 1.27 N-m (มอเตอร์แบบที่ 2).....	115
6-2 แสดงการติดตั้งมอเตอร์กับจักษุยาน 3 ล้อ.....	116

สารบัญคำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
a	ความเร็ว	m/s^2
a_l	จำนวนเส้นทางกระแสในแนวขนาน	
A	พื้นที่	m^2
A_{co}	พื้นที่หน้าตัดทางแม่เหล็ก	m^2
A_g	พื้นที่ช่องอากาศ	m^2
A_{st}	พื้นที่สล๊อต	m^2
\overline{A}	โหลดจำเพาะทางไฟฟ้า	
b_{is}	ความกว้างของฟันสเตเตอร์	m
B	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก	T
B_{cs}	ความหนาแน่นฟลักซ์ใต้สล๊อต	T
B_g	ความหนาแน่นฟลักซ์ช่องอากาศ	T
B_{is}	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ฟันสเตเตอร์	T
\overline{B}	โหลดจำเพาะทางแม่เหล็ก	
C_o	ค่าคงที่ Esson	
$\cos \varphi$	ตัวประกอบกำลัง	
d_{co}	เส้นผ่านศูนย์กลางของลวด	m
D_{is}	เส้นผ่านศูนย์กลางของสเตเตอร์	m
EMF	แรงเคลื่อนไฟฟ้า	V
F	แรงกระทำ	N
f	ความถี่	Hz
F_{mg}	แรงเคลื่อนแม่เหล็กช่องอากาศ	A turns
F_{mts}	แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ฟันสเตเตอร์	A turns
F_{mtr}	แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ฟันโรเตอร์	A turns
g	ระยะช่องอากาศ	m
H_{is}	ภาวะกระแสจำเพาะ หรือ Specific current loading	A/m
I	กระแสไฟฟ้า	A
I_m	Magnetizing Current	A

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
I_{rms}	กระแสรากลำดับสองเฉลี่ย	A
I_r	กระแสในโรเตอร์	A
I_{In}	กระแสพิกัด	A
J_{cos}	ค่าความหนาแน่นของกระแส	A/mm ²
k_f	ตัวประกอบรูปแบบ	
K_E	ส.ป.ส แรงเคลื่อนไฟฟ้า	
K_{fill}	ตัวประกอบการเติมเต็มในสล็อต	
K_{Fe}	ตัวประกอบของเหล็กสเตเตอร์	
K_{q1}	ตัวประกอบของการแผ่กระจาย	
K_{w1}	ตัวประกอบการพัน	
K_{y1}	ตัวประกอบของคอร์ด	
$l+K_{st}$	ส.ป.ส การอิมิตัวของฟันสเตเตอร์	
l	ความยาวตัวนำ	m
L	ความยาวของแกนเหล็กสเตเตอร์	m
m	จำนวนเฟส	
MMF	แรงเคลื่อนแม่เหล็ก	Aturns
n_{slot}	จำนวนตัวนำต่อสล็อต	
N	จำนวนรอบของขดลวด	turns
N_r	ความเร็วโรเตอร์	rpm
N_s	ความเร็วซิงโครนัส	rpm
N_{slot}	จำนวนสล็อตในสเตเตอร์	
p	จำนวนโพล	Pole
p_1	จำนวนคู่โพล	Pole pair
P_{in}	กำลังขาเข้า	W
P_n	กำลังพิกัด	W
P_{out}	กำลังขาออก	W
P_{loss}	กำลังสูญเสีย	W
P_{AV}	กำลังเฉลี่ย	W
q	จำนวนขดลวดต่อโพลต่อเฟส	

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
Q	กำลังขาออกจำเพาะ (Specific Power Output)	
r	รัศมีของโรเตอร์	m
R	ความต้านทานไฟฟ้า	Ω
s	สลิป	
S_{gap}	กำลังปรากฏที่ช่องอากาศ	VA
T	แรงบิด	N-m
v	ความเร็วเชิงเส้น	m/s
v_0	ความเร็วเมื่อไม่มีโหลด	m/s
V	ความต่างศักย์ไฟฟ้า	V
V_{rms}	ความต่างศักย์รากลกำลังสองเฉลี่ย	V
V_{iph}	ความต่างศักย์ของเฟส	V
W_l	จำนวนรอบต่อเฟส	
y	ระยะการลงขดลวด	
A	ความต้านทานแม่เหล็ก	H^{-1}
α_{ec}	มุมทางไฟฟ้า	
α_i	ตัวประกอบรูปร่างของความหนาแน่นฟลักซ์	
ϕ_r	ฟลักซ์แม่เหล็ก	Wb
η	ประสิทธิภาพ	
η_n	ประสิทธิภาพที่ค่าพิกัด	
φ_r	มุมล้าหลัง	
λ	อัตราส่วนยาวต่อกว้างของแกนเหล็ก	
μ	ส.ป.ส.แรงเสียดทานภายในแบร์ริง	
μ_0	ค่าคงที่ที่ว่างสนามแม่เหล็ก	H/m
τ	โพลพิทซ์	m
τ_s	สลีตพิทซ์	m
ω	ความเร็วเชิงมุม	rad/s

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นเครื่องต้นกำลังที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในวงการอุตสาหกรรมทั่วไป ทั้งนี้ก็เพราะพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีความสะดวกในการแปรรูปเป็นรูปอื่นได้ง่ายและเป็นพลังงานที่สะอาดเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้จากแหล่งอื่น [1]

โรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปที่มีการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นเครื่องต้นกำลังโดยส่วนใหญ่จะใช้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่มีความแข็งแรง ทนทาน ราคาถูก การบำรุงรักษาสะดวก ประสิทธิภาพและความแน่นอนในการใช้งานสูง จึงกล่าวได้ว่าเครื่องต้นกำลังในอุตสาหกรรมเกือบทั้งหมดใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำและกว่าร้อยละ 90 ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในรูปเครื่องต้นกำลังจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ [1] ปัจจุบันได้มีการนำมอเตอร์มาใช้ประโยชน์กับงานที่หลากหลายมากขึ้น และจากที่ได้ทำการศึกษาพบว่าในต่างประเทศได้มีการนำมอเตอร์ไฟฟ้ามาใช้เป็นตัวขับเคลื่อนโรดไฟฟ้า [2] ซึ่งข้อดีของโรดไฟฟ้าเมื่อเทียบกับรถที่ใช้เครื่องยนต์ คือ น้ำหนักเบา การเดินเครื่องเงียบ ไม่ใช้น้ำมันจึงไม่ก่อให้เกิดควันพิษที่จะส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมแต่อย่างไรก็ตามรถประเภทนี้ก็ยังมีความเสี่ยงอยู่เช่นกัน คือ มีความเร็วจำกัดและมีแรงบิดไม่สูง

เนื่องด้วยปัญหาด้านราคาน้ำมันที่ปรับตัวสูงขึ้นในปัจจุบัน การศึกษาและวิจัยคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อใช้กับรถไฟฟ้า จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะพัฒนาสู่การใช้รถไฟฟ้าแทนรถที่ใช้เครื่องยนต์ ทั้งนี้การใช้รถไฟฟ้ายังจะช่วยลดการใช้น้ำมัน ลดการเกิดมลภาวะทางอากาศและมลภาวะทางเสียงได้อีกด้วย

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษา ออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถจักรยาน โดยจะทำการศึกษาคูณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สร้างขึ้น รวมทั้งศึกษาถึงปัญหาที่เกิดขึ้นและกำหนดแนวทางการแก้ไขที่ถูกต้องต่อการนำไปใช้งานจริง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับใช้ขับเคลื่อนจักรยาน
- 1.2.2 เพื่อนำเสนอแนวทางการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้ไปใช้งานได้เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 กำหนดเงื่อนไขในการทำงานเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- 1.3.2 ทำการออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำขึ้นมาเพื่อใช้ขับเคลื่อนจักรยาน
- 1.3.3 ศึกษาคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับใช้ขับเคลื่อนจักรยาน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาแนวทางการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับใช้ขับเคลื่อนจักรยาน
- 1.4.2 กำหนดเงื่อนไขในการทำงานเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- 1.4.3 ทำการออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ รวมทั้งอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อใช้ในการทดสอบมอเตอร์
- 1.4.4 ทดสอบคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับใช้ขับเคลื่อนจักรยาน
- 1.4.5 เก็บรวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลวิจัย
- 1.4.6 จัดพิมพ์งานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.5.1 เข้าใจหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- 1.5.2 เข้าใจหลักการคำนวณและออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เหมาะสมสำหรับใช้ขับเคลื่อนจักรยาน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สำหรับใช้ในการขับเคลื่อนขั้วรถจักรยาน ดังนั้นในส่วนของทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาถึงองค์ประกอบทั่วไปของมอเตอร์ หลักการทำงานเบื้องต้นของมอเตอร์ การคำนวณค่าองค์ประกอบต่างๆ ที่สำคัญสำหรับการออกแบบและสร้างมอเตอร์ เพื่อให้ได้มอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ขับเคลื่อนขั้วรถจักรยาน

2.1 มอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลเพื่อใช้งานในการขับเคลื่อนอุปกรณ์หรือเครื่องจักรอื่นๆ โดยปกติมอเตอร์จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อทำงานที่ประมาณ 80-100% ของค่าโหลดเต็มพิกัด (Full load) [3] ซึ่งค่าที่บอกไว้ในป้ายชื่อ (Name Plate) ในหน่วยกิโลวัตต์หรือแรงม้าของมอเตอร์นั้นๆ จะเป็นค่าของกำลังขาออก (Power output) ดังนั้นขณะที่มีโหลดไม่เต็มพิกัดประสิทธิภาพของมอเตอร์จะมีค่าต่ำลง เนื่องจากมีการใช้กำลังไฟฟ้าสูงเกินความจำเป็น อย่างไรก็ตามข้อควรระวังก็คืออย่าให้มอเตอร์รับโหลดเกินพิกัด (Over load) เพราะจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพต่ำลงและความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้น โดยทั่วไปมอเตอร์ที่มีขนาดเท่ากันเมื่อทำงานที่ไม่เกินค่าโหลดพิกัดจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อทำงานที่โหลดเกินพิกัด

กำลังไฟฟ้านำเข้าสู่มอเตอร์จะนำไปใช้ในที่ต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นกำลังที่ใช้แล้วได้ประโยชน์ เช่น กำลังที่ใช้ในการหมุนโหลด ส่วนกำลังที่ใช้แล้วสูญเสีย เช่น กำลังที่ใช้ในการต้านความฝืดระหว่างแกนหมุน เรียกว่าเป็นกำลังสูญเสียทางกลในมอเตอร์และกำลังที่ใช้ในการต้านทานในเนื้อเหล็ก เรียกว่าเป็นกำลังสูญเสียทางไฟฟ้า หากพิจารณาทั้งระบบจะพบว่ามีกำลังสูญเสียไปในสายไฟที่นำไฟฟ้าเข้าสู่มอเตอร์ด้วย โดยทั่วไปแล้วกำลังสูญเสียทางกลจะขึ้นอยู่กับความฝืด ดังนั้นหากมีการออกแบบที่ดีและการดูแลรักษาที่ถูกต้องกำลังสูญเสียทางกลก็สามารถทำให้มีค่าน้อยที่สุดได้ สำหรับกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดจากสาเหตุต่างๆ ดังนี้

1. กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านขดลวด เรียกว่า กำลังสูญเสียในลวดทองแดง (Copper loss) กำลังสูญเสียชนิดนี้ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของลวดทองแดงที่กระแสไหลผ่านและแปรตามขนาดของกระแสยกกำลังสอง

2. กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กผ่านวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งส่วนใหญ่วัสดุที่ใช้ คือ เหล็กซิลิกอน (Silicon steel) กำลังสูญเสียชนิดนี้จะแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ [3]

นอกจากนี้กำลังสูญเสียทางไฟฟ้ายังแปรตามชนิดของโหลด และสภาวะแวดล้อมมอเตอร์ เช่น อุณหภูมิภายนอก เป็นต้น [4] ยิ่งกว่านั้นกำลังสูญเสียที่มากขึ้นไปก็เนื่องจากการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าไม่เหมาะสมกับโหลด โดยเฉพาะการเลือกมอเตอร์มาใช้งานในครั้งแรก เช่น ขนาดใหญ่หรือเล็กเกินไป หรือการเลือกใช้มอเตอร์ที่ไม่ได้มาตรฐานเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุที่นำไปสู่การใช้งานที่ไม่เหมาะสม เป็นผลให้มีกำลังสูญเสียในปริมาณที่สูงและการทำงานของมอเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 2-1

$$P_{in} = P_{out} + P_{loss} \quad (2-1)$$

ส่วนประสิทธิภาพของมอเตอร์ (Efficiency: η) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-2

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad (2-2)$$

เมื่อ

$$P_{in} = \text{กำลังขาเข้า (W)}$$

$$P_{out} = \text{กำลังขาออก (W)}$$

$$P_{loss} = \text{กำลังสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้น (W)}$$

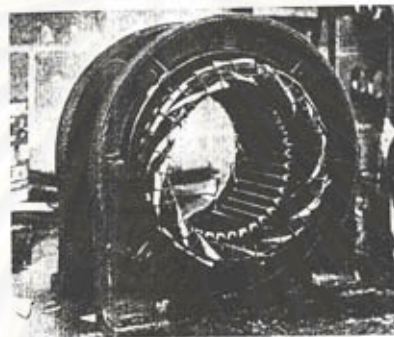
$$\eta = \text{ประสิทธิภาพของมอเตอร์}$$

เนื่องจากมอเตอร์ที่ได้มาตรฐานจะมีประสิทธิภาพมากกว่า 80% ในการทำงานทั่วไปและเพิ่มเป็นประมาณ 90% ที่ค่าโหลดเต็มพิกัด องค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์มีดังนี้ [5]

1. ตัวนำ (Conductor) เนื่องจากการกำลังสูญเสียในตัวนำขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสและกำลังสอง และมักจะมีค่าประมาณ 35% ของกำลังสูญเสียทั้งหมด ซึ่งความต้านทานนี้สามารถลดลงได้ด้วยการใช้ลวดขนาดใหญ่ขึ้นและปรับปรุงเทคนิคการผลิตเพื่อทำให้ตัวนำมีขนาดสั้นลง แต่จากวิธีการดังกล่าวทำให้ต้องมีพื้นที่สลิตมากขึ้น ดังนั้นแกนเหล็กจึงต้องมีขนาดเล็กลงซึ่งจะทำให้การอิมิตัวงายขึ้น แต่ก็จะทำให้กำลังสูญเสียในแกนเหล็กเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แนวทางแก้ไขอาจทำได้โดยการเพิ่มความยาวของแกนเหล็กหรืออาจเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วย

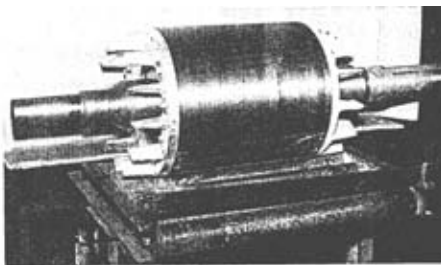
2. แกนแม่เหล็ก (Magnetic Core) เป็นส่วนประกอบที่มีราคาแพงที่สุดในมอเตอร์ ดังนั้น การเพิ่มปริมาณแกนแม่เหล็กจึงไม่ใช่การออกแบบที่ดีเท่าใดนัก กำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็กแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สูญเสียจากฮิสเทอรีซิสและกระแสวน (Hysteresis Loss and Eddy current Loss)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน ส่วนแรกทำด้วยวัสดุแม่เหล็กมีขดลวดทองแดงพัน เรียกว่า สเตเตอร์ (Stator) สเตเตอร์จะเป็นส่วนที่อยู่นิ่งกับที่ ดังรูปที่ 2-1 และอีกส่วนหนึ่งจะเป็นส่วนที่หมุนจะทำด้วยวัสดุแม่เหล็กเช่นกัน เรียกว่าโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในส่วนต่อไป

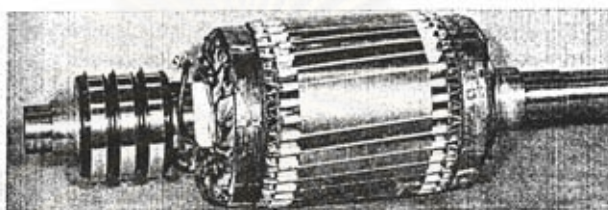


รูปที่ 2-1 สเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส [5]

มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) เป็นมอเตอร์ที่อาศัยหลักการปล่อยกระแสให้ไหลเข้าสู่ขดลวดสเตเตอร์ทำให้มีสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating magnetic fields) การหมุนของสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสขึ้นในขดลวดโรเตอร์และทำให้เกิดแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque) ส่งผลให้โรเตอร์หมุน ความเร็วของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำนี้จะไม่คงที่แต่จะแปรไปตามขนาดของโหลด [6] โดยทั่วไปมอเตอร์เหนี่ยวนำมีทั้งแบบเฟสเดียวและแบบ 3 เฟส ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้น ยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบตามความแตกต่างของโรเตอร์ แบบแรกเรียกว่าโรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) ดังรูปที่ 2-2b ซึ่งเรียกตามลักษณะการวางตัวนำที่โรเตอร์ แบบนี้จะทำได้ง่าย มีราคาถูก ข้อเสียคือ ปรับความเร็วรอบไม่ได้ กระแสขณะสตาร์ทสูง และอีกแบบหนึ่งเรียกว่าแบบพันด้วยขดลวด (Wound-rotor) ดังรูปที่ 2-2b ซึ่งจะมีขดลวดที่โรเตอร์ต่อผ่านความต้านทานภายนอกได้ทำให้สามารถปรับความเร็วได้ [5] แต่สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอก ดังนั้นจึงขอกกล่าวถึงเฉพาะหลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอกเท่านั้น



รูปที่ 2-2a โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) [5]



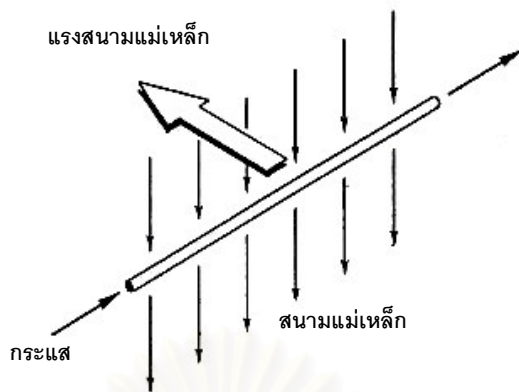
รูปที่ 2-2b โรเตอร์แบบพันด้วยขดลวด (Wound-rotor) [5]

2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับมอเตอร์เป็นส่วนหนึ่งของเนื้อหาที่สำคัญ ซึ่งจะช่วยสร้างความเข้าใจในหลักการทำงานของมอเตอร์และองค์ประกอบที่สำคัญต่างๆ ของมอเตอร์ เพื่อให้ขั้นตอนในการคำนวณ ออกแบบและสร้างมอเตอร์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.1 แรงสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic Force)

เมื่อนำตัวนำเก็บกระแส (Current-carrying conductor) ไปไว้ในสนามแม่เหล็ก ขนาดของแรงสนามแม่เหล็กจะขึ้นกับกระแสในตัวนำและความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength) กล่าวคือเมื่อเพิ่มกระแสหรือเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กก็จะทำให้แรงสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและแรงนั้นจะมีขนาดมากที่สุดก็ต่อเมื่อสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับตัวนำ โดยทั่วไปความเข้มสนามแม่เหล็กจะถูกอธิบายในรูปของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux density :B) ดังรูปที่ 2-3 แสดงให้เห็นแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดบนตัวนำที่กระแสไหลผ่านในสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2-3 แรงสนามแม่เหล็กที่เกิดบนตัวนำที่กระแสไหลผ่านในสนามแม่เหล็ก[7]

2.2.2 ฟลักซ์แม่เหล็กและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux and Flux Density)

เมื่อมีความเข้มสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นตรงปลายทั้งสองของแท่งแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กถูกบีบให้มีพื้นที่เล็กลงก็จะทำให้มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงขึ้น ดังรูปที่ 2-4 ซึ่งการคำนวณค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการที่ 2-3

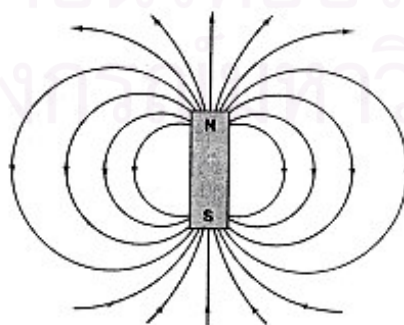
$$B = \frac{\phi}{A} \quad (2-3)$$

เมื่อ

B = ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)

ϕ = ฟลักซ์แม่เหล็ก (Wb)

A = พื้นที่ (m^2)



รูปที่ 2-4 ฟลักซ์แม่เหล็กรอบแท่งแม่เหล็ก [7]

2.2.3 แรงบนตัวนำ (Conductor Force)

แรงบนตัวนำ คือ แรงที่เกิดจากแท่งตัวนำตัดกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถแสดงแรงบนตัวนำได้จากสมการที่ 2-4 แต่สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่กระแสตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กเท่านั้น ถ้ากระแสขนานกับสนามแม่เหล็กจะทำให้แรงบนตัวนำเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงควรออกแบบให้กระแสตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก

$$F = BLI \quad (2-4)$$

เมื่อ

F = แรงบนตัวนำ (N)

B = ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)

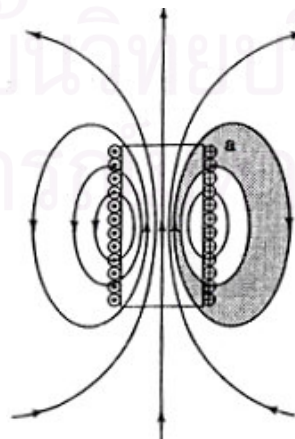
l = ความยาวตัวนำ (m)

I = กระแส (A)

ดังนั้นการที่จะทำให้ตัวนำได้รับแรงมากๆ ก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็กและเพิ่มกระแส

2.2.4 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)

หลักการของวงจรแม่เหล็กเกิดจากการที่สนามแม่เหล็กถูกเหนี่ยวนำขึ้นโดยโซเลนอยด์ (Solenoid) ดังรูปที่ 2-5 ซึ่งมีรูปแบบเหมือนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็ก (โดยทั่วไปจะใช้ขดลวดพันรอบแกนเหล็ก)



รูปที่ 2-5 สนามแม่เหล็กของโซเลนอยด์ [7]

2.2.5 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magneto motive force; MMF)

แนวทางหนึ่งสำหรับการเพิ่มความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก คือ การเพิ่มกระแสหรือการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวด โดยกำหนดปริมาณที่ขดลวดสามารถผลิตฟลักซ์แม่เหล็กได้ในเทอมของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก โดยอธิบายได้ว่าแรงเคลื่อนที่แม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดคูณด้วยปริมาณกระแส ซึ่งเขียนเป็นสมการที่ 2-5

$$MMF = NI \quad (2-5)$$

เมื่อ

MMF = แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Aturns)

N = จำนวนรอบของขดลวด (turns)

I = กระแส (A)

2.2.6 การเปรียบเทียบวงจรไฟฟ้าและความต้านทานแม่เหล็ก (Electric Circuit analogy and Reluctance)

วงจรไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบกับกฎของโอห์ม(Ohm' Law) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2-6

$$I = \frac{EMF}{Resistance} = \frac{V}{R} \quad (2-6)$$

เมื่อ

EMF = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (V)

I = กระแสไฟฟ้า (A)

R = ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่ากระแสขึ้นอยู่กับความต้านทาน กรณีที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดมีค่าคงที่

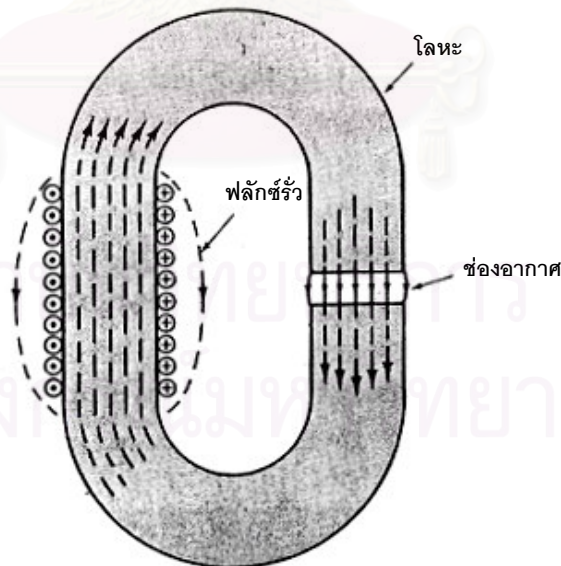
วงจรแม่เหล็กเมื่อ (Magnetic Circuit) เปรียบเทียบกับกฎของโอห์ม สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2-7

$$\phi = \frac{MMF}{Reluctance} = \frac{NI}{\Lambda} \quad (2-7)$$

เมื่อ

- MMF = แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Atturns)
- N = จำนวนรอบของขดลวด (turns)
- I = กระแส (A)
- Λ = ความต้านทานแม่เหล็ก (H^{-1})

ในสนามแม่เหล็กจำเป็นต้องมีความต้านทานแม่เหล็ก ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับความต้านทานของวงจรไฟฟ้าเพื่อให้ครบวงจร ดังรูปที่ 2-6 การเพิ่มฟลักซ์แม่เหล็กจะต้องลดความต้านทานแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กและจะต้องแทนส่วนวิถีอากาศ (Air path) หรือส่วนที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กต่ำ (Poor Magnetic) กับวัสดุที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กสูง (Good Magnetic Material) เพื่อลดความต้านทานแม่เหล็กและทำให้มีฟลักซ์แม่เหล็กสูงขึ้น



รูปที่ 2-6 แสดงวงจรแม่เหล็กกับช่องอากาศ [7]

โดยส่วนใหญ่จะใช้แท่งเหล็กเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดประโยชน์ต่อวงจรแม่เหล็ก 2 ประการ คือ

ประการที่หนึ่ง ความต้านทานแม่เหล็กของวิถีโลหะ (Iron path) จะน้อยกว่าวิถีอากาศมาก ทำให้มีแรงเคลื่อนแม่เหล็กมาก

ประการที่สอง ฟลักซ์แม่เหล็กเกือบทั้งหมดจะถูกกักไว้ในแท่งเหล็กได้ดี

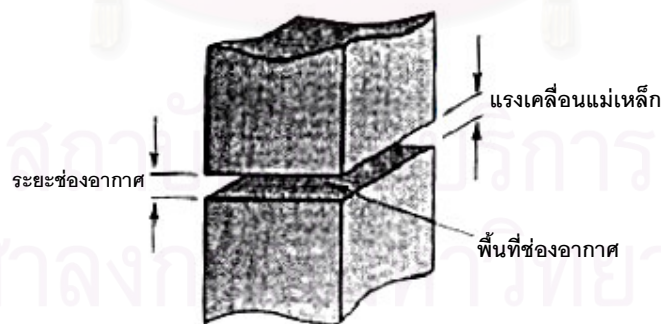
2.2.7 ช่องอากาศ (Air-gap)

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะสูงในวิถีโลหะ แต่ก็จะไม่เกิดกระแสภายในตัวนำขึ้นในแท่งเหล็กได้ ดังนั้นจึงต้องทำช่องอากาศขึ้นในวงจรแม่เหล็กดังรูปที่ 2-6

หากช่องอากาศแคบฟลักซ์แม่เหล็กจะกระโดดข้ามได้ง่าย ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กที่กระโดดข้ามจะมีค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กในแท่งเหล็ก หลักการของวงจรแม่เหล็กประกอบด้วยวิถีโลหะและช่องว่างอากาศหนึ่งช่องหรือมากกว่านั้น ความต้านทานแม่เหล็กของวิถีโลหะจะน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทานแม่เหล็กของช่องอากาศ แต่ระยะช่องว่างน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนอื่นๆ ของแท่งเหล็ก (หากพิจารณาช่องว่างอากาศกับแท่งเหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันจะพบว่าความต้านทานแม่เหล็กของวิถีอากาศมากกว่าวิถีโลหะ ถึง 1,000 เท่า) [7]

2.2.8 ความหนาแน่นของช่องอากาศ (Air gap Densities)

เนื่องจากส่วนวิถีโลหะไม่สามารถใช้แรงเคลื่อนแม่เหล็กในการขับเคลื่อนได้ ดังนั้นจึงต้องนำเอาฟลักซ์แม่เหล็กจากส่วนของช่องอากาศมาช่วยในการขับเคลื่อน ดังรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 ขอบเขตช่องอากาศและแรงเคลื่อนแม่เหล็ก [7]

จากรูปที่ 2-7สามารถอธิบายตามนิยามความต้านทานแม่เหล็กของช่องอากาศในพื้นที่ และระยะช่องอากาศ ดังสมการที่ 2.8

$$\Lambda = \frac{g}{\mu_0 A} \quad (2-8)$$

เมื่อ

- Λ = ความต้านทานแม่เหล็ก (H^{-1})
- g = ระยะช่องอากาศ (m)
- μ_0 = ค่าคงที่ที่ว่างสนามแม่เหล็ก (H/m)
- A = พื้นที่ช่องอากาศ (m^2)

จากสมการที่ 2-7 และ 2-8 จะสามารถคำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็กได้ดังสมการที่ 2-9

$$\phi = \frac{MMF}{\Lambda} = \frac{NIA\mu_0}{g} \quad (2-9)$$

เมื่อ

- ϕ = ฟลักซ์แม่เหล็ก (Wb)
- N = จำนวนรอบของขดลวด (turns)
- I = กระแส (A)
- A = พื้นที่ช่องอากาศ (m^2)
- μ_0 = ค่าคงที่ที่ว่างสนามแม่เหล็ก (H/m)
- g = ระยะช่องอากาศ (m)

จากนั้นจะสามารถหาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้โดยรวมสมการที่ 2-3 และ 2-9 จะได้สมการที่ 2-10

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{NI\mu_0}{g} \quad (2-10)$$

เมื่อ

B = ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)

N = จำนวนรอบของขดลวด (turns)

I = กระแส (A)

μ_0 = ค่าคงที่ที่ว่างสนามแม่เหล็ก (H/m)

g = ระยะช่องอากาศ (m)

2.2.9 สภาวะการอิ่มตัว (Saturation)

สภาวะการอิ่มตัวคือสภาวะที่แท่งเหล็กไม่สามารถรับฟลักซ์แม่เหล็กได้อีก โดยทั่วไปความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าจำกัดอยู่ระหว่าง 1.6 - 1.8 T ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแท่งเหล็ก การที่ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านช่องว่างอากาศจะทำให้เกิดความต้านทานความเป็นแม่เหล็กสูง ดังนั้นจึงต้องหลีกเลี่ยงการเกิดสภาวะอิ่มตัวของแท่งเหล็กในวงจร

เมื่อค่อยๆ เพิ่มแรงเคลื่อนแม่เหล็กหรือลดพื้นที่ของแท่งเหล็ก ที่ค่าคงที่ความหนาแน่นฟลักซ์ (Constant Flux density) ประมาณ 2 T จะเกิดสภาวะอิ่มตัวดังรูปที่ 2-8 ดังนั้นการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดสภาวะอิ่มตัวต้องให้ความหนาแน่นฟลักซ์สนามแม่เหล็กมีค่าไม่เกิน 1.5 T

ความต้านทานแม่เหล็กยังผล



รูปที่ 2-8 ความต้านทานแม่เหล็กของเหล็กเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่สภาวะความหนาแน่นฟลักซ์อิ่มตัว [7]

2.2.10 การสร้างแรงบิด (Torque Production)

เมื่อสนามแม่เหล็กตัดกับตัวนำในโรเตอร์ดังรูปที่ 2-9 จะทำให้เกิดเป็นแรงในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้เกิดแรงบิดขึ้นที่โรเตอร์ ซึ่งแรงบิดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก การหาขนาดของแรงบิดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-11

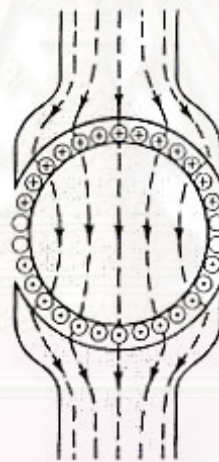
$$T = Fr \quad (2-11)$$

เมื่อ

T = แรงบิด (N-m)

F = แรง (N)

r = รัศมีของโรเตอร์ (m)

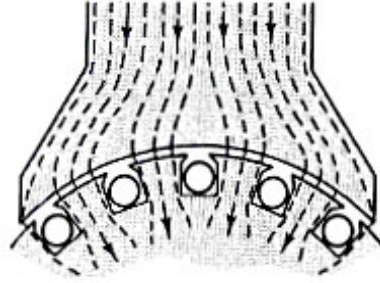


รูปที่ 2.9 ตัวนำบนโรเตอร์และตำแหน่งที่เกิดแรงบิด [7]

2.2.11 สล็อต (Slotting)

จากรูปตัวนำบนโรเตอร์และตำแหน่งที่เกิดแรงบิดในข้างต้นจะเห็นได้ว่าช่องว่างอากาศมีค่าน้อยที่สุดได้เท่ากับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ และการที่จะทำให้ช่องว่างอากาศนั้นน้อยลงไปอีกก็สามารถทำได้โดยการเจาะร่องหรือที่เรียกว่าสล็อตเพื่อใส่ตัวนำ แสดงดังรูปที่

2-10



รูปที่ 2-10 การเหนี่ยวนำของฟลักซ์เมื่อผิวโรเตอร์เป็นสลีตและบรรจุตัวนำในสลีต [7]

นอกจากนั้นแล้วการมีสลีตอยู่ภายในโรเตอร์จะช่วยให้เกิดแรงกระทำต่อโรเตอร์โดยตรงอีกด้วย กรณีที่ต้องคำนึงถึงเมื่อฟันสเตเตอร์มีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้มีฟลักซ์แม่เหล็กมากและเกิด ความต้านทานแม่เหล็กมากในแท่งเหล็กส่งผลให้เกิดสภาวะอิ่มตัวของแท่งเหล็ก

2.2.12 โหลดจำเพาะและปริมาตรจำเพาะ (Specific Loading and Specific Volume)

ในการออกแบบมอเตอร์ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนึงถึง 2 ตัวแปรสำคัญ ซึ่งก็คือ

1. โหลดจำเพาะทางแม่เหล็ก (Specific Magnetic Loading; \bar{B}) คือ ค่าเฉลี่ยของฟลักซ์แม่เหล็กในแนวรัศมีของผิวโรเตอร์
2. โหลดจำเพาะทางไฟฟ้า (Specific Electric Loading; \bar{A}) คือ กระแสในแนวแกนต่อระยะในแนวเส้นรอบวงของโรเตอร์

การออกแบบมอเตอร์ขึ้นอยู่กับตัวแปรสำคัญข้างต้น ซึ่งตัวแปรสำคัญเหล่านี้จะถูกจำกัดโดยคุณสมบัติของวัสดุและระบบหล่อเย็นที่ใช้กำจัดความร้อนที่สูญเสีย (Heat Loss)

โดยที่ ค่า \bar{B} จะไม่แปรเปลี่ยนแต่จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแม่เหล็ก

ค่า \bar{A} จะขึ้นอยู่กับระบบหล่อเย็น

2.2.13 แรงบิดและปริมาตรของมอเตอร์ (Torque and Motor volume)

แรงในแนวสัมผัส (Tangential force) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะแปรตาม $\bar{B} \bar{A}$ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดจะแปรผันตามแรงในแนวสัมผัสที่แสดงได้ดังนี้

$$T \propto \bar{B} \bar{A} D^2 L$$

โดยเทอม $D^2 L$ คือ สัดส่วนปริมาตรของโรเตอร์

2.2.14 กำลังขาออกจำเพาะ (Specific Output Power)

กำลังขาออกจำเพาะสามารถคำนวณได้จากแรงบิดคูณด้วยความเร็วเชิงมุม ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2-12

$$P = T\omega \quad (2-12)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและปริมาตรของมอเตอร์กับสมการที่ 2-12 จะสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ของกำลังขาออก แรงในแนวสัมผัส ปริมาตรและความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$P \propto B A D^2 L \omega$$

หรือ

$$Q \propto B A \omega$$

เมื่อ

T = แรงบิด (N-m)

P = กำลังขาออก (W)

Q = กำลังขาออกจำเพาะ (Specific Power Output)

B = โหลดจำเพาะทางแม่เหล็ก

A = โหลดจำเพาะทางไฟฟ้า

D = เส้นผ่านศูนย์กลางช่องอากาศ (m)

L = ความหนาของแกนเหล็ก (m)

ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

การที่จะทำให้ได้กำลังขาออกจำเพาะสูงสุด จะต้องให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วสูงสุดด้วยเช่นกัน โดยส่วนใหญ่มอเตอร์ความเร็วสูงจะเป็นมอเตอร์ขนาดเล็ก (Small-High-Speed Motor) ดังนั้นจึงต้องใช้ชุดเกียร์ซึ่งส่งผลให้เกิดเสียงดังเนื่องจากมีระบบส่งทอดกำลัง

2.2.15 ความสัมพันธ์ของกำลัง (Power relationships)

ความสัมพันธ์ของกำลังสามารถแบ่งออกเป็น 2 สภาวะดังนี้

1. สภาวะที่หยุดนิ่ง (Stationary Conditions)

โดยปกติแล้วค่าความร้อนสูญเสีย (Heat loss) จะไม่เกิดจากกำลังขาออกทางกล (Mechanical Output Power) แต่ทั่วไปแล้วจะเกิดจากกำลังขาเข้าทางไฟฟ้า (Electrical input power) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกำลังดังสมการอนุรักษ์พลังงาน จะได้ว่า

กำลังขาเข้าทางไฟฟ้า = อัตราส่วนการสูญเสียทางความร้อนในตัวนำ

$$V_1 I = I^2 R \quad (2-13)$$

2. สภาวะความเร็วคงที่ (Moving at Constant Speed Conditions)

กำลังขาออกทางกล = แรง \times ความเร็ว

$$= BIL \times v \quad (2-14)$$

เมื่อกำหนดให้โรเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ดังนั้นจะได้ว่าสมการการอนุรักษ์พลังงาน หมายถึง กำลังขาเข้าทางไฟฟ้า เท่ากับผลรวมของอัตราส่วนการสูญเสียทางความร้อนในตัวนำ และกำลังขาออกทางกล

$$V_2 I = I^2 R + BILv \quad (2-15)$$

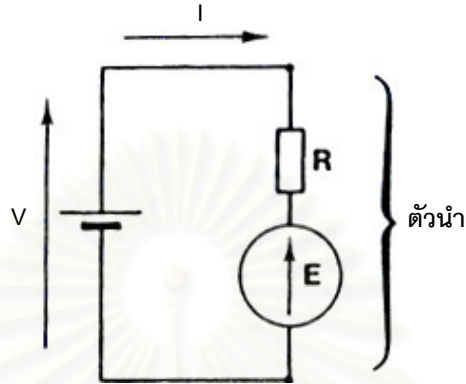
เมื่อเทอมที่สองของสมการที่ 2-15 เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังขาเข้าทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากกว่าในสภาวะหยุดนิ่ง ดังนั้นจึงนิยาม V_2 เป็นความต่างศักย์เมื่อตัวนำเคลื่อนที่ และจากการรวมสมการที่ 2.13 และ 2.15 จะได้ว่าความแตกต่างของความต่างศักย์เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเป็นดังนี้

$$(V_2 - V_1) = E = BLv \quad (2-16)$$

เพื่อรักษาให้กระแสคงที่ ดังนั้นความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น

2.2.16 วงจรสมมูล (Equivalent Circuit)

วงจรสมมูลสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าของตัวนำที่เคลื่อนที่ในวงจรสมมูลดังรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-11 วงจรสมมูลของมอเตอร์ [7]

จากกฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ (Kirchhoff's Law)

$$V = E + IR \quad (2-17)$$

หรือ

$$I = \frac{V - E}{R} \quad (2-18)$$

จากสมการที่ 2-17 คูณด้วย I ตลอด จะได้ว่า

กำลังขาเข้าทางไฟฟ้า = กำลังขาออกทางกล + ความสูญเสียของทองแดง

$$VI = EI + I^2R \quad (2-19)$$

เมื่อ

$$V = \text{ความต่างศักย์ (V)}$$

$$I = \text{กระแส (A)}$$

$$E = \text{แรงเคลื่อนไฟฟ้า (V)}$$

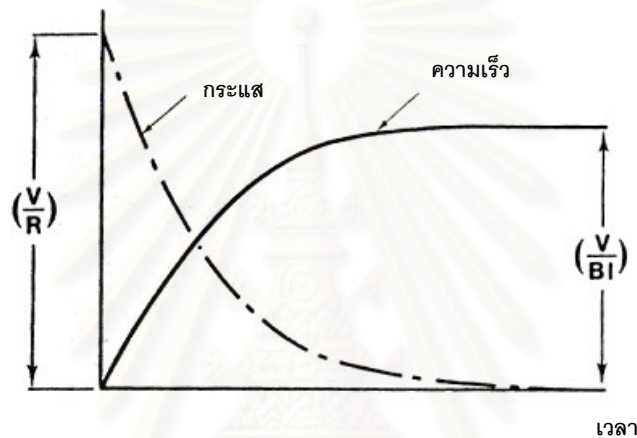
$$R = \text{ความต้านทานไฟฟ้า (\Omega)}$$

จากสมการ 2-18 ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดน้อยกว่าความต่างศักย์ที่ป้อน กระแสจะเป็นบวก และกำลังไฟฟ้าจะไหลจากแหล่งกำเนิด ทำให้มอเตอร์ทำงานได้ แต่ในทางกลับกันถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดมากกว่าความต่างศักย์ที่ป้อน กระแสจะไหลกลับสู่แหล่งกำเนิดซึ่งทำงานคล้ายเครื่องกำเนิดกระแส (Generator)

2.2.17 ภาวะการทำงานเป็นมอเตอร์ (Motoring Condition)

พฤติกรรมของมอเตอร์ที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก สามารถแบ่งได้ดังนี้

1. พฤติกรรมเมื่อไม่มีโหลดทางกล (Behavior with no Mechanical Load)



รูปที่ 2-12 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เมื่อไม่มีโหลดทางกล [7]

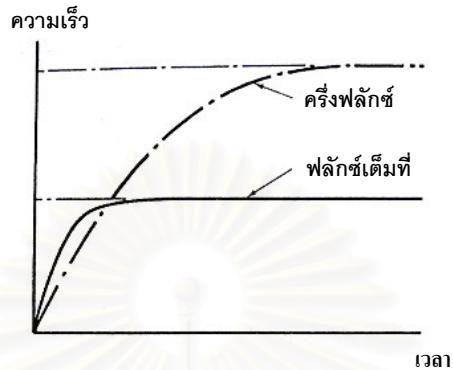
จากรูปที่ 2-12 ในช่วงแรกเห็นได้ว่ากระแสจะสูง เพราะไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าและตัวนำมีแรงกระทำสูง กรณีที่ไม่มีโหลดตัวนำจะมีความเร่งสูงในทิศทางของแรงกระทำ ขณะที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับความเร็วดังสมการที่ 2-16 เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และกระแสก็จะค่อยๆ ลดลง และเมื่อกระแสลดลงก็จะทำให้แรงลดลงเนื่องจากการลดลงของความเร่ง ทำให้ความเร็วเพิ่มสูงขึ้นจนกระแสตกลงเป็นศูนย์ ($E = V$ จากสมการ 2-18) ดังรูปที่ 2-12

ตามที่กล่าวมานี้เป็นสถานการณ์ในอุดมคติคือตัวนำมีความเร็วคงที่ ไม่มีกำลังทางกลและไม่มีการเข้าเพราะกระแสเป็นศูนย์ (ในที่นี้ไม่คิดแรงเสียดทาน) สามารถแทนความเร็วในสถานะที่ไม่มีโหลดด้วย v_0 ดังนั้นจากสมการที่ 2-16 จะได้ว่า

$$V = E = BLv_0$$

$$\therefore v_0 = \frac{V}{BL} \quad (2-20)$$

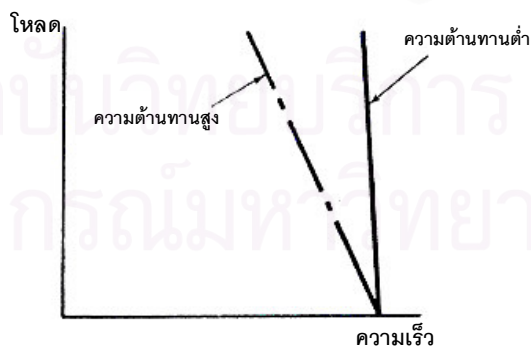
แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมความเร็วได้โดยการปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ โดยที่ความเร็วเป็นส่วนกลับของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 2-13



รูปที่ 2-13 ผลกระทบจากฟลักซ์ภายใต้ความเร่งและความเร็วคงที่ [7]

2. พฤติกรรมเมื่อมีโหลดทางกล (Behavior with a Mechanical Load)

เมื่อมีโหลดตัวนำจะเกิดความหน่วง ความเร็วจะลดลง แรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดน้อยกว่าความต่างศักย์ที่ป้อน และเริ่มมีกระแสไหล แรงสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างจากตัวนำจะเริ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดสมดุลครั้งใหม่ แต่ความเร็วจะน้อยกว่าในกรณีไม่มีโหลดและเกิดกำลังขาออกทางกล ในกรณีความต้านทานของตัวนำเป็นศูนย์ ความเร็วจะคงที่ทุกๆ ค่าของโหลด แต่ในความเป็นจริงความต้านทานของตัวนำไม่เป็นศูนย์ และความเร็วจะลดลงเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2-14



รูปที่ 2-14 ผลกระทบของความต้านทานต่อความเร็วและโหลด [7]

แรงสนามแม่เหล็กจะแปรผันตรงกับฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งจากในรูปที่ 2-15 แสดงให้เห็นว่าที่ฟลักซ์แม่เหล็กลดลง ส่งผลให้ความเร็วลดลงจากความเร็วที่ฟลักซ์แม่เหล็กเต็มที (Full flux)



รูปที่ 2-15 ผลกระทบของฟลักซ์เกี่ยวกับความเร็วและโหลด [7]

2.2.18 ขนาดของความต่างศักย์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าและประสิทธิภาพประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (Relative Magnitude of Voltage , Electro Motive Force and Efficiency)

สามารถแสดงให้เห็นได้ดังนี้

เมื่อสมมติให้ $R = 0.5 \ \Omega$

$$I = 4 \ \text{A}$$

$$E = 8 \ \text{V}$$

จากสมการ $V = E + IR$

เมื่อแทนค่า $V = 8 + 4(0.5) = 10 \ \text{V}$

กำลังขาเข้าทางไฟฟ้า (VI) เท่ากับ $40 \ \text{W}$

กำลังขาออกทางกล (EI) เท่ากับ $32 \ \text{W}$

$$\therefore \text{ประสิทธิภาพ} = 80 \%$$

แต่หากเพิ่มความต่างศักย์ให้เป็นสองเท่าจะได้ $V = 20 \ \text{V}$

ดังนั้นจะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้า $E = 20 - 4(0.5) = 18 \ \text{V}$

กำลังขาเข้าทางไฟฟ้า (VI) เท่ากับ $80 \ \text{W}$

กำลังขาออกทางกล (EI) เท่ากับ $72 \ \text{W}$

$$\therefore \text{ประสิทธิภาพ} = 90\%$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นและทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับเครื่องจักรในอุดมคติ (Ideal Machine) แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเท่ากับ ความต่างศักย์และมีประสิทธิภาพเท่ากับ 100%

2.3 ทฤษฎีการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor Design Theory)

เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงหลักการการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำว่ามีรูปแบบและลักษณะการทำงานอย่างไรก่อนทำการออกแบบ เริ่มแรกต้องทราบก่อนว่าสนามแม่เหล็กหมุนอย่างไรและโรเตอร์จะต้องหมุนตามสนามแม่เหล็กอย่างไร ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการหมุนของโรเตอร์จะไม่เร็วเท่ากับ การหมุนของสนามแม่เหล็ก แต่สำหรับการควบคุมความเร็วของโรเตอร์นั้นจำเป็นต้องควบคุมความเร็วในการหมุนของสนามแม่เหล็กด้วย [8] ดังนั้นการศึกษาถึงการหมุนของสนามแม่เหล็กจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับขดลวดสเตเตอร์เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์จะส่งผลให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็ก องค์ประกอบสำคัญสำหรับการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำมีดังต่อไปนี้

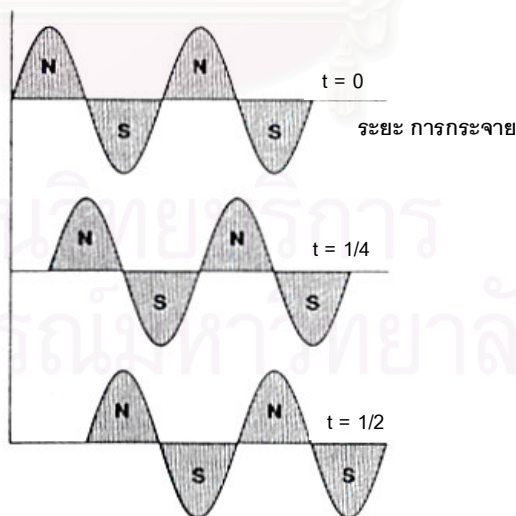
2.3.1 สนามแม่เหล็กหมุน

ฟลักซ์แม่เหล็กจะถูกผลิตขึ้นในสเตเตอร์และจะเหนี่ยวนำผ่านช่องอากาศมาสู่โรเตอร์ในแนวรัศมี เมื่อพิจารณารูปแบบสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole ในอุดมคติดังรูปที่ 2-16a จะเห็นได้ว่าเป็นขั้วเหนือ 2 ขั้วและขั้วใต้ 2 ขั้ว



(a)

แนวรัศมีมีความหนาแน่นฟลักซ์



(b)

รูปที่ 2-16 (a) รูปแบบของฟลักซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 4 Pole

(b) การกระจายความหนาแน่นฟลักซ์ในแนวรัศมีของช่องอากาศ [7]

โดยสามารถเขียนรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ในแนวรัศมีกับระยะทางรอบสเตเตอร์ ได้ดังรูปที่ 2-16b มีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์ซึ่งเรียกว่าคลื่นฟลักซ์ (flux wave) และระยะจากจุดสูงสุดของขั้วเหนือ (N-peak) ถึงจุดสูงสุดของขั้วใต้ (S-peak) เราเรียกว่าโพลพิทช์ (pole pitch) ในรูปนี้คลื่นฟลักซ์จะเคลื่อนที่ไปครั้งละครึ่งโพลพิทช์ และเมื่อเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบของสเตเตอร์คลื่นฟลักซ์จะเคลื่อนที่ครบ 2 รอบ และที่ความถี่ 50 Hz สนามแม่เหล็กหมุนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 25 รอบต่อวินาที (1,500 rpm) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (2-21)$$

เมื่อ

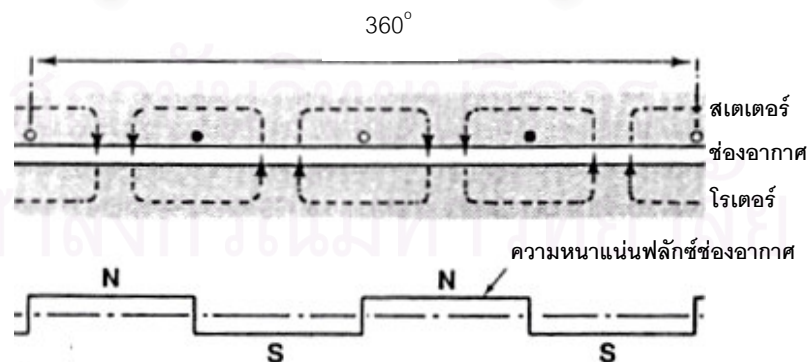
N_s = ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

f = ความถี่ (Hz)

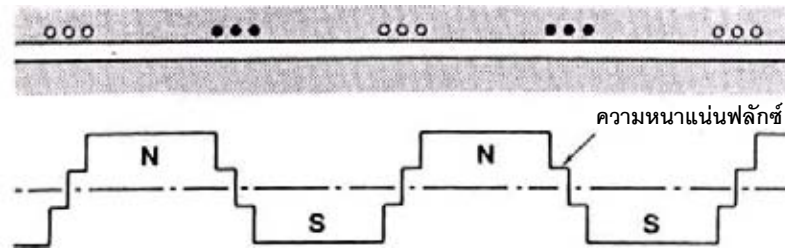
p = จำนวนโพล

2.3.2 สนามแม่เหล็กที่สร้างโดยขดลวด

ในส่วนนี้จะมุ่งเน้นไปที่ขดลวดในเฟสเดียวก่อนเพื่อศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างคลื่นฟลักซ์ของมอเตอร์ 4 โพล ดังรูปที่ 2-17 ซึ่งแสดงการจัดเรียงขดลวดแบบ 1 ขดลวดต่อโพล และทำให้คลื่นฟลักซ์มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม แต่ความเป็นจริงแล้วต้องการฟลักซ์ที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์ แนวทางแก้ไขก็คือเพิ่มจำนวนขดลวดต่อโพลให้มากขึ้น [9] ดังในรูปที่ 2-18 ได้เปลี่ยนเป็น 3 ขดลวดต่อโพลและให้แต่ละขดลวดเรียงกัน ซึ่งจะช่วยทำให้คลื่นเรียบขึ้นกว่าการจัดเรียงขดลวดแบบขดลวดต่อโพล

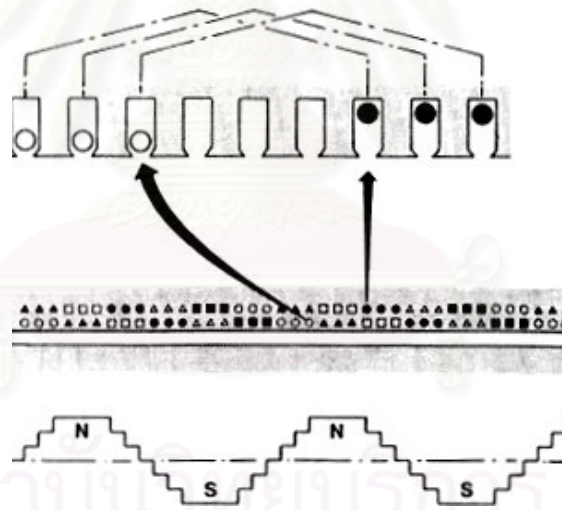


รูปที่ 2-17 แผนภาพของมอเตอร์ 4 Pole ลงร่อง 1 ขดลวดต่อโพล พันแบบชั้นเดียว [7]

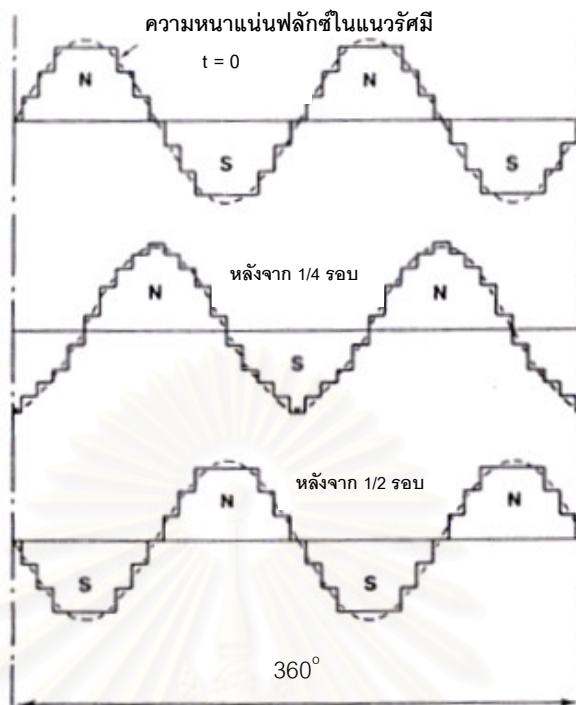


รูปที่ 2-18 แผนภาพของมอเตอร์ 4 Pole ลงร่อง 3 ขดลวดต่อโพล พันแบบชั้นเดียว [7]

วิธีที่จะทำให้คลื่นฟลักซ์เข้าใกล้ลักษณะคลื่นไซน์ชานนั้นก็คือวิธีการพันขดลวดแบบสองชั้น (Two-layer Winding) ดังรูปที่ 2-19 ซึ่งแสดงลักษณะคลื่นฟลักซ์ของเฟส A ส่วนในเฟส B และเฟส C นั้นก็จะมีรูปร่างเหมือนกับเฟส A แต่จะห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า (Electric angle) และเมื่อนำ 3 เฟสรวมเข้าด้วยกันแล้วก็จะมีรูปร่างดังรูปที่ 2-20



รูปที่ 2-19 แผนภาพการจัดวางขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole พันขดลวดแบบ 2 ชั้น [7]



รูปที่ 2-20 รูปแบบของคลื่นฟลักซ์ทั้ง 3 เฟส [7]

2.3.3 ทิศทางของการหมุน (Direction of Rotation)

ทิศทางของการหมุนของมอเตอร์ 3 เฟสจะขึ้นอยู่กับ การต่อวงจรมอเตอร์เป็นสำคัญ ทิศทางของการหมุนสามารถกลับทางได้โดยการสลับระหว่งการต่อของ 2 เฟส ลำดับเฟสของความ ต้องการทิศทาง การหมุนจะต้องตรวจสอบก่อนการเริ่มเดินเครื่อง

2.3.4 ฟลักซ์ช่องอากาศและฟลักซ์รั่ว (Air-gap flux and leakage flux)

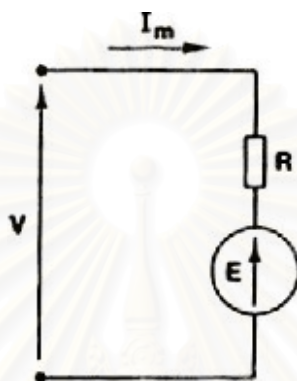
เมื่อฟลักซ์ถูกสร้างขึ้นโดยขดลวดสเตเตอร์ผ่านช่องอากาศไปยังพินโรเตอร์ จากนั้นจะส่งต่อไปยังตัวนำในโรเตอร์และกลับไปยังสเตเตอร์เช่นเดิม แต่ในความเป็นจริงแล้วมีฟลักซ์บางส่วน จะผ่านไปยังตัวนำโรเตอร์โดยตรงไม่ผ่านพินโรเตอร์เรียกว่าฟลักซ์รั่ว ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อสมรรถนะของมอเตอร์ [10]

2.3.5 ขนาดของคลื่นฟลักซ์หมุน (Magnitude of rotating flux wave)

โดยปกติแล้วความเร็วของคลื่นฟลักซ์จะขึ้นอยู่กับจำนวนโพลและความถี่ที่ป้อนให้แก่ มอเตอร์ ส่วนขนาดของฟลักซ์จะแปรผันตรงกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กและกระแส จากการที่ขดลวด สเตเตอร์ตัดกับสนามแม่เหล็กและคลื่นฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในขดลวดจะทำให้เกิดคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ขึ้นในขดลวดด้วย ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับขนาดของฟลักซ์และความเร็วของการเคลื่อนฟลักซ์ (ความถี่ที่ป้อนให้)

เมื่อเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าของทั้ง 3 เฟส จะเห็นได้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแต่ละเฟสมีขนาดเท่ากันแต่ตำแหน่งจะห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะเฟสเดียวซึ่งสามารถ อธิบายได้จากวงจรสมมูล ดังรูปที่ 2-21



รูปที่ 2-21 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [7]

จากกฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ จะได้ว่า

$$V = I_m R + E \quad (2-22)$$

เมื่อ

V = ความต่างศักย์ที่ป้อน (V)

I_m = Magnetizing Current (A)

R = ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)

E = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (V)

ในขณะที่เทอมของ $I_m R$ คือ ความต่างศักย์ตกคร่อมเนื่องจากความต้านทานขดลวด ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความต่างศักย์ที่ป้อน จึงสามารถประมาณได้ว่า

$$V \approx E$$

และจากความสัมพันธ์

$$E \propto B_m f$$

เมื่อ

$$B_m = \text{ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)}$$

$$f = \text{ความถี่ที่ป้อน (Hz)}$$

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่าง $V \approx E$ และ $E \propto B_m f$ จะได้สมการดังนี้

$$B_m = k \frac{V}{f} \quad (2-23)$$

เมื่อให้ค่า k เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบต่อขดลวดต่อเฟสและการกระจายตัวของขดลวด ในสมการ 2-23 เป็นทฤษฎีสำคัญของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ้าความถี่ที่ป้อนให้แก่มอเตอร์คงที่ ฟลักซ์จะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ที่ป้อนหรืออาจกล่าวได้ว่าความต่างศักย์ก่อให้เกิดฟลักซ์ (The voltage sets the flux) โดยทั่วไปแล้วฟลักซ์แม่เหล็กจะนิยมให้คงที่ แต่ถ้าจะลดหรือเพิ่มความเร็วยุโรปของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่จะนิยมเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่ป้อนด้วยเพื่อให้สัดส่วนระหว่าง V/f มีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลและกฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ จะพบว่าเมื่อลดปริมาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าลง จะส่งผลให้กระแสเพิ่มสูงขึ้นและทำให้ความต่างศักย์ตกคร่อมในเทอมของ $I_m R$ เพิ่มขึ้น ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ป้อน มีค่าไม่ใกล้เคียงกัน

2.3.6 โวลต์-แอมแปร์ (Volt-Ampere : VA)

โวลต์-แอมแปร์มีชื่อเรียกอย่างย่อว่า “วีเอ (VA)” ซึ่งเป็นหน่วยของความต่างศักย์คูณกับกระแสที่บ่งบอกถึงอัตราสูงสุดของแหล่งกำลังงานนั้น หน่วยของ วีเอ นี้บางครั้งทำให้เกิดความเข้าใจผิดกับหน่วยของกำลังงานที่เป็นวัตต์ เนื่องจากค่ากำลังงานที่เป็นวัตต์นั้นสร้างขึ้นจากผลคูณของความต่างศักย์และกระแสเช่นกัน แต่จะประยุกต์ใช้ได้เมื่อเป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรง (DC Circuit) เท่านั้น ในความเป็นจริงอุปกรณ์หลายชนิดสร้างขึ้นจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนทำให้เกิดสัมประสิทธิ์ของกำลังงานขึ้นตัวหนึ่งที่รู้จักกันในชื่อของ “ ตัวประกอบกำลัง (Power Factor : $\cos \varphi$) ” โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง วีเอ และ ค่าของกำลังงานเฉลี่ยดังสมการที่ 2-24

$$P_{AV} = (V_{rms} \times I_{rms}) \cos \varphi \quad (2-24)$$

เมื่อ

$$P_{AV} = \text{กำลังเฉลี่ย (W)}$$

$$V_{rms} = \text{ความต่างศักย์รากกำลังสองเฉลี่ย (V)}$$

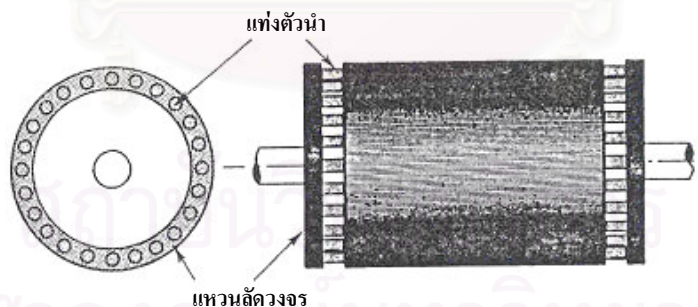
$$I_{rms} = \text{กระแสรากกำลังสองเฉลี่ย (A)}$$

$$\cos \varphi = \text{ตัวประกอบกำลัง}$$

การระบุหน่วยของกำลังงานเป็นค่าวีเอนี้มักจะนิยมใช้กันเมื่อวงจรทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟสลับ โดยผลิตภัณฑ์จะระบุค่าของอัตราวีเอ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าใจอัตราสูงสุดเมื่อมีภาระโหลดของวงจรเป็นความต้านทาน และเมื่อโหลดของวงจรเปลี่ยนแปลงไป กำลังงานเฉลี่ยในวงจรจะเปลี่ยนแปลงไปตามสมการที่ 2-24

2.3.7 โรเตอร์กรงกระรอก (Cage rotor)

โรเตอร์กรงกระรอกทำจากแผ่นเหล็กอัดซ้อนกัน (Laminated Steel) และมีช่องว่างเพื่อใช้สำหรับบรรจุตัวนำดังรูป 2-22 ตัวนำที่ถูกบรรจุไว้ในโรเตอร์จะต่อถึงกันเพื่อให้เกิดการลัดวงจร (Short circuit) ตำแหน่งรอยเชื่อมตรงปลายแท่งตัวนำเรียกว่าแหวนลัดวงจร (short circuit ring) ซึ่งอาจทำมาจากทองแดงหรืออลูมิเนียมก็ได้



รูป 2-22 โครงสร้างโรเตอร์กรงกระรอก [7]

2.3.8 สลิป (Slip)

สลิปคือความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัสและความเร็วโรเตอร์เมื่อเทียบกับความเร็วซิงโครนัส โดยสามารถเขียนเป็นสมการที่ 2-25

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2-25)$$

ความแตกต่างระหว่างความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วของโรเตอร์ เรียกว่า ความเร็วสลิป (Slip speed) ดังนั้นเขียนสมการได้

$$\text{ความเร็วสลิป} = N_s - N_r \quad (2-26)$$

เมื่อ

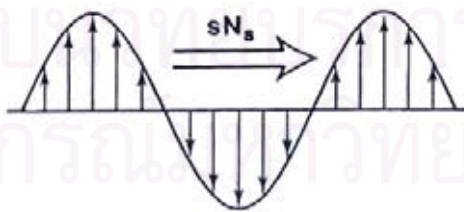
s = สลิป

N_s = ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)

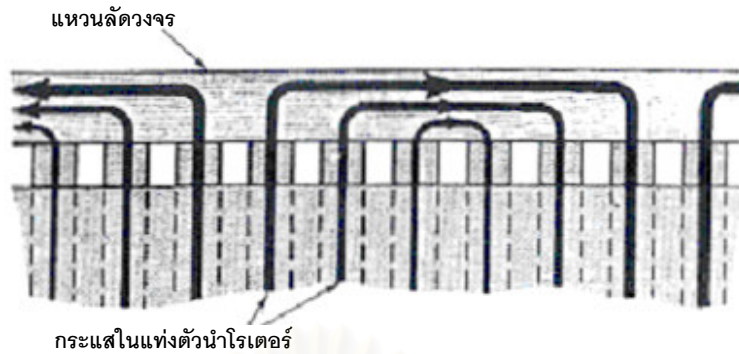
N_r = ความเร็วโรเตอร์ (rpm)

2.3.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์

เมื่อตัวนำในโรเตอร์ตัดกับฟลักซ์จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะแปรผันตรงกับสลิป ในรูปที่ 2-23 จะแสดงคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำโดยโรเตอร์ ซึ่งคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะไปเหนี่ยวนำวงจรกระแสในโรเตอร์ ดังรูปที่ 2-24 และสามารถทำให้เกิดแรงบิดขึ้นมาได้



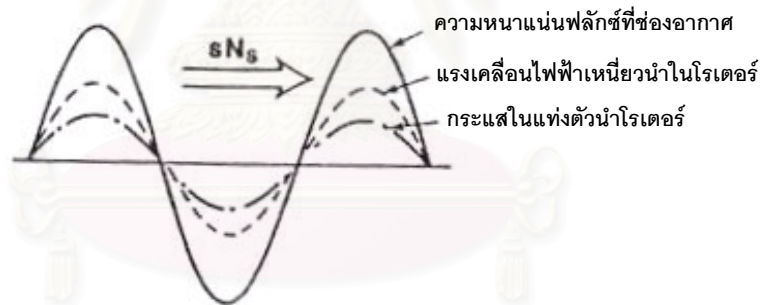
รูปที่ 2-23 รูปแบบแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว sN_s [7]



รูปที่ 2-24 รูปแบบของวงจรระแสในตัวนำโรเตอร์และแหวนปลาย [7]

2.3.10 กระแสโรเตอร์และแรงบิด (ในกรณีที่มีสลิปต่ำ)

เมื่อค่าสลิปต่ำ (ประมาณ 0-10%) ความถี่ในการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะต่ำ ประมาณ 0-5 Hz) [11] เพราะโรเตอร์มีความถี่ต่ำ ในกรณีนี้จะมีแอกแทนซ์ต่ำซึ่งส่งผลต่อคลื่นกระแสในตัวนำโรเตอร์ คลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์และคลื่นฟลักซ์ของช่องอากาศ อยู่เฟสเดียวกัน (In-phase) ดังแสดงในรูปที่ 2-5



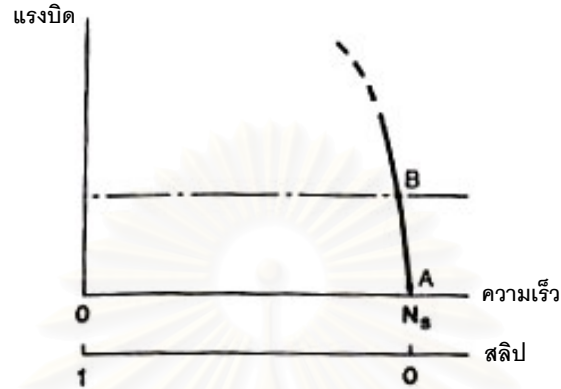
รูปที่ 2-25 รูปแบบของความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องอากาศ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ และกระแสในตัวนำโรเตอร์ (ในกรณีที่มีสลิปต่ำ) [7]

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด ความหนาแน่นฟลักซ์และกระแสในโรเตอร์ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$T \propto BI_r$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นในกรณีที่มีสลิปน้อย ในรูปที่ 2-26 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาวะที่ไม่มีโหลดมอเตอร์จะหมุนที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเล็กน้อยหรือจุด A และเมื่อมอเตอร์ได้รับโหลดค่าหนึ่งจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในโรเตอร์

สลิปจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมอเตอร์ปรับสมดุลครั้งใหม่มายังจุด B โดยทั่วไปมอเตอร์ที่อยู่ในสภาวะรับโหลดเต็มที่จะเป็นสภาวะที่มอเตอร์สามารถรับกระแสได้สูงสุด เพราะฉะนั้นถ้ามอเตอร์รับโหลดมากกว่านี้จะทำให้มอเตอร์รับโหลดเกินพิกัด (Overload) โดยแสดงเป็นเส้นประดังรูปที่ 2-26

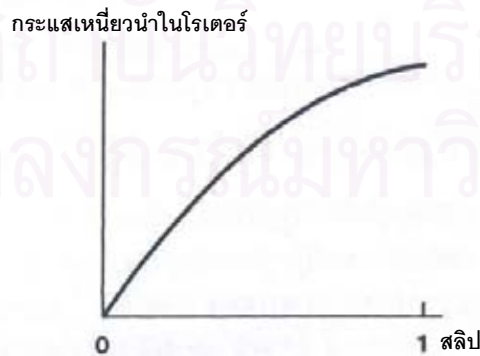


รูปที่ 2-26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว (ในกรณีที่สลิปต่ำ) [7]

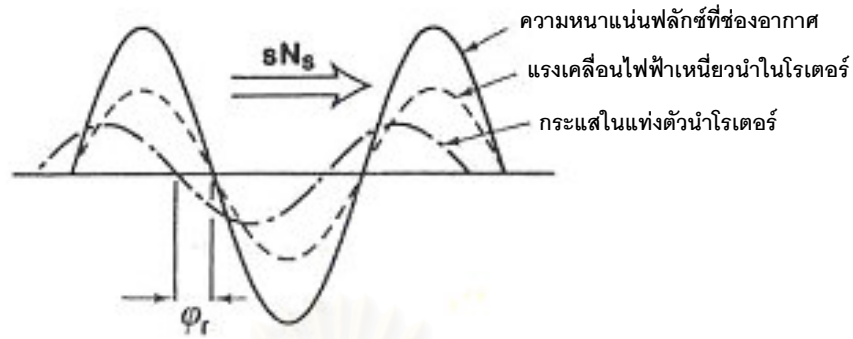
2.3.11 กระแสโรเตอร์และแรงบิด (ในกรณีที่สลิปสูง)

เมื่อสลิปเพิ่มขึ้นสูงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์และความถี่ของโรเตอร์จะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2-27 ในขณะที่สลิปสูง คลื่นกระแสในโรเตอร์จะล่าหลังคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2-28 และล่าหลังเป็นมุม ϕ ซึ่งทำให้คลื่นฟลักซ์ไม่อยู่ในเฟสเดียวกับคลื่นกระแสโรเตอร์ ทำให้แรงบิดที่ได้รับน้อยลง สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด ความหนาแน่นฟลักซ์และกระแสในโรเตอร์ได้ดังนี้

$$T \propto BI_r \cos \phi_r$$



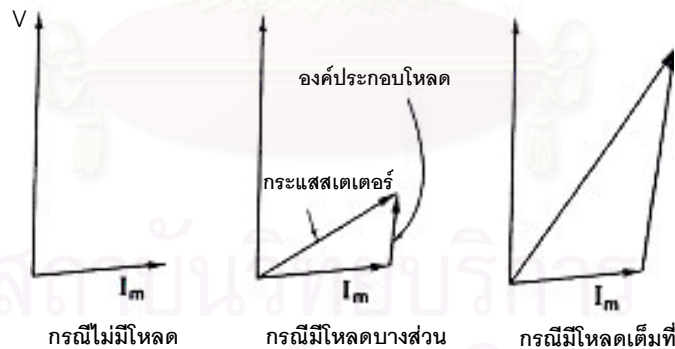
รูปที่ 2-27 ขนาดของกระแสเหนี่ยวนำในโรเตอร์ [7]



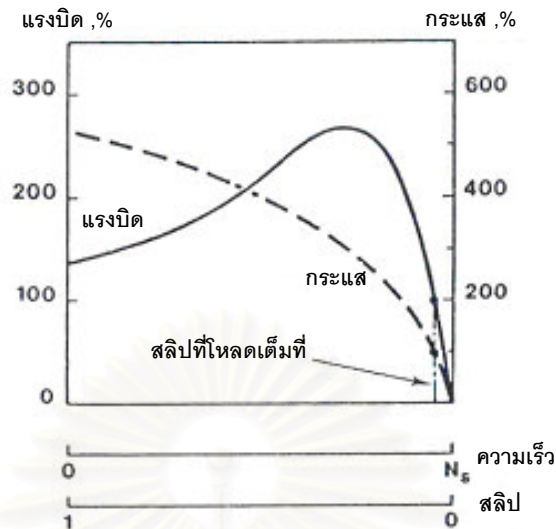
รูปที่ 2-28 รูปแบบของความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องอากาศ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ และกระแสในตัวนำโรเตอร์ (ในกรณีที่สลิปสูง) [7]

2.3.12 ลักษณะของกระแสเตเตอร์และความเร็ว

สลิปจะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับโหลดเพิ่มขึ้นและกระแสในสเตเตอร์ก็จะเพิ่มสูงขึ้น สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2-29 ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ กระแสในสเตเตอร์เมื่อไม่มีโหลด มีโหลดบางส่วนและมีโหลดเต็มที่ จะเห็นได้ว่าเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสเตเตอร์สูงขึ้นมาก ส่วนในรูปที่ 2-30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด ความเร็ว และกระแสเตเตอร์ จะเห็นได้ว่าเมื่อสลิปเท่ากับหนึ่งจะมีกระแสสูงสุดซึ่งเป็นกระแสอนสตาร์ทนั่นเอง



รูปที่ 2-29 แผนภาพเฟเซอร์แสดงกระแสเตเตอร์ในสภาวะไม่มีโหลด มีโหลดบางส่วนและมีโหลดเต็มพิกัด [7]



รูปที่ 2-30 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของแรงบิดกับความเร็วและกระแสกับความเร็วสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก [7]

2.4 ลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Operating Characteristics of Induction Motor)

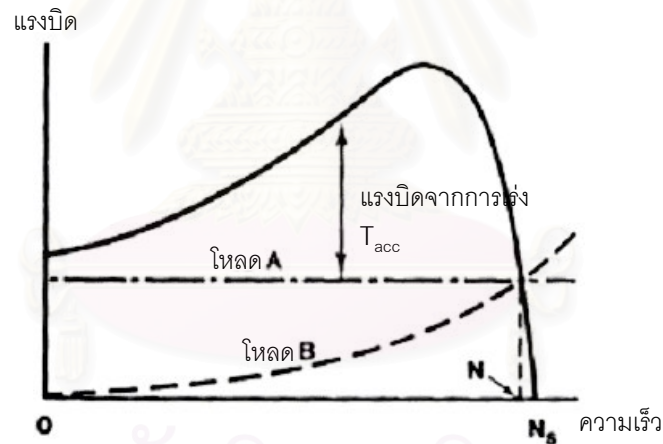
2.4.1 การสตาร์ทมอเตอร์กรงกระรอก (Method of Starting Cage Motor)

ขณะที่มอเตอร์สตาร์ท กระแสในมอเตอร์กรงกระรอกจะมากกว่ากระแสพิกัดโดยเฉลี่ยประมาณ 4-8 เท่า [12] วิธีการต่อมอเตอร์โดยตรงกับวงจรต้นกำลังเพื่อใช้สตาร์ทนี้เรียกว่า Direct-on-Line (DOL) หรือ Direct-to-Line (DTL) การสตาร์ทแบบนี้เป็นสาเหตุให้กระแสตกลงและมีผลกระทบต่ออุปกรณ์อื่นที่ใช้ระบบจ่ายไฟเดียวกัน หากระบบจ่ายไฟในโรงงานไม่พอควรจะใช้สตาร์ทเตอร์ (Starter) เพื่อจำกัดกระแสตอนสตาร์ทและระหว่างการเดินเครื่องเข้าสู่ความเร็วพิกัดด้วยการลดขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่รับกวนระบบจ่ายไฟ [13] และเมื่อมอเตอร์มีความเร็วเพิ่มขึ้นกระแสจะตกลง จากนั้นจึงนำสตาร์ทเตอร์ออกเมื่อใกล้เข้าสู่ความเร็วเต็มที่ (Full speed) ผลของการลดกระแสในการสตาร์ทคือแรงบิดขณะสตาร์ทลดลงและการเดินเครื่องเข้าสู่ความเร็วเต็มที่ที่ใช้เวลานานขึ้น การที่จะใช้สตาร์ทเตอร์หรือไม่นั้นก็ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของขนาดมอเตอร์ ความจุของระบบจ่ายไฟและขนาดของโหลด

มอเตอร์ที่สตาร์ทโดยไม่มีโหลดจะสามารถเร่งได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดกระแสสูงในช่วงเวลาสั้นๆ เช่น มอเตอร์ขนาด 10 kW สามารถเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้นภายในเวลาแค่ไม่กี่วินาที ในทางตรงกันข้ามหากมีโหลดการเร่งก็จะต้องใช้เวลาหลายวินาที ซึ่งกรณีนี้จำเป็นต้องใช้สตาร์ทเตอร์ช่วยในการสตาร์ท

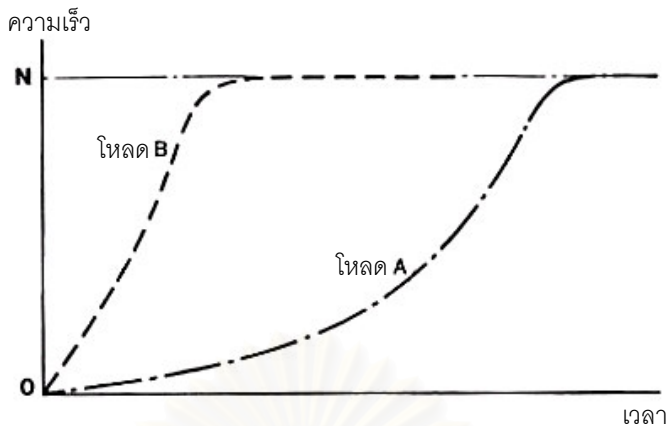
2.4.2 การเดินเครื่องขึ้นและขอบเขตการทำงานที่เสถียร (Run-up and Stable operating regions)

แรงบิดในการสตาร์ทเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมากและในการคาดการณ์ว่าความเร็วจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างไรหลังจากเปิดสวิตช์นั้น ต้องมีเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วและโหลดของมอเตอร์ จะเห็นได้จากรูปที่ 2-31 เส้นทึบคือเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็ว (Torque-speed curve) ของมอเตอร์ ส่วนเส้นประคือโหลด 2 แบบ โดยที่โหลด A คือโหลดจากเครื่องชักลาก(Hoist) ซึ่งจะให้ค่าแรงบิดคงที่ทุกๆ ความเร็ว ส่วนโหลด B จะเป็นโหลดจากพัดลมเพื่อให้ง่ายขึ้นจึงได้สมมุติให้โหลดที่เพลามอเตอร์ของทั้งโหลด A และโหลด B เท่ากัน



รูปที่ 2-31 รูปแบบของเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็ว ที่โหลดต่างกัน 2 ชนิดซึ่งมีบริเวณความเร็วคงตัวเหมือนกัน [7]

เมื่อ T_{acc} คือ ความแตกต่างระหว่างแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นกับแรงบิดที่โหลดต้องการ โหลดทั้งสองมีความเร็วคงตัว (Steady speed) N จุดเดียวกัน (เป็นจุดที่แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นเท่ากับแรงบิดที่โหลดต้องการ) แต่โหลด B มาถึงจุดเสถียรเร็วกว่าเพราะมี T_{acc} สูงกว่าโหลด A ซึ่งโหลด A จะเดินเครื่องขึ้นอย่างช้าๆ ในระยะแรกและเข้าสู่ภาวะสมดุลในที่สุดดังในรูปที่ 2-32



รูปที่ 2-32 เส้นโค้งในระหว่างเดินเครื่องขึ้น (run-up) ของมอเตอร์และโหลดในรูป 2-31 [7]

2.4.3 โหลดที่มีความเฉื่อยสูง – ความร้อนเกิน (High inertia load-overheating)

พลังงานรวม (Total energy) ที่หมดไปกับการกลายเป็นความร้อนในขดลวดจะเท่ากับพลังงานจลน์ของมอเตอร์บวกโหลด เพราะฉะนั้นถ้าความเฉื่อยของโหลดสูง ก็จะทำให้ขดลวดร้อนมาก การเดินเครื่องขึ้นของมอเตอร์ที่เป็นแบบมอเตอร์ปิด (Enclosed motor) ก็จะมีการระบายโดยใช้ครีบ (fin) และมีพัดลมเป่าโดยตรงกับปลายเพล่า อีกข้างหนึ่งของมอเตอร์

2.4.4 การสูญเสียของโรเตอร์ที่สถานะคงตัวและประสิทธิภาพ (Steady-state rotor losses and efficiency)

เนื่องจากกำลังที่เอามาจากฟลักซ์ช่องอากาศไม่สามารถสร้างเป็นพลังงานกลได้ทั้งหมด เพราะว่ามีบางส่วนได้สูญเสียเป็นความร้อนในวงจรรของโรเตอร์ สมมติว่ากำลังที่เอามาจากฟลักซ์ช่องอากาศเป็น P_r ดังนั้นกำลังที่สูญเสียเนื่องจากสลิปคือ sP_r ส่วนกำลังที่เหลือ คือ $(1-s)P_r$ ซึ่งสามารถนำไปสร้างเป็นพลังงานกล

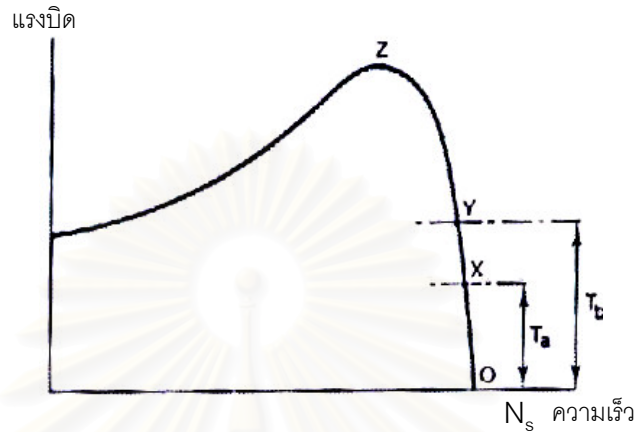
ดังนั้นเมื่อมอเตอร์ทำงานที่สถานะคงตัว ประสิทธิภาพของโรเตอร์คือ

$$\eta_r = \frac{\text{กำลังขาออกทางกล}}{\text{กำลังขาเข้าของโรเตอร์}} = (1-s) \quad (2-27)$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อสลิปมากประสิทธิภาพของโรเตอร์จะน้อย เพราะจะสูญเสียไปเป็นความร้อนที่โรเตอร์ แต่ประสิทธิภาพทั้งหมด (Overall Efficiency) ของมอเตอร์ จะน้อยกว่าประสิทธิภาพของโรเตอร์เพราะจะมีการสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ อิทธิพลของลมและการสูญเสียจากแรงเสียดทานรวมไปด้วย

2.4.5 สถานะคงตัวเสถียรภาพ Pull-out torque และการหยุด (Steady-State stability pull-out torque and stalling)

จากรูปที่ 2-33 เส้นประในแนวนอนแสดงโหลด และจุดที่ความเร็ว X เป็นจุดเสถียร



รูปที่ 2-33 เส้นโค้งแรงบิดกับความเร็วแสดงการทำงานในขอบเขตที่เสถียร (OXYZ) [7]

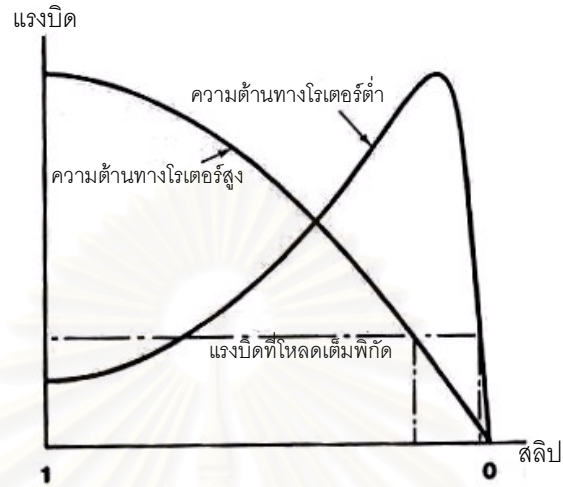
จากรูปแสดงว่าถ้าแรงบิดจากโหลดเพิ่มขึ้นจาก T_a และ T_b ส่งผลให้แรงบิดที่โหลดต้องการมากกว่าแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น ดังนั้นมอเตอร์จะลดความเร็วลง จนมาถึงจุดใหม่ (ความเร็ว Y) ซึ่งจะเป็นจุดสมดุลใหม่และความเร็วจะลดลงเล็กน้อย แต่ในทางกลับกันถ้าแรงบิดที่โหลดต้องการลดลงจากจุดสมดุลใหม่ ความเร็วก็จะสูงขึ้นอีก แต่ถ้าแรงบิดที่โหลดต้องการสูงขึ้นจนถึงจุด Z ซึ่งเป็นจุดที่มอเตอร์สามารถสร้าง pull-out torque มอเตอร์ตัวนั้นก็จะมีโหลดเกิน (Overload) และเกิดความร้อนเกิน (Overheating) ขึ้น ถ้าแรงบิดที่โหลดต้องการ เพิ่มขึ้นมากๆ มอเตอร์ก็จะหยุด (Stalling) ถ้าแรงบิดที่โหลดต้องการเกิน pull-out torque จะทำให้เครื่องเดินตะกุกตะกัก เกิดเสียงดัง แต่ในกรณีเครื่องจักรอก ถ้ามีโหลดเกิน มอเตอร์จะหมุนกลับทาง ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยติดเบรกเข้าไป

2.4.6 เส้นโค้งแรงบิดกับความเร็ว- อิทธิพลของพารามิเตอร์ของโรเตอร์ (Torque-speed curves-Influence of rotor parameters)

รูปร่างของเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็วขึ้นอยู่กับความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงเฉพาะโรเตอร์กรงกระรอกเท่านั้น

จากรูปที่ 2-34 ในกรณีที่โรเตอร์มีความต้านทานต่ำ ค่าสลิปที่โหลดเต็มที่ของโรเตอร์จะน้อยกว่าค่าสลิปที่โหลดเต็มที่ของโรเตอร์ที่มีความต้านทานสูง และหากค่าสลิปน้อยก็ทำให้มีความเร็วสูงทั้งยังให้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงควรที่จะลดความต้านทานของโรเตอร์

แต่การที่มีความต้านทานต่ำนั้น ก็จะมีปัญหาตอนสตาร์ทเพราะแรงบิดตอนสตาร์ทไม่พอที่จะขับโหลดและกระแสก็จะมากขึ้น



รูปที่ 2-34 อิทธิพลของความต้านทานโรเตอร์ต่อเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็วของโรเตอร์
กรงกระรอก (เส้นประในแนวตั้งแสดงความเร็วที่โหลดเต็มพิกัด) [7]

สลิปที่ pull-out torque จะแปรผันตรงกับค่าความต้านทานของโรเตอร์ ถ้าค่าความต้านทานของโรเตอร์สูงก็จะทำให้แรงบิดตอนสตาร์ทสูงขึ้น แต่ก็ทำให้ประสิทธิภาพต่ำเพราะว่าสลิปตอนความเร็วพิกัดสูง การใช้ประโยชน์ของมอเตอร์ที่มีความต้านทานของโรเตอร์สูง เช่นในเครื่องอัดเหล็ก โดยมอเตอร์จะเร่งขึ้นเพื่อเก็บพลังงานที่ล้อตุ่นกำลัง (Flywheel) และล้อตุ่นกำลังจะค่อยๆ หมุนลงอย่างช้าๆ เพื่อทำการอัดและมอเตอร์ก็จะเร่งขึ้นอีกครั้ง มอเตอร์ชนิดนี้ต้องการแรงบิดสูงๆ แต่จะมีประสิทธิภาพต่ำ [13]

สรุปคือโรเตอร์ที่มีความต้านทานสูงจะใช้ประโยชน์ในการสตาร์ทเพราะมีแรงบิดตอนสตาร์ทสูงกว่าโรเตอร์ที่มีความต้านทานต่ำและเหมาะกับงานที่ใช้ความเร็วต่ำ อย่างไรก็ตามโรเตอร์ที่มีความต้านทานต่ำจะใช้งานในช่วงความเร็วเต็มที่ ทางที่ดีคือต้องทำให้โรเตอร์มีความต้านทานสูงเวลาสตาร์ทและมีความต้านทานต่ำในช่วงความเร็วเต็มที่ [12], [13] วิธีที่เป็นไปได้คือการใช้โรเตอร์แบบกรงคู่ (Double cage) หรือ แท่งลึก (Deep bar)

2.4.6.1 โรเตอร์แบบกรงคู่ (Double Cage Rotors)

โดยโรเตอร์ชนิดนี้จะทำกรงชั้นนอกเป็นโลหะผสมระหว่างทองแดง และดีบุกหรือบรอนซ์ (Bronze) เพื่อให้มีความต้านทานสูง ส่วนกรงชั้นในใช้ทองแดงเพื่อให้มีความต้านทานต่ำแสดง ดังรูปที่ 2-35



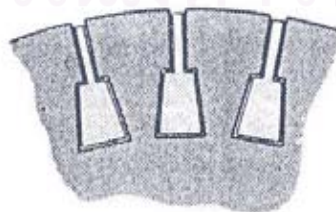
รูปที่ 2-35 รูปแบบการจัดเรียงตัวนำของโรเตอร์ชนิดกรงคู่ ซึ่งกรงชั้นนอกมีความต้านทานสูง (เช่น บรอนซ์) และกรงชั้นในมีความต้านทานต่ำ (เช่น ทองแดง) [7]

หลักการทำงานคือเมื่อเริ่มสตาร์ทความถี่โรเตอร์จะสูง กรงชั้นในซึ่งมีความต้านทานต่ำจะมีการเหนี่ยวนำรั่ว (Leakage Inductance) สูง ทำให้มีรีแอกแตนซ์สูงและกระแสไหลน้อย ส่วนกรงชั้นนอกซึ่งมีความต้านทานสูงจะมีการเหนี่ยวนำรั่วต่ำ ก็จะทำให้มีรีแอกแตนซ์ต่ำและกระแสไหลมาก ส่งผลให้มอเตอร์มีแรงบิดสูงในช่วงสตาร์ทเนื่องจากโรเตอร์มีความต้านทานสูง สำหรับช่วงความเร็วเต็มที่จะกลับกันกับช่วงการสตาร์ทคือ ความถี่โรเตอร์จะต่ำลง ดังนั้นทั้งชั้นในและชั้นนอกจะมีรีแอกแตนซ์ต่ำและกระแสจะไหลในกรงชั้นในซึ่งมีความต้านทานต่ำกว่ากรงชั้นนอก

เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างกรงเดี่ยว (Single cage) กับกรงคู่แล้ว กรงคู่จะมีแรงบิดตอนสตาร์ทสูงกว่ากรงเดี่ยวและมีกระแสตอนสตาร์ทต่ำกว่า แต่สมรรถนะช่วงความเร็วเต็มที่จะไม่แตกต่างโรเตอร์แบบกรงเดี่ยว

2.4.6.2 โรเตอร์แบบแท่งลึก (Deep Bar Rotors)

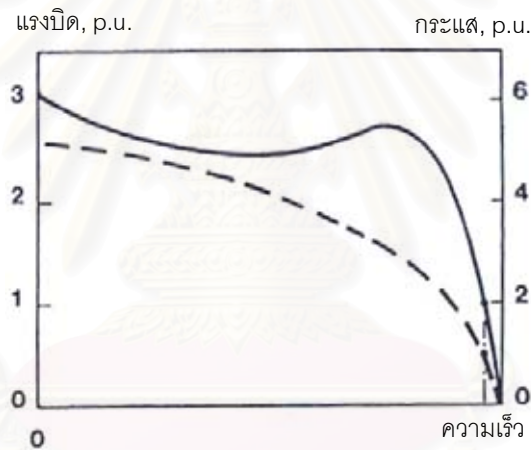
โรเตอร์ชนิดนี้เป็นแบบกรงเดี่ยวชนิดหนึ่ง แต่สล๊อตจะลึกและแคบ โครงสร้างทำได้ง่ายและถูกกว่าโรเตอร์ชนิดกรงคู่ดังรูปที่ 2-36



รูปที่ 2-36 รูปแบบโครงสร้างของโรเตอร์แบบแท่งลึก [7]

หลักการทำงานคือเมื่อเริ่มสตาร์ท ช่วงบนของสล้อตในโรเตอร์จะมีกระแสหนาแน่นเพราะความถี่ของโรเตอร์สูงทำให้ความต้านทานยังผลสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงบิดในการสตาร์ทสูง แต่เมื่อเริ่มเดินเครื่องขึ้น ความถี่โรเตอร์จะตกลงทำให้ความต้านทานยังผลลดลง กระแสจะเป็นเอกรูป (Uniform) ทำให้เกิดการเดินเครื่องขึ้นเป็นเหมือนโรเตอร์ชนิดกรงเดี่ยวธรรมดาที่มีความต้านทานต่ำ ดังนั้นโรเตอร์ชนิดนี้ประสิทธิภาพจะสูง แต่แรงบิดสูงสุดจะน้อยกว่าโรเตอร์ชนิดกรงเดี่ยวเพราะมีความต้านทานรั่ว (Leakage resistance) สูงกว่า

การออกแบบโรเตอร์แบบแท่งลึกลงต้องคำนึงถึงสมรรถนะในช่วงความเร็วเต็มที่มากกว่าความสามารถในการให้แรงบิดที่สูงในการสตาร์ท จะเห็นได้จากรูปที่ 2-37 เส้นทึบแทนเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็วที่ดี ส่วนเส้นประแทนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความเร็ว ทั้งค่าแรงบิดและกระแสแทนในรูปต่อหน่วย (per-unit; p.u) เช่น 1 p.u (or 100%) แทนค่าพิกัด หรือกระแส 400% หมายถึงกระแส 4 เท่าของค่าพิกัดหรือ 4 p.u

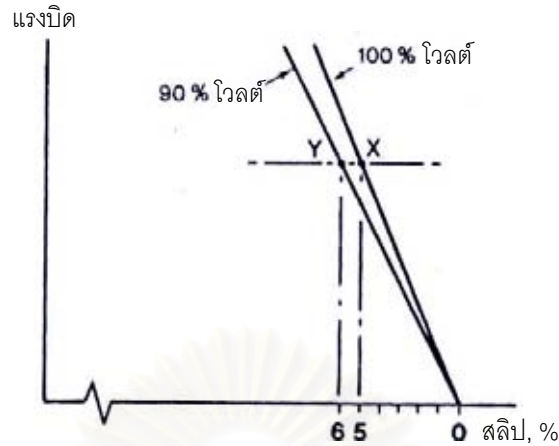


รูปที่ 2-37 รูปแบบของเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็วและกระแสกับความเร็วสำหรับมอเตอร์แบบกรงกระรอกที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม [7]

2.4.7 อิทธิพลของความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายต่อเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็ว (Influence of supply voltage on torque-speed curve)

เนื่องจากฟลักซ์ช่องอากาศแปรผันโดยตรงกับความต่างศักย์ ($B \propto V$) และเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสในโรเตอร์ แรงบิดแปรผันโดยตรงกับฟลักซ์ช่องอากาศและกระแสในโรเตอร์ ($T \propto BI_r$) ดังนั้นแรงบิดจึงแปรผันโดยตรงกับกำลังสองของความต่างศักย์ ($T \propto V^2$)

ดังแสดงในรูปที่ 2-38 แรงบิดที่โหลดเต็มที่ มอเตอร์เดินเครื่องที่จุด X และมีสลีป 5% ดังนั้นจุดนี้จะเป็นภาวะปกติของโหลดเต็มที่ (Normal full load condition)



รูปที่ 2-38 อิทธิพลของความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายต่อเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็ว [7]

ในกรณีที่ความต่างศักย์ลดลงจนถึง 90% และแรงบิดของโหลดคงที่ มอเตอร์จะลดความเร็วลงจนถึงจุดทำงานใหม่คือจุด Y ดังนั้น ความหนาแน่นฟลักซ์ที่ช่องอากาศที่จุด Y จะเท่ากับ 0.9 เท่าของความหนาแน่นฟลักซ์ค่าพิกัด กระแสที่เพิ่มขึ้นในการทำให้แรงบิดของโหลดเท่ากันคือ 1.1 เท่าของค่าพิกัด ซึ่งก็คือกระแสเพิ่มขึ้น 10% แต่ความหนาแน่นฟลักซ์ลดลง 10% ทำให้สลิปเพิ่มขึ้น 20% เพราะฉะนั้นสลิปใหม่จะเท่ากับ 6%

การลดความเร็วจาก 95% เป็น 94% จะไม่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์มากนัก แต่การที่กระแสในโรเตอร์เพิ่มขึ้น 10% ของค่าพิกัดนั้นทำให้ความร้อนของโรเตอร์เพิ่มขึ้น 21% ส่งผลให้มอเตอร์ไม่สามารถทำงานต่อเนื่องได้ [10] ดังนั้นถ้ามอเตอร์ทำงานอย่างต่อเนื่องจะเกิดความร้อนเกินขึ้น จึงต้องควบคุมความต่างศักย์ให้เหมาะสม

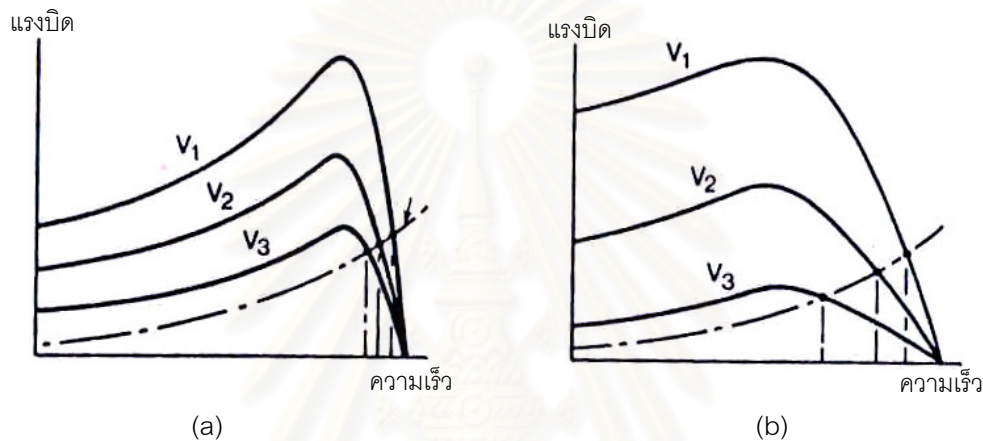
2.4.8 การควบคุมความเร็ว (Speed Control)

การทำงานอย่างมีประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำกล่าวคือจะต้องให้มอเตอร์ทำงานที่สลิปต่ำๆ แต่การควบคุมความเร็วต้องตั้งอยู่บนพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงโคโรนัส จากสมการที่ 2.21 องค์ประกอบของความเร็วเชิงโคโรนัสคือความถี่และจำนวนโพล

ในวิทยานิพนธ์นี้จะให้ความสำคัญค่าคงที่ ดังนั้นการควบคุมความเร็วเชิงโคโรนัสก็จะเป็นการเปลี่ยนจำนวนโพล

2.4.9 การควบคุมความต่างศักย์ของมอเตอร์กรงกระรอก (Voltage Control of Squirrel-cage Motor)

การควบคุมแรงบิดหรือความเร็วของมอเตอร์สามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ แรงบิดที่ทุกค่าของสลิปจะเป็นสัดส่วนกำลังสองของความต่างศักย์ ดังนั้นถ้าต้องการลดความเร็วก็ต้องลดความต่างศักย์ วิธีนี้ไม่เหมาะกับโรเตอร์ที่มีค่าความต้านทานต่ำเพราะว่าช่วงความเร็วที่ปรับได้มีค่าจำกัดดังรูปที่ 2-39(a) แต่ถ้าโรเตอร์มีค่าความต้านทานสูงช่วงความเร็วที่ปรับได้ก็จะกว้างดังรูปที่ 2-39(b)



รูปที่ 2-39 การควบคุมความเร็วมอเตอร์กรงกระรอกโดยวิธีการปรับความต่างศักย์ที่ให้แก่ขดลวดสเตเตอร์ (a) โรเตอร์มีความต้านทานต่ำ (b) โรเตอร์มีความต้านทานสูง [7]

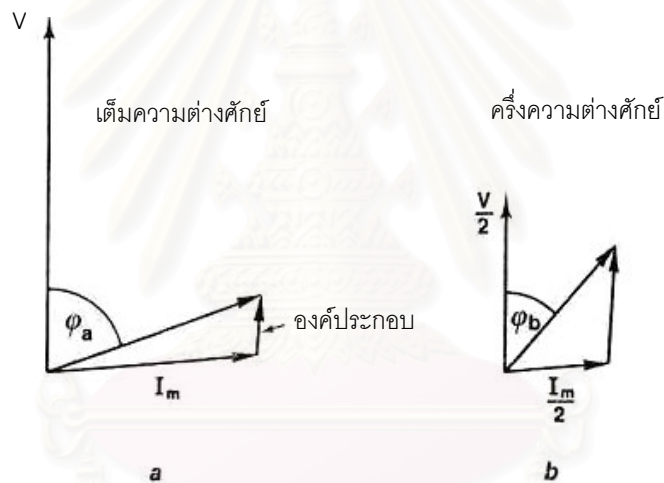
ข้อเสียของวิธีนี้คือ ประสิทธิภาพต่ำ เพราะว่าประสิทธิภาพของโรเตอร์คือ $(1-s)$ การเปลี่ยนความต่างศักย์ ทำให้สลิปเปลี่ยน ประสิทธิภาพก็เปลี่ยนไปด้วย เช่น การลดความต่างศักย์จนทำให้สลิปเท่ากับ 0.3 โรเตอร์ก็จะมีความเร็วเพียง 70% ของความเร็วซิงโครนัส และกำลังที่สูญเสียไปก็กลายเป็นความร้อนในโรเตอร์ด้วย การใช้งานก็จะใช้เฉพาะงานที่มีแรงบิดของโหลดต่ำๆ เช่น การระบายอากาศ เป็นต้น

2.4.10 การควบคุมตัวประกอบกำลังและพลังงานเหมาะสม (Power-Factor Control and Energy Optimization)

การควบคุมตัวประกอบกำลังและพลังงานเหมาะสมนั้น ตั้งอยู่บนความจริงที่ว่าฟลักซ์ที่ช่องอากาศเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์ ดังนั้นจึงสามารถปรับความต่างศักย์ให้เหมาะสมกับโหลดได้

จากรูปที่ 2-40 (a) จะเห็นว่าการใช้ความต่างศักย์เต็มที่ ฟลักซ์แม่เหล็กจะสูงและกระแสในสนามแม่เหล็กจะมาก ซึ่งถ้ามาใช้กับโหลดต่ำจะทำให้ตัวประกอบกำลังขาเข้า (Input power-factor) เป็น $\cos\phi_a$ ซึ่งมีค่าต่ำ

ถ้าลดความต่างศักย์ ลงครึ่งหนึ่งของความต่างศักย์เต็มที่ ดังนั้นฟลักซ์ก็จะลดลงครึ่งหนึ่ง กระแสในสนามก็จะลดลง แต่กระแสในโรเตอร์ต้องสูงขึ้นเพื่อให้แรงบิดเท่าเดิม ดังนั้น ตัวประกอบกำลังขาเข้าก็จะเปลี่ยนมาเป็น $\cos\phi_b$ ซึ่งมีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 2-40 (b)

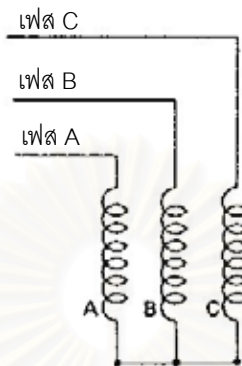


รูปที่ 2-40 แผนภาพเฟเซอร์แสดงการปรับปรุงตัวประกอบกำลังโดยการลดความต่างศักย์ที่ให้แก่ขดลวดสเตเตอร์ [7]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 ทฤษฎีการพันและการต่อมอเตอร์ 3 เฟส (3-Phase Motor winding and connecting Theory)

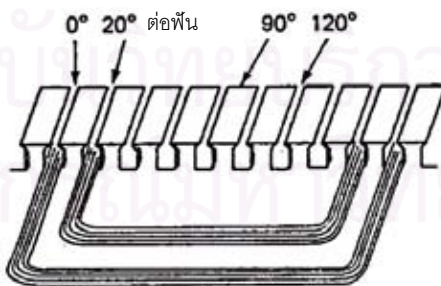
ขดลวดในสเตเตอร์จะถูกเชื่อมต่อกับไฟแต่ละเฟสดังแสดงในรูปที่ 2-41



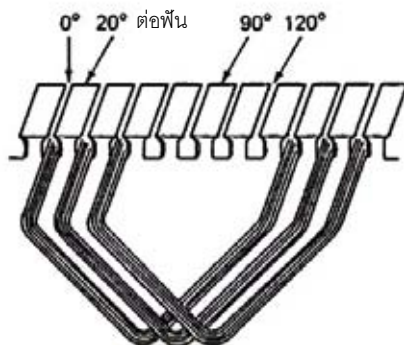
รูปที่ 2-41 การต่อขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส [14]

ขดลวดในแต่ละเฟสจะถูกเชื่อมต่อในทางเดียวกันเหมือนกับมอเตอร์เฟสเดียว โพลที่อยู่ใกล้กันจะต้องต่อให้มีขั้วตรงข้ามกัน จำนวนของวงจรแต่ละเฟสจะเป็นจำนวนที่หารด้วยจำนวนโพลลงตัว เช่น 4 Pole อาจจะเป็น 1, 2 หรือ 4 วงจรก็ได้

ตัวอย่างของมอเตอร์ 36 สล็อต 4 Pole แต่ละหมู่โพลจะถูกบรรจุไว้ในสล็อตซึ่งจะเชื่อมต่อต่อกัน และจะห่างกัน 120° ทางไฟฟ้า ในรูปที่ 2-42 แสดงตำแหน่งที่ 120° ของสลอตในการพันขดลวดแบบร่วมศูนย์กลาง (Concentric-Winding) และในรูปที่ 2-43 แสดงตำแหน่งที่ 120° ของสลอตในการพันขดลวดแบบแลป (Lap-Winding) โดยขดลวดที่ 120° จะบรรจุขดลวดที่หนึ่งใหม่ของอีกเฟสซึ่งมีขั้วเหมือนกัน

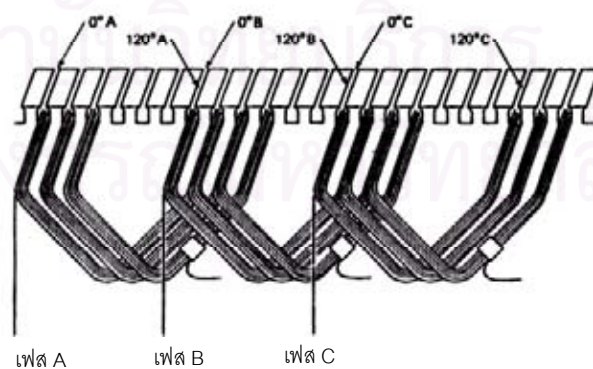
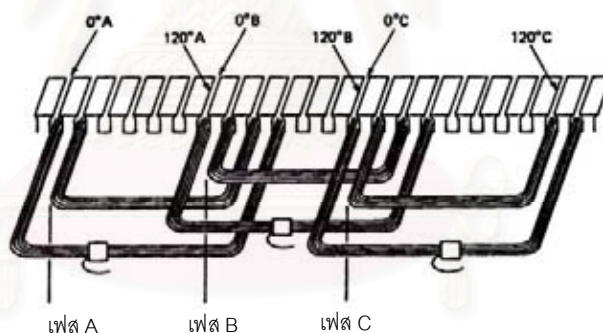


รูปที่ 2-42 มอเตอร์ 4 Pole 36 สล็อต พันแบบร่วมศูนย์กลาง แสดงตำแหน่งสลอตที่ 90° และ 20° แต่ละร่องสลอตห่างกัน 20° ตำแหน่งที่ 120° จะบรรจุขดลวดที่หนึ่งใหม่ของอีกเฟสซึ่งมีขั้วเหมือนกัน [14]

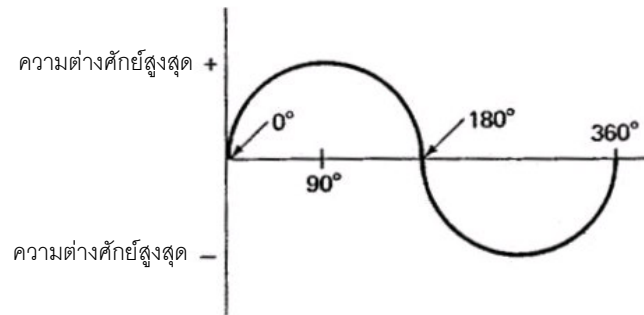


รูปที่ 2-43 มอเตอร์ 4 Pole 36 สล็อต พันแบบแลปและแสดงตำแหน่งสล็อตที่ 90° และ 120° ตำแหน่งสล็อตที่ 120° จะบรรจุขดลวดที่หนึ่งใหม่ของอีกเฟสซึ่งมีขั้วเหมือนกัน [14]

ตามที่ได้กล่าวในข้างต้นว่าขดลวดแต่ละขดจะวางห่างกัน 120° ทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 2-44 และในแต่ละเฟสจะให้ห้องคาทางไฟฟ้าในสเตเตอร์เพื่อวัดการบรรจุโพล เช่น 360° เท่ากับ 2 Pole (ขั้วเหนือ 1 ขั้ว, ขั้วใต้ 1 ขั้ว) และ 1 รอบของกระแสลับเท่ากับ 360° ที่ 50 รอบต่อวินาที (Hz) ดังนั้น 1 รอบจะเท่ากับ $1/50$ วินาที รูปที่ 2-45 แสดงความต่างศักย์ในรูปของคลื่นไซน์ของเฟสเดียว

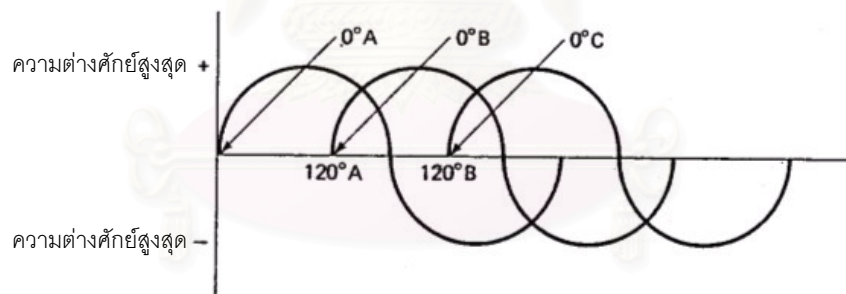


รูปที่ 2-44 การบรรจุขดลวดแบบร่วมศูนย์กลางและแบบแลปเริ่มที่ 120° ของร่องสล็อต แต่ละหมู่ขดลวดของในแต่ละเฟสต้องมีขั้วเหมือนกัน [14]



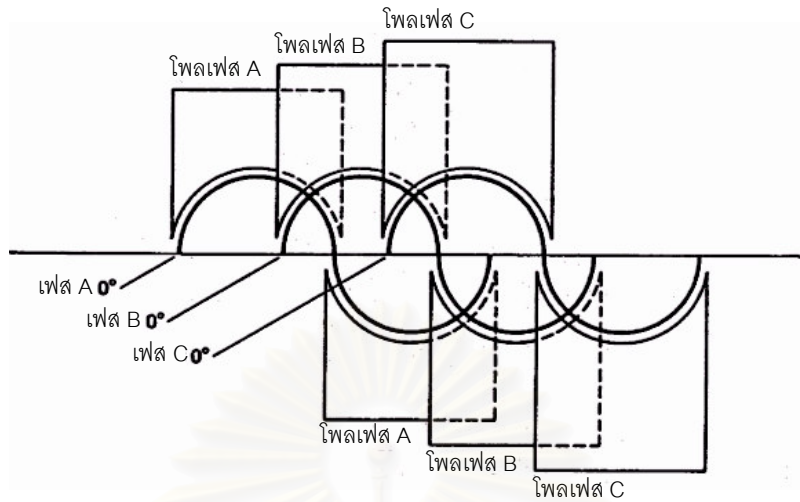
รูปที่ 2-45 รูปคลื่นขายน์ของความต่างศักย์ในเฟสเดียว [14]

และในรูปที่ 2-46 จะแสดงคลื่นทั้ง 3 เฟส ซึ่งก็คือคลื่นเฟสเดียว 3 คลื่นบรรจบกัน 120° นั่นเอง ความต่างศักย์สูงสุดของแต่ละคลื่นจะเกิดเมื่อ 120° ผ่านไป รูปที่ 2-47 แสดงให้เห็นถึงหมุโพลกับคลื่นขายน์ รูปที่ 2-48 (a) แสดงการสร้างขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ 2 โพลของเฟส A, จุดที่ 90° ของเฟส A จะแสดงจุดสูงสุดของขั้วและแท่งแม่เหล็กจะแสดงทิศทางการหมุนของโรเตอร์ ในรูปที่ 2-48 (b) จะแสดงเฟส B และในรูปที่ 2-48 (c) จะแสดงเฟส C จนมาถึงรูปที่ 2-48 (d) จะกลับมาสู่เฟส A อีกครั้ง

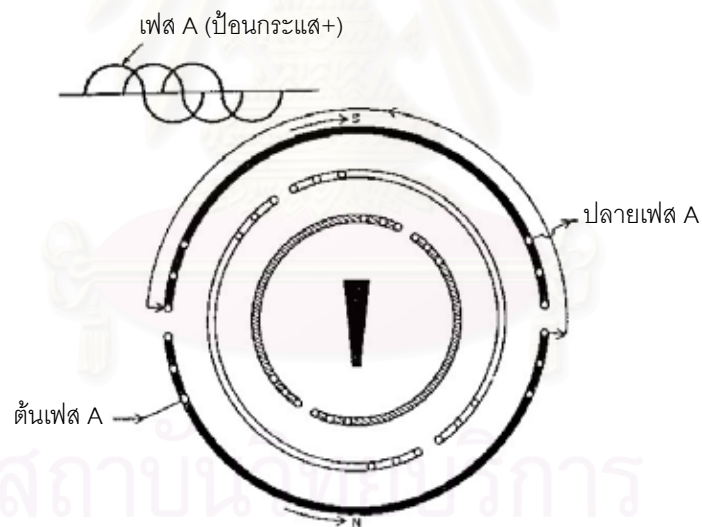


รูปที่ 2-46 รูปคลื่นขายน์ของความต่างศักย์ใน 3 เฟส [14]

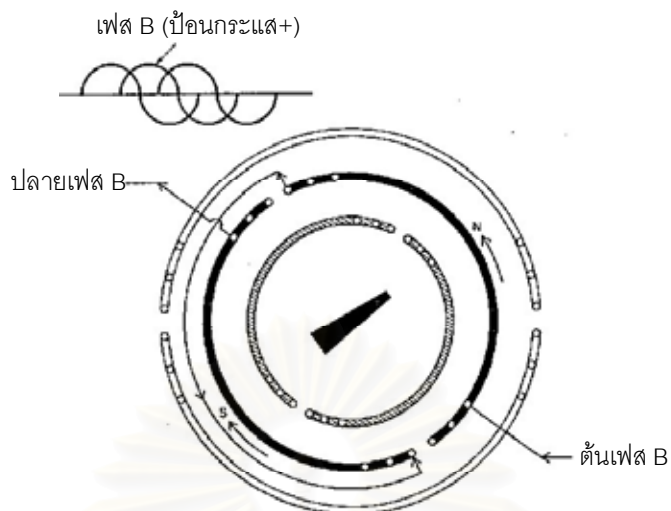
สถาบันวิจัยและพัฒนา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



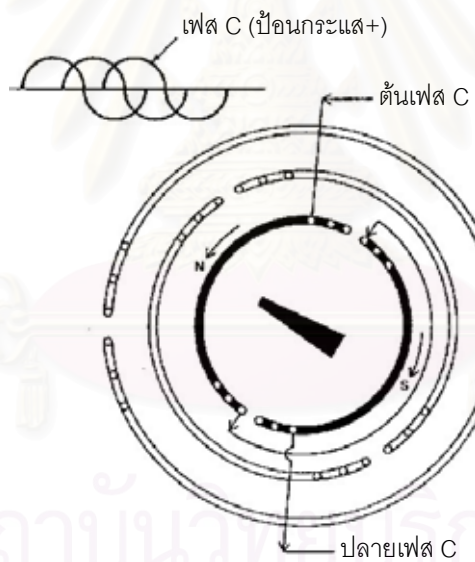
รูปที่ 2-47 แสดงขั้วแม่เหล็กในแต่ละเฟสกับคลื่นความต่างศักย์ที่เป็นรูปซายน์ของ
สเตเตอร์ 3 เฟส [14]



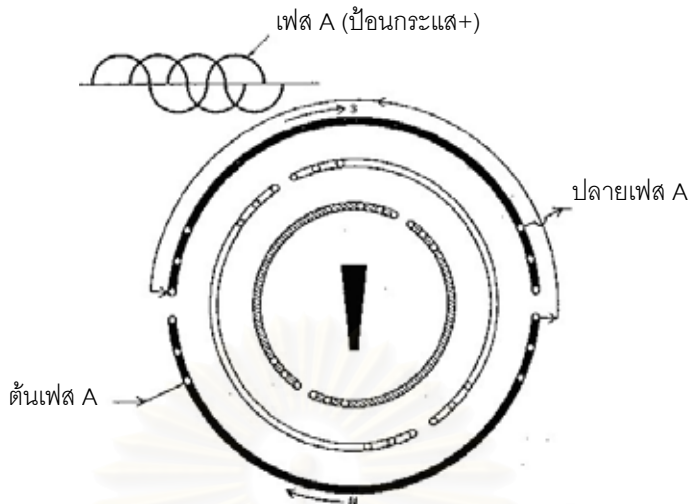
รูปที่ 2-48(a) แสดงแผนภาพการป้อนกระแสให้แก่เฟส A เพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ [14]



รูปที่ 2-48 (b) แสดงแผนภาพการป้อนกระแสให้แก่เฟส B เพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ [14]



รูปที่ 2-48 (c) แสดงแผนภาพการป้อนกระแสให้แก่เฟส C เพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ [14]



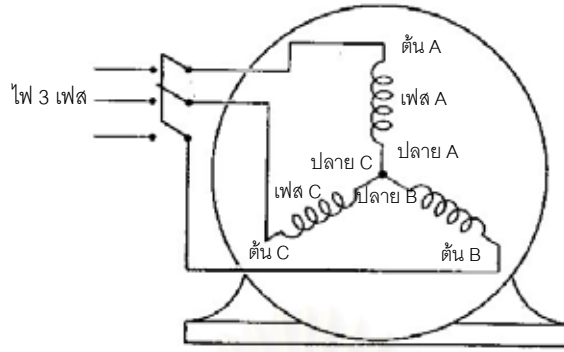
รูปที่ 2-48 (d) แสดงแผนภาพการป้อนกระแสให้แก่เฟส A เหมือนรูปที่ 2-48 (a) เพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ [14]

โดยทั่วไปการพันมอเตอร์จะแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ การพันมอเตอร์แบบแลปและการพันมอเตอร์แบบร่วมศูนย์กลาง ซึ่งสำหรับการออกแบบและสร้างมอเตอร์ 3 เฟส ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้การพันมอเตอร์แบบแลป เนื่องจากการพันมอเตอร์แบบแลปนั้นสามารถทำได้ง่ายและสะดวกกว่าการพันมอเตอร์แบบร่วมศูนย์กลางโดยที่แรงเคลื่อนแม่เหล็กของการพันทั้ง 2 แบบไม่ต่างกันเท่าใด [15] อีกทั้งการพันแบบแลปยังง่ายต่อการพัน 2 ชั้นอีกด้วย

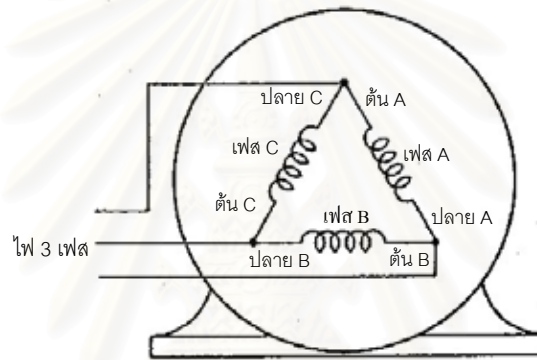
2.5.1 การพันมอเตอร์ 3 เฟส

สมมติให้มอเตอร์ 3 เฟสนี้มี 36 ขดลวด 4 Pole มอเตอร์จะถูกเชื่อมต่อกับไฟ 3 เฟส ในแต่ละเฟสต้องมีจำนวนขดลวดเท่ากับ 1 ใน 3 ของขดลวดทั้งหมดของสเตเตอร์ และสำหรับการพันมอเตอร์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ [14],[16],[17],[18]

ขั้นตอนที่ 1 หาจำนวนขดลวดในแต่ละเฟส และทำการแบ่งจำนวนขดลวดในสเตเตอร์ต่อจำนวนเฟส เช่น ถ้ามอเตอร์ 3 เฟส มี 36 ขดลวด แต่ละเฟสจะต้องมี 12 ขดลวดและจะเรียกแต่ละเฟสว่า เฟส A เฟส B และเฟส C สำหรับในมอเตอร์ 3 เฟส จะมีการเชื่อมต่อแบบสตาร์หรือแบบเดลก็ได้ การเชื่อมต่อแบบสตาร์ คือ ปลายด้านหนึ่งของแต่ละเฟสจะถูกเชื่อมต่อกับสายไฟหลักและปลายอีกด้านหนึ่งจะเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 2-49 และการเชื่อมต่อแบบเดลคือปลายของแต่ละเฟสต่อกับจุดเริ่มของแต่ละเฟส ดังรูปที่ 2-50



รูปที่ 2-49 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อแบบสตาร์ [14]



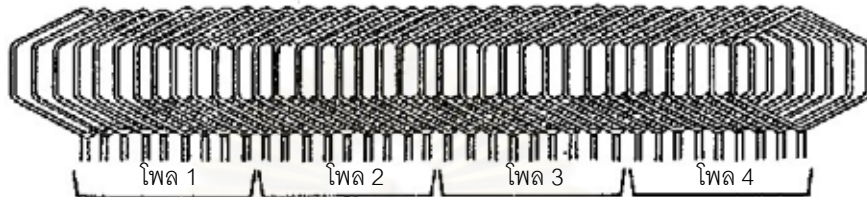
รูปที่ 2-50 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อแบบเดลต้า [14]

มอเตอร์ 3 เฟส ตามที่ได้กล่าวในข้างต้น เป็นมอเตอร์ 36 ขดลวด 4 Pole ซึ่งแต่ละโพลจะต้องประกอบด้วย 9 ขดลวด ดังรูปที่ 2-51



รูปที่ 2-51 จำนวนขดลวดในแต่ละโพลของมอเตอร์ 3 เฟส 36 ขดลวด 4 Pole [14]

ขั้นตอนที่ 2 หาจำนวนขดลวดในแต่ละโพล โดยต้องแบ่งจำนวนขดลวดในสเตเตอร์ต่อจำนวนโพล ดังนั้น มอเตอร์ 3 เฟส มี 36 ขดลวด จำนวน 4 Pole จึงมีจำนวนขดลวดต่อโพลเป็น 9 ขดลวดต่อโพล ดังรูปที่ 2-52 เป็นจำนวนขดลวดทั้งหมด โดยจะให้สายออกมาสองสายใน 1 หมูขดลวด ดังรูปที่ 2-53



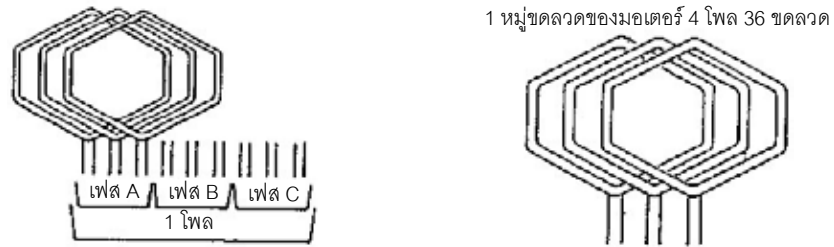
รูปที่ 2-52 แสดงรูปร่างจริงของขดลวดในรูปที่ 2-53 [14]



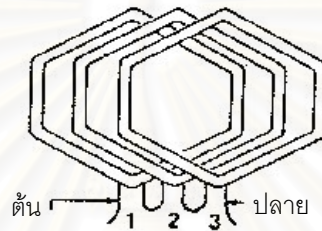
รูปที่ 2-53 แผนภาพอย่างง่ายของขดลวดในมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole [14]

หมูขดลวด คือ จำนวนขดลวดที่อยู่ใกล้กันและต่อกันแบบอนุกรม มอเตอร์ดังที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็น 3 หมูขดลวดต่อโพลต่อเฟส ดังนั้น หมูหนึ่งจะมาจากเฟส A ต่อจากหมูหนึ่งที่มาจากเฟส B และหมูสุดท้ายจะมาจากเฟส C

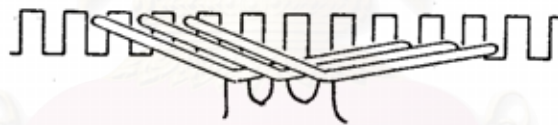
ดังนั้นถ้า 1 Pole มี 9 ขดลวดจะต้องมี 3 ขดลวดต่อหมูดังรูปที่ 2-54 ขดลวดของหนึ่งหมูโพลจะต่อกันแบบอนุกรมดังรูปที่ 2-55 ซึ่งในรูปจะเห็นว่าปลายของขดลวดที่ 1 จะต่อกับต้นของขดลวดที่ 2 และปลายของขดลวดที่ 2 จะต่อกับต้นของขดลวดที่ 3 ดังนั้นจะมีปลายที่ออกมา 2 เส้น ที่นำไปต่อเข้ากับหมูอื่น ดังรูปที่ 2-56



รูปที่ 2-54 แสดงหมู่ขดลวดทั้ง 3 หมู่ของ 1 Pole และในแต่ละหมู่ประกอบด้วย 3 ขดลวด [14]



รูปที่ 2-55 แสดงการต่อขดลวดใน 1 หมู่ [14]



รูปที่ 2-56 แสดงรูปด้านข้างของการต่อขดลวดในรูปที่ 2-55 [14]

ขั้นตอนที่ 3 หาจำนวนหมู่ขดลวดทั้งหมดในสเตเตอร์ และสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{หมู่ขดลวด} = \text{จำนวนโพล} \times \text{จำนวนเฟส}$$

ขั้นตอนที่ 4 หาจำนวนขดลวดในแต่ละหมู่ โดยที่จำนวนขดลวดในแต่ละหมู่จะเท่ากับจำนวนของขดลวดในสเตเตอร์หารด้วยจำนวนหมู่ขดลวด ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{จำนวนของขดลวดต่อหมู่} = \frac{\text{จำนวนของขดลวด}}{\text{จำนวนหมู่ขดลวด}}$$

2.5.2 การต่อมอเตอร์แบบสตาร์

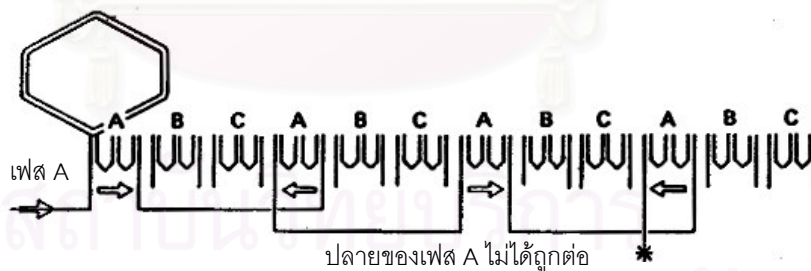
การต่อมอเตอร์แบบสตาร์ กรณีมอเตอร์ 3 เฟส 36 สลิต จำนวน 4 Pole มีขั้นตอนการเชื่อมต่อ ดังต่อไปนี้ [14],[16],[17],[18]

ขั้นตอนที่ 1 กรณีมอเตอร์ 3 เฟส 36 สลิต 4 Pole มีจำนวนหมู่ขดลวดเท่ากับ 12 หมู่ (จากมอเตอร์ 3 เฟสคูณจำนวนโพลคือ 4 Pole) และมีจำนวนขดลวดต่อหมู่เท่ากับ 3 ขดลวดต่อหมู่ (จาก 36 ขดลวดหารด้วยหมู่ขดลวด 12 หมู่) ซึ่งขดลวดในหมู่นั้นจะเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ดังรูปที่ 2-57



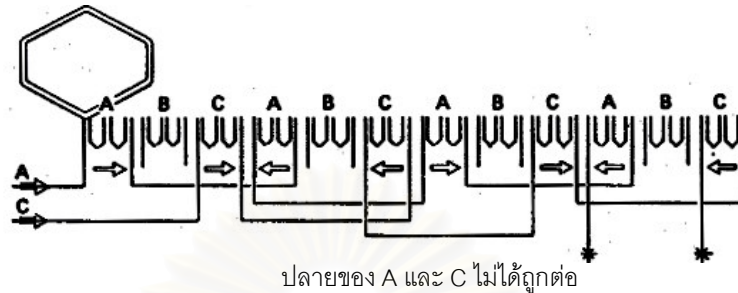
รูปที่ 2-57 แสดงการต่อหมู่ขดลวด 12 หมู่ ที่มี 3 ขดลวดต่อหมู่ [14]

2. ทำการต่อหมู่ของเฟส A เข้าด้วยกันดังรูปที่ 2-58 หมู่แรกกระแสไหลตามเข็มนาฬิกา ส่วนหมู่ที่สองกระแสจะไหลทวนเข็มนาฬิกา การไหลที่สวนทางกันนี้จะทำให้เกิดขั้วเหนือและขั้วใต้สลับกัน



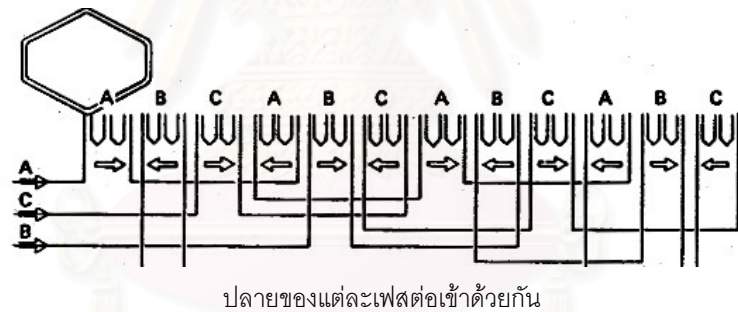
รูปที่ 2-58 แสดงการต่อหมู่ขดลวดของเฟส A เข้าด้วยกัน [14]

3. ทำการต่อเฟส C ซึ่งวิธีการต่อเหมือนกับการต่อเฟส A เข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 2-59 (โดยจะข้ามเฟส B ไปก่อน)



รูปที่ 2-59 แสดงการต่อเฟส C ซึ่งมีวิธีการต่อเหมือนกับการต่อเฟส A โดยในการต่อจะข้ามเฟส B ไปก่อน [14]

4. ทำการต่อเฟส B ซึ่งเหมือนกับการต่อเฟส A และเฟส C ดังรูปที่ 2-60 ซึ่งจะแสดงจุดเริ่มของเฟส B ที่หมู่ที่ 5



รูปที่ 2-60 การไหลของกระแสในเฟส B ตรงข้ามกับการไหลของกระแสในเฟส A และ C [14]

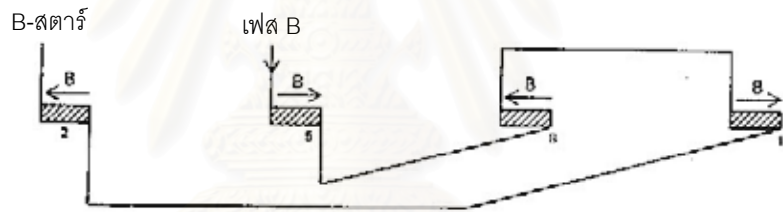
วิธีการต่อข้ามหมู่ (Skip-group Connection) ดังรูปที่ 2-60 ลูกศรที่แสดงในหมู่แรกจะบ่งบอกว่าเป็นทิศตามเข็มนาฬิกา ส่วนลูกศรในหมู่ที่สองจะเป็นทิศทวนเข็มนาฬิกาและหมู่ที่อยู่ติดกันจะมีทิศทางตรงข้ามกันแสดงว่าเป็นคนละขั้ว แผนภาพที่ทำให้มองได้ง่ายขึ้นจะแสดงหมู่ขดลวดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาแล้วว่ามอเตอร์ 3 เฟสเหมือนกับการนำเฟสเดียว 3 เส้นมาต่อกัน ดังในรูปที่ 2-61a และ 2-61b เฟส A และ เฟส C ต่อกันเหมือนเฟสเดียวกัน เฟส B จะมีขั้วตรงข้ามกับเฟส A และ เฟส C ดังรูปที่ 2-61c ซึ่งเป็นเหตุให้ข้ามการเป็นเฟส B ในหมู่แรกนั่นเอง และรูปที่ 2-61d แสดงการวางทั้ง 3 เฟสเข้าด้วยกัน



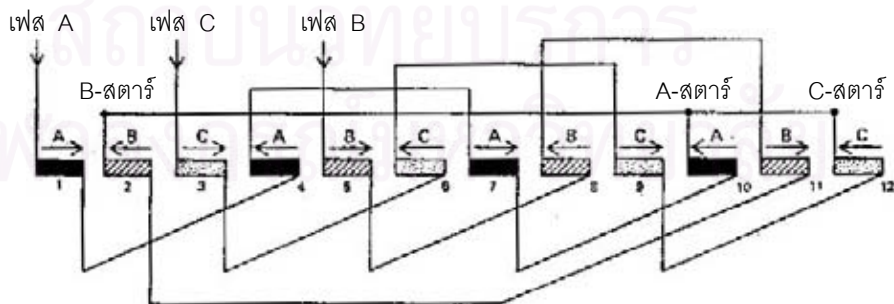
รูปที่ 2-61a แสดงการต่อหมุขดลวดของเฟส A เข้าด้วยกัน [14]



รูปที่ 2-61b แสดงการต่อเฟส C ซึ่งมีวิธีการต่อเหมือนกับเฟส A โดยในการต่อจะข้ามเฟส B ไปก่อน [14]

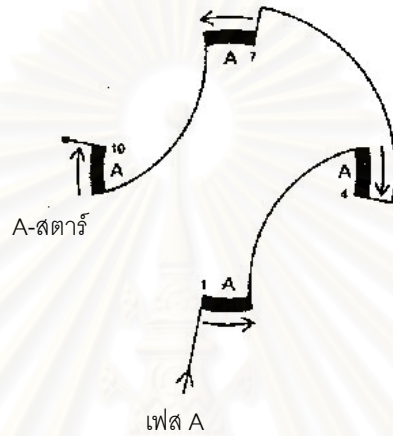


รูปที่ 2-61c แสดงการไหลของกระแสในเฟส B ซึ่งจะมีทิศทางกรไหลตรงข้ามกับเฟส A และเฟส C [14]

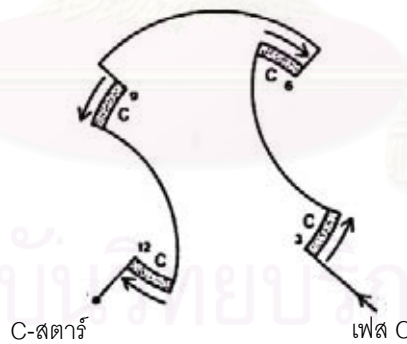


รูปที่ 2-61d แผนภาพแสดงการต่อมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole แบบสตาร์ [14]

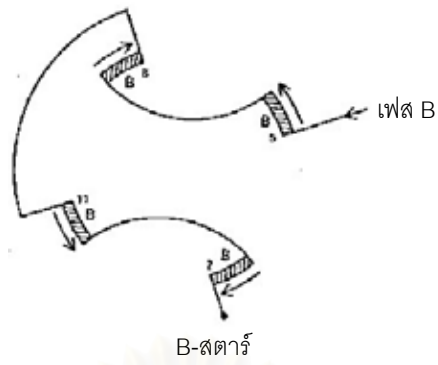
รูปที่ 2-61 a, b, c และ d แสดงแผนภาพเส้นตรงการต่อมอเตอร์ ส่วนรูปที่ 2-62 a, b, c และ d แสดงให้เห็นแผนภาพวงกลมการต่อมอเตอร์ ซึ่งแผนภาพทั้งสองต่างก็มีลักษณะการทำงานที่เหมือนกัน รูปที่ 2-63 แสดงแผนภาพของมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole ต่อแบบสตาร์ โดยในแต่ละเฟส จะประกอบไปด้วย 4 หมู่ ซึ่งถ้ามีหมู่ขดลวด 4 หมู่ในแต่ละเฟส แสดงว่ามี 4 Pole ในรูปที่ 2-63 มีการต่อแบบอนุกรม ดังนั้นจึงเรียกว่า มอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole ที่มีการต่อแบบนี้ว่าอนุกรมสตาร์ (Series-Star, 1-star)



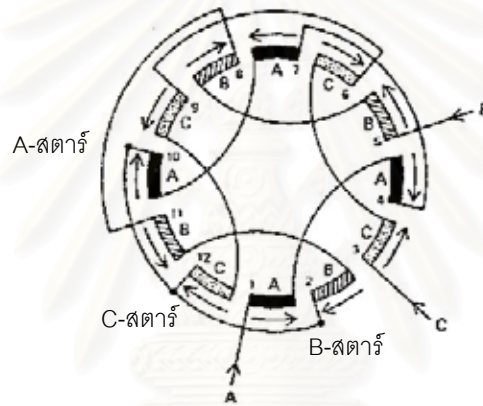
รูปที่ 2-62a แผนภาพวงกลมแสดงการต่อเฟส A [14]



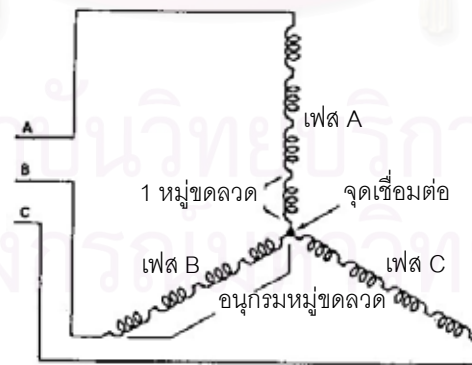
รูปที่ 2-62b แผนภาพวงกลมแสดงการต่อเฟส C ซึ่งคล้ายกับการต่อของเฟส A [14]



รูปที่ 2-62c แสดงการไหลของกระแสในเฟส B จะมีทิศทางการไหลตรงข้ามกับเฟส A และเฟส C [14]



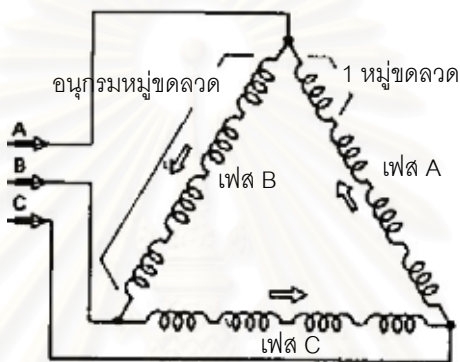
รูปที่ 2-62d แผนภาพวงกลมแสดงการต่อมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole แบบสตาร์ [14]



รูปที่ 2-63 แสดงแผนภาพของมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole ต่อแบบสตาร์และขดลวดในแต่ละเฟส ต่อแบบอนุกรม(1-star) [14]

2.5.3 การต่อมอเตอร์แบบเดลต้า

การต่อมอเตอร์แบบเดลต้าโดยในรูปที่ 2-64 เป็นแผนภาพแสดงการต่อมอเตอร์แบบเดลต้าโดยในแต่ละเฟสขดลวดจะต่อกันแบบอนุกรมหรือเรียกว่าอนุกรมเดลต้า (Series-Delta) ซึ่งในแต่ละเฟสของอนุกรมขดลวดจะประกอบไปด้วยหม้อขดลวด 4 หม้อ ซึ่งหมายถึงมีจำนวนโพล 4 โพล การต่อหม้อขดลวดเข้าด้วยกันโดยให้ปลายเฟส A ต่อกับต้นเฟส C จากนั้นนำปลายเฟส C มาต่อกับต้นเฟส B และนำปลายเฟส B มาต่อกับต้นเฟส A ตามลำดับ โดยแต่ละเฟสจะต้องห่างกัน 120 องศา



รูปที่ 2-64 แผนภาพแสดงการต่อมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole แบบอนุกรมเดลต้า [14]

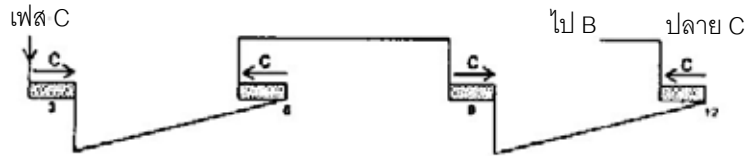
ขั้นตอนการต่อมอเตอร์แบบอนุกรมเดลต้า มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ต่อเฟส A เหมือนกับการต่อแบบสตาร์ ดังรูปที่ 2-65a

ขั้นตอนที่ 2 ต่อเฟส C ดังรูป 2-65b และต่อปลายของเฟส A กับจุดเริ่มต้นของเฟส C

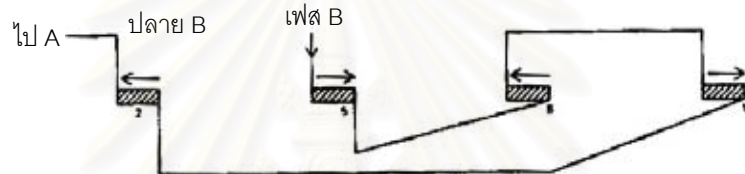


รูปที่ 2-65a การต่อหม้อขดลวดของเฟส A เข้าด้วยกันแบบอนุกรมเดลต้าสำหรับมอเตอร์ 4 Pole [14]

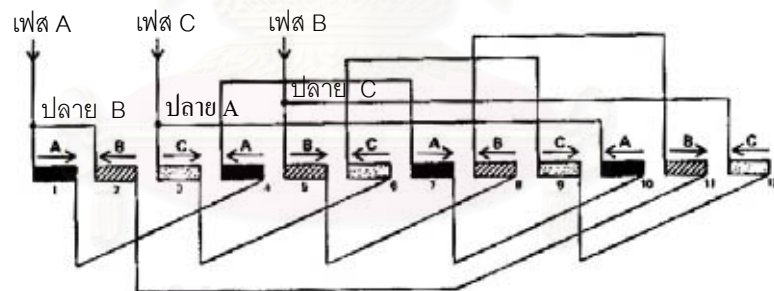


รูปที่ 2-65b การต่อหมุ่ขดลวดของเฟส C เข้าด้วยกันเหมือนการต่อแบบเฟส A [14]

ขั้นตอนที่ 3 การต่อเฟส B จะเริ่มที่หมู่ 5 ดังรูปที่ 2-65c และในรูปที่ 2-65d จะแสดงการต่อที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว ซึ่งเห็นได้ว่าที่ปลายเฟส A จะต่อกับจุดเริ่มต้นของเฟส C ปลายเฟส C จะต่อกับจุดเริ่มต้นของเฟส B และปลายของเฟส B ก็ต่อกับจุดเริ่มต้นของเฟส A

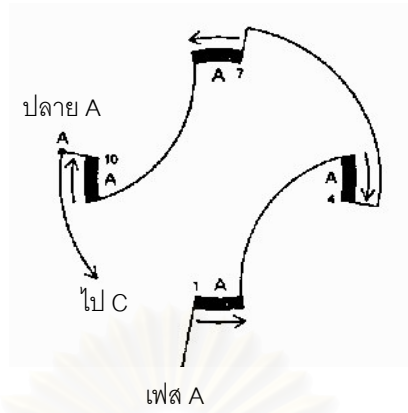


รูปที่ 2-65c การต่อหมุ่ขดลวดของเฟส B ซึ่งมีขั้วตรงกันข้ามกับเฟส A และเฟส C [14]

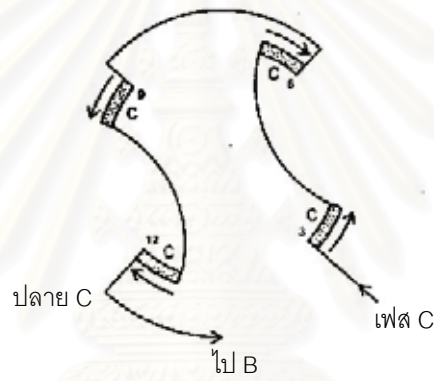


รูปที่ 2-65d แผนภาพของมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole ต่อแบบเดลต้า [14]

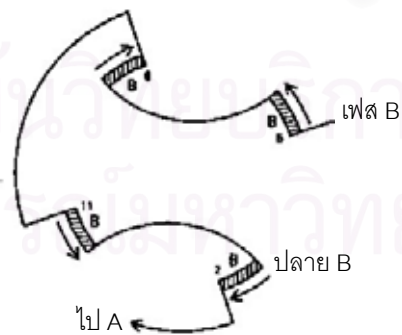
ความแตกต่างของการต่อมอเตอร์แบบสตาร์และแบบเดลต้า คือการต่อแบบสตาร์ปลายของแต่ละเฟสจะต่อเชื่อมกัน ส่วนการต่อแบบเดลต้าปลายของแต่ละเฟสจะต่อกับต้นของเฟสอื่น ดังรูปที่ 2-66a, b, c และ d ซึ่งจะแสดงแผนภาพวงกลมของการต่อมอเตอร์เฟส A เฟส C เฟส B และการต่อมอเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์ตามลำดับ



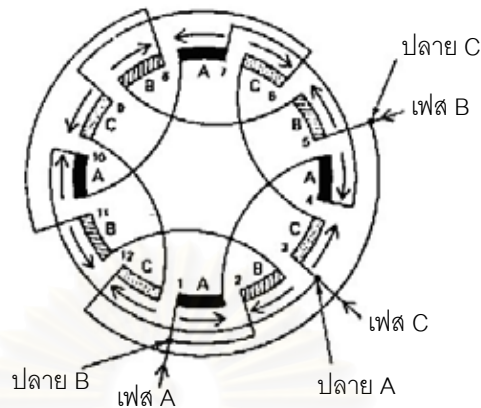
รูปที่ 2-66a แผนภาพวงกลมแสดงการต่อเฟส A [14]



รูปที่ 2-66b แผนภาพวงกลมแสดงการต่อเฟส C ที่มีลักษณะการต่อเหมือนเฟส A [14]

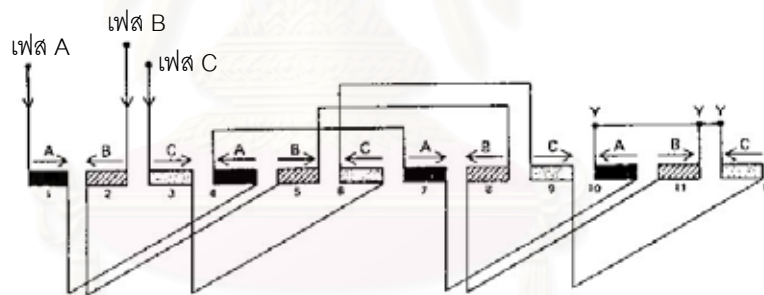


รูปที่ 2-66c แผนภาพวงกลมแสดงการต่อเฟส B ซึ่งมีขั้วต่างกับเฟส A และ เฟส C [14]



รูปที่ 2-66d แผนภาพวงกลมแสดงการต่อมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole แบบเดลต้า [14]

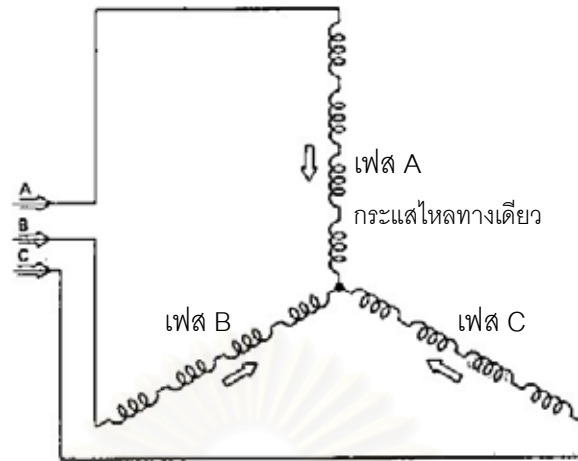
สำหรับในรูปที่ 2-67 เป็นรูปแสดงการต่ออีกแบบหนึ่งที่ไม่ใช้วิธีการต่อแบบข้ามหมู ซึ่งจะเริ่มต่อเฟส B ในหมูที่ 2 แต่ต้องเป็นขั้วตรงข้ามกับเฟส A และเฟส C



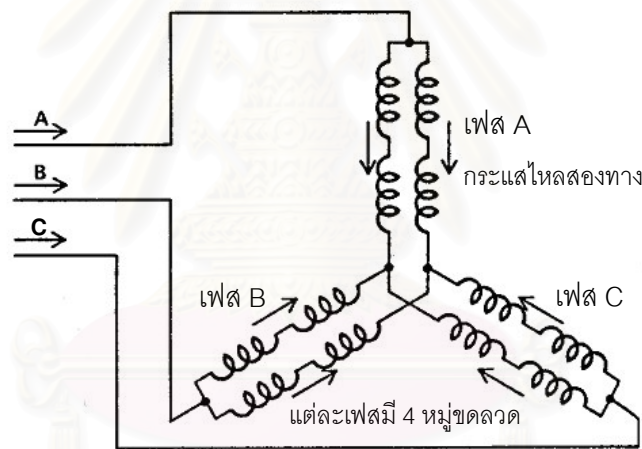
รูปที่ 2.67 การต่อมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole แบบสตาร์โดยที่ต่อเฟส B โดยไม่ใช้วิธีต่อแบบข้ามหมู ส่วนการต่อเฟส A และ เฟส C ใช้วิธีต่อเหมือนการต่อแบบข้ามหมู [14]

2.5.4 การต่อมอเตอร์แบบขนาน

ส่วนมากมอเตอร์ 3 เฟส จะได้รับการออกแบบให้มีการต่อแบบ 2 วงจร ดังรูปที่ 2-68 เป็นการต่อแบบอนุกรมสตาร์ ส่วนรูปที่ 2-69 เป็นการต่อแบบหมูขดลวดในแต่ละเฟสต่อขนานกัน 2 ชุด (Two-parallel) จำนวนหมูในแต่ละเฟสของการต่อแบบขนานนี้จะถูกแบ่งให้กระแสไหลเป็นสองทาง

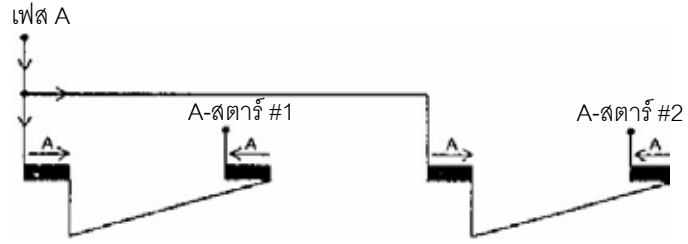


รูปที่ 2-68 มอเตอร์ 4 Pole ต่อแบบอนุกรมสตาร์ (1-star) ในการต่อแบบนี้กระแสจะไหลทางเดียว [14]

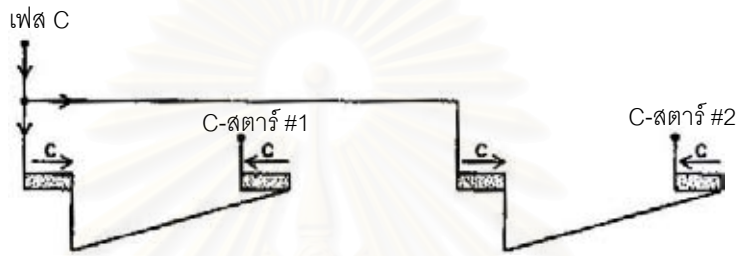


รูปที่ 2-69 มอเตอร์ 4 Pole ต่อแบบสตาร์และแต่ละเฟสต่อขนานกัน 2 ชุด (2-star) ในการต่อแบบนี้กระแสจะไหลสองทาง [14]

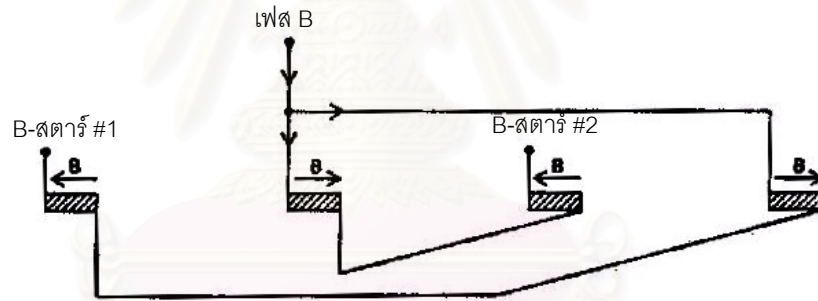
การต่อแบบขนานของเฟส A จะแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2-70a โดยเริ่มจากการต่อในหมู่ที่ 1 และ 3 เข้ากับสายไฟหลัก จากนั้นก็เดินสายตามแผนภาพ และก็ทำการต่อเฟส C ดังรูปที่ 2-70b ต่อมาก็ต่อเฟส B ดังรูปที่ 2-70c ส่วนในรูปที่ 2-70d เป็นแผนภาพที่สมบูรณ์ของมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole และต่อแบบหมูขดลวดในแต่ละเฟสต่อขนานกัน 2 ชุดในรูปที่ 2-71 จะแสดงแผนภาพวงกลมของมอเตอร์ดังกล่าว



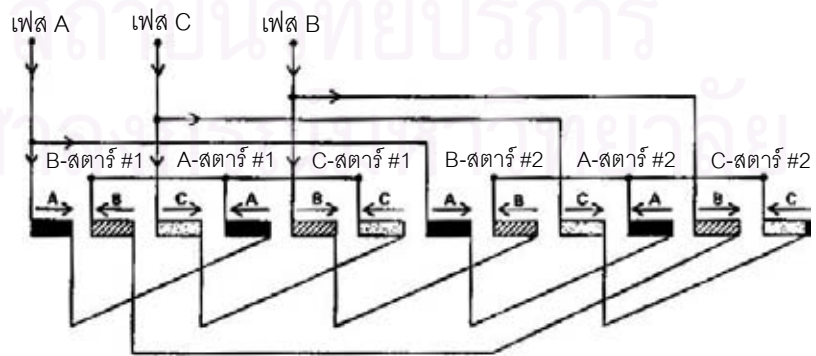
รูปที่ 2-70a การต่อเฟส A แบบขนานกัน 2 ชุดของมอเตอร์ 4 Pole [14]



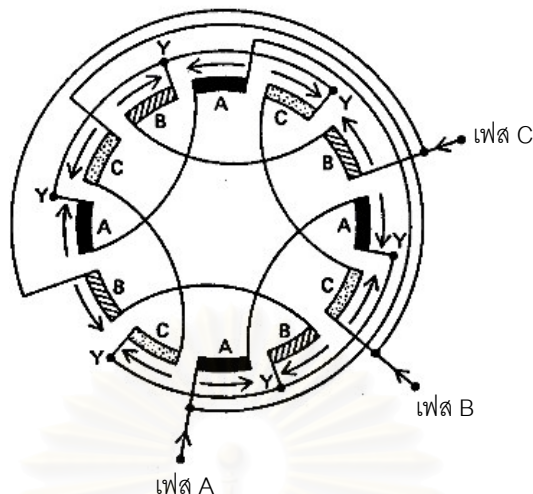
รูปที่ 2-70b การต่อเฟส C แบบขนานกัน 2 ชุดของมอเตอร์ 4 Pole [14]



รูปที่ 2-70c การต่อเฟส B แบบขนานกัน 2 ชุดของมอเตอร์ 4 Pole [14]



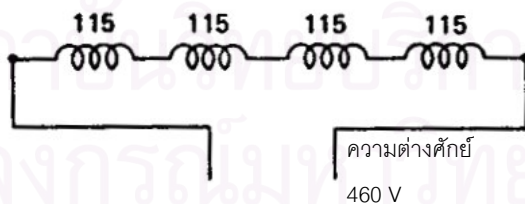
รูปที่ 2-70d การต่อมอเตอร์ 4 Pole แบบขนานกัน 2 ชุด [14]



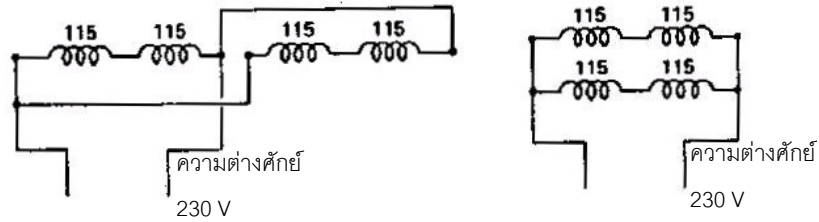
รูปที่ 2-71 แผนภาพวงกลมของการต่อมอเตอร์ 4 Pole แบบขนานกัน 2 ชุด [14]

2.5.5 การต่อมอเตอร์ 3 เฟส - แรงเคลื่อนไฟฟ้า

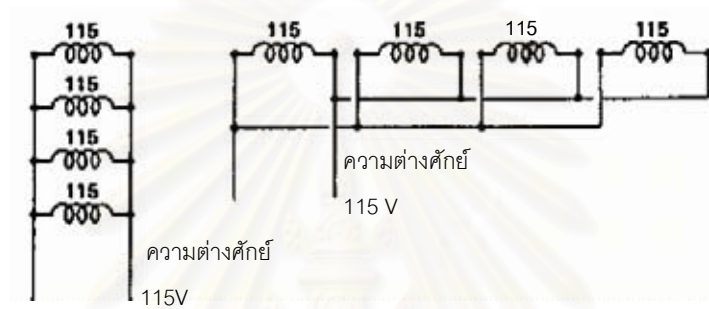
มอเตอร์ 3 เฟสขนาดเล็กและขนาดกลางส่วนใหญ่มักมีการต่อให้สามารถใช้แหล่งพลังงานที่ให้ความต่างศักย์ 2 ค่า หากต้องการให้มอเตอร์มีค่าความต่างศักย์ต่ำก็ต้องต่อแบบขนาน ในรูปที่ 2-72 แสดงขดลวด 4 ขดต่อแบบอนุกรม ใช้ความต่างศักย์ของแหล่งจ่าย 460 V โดยในแต่ละขดลวดจะรับ 115 V แต่ถ้า 4 ขดนั้นต่อแบบขนาน 2 ชุด ดังรูปที่ 2-73 ก็จะใช้ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายเพียง 230 V ซึ่งในแต่ละขดลวดก็ยังคงรับ 115 V เท่าเดิม และในรูปที่ 2-74 จะเป็นการต่อแบบขนาน 4 ชุด ก็จะใช้ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายเท่ากับ 115 V และแต่ละขดลวดรับ 115 V สำหรับการต่อมอเตอร์แบบนี้จะไม่สนใจว่าจะใช้ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟเท่าไรแต่ความต่างศักย์ในแต่ละคอยล์ต้องยังคงเท่าเดิม



รูปที่ 2-72 ขดลวด 4 ขดต่อแบบอนุกรมสำหรับความต่างศักย์ของแหล่งจ่าย 460 V โดยที่ความต่างศักย์ของขดลวดเท่ากับ 115 V [14]

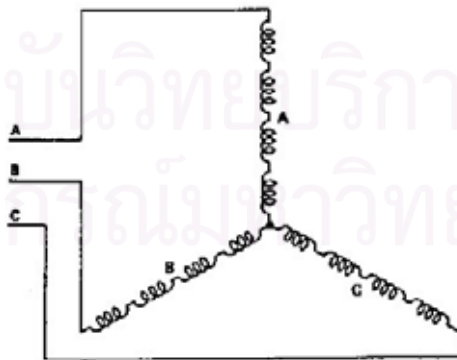


รูปที่ 2-73 ขดลวด 4 ขดต่อแบบขนาน 2 ชุดสำหรับความต่างศักย์ของแหล่งจ่าย 230 V โดยที่ความต่างศักย์ของขดลวดเท่ากับ 115 V [14]

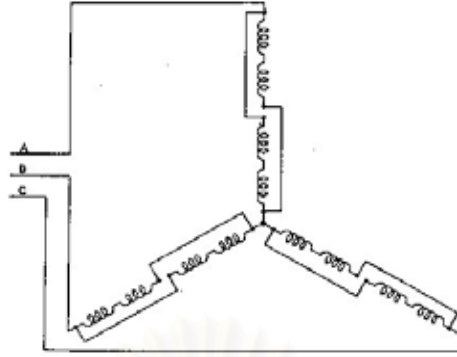


รูปที่ 2.74 ขดลวด 4 ขดต่อแบบขนาน 4 ชุดสำหรับความต่างศักย์ของแหล่งจ่าย 115 V โดยที่ความต่างศักย์ของขดลวดเท่ากับ 115 V [14]

หลักการข้างต้นนี้สามารถประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole ได้ ดังรูปที่ 2-75 ซึ่งเป็นการต่อแบบอนุกรมสตาร์ใช้ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟเท่ากับ 460 V แต่ถ้าจะใช้กับความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 230 V ก็ต้องต่อแบบขนานกัน 2 ชุด ดังรูปที่ 2-76



รูปที่ 2-75 มอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole ต่อแบบอนุกรมสตาร์ [14]



รูปที่ 2-76 มอเตอร์ 3 เฟส 4 Pole ต่อแบบสตาร์และขนานกัน 2 ชุด [14]



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับขับเคลื่อนขั้วรถจักรยาน

ปัจจุบันในประเทศไทยรถไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นรถจักรยานยังไม่นิยมนำมาใช้กัน แต่สำหรับในต่างประเทศบางประเทศได้มีการนำรถไฟฟ้ามาใช้นานหลายปีแล้วและที่นำมาใช้ส่วนมากจะเป็นรถไฟฟ้าที่ใช้ในสนามกอล์ฟเสียเป็นส่วนใหญ่ ข้อดีของรถไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบกับรถที่ใช้เครื่องยนต์คือรถไฟฟ้ามีน้ำหนักเบา เงียบและไม่มีควันพิษ เพราะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อน แต่ข้อเสียคือมีความเร็วที่จำกัด แรงบิดไม่สูงมากและที่สำคัญคือเวลาที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ค่อนข้างนานไม่เหมือนรถยนต์ที่ใช้น้ำมัน ซึ่งใช้เวลาเติมน้ำมันไม่นานนักแต่ในอนาคตรถประเภทนี้จะถูกนำมาใช้กันมากขึ้น เมื่อการพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ก้าวหน้ามากกว่านี้ เนื่องจากมีข้อดีหลายๆ ด้าน ซึ่งเหมาะอย่างมากที่จะใช้ในเมืองเพราะช่วยลดมลภาวะทางอากาศและมลภาวะทางเสียงได้ [2]

จากที่ได้กล่าวแล้วว่าวิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถจักรยาน ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ยังแบ่งได้เป็น แบบกรงกระรอกและแบบพันด้วยขดลวด แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้เลือกออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกรงกระรอก เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานอุตสาหกรรมต่างๆ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอขั้นตอนการคำนวณหาขนาดมอเตอร์และการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำไว้ 2 แบบ โดยแบ่งตามลักษณะการวางโรเตอร์ คือ มอเตอร์แบบที่ 1 เป็นมอเตอร์ที่มีโรเตอร์อยู่ภายนอก โดยให้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนโดยตรงเพื่อลดความสูญเสียจากระบบการส่งทอดกำลัง ส่วนมอเตอร์แบบที่ 2 เป็นมอเตอร์ที่มีโรเตอร์อยู่ภายในโดยให้มีระบบส่งทอดกำลังและใช้แกนเพลลาเป็นตัวขับเคลื่อน

3.1 การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์

ขนาดของมอเตอร์เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่มีความสำคัญมากสำหรับการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งข้อมูลที่บ่งบอกถึงขนาดของมอเตอร์จะประกอบด้วย แรงบิดของมอเตอร์ ความเร็วรอบของมอเตอร์และกำลังของมอเตอร์ โดยมีขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาขนาดของมอเตอร์ดังนี้

3.1.1 การคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์

การหาแรงบิดของมอเตอร์จำเป็นต้องทราบว่ามีแรงใดบ้างที่เกี่ยวข้อง และแรงที่กล่าวถึงนี้จะหมายถึงแรงที่กระทำต่อตัวรถในขณะที่ยังวิ่งซึ่งเป็นแรงที่พยายามต้านทานการเคลื่อนที่ของรถ การที่จะทำให้รถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิมได้นั้น แรงขับที่ล้อ (Tractive effort) จะต้องเท่ากับผลรวมของแรงเหล่านี้ ถ้าแรงขับนี้มีค่ามากกว่าก็จะทำให้รถเกิดความเร่งและในทางตรงกันข้ามถ้ามีค่าน้อยกว่าก็จะทำให้รถชะลอความเร็วลง แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถสามารถแบ่งได้ดังนี้ [2]

- 1) แรงต้านทานจากการกลิ้ง
- 2) แรงต้านของอากาศ
- 3) แรงต้านทานเนื่องจากความลาดชัน

ตามที่ได้กล่าวในข้างต้นว่าการหาแรงบิดของมอเตอร์ จำเป็นต้องคำนึงถึงค่าแรงกระทำและแรงเสียดทานต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนของมอเตอร์ก่อนการคำนวณหาขนาดมอเตอร์จะต้องทราบข้อมูลจำเพาะเบื้องต้นและการนำไปใช้งานของมอเตอร์ ซึ่งข้อมูลจำเพาะเบื้องต้นเพื่อใช้ในการคำนวณและออกแบบมอเตอร์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

รถจักรยาน	3 ล้อ
น้ำหนักของตัวรถรวมกับน้ำหนักคน	80 kg
เส้นผ่านศูนย์กลางของล้อ	50 cm
ความเร็วรถ	20 km/hr
มุมลาดเอียง	20°

3.1.1.1 การคำนวณแรงเสียดทานจากการกลิ้งและแรงบิดจากแรงเสียดทานจากการกลิ้ง

การคำนวณแรงเสียดทานและแรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทานการกลิ้ง สามารถหาได้ดังนี้

$$R_r = f_r mg$$

เมื่อ

$$R_r = \text{แรงเสียดทานการกลิ้ง (N)}$$

$$f_r = \text{ส.ป.ส.แรงเสียดทานการกลิ้งของล้อรถยนต์ (0.012- 0.015)}$$

$$m = \text{มวลของรถ (kg)}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } R_r &= 0.013 \times 80 \times 9.81 \\ &= 10.2 \text{ N} \end{aligned}$$

(ในกรณีนี้ เลือกใช้ f_r เท่ากับ 0.013 โดยสมมติให้การยุบตัวของยางรถจักรยานเท่ากับยางรถยนต์ ขับเคลื่อนบนพื้นผิวเดียวกันและวัสดุที่ใช้ทำยางเป็นชนิดเดียวกัน)

ดังนั้น แรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทานการกลิ้ง (T_r)

$$\begin{aligned} T_r &= 10.2 \times 0.25 \\ &= 2.55 \text{ N-m} \end{aligned}$$

3.1.1.2 การคำนวณแรงต้านจากอากาศและแรงบิดที่เกิดจากแรงต้านอากาศ

ในกรณีนี้รถจักรยานวิ่งช้าจึงได้ละทิ้งแรงต้านจากอากาศทิ้งไป

3.1.1.3 การคำนวณแรงจากน้ำหนักรถในทางลาดเอียงและแรงบิดที่ทำให้รถไหลลงในกรณีที่อยู่บนทางลาดเอียง

ในกรณีรถไหลลงทางลาดเอียงที่มีมุมลาดเอียง 20° โดยพิจารณาจากรูป ค-2 การคำนวณหาแรงจากน้ำหนักรถที่ทำให้รถไหลลงทางลาดเอียงและแรงเสียดทานที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงสามารถหาได้ดังนี้

$$R_g = mg \sin \theta$$

เมื่อ

$$R_g = \text{แรงจากน้ำหนักรถในทางลาดเอียง (N)}$$

$$m = \text{มวลของรถ (kg)}$$

$$\theta = \text{มุมลาดเอียง}$$

$$\begin{aligned}\text{แทนค่า } R_g &= 80 \times 9.81 \times \sin 20 \\ &= 268.42 \text{ N}\end{aligned}$$

ดังนั้น แรงบิดที่เกิดจากน้ำหนักรถไหลลงทางลาดเอียง (T_g)

$$\begin{aligned}T_g &= 268.42 \times 0.25 \\ &= 67.1 \text{ N-m}\end{aligned}$$

∴ เมื่อรวมแรงบิดทุกตัวเข้าด้วยกันจะได้

$$\begin{aligned}T_t &= T_r + T_g \\ &= 2.55 + 67.1 \\ &= 69.65 \text{ N-m}\end{aligned}$$

3.1.2 การคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์

ความเร็วรอบมอเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการ ค-1

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{V}{R} \\ \omega &= \frac{5.55}{0.25} \\ \omega &= 22.2 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

จากนั้นเปลี่ยนหน่วย rad/s เป็นหน่วย rpm โดย

$$\begin{aligned}rpm &= \frac{\omega \times 60}{2\pi} = \frac{22.2 \times 60}{2\pi} \\ rpm &= 212\end{aligned}$$

3.1.3 การคำนวณหากำลังของมอเตอร์

เมื่อได้แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ตามที่ต้องการแล้ว จากนั้นจะต้องคำนวณว่าเมื่อแรงบิดและความเร็วรอบที่คำนวณได้จะต้องใช้มอเตอร์ที่มีกำลังเท่าใด โดยหาได้จากสมการ

ค-2

$$\begin{aligned}P &= T\omega \\ P &= 69.65 \times 22.2 \\ P &= 1546.23 \text{ W}\end{aligned}$$

หากพิจารณาอย่างละเอียดจะเห็นว่าถ้าเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1546.23 W จะเป็นการเลือกมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็นต่อการใช้งานอยู่มาก เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

1. แรงบิดส่วนใหญ่มาจาก แรงบิดที่เกิดจากการต้านน้ำหนักในทางลาดเอียง ดังนั้นถ้าความลาดเอียงของถนนลดลง แรงบิดสูงสุดที่ต้องการให้มอเตอร์ทำก็จะลดลง

2. ความเร็วสูงสุด 20 km/hr จะเกิดขึ้นเมื่อรถไปวิ่งบนพื้นราบและใช้กำลังสูงสุดเพียง 56.61 W คำนวณมาจากแรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทานกลึง 2.55 N-m คูณกับความเร็วจังหวะ 22.2 rad/s

ดังนั้นในกรณีออกแบบและสร้างมอเตอร์เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถจักรยานนี้จะเลือกใช้มอเตอร์ที่มีกำลังสูงสุดไม่น้อยกว่า 180 W และความเร็วสูงสุดไม่น้อยกว่า 22.2 rad/s หรือ 212 rpm แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจริงอาจไม่สามารถหาขนาดของแรงบิดได้ตามต้องการ เพราะฉะนั้นแนวทางการออกแบบที่ปลอดภัยที่สุดคือเลือกมอเตอร์ที่สามารถสร้างแรงบิดได้มากกว่าที่ต้องการ ส่วนเรื่องความเร็วรอบจะได้รับความสำคัญรองลงมา

3.2 การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เนื่องจากผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำไว้ 2 แบบ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่าย ผู้วิจัยจึงขอเสนอการออกแบบมอเตอร์ในแต่ละแบบแยกจากกัน โดยมีขั้นตอนการคำนวณและออกแบบดังต่อไปนี้

3.2.1 การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบที่ 1

การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบที่ 1 เริ่มแรกจะต้องกำหนดข้อมูลจำเพาะซึ่งเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ต้องทราบก่อนการคำนวณ [19],[20] โดยข้อมูลจำเพาะที่ผู้วิจัยได้กำหนดมีดังนี้

- 1) กำลังพิกัด (Rated power) : P_n [W] = 180 W (สามารถขึ้นพื้นเอียง 20° ได้ด้วยความเร็ว 2.32 km/hr)
- 2) ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) : n_s [rpm] = 333.33 rpm
- 3) ความต่างศักย์แหล่งจ่าย (Line supply voltage) : V_l [V] = 48 V (แบตเตอรี่ที่ใช้กันทั่วไปลูกละ 12 V โดยจะใช้แบตเตอรี่ 4 ลูก)
- 4) ความถี่ (Supply frequency) : f_s [Hz] = 50 Hz
- 5) จำนวนเฟส (Number of phase) : $m = 3$
- 6) การเชื่อมต่อ (Phase connections) : serie-star
- 7) ตัวประกอบกำลังเป้าหมาย (Targeted power factor) : $\cos \phi_n = 0.83$
- 8) ประสิทธิภาพเป้าหมาย (Targeted efficiency) : $\eta_n = 0.8$

จากนั้นนำข้อมูลจำเพาะเหล่านี้มาใช้ในการคำนวณและออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยสมการคำนวณมิติหลักของสเตเตอร์และข้อมูลสำคัญประกอบการพันมอเตอร์ ผู้วิจัยได้นำเสนอและอธิบายไว้อย่างละเอียดในภาคผนวก ค

1. การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสเตเตอร์

การใช้โรเตอร์ของพัดลมเพดานทำให้ได้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสเตเตอร์ (D_{is}) = 160 mm

2. การคำนวณหาความยาวแกนสเตเตอร์

การใช้โรเตอร์ของพัดลมเพดานทำให้ได้ความยาวแกนเหล็กสเตเตอร์ (L) = 18.45 mm

3. การคำนวณหาโพลพิทช์

การคำนวณโพลพิทช์ สามารถหาได้จากสมการ ค-8

$$\tau = \frac{\pi D_{is}}{2p_1} = \frac{\pi \times 0.16}{2 \times 9} = 0.028 \text{ m}$$

4. สล๊อตพิทช์

การคำนวณสล๊อตพิทช์ สามารถหาได้จากสมการ ค-9

เมื่อกำหนดจำนวนสล๊อตต่อโพลต่อเฟส (q) เท่ากับ 1

$$\tau_s = \frac{\tau}{3q} = \frac{0.028}{3 \times 1} = 0.0093 \text{ m}$$

ระยะช่องอากาศ (g) จะคำนวณหาได้จากสมการ ค-11 ดังนี้

$$g = (0.1 + 0.012\sqrt{180})10^{-3} = 0.17 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (\text{เมื่อ } 2p_1 = 8)$$

5. การคำนวณหาจำนวนสล๊อตในสเตเตอร์

การคำนวณหาจำนวนสล๊อตในสเตเตอร์ สามารถหาได้จากสมการ ค-12

$$N_s = 2p_1 q m = 2 \times 9 \times 1 \times 3 = 54 \text{ สล๊อต}$$

6. โพลพิทช์แบ่งโดยจำนวนสล๊อต

การคำนวณโพลพิทช์แบ่งโดยจำนวนสล๊อต สามารถหาได้จากสมการ ค-13

$$\tau = \frac{N_s}{2p_1} = \frac{54}{2 \times 9} = 3 \text{ ร่องสล๊อต}$$

สำหรับการลงขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส ทำได้โดยการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างระยะการลงขดลวดกับระยะโพลพิทช์ ดังนี้

$$\frac{y}{\tau} = \frac{2}{3} \text{ จะได้ระยะการลงขดลวด } y = 2$$

7. มุมทางไฟฟ้า (Electrical angle : α_{ec})

การคำนวณมุมทางไฟฟ้า สามารถหาได้จากสมการ ค-14

$$\alpha_{ec} = \frac{2\pi p_1}{N_s} = \frac{2\pi \cdot 9}{54} = \frac{\pi}{3}$$

8. ตัวประกอบของการแผ่กระจาย (K_{q1})

การคำนวณตัวประกอบของการแผ่กระจาย สามารถหาได้จากสมการ ค-15

$$K_{q1} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q \sin \frac{\pi}{6q}} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{1 \times \sin \frac{\pi}{6 \times 1}} = 1$$

9. ตัวประกอบของคอร์ด (K_{y1})

การคำนวณตัวประกอบของคอร์ด สามารถหาได้จากสมการ ค-16

$$K_{y1} = \sin \frac{\pi y}{2\tau}$$

$$K_{y1} = \sin \frac{\pi \times 2}{2 \times 3} = 0.866$$

ดังนั้น ตัวประกอบการพันสเตเตอร์ (K_{w1}) จากสมการ ค-17 จะได้ว่า

$$K_{w1} = K_{q1} \times K_{y1}$$

$$K_{w1} = 1 \times 0.866 = 0.866$$

10. ฟลักซ์ช่องอากาศ

กรณีนี้ได้กำหนดค่า $1 + K_{sr} = 1.4$ และ $B_g = 0.8$ T เพราะฉะนั้นจากรูปที่ 3-5 จะได้ $\alpha_f = 0.729$ $K_f = 1.085$ จากนั้นทำการหาจำนวนรอบต่อเฟสโดยเริ่มจากการคำนวณหาโพลฟลักซ์ (Pole flux : ϕ) ในสมการ ค-18

$$\phi = \alpha_f \tau L B_g$$

$$\phi = 0.729 \times 0.028 \times 0.01845 \times 0.8 = 0.3 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

11. จำนวนรอบต่อเฟส (Turns per phase : W_1)

การคำนวณจำนวนรอบต่อเฟส สามารถหาได้จากสมการ ค-19 และจากสมการ ค-5 สามารถหา K_E ได้ดังนี้

$$K_E = 0.98 - 0.005 p_1 = 0.98 - 0.005(9) = 0.935$$

$$W_1 = \frac{K_E V_{1ph}}{4 K_f K_{w1} f_1 \phi}$$

$$W_1 = \frac{0.935 \times 48 / \sqrt{3}}{4 \times 1.085 \times 0.866 \times 50 \times 0.3 \times 10^{-3}}$$

$$W_1 = 459.61 \text{ รอบต่อเฟส}$$

ในกรณีนี้กำหนดให้จำนวนเส้นทางกระแสในแนวขนาน (Current paths in parallel : a_1) เท่ากับ 1

12. จำนวนตัวนำต่อสล๊อต (Conductors per slot : n_s)

การคำนวณจำนวนตัวนำต่อสล๊อต สามารถหาได้จากสมการ ค-20

$$n_s = \frac{a_1 W_1}{p_1 q}$$

$$n_s = \frac{a_1 W_1}{p_1 q} = \frac{1 \times 459.61}{9 \times 1} = 51.07$$

** จำนวนตัวนำต่อสล๊อตจะต้องเป็นจำนวนเต็ม แต่ในกรณีนี้เลือก n_s เท่ากับ 30 (ข้อจำกัดทางพื้นที่สล๊อต)

ดังนั้น

$$W_1' = p_1 q n_s$$

$$W_1' = 9 \times 1 \times 30 = 270 \quad \text{รอบต่อเฟส}$$

และฟลักซ์ช่องอากาศใหม่ (B_g') คือ

$$B_g' = \frac{B_g W_1}{W_1'} = \frac{0.8 \times 459.61}{270} = 1.36 \quad \text{T}$$

13. กระแสพิกัด (Rated current : I_{ln})

การคำนวณหากระแสพิกัด สามารถหาได้จากสมการ ค-21

$$I_{ln} = \frac{P_n}{\eta_n \cos \varphi_n \sqrt{3} V_1}$$

$$I_{ln} = \frac{180}{0.8 \times 0.83 \times \sqrt{3} \times 48} = 3.26 \quad \text{A}$$

14. ค่าความหนาแน่นของกระแส (Current Density : J_{cos})

ค่าความหนาแน่นของกระแสที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง (High efficiency motor) คือ

$$J_{cos} = (4-7) \quad \text{A/mm}^2 \quad \text{สำหรับ } 2p_1 = 2, 4$$

$$J_{cos} = (5-8) \quad \text{A/mm}^2 \quad \text{สำหรับ } 2p_1 = 6, 8$$

ในกรณีนี้เลือก $J_{cos} = 8 \quad \text{A/mm}^2$ [8]

15. พื้นที่หน้าตัดทางแม่เหล็ก (Magnetic wire cross section : A_{co})

การคำนวณพื้นที่หน้าตัดทางแม่เหล็ก สามารถหาได้จากสมการ ค-22

$$A_{co} = \frac{I_{ln}}{J_{cos} a_1} = \frac{3.26}{8 \cdot 1} = 0.4 \quad \text{mm}^2$$

ขนาดของลวด (Wire diameter : d_{co}) จะคำนวณหาได้จากสมการ ค-23

$$d_{co} = \sqrt{\frac{4A_{co}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.4}{\pi}} = 0.72 \quad \text{mm}$$

16. ขนาดสล๊อตสเตเตอร์ (Stator slot sizing)

เมื่อได้ค่าตัวนำต่อสล๊อต (n_s) ขนาดลวด (d_{co}) และพื้นที่สล๊อต (Slot area : A_{su}) ก็จะทำขนาดสล๊อตได้จากสมการ ค-24

$$A_{su} = \frac{\pi d_{co}^2 n_s}{4K_{fill}}$$

$$A_{su} = \frac{\pi \times 0.72^2 \times 30}{4 \times 0.4} = 30.54 \text{ mm}^2$$

เมื่อ $K_{fill} \approx 0.35 - 0.4$ มอเตอร์ต่ำกว่า 10 kW

$K_{fill} \approx 0.4 - 0.44$ มอเตอร์สูงกว่า 10 kW

** กรณีนี้ได้เลือกใช้ $K_{fill} = 0.4$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน เมื่อสมมติให้ฟลักซ์ของอากาศส่งผ่านไปยังฟันของสเตเตอร์ จะได้

$$B_g \tau_s L \approx B_{ts} b_{ts} L K_{Fe}$$

ในกรณีนี้ $K_{Fe} \approx 0.96$ สำหรับเหล็กลามิเนตหนา 0.5 mm B_{ts} เท่ากับ 1.55 T และค่าสล๊อตพิทซ์ τ_s เท่ากับ 9.3 mm ดังนั้นความกว้างของฟันสเตเตอร์ (Tooth width: b_{ts}) จะหาได้จากสมการ ค-25

$$b_{ts} = \frac{B_g \tau_s}{B_{ts} K_{Fe}}$$

$$b_{ts} = \frac{1.36 \times 0.0093}{1.55 \times 0.96} = 0.0085 \text{ m}$$

ซึ่งโดยทั่วไปความกว้างของฟันสเตเตอร์ไม่ควรต่ำกว่า 3.5 mm [8] แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดของขนาดร่องสล๊อตและกระบวนการผลิต ผู้วิจัยจึงได้กำหนดให้ความกว้างของฟันสเตเตอร์เท่ากับ 5 mm และความกว้างร่องสล๊อตเท่ากับ 3 mm

การพันแบบ 2 ชั้น ทำให้พื้นที่ร่องสล๊อตเท่ากับ $2A_{su}$ ดังนั้น หาความลึกร่องสล๊อตได้ คือ

$$h_s = \frac{2 \times 30.54 \times 10^{-3}}{3} = 0.020 \text{ m}$$

17. ส.ป.ส การอิมิตัวของฟลักซ์หรือค่า $1+K_{st}$

สำหรับการคำนวณ ส.ป.ส การอิมิตัวของฟลักซ์หรือค่า $1+K_{st}$ จากสมการ ค-29 สามารถหาได้ดังนี้

$$1 + K_{st} = 1 + \frac{F_{mts} + F_{mtr}}{F_{mg}}$$

เมื่อ F_{mg} , F_{mts} และ F_{mtr} มีค่าดังต่อไปนี้

$$F_{mg} \approx 1.2 \times 0.17 \times 10^{-3} \times \frac{1.36}{1.256 \times 10^{-6}} = 217.75 \text{ A turns}$$

$$F_{mts} = 1760(20) \times 10^{-3} = 35.2 \text{ A turns}$$

$$F_{mtr} = 0.4 \times 217.75 - 35.2 = 51.9 \text{ A turns}$$

การคำนวณหา h_{cs} เพื่อใช้หาความหนาแน่นฟลักซ์ใต้สล๊อต (Back core flux density: B_{cs}) สามารถหา h_{cs} ได้ดังนี้

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - D_{is} - 2h_s}{2}$$

$$h_{cs} = \frac{160 - 21 - 2 \times 20}{2} = 49.5 \text{ mm}$$

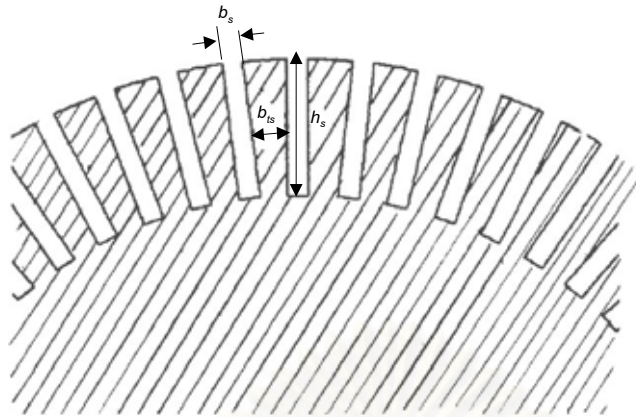
เมื่อได้ค่า h_{cs} แล้วจากนั้นทำการหาความหนาแน่นฟลักซ์ใต้สล๊อต (Back core flux density: B_{cs}) ได้จาก

$$B_{cs} = \frac{\phi}{2Lh_{cs}}$$

$$B_{cs} = \frac{0.3 \times 10^{-3}}{2 \times 0.01845 \times 49.5 \cdot 10^{-3}} = 0.164 \text{ T}$$

โดยทั่วไปแล้ว B_{cs} ไม่ควรเกิน 1.7 T ซึ่งหาก B_{cs} มีค่ามากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการอิมิตัวที่แกนเหล็กสเตเตอร์

** การคำนวณข้างต้นเป็นแนวทางในการหามิตรองสล๊อต ส่วนในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้สร้างสล๊อตของมอเตอร์แบบที่ 1 เป็นดังรูปที่ 3-1



- 1) $b_s = 3 \text{ mm}$
- 2) $b_{ts} = 5 \text{ mm}$
- 3) $h_s = 20 \text{ mm}$

รูปที่ 3-1 แสดงขนาดของสเตเตอร์ (มอเตอร์แบบที่ 1)

3.2.2 การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบที่ 2

การออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบที่ 2 ผู้วิจัยได้กำหนดข้อมูลจำเพาะเพื่อใช้ในการคำนวณดังนี้

- 1) กำลังพิกัด (Rated power) : $P_n[\text{W}] = 200 \text{ W}$ (เมื่อทดรอบ 4:1 สามารถขึ้นพื้นเอียง 20° ได้ด้วยความเร็ว 10.34 km/hr)
- 2) ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) : $n_s[\text{rpm}] = 750 \text{ rpm}$
- 3) ความต่างศักย์แหล่งจ่าย (Line supply voltage) : $V_l[\text{V}] = 36 \text{ V}$ (แบตเตอรี่ที่ใช้กันทั่วไปลูกละ 12 V โดยจะใช้แบตเตอรี่ 3 ลูก)
- 4) ความถี่ (Supply frequency) : $f_l[\text{Hz}] = 50 \text{ Hz}$
- 5) จำนวนเฟส (Number of phase) : $m = 3$
- 6) การเชื่อมต่อ (Phase connections) : two parallel delta
- 7) ตัวประกอบกำลังเป้าหมาย (Targeted power factor) : $\cos \phi_n = 0.83$
- 8) ประสิทธิภาพเป้าหมาย (Targeted efficiency) : $\eta_n = 0.8$

เมื่อได้ข้อมูลจำเพาะในเบื้องต้นแล้ว จากนั้นนำข้อมูลจำเพาะนี้มาใช้ในการคำนวณและออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1. การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสเตเตอร์

การใช้โรเตอร์ของมอเตอร์ครึ่งแรงม้าทำให้ได้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของสเตเตอร์ (D_{is}) = 54 mm

2. การคำนวณหาความยาวแกนสเตเตอร์

การใช้โรเตอร์ของมอเตอร์เครื่องแม่เหล็กทำให้ความยาวแกนเหล็กสเตเตอร์ (L) = 59 mm

3. การคำนวณหาโพลพิทช์

การคำนวณหาโพลพิทช์ สามารถหาได้จากสมการ ค-8 ดังนี้

$$\tau = \frac{\pi D_{is}}{2p_1} = \frac{\pi \times 0.054}{2 \times 4} = 0.021 \text{ m}$$

4. การคำนวณหาสล๊อตพิทช์

การคำนวณหาสล๊อตพิทช์ สามารถหาได้จากสมการ ค-9 โดยกำหนดจำนวนสล๊อตต่อโพลต่อเฟส (q) เท่ากับ 1

$$\tau_s = \frac{\tau}{3q} = \frac{0.021}{3 \times 1} = 0.007 \text{ m}$$

จากในตาราง ค-2 ที่ได้แสดงอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในต่อภายนอกของสเตเตอร์ และในกรณีมอเตอร์นี้มีคู่โพล (p_1) เท่ากับ 4 ซึ่งจากในตาราง $2p_1 = 8$ จะได้

$$\frac{D_{is}}{D_{out}} = K_D = 0.73$$

$$D_{out} = \frac{0.0538}{0.73} = 0.074 \text{ m}$$

ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D_{is}) ได้เท่ากับ 0.074 m (ในกรณีนี้ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 0.1 m) โดยมีระยะช่องอากาศ (g) จะคำนวณหาได้จากสมการ ค-11 ดังนี้

$$g = (0.1 + 0.012\sqrt{200})10^{-3} = 0.17 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (\text{เมื่อ } 2p_1 = 8)$$

5. การคำนวณหาจำนวนสล๊อตในสเตเตอร์

การคำนวณหาจำนวนสล๊อตในสเตเตอร์ สามารถหาได้จากสมการ ค-12

$$N_s = 2p_1 q m = 24 \text{ สล๊อต}$$

6. โพลพิทช์แบ่งโดยจำนวนสล๊อต

การคำนวณโพลพิทช์แบ่งโดยจำนวนสล๊อต สามารถหาได้จากสมการ ค-13

$$\tau = \frac{N_s}{2p_1} = \frac{24}{8} = 3 \text{ ร่องสล๊อต}$$

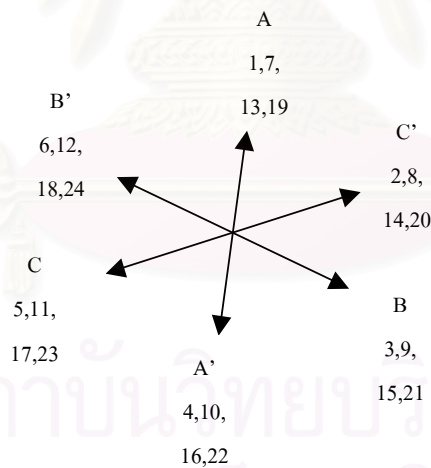
สำหรับการลงขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส ทำได้โดยการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างระยะการลงขดลวดกับระยะโพลพิทช์ ดังนี้

$$\frac{y}{\tau} = \frac{2}{3} \text{ จะได้ระยะการลงขดลวด } y = 2$$

7. มุมทางไฟฟ้า (Electrical angle : α_{ec})

การคำนวณมุมทางไฟฟ้า สามารถหาได้จากสมการ ค-14 โดยมุมทางไฟฟ้าที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-2

$$\alpha_{ec} = \frac{2\pi p_1}{N_s} = \frac{2\pi \cdot 4}{24} = \frac{\pi}{3}$$



รูปที่ 3-2 แสดงมุมทางไฟฟ้า

และมีรูปแบบการลงขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส 8 Pole 24 ร่องสล๊อต พันแบบสองชั้น chorded

coil ($\frac{y}{\tau} = \frac{2}{3}$) ดังนี้

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'
C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'	A

8. ตัวประกอบของการแผ่กระจาย (K_{q1})

การคำนวณหาตัวประกอบของการแผ่กระจาย สามารถหาได้จากสมการ ค-15 ดังนี้

$$K_{q1} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q \sin \frac{\pi}{6q}} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{1 \times \sin \frac{\pi}{6 \times 1}} = 1$$

9. ตัวประกอบของคอรัต (K_{y1})

การคำนวณหาตัวประกอบของคอรัต สามารถหาได้จากสมการ ค-16 ดังนี้

$$K_{y1} = \sin \frac{\pi y}{2\tau}$$

$$K_{y1} = \sin \frac{\pi \times 2}{2 \times 3} = 0.866$$

ดังนั้น ตัวประกอบการพันสเตเตอร์ (K_{w1}) จากสมการ ค-17 จะได้ว่า

$$K_{w1} = K_{q1} \times K_{y1}$$

$$K_{w1} = 1 \times 0.866 = 0.866$$

10. ฟลักซ์ช่องอากาศ

ในกรณีฟลักซ์ช่องอากาศ ผู้วิจัยได้นิยามไว้สำหรับมอเตอร์ที่มีค่า $2p_1$ เท่ากับ 8 เป็นดังนี้

$$B_g = (0.75 - 0.85)T \quad \text{สำหรับ } 2p_1 = 8$$

กรณีนี้ได้กำหนดค่า $1 + K_{st} = 1.4$ และ $B_g = 0.8$ T เพราะฉะนั้นจากรูป ค-5 จะได้ $\alpha_f = 0.729$
 $K_f = 1.085$ จากนั้นทำการหาจำนวนรอบต่อเฟสโดยเริ่มจากการคำนวณหาโพลฟลักซ์ (Pole flux : ϕ) ในสมการ ค-18

$$\phi = \alpha_f \tau L B_g$$

$$\phi = 0.729 \times 0.021 \times 0.059 \times 0.8 = 0.73 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

11. จำนวนรอบต่อเฟส (Turns per phase : W_1)

การคำนวณจำนวนรอบต่อเฟส สามารถหาได้จากสมการ ค-19 และจากสมการ ค-5 จะสามารถหา K_E

$$K_E = 0.98 - 0.005p_1 = 0.98 - 0.005(4) = 0.96$$

$$W_1 = \frac{K_E V_{1ph}}{4K_f K_{w1} f_1 \phi}$$

$$W_1 = \frac{0.96 \times 36}{4 \times 1.085 \times 0.866 \times 50 \times 0.73 \times 10^{-3}}$$

$$W_1 = 252 \text{ รอบต่อเฟส}$$

12. จำนวนตัวนำต่อสลิต (Conductors per slot : n_s)

การคำนวณหาจำนวนตัวนำต่อสลิต สามารถหาได้จากสมการ ค-20 ซึ่งในกรณีนี้ กำหนดให้จำนวนเส้นทางกระแสในแนวขนาน (Current paths in parallel : a_l) เท่ากับ 2

$$n_s = \frac{a_l W_1}{p_1 q}$$

$$n_s = \frac{a_l W_1}{p_1 q} = \frac{2 \times 252}{4 \times 1} = 126$$

** จำนวนตัวนำต่อสลิตจะต้องเป็นจำนวนเต็ม แต่ในกรณีนี้เลือก n_s เท่ากับ 45 (ข้อจำกัดทางพื้นที่สลิต)

ดังนั้น

$$W_1' = p_1 q n_s$$

$$W_1' = 4 \times 1 \times 45 = 180 \text{ รอบต่อเฟส}$$

และฟลักซ์ช่องอากาศใหม่ (B'_g) คือ

$$B'_g = \frac{B_g W_1}{W_1'} = \frac{0.8 \times 252}{180} = 1.12 \text{ T}$$

13. กระแสพิกัด (Rated current : I_{ln})

การคำนวณหากระแสพิกัด สามารถหาได้จากสมการ ค-21 ดังนี้

$$I_{ln} = \frac{P_n}{\eta_n \cos \varphi_n \sqrt{3} V_1}$$

$$I_{ln} = \frac{200}{0.8 \times 0.83 \times \sqrt{3} \times 36} = 4.83 \text{ A}$$

14. ค่าความหนาแน่นของกระแส (Current Density : J_{cos})

ค่าความหนาแน่นของกระแสที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง (High efficiency motor) คือ

$$J_{cos} = (4 - 7) \text{ A/mm}^2 \quad \text{สำหรับ } 2p_1 = 2, 4$$

$$J_{cos} = (5 - 8) \text{ A/mm}^2 \quad \text{สำหรับ } 2p_1 = 6, 8$$

ซึ่งในกรณีนี้เลือก $J_{cos} = 8 \text{ A/mm}^2$ [8]

15. พื้นที่หน้าตัดทางแม่เหล็ก (Magnetic wire cross section : A_{co})

การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดทางแม่เหล็ก สามารถหาได้จากสมการ ค-22

$$A_{co} = \frac{I_{ln}}{J_{cos} a_1} = \frac{4.83}{8 \cdot 2} = 0.3 \text{ mm}^2$$

ขนาดของลวด (Wire diameter : d_{co}) จะคำนวณหาได้จากสมการ ค-23

$$d_{co} = \sqrt{\frac{4A_{co}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.3}{\pi}} = 0.62 \text{ mm}$$

16. ขนาดสล็อตสเตเตอร์ (Stator slot sizing)

เมื่อได้ค่าตัวนำต่อสล็อต (n_s) ขนาดลวด (d_{co}) และพื้นที่สล็อต (Slot area : A_{su}) ก็จะสามารถหาขนาดสล็อตได้จากสมการ ค-24

$$A_{su} = \frac{\pi d_{co}^2 n_s}{4K_{fill}}$$

$$A_{su} = \frac{\pi \times 0.62^2 \times 45}{4 \times 0.4} = 33.96 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } K_{fill} &\approx 0.35 - 0.4 \text{ มอเตอร์ต่ำกว่า } 10 \text{ kW} \\ K_{fill} &\approx 0.4 - 0.44 \text{ มอเตอร์สูงกว่า } 10 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$** \text{ กรณีนี้ได้เลือกใช้ } K_{fill} = 0.4$$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน เมื่อสมมติให้ฟลักซ์ช่องอากาศส่งผ่านไปยังฟันของสเตเตอร์ จะได้

$$B_g \tau_s L \approx B_{ts} b_{ts} L K_{Fe}$$

ในกรณีนี้ $K_{Fe} \approx 0.96$ สำหรับเหล็กลามิเนตหนา 0.5 mm B_{ts} เท่ากับ 1.55 T และค่าสล็อตพิทช์ τ_s เท่ากับ 7 mm ดังนั้นความกว้างของฟันสเตเตอร์ (Tooth width: b_{ts}) จะหาได้จากสมการ ค-25

$$\begin{aligned} b_{ts} &= \frac{B_g \tau_s}{B_{ts} K_{Fe}} \\ b_{ts} &= \frac{1.12 \times 0.007}{1.55 \times 0.96} = 0.0053 \text{ m} \end{aligned}$$

ความกว้างของฟันสเตเตอร์ไม่ควรต่ำกว่า 3.5 mm จากนั้นคำนวณหา b_{s1} จากสมการ ค-26 ซึ่งในกรณีนี้เลือกใช้ b_{os} เท่ากับ 2.2 mm h_{os} เท่ากับ 0.67 mm และ h_w เท่ากับ 1.5 mm และจะได้ b_{s1} ดังนี้

$$\begin{aligned} b_{s1} &= \frac{\pi(D_{is} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_s} - b_{ts} \\ b_{s1} &= \frac{\pi(0.054 + 2 \times 0.00067 + 2 \times 0.0015)}{24} - 0.0053 \text{ m} \\ b_{s1} &= 0.0023 \text{ m} \end{aligned}$$

เมื่อได้ค่า b_{s1} แล้วจากนั้นคำนวณหา b_{s2} จากสมการ ค-27 และเนื่องจากการพันแบบ 2 ชั้น ดังนั้น พ.ท ร่องสลอตจึงต้องเป็น $2A_{su}$

$$b_{s2} = \sqrt{4 \times 2A_{su} \tan \frac{\pi}{N_s} + b_{s1}^2}$$

$$b_{s2} = 10^{-3} \sqrt{4 \times 2 \times 33.96 \tan \frac{\pi}{24} + 2.3^2} = 0.0064 \text{ m}$$

เมื่อแทน b_{s2} ในสมการ ค-28 จะได้ว่า

$$h_s = \frac{2 \times 2A_{st}}{b_{s1} + b_{s2}}$$

$$h_s = \frac{2 \times 2 \times 33.96 \times 10^{-3}}{4.19 + 5.76} = 0.0156 \text{ m}$$

17. ส.ป.ส การอิมิตัวของฟลักซ์เตเตอร์หรือค่า $1+K_{st}$

การคำนวณหา ส.ป.ส การอิมิตัวของฟลักซ์เตเตอร์หรือค่า $1+K_{st}$ สามารถหาได้จากสมการ ค-29 ดังนี้

$$1 + K_{st} = 1 + \frac{F_{mts} + F_{mtr}}{F_{mg}}$$

เมื่อ F_{mg} , F_{mts} และ F_{mtr} มีค่าดังต่อไปนี้

$$F_{mg} \approx 1.2 \times 0.17 \times 10^{-3} \times \frac{1.12}{1.256 \times 10^{-6}} = 182.13 \text{ A turns}$$

$$F_{mts} = 1760(15.6 + 0.67 + 1.5) \times 10^{-3} = 31.21 \text{ A turns}$$

$$F_{mtr} = 0.4 \times 182.13 - 31.21 = 41.64 \text{ A turns}$$

การคำนวณหา h_{cs} เพื่อใช้หาความหนาแน่นฟลักซ์ใต้สล็อต (Back core flux density: B_{cs}) สามารถหา h_{cs} ได้ดังนี้

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{is} + 2(h_{os} + h_w + h_s))}{2}$$

$$h_{cs} = \frac{100 - (54 + 2 \times (0.67 + 1.5 + 15.6))}{2} = 5.27 \text{ mm}$$

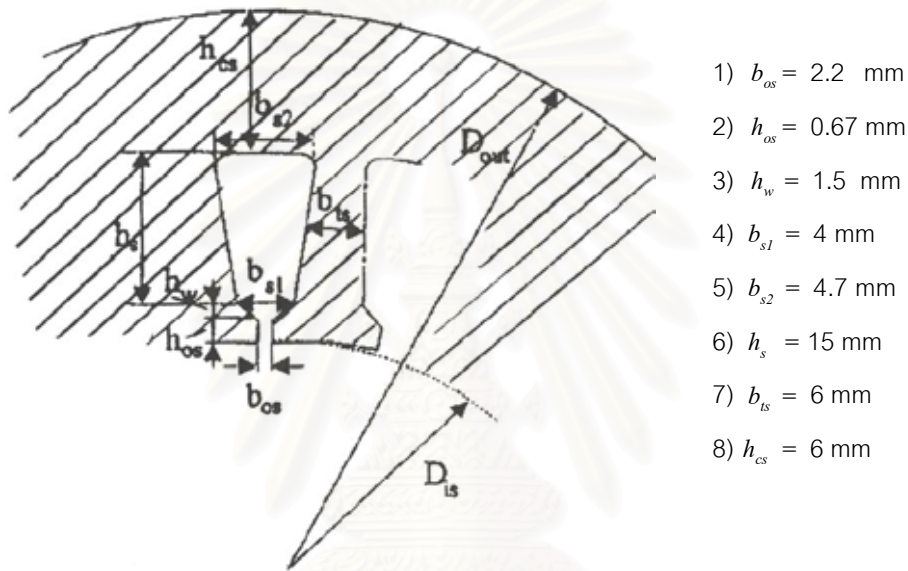
เมื่อได้ค่า h_{cs} แล้วจากนั้นทำการหาความหนาแน่นฟลักซ์ใต้สล็อต (Back core flux density: B_{cs}) ได้จาก

$$B_{cs} = \frac{\phi}{2Lh_{cs}}$$

$$B_{cs} = \frac{0.73 \times 10^{-3}}{2 \times 0.059 \times 5.27 \cdot 10^{-3}} = 1.17 \text{ T}$$

โดยทั่วไปแล้ว B_{cs} ไม่ควรเกิน 1.7 T ซึ่งหาก B_{cs} มีค่ามากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการอิ่มตัวที่แกนเหล็กสเตเตอร์

** การคำนวณข้างต้นเป็นแนวทางในการหามิติร่องสลิต ส่วนในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้สร้างสลิตของมอเตอร์แบบที่ 2 ดังรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 แสดงขนาดของสเตเตอร์ (มอเตอร์แบบที่ 2)

3.3 สรุปผลการออกแบบมอเตอร์

ในการออกแบบมอเตอร์แบบที่ 1 และแบบที่ 2 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการนำไปสร้าง ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลการออกแบบมอเตอร์ทั้ง 2 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สรุปผลการออกแบบมอเตอร์แบบที่ 1 และแบบที่ 2

มิติหลักสเตเตอร์และการพันมอเตอร์	มอเตอร์แบบที่ 1	มอเตอร์แบบที่ 2
1. จำนวนโพล (Pole)	18	8
2. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (mm)	160	100
3. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (mm)	21	54
4. ความยาวแกนสเตเตอร์ (mm)	18.45	59
5. ระยะช่องอากาศ (mm)	0.17	0.17
6. จำนวนสล๊อต	54	24
7. การเชื่อมต่อ	Series star	Two parallel delta
8. จำนวนตัวนำต่อสล๊อต	52	126
9. เส้นผ่านศูนย์กลางลวด (mm)	0.72	0.62

ผลจากการออกแบบมอเตอร์แบบที่ 1 และแบบที่ 2 ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของมอเตอร์สามารถกล่าวได้ดังนี้

1. จำนวนโพล มีผลต่อความเร็วเชิงโคโรนัสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังความสัมพันธ์ของสมการ 2-21 ความเร็วเชิงโคโรนัสแปรผกผันกับจำนวนโพล ทำให้มอเตอร์แบบที่ 1 (18 โพล) มีความเร็วเชิงโคโรนัสน้อยกว่ามอเตอร์แบบที่ 2 (8 โพล) และจากความสัมพันธ์ของสมการ ค-2 สามารถพิจารณาได้ว่าในกรณีที่กำลังวัตต์ของมอเตอร์ทั้ง 2 แบบเท่ากัน มอเตอร์ที่มีความเร็วรอบน้อยกว่าจะให้แรงบิดมากกว่า ดังนั้นมอเตอร์แบบที่ 1 ซึ่งมีความเร็วรอบน้อยกว่ามอเตอร์แบบที่ 2 จึงให้แรงบิดมากกว่ามอเตอร์แบบที่ 2 ในกรณีที่กำลังวัตต์เท่ากัน

2. เส้นผ่านศูนย์กลางภายในและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสเตเตอร์ มีผลโดยตรงต่อขนาดและกำลังของมอเตอร์ตามความสัมพันธ์ของสมการ ค-3 ซึ่งในกรณีมอเตอร์แบบที่ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางที่นำมาใช้ในการคำนวณหาขนาดร่องสล๊อตมีขนาดใหญ่กว่ามอเตอร์แบบที่ 2 ทำให้มอเตอร์แบบที่ 1 มีร่องสล๊อตได้มากกว่ามอเตอร์แบบที่ 2

3. ความยาวแกนสเตเตอร์ มีผลต่อพื้นที่การส่งผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในมอเตอร์แบบที่ 2 มีความยาวแกนสเตเตอร์เท่ากับ 59 mm ส่วนในมอเตอร์แบบที่ 1 มีความยาวแกน

สเตเตอร์เท่ากับ 18.45 mm ทำให้มอเตอร์แบบที่ 2 มีพื้นที่ส่งผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้มากกว่ามอเตอร์แบบที่ 1

4. ระยะช่องอากาศ ในกรณีของมอเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ทั้ง 2 แบบนี้ มีระยะช่องอากาศเท่ากันคือ 0.17 mm ซึ่งระยะช่องอากาศที่แคบจะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์มีความเข้มข้นสูง

5. จำนวนสลิต สำหรับมอเตอร์แบบที่ 1 มีจำนวนสลิตเท่ากับ 54 สลิต เมื่อทำให้เป็นมอเตอร์ 3 เฟส จะได้ 18 สลิตต่อเฟส และมีจำนวน 1 สลิตต่อโพลต่อเฟส ส่วนจำนวนสลิตของมอเตอร์แบบที่ 2 เท่ากับ 24 สลิต เมื่อทำให้เป็นมอเตอร์ 3 เฟส จะได้ 8 สลิตต่อเฟส และมีจำนวน 1 สลิตต่อโพลต่อเฟส

6. การเชื่อมต่อ สำหรับมอเตอร์ทั้ง 2 แบบมีวิธีการเชื่อมต่อขดลวดที่แตกต่างกันคือมอเตอร์แบบที่ 1 จะเชื่อมต่อแบบ Series star ซึ่งจะต่ออนุกรมกันในแต่ละเฟส แล้วนำปลายด้านหนึ่งของขดลวดในแต่ละเฟสมาเชื่อมต่อกัน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต่อกับแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส การเชื่อมต่อวิธีนี้จะทำให้ได้มอเตอร์ 3 เฟส ใช้กับแหล่งจ่ายไฟ 48 โวลต์ ส่วนมอเตอร์แบบที่ 2 จะเชื่อมต่อแบบ Two parallel delta ซึ่งในแต่ละขดจะต่อขนานกัน 2 เส้น แล้วนำแต่ละขดมาต่อกันแบบต้นต่อปลาย ส่วนจุดต่อของแต่ละขดจะต่อกับแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส ซึ่งการเชื่อมต่อวิธีนี้จะใช้ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนการต่อขนานของขดลวดแต่ละขด ในกรณีนี้การเชื่อมต่อมอเตอร์แบบที่ 2 จะทำให้ได้มอเตอร์ 3 เฟส ที่ใช้กับแหล่งจ่ายไฟ 36 โวลต์

7. จำนวนตัวนำต่อสลิต จำนวนตัวนำมีผลต่อการสร้างแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กดังความสัมพันธ์ของสมการ 2-5 คือ ถ้ามีจำนวนตัวนำต่อสลิตมากจะทำให้แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กมากขึ้นตาม

8. เส้นผ่านศูนย์กลางลวด ขนาดของลวดมีผลต่อความหนาแน่นกระแสในขดลวดซึ่งหากมอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดใหญ่ ก็จะทำให้ความต้านทานในขดลวดลดลงมอเตอร์ก็จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

บทที่ 4

ขั้นตอนการดำเนินงาน

เมื่อได้ผลการคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ มิติหลักของสเตเตอร์และข้อมูลสำคัญเพื่อประกอบการพันมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทั้ง 2 แบบ ซึ่งผู้วิจัยได้แสดงขั้นตอนการคำนวณอย่างละเอียดไว้ในบทที่ 3 เมื่อได้ผลการคำนวณแล้วต่อไปจะเป็นการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ ตามที่ได้คำนวณไว้เพื่อทำการประกอบสเตเตอร์ สเตเตอร์ที่ประกอบเสร็จจะถูกนำมาพันขดลวด จากนั้นนำสเตเตอร์และโรเตอร์มาประกอบเข้าด้วยกันได้เป็นมอเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์ ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการทดสอบการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งการดำเนินงานออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับใช้ขับรถจักรยานนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลักๆ คือ

- ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ มิติหลักของสเตเตอร์และข้อมูลสำคัญเพื่อประกอบการพันมอเตอร์
- ขั้นตอนที่ 2 การสร้างชิ้นส่วนต่างๆ ของมอเตอร์ตามที่ได้คำนวณ
- ขั้นตอนที่ 3 การประกอบชิ้นส่วนสเตเตอร์ การพันขดลวดและการประกอบมอเตอร์
- ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบการทำงานของมอเตอร์

การออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทั้ง 2 แบบ มีขั้นตอนการคำนวณประกอบการออกแบบมอเตอร์ที่แตกต่างกัน เนื่องจากเป็นการถอดโรเตอร์จากมอเตอร์เก่ามาประยุกต์ใช้จึงมีข้อจำกัดในการออกแบบ แต่สำหรับขั้นตอนการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 2 แบบนั้นเหมือนกัน ดังนั้นเนื้อหาของบทนี้ผู้วิจัยจะขอเสนอขั้นตอนการดำเนินงานออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ (ขั้นตอนที่ 1-3) ของมอเตอร์แต่ละแบบแยกจากกัน ส่วนขั้นตอนการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ (ขั้นตอนที่ 4) ของมอเตอร์ทั้ง 2 แบบจะนำเสนอไปพร้อมกัน

4.1 การดำเนินงานออกแบบและสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ

4.1.1 มอเตอร์แบบที่ 1

สำหรับมอเตอร์แบบที่ 1 ผู้วิจัยได้นำมอเตอร์พัดลมเพดานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 56 inches ด้วยการถอดโรเตอร์ของมอเตอร์พัดลมเพดานมาประยุกต์ใช้ ดังรูปที่ 4-1 จากนั้นทำการออกแบบมอเตอร์ใหม่โดยให้สเตเตอร์อยู่ภายในและโรเตอร์อยู่ภายนอก ขั้นตอนการออกแบบและสร้างมอเตอร์แบบที่ 1 เป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ มิติหลักของสเตเตอร์และข้อมูลสำคัญเพื่อประกอบการพันมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณและอธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 โดยนำผลการคำนวณและข้อมูลจำเพาะต่างๆ ที่ได้มาใช้ประกอบการออกแบบสเตเตอร์ จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ ของมอเตอร์



รูปที่ 4-1 โรเตอร์ของมอเตอร์พัดลมเพดานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 56 inches

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างชิ้นส่วนต่างๆ ของมอเตอร์ตามที่ได้คำนวณ

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ ของมอเตอร์แบบที่ 1 เริ่มจากนำแผ่นเหล็กซิลิกอนที่มีความหนา 0.5 mm จำนวน 37 แผ่น มาใช้ในการสร้างสเตเตอร์โดยใช้มีดกลึงกัดเซาะร่องสเตเตอร์ตามที่ได้ออกแบบไว้

ขั้นตอนที่ 3 การประกอบชิ้นส่วนสเตเตอร์ การพันขดลวดและการประกอบมอเตอร์

ขั้นตอนนี้เป็นกรนำชิ้นส่วนต่างๆ ที่สร้างขึ้นมาประกอบเป็นสเตเตอร์ จากนั้นนำสเตเตอร์ที่ได้มาทำการพันขดลวด สำหรับมอเตอร์แบบที่ 1 มีรูปแบบการพันขดลวดแบบแลป 2 ชั้น โดยใช้

ลวดทองแดงเบอร์ 21 SWG (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8128 mm) พันได้ 30 รอบต่อขด มีการเชื่อม ต่อแบบอนุกรมสตาร์ และทำการเดินสาย Lead จำนวน 6 เส้น ผ่านช่องของเฟลา ดังรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-2 สเตเตอร์ 3 เฟส 54 สลิต 18 Pole และพันขดลวดแบบแลป 2 ชั้น

ต่อจากนั้นจะนำสเตเตอร์และโรเตอร์ที่ได้ประกอบเข้ากับโครงมอเตอร์ โดยที่โครงมอเตอร์นี้ได้ถูก สร้างขึ้นมาเฉพาะสำหรับการประกอบ ดังรูปที่ 4-3 จะเป็นมอเตอร์ 3 เฟส 18 Pole 54 สลิต ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้ว



รูปที่ 4-3 มอเตอร์ 3 เฟส 18 Pole 54 สลิต ต่อแบบอนุกรมสตาร์

4.1.2 มอเตอร์แบบที่ 2

สำหรับมอเตอร์แบบที่ 2 ผู้วิจัยได้นำเอาโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส 8 Pole ขนาด 0.5 hp มาประยุกต์ใช้ ดังรูปที่ 4-4 ซึ่งแสดงให้เห็นโรเตอร์ที่ได้ถอดออกมาจากมอเตอร์ 3 เฟสและมีพัดลมระบายความร้อนติดอยู่ที่ปลายเพลาด้านหนึ่งของโรเตอร์ การออกแบบมอเตอร์ในครั้งนี้จะให้สเตเตอร์อยู่ภายนอกและโรเตอร์อยู่ภายใน และเป็นมอเตอร์ที่มีการทดรอบ 4 : 1

ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ มิติหลักของสเตเตอร์และข้อมูลสำคัญเพื่อประกอบการพันมอเตอร์เหนี่ยวนำ

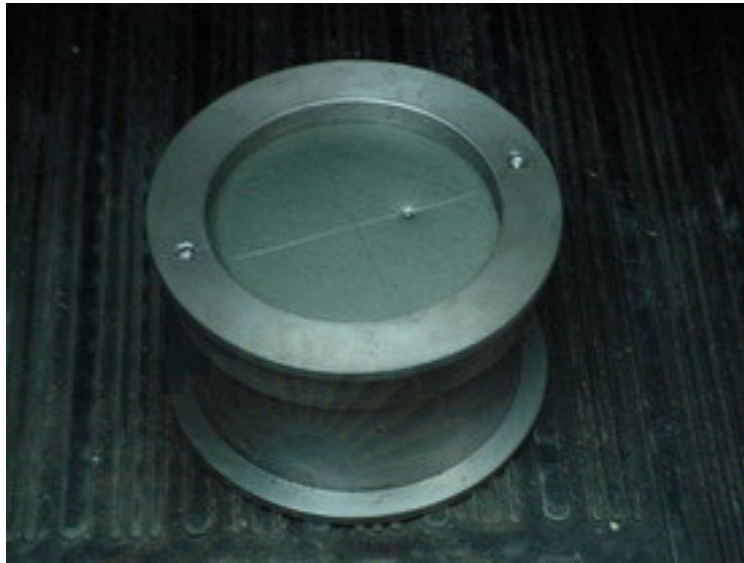
ขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณและอธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 โดยนำผลการคำนวณและข้อมูลจำเพาะต่างๆ ที่ได้มาใช้ประกอบการออกแบบสเตเตอร์ จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ ของมอเตอร์



รูปที่ 4-4 โรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส 8 Pole ขนาด 0.5 hp

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างชิ้นส่วนต่างๆ ของมอเตอร์ตามที่ได้คำนวณ

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ ของมอเตอร์แบบที่ 1 เริ่มจากนำแผ่นเหล็กซิลิกอนที่มีความหนา 0.5 mm จำนวน 118 แผ่น มาตัดเป็นวงกลมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 inches (เรียงซ้อนกันให้ได้ความหนา 59 mm) และนำแผ่นซิลิกอนมาวางซ้อนกันในตัวจับยึด (Jig) ที่ได้สร้างขึ้น ดังรูปที่ 4-5 จากนั้นนำชิ้นงานที่ถูกจับยึดมาเข้าเครื่อง Wire Cut จะได้ผลออกมาดังรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-5 แผ่นซิลิกอนที่วางอัดซ้อนในตัวจับยึด



รูปที่ 4-6 ชิ้นงานที่ผ่านการ Wire Cut

ขั้นตอนที่ 3 การประกอบชิ้นส่วนสเตเตอร์ การพันขดลวดและการประกอบมอเตอร์

ขั้นตอนนี้เป็น การนำชิ้นส่วนต่างๆ ที่สร้างขึ้นมาประกอบเป็นสเตเตอร์ จากนั้นนำสเตเตอร์ที่ได้มาทำการพันขดลวด สำหรับมอเตอร์แบบที่ 2 เมื่อผ่านกระบวนการ Wire Cut แล้ว ก็นำแผ่นสเตเตอร์ที่ได้มาทำการประกอบเข้ากับตัวเรือนมอเตอร์ที่ได้สร้างขึ้น ดังรูปที่ 4-7 มอเตอร์แบบที่ 2 มีรูปแบบการพันขดลวดแบบแลป 2 ชั้น ใช้ลวดทองแดงเบอร์ 25 SWG (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.508 mm) พันได้ 45 รอบต่อขด และเชื่อมต่อแบบ two parallel delta ดังรูปที่ 4-8



รูปที่ 4-7 แผ่นสเตเตอร์ที่อัดเข้ากับเรื่อนมอเตอร์



รูปที่ 4-8 มอเตอร์ 3 เฟส 8 Pole 24 สล็อต ต่อแบบ two parallel delta

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อได้มอเตอร์เหนี่ยวนำที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว ในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 2 แบบมาทำการทดสอบด้วยแท่นทดสอบแรงบิดที่ได้สร้างขึ้นมา จากนั้นทำการวัดและคำนวณค่าต่างๆ ดังนี้

- 1) แรงบิดของมอเตอร์ (Torque)
- 2) ความเร็วโรเตอร์ (Rotor speed)
- 3) กระแสเข้าสเตเตอร์ในแต่ละสาย (Stator Current)
- 4) ตัวประกอบกำลัง (Power factor)
- 5) ประสิทธิภาพมอเตอร์ (Efficiency)

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบการทำงานของมอเตอร์

ขั้นตอนการทดสอบนี้ทำโดยการปรับค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งในการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟนี้สามารถทำได้โดยใช้ Variable Voltage Transformer ชนิดปรับแรงดันแบบแกนหมุนแบบ 3 เฟส 50 Hz รุ่น KS-8 ดังรูปที่ 4-9 โดยให้การต่อเพื่อสตาร์ทใช้วิธีการต่อโดยตรง (DOL) ซึ่งในการต่อจะต่อจากแหล่งจ่ายไฟหลัก 380 V เข้ากับ Variable Voltage Transformer ดังรูปที่ 4-10 เพื่อปรับความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟที่ป้อนให้แก่มอเตอร์แต่ละแบบ มอเตอร์แบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟเท่ากับ 48 V และ 36 V ตามลำดับ



รูปที่ 4-9 Variable Voltage Transformer ชนิด 3 เฟส



รูปที่ 4-10 แสดงการต่อสายไฟจากแหล่งจ่ายไฟ 380 V เข้ากับ Variable Voltage Transformer และ DOL Starter

จากนั้นทำการวัดค่ากระแสแต่ละเฟส ตัวประกอบกำลังและกำลังไฟฟ้าเข้า โดยใช้วัตต์มิเตอร์ (Power meter) ยี่ห้อ CHAUVINS ARNOUX รุ่น C.A 8210 ดังรูปที่ 4-11 ทำการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบแบบแสง ยี่ห้อ MOVISTROB รุ่น Ministrob Series 2000 N โดยมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 2% ของค่าที่อ่านได้ ดังรูปที่ 4-12 และทำการวัดค่าแรงบิดจากแท่นทดสอบแรงบิดที่ได้ทำการสร้างขึ้นโดยเฉพาะซึ่งมีความละเอียดในการวัดเท่ากับ 0.01 kg การทดสอบโดยละเอียดจะกล่าวถึงในบทที่ 5

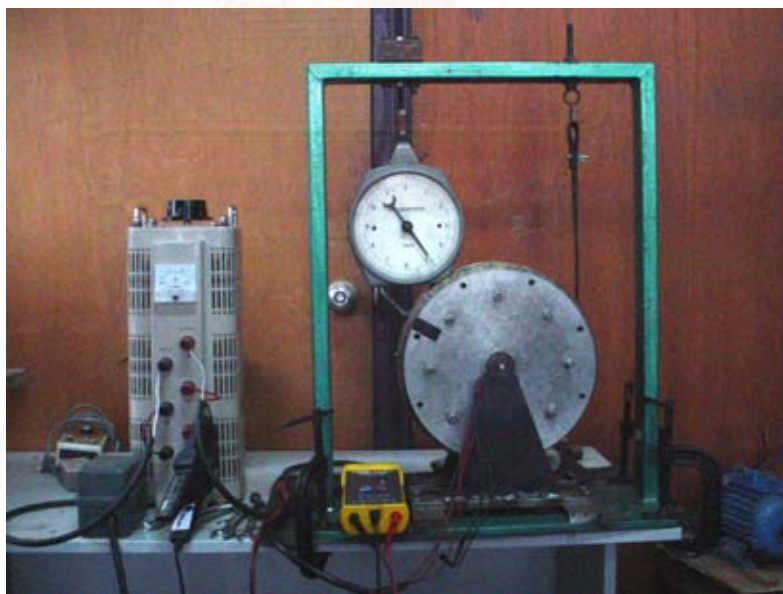


รูปที่ 4-11 วัตต์มิเตอร์



รูปที่ 4-12 แสดงเครื่องวัดความเร็วรอบแบบแสง

และเมื่อได้ค่าองค์ประกอบต่างๆ ที่ต้องการครบถ้วนแล้ว จากนั้นทำการพล็อตเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็ว ซึ่งทำให้สามารถบอกถึงช่วงการทำงานที่เหมาะสมของมอเตอร์ พล็อตเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาออกกับความเร็วและพล็อตเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเร็ว ซึ่งแสดงให้เห็นกระแสที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลดลงอันเนื่องมาจากโหลดมอเตอร์เพิ่มขึ้น ในรูปที่ 4-13 แสดงการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์ (มอเตอร์แบบที่ 1) และในรูปที่ 4-14 แสดงการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์ (มอเตอร์แบบที่ 2)



รูปที่ 4-13 แสดงการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบที่ 1



รูปที่ 4-14 แสดงการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบที่ 2

หลังจากทำการติดตั้งมอเตอร์ทั้ง 2 แบบ เพื่อทำการทดสอบแล้ว จากนั้นทำการวัดและคำนวณค่าต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย แรงบิดของมอเตอร์ ความเร็วโรเตอร์ กระแสเข้าสเตเตอร์ในแต่ละสาย ตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพมอเตอร์ โดยจะนำเสนอผลการทดสอบอย่างละเอียดในบทที่ 5 ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้เป็นกรนำเสนองถึงผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างไว้ 2 แบบ ผลที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์นี้ประกอบด้วย แรงบิดของมอเตอร์ ความเร็วโรเตอร์ กระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสาย ความต่างศักย์แหล่งจ่ายไฟ ตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพมอเตอร์ โดยผลจากการทดสอบดังกล่าวจะนำไปสู่การหาสมรรถนะของมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการขับเคลื่อนรถจักรยาน

จากที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้นว่าวิทยานิพนธ์นี้เป็นการสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถจักรยานซึ่งได้สร้างไว้ 2 แบบ โดยมอเตอร์แบบที่ 1 เป็นมอเตอร์ 18 Pole 54 สลิต ต่อแบบ Series star ส่วนมอเตอร์แบบที่ 2 เป็นมอเตอร์ 8 Pole 24 สลิต ต่อแบบ Two parallel delta เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่าย ดังนั้นในการนำเสนอจึงได้นำเสนอถึงขั้นตอนและผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในแต่ละแบบแยกออกจากกันและมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 มอเตอร์แบบที่ 1 (มอเตอร์ 3 เฟส 18 Pole 54 สลิต)

5.1.1 ขั้นตอนการทดสอบมอเตอร์แบบที่ 1

1. ทำการปรับค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟที่ 36 V (แบตเตอรี่ 3 ลูก) จากนั้นวัดความเร็วรอบของ โรเตอร์โดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบแบบแสง วัดค่ากระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสาย วัดกำลังขาเข้าและตัวประกอบกำลังโดยใช้ Power meter

2. ใส่โหลดให้แก่มอเตอร์ จากนั้นวัดค่ากระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสาย วัดความเร็วรอบของโรเตอร์ วัดกำลังขาเข้าและตัวประกอบกำลัง

3. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 โดยเพิ่มโหลดครั้งละ 0.43 kg จนกว่ามอเตอร์จะหยุดหมุน

4. ปรับค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟเป็น 48 V (แบตเตอรี่ 4 ลูก) และทำตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 3 ใหม่

5. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสายและความเร็วรอบ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาออกและความเร็วรอบ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของมอเตอร์และความเร็วรอบที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 36 V และ 48 V

5.1.2 การทดสอบมอเตอร์แบบที่ 1

สำหรับการทดสอบมอเตอร์แบบที่ 1 ทำโดยการปรับค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ เริ่มจาก 36 V และ 48 V ตามลำดับ ในการทดสอบของแต่ละค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ ทำการเพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์จนกว่ามอเตอร์หยุดหมุน และทุกๆ ครั้งที่ทำการเพิ่มโหลดจะต้องบันทึกค่าความเร็วของโรเตอร์ กระแสเข้าสเตเตอร์ ตัวประกอบกำลังและกำลังขาเข้า ซึ่งสามารถวัดได้จากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งทดสอบ จากนั้นนำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาค่าแรงบิด กำลังขาออก และประสิทธิภาพมอเตอร์

5.1.2.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ที่ค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 36 โวลต์

ผลการทดสอบมอเตอร์ กรณีความต่างศักย์ดังกล่าว ขณะไม่มีโหลด วัดค่ากำลังขาเข้าได้ 39.88 W และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.39 ส่วนผลการทดสอบในแต่ละครั้งจนกระทั่งมอเตอร์หยุดหมุน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 แสดงค่าแรงบิด ความเร็วรอบและกระแสเข้าสเตเตอร์ในแต่ละสาย ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 36 V (มอเตอร์แบบที่ 1)

ครั้งที่	แรงบิด (N-m)	ความเร็ว (rpm)	กระแสเข้าสเตเตอร์ ในแต่ละสาย (A)	ตัวประกอบกำลัง	กำลังขาเข้า (W)	กำลังขาออก (W)	ประสิทธิภาพ (%)
1	0	300	1.64	0.39	39.88	0.00	0.00
2	0.5	250	1.65	0.42	43.21	13.09	30.29
3	1	200	1.68	0.49	51.33	20.94	40.80
4	1.5	0	3.7	0.55	126.89	0.00	0.00

5.1.2.2 ผลการทดสอบมอเตอร์ที่ค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 48 โวลต์

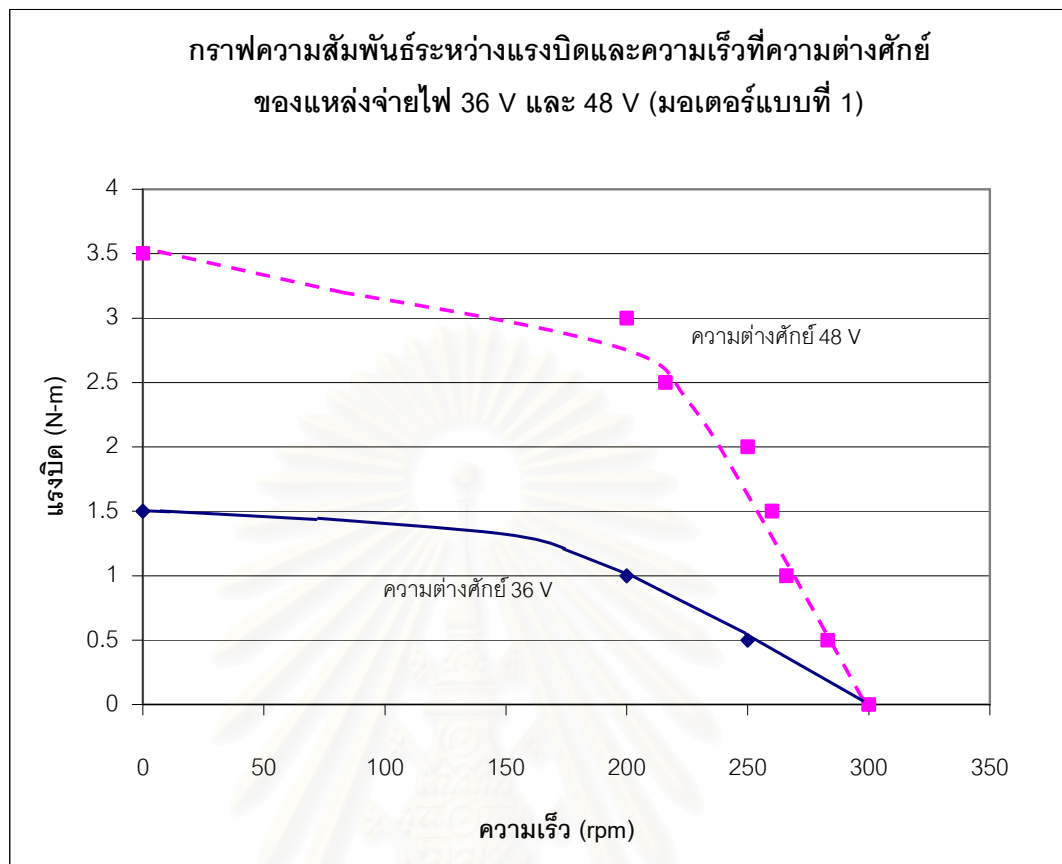
ผลการทดสอบมอเตอร์ กรณีความต่างศักย์ดังกล่าว ขณะไม่มีโหลด วัดค่ากำลังขาเข้าได้ 86.05 W และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.45 ส่วนผลการทดสอบในแต่ละครั้งจนกระทั่งมอเตอร์หยุดหมุน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 แสดงค่าแรงบิด ความเร็วรอบและกระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสาย ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 48 V (มอเตอร์แบบที่ 1)

ครั้งที่	แรงบิด (N-m)	ความเร็ว (rpm)	กระแสเข้าสแตเตอร์ ในแต่ละสาย (A)	ตัวประกอบกำลัง	กำลังขาเข้า (W)	กำลังขาออก (W)	ประสิทธิภาพ (%)
1	0	300	2.3	0.45	86.05	0.00	0.00
2	0.5	283	2.32	0.47	90.65	14.82	16.34
3	1	266	2.35	0.50	97.69	27.85	28.51
4	1.5	260	2.37	0.55	108.37	40.83	37.68
5	2	250	2.39	0.59	117.23	52.35	44.65
6	2.5	216	2.4	0.62	123.71	56.54	45.70
7	3	200	2.45	0.66	134.43	62.82	46.73
8	3.5	0	5.7	0.72	341.20	0.00	0.00

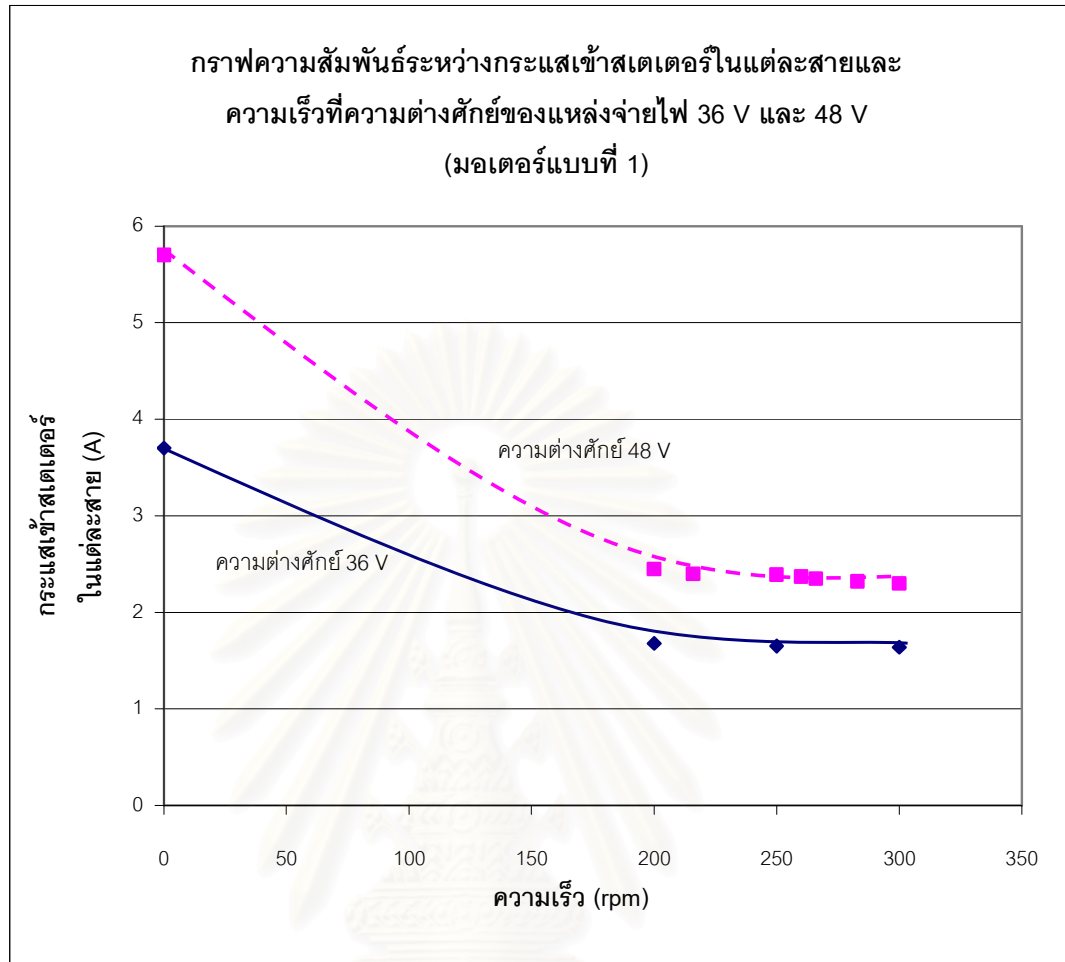
จากตารางในข้างต้นสามารถพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบ ดังรูปที่ 5-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสายและความเร็วรอบ ดังรูปที่ 5-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาออกและความเร็วรอบ ดังรูปที่ 5-3 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบ ดังรูปที่ 5-4 เพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของมอเตอร์แบบที่ 1 ที่ค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 36 V และ 48 V

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



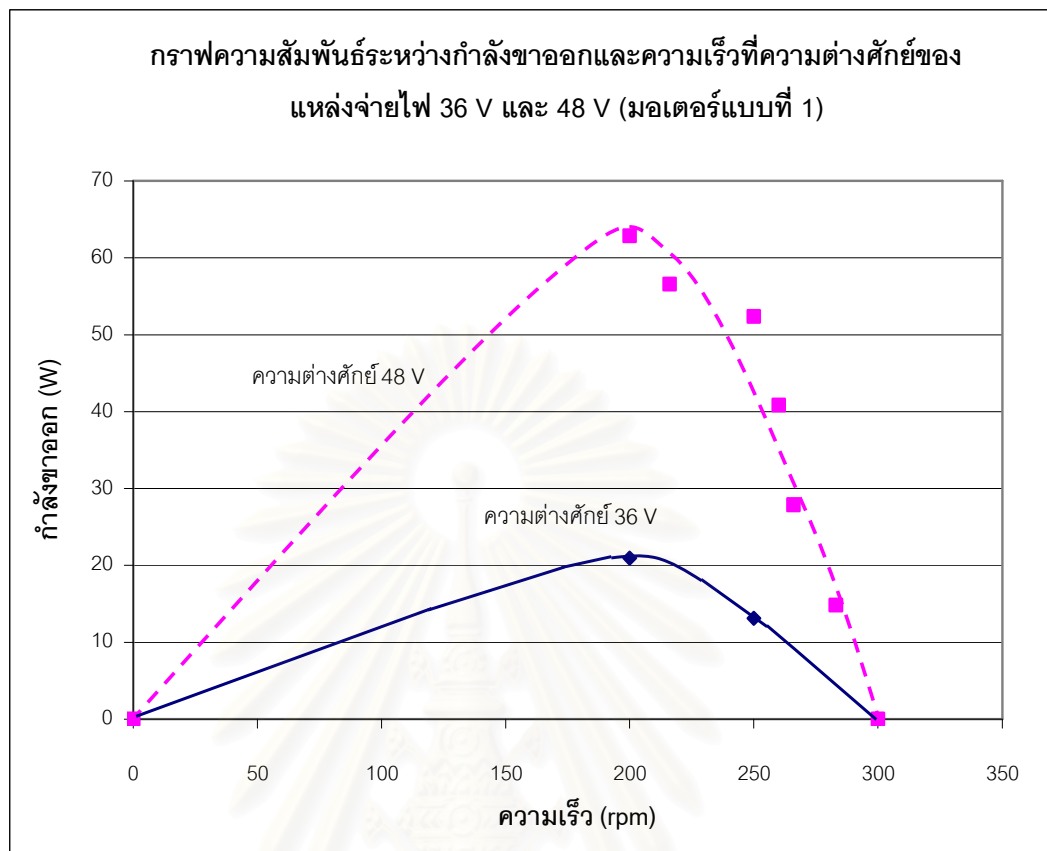
รูปที่ 5-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ
36 V และ 48 V (มอเตอร์แบบที่ 1)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



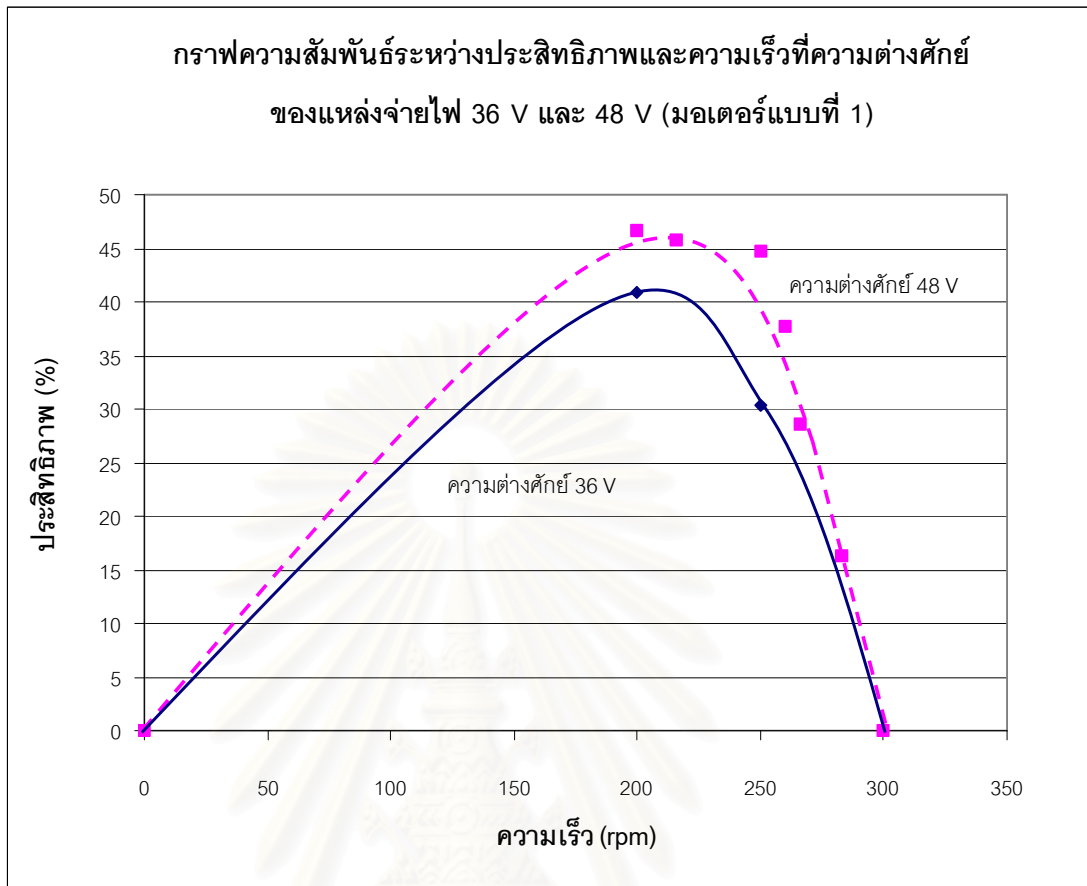
รูปที่ 5-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสายและความเร็วที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 36 V และ 48 V (มอเตอร์แบบที่ 1)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาออกและความเร็ว ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 36 V และ 48 V (มอเตอร์แบบที่ 1)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็ว ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 36 V และ 48 V (มอเตอร์แบบที่ 1)

5.2 มอเตอร์แบบที่ 2 (มอเตอร์ 3 เฟส 8 Pole 24 สล็อต)

5.2.1 ขั้นตอนการทดสอบมอเตอร์แบบที่ 2

1. ทำการปรับค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟที่ 24 V (แบตเตอรี่ 2 ลูก) จากนั้นวัดความเร็วรอบของโรเตอร์โดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบแบบแสง วัดค่ากระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสาย วัดกำลังขาเข้าและตัวประกอบกำลังโดยใช้ Power meter
2. ใส่โหลดให้แก่มอเตอร์ จากนั้นวัดค่ากระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสาย วัดความเร็วรอบของโรเตอร์ วัดกำลังขาเข้าและตัวประกอบกำลัง
3. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 โดยเพิ่มโหลดครั้งละ 0.43 kg จนกว่ามอเตอร์จะหยุดหมุน
4. ปรับค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟเป็น 36 V (แบตเตอรี่ 3 ลูก) และทำตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 3 ใหม่
5. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

กระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสายและความเร็วรอบ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาออกและความเร็วรอบ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของมอเตอร์และความเร็วรอบที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 24 V และ 36 V

5.2.2 การทดสอบมอเตอร์แบบที่ 2

สำหรับการทดสอบมอเตอร์แบบที่ 2 ทำโดยการปรับค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟเริ่มจาก 24 V และ 36 V ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานเป็นเช่นเดียวกับการทดสอบมอเตอร์แบบที่ 1

5.2.2.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ที่ค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 24 V

ผลการทดสอบมอเตอร์ กรณีความต่างศักย์ดังกล่าว ขณะไม่มีโหลด วัดค่ากำลังขาเข้าได้ 113.77 W และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.35 ส่วนผลการทดสอบในแต่ละครั้งจนกระทั่งมอเตอร์หยุดหมุน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-3 แสดงค่าแรงบิด ความเร็วรอบและกระแสเข้าสแตเตอร์ในแต่ละสาย ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 24 โวลต์ (มอเตอร์แบบที่ 2)

ครั้งที่	แรงบิด (N-m)	ความเร็ว (rpm)	กระแสเข้าสแตเตอร์ ในแต่ละสาย (A)	ตัวประกอบกำลัง	กำลังขาเข้า (W)	กำลังขาออก (W)	ประสิทธิภาพ (%)
1	0	725	7.82	0.35	113.77	0.00	0.00
2	0.27	633	8.01	0.42	139.84	17.89	12.80
3	0.54	600	8.19	0.46	156.60	33.92	21.66
4	0.81	583	8.14	0.50	169.18	49.44	29.22
5	1.08	550	8.3	0.54	186.31	62.19	33.38
6	1.35	533	8.61	0.59	211.16	75.34	35.68
7	1.63	466	9.09	0.64	241.83	79.53	32.89
8	1.9	0	15	0.68	423.99	0.00	0.00

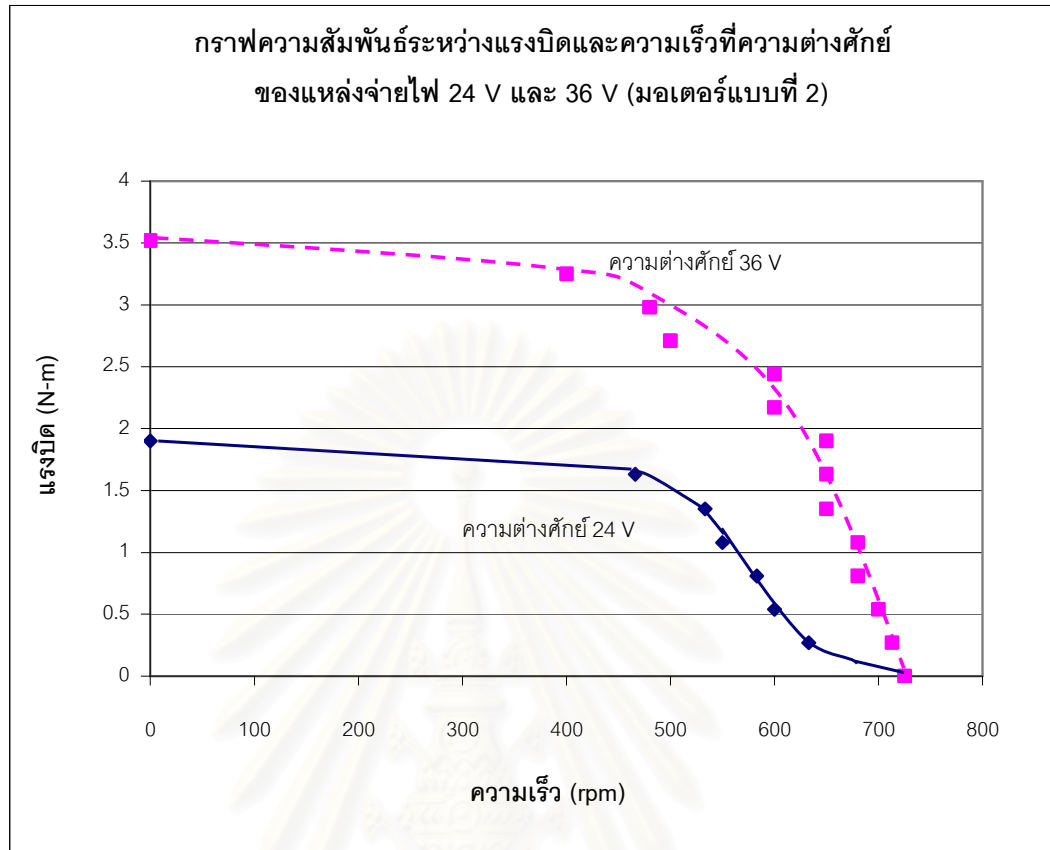
5.2.2.2 ผลการทดสอบมอเตอร์ที่ค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 36 V

ผลการทดสอบมอเตอร์ กรณีความความต่างศักย์ดังกล่าว ขณะไม่มีโหลด วัดค่ากำลังขาเข้าได้ 291.81 W และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.39 ส่วนผลการทดสอบในแต่ละครั้งจนกระทั่งมอเตอร์หยุดหมุน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5-4

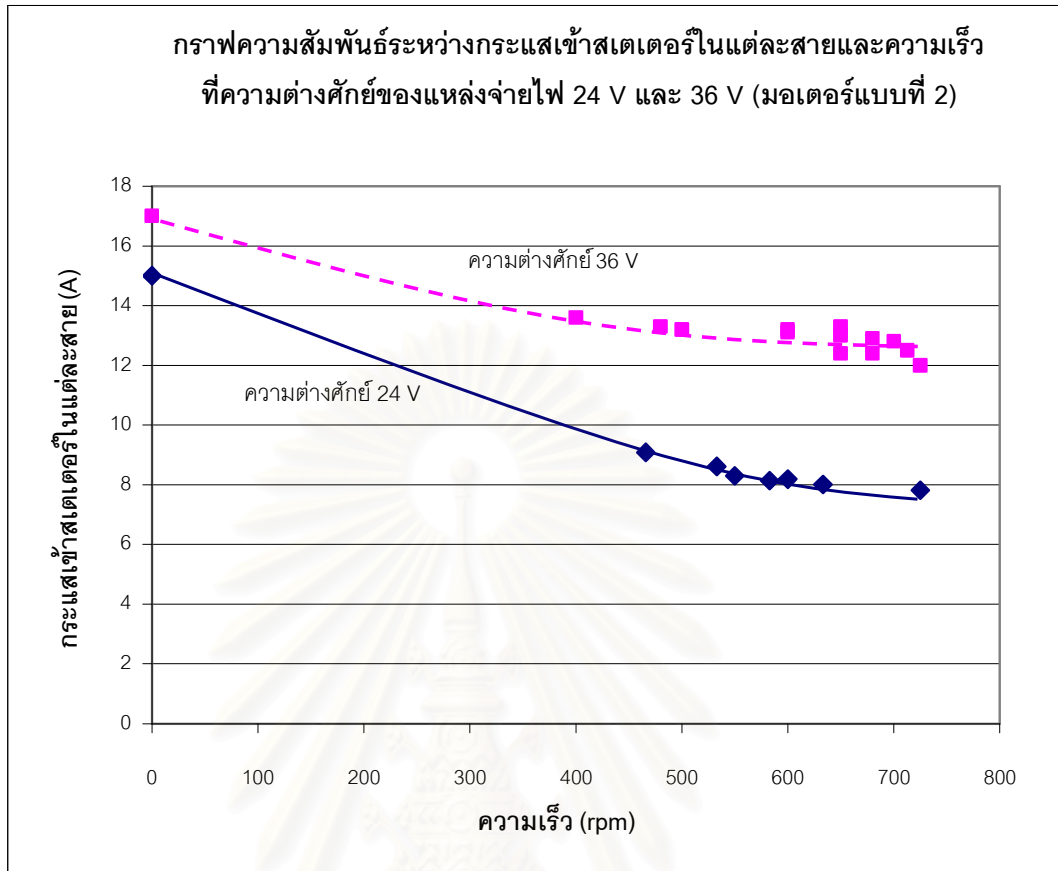
ตารางที่ 5-4 แสดงค่าแรงบิด ความเร็วรอบและกระแสเข้าสเตเตอร์ในแต่ละสาย ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 36 V (มอเตอร์แบบที่ 2)

ครั้งที่	แรงบิด (N-m)	ความเร็ว (rpm)	กระแสเข้าสเตเตอร์ ในแต่ละสาย (A)	ตัวประกอบกำลัง	กำลังขาเข้า (W)	กำลังขาออก (W)	ประสิทธิภาพ (%)
1	0	725	12	0.39	291.81	0.00	0.00
2	0.27	713	12.5	0.42	327.35	20.16	6.16
3	0.54	700	12.8	0.43	343.19	39.58	11.53
4	0.81	680	12.4	0.45	347.92	57.67	16.58
5	1.08	680	12.9	0.45	361.95	76.89	21.24
6	1.35	650	12.4	0.49	378.85	91.87	24.25
7	1.63	650	13	0.49	397.18	110.93	27.93
8	1.9	650	13.3	0.53	439.52	129.30	29.42
9	2.17	600	13.1	0.55	449.25	136.32	30.34
10	2.44	600	13.2	0.59	485.60	153.28	31.57
11	2.71	500	13.2	0.62	510.29	141.87	27.80
12	2.98	480	13.3	0.66	547.33	149.76	27.36
13	3.25	400	13.6	0.69	585.11	136.11	23.26
14	3.52	0	17	0.73	773.79	0.00	0.00

จากตารางในข้างต้นสามารถพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิด ดังรูปที่ 5-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเข้าสเตเตอร์ในแต่ละสายและความเร็วรอบ ดังรูปที่ 5-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาออกและความเร็วรอบ ดังรูปที่ 5-7 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบ ดังรูปที่ 5-8 เพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของมอเตอร์แบบที่ 2 ที่ค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 24 V และ 36 V

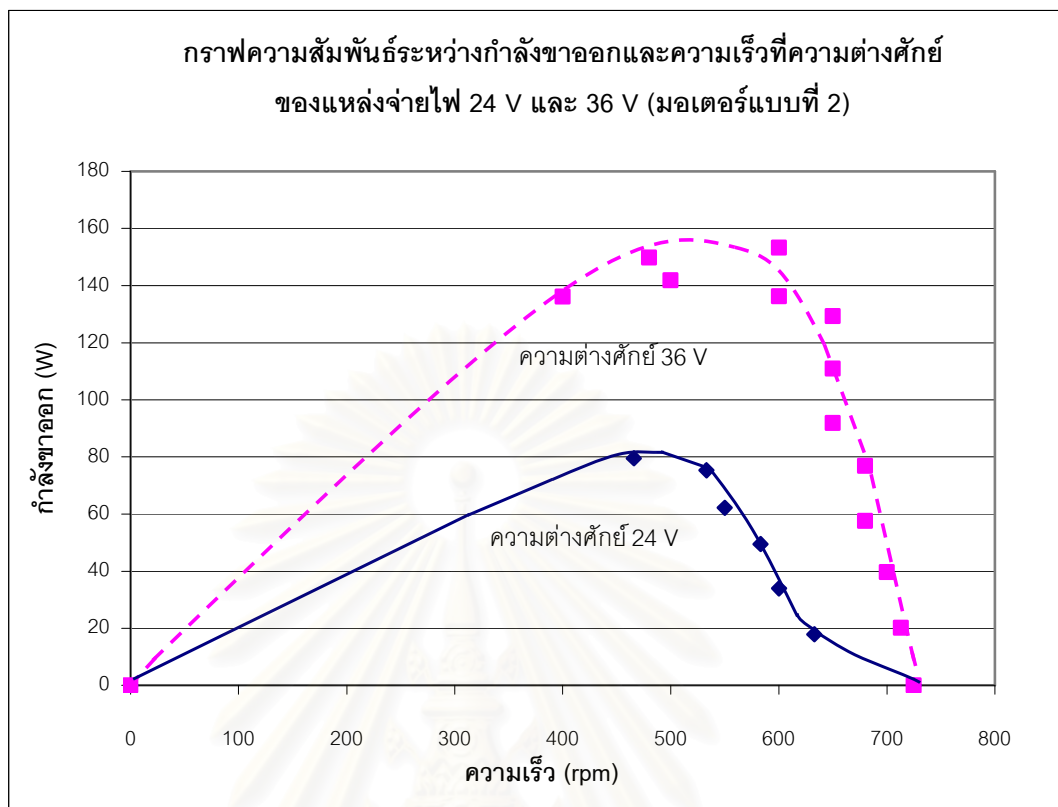


รูปที่ 5-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบ ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 24 V และ 36 V (มอเตอร์แบบที่ 2)



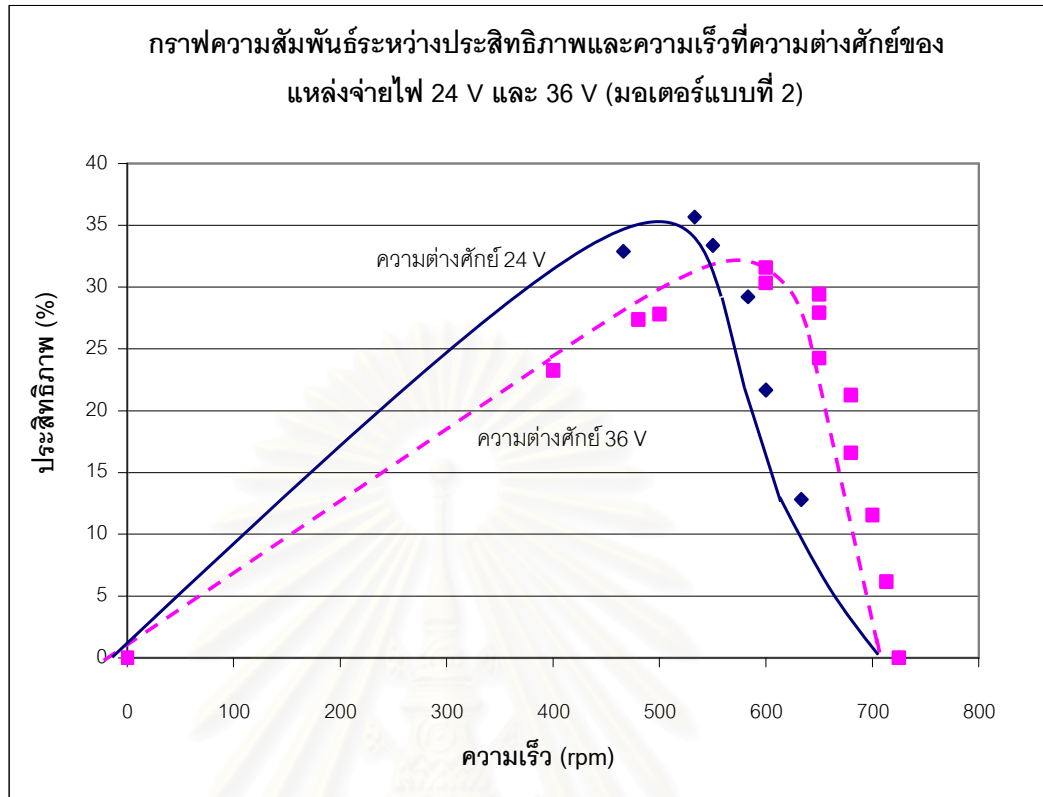
รูปที่ 5-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเข้าสเตเตอร์ในแต่ละสายและความเร็วรอบ
ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 24 V และ 36 V (มอเตอร์แบบที่ 2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาออกและความเร็วรอบ ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 24 V และ 36 V (มอเตอร์แบบที่ 2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบ ที่ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟ 24 V และ 36 V (มอเตอร์แบบที่ 2)

5.3 สรุปผลการทดสอบมอเตอร์

ผลการทดสอบมอเตอร์นี้จะเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้เลือกมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับขับเคลื่อนรถจักรยานและนำมาติดตั้งกับรถจักรยาน โดยจะทำการวิเคราะห์ผลทางด้านแรงบิด ความเร็วมอเตอร์ ประสิทธิภาพมอเตอร์ และลักษณะทางกลทั่วไป จากผลการทดสอบมอเตอร์แบบที่ 1 และมอเตอร์แบบที่ 2 สามารถสรุปออกมาได้ดังนี้

มอเตอร์แบบที่ 1 เป็นมอเตอร์ 3 เฟส 18 Pole 54 สล็อต ต่อแบบ Series star

จากผลการทดสอบมอเตอร์ที่ความต่างศักย์ 36 V

Pull-out torque = 1.5 N-m

Locked rotor current = 3.7 A

อุณหภูมิขณะ locked rotor = 40 °C

จากผลการทดสอบมอเตอร์ที่ความต่างศักย์ 48 V

Pull-out torque = 3.5 N-m

Locked rotor current = 5.7 A

อุณหภูมิขณะ locked rotor = 61 °C

มอเตอร์แบบที่ 2 เป็นมอเตอร์ 3 เฟส 8 Pole 24 สล็อต ต่อแบบ Two parallel delta

จากผลการทดสอบมอเตอร์ที่ความต่างศักย์ 24 V

Pull-out torque = 1.9 N-m

Locked rotor current = 15 A

อุณหภูมิขณะ locked rotor = 60 °C

จากผลการทดสอบมอเตอร์ที่ความต่างศักย์ 36 V

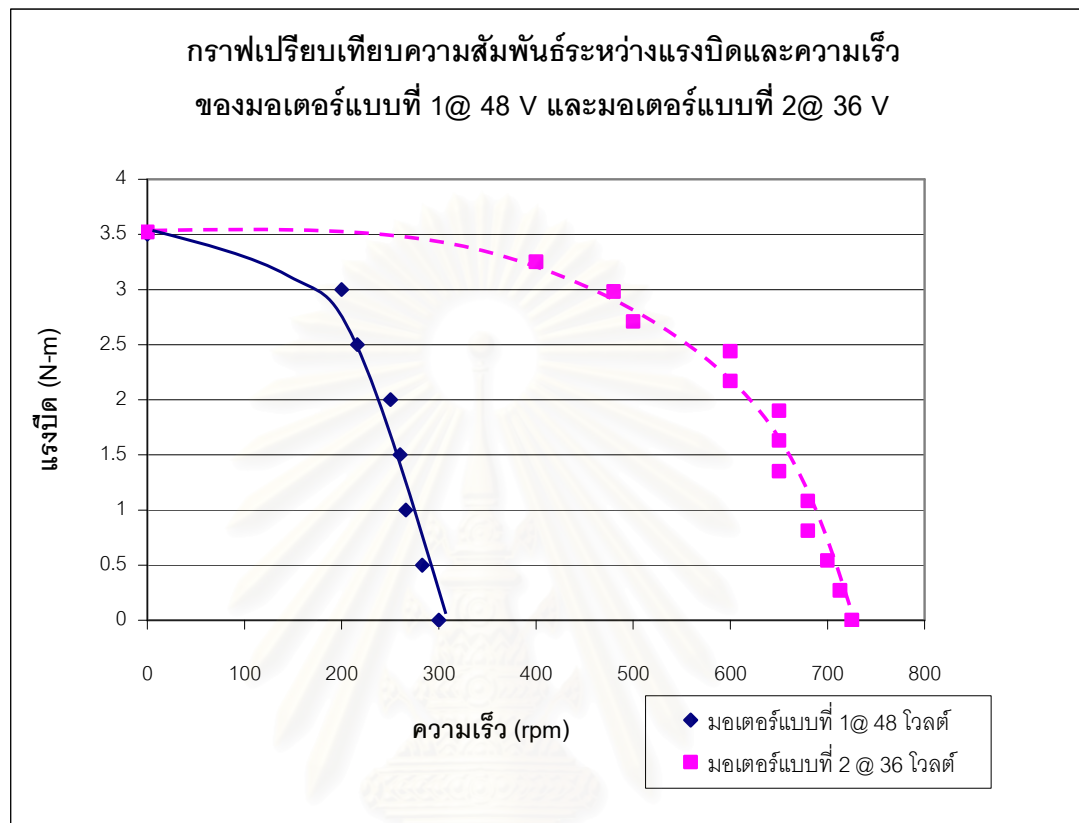
Pull-out torque = 3.5 N-m

Locked rotor current = 17 A

อุณหภูมิขณะ locked rotor = 92 °C

จากผลการทดสอบมอเตอร์แบบที่ 1 และแบบที่ 2 ถ้าทดสอบโดยเพิ่มความต่างศักย์ให้สูงเกินกว่าความต่างศักย์ที่ได้ออกแบบไว้ (มอเตอร์แบบที่ 1 ออกแบบไว้ที่ 48 V, มอเตอร์แบบที่ 2 ออกแบบไว้ที่ 36 V) มอเตอร์จะร้อนมาก ซึ่งอาจทำให้มอเตอร์ไหม้ได้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟเพียง 2 ค่าเท่านั้น จากนั้นจะแสดงผลการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ทั้ง 2 แบบที่ความต่างศักย์ที่ได้ออกแบบไว้

ผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติมอเตอร์แบบที่ 1 ที่ค่าความต่างศักย์ 48 V และมอเตอร์แบบที่ 2 ที่ค่าความต่างศักย์ 36 V แสดงได้ดังรูปที่ 5-9



รูปที่ 5-9 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์แบบที่ 1 ค่าความต่างศักย์ 48 V และมอเตอร์แบบที่ 2 ค่าความต่างศักย์ 36 V

มอเตอร์ที่ได้สร้างขึ้นนี้มีประสิทธิภาพต่ำ ทำให้มี Pull-out torque เพียง 3.5 N-m ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้กำหนดให้ค่าแรงบิดพิกัดของมอเตอร์เท่ากับ 1.27 N-m (36.36% ของ Pull-out torque สำหรับ NEMA Design D [8]) การเปรียบเทียบคุณสมบัติของมอเตอร์แบบที่ 1 และมอเตอร์แบบที่ 2 เมื่อแรงบิดที่จ่ายออกมาที่เพลาเท่ากับ 1.27 N-m แสดงดังตารางที่ 5-5

ตารางที่ 5-5 เปรียบเทียบคุณสมบัติของมอเตอร์แบบที่ 1 และมอเตอร์แบบที่ 2 เมื่อแรงบิดที่จ่ายออกมาที่เพลาท่ากับ 1.27 N-m

แรงบิดที่จ่ายออกมาที่เพลาท่ากับ 1.27 N-m	มอเตอร์แบบที่ 1 @ 48 โวลต์ 8 Pole 54 สล็อต	มอเตอร์แบบที่ 2 @ 36 โวลต์ 8 Pole 24 สล็อต
กระแสเข้าสเตเตอร์ในแต่ละสาย (A)	2.36	12.86
กำลังเข้าสเตเตอร์ทั้งหมด (W)	103.46	373.84
กำลังงานสูญเสียทั้งหมด (W)	68.6	286.41
กำลังขาออกที่เพล่า (W)	34.86	87.43
ประสิทธิภาพ (%)	33.46	23.36
ตัวประกอบกำลัง	0.53	0.48
ความเร็วที่เพล่าของมอเตอร์ (rpm)	262.76	658.89
สลิป	0.21	0.12

ในส่วนของการวิเคราะห์ผลการทดสอบมอเตอร์เพื่อนำไปใช้ติดตั้งกับรถจักรยาน
ข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงและออกแบบ และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไปใน
อนาคต จะนำเสนอไว้ในบทที่ 6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

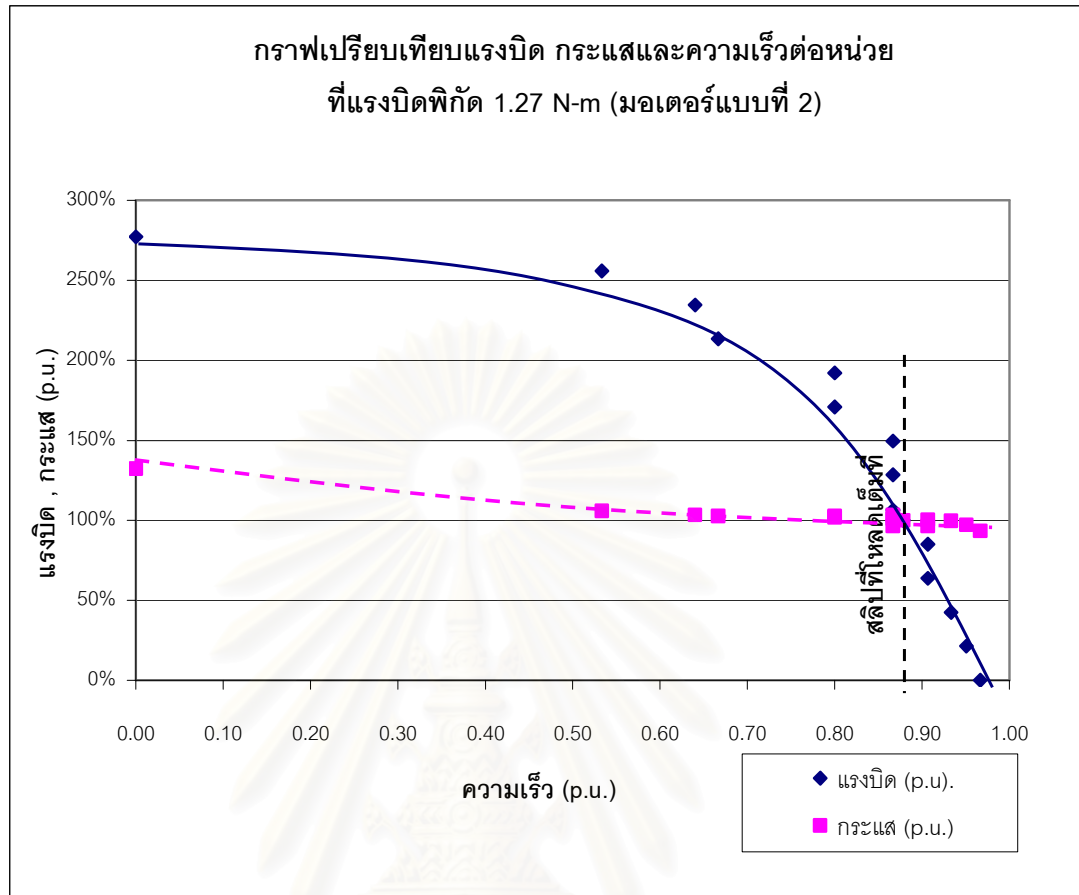
บทที่ 6

วิเคราะห์ผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

6.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการสร้างมอเตอร์ทั้ง 2 แบบนี้ ตามความเป็นจริงแล้วมอเตอร์ที่สร้างขึ้นทั้ง 2 แบบ ยังสามารถให้ Pull-out torque ได้ถึง 3.5 N-m อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วก็ไม่นิยมที่จะให้ค่า พิกัดของมอเตอร์มีค่าเท่ากับค่า Pull-out torque ดังนั้นจึงได้ตั้งค่าพิกัดไว้เพียงที่แรงบิดออกมาที่ เพลา 1.27 N-m ซึ่งจะทำให้มอเตอร์แบบที่ 1 และมอเตอร์แบบที่ 2 มีกำลังพิกัดเท่ากับ 34.86 และ 87.43 W ตามลำดับ และมีกระแสไหลเข้าสเตเตอร์ในแต่ละสายเท่ากับ 2.36 A และ 12.86 A ตามลำดับ ซึ่งไหลผ่านลวดทองแดงเบอร์ 21 SWG และ 25 SWG ตามลำดับ ขนาดลวดของ มอเตอร์แบบที่ 1 มีความหนาแน่นกระแส 4.55 A/mm² ส่วนลวดของมอเตอร์แบบที่ 2 มีความหนาแน่นกระแส 18.3 A/mm² ประสิทธิภาพพิกัดของมอเตอร์แบบที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับร้อยละ 33.46 และ 23.36 ตามลำดับ สำหรับกำลังพิกัดและประสิทธิภาพพิกัดที่มีค่าน้อยกว่าค่าที่ออกแบบเป็น ผลมาจากจำนวนรอบขดลวดที่น้อยและระยะช่องอากาศที่มากกว่าที่ได้ออกแบบ (รายละเอียดใน ภาคผนวก ง) จากรูปที่ 5-9 จะเห็นได้ว่า Pull-out torque ที่มอเตอร์ทั้ง 2 แบบมีค่าเท่ากัน (3.5 N-m) แต่ความเร็วของมอเตอร์แบบที่ 2 มากกว่า และจากตารางที่ 5-5 จะแสดงถึงคุณสมบัติของมอเตอร์ทั้ง 2 แบบ เมื่อแรงบิดที่จ่ายออกมาที่เพลาเท่ากับ 1.27 N-m แต่เนื่องจาก มอเตอร์แบบที่ 1 มีแรงบิดพิกัดไม่เพียงพอที่จะเอาชนะแรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทานการกลิ้งซึ่งมี ค่าเท่ากับ 2.55 N-m ตามข้อกำหนดในเบื้องต้น อีกทั้งยังมีการระบายความร้อนที่ไม่ดี ผู้วิจัยจึงได้ ออกแบบและสร้างมอเตอร์แบบที่ 2 โดยกำหนดให้มีการทดรอบ 4 :1 และได้นำมอเตอร์ที่สร้างขึ้น ในครั้งที่ 2 มาติดตั้งกับรถจักรยาน และเมื่อทำการเปรียบเทียบแรงบิด กระแสและความเร็วต่อ หน่วยของค่าพิกัดจะแสดงได้ดังรูปที่ 6-1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6-1 กราฟเปรียบเทียบแรงบิด กระแสและความเร็วต่อหน่วยที่แรงบิดพิกัด 1.27 N-m (มอเตอร์แบบที่ 2)

จากรูปที่ 6-1 Pull-out torque เท่ากับ Starting torque มีค่าเท่ากับ 2.77 เท่าของแรงบิดพิกัด Starting current มีค่าเท่ากับ 1.32 เท่าของกระแสพิกัด และความเร็วพิกัด มีค่าเท่ากับ 0.88 เท่าของความเร็วซึ่งโครนัส

เมื่อทำการทดสอบมอเตอร์ด้วยอัตราทด 4:1 จึงทำให้ความเร็วโรเตอร์ขณะไม่มีโหลดลดลงเหลือเพียง 181.25 rpm และมีความเร็วโรเตอร์ที่ค่าพิกัดเท่ากับ 164.72 rpm ทำให้แรงบิดที่ล้อยรถมากกว่าแรงบิดพิกัดของมอเตอร์ถึง 4 เท่า (5.08 N-m) ดังนั้นความเร็วรถสูงสุดขณะไม่มีโหลดเท่ากับ 17 km/hr และความเร็วรถที่ค่าพิกัดมอเตอร์เท่ากับ 15.52 km/hr ซึ่งผู้วิจัยได้นำมอเตอร์แบบที่ 2 มาติดตั้งกับรถจักรยานเพื่อทำการทดสอบการขับเคลื่อนรถจักรยาน ดังรูปที่ 6-2



รูปที่ 6-2 แสดงการติดตั้งมอเตอร์กับจักรยาน 3 ล้อ

เมื่อติดตั้งมอเตอร์กับรถจักรยานเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงได้ทำการทดลองขับเคลื่อนจริง โดยรถจักรยานมีน้ำหนักรวมเท่ากับ 90 kg และวัดความเร็วรถจักรยานที่วิ่งได้เป็น 13 km/hr และสามารถวิ่งบนพื้นเอียง 20° ที่ความเร็ว 7 km/hr

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงและออกแบบ

การปรับปรุงคุณภาพของมอเตอร์ เพื่อให้มีความสูญเสียจากส่วนต่างๆ ลดลง สามารถทำได้โดยปรับปรุงในส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ปรับปรุงคุณภาพของแกนเหล็กมอเตอร์ โดยทั่วไปจะใช้เหล็กแผ่นที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนต่ำ (low carbon laminated steel) สำหรับตัวแกนเหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งแกนเหล็กดังกล่าวมีค่าความสูญเสียสูงแต่ในมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงจะใช้แผ่นเหล็กซิลิกอนคุณภาพสูง (high grade silicon steel) ซึ่งมีค่าความสูญเสียลดลง
2. ใช้แผ่นเหล็กที่บางกว่า การลดความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็กทั้งในสเตเตอร์และโรเตอร์จะช่วยลดการสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy current loss)
3. ลดช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ การลดช่องอากาศที่เป็นทางเดินของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์จะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านช่องอากาศมาถึง

โรเตอร์มีความเข้มสูงขึ้น ลดปริมาณสนามแม่เหล็กรั่ว ทำให้มอเตอร์กินพลังงานไฟฟ้าลดลงเพื่อผลิตแรงบิดเท่าเดิมและยังลดความสูญเสียจากภาระการใช้งานด้วย

4. เพิ่มขนาดของตัวนำในมอเตอร์ โดยทั่วไปจะใช้ลวดทองแดงที่มีขนาดพอดีกับกระแสสูงสุดที่เกิดจากโหลดของมอเตอร์ แต่ในมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงจะใช้ลวดทองแดงในสเตเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อลดความต้านทานในขดลวด ส่วนในโรเตอร์จะมีการออกแบบให้ตัวนำในโรเตอร์และแหวนลัดวงจรมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อลดความต้านทานเช่นกัน

5. ออกแบบร่องสลีตใหม่และทำให้แกนเหล็กที่สเตเตอร์ยาวขึ้น เพื่อสามารถรองรับลวดทองแดงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และลดความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก โดยแกนเหล็กที่ยาวขึ้นจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ส่งผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและยังส่งผลต่อตัวประกอบกำลัง (Power factor) ที่ดีขึ้นด้วย

6.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไปในอนาคต

การนำโรเตอร์จากมอเตอร์ตัวอื่นมาดัดแปลงเพื่อสร้างมอเตอร์นั้น ทำให้เห็นว่าข้อจำกัดในการออกแบบเรื่องขนาดของสเตเตอร์และขนาดของร่องสลีตถูกจำกัดไปด้วย เมื่อความกว้างของร่องสลีตน้อย ก็จะทำให้บรรจุลวดได้น้อยและเส้นผ่านศูนย์กลางลวดต้องไม่ใหญ่มากนัก เพราะถ้าใหญ่เกินไปก็จะทำให้ลงขดลวดได้ยาก แต่ถ้าใช้สเตเตอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ก็จะสามารถออกแบบร่องสลีตได้กว้างขึ้น ใส่ลวดได้มากและยังออกแบบให้เส้นผ่านศูนย์กลางลวดใหญ่ขึ้นได้ ควรขยายความยาวของแกนสเตเตอร์เพื่อลดความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและลดช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์เพื่อให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านช่องอากาศมาถึงโรเตอร์มีความเข้มสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้มอเตอร์ที่ออกแบบนี้มีประสิทธิภาพดีขึ้นอย่างแน่นอน

รายการอ้างอิง

1. รศ.ดร.อภิชาติ เทอดโยธิน. 2541. มอเตอร์ (Motor). เอกสารเผยแพร่ ชุดประสิทธิภาพการใช้พลังงาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักกำกับและอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
2. ศิวะ หงษ์นภา. 2541. การหาขนาดมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนรถไฟ. Industrial Technology Review 9.
3. M.H.Hopkins and H.Richard Skutt. 1972. Introduction to electrical engineering. 1st ed. New York : Ronald Press
4. Theodore Wildi. 2002. Electrical machines, drives, and power systems. 5th ed. Columbus, Ohio : Prentice Hall
5. ปัญญา ยอดโอวาท. 2547. อนุกรมเครื่องกลไฟฟ้า เล่ม 2 เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพ
6. พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ และมาบุญชี มาการิชาวา. 2533. เทคนิคการซ่อมแซม เลือกระเบิดและติดตั้ง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น
7. Austin Hughes.1993. Electric Motors and Drives (Fundamentals Types and applications). 2nded. Great Britain : British Library Cataloguing in Publication Data
8. Iron Boldea and Syed A.Nasar. 2001. The Induction Machine Handbook. 1st ed. The United States of America : Library of Congress Cataloging in Publication Data
9. M.G. Say. 1983. Alternation current machines. 5thed. London : Pitman
10. Jimmie J. Cathey. 2001. Electric machines (analysis and design applying Matlab). Boston : McGraw-Hill international ed.
11. Richard T. Smith. 1982. Analysis of electrical machines. 1sted. New York : Pergamon
12. Alexander S. Langsdoff. Theory of Alternating Current Machinery. 2nded. Tokyo : Mc.Graw-Hill Book ., Kogakusha, n.d.
13. Puchstein, Lloyd and Conrad. Alternating Current Machines. 3rded. Wley, Tuttle, n.d.
14. Robert Rosenberg and August Hand. 1987. Electric Motor Repair. 3rded. New York : Holt, Rinchart and Winston.
15. E.Openshaw Taylor. 1958. The Performance and design of A.C. Commutator motors. 1sted. The United States of America : STR ISSAC Pitman and Sons.

16. H.Hopwood. 1950. Alternating-Current Motor Windings (Covering the design and manufacture of windings for all type of A.C. motors, frequency changer, booster and converters). 1st ed. D.B.Taraporevala Sons and Co. Private.,
17. John E. Traister . 1986. Complete handbook of electric motor controls . 1st ed. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall
18. Robert I. Lawrie. 1987. Electric Motor manual. The United States of America : Mc.Graw-Hill Book .
19. Alfred Still and Charles S. Siskind. 1954. Elements of Electrical Machine Design. 3rded. The United States of America : McGraw-Hill Book
20. วิศิษฐ์ ชัยสุวรรณ. 2521. การออกแบบและสร้างขดลวดสเตเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส แบบเปลี่ยนอัตราส่วนความเร็ว 4 ต่อ 6 โดยใช้ขดลวดสเตเตอร์ชุดเดียว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
21. จำรูญ ตันติพิศาลกุล. 2542. การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล 2. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร : ว.เพ็ชรสกุล.
22. สุนันท์ ศรีถนนิตย์. 2538. การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer). พิมพ์ครั้งที่ 5 กรุงเทพมหานคร: งานเอกสารและการพิมพ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก-1 ตารางการใช้ลวด

(1) ลวด เบอร์	(2) เส้นผ่าน ศูนย์กลาง	(3) พื้นที่หน้า ตัด	ความหนาแน่นของกระแส (Current Design) แอมแปร์ต่อตารางนิ้ว					
			(4) 2000 A	(5) 2500 A	(6) 3000 A	(7) 3500 A	(8) 4000 A	(9) 4500 A
swg	(Mil = 10 ⁻³ inch)	ตารางนิ้ว						
3	252	0.04988	99.8	124.8	149.7	174.5	199.6	224.5
4	232	0.04277	85	106.2	127.8	148.8	170	191.2
5	212	0.03530	70.4	88	105.6	123.1	140.8	158.5
6	192	0.02895	57.8	72.25	86.7	101.2	115.6	130
7	176	0.02433	48.66	60.7	72.99	85	97.3	109.5
8	160	0.02011	40.28	50.4	60.42	70.5	80.56	90.6
9	144	0.01629	32.6	40.75	48.9	57	65.2	73.3
10	128	0.01287	25.74	32.2	38.71	45	51.48	57.95
11	116	0.01057	21.16	26.45	31.74	37	42.32	47.55
12	104	0.008495	17	21.25	25.4	29.75	34	38.25
13	92	0.006648	13.28	16.6	19.92	23.2	26.56	29.85
14	80	0.005027	10.05	12.58	15.08	17.6	20.11	22.6
15	72	0.004072	8.14	10.2	12.22	14.24	16.29	18.3
16	64	0.003217	6.43	8.05	9.65	11.3	12.87	14.5
17	56	0.002463	4.93	6.16	7.39	8.82	9.85	11.1
18	48	0.00181	3.62	4.52	5.44	6.34	7.24	8.14
19	40	0.001257	2.52	3.14	3.77	4.4	5.02	5.65
20	36	0.001018	2.04	2.55	3.05	3.56	4.07	4.58
21	32	0.0008042	1.61	2.01	2.41	2.81	3.21	3.61
22	28	0.0006158	1.23	1.54	1.84	2.15	2.46	2.76
23	24	0.0004524	0.905	1.13	1.36	1.58	1.82	2.03
24	22	0.0003801	0.76	0.95	1.14	1.33	1.52	1.71
25	20	0.0003142	0.63	0.79	0.94	1.1	1.25	1.41
26	18	0.0002545	0.51	0.64	0.76	0.89	1.01	1.14
27	16.4	0.0002113	0.42	0.53	0.53	0.74	0.85	0.95

28	14.8	0.0001720	0.34	0.43	0.52	0.6	0.69	0.77
29	13.6	0.0001453	0.29	0.36	0.44	0.51	0.58	0.65
30	12.4	0.0001208	0.24	0.3	0.36	0.42	0.48	0.54
31	11.6	0.0001057	0.21	0.26	0.32	0.37	0.42	0.48
32	10.8	0.00009158	0.18	0.23	0.28	0.32	0.37	0.41
33	10	0.00007854	0.16	0.2	0.24	0.28	0.31	0.35
34	9.2	0.00006648	0.13	0.17	0.2	0.23	0.27	0.3
35	8.4	0.00005542	0.11	0.14	0.17	0.19	0.22	0.25

(ที่มาของตาราง : คู่มือซ่อมมอเตอร์ไฟฟ้า โดยนายทวย สำเร็จ หน้า 124)

หมายเหตุ :

1. Current Density ต่ำกว่า 2000 แอมแปร์/ตารางนิ้ว ต้องลดจำนวนรอบของขดลวดให้น้อยลง เพราะกระแสไหลเข้ามอเตอร์น้อยเกินไป
2. Current Density อยู่ระหว่างช่อง 4-7 --> Good Condition
3. Current Density เกิน 4000 แอมแปร์/ตารางนิ้ว มอเตอร์จะร้อนมาก
4. ปกติ Design ให้ค่า Current Density อยู่ประมาณช่องที่ 6

ภาคผนวก ก-2 คำอธิบายการใช้ลวด

โปรดดูตารางการใช้ลวดประกอบ

ช่องที่ 1 คือเบอร์ลวดมาตรฐานของอังกฤษ (Standard Wire Gauge) ตัวย่อคือ SWG.

ช่องที่ 2 คือเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองแดงวัดเป็นมิล(Mill) 1000 มิลเท่ากับ 1 นิ้ว

ช่องที่ 3 คือพื้นที่หน้าตัดของลวด มีหน่วยเป็นตารางนิ้ว

ช่องที่ 4 คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า(Current Density) 2000 แอมแปร์ต่อตารางนิ้ว เช่น ลวดเบอร์ 12 SWG. เมื่อกระแสผ่าน 17 แอมแปร์ อยู่ที่ช่อง 4 พอดี ก็หมายความว่ากระแสผ่านเทียบเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 2000 แอมแปร์ต่อตารางนิ้ว

ช่องที่ 5 ถึงช่องที่ 9 คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านไปบนเส้นลวดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2500-4500 แอมแปร์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ

การใช้ลวดพันมอเตอร์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลวดแต่ละเส้นควรมีความหนาแน่นอยู่ระหว่างช่องที่ 4 ถึงช่องที่ 7 จึงจะดี เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมาก วัดและอ่านได้ที่ช่องที่ 8 และ 9 มอเตอร์จะร้อนมาก ทำให้อายุการใช้งานสั้นก็ไม่ควรใช้งาน

ตัวอย่าง เมื่อเอาลวดเบอร์ 19 SWG. พันมอเตอร์ตัวหนึ่ง (ต่อแบบสตาร์) เมื่อใช้งานวัดกระแสได้ 3 แอมแปร์ ซึ่งอยู่ที่ช่อง 4 – 5 แสดงว่าความหนาแน่นของกระแสอยู่ระหว่าง 2000-2500 แอมแปร์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้งานได้ดี หากกระแสที่วัดได้มีค่าเป็น 6 แอมแปร์ คูณในตารางแล้วไม่มี (มากเกินไปกว่าที่ลวดขนาดนี้จะทนได้) จะทำให้มอเตอร์ตัวนั้นร้อนจัด ซึ่งไม่ควรจะแสดงว่าลวดอาจจะเล็กไป หรือ จำนวนรอบอาจจะน้อยไป ดังนั้นจึงควรตรวจสอบสาเหตุและเลือกขนาดลวดให้พอเหมาะกับขนาดของมอเตอร์ นี่เป็นตัวอย่างพอสังเขป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข Lamination magnetization curve $B_m(H_m)$

B[T]	H[A/m]	B[T]	H[A/m]
0.05	22.8	1.05	237
0.1	35	1.1	273
0.15	45	1.15	310
0.2	49	1.2	356
0.25	57	1.25	417
0.3	65	1.3	482
0.35	70	1.35	585
0.4	76	1.4	756
0.45	83	1.45	1050
0.5	90	1.5	1340
0.55	98	1.55	1760
0.6	106	1.6	2460
0.65	115	1.65	3460
0.7	124	1.7	4800
0.75	135	1.75	6160
0.8	148	1.8	8270
0.85	162	1.85	11170
0.9	177	1.9	15220
0.95	198	1.95	22000
1.0	220	2.0	34000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค หลักการพื้นฐานในการคำนวณหาขนาดมอเตอร์และออกแบบมอเตอร์ เหนี่ยวนำ

ค-1 หลักการพื้นฐานในการคำนวณหาขนาดของมอเตอร์

สิ่งสำคัญสำหรับการเลือกมอเตอร์อยู่ที่ว่าแรงบิดพอต่อการใช้ขับเคลื่อนหรือไม่เพราะหากแรงบิดไม่พอ ล้อก็จะไม่หมุนทำให้รถไม่สามารถวิ่งไปได้ ดังนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกสำหรับการเลือกใช้มอเตอร์ก็คือแรงบิด จากนั้นจึงศึกษาต่อว่ามอเตอร์ที่เลือกนั้นให้ความเร็วตามที่ต้องการหรือไม่ เมื่อพิจารณาทั้งสองสิ่งที่สำคัญแล้วจึงค่อยนำมาคำนวณหาขนาดกิโลวัตต์หรือแอมป์ของมอเตอร์ต่อไป และส่วนสำคัญที่จะบ่งบอกถึงขนาดของมอเตอร์ คือ แรงบิดมอเตอร์ ความเร็วรอบของมอเตอร์ และกำลังของมอเตอร์

ค-1.1 การคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์

การหาแรงบิดของมอเตอร์จำเป็นต้องทราบว่ามีแรงไต่บ้างที่เกี่ยวข้อง และแรงที่กล่าวถึงนี้จะหมายถึงแรงที่กระทำต่อตัวรถในขณะที่ที่รถวิ่งซึ่งเป็นแรงที่พยายามต้านทานการเคลื่อนที่ของรถ การที่จะทำให้รถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิมได้นั้น แรงขับที่ล้อ (Tractive effort) จะต้องเท่ากับผลรวมของแรงเหล่านี้ ถ้าแรงขับนี้มีค่ามากกว่าก็จะทำให้รถเกิดความเร่งและในทางตรงกันข้ามถ้ามีค่าน้อยกว่าก็จะทำให้รถชะลอความเร็วลง โดยแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถสามารถแบ่งได้ดังนี้ [2]

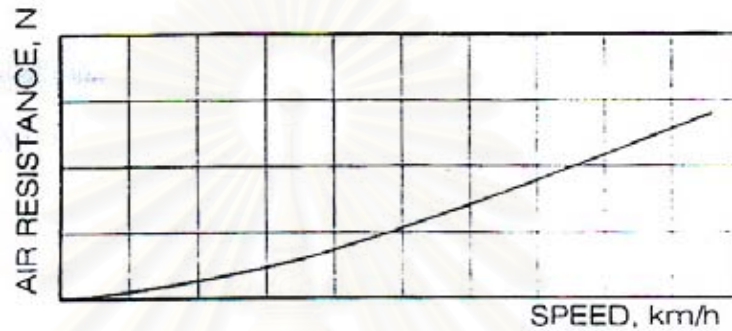
1. แรงต้านทานจากการกลิ้ง

แรงต้านทานจากการกลิ้งคือผลที่เกิดจากการเสียรูปของยาง พื้นถนนและการถ่ายเทพลังงานเมื่อเกิดการกระทบกระแทก แรงต้านทานนี้ขึ้นอยู่กับสภาพผิวถนน สภาพของยางที่ใส่อยู่และน้ำหนักรวมที่ยางเส้นนั้นๆ โดยปกติถนนและยางที่อ่อนจะทำให้เกิดแรงต้านทานมากกว่าถนนและยางที่แข็ง สิ่งสำคัญคือแรงต้านทานจากการกลิ้งจะแปรผันโดยตรงกับน้ำหนักที่กดลงบนยาง และส่วนที่ได้รับการกระทบกระแทกมีผลอย่างมากต่อความเร็วของรถ จากที่ได้ทำการศึกษาพบว่าถนนที่มีความแข็ง แห้งและมีหลุมไม่มากแรงต้านทานในส่วนนี้จะมิต่ำน้อยมากและอาจถือได้ว่าไม่มีแรงต้านทานในส่วนนี้เลย

2. แรงต้านจากอากาศ

เมื่อตัวถังรถเคลื่อนที่แทรกเข้าไปในอากาศๆ จะออกแรงต้าน แรงต้านนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของตัวถังรถและความเร็วที่แหวกอากาศ ในที่นี้จะไม่กล่าวถึงผลจากรูปร่างและขนาดของรถ เนื่องจากเป็นค่าคงที่แต่จะพิจารณาผลของแรงต้านเนื่องจากความเร็วที่แสดงดังรูปที่ ค-1

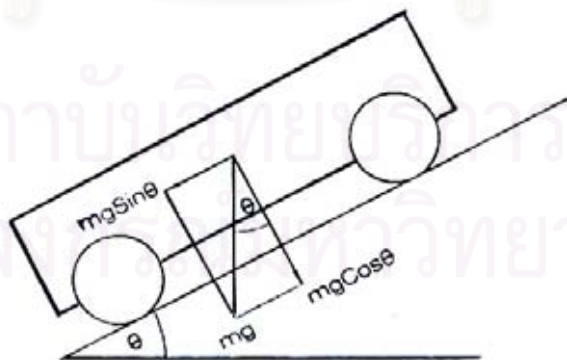
เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่าแรงต้านจากอากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังสองของความเร็ว ยานยนต์ที่แล่นช้าอย่างเช่นรถบรรทุกหนักๆ จะได้รับแรงต้านจากอากาศน้อยมากและสามารถละทิ้งได้ในการคำนวณแต่สำหรับยานยนต์ที่แล่นด้วยความเร็วสูงแรงต้านจากอากาศจะมีค่ามาก ในกรณีรถแข่งแรงต้านจากอากาศนี้มีความสำคัญและต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมากสำหรับการคำนวณและออกแบบ ส่วนรถขนาดใหญ่ที่แล่นช้าและแล่นทวนลมแรงๆ ก็จะได้รับแรงต้านจากอากาศนี้มากด้วยเช่นกัน



รูปที่ ค-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านจากอากาศกับความเร็ว

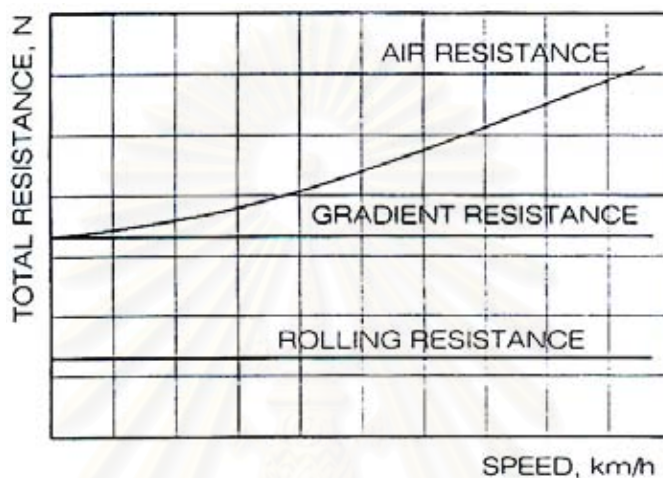
3. แรงต้านทานเนื่องจากความลาดชัน

ในกรณีรถหยุดนิ่งบนทางลาดชัน น้ำหนักของรถสามารถแตกได้สองทิศทางคือตั้งฉากกับพื้นทิศทางหนึ่งและขนานกับพื้นอีกทิศทางหนึ่ง ดังรูปที่ ค-2 ส่วนประกอบของน้ำหนักที่ขนานกับพื้นคือแรงต้านจากความลาดชัน ซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำหนักของรถและความชันของพื้นแต่จะไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วของรถ



รูปที่ ค-2 แสดงรถหยุดนิ่งอยู่บนทางลาดชัน

เมื่อทราบแรงต้านทานการเคลื่อนที่ทั้งสามแล้ว จากนั้นหาแรงต้านทานการเคลื่อนที่รวมของรถได้จากผลรวมของแรงต้านทานทั้งสามซึ่งสองในสามไม่ขึ้นอยู่กับความเร็ว ดังนั้นการพล็อตกราฟของแรงต้านทานการเคลื่อนที่เทียบกับความเร็วก็คือการเลื่อนกราฟแรงต้านของอากาศขึ้นไปเท่ากับแรงต้านทานจากความลาดชันรวมกับแรงต้านทานจากการกลิ้งที่คำนวณได้ดังรูปที่ ค-3



รูปที่ ค-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานการเคลื่อนที่ทั้งสามกับความเร็ว

ค-1.2 การคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์

การคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์ เริ่มจากการกำหนดความเร็วสูงสุดของรถก่อนว่าต้องการให้มีความเร็วสูงสุดเป็นเท่าใด เมื่อได้ความเร็วสูงสุด (ความเร็วเชิงเส้น) แล้ว จากนั้นเปลี่ยนความเร็วเชิงเส้นเป็นความเร็วเชิงมุม ได้ดังนี้

$$\omega = \frac{V}{R} \quad (\text{ค-1})$$

เมื่อ

V = ความเร็วเชิงเส้น (m/s)

ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

R = รัศมีล้อรถ (m)

ค-1.3 การคำนวณหากำลังของมอเตอร์

ในการเลือกมอเตอร์จะต้องเลือกมอเตอร์ที่สามารถให้ทั้งแรงบิดและความเร็วรอบสูงเท่าที่ต้องการ เมื่อหาแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ตามที่ต้องการแล้ว จากนั้นจะนำแรงบิดและความเร็วรอบที่ได้มาทำการคำนวณหากำลังของมอเตอร์ ซึ่งหาได้ดังนี้

$$P = T\omega \quad (\text{ค-2})$$

เมื่อ

P = กำลังของมอเตอร์ (W)

T = แรงบิดของมอเตอร์ (N-m)

ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

ค-2 หลักการพื้นฐานในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หลักการพื้นฐานในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้จะอธิบายถึงองค์ประกอบที่สำคัญซึ่งต้องนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยข้อมูลจำเพาะสำหรับออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ [19],[20] เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถจักรยานมีดังนี้

- 1) กำลังพิกัด (Rated power)
- 2) ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed)
- 3) ความต่างศักย์แหล่งจ่าย (Line supply voltage)
- 4) ความถี่ (Supply frequency)
- 5) จำนวนเฟส (Number of phase)
- 6) การเชื่อมต่อ (Phase connections)
- 7) ตัวประกอบกำลังเป้าหมาย (Targeted power factor)
- 8) ประสิทธิภาพเป้าหมาย (Targeted efficiency)

ลิขสิทธิ์ทรัพย์สินทางปัญญา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค-2.1 การคำนวณหามิติหลักของสเตเตอร์ (Main Dimensions of Stator Core)

มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ทำการออกแบบนี้เป็นมอเตอร์ที่มีจำนวนโพลเท่ากับ 8 โพล (750 rpm, 50 Hz) หรือมีจำนวนคูโพล (Pole pair: p_1) เท่ากับ 4 คูโพล โดยพิจารณาสมการเข้าพุทและนำมาใช้ในการคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของสเตเตอร์ [8]

1) เส้นผ่านศูนย์กลางของสเตเตอร์ สามารถหาได้จาก

$$D_{is} = \sqrt[3]{\frac{2p_1^2 S_{gap}}{\pi \lambda f_1 C_o}} \quad (\text{ค-3})$$

$$\text{โดยที่} \quad S_{gap} = \frac{K_E P_n}{\eta_n \cos \phi_{1n}} \quad (\text{ค-4})$$

$$K_E = 0.98 - 0.005 p_1 \quad (\text{ค-5})$$

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \quad (\text{ค-6})$$

เมื่อ

D_{is} = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของสเตเตอร์ (m)

p_1 = จำนวนคูโพล (Pole pair)

S_{gap} = กำลังปรากฏที่ช่องอากาศ (VA)

λ = อัตราส่วนยาวต่อกว้างของแกนเหล็ก

C_o = ค่าคงที่ Esson

K_E = ส.ป.ส.แรงเคลื่อนไฟฟ้า

P_n = กำลังพิกัด (W)

η = ประสิทธิภาพ

$\cos \phi_n$ = ตัวประกอบกำลัง

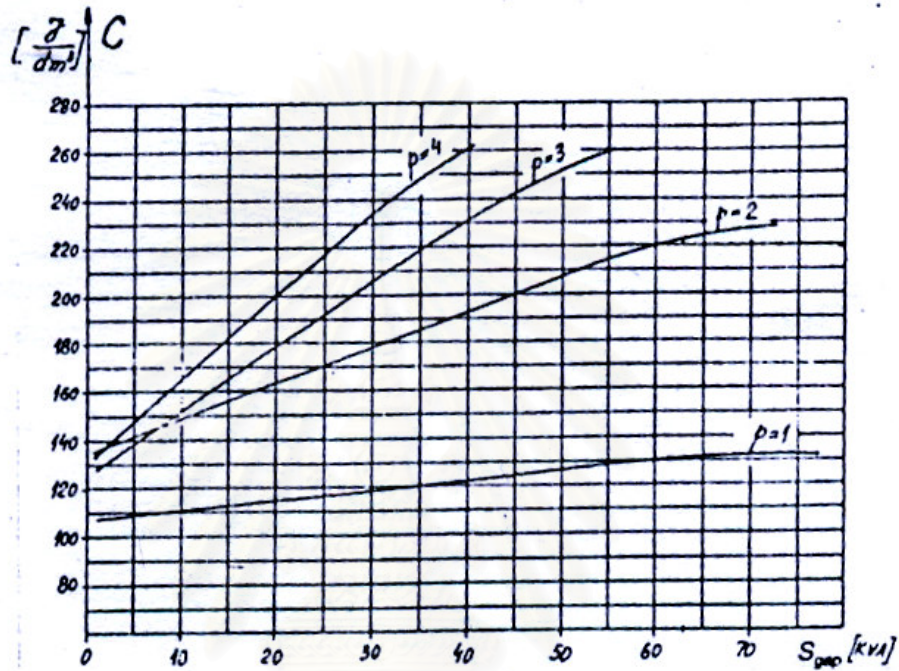
L = ความยาวแกนเหล็กสเตเตอร์ (m)

τ = โพลพิทช์ (m)

โดยทั่วไปค่าอัตราส่วนยาวต่อกว้างของแกนเหล็ก (λ) จะสามารถหาได้จากตารางที่ ค-1 เพราะเพียงทราบจำนวนคูโพลก็จะหาค่า λ ได้ ส่วนค่าค่าคงที่ Esson (C_o) หาได้จากรูปที่ ค-4 ที่กำลังปรากฏที่ช่องอากาศ (S_{gap}) ตามที่คำนวณได้จากสมการที่ ค-4 จากนั้นเมื่อได้ค่าตัวแปรทั้งหมดแล้ว จะสามารถคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของสเตเตอร์ (D_{is}) ได้จากสมการ ค-3

ตารางที่ ค-1 อัตราส่วนยาวต่อกว้างของแกนเหล็ก (λ) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป [8]

$2p_1$	2	4	6	8
λ	0.6-1.0	1.2-1.8	1.6-2.2	2-3



รูปที่ ค-4 แสดงค่าคงที่ Esson (C_e) เมื่อเทียบกับค่ากำลังปรากฏที่ช่องอากาศ (S_{gap}) [8]

2) ความยาวแกนเหล็กสเตเตอร์ (L) หาได้จาก

$$L = \frac{\lambda \pi D_{is}}{2 p_1} \quad (\text{ค-7})$$

เมื่อ

L = ความยาวแกนเหล็กสเตเตอร์ (m)

λ = อัตราส่วนยาวต่อกว้างของแกนเหล็ก

D_{is} = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของสเตเตอร์ (m)

p_1 = จำนวนคู่อัฒโพล (Pole pair)

3) โพลพิทช์ (τ) หาได้จาก

$$\tau = \frac{\pi D_{is}}{2p_l} \quad (\text{ค-8})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \tau &= \text{โพลพิทช์ (m)} \\ D_{is} &= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของสเตเตอร์ (m)} \\ p_l &= \text{จำนวนคูโพล (Pole pair)} \end{aligned}$$

4) สลิตพิทช์ (τ_s) หาได้จาก

$$\tau_s = \frac{\tau}{3q} \quad (\text{ค-9})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \tau_s &= \text{สลิตพิทช์ (m)} \\ \tau &= \text{โพลพิทช์ (m)} \\ q &= \text{จำนวนขดลวดต่อโพลต่อเฟส} \end{aligned}$$

ค่าที่เหมาะสมของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในต่อภายนอกสเตเตอร์ของมอเตอร์ที่มีกำลังต่ำกว่า 100 กิโลวัตต์ แสดงได้ดังตาราง ค-2

ตารางที่ ค-2 แสดงอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในต่อภายนอกของสเตเตอร์ [8]

$2p_l$	2	4	6	8	≥ 10
$\frac{D_{is}}{D_{out}} = K_D$	0.54-0.58	0.61-0.63	0.68-0.71	0.72-0.74	0.78-0.80

จากตารางที่ ค-2 จะทำให้สามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกสเตเตอร์ได้ เพราะทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสเตเตอร์แล้ว จากนั้นพิจารณาระยะห่างช่องอากาศ (g) ซึ่งได้มีการนิยามไว้ดังนี้

$$\text{สำหรับ } 2p_l = 2 ; \quad g = (0.1 + 0.02 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} \quad \text{m} \quad (\text{ค-10})$$

$$\text{สำหรับ } 2p_l \geq 2 ; \quad g = (0.1 + 0.012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} \quad \text{m} \quad (\text{ค-11})$$

ค-2.2 การพันสเตเตอร์ (Stator winding)

ข้อมูลสำคัญที่จะต้องทราบเพื่อนำมาใช้ประกอบการพันมอเตอร์ มีดังต่อไปนี้ [8]

1) จำนวนสล๊อตในสเตเตอร์ (N_{slot}) หาได้จาก

$$N_{slot} = 2p_1qm \quad (\text{ค-12})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} N_{slot} &= \text{จำนวนสล๊อตในสเตเตอร์} \\ p_1 &= \text{จำนวนคูโพล (Pole pair)} \\ q &= \text{จำนวนขดลวดต่อโพลต่อเฟส} \\ m &= \text{จำนวนเฟส} \end{aligned}$$

2) รูปแบบการพันมอเตอร์เป็นแบบแลป 2 ชั้น (Lap winding and Two layer winding)

3) โพลพิทช์แบ่งโดยจำนวนสล๊อต (τ) หาได้จาก

$$\tau = \frac{N_{slot}}{2p_1} \quad (\text{ค-13})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} N_{slot} &= \text{จำนวนสล๊อตในสเตเตอร์} \\ \tau &= \text{โพลพิทช์ (m)} \\ p_1 &= \text{จำนวนคูโพล (Pole pair)} \end{aligned}$$

4) มุมทางไฟฟ้า (Electrical angle : α_{ec}) หาได้จาก

$$\alpha_{ec} = \frac{2\pi p_1}{N_{slot}} \quad (\text{ค-14})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \alpha_{ec} &= \text{มุมทางไฟฟ้า} \\ p_1 &= \text{จำนวนคูโพล (Pole pair)} \\ N_{slot} &= \text{จำนวนสล๊อตในสเตเตอร์} \end{aligned}$$

5) ตัวประกอบของการแผ่กระจาย (Spread factor : K_{q1}) หาได้จาก

$$K_{q1} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q \sin \frac{\pi}{6q}} \quad (\text{ค-15})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} K_{q1} &= \text{ตัวประกอบของการแผ่กระจาย} \\ q &= \text{จำนวนขดลวดต่อโพลต่อเฟส} \end{aligned}$$

6) ตัวประกอบของคอร์ด (Chord factor: K_{y1}) หาได้จาก

$$K_{y1} = \sin \frac{\pi y}{2\tau} \quad (\text{ค-16})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} K_{y1} &= \text{ตัวประกอบของคอร์ด} \\ y &= \text{ระยะการวางขดลวด} \\ \tau &= \text{โพลพิทช์ (m)} \end{aligned}$$

7) ตัวประกอบการพัน (Stator winding factor: K_{w1}) หาได้จาก

$$K_{w1} = K_{q1} \times K_{y1} \quad (\text{ค-17})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} K_{w1} &= \text{ตัวประกอบการพัน} \\ K_{q1} &= \text{ตัวประกอบของการแผ่กระจาย} \\ K_{y1} &= \text{ตัวประกอบของคอร์ด} \end{aligned}$$

8) ฟลักซ์ช่องอากาศ (B_g) ที่ใช้กันทั่วไป มีดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} B_g &= (0.5 - 0.75)T && \text{สำหรับ } 2p_1 = 2 \\ B_g &= (0.65 - 0.78)T && \text{สำหรับ } 2p_1 = 4 \\ B_g &= (0.7 - 0.82)T && \text{สำหรับ } 2p_1 = 6 \\ B_g &= (0.75 - 0.85)T && \text{สำหรับ } 2p_1 = 8 \end{aligned}$$

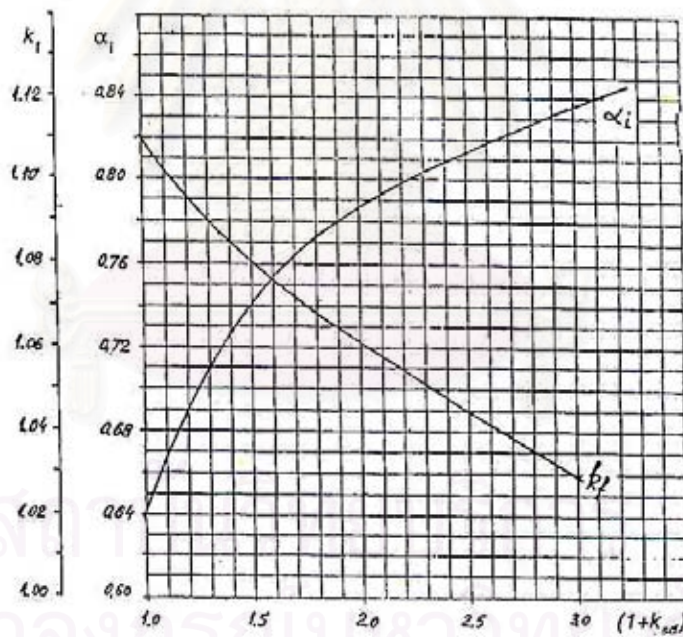
9) โพลฟลักซ์ (Pole flux : ϕ) หาได้จาก

$$\phi = \alpha_i \tau L B_g \quad (\text{ค-18})$$

เมื่อ

- ϕ = โพลฟลักซ์
 α_i = ตัวประกอบรูปร่างของความหนาแน่นฟลักซ์
 τ = โพลพิทช์ (m)
 L = ความยาวแกนเหล็กสเตเตอร์ (m)
 B_g = ความหนาแน่นฟลักซ์ที่ช่องอากาศ (T)

จากรูปที่ ค-5 จะสามารถหาตัวประกอบรูปร่างของความหนาแน่นฟลักซ์ (α_i) ตัวประกอบรูปแบบ (form factor : k_f) และเมื่อแทนค่า α_i ในสมการที่ ค-18 ก็จะได้ค่าโพลฟลักซ์



รูปที่ ค-5 ตัวประกอบรูปแบบ (k_f) และตัวประกอบรูปร่างของความหนาแน่นฟลักซ์ (α_i) ที่มีผลต่อการอิ่มตัวของฟลักสเตเตอร์ [8]

10) จำนวนรอบต่อเฟส (Turns per phase : W_1)

$$W_1 = \frac{K_E V_{1ph}}{4k_f K_{wl} f_1 \phi} \quad (\text{ค-19})$$

เมื่อ

- W_1 = จำนวนรอบต่อเฟส
 K_E = ส.ป.ส แรงเคลื่อนไฟฟ้า
 V_{1ph} = ความต่างศักย์ของเฟส (V)
 k_f = ตัวประกอบรูปแบบ
 K_{wl} = ตัวประกอบการพัน
 f_1 = ความถี่ (Hz)
 ϕ = โพลฟลักซ์

11) จำนวนเส้นทางกระแสในแนวขนาน (Current paths in parallel : a_1)

12) จำนวนตัวนำต่อสล๊อต (Conductors per slot : n_{slot}) หาได้จาก

$$n_{slot} = \frac{a_1 W_1}{p_1 q} \quad (3-20)$$

** จำนวนตัวนำต่อสล๊อตต้องจะต้องเป็นจำนวนจริง

เมื่อ

- n_{slot} = จำนวนตัวนำต่อสล๊อต
 a_1 = จำนวนเส้นทางกระแสในแนวขนาน
 W_1 = จำนวนรอบต่อเฟส
 p_1 = จำนวนคูโพล (Pole pair)
 q = จำนวนขดลวดต่อโพลต่อเฟส

13) กระแสพิกัด (Rated current : I_{In}) หาได้จาก

$$I_{In} = \frac{P_n}{\eta_n \cos \varphi_n \sqrt{3} V_I} \quad (\text{ค-21})$$

เมื่อ

I_{In} = กระแสพิกัด (A)

P_n = กำลังพิกัด (W)

η_n = ประสิทธิภาพที่ค่าพิกัด

$\cos \varphi_n$ = ตัวประกอบกำลัง

V_I = ความต่างศักย์ (V)

14) ค่าความหนาแน่นของกระแส (Current Density : J_{cos})

โดยทั่วไปที่ใช้นิยมใช้กับมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง(High efficiency motor) คือ

$$J_{cos} = (4-7) \text{ A/mm}^2 \quad \text{สำหรับ } 2p_1 = 2, 4$$

$$J_{cos} = (5-8) \text{ A/mm}^2 \quad \text{สำหรับ } 2p_1 = 6, 8$$

15) พื้นที่หน้าตัดทางแม่เหล็ก (Magnetic wire cross section: A_{co}) หาได้จาก

$$A_{co} = \frac{I_{In}}{J_{cos} a_1} \quad (\text{ค-22})$$

และสามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด (Wire diameter : d_{co}) ได้จาก

$$d_{co} = \sqrt{\frac{4A_{co}}{\pi}} \quad (\text{ค-23})$$

และเลือกขนาดลวดมาตรฐานได้จากภาคผนวก ก (ตารางการใช้ลวด)

เมื่อ

A_{co} = พื้นที่หน้าตัดทางแม่เหล็ก (m^2)

I_{In} = กระแสพิกัด (A)

J_{cos} = ค่าความหนาแน่นของกระแส (A/mm^2)

a_1 = จำนวนเส้นทางกระแสในแนวขนาน

d_{co} = เส้นผ่านศูนย์กลางของลวด (m)

16) ขนาดสล็อตสเตเตอร์ (Stator slot sizing)

หลังจากคำนวณหาตัวนำต่อสล็อตและขนาดลวดแล้ว จากนั้นจะสามารถหาพื้นที่สล็อต (Slot area : A_{su}) ได้จาก

$$A_{su} = \frac{\pi d_{co}^2 n_{slot}}{4K_{fill}} \quad (\text{ค-24})$$

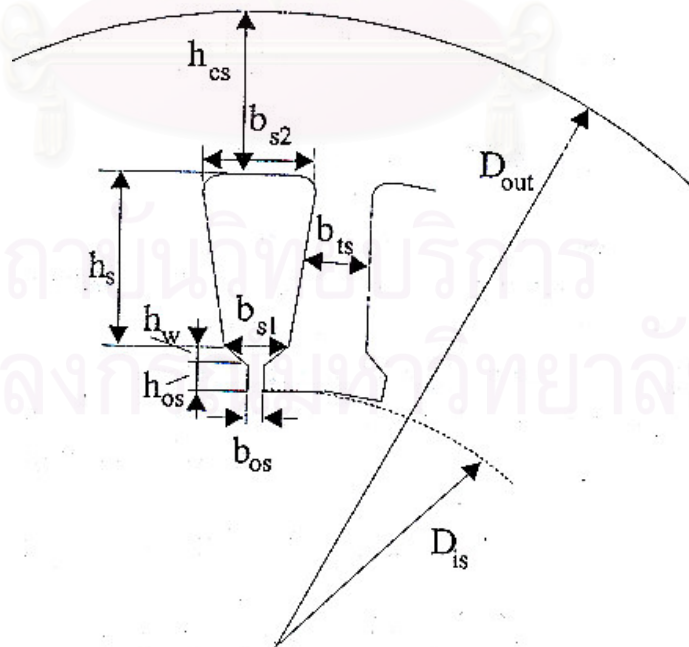
เมื่อ

- A_{su} = พื้นที่สล็อต (m^2)
 d_{co} = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลวด (m)
 n_{slot} = จำนวนตัวนำต่อสล็อต
 K_{fill} = ตัวประกอบการเติมเต็มในสล็อต

ซึ่งต้องนำค่าตัวประกอบการเติมเต็มในสล็อต (Slot fill factor : K_{fill}) มาพิจารณาด้วยดังนี้

- เมื่อ $K_{fill} \approx 0.35 - 0.4$ สำหรับมอเตอร์ต่ำกว่า 10 kW
 $K_{fill} \approx 0.4 - 0.44$ สำหรับมอเตอร์สูงกว่า 10 kW

และในกรณีนี้เลือกสล็อตแบบกึ่งเปิดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal semi closed shape) ดังรูปที่ ค-6



รูปที่ ค-6 สล็อตแบบกึ่งเปิดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู [8]

จากรูปที่ ค-6 สามารถใช้ค่าตัวแปร b_{os} , h_{os} , h_w ซึ่งเป็นค่าประมาณที่ได้รับการยอมรับและใช้กันมานาน (Past experience) คือ

$$b_{os} = 2 - 3 \quad \text{mm} < 8g$$

$$h_{os} = 0.5 - 10 \quad \text{mm}$$

$$h_w = 1 - 4 \quad \text{mm}$$

สมมติให้ฟลักซ์ของอากาศส่งผ่านไปยังฟันของสเตเตอร์ ดังนั้นกฎการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า

$$B_g \tau_s L \approx B_{is} b_{is} L K_{Fe}$$

โดยที่ $B_{is} \approx 1.5 - 1.65 \text{ T}$

17) ความกว้างของฟันสเตเตอร์ (Tooth width: b_{is}) หาได้จาก

$$b_{is} = \frac{B_g \tau_s}{B_{is} K_{Fe}} \quad (\text{ค-25})$$

เมื่อ

$$B_g = \text{ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องอากาศ (T)}$$

$$\tau_s = \text{สลีตพิทช์ (m)}$$

$$B_{is} = \text{ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ฟันสเตเตอร์ (T)}$$

$$K_{Fe} = \text{ตัวประกอบของเหล็กสเตเตอร์}$$

สามารถคำนวณหาความกว้างสลีต b_{s1} ได้จาก

$$b_{s1} = \frac{\pi(D_{is} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_{slot}} - b_{is} \quad (\text{ค-26})$$

จากสมการหาพื้นที่สลีต (A_{su})

$$A_{su} = \frac{h_s (b_{s1} + b_{s2})}{2}$$

$$\text{และ } b_{s2} \approx b_{s1} + 2h_s \tan \frac{\pi}{N_{slot}}$$

สามารถคำนวณหาความกว้างสลิต b_{s2} ได้

$$b_{s2} = \sqrt{4A_{su} \tan \frac{\pi}{N_{slot}} + b_{s1}^2} \quad (\text{ค-27})$$

$$\text{และความลึกของร่องสลิต } h_s = \frac{2A_{su}}{b_{s1} + b_{s2}} \quad (\text{ค-28})$$

18) ส.ป.ส.การอิมิตัวของฟันสเตเตอร์หรือค่า $1+K_{st}$ หาได้จาก

$$1 + K_{st} = 1 + \frac{F_{mts} + F_{mtr}}{F_{mg}} \quad (\text{ค-29})$$

$$\text{โดยที่ } F_{mg} \approx 1.2g \frac{B_g}{\mu_0}$$

$$F_{mts} = H_{ts} (h_s + h_{os} + h_w) \quad (\text{ค-30})$$

$$F_{mtr} = K_{st} F_{mg} - F_{mts} \quad (\text{ค-31})$$

เมื่อ

$$1+K_{st} = \text{ส.ป.ส.การอิมิตัวของฟันสเตเตอร์}$$

$$F_{mts} = \text{แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ฟันสเตเตอร์ (Aturns)}$$

$$F_{mtr} = \text{แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ฟันโรเตอร์ (Aturns)}$$

$$F_{mg} = \text{แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ช่องอากาศ (Aturns)}$$

$$B_g = \text{ความหนาแน่นฟลักซ์ช่องอากาศ (T)}$$

$$\mu_0 = \text{ค่าคงที่ที่ว่างสนามแม่เหล็ก (H/m)}$$

$$H_{ts} = \text{ภาระกระแสจำเพาะ หรือ Specific current loading (A/m)}$$

19) ความหนาแน่นฟลักซ์ได้สล๊อต (Back core flux density: B_{cs})

$$B_{cs} = \frac{\phi}{2Lh_{cs}} \quad (\text{ค-32})$$

โดยที่

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{is} + 2(h_{os} + h_w + h_s))}{2} \quad (\text{ค-33})$$

เมื่อ

B_{cs} = ความหนาแน่นฟลักซ์ได้สล๊อต (T)

ϕ = โพลฟลักซ์(Wb)

L = ความยาวแกนสเตเตอร์ (m)

D_{out} = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสเตเตอร์ (m)

D_{is} = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของสเตเตอร์ (m)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง ตารางเปรียบเทียบผลการออกแบบและผลการสร้างมอเตอร์

มิติหลักสแตเตอร์ และการพันมอเตอร์	มอเตอร์แบบที่ 1		มอเตอร์แบบที่ 2	
	ผลการออกแบบ	ผลการสร้าง	ผลการออกแบบ	ผลการสร้าง
จำนวนโพล (Pole)	18	18	8	8
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (mm)	160	160	100	101.6
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (mm)	21	21	54	54
ความยาวแกนสแตเตอร์ (mm)	18.45	18.5	59	59
จำนวนขดลวดต่อโพลต่อเฟส	1	1	1	1
ระยะช่องอากาศ (mm)	0.17	1.2	0.17	1.4
จำนวนสล็อต	54	54	24	24
รูปแบบการพัน	แลป 2 ชั้น	แลป 2 ชั้น	แลป 2 ชั้น	แลป 2 ชั้น
การเชื่อมต่อ	Serie star	Serie star	Two parallel deta	Two parallel deta
จำนวนตัวนำต่อสล็อต	52	30	126	45
เส้นผ่านศูนย์กลางลวด (mm)	0.72	0.8128	0.62	0.508

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปกาศิต เกิดกลิ่น เกิดเมื่อวันที่ 30 เดือนมีนาคม พุทธศักราช 2522 ที่จังหวัด สุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปีการศึกษา 2544 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย