

การใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบบ่อนกำลังไฟคู่
DOUBLY-FED INDUCTION MOTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2538

ISBN 974-621-400-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

DOUBLY-FED INDUCTION MOTOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKCRABANG

1995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ISBN 974-621-400-4
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Doubly-Fed Induction Motor
Student	Mr. Krittaya Yuangngoen
Thesis Advisor	Assist. Prof. Prapas Prisuwanna
Level of Study	Master of Engineering in Electrical Engineer
Department	Electrical Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	1995

ABSTARCT

A polyphase wound type induction motor can operate as a synchronous motor at a specified speed if each member is connected to symmetrical polyphase supply. It can retain this speed over range of mechanical load torque, exhibiting a synchronizing torque. Such a machine could be used as a high-speed motor, or as a frequency-detector with one member connected to a supply of reference frequency and the other to the source whose frequency deviation is to be detected. In this thesis, Doubly-excited system used as a high-speed motor. By experimental and analysis, using wound type induction motor, Singly-excited system compare with doubly-excited system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะได้รับความเมตตาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประภาส ไพรสุวรรณ ที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำความรู้ทางด้านวิชาการ และให้ความอนุเคราะห์เรื่องราวต่าง ๆ ตลอดเวลาการศึกษาของผู้เขียนภายในสถาบันแห่งนี้ ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ศุภี บรรจงจิตร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิทัศน์ กฤษณจินดา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล ที่กรุณาให้คำแนะนำ และแนะแนวทางการเขียนเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ ให้กับผู้เขียนตลอดเวลาการศึกษาของผู้เขียนภายในสถาบันแห่งนี้

ขอขอบพระคุณพี่เจ้าหน้าที่ศูนย์บริการ และพัฒนาทางวิศวกรรม พี่เจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ พี่เจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัย และทุกท่านที่กรุณาให้ความร่วมมือช่วยเหลือผู้เขียนตลอดเวลาที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ(ถึงแก่กรรม)คุณแม่ ผู้ซึ่งเป็นหลักชีวิตและผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างที่ดีกับชีวิตผู้เขียน ทั้งในอดีต ปัจจุบัน และอนาคต

นายกฤตยา ยวงเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์.....	1
1.2 แนวความคิดที่ทำให้น่าเชื่อว่ามีความเป็นไปได้.....	2
1.3 วิธีการและประโยชน์.....	3
2. การแปรรูปพลังงานไฟฟ้า-กลศาสตร์.....	5
2.1 เครื่องแปรรูปพลังงานไฟฟ้า-กลศาสตร์.....	5
2.2 ระบบกระตุ้นเดี่ยว.....	8
2.3 ระบบกระตุ้นคู่.....	18
3. หลักเบื้องต้นของเครื่องจักรไฟฟ้า.....	22
3.1 หลักการพื้นฐาน.....	22
3.2 ชนิดของเครื่องจักร.....	28
3.3 ลักษณะทั่วไปของสนามแม่เหล็กหมุนในอุปกรณ์ไฟฟ้า-กลศาสตร์.....	35
3.4 แรงแเคลื่อนแม่เหล็กหมุนรอบช่องอากาศ อุปกรณ์ 2-ขั้ว.....	40
4. ข้อกำหนดในทฤษฎีเบื้องต้น.....	45
4.1 ข้อสมมติเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์.....	45
4.2 ค่าความเหนี่ยวนำของการพันขดลวดแบบกระจายและแบบรวม.....	45
4.3 ไดอะแกรมการพันขดลวดแบบรวม.....	56
5. เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสมมาตร.....	60
5.1 บทนำ.....	60
5.2 เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 2-เฟส.....	63
5.3 สมการแรงดัน และความเหนี่ยวนำขดลวดและแรงเคลื่อนที่มีผลรวมไปใช้.....	65
5.4 แรงบิด.....	70
5.5 เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ -เฟส.....	70

6. เครื่องจักรซิงโครนัส.....	74
6.1 บทนำ.....	74
6.2 เครื่องจักรซิงโครนัส 2-เฟส.....	77
6.3 สมการแรงดัน และความเหนี่ยวนำชุดขดลวด.....	79
6.4 แรงบิด.....	85
6.5 เครื่องจักรซิงโครนัส 3-เฟส.....	86
7. การประยุกต์ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่.....	89
7.1 แนวความคิดพื้นฐาน.....	89
7.2 ประเภทของเครื่องจักรตามสมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า.....	90
7.3 การพิจารณาสมการแรงบิดโดยอาศัยเงื่อนไขความเร็วการหมุน.....	95
7.4 แนวความคิดพื้นฐานที่นำมาประยุกต์เพื่ออธิบายความเป็นไปได้.....	97
7.5 การทดลอง.....	98
8. ผลการทดลอง.....	106
9. วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	118
9.1 เครื่องจักรโครงสร้างทรงกระบอก.....	118
9.2 การสร้างแรงบิดของเครื่องจักรทรงกระบอก.....	120
9.3 เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับหลายเฟส.....	125
9.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่.....	132
9.5 เปรียบเทียบมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองระบบ.....	138
10. สรุปผลการทดลอง.....	148
10.1 เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับระบบป้อนกำลังไฟคู่.....	148
10.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่.....	149
10.3 สรุป.....	152
บรรณานุกรม.....	154
ภาคผนวก.....	155
ประวัติผู้เขียน.....	157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-6	แสดงผลการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟปกติ	107-110
7-13	แสดงผลการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่	111-117



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้า

1.1 แสดงลักษณะสนามแม่เหล็กหมุน เครื่องจักร 2-ขั้ว 3-เฟส.....	2
2.1 แสดงการแปรรูปพลังงานไฟฟ้า-กลศาสตร์.....	5
2.2 แสดงตัวอย่างเครื่องแปรรูปพลังงานไฟฟ้า-กลศาสตร์.....	7
2.3 แสดงตัวอย่างระบบกระตุ้นเดี่ยว.....	8
2.4 แสดงความสัมพันธ์เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับกระแส.....	10
2.5 แสดงพลังงานที่เงื่อนไขต่าง ๆ ในระบบกระตุ้นเดี่ยว.....	11
2.6 แสดงโรเตอร์เคลื่อนที่ช้า.....	12
2.7 แสดงโรเตอร์เคลื่อนที่ทันทีทันใด.....	13
2.8 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับกระแสสำหรับการเคลื่อนที่โรเตอร์.....	14
2.9 แสดงลักษณะระบบกระตุ้นคู่.....	17
3.1 แสดงแรงบิดเนื่องจากการพยายามจัดแนวเส้นแรงแม่เหล็กเป็นแนวเดิม.....	23
3.2 แสดงแรงบิดเนื่องจากการปรับค่าความต้านทานแม่เหล็กให้น้อยที่สุด.....	24
3.3 แสดงแนวความคิดเกี่ยวกับแรงบิดเนื่องจากการบิดเบือนแม่เหล็ก.....	25
3.4 แสดงลักษณะการสร้างแรงบิดอย่างง่าย.....	26
3.5 แสดงเครื่องจักรไฟฟ้าหมุนพื้นฐาน.....	28
3.6 แสดงโครงสร้างชุดขดลวดคอมมิวเตเตอร์ 2-ขั้ว.....	29
3.7 แสดงแรงบิดการวางแนวสนามแม่เหล็กในเครื่องจักรซิงโครนัส.....	31
3.8 แสดงโรเตอร์แบบกรง.....	33
3.9 แสดงสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	33
3.10 แสดงแรงบิดการวางแนวสนามแม่เหล็กในเครื่องจักรเหนี่ยวนำ.....	35
3.11 แสดงอุปกรณ์ไฟฟ้า-กลศาสตร์ชนิดหมุน.....	36
3.12 แสดงชุดขดลวดสเตเตอร์ เครื่องจักร 2-ขั้ว 1-เฟส.....	37
3.13 แสดงชุดขดลวดสเตเตอร์ เครื่องจักร 2-ขั้ว 2-เฟส.....	37
3.14 แสดงการพันชุดขดลวด as กระจายลักษณะไซนูซอยด์ (โดยประมาณ).....	38
3.15 แสดงภาพตัดขวาง และทำให้รูป 3.14 แบบลง.....	38
3.16 แสดงทางเดินวงปิดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากสเตเตอร์.....	39
3.17 แสดง $m_{mf_{as}}$ เนื่องจากการพันชุดขดลวด as กระจายแบบไซนูซอยด์ โดยทางด้านบน.....	40
3.18 แสดงชุดขดลวดสเตเตอร์ 2-ขั้ว 1-เฟส.....	41
3.19 แสดงชุดขดลวดสเตเตอร์ 2-ขั้ว 2-เฟส.....	42
3.20 แสดงชุดขดลวดสเตเตอร์ เครื่องจักร 2-ขั้ว 3-เฟส.....	44

4.1 แสดงขดลวดพันแบบเป็นก้อนที่โรเตอร์ ระยะขั้วสั้น.....	46
4.2 แสดงผลการกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็ก และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก.....	47
4.3 แสดงการกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็ก และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก.....	49
4.4 แสดงสมมติฐานการเกิดช่องอากาศ 2-แกน ที่สม่าเสมอ.....	50
4.5 แสดงความเหนี่ยวนำของขดขดลวดขณะเคลื่อนที่โครงสร้างมีขั้วขาลื่น.....	52
4.6 แสดงการกระจายขดลวดตัวนำบนโรเตอร์อย่างสม่าเสมอ.....	52
4.7 แสดงการตีแผ่ตัวนำเฟส aa'.....	54
4.8 แสดงการกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็กตามตำแหน่งของขดลวด.....	55
4.9 แสดงไดอะแกรมการพันขดขดลวดแบบรวม ทรานสิเวอร์แบบหมุน.....	57
5.1 แสดงตัวอย่างโครงสร้างสเตเตอร์.....	60
5.2 แสดงโครงสร้างโรเตอร์กรงกระรอก.....	61
5.3 แสดงมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์พันด้วยขดลวด.....	62
5.4 แสดงเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสมมาตร 2-ขั้ว 2-เฟส.....	62
5.5 แสดงเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสมมาตร 2-ขั้ว 3-เฟส.....	71
6.1 แสดงโรเตอร์ของเครื่องจักรซิงโครนัส.....	74
6.2 แสดงขดขดลวดตัวหน่วงทำด้วยทองแดง และลัดวงจรบริเวณปลาย.....	75
6.3 แสดงมอเตอร์ซิงโครนัส 2-ขั้ว.....	76
6.4 แสดงเครื่องจักรซิงโครนัสมีขั้วขาลื่นที่ 2-ขั้ว 2-เฟส.....	78
6.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กโดยประมาณ.....	81
6.6 แสดงทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กขดขดลวด.....	82
6.7 แสดงเครื่องจักรซิงโครนัส 2-ขั้ว 3-เฟส มีขั้วขาลื่น.....	86
7.1 แสดงตัวอย่างวงจรแม่เหล็กระบบกระตุ้นคู่.....	90
7.2 แสดงความสัมพันธ์ $\theta = \omega t + \beta$	92
7.3 แสดงแกนไดเร็กต์ และ แกนขดลวด.....	93
7.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดตามการหมุนของโรเตอร์.....	94
7.5 แสดงตำแหน่งคอมมิวเตเตอร์ และแปรงถ่าน.....	94
7.6 แสดงการสร้างแรงบิดในเครื่องจักรทรงกระบอก.....	95
7.7 แสดงลักษณะการป้อนกำลังไฟให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่.....	99
7.8 แสดงลักษณะการ coupling ของมอเตอร์เหนี่ยวนำกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	100
7.9 แสดงอุปกรณ์การทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่.....	100
7.10 แสดงวงจรการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำภาวะปกติ.....	102
7.11 แสดงวงจรการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่.....	103

9.1 แสดงโครงสร้างทรงกระบอกของสเตเตอร์ กับโรเตอร์.....	119
9.2 แสดงการสร้างแรงบิดของเครื่องจักรทรงกระบอก.....	119
9.3 แสดงเครื่องจักร 2-ขั้ว ช่องอากาศสม่าเสมอ.....	121
9.4 แสดงการกระจายแบบไซนูซอยด์ของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศ.....	121
9.5 แสดงเครื่องจักร 2-ขั้ว.....	123
9.6 แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน เครื่องจักร 2-ขั้ว 3-เฟส.....	126
9.7 แสดงแกนแรงเครื่องแม่เหล็กของเครื่องจักรซิงโครนัส.....	127
9.8 แสดงแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนเมื่อกระตุ้นสเตเตอร์กับโรเตอร์.....	129
9.9 แสดงแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนเครื่องจักรเหนี่ยวนำ.....	130
9.10 แสดงการทำงานของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ ภาวะ $w_m > w_s$	131
9.11 แสดงชุดขดลวดสเตเตอร์ เครื่องจักร 2-ขั้ว 3-เฟส.....	133
9.12 แสดงกระแสแต่ละเฟส.....	133
9.13 แสดงการสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนตามการเปลี่ยนแปลงของกระแส 3-เฟส.....	134



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และวัตถุประสงค์

พลังงานไฟฟ้าจัดเป็นพลังงานที่สามารถควบคุม และส่งจ่ายได้สะดวกโดยมีประสิทธิภาพ และความเชื่อถือได้สูง (reliability and efficiency) จึงนิยมใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นตัวกลางการแปรรูปพลังงานจากรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่งหรือส่งถ่ายพลังงานจากสถานที่หนึ่งไปอีกสถานที่หนึ่งโดยทั่วไปที่ใช้กันคือ อุปกรณ์แปรรูปพลังงานไฟฟ้ากลศาสตร์ (electromechanical device) ซึ่งอาจหมายถึงการแปรรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลศาสตร์ หรือการแปรรูปพลังงานกลศาสตร์เป็นพลังงานไฟฟ้า ทั้งสองกรณีต่างก็อาศัยหลักการแปรรูปพลังงานลักษณะเดียวกัน แต่การแปรรูปพลังงานที่มีความใกล้ชิดกับเรามากคือ การแปรรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลศาสตร์ โดยอาศัย อุปกรณ์ที่เรียกว่ามอเตอร์ (motors)

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งมอเตอร์ออกตามลักษณะของระบบไฟที่ป้อน,หลักในการหมุน และโครงสร้าง ได้ดังนี้

1) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

- มอเตอร์เหนี่ยวนำ
- มอเตอร์ซิงโครนัส
- มอเตอร์แบบมีคอมมิวเตเตอร์ และแปรงถ่าน

2) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

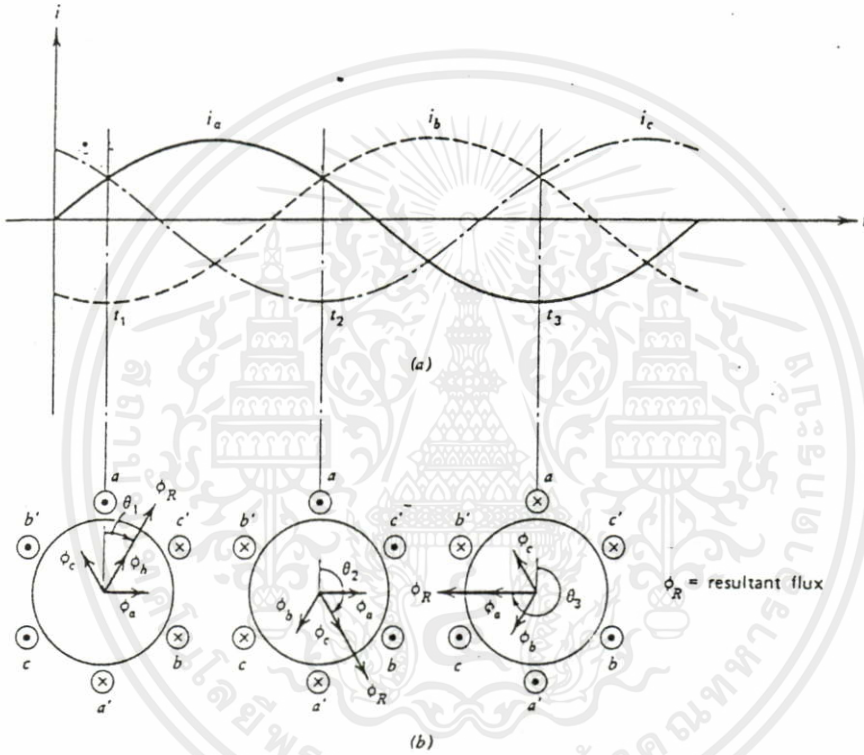
- วงจรขั้วแม่เหล็กขนาน
- วงจรขั้วแม่เหล็กอนุกรม
- วงจรขั้วแม่เหล็กผสม

ในแต่ละประเภทของมอเตอร์กระแสสลับก็สามารถแบ่งย่อยลงไปได้อีก แต่จะไม่ขอกกล่าวในที่นี้ การใช้พลังงานในปัจจุบันการแปรรูปพลังงานในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มาจากพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยมอเตอร์เป็นตัวกลางแปรรูปพลังงาน มอเตอร์จึงมีบทบาทสำคัญในการเสริมสร้างความเจริญ และวิวัฒนาการความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ที่นิยมใช้กันมากคือมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะ โครงสร้างไม่ซับซ้อนแต่มีความแข็งแรงทนทาน ราคาไม่สูง สดวกในการบำรุงรักษา มีความแน่นอนสูงในการทำงาน และมีปัญหาน้อย ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงมอเตอร์โดยทั่วไปมักหมายถึงมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ถ้าเราสามารถหาวิธีเพิ่มขอบเขตภาระ(load) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ อาจก่อให้เกิดประโยชน์ทางอุตสาหกรรม เนื่องจากเราสามารถลดขนาดมอเตอร์ให้เล็กลงได้โดยสามารถรับภาระได้เท่าเดิม วิธีการดังกล่าวคือ การใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่(Doubly-Fed Induction Motor) ซึ่งสามารถใช้ได้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์พันด้วยขดลวดที่มีอยู่โดยทั่วไป

1.2 แนวความคิดที่ทำให้เราเชื่อว่ามีความเป็นไปได้

เป็นที่ทราบกันว่าอุปกรณ์แปรรูปพลังงานไฟฟ้ากลศาสตร์ ไม่ว่าจะมิชชุดขดลวดที่ชุดก็ตามในการวิเคราะห์เราสามารถมองเป็น ระบบกระตุ้นเดี่ยว (singly-excited system) หรือ ระบบกระตุ้นคู่ (doubly-excited system) มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้กันทั่วไปเข้ากับลักษณะระบบกระตุ้นเดี่ยว เนื่องจากเราจ่ายพลังงานให้กับชุดขดลวดสเตเตอร์ และอาศัยหลักการเหนี่ยวนำเพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าที่โรเตอร์ ส่วนมอเตอร์ซิงโครนัสมีลักษณะกระตุ้นคู่ คือนอกจากจะป้อนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเข้าที่สเตเตอร์ (เหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ) ยังมีการจ่ายพลังงาน ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่โรเตอร์ด้วย [1],[4]



รูป 1.1 ลักษณะสนามแม่เหล็กหมุน เครื่องจักร 2-ขั้ว 3-เฟส [8]

เป็นที่ทราบกันว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3-เฟส เมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับสเตเตอร์ ผลที่ได้ก็คือ สนามแม่เหล็กหมุนซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านขดลวดแต่ละเฟส ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาในลักษณะไซน์ซายด์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามกระแส ผลรวมสนามแม่เหล็กของทั้ง 3-เฟส ดูคล้ายกับมีการหมุนของขั้วแม่เหล็กถาวร แต่ในความจริงสนามแม่เหล็กหมุนเกิดจากตำแหน่งของเส้นแรงแม่เหล็กลัพธ์ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามกระแส ส่วนการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงไม่ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน เราทราบว่าความเร็วในการหมุนของโรเตอร์มีความสัมพันธ์กับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นตามความสัมพันธ์นี้ [7]

$$w_m = w_s - w_r$$

.....1.1

เมื่อ

w_m : ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์

w_s : ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนจาสเตเตอร์เทียบกับสเตเตอร์

w_r : ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนจากโรเตอร์เทียบกับโรเตอร์

มอเตอร์ซิงโครนัสโรเตอร์ป้อนด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้ $w_r = 0$ ดังนั้น $w_m = w_s$ ส่วนมอเตอร์เหนี่ยวนำโรเตอร์ทำงานด้วยเงื่อนไขต้องมีการสลิปของความเร็ว นั่นคือ $w_r < w_s$ จึงจะมีการหมุนของโรเตอร์ดังสมการ 1.1 ถ้าหากเราสามารถทำให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วมากกว่า w_s หมายความว่า w_r จะเป็นลบ สนามแม่เหล็กหมุนมีความเร็วที่น้อยกว่าความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ วิธีการทำคือ เพิ่มการป้อนกำลังไฟฟ้าเข้าที่โรเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุนของโรเตอร์เอง แต่กลับลำดับเฟสที่โรเตอร์เพื่อให้ทิศของ w_r เสริมกับ w_s ผลที่ได้เมื่อพิจารณาจากสมการ 1.1 ก็คือ w_m มีค่ามากกว่า w_s แต่ความเร็ว w_m ที่ใช้ต้องเป็นความเร็วที่สามารถก่อให้เกิดการสร้างแรงบิดอย่างต่อเนื่องที่เพลลาของโรเตอร์ หากเราใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของสเตเตอร์ กับโรเตอร์แหล่งเดียวกัน แต่กลับลำดับเฟสของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนพร้อมปรับแต่งแรงดัน และกระแสที่ต้องป้อนให้สเตเตอร์กับโรเตอร์ เราจะได้ w_m มีค่าเป็นสองเท่าของความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนในอวกาศ

1.3 วิธีการ และประโยชน์

วิธีการกล่าวอย่างง่าย ๆ คือ นำมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้งานอยู่ทั่วไปมาทดสอบแนวความคิดดังกล่าวมาทดสอบด้วยการประยุกต์ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟฟ้วิธีการทดสอบจะไม่กล่าวถึงในบทนี้ ผลที่ได้คือมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถรับภาระได้สูงขึ้น เนื่องจากความเร็วที่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของโรเตอร์ตามความสัมพันธ์ของกำลังเอาต์พุท ซึ่งขึ้นกับแรงบิด และความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ดังสมการ

$$P_{op} = T_{shaft} * w_m$$

..... 1.2

ผลอีกอย่างที่ได้คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบป้อนกำลังไฟฟ้คู่นี้ ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์คงที่ทุกภาระที่ได้รับ ยกเว้นกรณีเกิดการรับภาระเกิน หมายความว่าเราสามารถใช่มอเตอร์เหนี่ยวนำในลักษณะของมอเตอร์ซิงโครนัส เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำมีราคาถูกลงกว่า การบำรุงรักษาสะดวก มีปัญหาน้อย หากได้รับการออกแบบที่เหมาะสม เราอาจได้มอเตอร์ซิงโครนัสที่อยู่ในรูปแบบโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งข้อดีต่าง ๆ ของโครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำได้กล่าวถึงมาแล้ว แต่ที่สำคัญคือ เราสามารถเพิ่มการรับภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปได้

หมายเหตุ ภาวะของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้องกันกำลังไฟคู่ที่ใช้ในการทดลอง คือ ภาวะทางไฟฟ้าโดยตรง โดยนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมาต่อกับเพลลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การแปรรูปพลังงานไฟฟ้า-กลศาสตร์

พลังงาน คือ ความสามารถในการทำงาน ในระบบกลศาสตร์ มวลใด ๆ อาจมีพลังงานได้ 2 ลักษณะ คือ [1],[4]

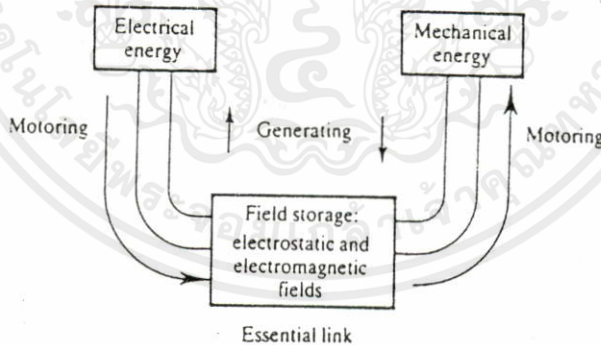
- ก) พลังงานศักย์ เนื่องจากตำแหน่งของวัตถุ
- ข) พลังงานจลน์ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของวัตถุ

ในทำนองเดียวกัน ประจุไฟฟ้ามีพลังงาน 2 ลักษณะเช่นกัน คือ [1],[4]

- ก) ประจุไฟฟ้าสถิตย์ (ประจุไฟฟ้านิ่ง) มีผลสร้างสนามไฟฟ้าสถิตย์ มีพลังงานไฟฟ้าสถิตย์ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้า
- ข) ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ (เช่น กระแสไฟฟ้า) มีผลสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า มีพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุ

2.1 เครื่องแปรรูปพลังงานไฟฟ้า-กลศาสตร์

เครื่องแปรรูปพลังงานไฟฟ้า-กลศาสตร์ คือ อุปกรณ์ซึ่งสามารถแปรรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลศาสตร์ ในทางกลับกันก็สามารถแปรรูปพลังงานกลศาสตร์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้เช่นกัน ตามรูป 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของห่วงโซ่พลังงาน ในการแปรรูปพลังงานอาศัยสนามแม่เหล็ก หรือสนามไฟฟ้าเป็นตัวกลาง



รูป 2.1 การแปรรูปพลังงานไฟฟ้ากลศาสตร์ [4]

ส่วนประกอบทางกลศาสตร์ถูกทำให้เคลื่อนที่ไต่งานเชิงกลศาสตร์ ภายใต้แรงซึ่งถูกสร้างขึ้นมาจากพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าเป็นตัวกลาง ถ้าไม่มีการจ่ายพลังงานให้กับสนามทั้งสองด้วยแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นต่อไปจนกระทั่งแรงทางกลศาสตร์เป็นศูนย์ (การเคลื่อนที่สิ้นสุดลง) หรือส่วนที่เคลื่อนที่ได้ไปถึงจุดสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ที่ยอมให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ ในกรณีการใช้งานเครื่องจักรหมุน

อย่างต่อเนื่องที่สภาวะคงตัว (steady-state operation) พลังงานจากสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าถูกดูดกลืนเข้าไปเพื่อสร้างงานอย่างต่อเนื่อง สนามพลังงานจะถูกแทนที่โดยพลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายให้ [1],[4]

กระบวนการทำนองเดียวกันนี้ เกิดขึ้นกับการแปรรูปพลังงานกลศาสตร์เป็นพลังงานไฟฟ้า ในกรณีนี้จำเป็นต้องมีสนามแม่เหล็ก หรือสนามไฟฟ้าก่อนจะเกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้า เพื่อให้ได้แรงดันที่สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้บางครั้งเราอาจไม่สามารถใช้อุปกรณ์แปรรูปพลังงานในการแปรรูปพลังงานกลับไปกลับมาได้ ในกรณีที่สนามแม่เหล็กหายไปขณะจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกจากอุปกรณ์นั้น [1],[4]

2.1.1 การคงค่าพลังงาน

ในระบบใดก็ตาม พลังงานสามารถเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบหนึ่งไปอีกรูปแบบหนึ่ง จากแหล่งจ่ายพลังงานไปสู่ตัวใช้พลังงาน แต่ไม่อาจเพิ่มขึ้น หรือลดลงไปได้เอง พลังงานรวมในระบบมีค่าคงที่เสมอ ในการเขียนสมการพลังงานของอุปกรณ์แปรรูปพลังงาน พลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบเท่ากับผลรวมของพลังงานต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ พลังงานสูญเสียในรูปต่าง ๆ พลังงานสะสมในรูปสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก และ พลังงานที่ได้ออกมาใช้ ตามความสัมพันธ์ [1],[4]

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้า} &= \text{พลังงาน} + \text{พลังงานสะสม} + \text{พลังงานแปรรูป} \\ \text{ป้อนเข้าระบบ} & \quad \text{สูญเสีย} \quad \text{ในรูป E กับ B} \quad \text{ไฟฟ้ากลศาสตร์} \\ W_e &= W_{le} + W_{fe} + W_{em} \end{aligned} \quad \dots 2.1$$

พลังงานซึ่งแปรรูปจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลศาสตร์ไม่ได้ถูกใช้งานจริงทั้งหมด มีการสูญเสียทางกลศาสตร์เนื่องจากความฝืด และบางส่วนสะสมในรูปพลังงานกลศาสตร์ในลักษณะของพลังงานจลน์ หรือพลังงานศักย์ [1],[4]

$$W_m = W_{em} - W_{lm} - W_{sm} \quad \dots 2.2$$

นำค่า W_m ตามสมการ 2.2 แทนลงในสมการ 2.1 [1],[4]

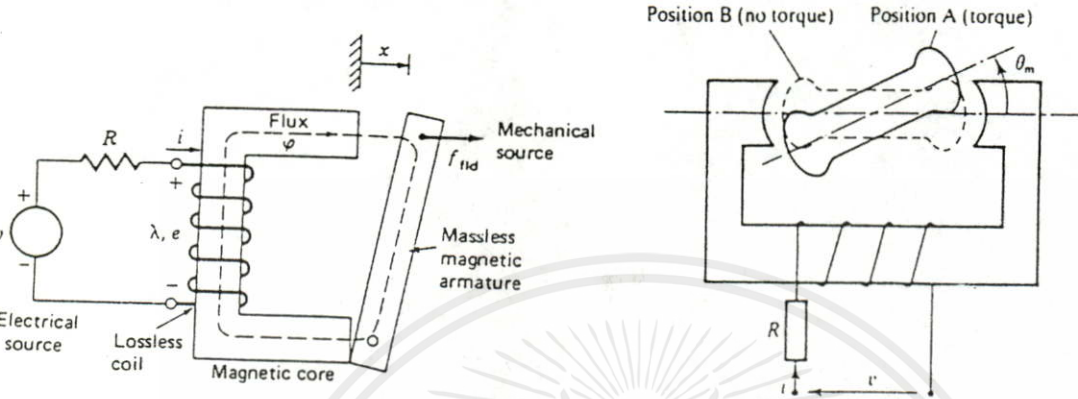
$$W_e = (W_{le} + W_{lm}) + (W_{fe} + W_{sm}) + W_m \quad \dots 2.3$$

ส่วนสูญเสีย ส่วนสะสม ส่วนใช้งาน

ในทำนองเดียวกัน สมการของอุปกรณ์แปรรูปพลังงานกลศาสตร์เป็นพลังงานไฟฟ้า สามารถเขียนได้เป็น [1],[4]

$$W_m = (W_{le} + W_{lm}) + (W_{fe} + W_{sm}) + W_e \quad \dots 2.4$$

ไฟฟ้าเป็นพลังงานกลศาสตร์ หรือพลังงานกลศาสตร์เป็นพลังงานไฟฟ้า) มอเตอร์ไฟฟ้า หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกชนิดจัดเป็นเครื่องแปรรูปพลังงานไฟฟ้ากลศาสตร์ (electromechanical energy converter) ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วนคือ 1) ระบบทางไฟฟ้า 2) ระบบทางกลศาสตร์ และ 3) สนามเชื่อมระบบ แสดงตัวอย่างพื้นฐานได้ดังรูป 2.2 [4]



ก) รีเลย์แม่เหล็กไฟฟ้า [6] (ข) ระบบกระตุ้นเดี่ยวชนิดหมุน [4]

รูป 2.3 ตัวอย่างระบบกระตุ้นเดี่ยว

2.2 ระบบกระตุ้นเดี่ยว (Singly-Excited Systems)

รูป 2.3 ก แสดงรีเลย์ชนิดอาร์มาเจอร์ดึงดูด (armature-attracted-type relay) อันเป็นลักษณะพื้นฐานของระบบกระตุ้นเดี่ยว R เป็นความต้านทานของชุดขดลวดกระตุ้น ตัวแปรเชิงกลมีค่าการขจัด x กับ แรง f_{fld} ซึ่งสร้างจากสนามแม่เหล็ก ความสูญเสียเชิงกลสามารถเขียนในรูปส่วนประกอบภายนอกที่นำมาต่อ และถือว่าส่วนที่เคลื่อนที่ไม่มีมวล ส่วนรูป 2.3 ข แสดงถึงระบบกระตุ้นเดี่ยวอีกแบบหนึ่งที่สามารถหมุนได้ โรเตอร์เป็นสารแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรพายรามจัดตัวเองให้อยู่ตำแหน่งที่มีค่าความต้านทานแม่เหล็กน้อยที่สุดตามแนวของเส้นแรงแม่เหล็ก หมายความว่า แรงบิดบนโรเตอร์เกิดขึ้นในทิศทางที่จะเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก ความต้านทานแม่เหล็กขึ้นอยู่กับมุมของโรเตอร์ เรียกแรงบิดแบบนี้ว่า แรงบิด รีลัคแตนซ์ (reluctance torque) และ เรียกโรเตอร์แบบนี้ว่าโรเตอร์ชนิดมีชั่วชาเลียนท์ เราจะเห็นได้ว่าถ้าโรเตอร์มีลักษณะเป็นทรงกระบอกตันจะไม่มีแรงบิดชนิดนี้ [1],[4]

การวิเคราะห์ระบบกระตุ้นเดี่ยวขั้นต้นจะใช้โรเตอร์ดังรูป 2.3 ข เป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์ตามข้อกำหนดสำหรับระบบดังนี้ [1],[4]

- 1) ในวงจรแม่เหล็กของโรเตอร์ และสเตเตอร์ มีความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็ก และกระแสมีลักษณะเชิงเส้น ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
- 2) ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นโดยขดลวดจะเกี่ยวคัล้องชุดขดลวด และอยู่ภายในวงจรแม่เหล็กทั้งหมด

3) ขดลวดมีความแข็งแรงทางกลศาสตร์ไม่มีการยืดหรือหดตัว อันเนื่องจากแรงทางไฟฟ้าแม่เหล็กที่เกิดขึ้น หากไม่ใช่ข้อกำหนดนี้ความเหนียวน่าจะเปลี่ยนแปลงที่กระแสต่างกัน และต้องคำนึงถึงพลังงานทางกลศาสตร์ที่เกิดจากการยืดตัว (หรือหดตัว) ของขดลวดซึ่งสะสมในขดลวด

4) ไม่คิดถึงผลจากฮิสเทอรีซิส และ กระแสไหลวนในแกนเหล็ก (hysteresis losses and eddy current losses)

5) ผลของพลังงานที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถตัดผลของพลังงานที่เกิดจากสนามไฟฟ้าทิ้งได้

ชุดขดลวดความต้านทาน R โอห์ม เขียนสมการแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้ [4]

$$v = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \quad \dots 2.5$$

คูณด้วยกระแส i [4]

$$vi = Ri^2 + i \frac{d\lambda}{dt} \quad \dots 2.6$$

อินทิเกรตเทียบกับเวลา จาก $t=0$ ถึง $t=t$ กำหนดให้ขณะเริ่มต้น กระแส และเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องล่องเป็นศูนย์ [4]

$$\int_0^t v i dt = \int_0^t Ri^2 dt + \int_0^\lambda i d\lambda \quad \dots 2.7$$

และ

$$\begin{matrix} \text{total electrical} & = & \text{energy to} & + & \text{useful electrical} \\ \text{input energy} & & \text{electrical losses} & & \text{input energy} \end{matrix}$$

จากสมการ 2.1 จะได้

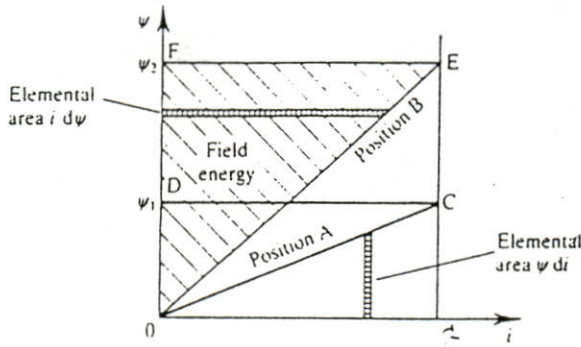
$$\int_0^\lambda i d\lambda = w_{fe} + w_{em} \quad \dots 2.8$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2.2.1 กรณีจ่ายพลังงานสู่ระบบขณะไม่เคลื่อนที่ (static energization) การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูป 2.3 ข ตำแหน่งต่าง ๆ ของโรเตอร์สามารถเขียนความสัมพันธ์ของเส้นแรงแม่เหล็ก

เกี่ยวข้องล่องกับกระแสได้ดังรูป 2.4 [4]



รูป 2.4 ความสัมพันธ์เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับกระแส [4]

ตำแหน่ง A : โรเตอร์ทำมุมกับแกนขั้วของสเตเตอร์

ตำแหน่ง B : โรเตอร์อยู่ในแกนขั้วของสเตเตอร์

หากมีการอ้อมตัวในแกนเหล็กมีผลทำให้การเพิ่มของเส้นแรงแม่เหล็กไม่คงที่ ในขณะที่ช่องอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลง ทำให้ความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเชิงเส้นมากขึ้น ตำแหน่ง A แนวการวางตัวของโรเตอร์เฉียงอยู่จะทำให้เกิดแรงบิดขึ้น โดยมีทิศทางดังรูป 2.3 ข เมื่อโรเตอร์หมุนไปจนกระทั่งแนวการวางตัวอยู่ตำแหน่ง B สนามแม่เหล็กทั้ง 2 ด้านของแนวแกนขั้วแม่เหล็กจะเหมือนกัน และไม่เกิดแรงบิด ขณะไม่มีการเคลื่อนที่ จะไม่มีการจ่ายพลังงานกลศาสตร์ของระบบ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบทั้งหมดจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็ก [1],[4]

$$\text{พลังงานไฟฟ้า} = \int_0^i i d\lambda = W_{fe} \quad \dots 2.9$$

จากรูป 2.4 พลังงานสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น W_{fe} คือพลังงานที่เกิดขึ้นขณะกระแสเพิ่มจาก 0 ถึง i สามารถแทนค่าการอินทิเกรตด้วยพื้นที่จากกราฟ ตำแหน่ง A พลังงานสนามแม่เหล็กคือ OCDO ส่วนตำแหน่ง B พลังงานสนามแม่เหล็กคือ OEFO [4]

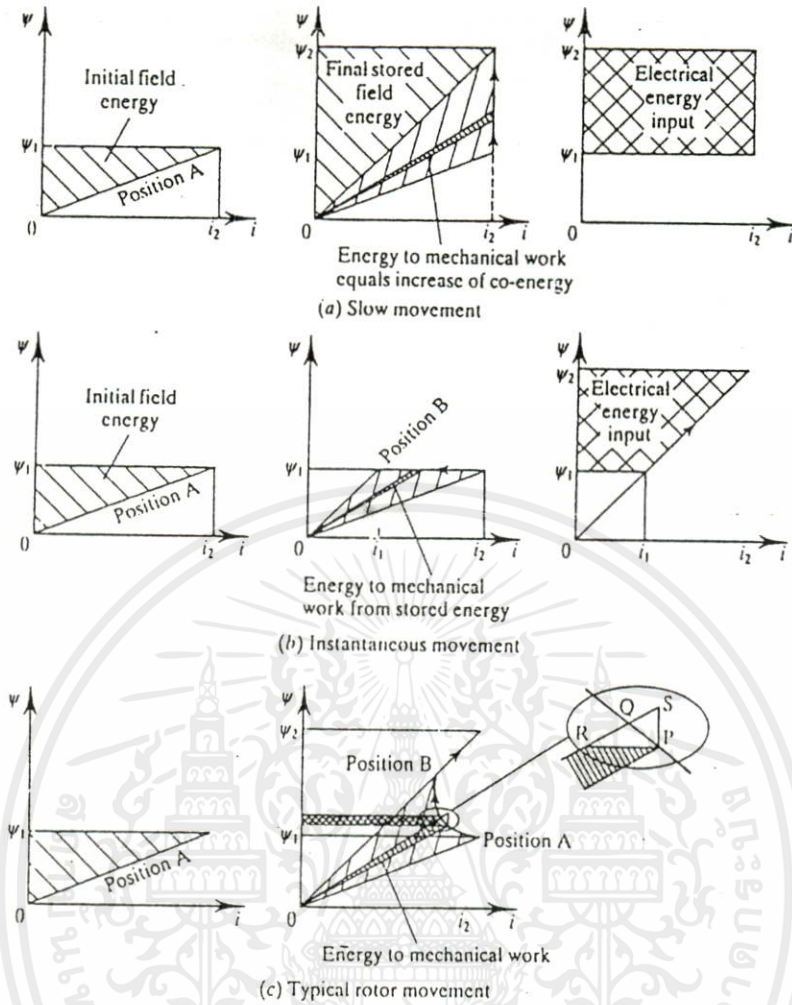
กำหนดนิยามพลังงานเทียบของสนามแม่เหล็ก (Co-Energy) เป็นพื้นที่ใต้เส้นความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับกระแส ใช้สัญลักษณ์ W'_{fe} [4]

$$\text{Co-Energy} = W'_{fe} = \int_0^i \lambda di \quad \dots 2.10$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนั้น อีกทั้งห้ามให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่ง A : พลังงานเทียบของสนามแม่เหล็ก คือพื้นที่ OCDO

ตำแหน่ง B : พลังงานเทียบของสนามแม่เหล็ก คือพื้นที่ OEFO



รูป 2.5 พลังงานที่เงื่อนไขต่าง ๆ ในระบบกระตุ้นเดี่ยว[4]

2.2.2 การกระตุ้นขณะเกิดการเคลื่อนที่ (dynamic energization)

ก่อนพิจารณาการทำงานสภาวะชั่วคราวของอุปกรณ์ ควรพิจารณา 2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ที่มีประโยชน์มาก คือ โรเตอร์เคลื่อนที่ช้า ๆ กับ โรเตอร์เคลื่อนที่ทันทีทันใดจากตำแหน่งหนึ่งไปอีกตำแหน่งหนึ่ง [1],[4]

1) เคลื่อนที่ช้า (slow movement) ถ้าโรเตอร์เคลื่อนที่ช้ามากทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับเวลา มีค่าน้อย จนสามารถมองดูว่ากระแส i คงที่ กำหนดให้เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับเพิ่มขึ้นจาก λ_1 เป็น λ_2 โดย i_2 คงที่ [1],[4]

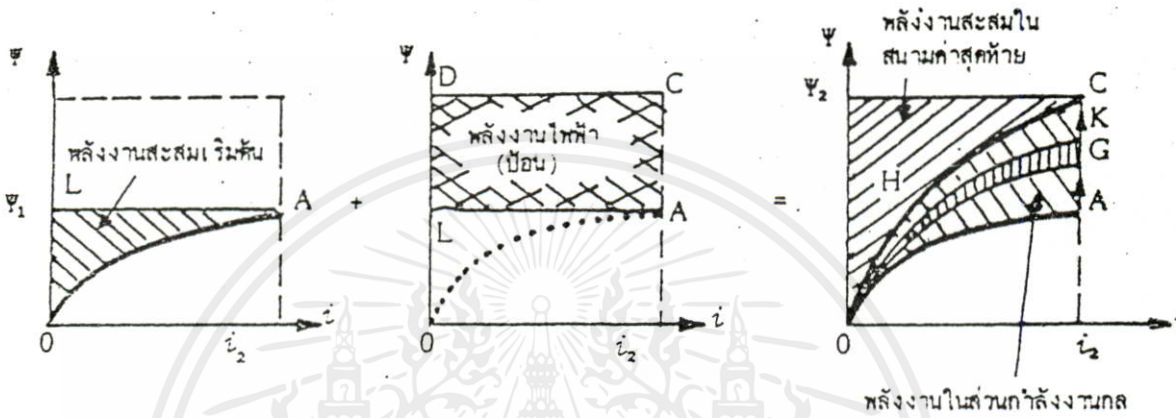
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i_2 d\lambda = i_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda = i_2 (\lambda_2 - \lambda_1) \quad \dots 2.11$$

จากรูป 2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานสนามแม่เหล็ก งานทางกลศาสตร์หาได้จากอัตรา
การเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานที่ป้อนเข้าระบบ กับการเปลี่ยนแปลงของพลังงานสนามแม่
เหล็ก เท่ากับพื้นที่ OACHO ค่าเฉลี่ยของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าขณะเคลื่อนที่ T_e

$$T_e = \text{งานทางกลศาสตร์} = \text{พื้นที่ OACHO}$$

การเคลื่อนที่เชิงมุม การเคลื่อนที่เชิงมุม



ก) ตำแหน่ง A ข) พลังงานไฟฟ้าที่ป้อน ค) งานที่ได้ทางกลศาสตร์
รูป 2.6 การเคลื่อนที่ซ้ำ[1]

พิจารณาการเปลี่ยนมุมเล็กน้อย θ ขณะเคลื่อนที่งานทางกลศาสตร์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เท่ากับ
พื้นที่รูป OGKO ในรูป 2.6 [1],[4]

$$T_e = \lim \left[\frac{\text{พื้นที่ OGKO}}{\omega} \right]$$

พื้นที่รูป OGKO คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเทียบสนามแม่เหล็กขณะการเคลื่อนที่
เป็นมุม θ [1],[4]

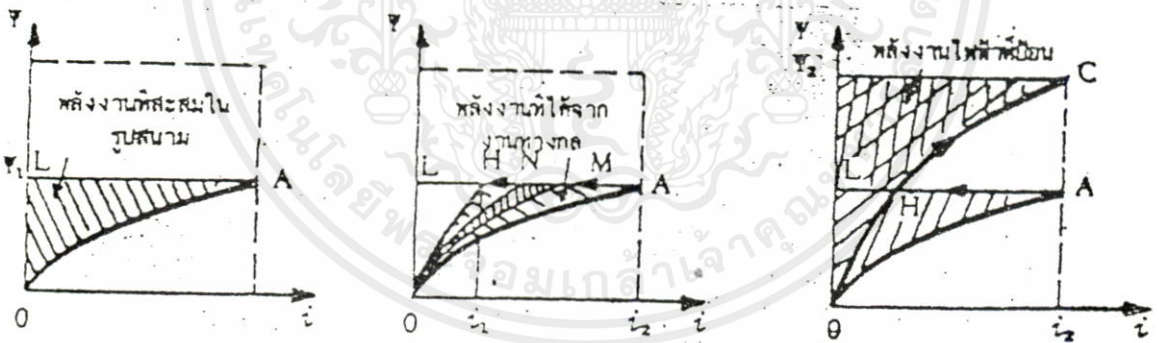
$$T_e = \lim \left[\frac{\partial w_{fe}}{\partial \theta} \right]_{\text{consti}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_e = \left[\frac{\partial w_{fe}}{\partial \theta} \right]_{\text{consti}}$$

.....2.12

2) การเคลื่อนที่แบบทันทีทันใด (instantaneous movement) กำหนดให้โรเตอร์เคลื่อนที่อย่างทันทีทันใด จากตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง B ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นเป็นอนันต์ ด้วยเหตุนี้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงตามให้ทันได้ทันที ในความเป็นจริงถ้าการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เป็นไปอย่างรวดเร็วแต่ไม่ถึงกับทันทีทันใด จะมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเล็กน้อย และเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันสูงขึ้นในขดลวด แรงดันที่เกิดขึ้นทำให้กระแสที่ไหลในวงจรเปลี่ยนแปลงในลักษณะต่อต้านเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมาใหม่ ในการใช้งานผลของการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กมีผลกระทบน้อยมาก จนกระทั่งสามารถตัดทิ้งไม่นำมาคิด หลักการกำหนดไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเรียกว่า ทฤษฎีเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้งคงตัว สามารถนำมาใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของกระแสในขดลวดวงจรต่าง ๆ ที่มีการไหลของกระแสอย่างทันทีทันใด หรือวิเคราะห์การจัดการเคลื่อนที่ของขดลวดชุดใดชุดหนึ่งในจำนวน 2 ชุดของวงจรต่อเนื่องแม่เหล็กไฟฟ้า ตามรูป 2.7 ข กระแสในขดลวดลดลงจาก i_2 เป็น i_1 ในขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้งคงที่ เมื่อโรเตอร์ถูกยึดอยู่ตำแหน่ง B ค่าของกระแส และเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้งค่อย ๆ เพิ่มขึ้นสู่ค่าคงที่ i_2 และ λ_2 ดังรูป 2.7 ค ในระยะเวลาที่พลังงานสนามแม่เหล็กสะสม ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นโดยมีขนาดเท่ากับพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ในขณะที่โรเตอร์เคลื่อนที่อย่างทันทีทันใดจะไม่มีกระแสพลังงานเข้าสู่ระบบเพราะ $i \frac{d\lambda}{dt} = 0$ พลังงานกลศาสตร์ได้จากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานสนามแม่เหล็กสะสม ในรูป 2.7 ข พิจารณาแรงบิด ในทำนองเดียวกับกรณีการเคลื่อนที่ช้า[1],[4]



(ก) ตำแหน่ง A (ข) งานทางกลศาสตร์ (ค) พลังงานไฟฟ้าที่ป้อน
รูป 2.7 โรเตอร์เคลื่อนที่ทันทีทันใด [1]

$$T_e = \lim_{\infty} \left[\frac{\text{พื้นที่ OMNO}}{\infty} \right]$$

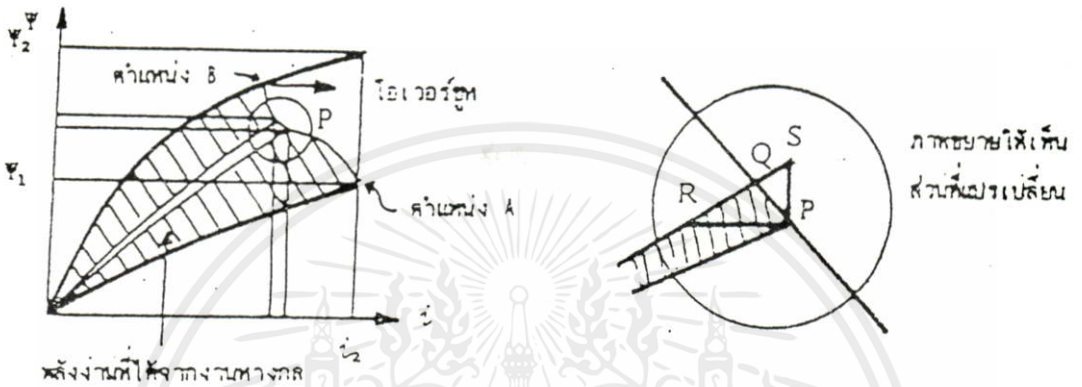
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
พื้นที่รูป OMNO เท่ากับ พลังงานสะสมของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปขณะการเคลื่อน
ที่ ∞ [1],[4]

$$T_e = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left[\frac{\partial w_{fe}}{\partial \theta} \right]_{\text{const.}}$$

เครื่องหมายลบของสมการบอกถึง การลดลงของพลังงานสะสมในรูปสนามแม่เหล็กขณะเกิดการเคลื่อนที่ [1],[4]

$$T_e = \left[\frac{\partial w_{fe}}{\partial \theta} \right]_{\text{const.}}$$

.....2.13



รูป 2.8 เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับกระแสสำหรับการเคลื่อนที่โรเตอร์ [1]

3) การเคลื่อนที่แบบทรานเซียน (transient movement) โดยทั่วไประหว่างการเคลื่อนที่แบบนี้ กระแส และเส้นแรงแม่เหล็กพอจะเปลี่ยนแปลงได้ทัน ตามรูป 2.8 แสดงตัวอย่างการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จากตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง B และเลยออกไปโดยลักษณะโอเวอร์ชูต (overshoot) จากพลังงานจลน์ งานทางกลศาสตร์สามารถหาค่าได้จากการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ทั้งสองแบบ คือ การเคลื่อนที่ช้า กับการเคลื่อนที่ทันทีทันใด [1],[4]

ตามรูป 2.8 ส่วนย่อยการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ PQ พลังงานที่เปลี่ยนเป็นงานทางกลศาสตร์คือพื้นที่ OPQO ซึ่งสามารถคิดโดยการเคลื่อนที่ที่จุด P โดยการควบคุมตัวแปรตามพื้นที่ที่ OPRO เป็นการเคลื่อนที่โดยให้เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องคงที่ ส่วนพื้นที่ OPSO เป็นการเคลื่อนที่โดยให้กระแสคงที่ เราจึงแบ่งคิดแรงบิดเป็น 3 กรณี [1],[4]

ก) การเคลื่อนที่ที่จริง

$$T_e = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left[\frac{\text{พื้นที่ OPQO}}{\omega} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ข) สมมติการเคลื่อนที่โดยมีกระแสคงที่
เมื่อกำลังเข้าที่เพิ่มขึ้น ออกที่หายไปเล็กน้อย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_e = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left[\frac{\text{พื้นที่ OPSO}}{\omega} \right] = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left[\frac{\text{พื้นที่ OPQO} + \text{พื้นที่ PQSP}}{\omega} \right]$$

ค) สมมติการเคลื่อนที่โดยมีเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับ

$$T_e = \lim \left[\frac{\text{พื้นที่OPRO}}{\partial} \right] = \lim \left[\frac{\text{พื้นที่OPQO} - \text{พื้นที่PQRP}}{\partial} \right]$$

ขณะที่ลิมิต ∂ เข้าใกล้ 0 พื้นที่รูป PQSP และพื้นที่รูป PQRP สูญหายไป ดังนั้นค่าสมการแรงบิดจะกลายเป็นสมการร่วมเดิม [1]

$$T_e = \frac{dw'_{fe}}{d\theta} = - \frac{dw_{fe}}{d\theta} \quad \dots 2.14$$

จากสมการ 2.22 สามารถคำนวณค่าของแรงบิดที่มุม θ ใด ๆ จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงาน หรือพลังงานเทียบ ขณะเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขกระแส หรือ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับ ซึ่งสามารถทำได้ง่าย เพราะฟังก์ชันของพลังงานสนาม และพลังงานสนามเทียบอยู่ในรูปของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับ และกระแส [1]

ถ้าสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง λ, i และ θ ได้เราอาจเขียนสมการพลังงานสนามเทียบได้ในรูปของ (i, θ) หรือ (λ, θ) [1]

$$\text{พลังงานสนามเทียบ} = W'_{fe}$$

$$T_e = \frac{\partial w'_{fe}(i, \theta)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{d\theta} + \frac{\partial w'_{fe}(i, \theta)}{\partial i} \frac{di}{d\theta} \quad \dots 2.15$$

ภายใต้เงื่อนไข $di/d\theta = 0$ [1],[4]

$$T_e = \left[\frac{\partial w'_{fe}(i, \theta)}{\partial \theta} \right]_{\text{const } i} \quad \dots 2.16$$

ภายใต้เงื่อนไขเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับ $dw/d\theta = 0$ [1],[4]

$$T_e = \left[\frac{\partial w_{fe}(\lambda, \theta)}{\partial \theta} \right]_{\text{const } \lambda} \quad \dots 2.17$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หมายเหตุ สมการ 2.26 ต้องจัดตัวแปรในรูป i กับ θ เท่านั้น [1],[4]

สมการ 2.27 ต้องจัดตัวแปรในรูป λ กับ θ เท่านั้น [1],[4]

2.2.3 ลักษณะเชิงเส้นในระบบกระตุ้นเดี่ยว

$$\lambda = Li$$

..... 2.18

L เป็นความเหนี่ยวนำ ไม่ขึ้นกับกระแส แต่เป็นฟังก์ชันของมุม θ [1],[4]

$$w_{fe} = \int_0^\lambda i d\lambda = \int_0^\lambda \lambda d\lambda = \frac{\lambda^2}{2L}$$

จากสมการ 2.18 สามารถเขียนพลังงานสนามแม่เหล็กได้เป็น [1],[4]

$$w_{fe} = \frac{\lambda^2}{2L} = \frac{Li^2}{2} = \frac{\lambda i}{2}$$

.....2.19

พลังงานเทียบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [1],[4]

$$w'_{fe} = \int_0^i \lambda di = \int_0^i Li di = \frac{Li^2}{2}$$

เราจะเห็นได้ว่าในระบบแม่เหล็กเชิงเส้น พลังงานสนามแม่เหล็กเท่ากับ พลังงานเทียบสนามแม่เหล็ก [1],[4]

$$w_{fe} = w'_{fe} = \frac{Li^2}{2} = \frac{\lambda i}{2} = \frac{\lambda^2}{2L}$$

.....2.20

แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบแม่เหล็กเชิงเส้น [1],[4]

$$T_e = \left[\frac{\partial w'_{fe}(i, \theta)}{\partial \theta} \right]_{const i} = \left[\frac{\partial [Li^2 / 2]}{\partial \theta} \right]_{const i} = \frac{i^2}{2} \frac{\partial L}{\partial \theta}$$

เนื่องจากความเหนี่ยวนำ L ไม่เป็นฟังก์ชันของกระแส i [1],[4]

$$T_e = \frac{i^2}{2} \frac{dL}{d\theta}$$

.....2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าจากสื่อที่ใดก็ตาม อีกหนึ่งข้อมติให้ดูปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v = Ri + d(Li)/dt = Ri + (Ldi/dt) + (i dL/dt)$$

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\theta_m} \frac{d\theta_m}{dt} \quad \dots 2.22$$

คูณด้วยกระแส i และ อินทิเกรตกับเวลา [1],[4]

$$\int v i dt = \int i^2 R dt + \int i L dt + \int i^2 \frac{dL}{d\theta_m} d\theta_m \quad \dots 2.23$$

จามสมการ 2.21 พลังงานเนื่องจากการเคลื่อนที่ด้วยมุมน้อย ๆ $d\theta$

$$T_e d\theta = \frac{i^2}{2} \frac{dL}{d\theta} d\theta \quad \dots 2.24$$

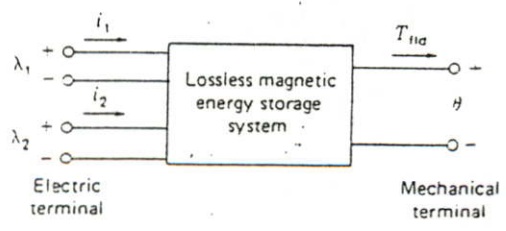
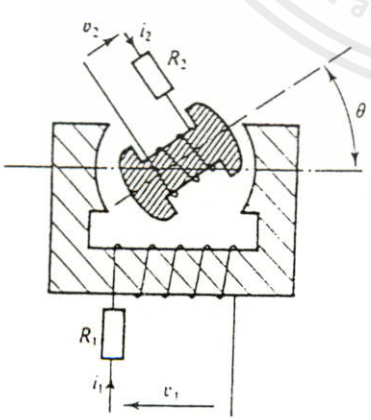
แทนค่าลงในสมการ 2.23

$$\int v i dt = \int i^2 R dt + \int i L dt + \int \frac{i^2}{2} \frac{dL}{d\theta_m} d\theta_m + \int T_e d\theta_m \quad \dots 2.25$$

(1) (2) (3) (4) (5)

เทอมต่าง ๆ ในสมการมีความหมายดังนี้

- (1) input from supply
- (2) resistive loss
- (3)+(4) energy to electromagnetic field storage
- (5) energy to mechanical work



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) ระบบกระตุ้นคู่แบบหมุน [4] (ข) ไดอะแกรมลักษณะระบบแม่เหล็ก[6]

รูป 2.9 ลักษณะระบบกระตุ้นคู่

2.3 ระบบกระตุ้นคู่ (Doubly Excited System)

ในการวิเคราะห์ระบบกระตุ้นคู่ ตามรูป 2.9 ก กำหนดให้ทั้งสเตเตอร์ และโรเตอร์มีลักษณะขาลีเนียนซี วงจรในขดลวดทั้งสองต่างก็มีเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำของตนเอง และเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำร่วมระหว่างขดลวด เพื่อลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์จึงกำหนดให้เส้นแรงแม่เหล็กเป็นอิสระต่อกัน มีลักษณะเชิงเส้น และเส้นแรงแม่เหล็กเป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้า ด้วยข้อกำหนดเหล่านี้ เราสามารถคิดลักษณะแยกซ้อนได้ ส่วนข้อกำหนดอื่นเหมือนกับระบบกระตุ้นเดี่ยวในหัวข้อ 2.2 ที่กล่าวมาแล้ว สมการเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำของขดลวดทั้งสอง [1],[4]

$$\lambda_1 = L_1 i_1 + M i_2 \quad \dots 2.26$$

$$\lambda_2 = L_2 i_2 + M i_1 \quad \dots 2.27$$

สมการแรงดันขณะใดขณะหนึ่งของขดลวด [1],[4]

$$v_1 = R_1 i_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} \quad \dots 2.28$$

$$v_2 = R_2 i_2 + \frac{d\lambda_2}{dt} \quad \dots 2.29$$

แทนค่า λ_1, λ_2 จากสมการ 2.26 กับ 2.27 [1],[4]

$$v_1 = R_1 i_1 + \frac{dL_1 i_1}{dt} + \frac{dM i_2}{dt} \quad \dots 2.30$$

$$v_2 = R_2 i_2 + \frac{dL_2 i_2}{dt} + \frac{dM i_1}{dt} \quad \dots 2.31$$

กำหนดให้ความเหนี่ยวนำไม่ขึ้นกับกระแส แต่ขึ้นกับตำแหน่งเชิงมุม θ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา ในทำนองเดียวกันกระแสไม่เป็นฟังก์ชันของความเหนี่ยวนำแต่ขึ้นกับเวลา [1],[4]

$$v_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{dL_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{dM}{dt} \quad \dots 2.32$$

$$v_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{dL_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{dM}{dt} \quad \dots 2.33$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 คุณสมการที่ 2.32 ด้วย i_1 และ คุณสมการที่ 2.33 ด้วย i_2 จะได้สมการของพลังงานไฟฟ้า
 ที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดทั้งสอง [1],[4]

$$v_1 i_1 = R_1 i_1^2 + L_1 i_1 \frac{di_1}{dt} + i_1^2 \frac{dL_1}{dt} + M i_1 \frac{di_2}{dt} + i_1 i_2 \frac{dM}{dt} \quad \dots 2.34$$

$$v_2 i_2 = R_2 i_2^2 + L_2 i_2 \frac{di_2}{dt} + i_2^2 \frac{dL_2}{dt} + M i_2 \frac{di_1}{dt} + i_1 i_2 \frac{dM}{dt} \quad \dots 2.35$$

อินทิเกรตสมการ 2.34 และ 2.35 เทียบกับเวลา แล้วนำมารวมกัน จะได้สมการสมดุลพลังงาน

$$\int [v_1 i_1 + v_2 i_2] dt = \int [R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2] dt + \int [L_1 i_1 di_1 + L_2 i_2 di_2 + i_1 M di_2 + 2i_1 i_2 dM + i_1^2 dL_1 + i_2^2 dL_2 + i_2 M di_1] \quad \dots 2.36$$

จากสมการ 2.1

$$\text{electrical energy input} = \int [v_1 i_1 + v_2 i_2] dt \quad \dots 2.37$$

$$\text{energy losses} = \int [R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2] dt \quad \dots 2.38$$

$$\begin{array}{l} \text{energy to} \\ \text{field storage} \\ \text{in electrical} \\ \text{system} \end{array} + \begin{array}{l} \text{electrical} \\ \text{to} \\ \text{mechanical} \\ \text{energy} \end{array} = \int [L_1 i_1 di_1 + L_2 i_2 di_2 + i_1 M di_2 + 2i_1 i_2 dM + i_1^2 dL_1 + i_2^2 dL_2 + i_2 M di_1] \quad \dots 2.39$$

2.3.1 พลังงานสะสมในรูปสนามแม่เหล็ก (storage energy in magnetic field)

พลังงานสะสมในรูปสนามแม่เหล็ก ณ ขณะใดขณะหนึ่งขึ้นอยู่กับค่าของความเหนี่ยวนำ และ กระแสที่พิจารณาในขณะนั้น สามารถหาได้โดยกำหนดให้เครื่องแปรรูปพลังงานอยู่นิ่งกับที่ จากนั้นจ่ายพลังงานเข้าสู่ขดลวด จากกระแสที่มีค่าเป็นศูนย์ จนกระทั่งถึงกระแสชั่วขณะที่จุดพิจารณา ที่กล่าวมาตรงนี้ยังไม่มีเอาท์พุททางกลศาสตร์ ความเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ ไม่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำ [1],[4]

$$\int dw_{fe} = \int_0^{i_1} L_1 i_1 di_1 + \int_0^{i_2} L_2 i_2 di_2 + \int_0^{i_1} [i_1 M di_2 + i_2 M di_1]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น $L_1 i_1^2$ และ $L_2 i_2^2$ ให้ลดลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{total } w_{fe} = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} + M i_1 i_2 \quad \dots 2.40$$

2.3.2 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic torque)

สมการ 2.40 ใช้กับทุกตำแหน่งเชิงมุมของการแปรรูปพลังงาน (ทุกตำแหน่งของโรเตอร์) ถ้าเครื่องแปรรูปพลังงานมีการหมุน อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานสะสมในรูปสนามแม่เหล็ก เทียบกับเวลา เท่ากับ การดิฟเฟอเรนเชียลสมการ 2.40 [1],[4]

$$\frac{dw_{fe}}{dt} + \frac{L_1}{2} \frac{di_1^2}{dt} + \frac{i_1^2}{2} \frac{dL_1}{dt} + \frac{L_2}{2} \frac{di_2^2}{dt} + \frac{i_2^2}{2} \frac{dL_2}{dt} + i_1 i_2 \frac{dM}{dt} + i_1 M \frac{di_2}{dt} + i_2 M \frac{di_1}{dt}$$

อินทิเกรตเทียบกับเวลา [1],[4]

$$W_{fe} = [L_1 i_1 di_1 + 0.5 i_1^2 dL_1 + L_2 i_2 di_2 + 0.5 i_2^2 dL_2 + i_1 i_2 dM + i_1 M di_2 + i_2 M di_1] \quad \dots 2.41$$

สมการ 2.41 ถือเป็นสมการหลักสำหรับเครื่องแปรรูปพลังงานขณะมีการเคลื่อนที่ โดยมี L_1, L_2, M, i_1, i_2 ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เวลาต่าง ๆ เปรียบเทียบสมการ 2.49 กับ 2.54 [1],[4]

$$W_{em} = \int [0.5 i_1^2 dL_1 + 0.5 i_2^2 dL_2 + i_1 i_2 dM] \quad \dots 2.42$$

ดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับตำแหน่งเชิงมุม θ (ตำแหน่งโรเตอร์) [1],[4]

$$\frac{dw_{em}}{dt} = \frac{i_1^2}{2} \frac{dL_1}{d\theta} + \frac{i_2^2}{2} \frac{dL_2}{d\theta} + i_1 i_2 \frac{dM}{d\theta} \quad \dots 2.43$$

ภายใต้เงื่อนไข L_1, L_2, M ขึ้นกับตำแหน่งเชิงมุม θ เท่านั้น [1],[4]

$$T_e = \lim_{\Delta\theta} \frac{\Delta w_{em}}{\Delta\theta} = \frac{dw_{em}}{d\theta}$$

$$T_e = \frac{i_1^2}{2} \frac{dL_1}{d\theta} + \frac{i_2^2}{2} \frac{dL_2}{d\theta} + i_1 i_2 \frac{dM}{d\theta} \quad \dots 2.44$$

สองเทอมแรกทางด้านขวาของสมการ 2.44 เป็นแรงบิดขาสีเลียนท์ หรือแรงบิดรีลัคแตนซ์ ส่วนเทอมสุดท้ายเรียกว่า co-alignment torque เช่นการเสริมกันของสนามแม่เหล็กที่พยายามจัดตัวเองให้อยู่ในแนวเดียวกัน เครื่องจักรที่มีช่องอากาศสม่ำเสมอไม่สามารถสร้างแรงบิดรีลัคแตนซ์ได้ ที่สภาวะคงตัว กระแสที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดของระบบกระตุ้นคู่ลวดรูปเหล็กล้วนเพียง[4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการ $\frac{dw_{fe}}{dt} = \frac{i_1^2}{2} \frac{dL_1}{dt} + \frac{i_2^2}{2} \frac{dL_2}{dt} + i_1 i_2 \frac{dM}{dt}$ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ $\dots 2.45$

อินทิเกรตเทียบกับเวลา [4]

$$w_{fe} = \int \left[\frac{i_1^2}{2} dL_1 + \frac{i_2^2}{2} dL_2 + i_1 i_2 dM \right] \quad \dots 2.46$$

จากสมการ 2.42 กับ 2.46 พบว่า w_{fe} กับ w_{em} มีค่าเท่ากัน พลังงานที่ใช้ ในระบบจะถูกแบ่งครึ่งออกเป็นพลังงานสะสมในรูปสนามแม่เหล็กและพลังงานแปรรูปเป็นงานกลศาสตร์ [1],[4]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักเบื้องต้นของเครื่องจักรไฟฟ้า

เครื่องจักรไฟฟ้าทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงส่งถ่ายพลังงานจากรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่ง หม้อแปลงไฟฟ้าทำการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแรงดัน และกระแส เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า และ มอเตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส (synchronous machine) ได้รับกระแสกระตุ้นให้เกิดสนามแม่เหล็ก หรือ กระแสฟิลด์ (field current) จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงภายนอก ในขณะที่เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induction machine) ได้รับกระแสฟิลด์จากการเหนี่ยวนำแม่เหล็กภายในชุดขดลวดสนาม (field winding)

3.1 หลักการพื้นฐาน

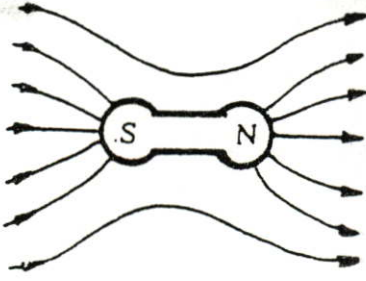
ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงวิธีที่ทำให้เกิดแรง หรือแรงบิดในเครื่องแปรรูปพลังงานไฟฟ้ากลศาสตร์ โดยอาศัย 2 กฎเพื่ออธิบาย [1],[4]

- 1) การบังคับให้การจัดวางตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก 2 ชุดอยู่ในแนวเดียวกัน
- 2) การบังคับให้การจัดวางตัวของแท่งแม่เหล็กอยู่ในแนวเส้นแรงแม่เหล็ก หรือ เคลื่อนไปในทิศทางที่ตำแหน่งเส้นแรงแม่เหล็กเข้มข้นกว่า

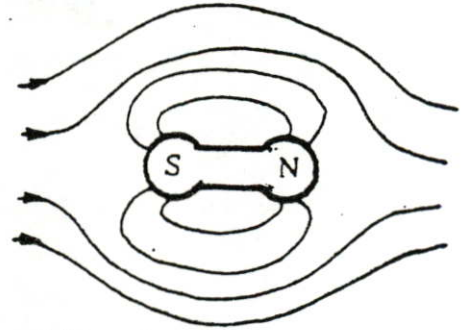
3.1.1 ลักษณะการเกิดแรงบิดทางกายภาพ

พิจารณาการนำแท่งแม่เหล็กไปวางในสนามแม่เหล็ก ดังรูป 3.1 ลักษณะแรงบิดที่เกิดขึ้นบนแท่งแม่เหล็กจะพยายามทำให้ตำแหน่งแท่งแม่เหล็กหันแนวขั้วเข้าสู่แนวเส้นแรงสนามแม่เหล็ก ตามรูป 3.1 ก อยู่ในลักษณะที่สนามแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กวางตัวในแนวเดียวกันไม่เกิดแรงบิด ตามรูป 3.1 ข การวางตัวของสนามแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็ก กับสนามแม่เหล็กอยู่ในตำแหน่งที่ไม่มีเสถียรภาพ เกิดอาการสั่น และคราง ถ้ามีการหมุนของแท่งแม่เหล็กไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จะทำให้เกิดแรงบิดเพิ่มขึ้นในทิศเดียวกับการหมุน แล้วเกิดการเคลื่อนที่ได้มากขึ้นแรงบิดสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อแท่งแม่เหล็ก และ สนามแม่เหล็กอยู่ในลักษณะทิศทางตั้งฉากกัน ดังรูป 3.1 ง [1]

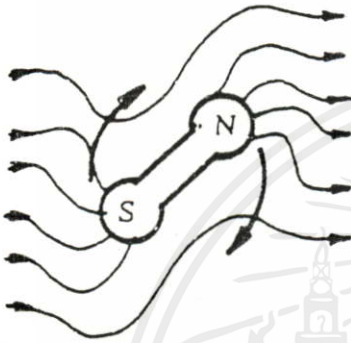
อาจเกิดแรงบิดได้อีกแบบหนึ่ง ถ้าเราจัดวางแท่งสารแม่เหล็กซึ่งยังไม่มีอำนาจแม่เหล็กลงในสนามแม่เหล็ก พิจารณารูป 3.2 เป็นลักษณะการวางตัวแบบต่าง ๆ เกิดแรงบิดขึ้นที่แท่งแม่เหล็ก ยกเว้นกรณีที่เส้นแรงแม่เหล็กจัดวางตำแหน่งทับแนวเดิมของมัน และไม่มีลักษณะการบิดเบือนของเส้นแรงแม่เหล็กดังรูป 2.2 ก กับ 2.2 ข แรงบิดชนิดนี้เรียกว่าแรงบิดรีลัคแตนซ์ เพราะแท่งตัวนำแม่เหล็กพยายามจัดแนวขั้วเข้าสู่ตำแหน่งที่ทำให้ความต้านทานแม่เหล็กน้อยที่สุดในสนามแม่เหล็กหรือลดช่องว่างอากาศของสนามแม่เหล็กนั่นเอง[1]



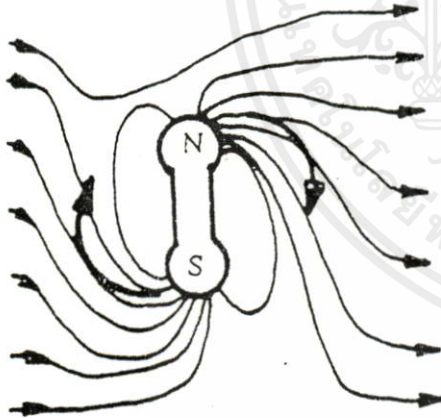
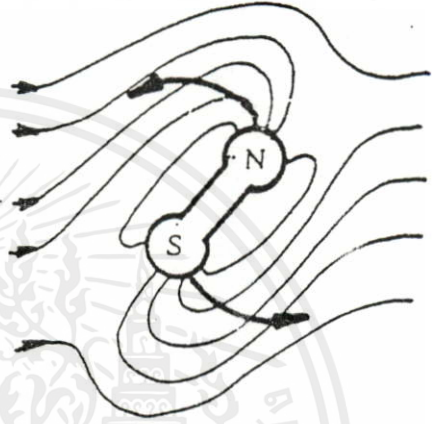
(ก) ไม่เกิดแรงบิต



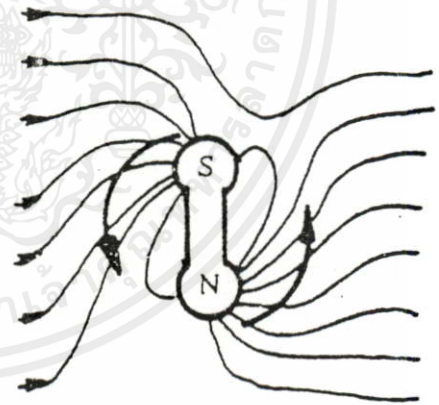
(ข) ไม่เกิดแรงบิต-อยู่ในสภาวะสมดุลขาคเสถียรภาพ



(ค) เกิดแรงบิต



(จ) เกิดแรงบิตมากที่สุด

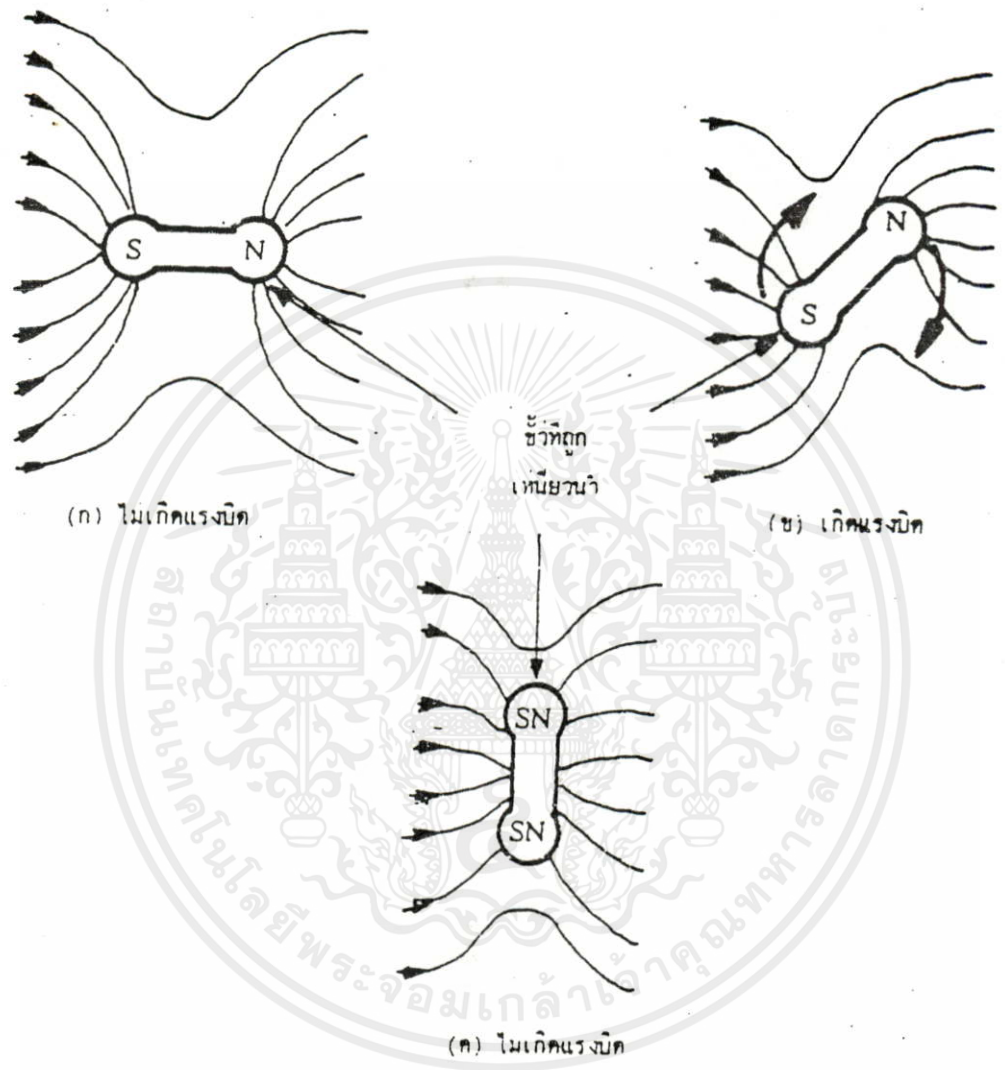


รูป 3.1 แรงบิตเนื่องจากการพยายามจัดแนวเส้นแรงแม่เหล็กเป็นแนวเดิม[1]

3.1.2 สนามแม่เหล็กจากระบบขดลวด

งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 พิจารณาหลักการการสร้างแรงบิตทางกลศาสตร์ในขอบเขตของวงจรร และทฤษฎีสถนามแม่เหล็ก
 ไฟฟ้า โดยใช้แนวความคิดเพื่อหาความสัมพันธ์ของทั้งสองวิธี เพื่อการพิจารณารูปแบบของเส้น
 แรงแม่เหล็กขณะใดขณะหนึ่ง แรงบิตถูกสร้างขึ้นเมื่อมีการบิดเบือนของสนามแม่เหล็ก (หรือไม่

สมมาตร) ลักษณะการจัดรูปของสนามแม่เหล็กดังแสดงด้วยรูป 3.1 อาจสร้างได้โดยใช้ระบบ กระตุ้นคู่ดังรูป 2.9 ข ส่วนลักษณะการจัดรูปสนามแม่เหล็กดังรูป 2.2 อาจสร้างได้โดยใช้ระบบ กระตุ้นเดี่ยวดังรูป 2.3 ข [4]



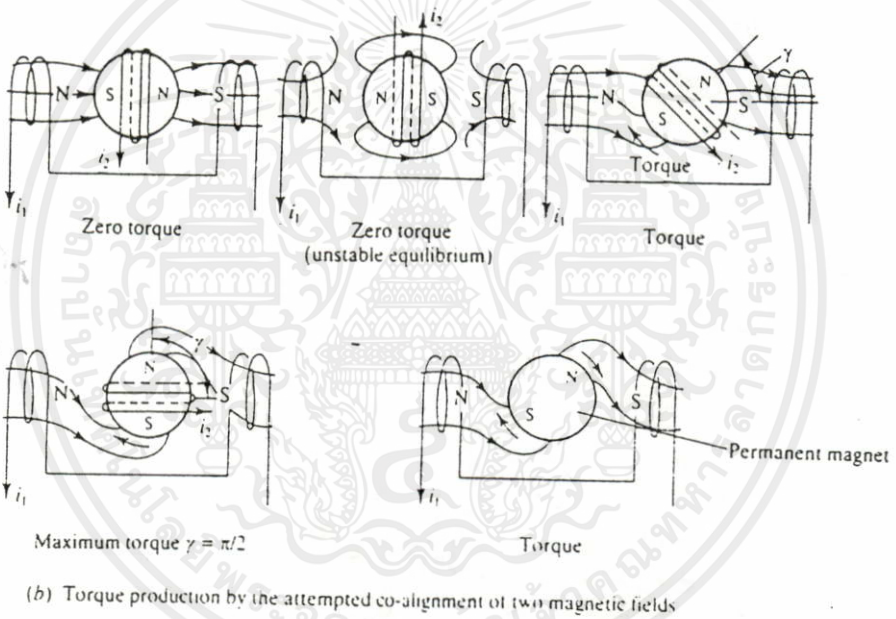
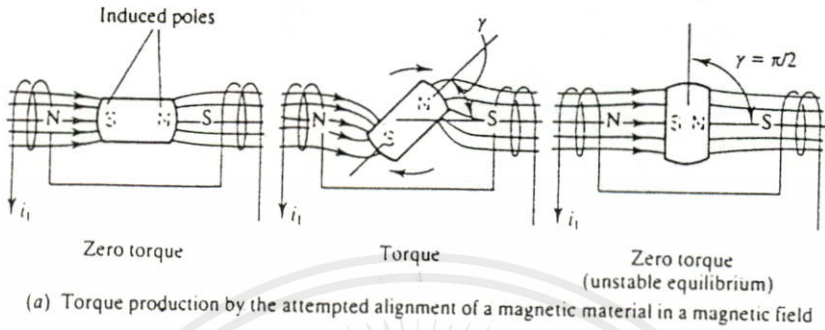
รูป 3.2 แรงบิดเนื่องจากการปรับค่าความต้านทานแม่เหล็กให้น้อยที่สุด

1) ระบบกระตุ้นเดี่ยว ตามรูป 3.3 ก ในระบบนี้แรงบิดถูกใช้เพื่อทำให้ขั้วแม่เหล็กวางตัวในแนวของสนามแม่เหล็ก หรือทำให้ขั้วแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งสนามแม่เหล็กสูง เป็นลักษณะแรงบิดรีลัคแตนซ์ สมมติว่าความเข้มสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับกระแส i_1 และขั้วแม่เหล็ก (ขั้วแม่เหล็กเกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กในสารแม่เหล็กชนิดเฟอร์โร โดยขึ้นอยู่กับความเข้มสนามแม่เหล็ก) ถ้าแกนเหล็กไม่มีการอึดตัว แรงบิดที่เกิดขึ้นแปรตามความ

เข็มสนามแม่เหล็กเดิม ความเข้มของขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำ และ ตำแหน่งการวางตัวของโรเตอร์ ในสนามแม่เหล็ก [1],[4]

$$T_e \propto (i_1^2) * f_1(\theta)$$

..... 3.1



รูป 3.3 แนวคิดเกี่ยวกับแรงบิดเนื่องจากการบิดเบือนแม่เหล็ก[4]

ความเข้มของขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งไปขึ้นอยู่กับกระแส และ แรงบิดเป็นศูนย์ที่ $\theta = 0, \pi/2, \pi, \dots$ [1],[4]

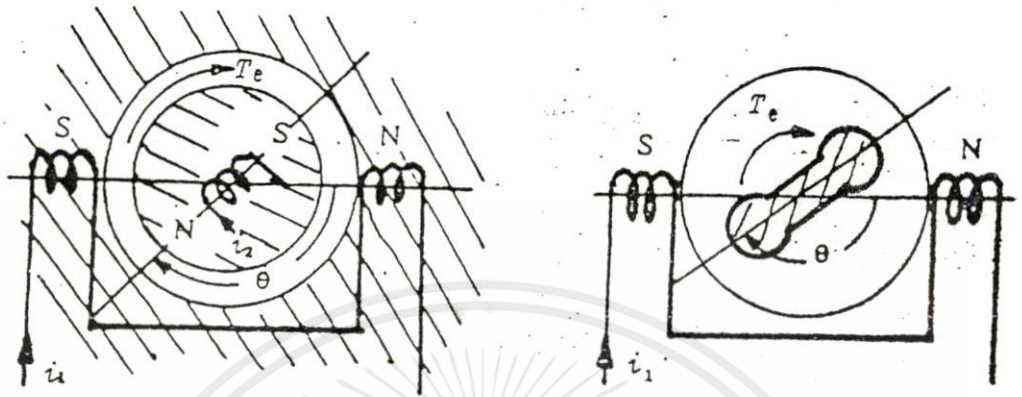
2) ระบบกระตุ้นคู่ ตามรูป 3.3 ข ระบบนี้พยายามจัดสนามแม่เหล็กทั้งสองชุดให้อยู่รวมใน แนวเดียวกัน ขนาดของสนามแม่เหล็กทั้งสองชุดขึ้นกับค่ากระแสในขดลวด ความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นตามค่ากระแส [1],[4]

ไม่ว่ากร $T_e \propto i_1 i_2 * f_2(\theta)$ จะมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้3.2

หรือ $T_e \propto \phi_1 i_2 * f_2(\theta)$

.....3.3

เมื่อ ϕ_1 เป็นเส้นแรงแม่เหล็กเนื่องจากส่วนที่เป็นแม่เหล็กถาวร ด้วยข้อกำหนดที่เหมาะสม $f_1(\theta) \propto \sin \theta$ แรงบิดสูงสุดเกิดที่ตำแหน่ง $\theta = \pi/2$ และไม่เกิดแรงบิดที่ตำแหน่ง $\theta=0, \pi$ ในตำแหน่ง $\theta = \pi$ เป็นตำแหน่งไม่สมดุลย์ [1],[4]



(ก) ระบบกระตุ้นคู่
สมมติเพื่อความเหมาะสม

$$T_e = i_1 i_2 K_1(\theta)$$

(ข) ระบบกระตุ้นเดี่ยว
สมมติเพื่อความเหมาะสม

$$T_e = i_1^2 K_2(\theta)$$

รูป 3.4 ลักษณะการสร้างแรงบิดอย่างง่าย [1]

ถ้าใช้ลักษณะขาสีเหลี่ยม ดังรูป 3.4 ข ของระบบกระตุ้นเดี่ยวไปใช้ในระบบกระตุ้นคู่แรงบิดที่เกิดขึ้นมี 2 ส่วนประกอบคือ เกิดแรงบิดรีลัคแตนซ์รวมอยู่ด้วย เมื่อเราเลือกค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม สมมติให้เป็น K_1 และ K_2 ซึ่งเป็นฟังก์ชันมุม θ [1]

$$T_e = i_1^2 K_1(\theta) + i_1 i_2 K_2(\theta) \quad \dots 3.4$$

ถ้าใช้ลักษณะขาสีเหลี่ยมในระบบกระตุ้นคู่ทั้งสเตเตอร์ และ โรเตอร์ ดังรูป 2.9 ก [1]

$$T_e = i_1^2 K_1(\theta) + i_1 i_2 K_2 + i_2^2 K_3(\theta) \quad \dots 3.5$$

เมื่อ T_e เป็นแรงบิดของโรเตอร์สมมติให้ชุดขดลวด และวงจรมแม่เหล็ก มีความแข็งแรงทางกลศาสตร์เกาะติดแน่นเป็นส่วนเดียวกัน แรงบิดที่เกิดขึ้นบนขดลวด และสารแม่เหล็กที่โรเตอร์ขึ้นกับลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กที่เสียรูปไป แรงบิดของโรเตอร์ไม่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของการจัดแนวเส้นแรงแม่เหล็ก และแรงบิดรีลัคแตนซ์ ในการใช้งานจริงแรงบิด

เกือบทั้งหมดเกิดขึ้นบนแท่งตัวนำแม่เหล็กเท่านั้น อย่างไรก็ตามเครื่องจักรที่ใช้งานอยู่น้อยที่สุดต้องมีแหล่งกำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กหนึ่งแหล่งได้รับการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า เปรียบเทียบสมการ 2.58 ในบทที่ 2 กับ สมการ 3.4,3.5 [1]

$$K_1(\theta) = \frac{1}{2} \frac{dL_1}{d\theta} \quad K_2(\theta) = \frac{dM}{d\theta} \quad K_3(\theta) = \frac{1}{2} \frac{dL_2}{d\theta}$$

ในสมการ 3.4 ไม่มี $K_3(\theta)$ เนื่องจากถ้าเรามองช่องอากาศจากโรเตอร์ไปยังสเตเตอร์จะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของช่องอากาศทำให้ $dL_2/d\theta = 0$ เห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์แรงบิดทั้งสองแนวคิดให้ผลคล้ายกัน โดยปกติเครื่องจักรใช้งานส่วนใหญ่มีลักษณะขาลื่นซี่ที่โรเตอร์ หรือ สเตเตอร์ตัวใดตัวหนึ่ง มีเครื่องจักรน้อยมากที่มีลักษณะขาลื่นซี่ทั้งโรเตอร์กับสเตเตอร์ [1]

3.1.3 อากัปกรณ์ของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

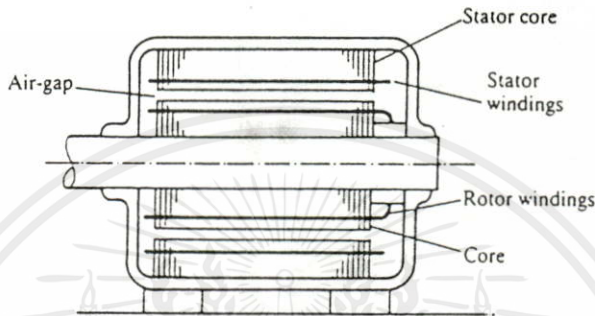
เพื่อเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับแนวความคิดเรื่องแรงบิด เพื่อนำไปใช้ได้ทั่วไปในเครื่องจักรในส่วนที่แล้วได้กล่าวถึงแรงบิดอันเกิดจากการป้อนกระแสเข้าขดลวด เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่ภายใต้การกระทำของแรงบิดทำให้เกิดงานทางกลศาสตร์ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขณะเคลื่อนที่ของแต่ละขดขดลวด ดังนั้นจึงต้องการกำลังไฟฟ้าเพื่อขับกระแสในแต่ละขดขดลวดต่อต้านแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น ลักษณะเช่นนี้ก่อให้เกิดการแปรรูปพลังงานโดยแปรจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เมื่อเครื่องจักรได้รับพลังงานกลศาสตร์เกิดกระบวนการตรงข้ามกันได้กำลังไฟฟ้าออกมา หลักการสร้างแรงบิดยังคงใช้ได้เมื่อกระแสที่ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการนี้ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กนี้เกิดปฏิกริยากับสนามแม่เหล็กหลัก แรงบิดลัพธ์มีทิศตรงข้ามกับแรงบิดทางกลศาสตร์จากตัวต้นกำลังที่ใช้หมุนเครื่องจักร ลักษณะเช่นนี้ก่อให้เกิดการแปรรูปพลังงานเช่นกัน โดยแปรจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า [1],[4]

ไม่จำเป็นว่าเครื่องจักรหมุนทุกชนิด สามารถเกิดกระบวนการไหลพลังงานกลับไปกลับมาได้ เครื่องจักรบางประเภทเป็นได้เพียงมอเตอร์ โดยไม่สามารถแปรรูปพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากสนามแม่เหล็กค่อย ๆ ลดลงจนหมด ถ้าหากเรานำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ไปจ่ายให้กับภาระพาสซีฟ (passive load) ไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งหรือทั้งสองวิธีในการสร้างแรงบิดที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมา ต้องเกิดขึ้นในเครื่องจักรที่อาศัยหลักทางแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิด เมื่อเกิดการหมุนของเครื่องจักรอย่างง่ายดังรูป 3.3 ซึ่งอาศัยหลักการไม่อยู่ในแนวเดียวกันของสนามแม่เหล็ก ขณะที่สนามแม่เหล็กเสีรูปค่อย ๆ กลับมาสู่รูปสนามแม่เหล็กที่เป็นแนวเดียวกัน พร้อมกันนั้นแรงบิดลดลงจนเป็นศูนย์ ณ ตำแหน่งที่ไม่มีกระแสของสนามแม่เหล็ก ในเชิงปฏิบัติของเครื่องจักรหมุนที่ใช้งานเราต้องการค่าแรงบิดต่อการหมุน 1 รอบ [1],[4]

3.1.4 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องจักรหมุน

ส่วนประกอบจำเป็นสำหรับเครื่องจักรไฟฟ้าหมุน แสดงดังรูป 3.5 ประกอบด้วย

- ส่วนอยู่นิ่ง (สเตเตอร์ และ ชุดขดลวด)
- ส่วนที่หมุน (โรเตอร์ และ ชุดขดลวด)
- ช่องอากาศตามการหมุน
- ส่วนติดต่อกับชุดขดลวดโรเตอร์(ผ่านทางแปรงถ่าน หรือวงแหวนลื่น)



รูป 3.5 เครื่องจักรไฟฟ้าหมุนพื้นฐาน [4]

สารแม่เหล็กชนิดเฟอร์ไรท์นำมาใช้ทำแกนสเตเตอร์หรือ โรเตอร์ อาจใช้เป็นแท่งตันหรือแผ่นบางมาประกอบกัน เพื่อลดความต้านทานแม่เหล็กของทางเดินเส้นแรงแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กลักษณะรูปคลื่นต้องการวัสดุแม่เหล็กแผ่นบางมาประกอบเป็นรูปทรง เพื่อลดความสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส (hysteresis losses) และ กระแสไหลวน (eddy current losses) เกือบทั้งหมดของเครื่องจักรหมุนมีชุดขดลวดที่ส่วนหมุน และส่วนอยู่นิ่ง แต่ก็มีเครื่องจักรบางชนิดมีขดลวดอยู่บนชุดขดลวดที่ได้รับการกระตุ้นเพียงส่วนเดียว อีกส่วนได้รับการกระตุ้นเป็นแม่เหล็กถาวร [4]

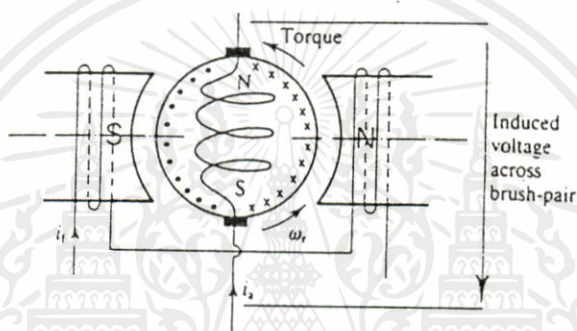
3.2 ชนิดของเครื่องจักร

แรงบิดที่เกิดบนโรเตอร์ของเครื่องจักร มาจากขั้วแม่เหล็กที่ปรากฏ (หรือเหนี่ยวนำ) บนผิวของสเตเตอร์ และโรเตอร์ ต่างก็สร้างสนามแม่เหล็กของตัวเองขึ้น เกิดปฏิกิริยาของสนาม แม่เหล็กทั้งสอง แรงบิดตามรูป 3.3 อาจไม่พอเพียงในการหมุนสำหรับเครื่องจักรที่ใช้งานกันอยู่ ถ้าเกิดการแกว่งของแรงบิดตามการหมุนยังผลให้แรงบิดรวมเป็นศูนย์ ยกเว้นกรณีของมอเตอร์รีลัคแตนซ์เฟสเดียว การพันขดลวดแบบคอมมิวเตเตอร์ หรือการพันขดลวดหลายเฟสแบบกระจายจัดเป็นเครื่องจักรอย่างง่ายประเภทหนึ่ง เพราะมีการเสียรูปของสนามแม่เหล็กตลอดเวลาในการหมุน ทำให้เกิดแรงบิดอย่างต่อเนื่องบนโรเตอร์ [1],[4]

ลักษณะที่เป็นไปได้ในการพันขดลวดให้กับสเตเตอร์ หรือโรเตอร์ ด้วยวิธีการที่เป็นไปได้ แบ่งเป็น 4 กลุ่มใหญ่ คือ [1],[4]

- 1) ชุดขดลวดแบบคอมมิวเตเตอร์ โดยสเตเตอร์มีขั้วขาลีเนียนท์ เช่น เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. Machine)
- 2) ชุดขดลวดแบบกระจายหลายเฟสที่สเตเตอร์ โดยโรเตอร์เป็นแบบชุดขดลวดรวม เช่น เครื่องจักรซิงโครนัส (Synchronous Machine)
- 3) ชุดขดลวดแบบกระจายหลายเฟสที่สเตเตอร์ โดยมีโรเตอร์เป็นชุดขดลวดรวมวงจรปิด เช่น เครื่องจักรเหนี่ยวนำ (Induction Machine)
- 4) สเตเตอร์มีขั้วขาลีเนียนท์ ใช้สวิตชิงอิเล็กทรอนิกส์

3.2.1 เครื่องจักรคอมมิวเตเตอร์ (commutator machine)



รูป 3.6 โครงสร้างชุดขดลวดคอมมิวเตเตอร์ 2-ขั้ว [4]

แรงบิด และแรงดันเหนี่ยวนำจากการหมุน พิจารณาการพันชุดขดลวดแบบคอมมิวเตเตอร์ 2 ขั้ว โดยมีตำแหน่งแปรงถ่านทำมุมตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กดังรูป 3.6 กระแสไหลเข้าสู่ชุดขดลวดผ่านทางแปรงถ่านสร้างสนามแม่เหล็กทิศทางตามแนวแปรงถ่าน ทำให้มีสนามแม่เหล็ก 2 สนาม เกิดปฏิกิริยาต่อกันสร้างแรงบิดที่โรเตอร์ ถ้าชุดขดลวดคอมมิวเตเตอร์เคลื่อนที่ตามแรงบิด ลักษณะการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนไปทั้งชุดขดลวด และแกนเหล็ก ภายใต้ข้อจำกัดปฏิกิริยาคอมมิวเตเตอร์ที่ได้รับ กระแสคงที่ไม่ว่าชุดขดลวดจะหมุนไปทางใด ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดปฏิกิริยากัน 2 สนาม ถูกสร้างขึ้นจากกระแสในสเตเตอร์ และโรเตอร์ที่ผ่านชุดขดลวดของตัวมัน ทำให้สนามแม่เหล็กทั้งสองอยู่คนละแนวเกิดแรงบิดอย่างต่อเนื่องบนโรเตอร์ แรงบิดจึงขึ้นกับกระแสที่ป้อนเข้าคอมมิวเตเตอร์ ไม่ขึ้นกับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ และความเร็วเชิงมุม [1],[4]

ชุดขดลวดคอมมิวเตเตอร์ที่หมุนจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในชุดขดลวด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องจากสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ ทุกตำแหน่งที่โรเตอร์หมุนไป แรงดันไฟฟ้าที่คร่อมระหว่างคู่แปรงถ่านเกิดจากการรวมแรงดันเหนี่ยวนำในทุกกรอบของตัวนำที่ต่ออนุกรมกันระหว่างคู่แปรงถ่าน ขนาดแรงดันขึ้นกับความเร็วของโรเตอร์ สนามแม่

เหล็กของสเตเตอร์ และจำนวนรอบการพันคอมมิวเตเตอร์ ภายใต้สนามแม่เหล็กของสเตเตอร์คงที่ และความเร็วเชิงมุมโรเตอร์คงที่ แรงดันที่เกิดระหว่างคู่แปรงถ่านเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง [1],[4]

ลักษณะการแปรรูปพลังงานเกิดขึ้นเมื่อป้อนกระแสเข้าชุดขดลวดคอมมิวเตเตอร์ โรเตอร์หมุนภายใต้การกระทำของแรงบิดได้กำลังทางกลศาสตร์ออกมา กระแสที่ไหลเข้าสู่ขดลวดของโรเตอร์ต่อต้านแรงดันที่สร้างขึ้นจึงต้องการแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ชดเชย ลักษณะนี้เป็นอากัปกิริยามอเตอร์ ถ้ากำลังไฟฟ้าและกลศาสตร์มีค่าคงที่ พลังงานสนามแม่เหล็กและพลังงานกลศาสตร์คงที่ด้วย กำลังทางไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปกับกำลังทางกลศาสตร์ที่ได้ออกมามีค่าเท่ากันเมื่อไม่คิดการสูญเสียถ้าหากมีกระแสไหลออกจากชุดขดลวดโรเตอร์ ขณะที่สร้างแรงดันเหนี่ยวนำทำให้ได้กำลัง ไฟฟ้าออกมา เป็นลักษณะอากัปกิริยาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้าแนวแกนของแปรงถ่านไม่ทำมุมตั้งฉากกับแนวแกนสนามแม่เหล็กจากสเตเตอร์ ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ และสเตเตอร์มีค่าลดลง ทำให้แรงบิดลดลง แรงดันเหนี่ยวนำระหว่างคู่แปรงถ่านลดลง แต่กำลังทางกลศาสตร์และทางไฟฟ้ายังคงเท่ากัน ถ้าแนวแกนแปรงถ่านอยู่แนวเดียวกับสนามแม่เหล็กจากสเตเตอร์ (direct axis) ทำให้ไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำระหว่างคู่แปรงถ่าน และแรงบิดเป็นศูนย์ [1],[4]

1) เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องจักรคอมมิวเตเตอร์ดังรูป 3.6 เป็นพื้นฐานของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไป ถ้าสมมติให้สนามแม่เหล็กกับกระแสมีความสัมพันธ์เชิงเส้น

$$\text{แรงบิด} \propto (\text{กระแสในโรเตอร์})(\text{กระแสในสเตเตอร์}) \propto i_a i_s$$

$$\text{แรงดันเหนี่ยวนำในโรเตอร์} \propto (\text{ความเร็วเชิงมุมโรเตอร์})(\text{กระแสสเตเตอร์}) \propto \omega_m i_s$$

เครื่องจักรประพัตต์ตัวเป็นมอเตอร์ ถ้าป้อนกำลังไฟฟ้าเข้าวงจรโรเตอร์ ได้กำลังทางกลศาสตร์ออกมาทางแกนเพลลา เมื่อไม่คิดการสูญเสีย กระแสในโรเตอร์ที่สร้างสนามแม่เหล็กจะต้องเพียงพอที่ทำให้แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า เท่ากับแรงบิดกลศาสตร์ที่ภาระ และเมื่อไม่คิดการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขณะหมุน แรงดันที่ป้อนเข้าไปเท่ากับแรงดันเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ ถ้าเครื่องจักรได้รับกำลังทางกลศาสตร์ที่แกนเพลลา เมื่อไม่คิดการสูญเสียโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นโดยกระแสในโรเตอร์ได้กำลังไฟฟ้าออกมา [1],[4]

2) มอเตอร์เอซีคอมมิวเตเตอร์เฟสเดียว การเกิดแรงบิดของเครื่องจักรชนิดนี้ สามารถพิจารณาได้จากเครื่องจักรดังรูป 3.6 เช่นกัน ถ้าขดลวดของสเตเตอร์ และโรเตอร์ได้รับการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงเฟสเดียว ความเหนี่ยวนำของขดลวดในเครื่องจักรชนิดนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ อันเป็นการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเครื่องจักร เช่นพันขดลวดเพิ่ม หรือเลื่อนตำแหน่งของแปรงถ่าน[1],[4]

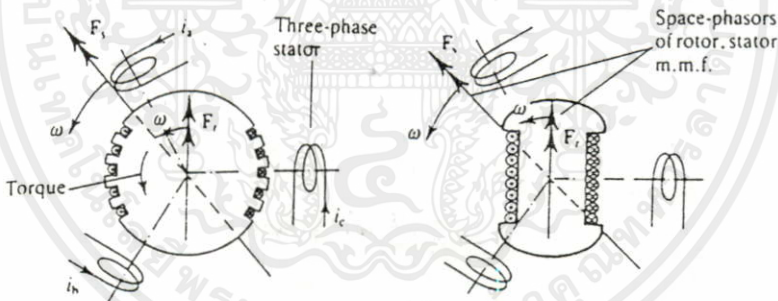
3) เครื่องจักรสนามแม่เหล็กตัดฉาก บ่อยครั้งเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการเพิ่มคู่แปรงถ่านเข้าที่แกนไดเร็กต์จะเรียกว่า เครื่องจักรสนามแม่เหล็กตัดฉาก และขดลวดที่เพิ่มเข้ามาทำให้

เครื่องจักรสามารถประพฤติตัวเป็นเครื่องจักรกำลังขยายสูง โดยยังคงรักษากระแสให้คงที่ [1],[4]

4) มอเตอร์เอชคอมมิวเตเตอร์ 3 เฟสได้รับการกระตุ้นโดยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟสผ่านทางแปรงถ่านซึ่งต่างเฟสกัน 120 องศา[1],[4]

3.2.2 เครื่องจักรให้ความเร็วซิงโครนัส (synchronous-speed machine)

1) เครื่องจักรซิงโครนัส (synchronous machine) พิจารณาเครื่องจักรไฟฟ้า 2 ขั้ว มีการพันชุดขดลวดสเตเตอร์แบบกระจาย 3 เฟส ที่สมดุลง่าย ทำให้ได้สนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็ว ω rad/sec ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ชุดขดลวดโรเตอร์เรียกว่าชุดขดลวดให้สนามแม่เหล็ก (field winding) ได้รับการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ตามรูป 3.7 แสดงถึงเค้าโครงของเครื่องจักรโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω rad/sec ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เห็นได้ว่าสนามแม่เหล็กในโรเตอร์ และสเตเตอร์ หมุนด้วยความเร็วเท่ากัน คือ ความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) สนามแม่เหล็กทั้งสองเกิดปฏิกิริยาซึ่งกันและกันโดยปกติสนามทั้งสองอยู่คนละแนว เกิดแรงบิดบนสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ที่พยายามทำให้ตัวเองอยู่แนวเดียวกับสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ แรงบิดที่เกิดโดยสนามแม่เหล็กของโรเตอร์จะส่งถ่ายกำลังบนโรเตอร์เอง ได้กำลังงานทางกลศาสตร์ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส [1],[4]



(ก) cylindrical rotor

(ข) salient-pole rotor

รูป 3.7 แรงบิดการวางแนวสนามแม่เหล็กในเครื่องจักรซิงโครนัส ประพฤติตัวเป็นมอเตอร์[4]

ขณะไม่มีภาระ,ไม่คิดการสูญเสีย และเครื่องจักรหมุนด้วยสภาวะคงตัว สนามแม่เหล็กของโรเตอร์ และสเตเตอร์อยู่แนวเดียวกัน ไม่มีการจ่ายออกมา เมื่อมีแรงบิดทางกลที่ภาระ ความเร็วของโรเตอร์ลดลงทำให้สนามแม่เหล็กอยู่คนละแนว เกิดแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้สนามแม่เหล็กทั้งสองกลับเข้าสู่แนวเดียวกัน เกิดความสมดุลกับแรงบิดทางกลที่ภาระ[1],[4]

อุปกรณ์ที่จะเรียกว่าเครื่องจักรซิงโครนัสนั้น สนามแม่เหล็กในสเตเตอร์ และโรเตอร์ต้องหมุนด้วยความเร็วเท่ากันก่อนที่จะใช้แรงบิด ถ้ามีความแตกต่างของความเร็วเชิงมุมจากสนามแม่เหล็กทั้งสอง ทำให้แรงบิดมีลักษณะขึ้นลงตามเวลา แรงบิดเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ ที่ภาวะ

ซึ่งโครโนการเปลี่ยนรูปพลังงานสามารถเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าก็ได้ (เมื่อขดลวดเป็นระบบ 3 เฟส) ตามหลักพื้นฐานของแรงบิดที่ได้กล่าวมาแล้ว ขดขดลวดหลายเฟสทำให้เครื่องจักรหมุนสามารถสร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่ภาวะคงตัวได้ แม้เส้นแรงแม่เหล็กอยู่คนละแนว แต่ผลรวมเส้นแรงแม่เหล็กก็ยังคงที่ อีกทั้งทำให้เกิดการไม่อยู่แนวเดียวกันของสนามแม่เหล็กตลอดการหมุน แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในระบบ 3 เฟส จะขึ้นกับความเร็วของโรเตอร์ และความเข้มสนามแม่เหล็ก ในขณะที่ความเร็วของโรเตอร์ขึ้นกับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ ถ้าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟคงที่ แรงดันเหนี่ยวนำในขดขดลวดสเตเตอร์เป็นสัดส่วนกับความเข้มสนามแม่เหล็ก[1],[4]

เครื่องจักรเมื่อไม่มีภาระสนามแม่เหล็กทั้งสองอยู่แนวเดียวกัน ทำให้กระแสมีเฟสตรงกับแรงดัน นั่นคือไม่มีการดึงกระแสที่สเตเตอร์ซึ่งไม่มีพลังงานออกมาถ้าไม่มีการสูญเสีย ถ้าแรงดันไฟจากแหล่งจ่าย และแรงดันเหนี่ยวนำไม่เท่ากัน ทำให้เกิดกระแสไหลวนเรียกว่า กระแสรีแอกทีฟ ซึ่งกระแสนี้ก่อให้เกิดผล 2 ประการ คือ [1],[4]

ก) เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กรวม เรียกอีกว่าปฏิกิริยาอาร์มาเจอร์

ข) เกิดแรงดันเหนี่ยวนำตกคร่อม ในส่วนรีแอกแตนซ์รั่วซึมของขดลวด

เมื่อมีภาระเกิดค่าตัวประกอบกำลัง (power factor) ขึ้นในกระแสสเตเตอร์ โดยสามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าเป็นเท่าไรก็ได้ โดยปรับมุมหรือตำแหน่งของแรงดันที่จ่ายกับตำแหน่งของแรงดันเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์ขณะเปิดวงจร นั่นคือ ตรวจจับที่ค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายคงที่ เราสามารถปรับสนามกระตุ้นของสเตเตอร์ให้ควบคุมตัวประกอบกำลังของเครื่องจักรได้ ขดลวดให้สนามแม่เหล็กอาจพันแบบกระจายในสลอต (โรเตอร์กรงกระรอก) หรือพันเป็นก้อนที่ขั้ว (มีขั้วขาลีเนียนท์) แบบแรกให้ค่าช่องอากาศเกือบเท่ากันโดยตลอด ในขั้วขาลีเนียนท์ความต้านทานแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามมุม มีแรงบิดรีลัคแตนซ์ร่วมกับแรงบิดการวางแนวสนามแม่เหล็ก[1],[4]

2) มอเตอร์ความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance motor) เครื่องจักรซิงโครนัสแบบมีขั้วขาลีเนียนท์ที่ไม่มีขดขดลวดให้สนามแม่เหล็กเรียกว่า มอเตอร์ความต้านทานแม่เหล็ก เพราะแรงบิดขึ้นกับความต้านทานแม่เหล็กอย่างเดียว เครื่องจักรชนิดนี้ไม่นิยมใช้แบบหลายเฟส แรงบิดขึ้นกับการหมุนทิศตรงข้ามของสนามแม่เหล็กที่สร้างจากขดลวดเฟสเดียว[1],[4]

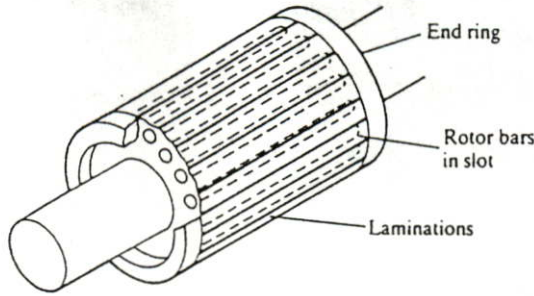
สนามแม่เหล็กหมุนอาจสร้างโดยวิธีใดวิธีหนึ่ง

- ขดขดลวด 3 เฟส

- ขดขดลวด 1 เฟส 2 ขด

3) ฮีสเตอร์รีซิสมอเตอร์ (hysteresis motor) โครงสร้างสเตเตอร์เหมือนกับมอเตอร์ความต้านทานแม่เหล็ก แต่โรเตอร์ทรงกระบอกมีวัสดุที่เป็นแม่เหล็กถาวรหันเข้าไป เพื่อทำให้เกิดแรงบิดฮีสเตอร์รีซิส [1],[4] ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 เครื่องจักรอซิงโครนัส (asynchronous motor)



รูป 3.8 โรเตอร์แบบกรง (cage rotor)[4]



รูป 3.9 สนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ[1]

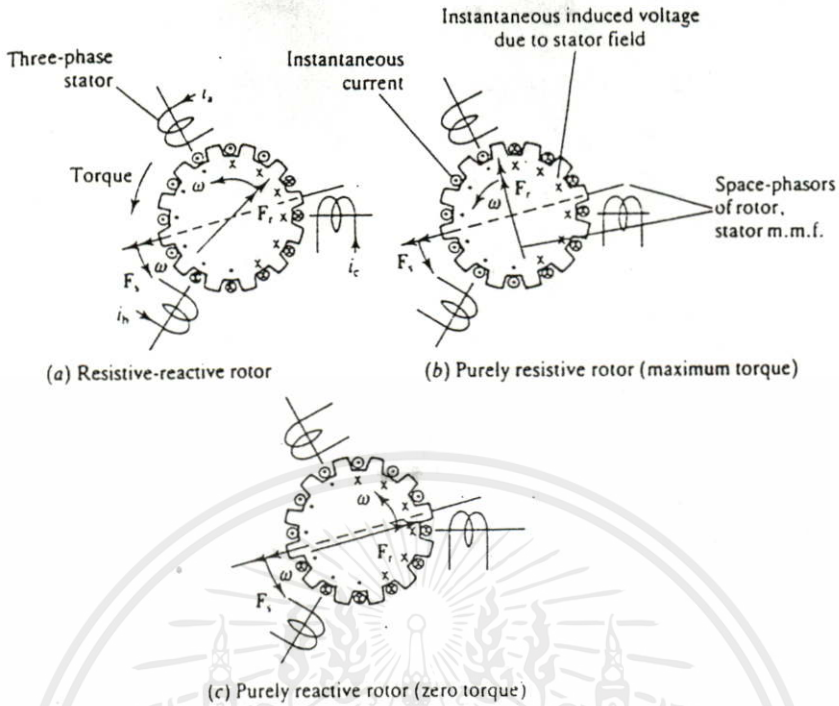
การพันขดขดลวดโรเตอร์มีความสมมาตรกัน และลัดวงจรไว้ เช่นขดขดลวดรูปกรงดังรูป 3.8 ขดขดลวดสเตเตอร์พันแบบกระจาย 3 เฟส ได้รับการกระตุ้นจากแหล่งจ่ายความถี่เชิงมุม ω rad/sec สร้างสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ด้วยความเร็วเชิงมุม ω rad/sec การหมุนของสนามแม่เหล็กหมุนทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนตัวนำของขดขดลวดโรเตอร์ได้ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการเลื่อนเฟสของกระแสในแต่ละตัวนำ และด้วยขดขดลวดที่ทำการลัดวงจรไว้นี้เองเป็นสาเหตุให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กรูปคลื่นที่หมุนด้วย (ลักษณะสนามแม่เหล็กหมุน) ความเร็วเชิงมุมขึ้นกับความถี่ของแรงดันเหนี่ยวนำ ถ้าแหล่งจ่ายมีความถี่เชิงมุม ω rad/sec และโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_r rad/sec ความถี่เชิงมุมของแรงดันเหนี่ยวนำเป็น $\omega - \omega_r$ rad/sec เรียกว่า slip angular frequency นั่นคือสนามแม่เหล็กหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กบนโรเตอร์มีความเร็วเชิงมุม $\omega - \omega_r$ rad/sec เทียบกับโรเตอร์ ด้วยเหตุนี้แรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์หมุน

ด้วยความเร็วเชิงมุม w rad/sec เทียบกับสเตเตอร์ ซึ่งโครไนซ์กับสนามแม่เหล็กหมุนของ สเตเตอร์ เมื่อมองจากผิวของโรเตอร์พบว่าสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์หมุน ด้วยความเร็ว เชิงมุม $w-w_r$ rad/sec หรือ sw rad/sec เมื่อ s ถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของ $(w-w_r)/w$ เรียกว่าเศษส่วนการสลิป ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างผิวของโรเตอร์ และสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ ด้วยความถี่เชิงมุม sw ชั้นที่โรเตอร์ และแรงดันเหนี่ยวนำนี้ทำให้ได้กระแสไหลในวงจรโรเตอร์ [1],[4]

เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ชุดขดลวดสเตเตอร์พันแบบกระจาย เมื่อได้รับการ กระตุ้น จะสร้างสนามแม่เหล็กหมุน เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดัน และกระแสชั้นที่โรเตอร์ซึ่งทำการ ลัดวงจรไว้ โดยกระแสในโรเตอร์ที่ไหลในชุดขดลวดทั้ง 3 เฟส สร้างสนามแม่เหล็กหมุนความ เร็วเชิงมุม sw rad/sec เทียบกับผิวโรเตอร์เคลื่อนที่ทิศทางเดียวกับโรเตอร์ดังรูป 3.9 ผลก็คือ สนามแม่เหล็กหมุนของโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว w rad/sec เทียบกับสเตเตอร์ ความถี่ของแรง ดันในโรเตอร์ และกระแสเป็นค่า s คูณกับความถี่ของแหล่งจ่าย จึงเรียก s เป็นความถี่ของสลิป สนามแม่เหล็กของโรเตอร์กับสเตเตอร์มีปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน เกิดแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าชั้นที่ โรเตอร์ และมีทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ เป็นอาภักปฏิกิริยามอเตอร์ แรงบิดที่เกิด ขึ้นอยู่กับมุมการบิดตัวของสนามแม่เหล็กทั้งสอง รูป 3.10 แสดงให้เห็นว่าสเตเตอร์กับ โรเตอร์ ต่างก็มีสนามแม่เหล็กคนละสนาม [1],[4]

- สนามแม่เหล็กทั้งสองทำมุมกัน $\pi/2 + \infty$ สร้างแรงบิด
- วงจรโรเตอร์เป็นความต้านทานทั้งหมด สนามแม่เหล็กทั้งสองทำมุม 90 องศา ให้แรงบิด สูงสุด
- วงจรโรเตอร์เป็นความเหนี่ยวนำทั้งหมด สนามแม่เหล็กทั้งสองมีทิศตรงข้ามกัน ไม่เกิด แรงบิด

โดยปกติสนามแม่เหล็กทั้งสองเอียงทำมุมกัน $\pi/2 + \phi$ เมื่อ $\cos \phi$ เป็นตัวประกอบกำลัง ของวงจรโรเตอร์ เครื่องจักรที่ชุดขดลวดโรเตอร์พันแบบหลายเฟสเรียกว่า เครื่องจักรเหนี่ยวนำ ชนิดตัวหมุนพันด้วยขดลวด (wound-rotor induction machine) อีกแบบหนึ่งเรียกว่าเครื่องจักร แบบกรงกระรอก (cage-rotor machine) โดยมีการสร้างแรงบิดเชิงกลเหมือนกันทั้งสองโครงสร้าง ลักษณะอาภักปฏิกิริยามอเตอร์ของเครื่องจักรแบบนี้ ความเร็วน้อยกว่าความเร็วซิงโครนัส ถ้าหาก หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสจะไม่เกิดแรงบิดขึ้น เนื่องจากไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ นั่นคือไม่มีกระแสในวงจรโรเตอร์ แต่ถ้าความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส แรงดันเหนี่ยวนำ บนโรเตอร์จะผลักระแสความถี่สลิปเข้าไปในวงจร ทำให้เศษส่วนการสลิปมีค่าลบ เกิดกระแส ไหลกลับทิศทาง สร้างแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าทิศทางตรงข้ามกับแรงบิดทางกลศาสตร์ที่เป็นตัว ขับ เครื่องจักรประพัตติตัวเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เครื่องจักรสามารถให้กำเนิดพลัง งานไฟฟ้าขึ้น ตราบเท่าที่ยังมีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับชุดขดลวดสเตเตอร์ หากไม่มีการ กระตุ้นที่สเตเตอร์ จะไม่มีสนามแม่เหล็กหมุนที่จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ อาภัก ปฏิกิริยาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่เกิดขึ้น [1],[4]



รูป 3.10 แรงบิดการวางแนวสนามแม่เหล็กในเครื่องจักรเหนี่ยวนำ [4]

3.2.4 เครื่องจักรชนิดอื่น

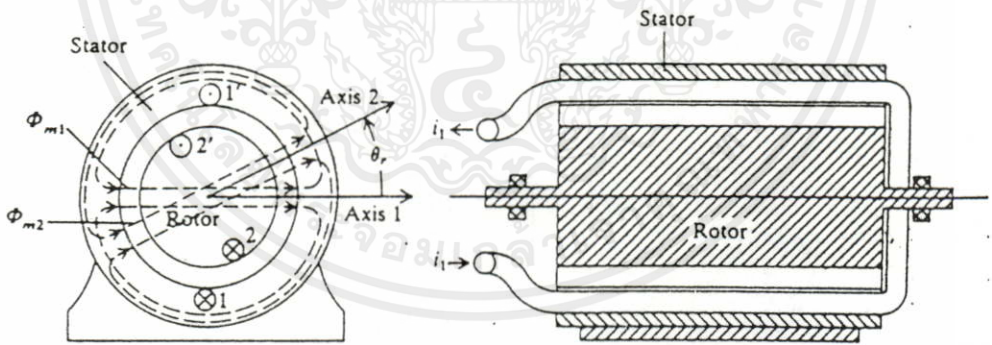
เครื่องจักรชนิดอื่นก็อาศัยการแปรรูปไฟฟ้ากลศาสตร์เช่นกัน แต่ไม่กล่าวถึงในที่นี้

3.3 ลักษณะทั่วไปของสนามแม่เหล็กหมุนในอุปกรณ์ไฟฟ้า-กลศาสตร์

3.3.1 ชดชดลวด

นอกเหนือไปจากเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง แรงบิดในการหมุนของอุปกรณ์ไฟฟ้ากลศาสตร์ ถูกสร้างขึ้นจากสนามแม่เหล็กอย่างน้อยหนึ่งสนามซึ่งหมุนรอบช่องอากาศ การจัดชดชดลวดของสเตเตอร์ และวิธีการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนจากกระแสสเตเตอร์ เหมือนกันในทุกจำนวนขั้วของเครื่องจักร ในการวิเคราะห์ที่กำหนดให้การจัดเรียงชดชดลวดสเตเตอร์ประมาณได้ว่าการกระจายของชดชดลวดเป็นไซน์ฮุซอดต์ในขอบเขตของการขจัดรอบช่องอากาศ ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กกรอบช่องอากาศเป็นไซน์ฮุซอดต์ขึ้นกับฟังก์ชันการขจัดรอบช่องอากาศเช่นเดียวกัน เริ่มต้นเราดูเฉพาะชดชดลวดสเตเตอร์ไม่คำนึงถึงชดชดลวดโรเตอร์ ตามรูป 3.12 เป็นลักษณะชดชดลวดสเตเตอร์ของอุปกรณ์ไฟฟ้ากลศาสตร์ 1-เฟส ชดชดลวดสเตเตอร์ a_s กระจายในสลอทซึ่งอยู่ภายในโดยรอบของส่วนอยู่หนึ่ง ชดชดลวดต่อกันแบบอนุกรมเป็นชดชดลวดแต่ละชดชดลวดอยู่บนสลอท กระแส i_{as} ไหลเข้า a_s (⊗) มีทิศบวก โดยไหลตามความยาวสเตเตอร์ และไหลออก a_s' (○) ตามความยาวสเตเตอร์ดังรูปของรูป 3.11 a_s, a_s' อยู่บนสลอทใน

สเตเตอร์ห่างกัน π rad อันเป็นลักษณะของเครื่องจักร 2-ขั้ว เราเรียก as_1, as_1' ว่าด้านขดลวด (coil side) และโดยรอบ as_1, as_1' เรียกขดลวด (coil) ในทางปฏิบัติ ขดลวดมีตัวนำมากกว่า 1 ตัว กระแสไหลเข้า as_1 และไหลออก as_1' ผ่านทางตัวนำตัวเดียวกัน จำนวนตัวนำในด้านขดลวดบอกรอบของขดลวดเขียนแทนด้วย nc_s การพันขดลวด as_1-as_1', as_2-as_2' และ as_3-as_3' เหมือนกันโดยเอกลักษณ์จำนวนรอบการพันขดลวดอาจแตกต่างกันได้ แต่ในการพิจารณาเรากำหนดการพัน nc_s เท่ากันในแต่ละขดลวด ตามรูป 3.13 เราเพิ่มขดขดลวดสเตเตอร์อีก 1 ขด คือขดขดลวด bs แกนแม่เหล็กของ bs ห่างจากแกนแม่เหล็ก as 90 องศา เรากำหนดทิศบวก i_{bs} ตามทิศแกนแม่เหล็กของขดขดลวด bs ที่ $\phi_s = \pi/2$ มากกว่าที่จะเป็น $\phi_s = -\pi/2$ (ในขณะนี้เรายังไม่ได้กำหนด ϕ_s) เห็นได้ว่า ϕ_s เป็นการขจัดเชิงมุมของสเตเตอร์ตามแกน as ตำแหน่งการวางขดขดลวด bs ห่างจากขดขดลวด as เป็น $\pi/2$ ซึ่งก็คือโครงสร้างสเตเตอร์ของอุปกรณ์ไฟฟ้ากลศาสตร์ 2-ขั้ว 2-เฟส ถ้าเราพันขดขดลวดทั้งสองด้วยตัวนำขนาดเดียวกัน และจำนวนรอบเท่ากัน ความต้านทานในขดขดลวดทั้งสองต้องเหมือนกัน เราเรียกว่าขดขดลวดสเตเตอร์สมมาตรกัน ส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้ากลศาสตร์ 2-ขั้ว 3-เฟส ที่ขดขดลวดสเตเตอร์สมมาตรกัน ก็จะมีขดขดลวด 3 ขดที่เหมือนกัน คือ as, bs และเพิ่มขดขดลวด bs โดยแต่ละขุดวางห่างกัน 120 องศา[5]

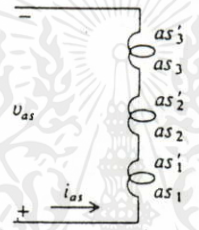
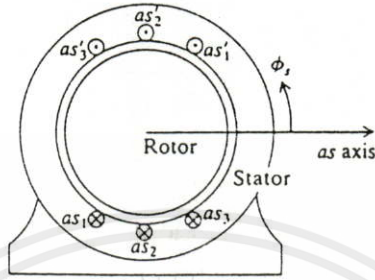


รูป 3.11 อุปกรณ์ไฟฟ้ากลศาสตร์ชนิดหมุน [5]

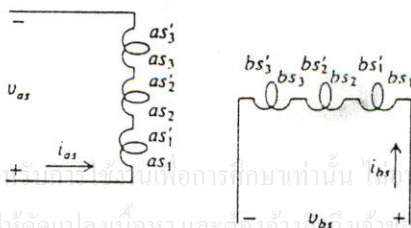
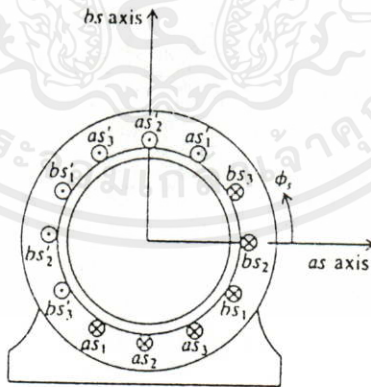
3.3.2 แรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบช่องอากาศ - การพันขดลวดกระจายแบบไซนูซอยด์

ในการวิเคราะห์อุปกรณ์เคลื่อนที่ไฟฟ้ากลศาสตร์ โดยปกติถือว่าขดขดลวดสเตเตอร์กับขดขดลวดโรเตอร์ ประมาณได้เป็นการพันขดขดลวดกระจายแบบไซนูซอยด์ ขดขดลวดแต่ละเฟสของสเตเตอร์อาจประมาณได้เป็นฟังก์ชันของ ϕ_s และรูปคลื่นของแรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบช่องอากาศ (air gap mmf.) ประมาณได้เป็นไซนูซอยด์ตามฟังก์ชัน ϕ_s เช่นกัน ในทางปฏิบัติ

ของเครื่องจักรโดยเฉพาะที่มีขนาดใหญ่ ต้องออกแบบชุดขดลวดให้สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ชอยด์มากที่สุด เพื่อลดฮาร์โมนิกเนื่องจากกระแส และแรงดันให้น้อยที่สุด เพื่อให้ได้รูปคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กเป็นไซน์ชอยด์ การพันชุดขดลวดต้องมีการพันกระจายแบบไซน์ชอยด์ [5]

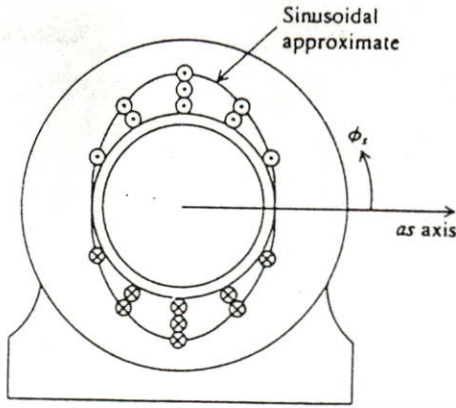


รูป 3.12 ชุดขดลวดสเตเตอร์ เครื่องจักร 2-ขั้ว 1-เฟส [5]

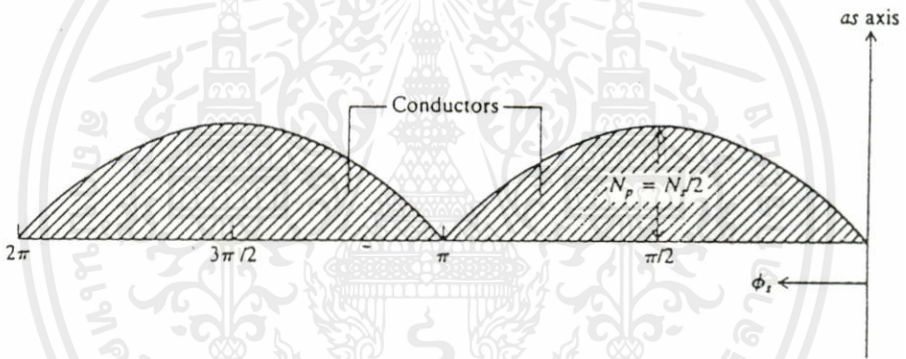


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานั่นเอง กรุณาอย่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้ง Vas เป็นเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 3.13 ชุดขดลวดสเตเตอร์ เครื่องจักร 2-ขั้ว 2-เฟส [5]



รูป 3.14 การพันชุดขดลวด as กระจายลักษณะไซน์ซวยด์ (โดยประมาณ)[5]



รูป 3.15 ภาพตัดขวาง และทำให้รูป 3.14 แบนลง[5]

จากรูป 3.12 เพิ่มขดลวดเข้าไปในชุดขดลวด as จนได้รูป 3.14 เพื่อความสะดวกในการอธิบายแรงเคลื่อนแม่เหล็กกรอบช่องอากาศ เราทำรูป 3.14 ในลักษณะภาพตัดขวาง ทำให้สเตเตอร์ กับโรเตอร์แบนลง (flattening out) ได้ดังรูป 3.15[5]

$$N_{as} = N_p \sin \phi_s : \text{ตำแหน่ง } 0 < \phi_s < \pi$$

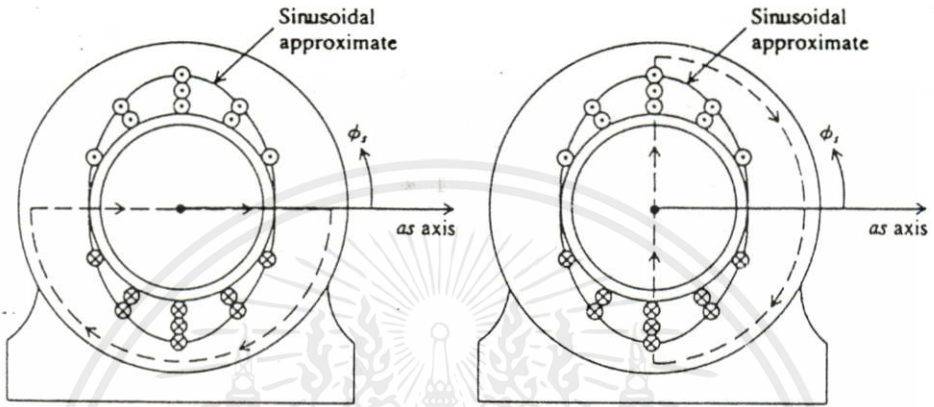
$$N_{as} = -N_p \sin \phi_s : \text{ตำแหน่ง } \pi < \phi_s < 2\pi$$

เมื่อ N_p : ความหนาแน่นจำนวนรอบสูงสุด turn/rad

เอกสาร N_p นี้เป็นสมมุติฐานจำนวนรอบของชุดขดลวดกระจายแบบไซน์ซวยด์นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งนั้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_s = \int_0^{\pi} N_p \sin \phi_s d\phi_s \quad \dots 3.6$$

กระแส i_{as} ที่ไหลในชุดขดลวดสเตเตอร์ซึ่งมีการพันกระจายแบบไซน์ชอยด์ จะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กในทิศทางตามแกน as ไม่คิดผลของการอิ่มตัว ความต้านทานแม่เหล็กของโลหะน้อยกว่าของช่องอากาศมาก สามารถคิดว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีเฉพาะที่ช่องอากาศ ถ้าชุดขดลวดมีการพันกระจายแบบไซน์ชอยด์ นั่นคือแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศก็เป็นไซน์ชอยด์ด้วย [5]



รูป 3.16 ทางเดินวงปิดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากสเตเตอร์ ($m_{mf_{as}}$) [5]

พิจารณาแรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบช่องอากาศของชุดขดลวด as ($m_{mf_{as}}$) เริ่มจากจุดศูนย์กลางของโรเตอร์ดังรูป 3.16 ก ไปทางขวาของแกน as ข้ามช่องอากาศที่ $\phi_s = 0$ ณจุดนี้เราอยู่ในสเตเตอร์ เลี้ยวไปทางขวาทิศทวนเข็มนาฬิกาของชุดขดลวดถึงตำแหน่ง $\phi_s = \pi$ จากจุดนี้ข้ามช่องอากาศอีกครั้ง และ กลับสู่ศูนย์กลางของโรเตอร์กระแสรวมเป็น $N_s i_{as}$ ตามกฎของแอมแปร์มีค่าเท่ากับค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ($H \cdot dl$) รอบทางเดินที่กำหนด แรงเคลื่อนแม่เหล็กคิดเฉพาะที่ช่องอากาศ โดยมีครึ่งหนึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง $\phi_s = 0$ อีกครึ่งหนึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง $\phi_s = \pi$ อาศัยข้อความนี้แรงเคลื่อนแม่เหล็กมีทิศจากโรเตอร์ไปสเตเตอร์ ดังนั้น $m_{mf_{as}}$ เป็นบวกตำแหน่งที่ตำแหน่ง $\phi_s = 0$ และเป็นลบที่ตำแหน่ง $\phi_s = \pi$ ตามทิศทางกระแส i_{as} เช่นกัน [5]

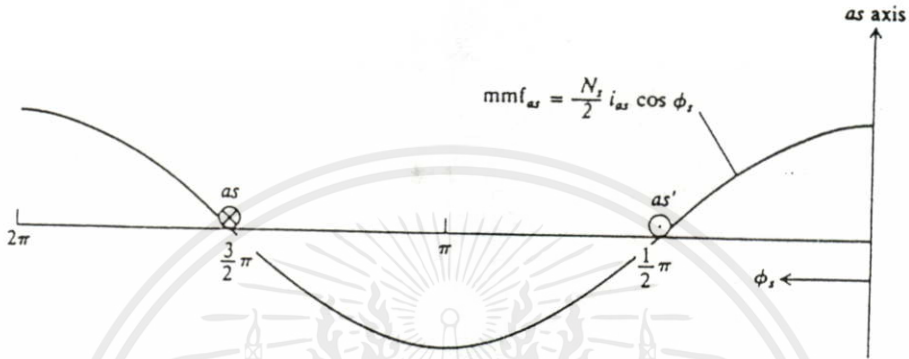
$$m_{mf_{as}}(0) = N_s i_{as} / 2 \quad \dots 3.7$$

$$m_{mf_{as}}(\pi) = -N_s i_{as} / 2 \quad \dots 3.8$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้อัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ เราอาจเขียน $m_{mf_{as}}$ ได้ตามฟังก์ชัน ϕ_s และการเป็นไซน์ชอยด์ของรูปคลื่น [5]

$$m_{mf_{as}}(\phi_s) = \frac{N_s i_{as}}{2} \cos \phi_s \quad \dots 3.9$$

ตามสมการ 3.9 บอกให้เราทราบว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของอากาศเป็นศูนย์ที่ตำแหน่ง $\phi_s \pm \pi/2$ ทำการตรวจสอบด้วยการเลื่อนตำแหน่งโรเตอร์ไปที่ $\phi_s = \pi/2$ ตามรูป 3.16 ข ทางเดินของแรงเคลื่อนแม่เหล็กเป็นไปตามเส้นประในรูป ไม่คิดถึงการเลือกทางเดินแรงเคลื่อนแม่เหล็ก กระแสไหลครบรอบตามทิศ และ กระแสรวมภายในผิวปิดเป็นศูนย์ ตามเส้นทางเดินที่ให้ $\text{mmf}_{as} = 0$ ที่ $\phi_s = \pm \pi/2$ เราจึงสามารถเขียน mmf_{as} ได้ดังรูป 3.17



รูป 3.17 mmf_{as} เนื่องจากการพันขดลวด as กระจายแบบไซนูซอยด์ [5]

ในอุปกรณ์ 2-เฟส ขดลวด bs วางห่างจากขดลวด as ไป $\pi/2$ และมีการพันขดลวดเหมือนกันโดยเอกลักษณ์ เราจึงเขียนแรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวด bs ได้เป็น

$$\text{mmf}_{bs} = \frac{N_s i_{bs}}{2} \sin \phi_s \quad \dots 3.10$$

3.4 แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนรอบช่องอากาศ อุปกรณ์ 2-ขั้ว

3.4.1 อุปกรณ์ 1-เฟส

พิจารณาขดลวดสเตเตอร์ 1-เฟส ดังรูป 3.18 ขดลวด as มีการพันกระจายแบบไซนูซอยด์ โดย as และ as' อยู่ในตำแหน่งที่มีความหนาแน่นจำนวนรอบขดลวดสูงสุด ถ้าเรากำหนดให้กระแสในขดลวด as คงที่ ขดลวด as เกิดสนามแม่เหล็กโดยมีขั้วเหนือในตำแหน่ง $\pi/2 < \phi_s < 3\pi/2$ และขั้วใต้ในตำแหน่ง $-\pi/2 < \phi_s < \pi/2$ แรงเคลื่อนแม่เหล็กมีทิศทางสัมพันธ์กับขั้วที่เกิดขึ้น โดยความจริงแล้วเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วเหนือไปขั้วใต้มีสาเหตุจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กของอากาศ [5] ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{as} = \sqrt{2} I_s \cos [\omega_e t + \theta_{esi}(0)] \quad \dots 3.11$$

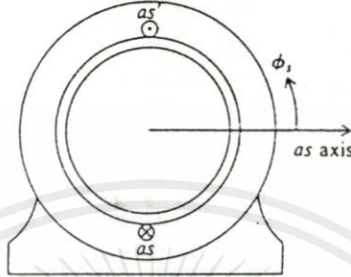
เมื่อ

I_s : rms ของกระแส

w_e : ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า

$\theta_{esi}(0)$: ตำแหน่งเชิงมุมที่ $t = 0$ ของกระแสชั่วขณะ

$$mmf_{as} = \frac{N_s}{2} \sqrt{2} I_s \cos[w_e t + \theta_{esi}(0)] \cos \phi \quad \dots 3.12$$



รูป 3.18 ชุดขดลวดสเตเตอร์ 2-ขั้ว 1-เฟส[5]

ถ้าเราอยู่ตำแหน่ง $\phi_s = 0$ จะเห็นแรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบช่องอากาศเป็นฟังก์ชันไซน์ชอยด์ของเวลา เลือก $\theta_{esi}(0)$ ให้มีค่าเป็นศูนย์ mmf_{as} ที่ $\phi_s = 0$ เป็นค่าบวกสูงสุด(ขั้วใต้) ที่เวลา $t = 0$ และมีค่าลบสูงสุด(ขั้วเหนือ) เมื่อ $w_e t = \pi$ จากทฤษฎีทางตรีโกณมิติ [5]

$$mmf_{as} = \frac{N_s}{2} \sqrt{2} I_s \left\{ \frac{1}{2} \cos[w_e t + \theta_{esi}(0) - \phi_s] + \frac{1}{2} \cos[w_e t + \theta_{esi}(0) + \phi_s] \right\} \quad \dots 3.13$$

กำหนดเทอมโคไซน์คงที่[5]

$$w_e t + \theta_{esi}(0) - \phi_s = C_1 \quad \dots 3.14$$

$$w_e t + \theta_{esi}(0) + \phi_s = C_2 \quad \dots 3.15$$

เดริเวทีฟเทียบกับเวลา[5]

$$\frac{d\phi_s}{dt} = w_e \quad \dots 3.16$$

$$\frac{d\phi_s}{dt} = -w_e \quad \dots 3.17$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สมการที่ 3.14 กับ 3.15 ทำให้เรารู้ว่าตามรูป 3.18 ถ้าเราหมุนรอบช่องอากาศทิศทวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเชิงมุม w_e เทอมแรกของโคไซน์จะปรากฏเป็นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่คงที่ เนื่องจากตำแหน่งคงที่ของขั้วเหนือ และขั้วใต้ ในอีกกรณีหนึ่งถ้าเราหมุนรอบช่องอากาศทิศ

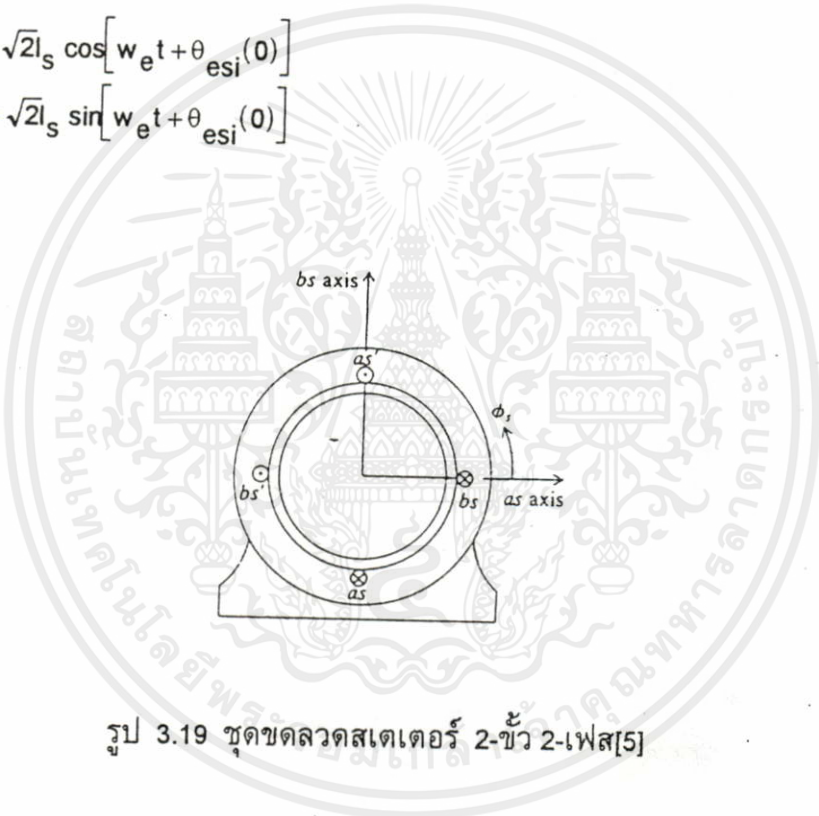
ตามเข็มนาฬิกาที่ความเร็วเชิงมุม ω_e เทอมโคไซน์เทอมที่สองจะปรากฏเป็นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่คงที่ กล่าวอีกนัยหนึ่งแรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบช่องอากาศเมื่อเรามองจาก $\phi_s = 0$ (กำหนดค่า ϕ_s) สามารถมองได้เป็นการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบช่องอากาศ (สนามแม่เหล็กหมุน) ด้วยความเร็วเชิงมุมของกระแสไฟฟ้า ω_e แต่ละครึ่งของแอมพลิจูดแบ่งเป็นแรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบช่องอากาศที่หมุนสวนทางกันแรงบิดจึงเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็ก[5]

3.4.2 อุปกรณ์ 2-เฟส

พิจารณาเครื่องจักร 2-ขั้ว 2-เฟส ตามรูป 3.19 สเตเตอร์มีชุดขดลวด a_s กับ b_s เราอาจเขียนกระแสสเตเตอร์ที่สภาวะคงตัวได้ดังนี้[5]

$$i_{a_s} = \sqrt{2}I_s \cos[\omega_e t + \theta_{esi}(0)] \quad \dots\dots 3.18$$

$$i_{b_s} = \sqrt{2}I_s \sin[\omega_e t + \theta_{esi}(0)] \quad \dots\dots 3.19$$



รูป 3.19 ชุดขดลวดสเตเตอร์ 2-ขั้ว 2-เฟส[5]

จากสมการ 3.16 กับ 3.17 $i_{b_s} = -j i_{a_s}$ เราอาจเขียนทั้งสองสมการได้ในรูปอื่นอีก 4 แบบสำหรับเครื่องจักร 2-ขั้ว แต่ด้วยสองสมการดังกล่าวทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบช่องอากาศหมุนทวนเข็มนาฬิกา ชุดขดลวดทั้งสองมีการพันกระจายแบบไขว้ขอยด์ [5]

$$mmf_s = mmf_{a_s} + mmf_{b_s} \quad \dots\dots 3.20$$

$$mmf_s = \frac{N_s}{2} [i_{a_s} \cos \phi_s + i_{b_s} \sin \phi_s] \quad \dots\dots 3.21$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า แทนค่ากระแสสเตเตอร์ลงในสมการ 3.20 กับ 3.21 และอาศัยทฤษฎีตรีโกณมิติ เราได้สมการ 3.22 [5]

$$\text{mmf}_{as} = \frac{N_s}{2} \sqrt{2} I_s \cos [w_e t + \theta_{esi}(0) - \phi_s] \quad \dots 3.22$$

เรามีแรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบช่องอากาศเพียงตัวเดียว หากกำหนดให้ทอมในวงเล็บของสมการ 3.22 คงที่ เตรีวเทียบกับเวลา $d\phi_s/dt = w_e$ ความสัมพันธ์นี้บอกให้เราทราบว่า ถ้าเราเคลื่อนที่รอบช่องอากาศของรูป 3.19 ตามทิศทวนเข็มนาฬิกาที่ความเร็วเชิงมุม w_e เราจะมองเห็น mmf_s คงที่ ลองเลือกตำแหน่งที่เหมาะสม $\phi_{esi}(0) = 0$ ขนาดของ mmf_s จะเป็น $(N_s/2)/2I_s$ ถ้าเวลาเพิ่มขึ้นเราเริ่มเคลื่อนตามทิศทวนเข็มนาฬิกาที่ w_e เราจะมองเห็น mmf_s มีขนาดเท่าเดิม[5]

แกน bs นำหน้าแกน as อยู่ $\pi/2$ ตำแหน่งของแกนทั้งสองเทียบกับตำแหน่งของกระแสทั้งสองต้องคงที่ที่เวลา $t=0$ โดยมี $\theta_{esi}(0) = 0$, mmf_s เป็นฟังก์ชันโคไซน์ของมุม ϕ_s มีค่าสูงสุดเป็น $(N_s/2)/2I_s$ ทิศตามแกน as ของรูป 3.19 กระแสในชุดขดลวดสเตเตอร์ซึ่งเป็นสาเหตุของเส้นแรงแม่เหล็กไหลเข้าช่องอากาศจากสเตเตอร์ ทำให้ได้แรงเคลื่อนแม่เหล็ก เกิดชั่วเหนือขึ้นเหนือพื้นที่บริเวณนี้ เวลา $t=0$ เกิดชั่วเหนือขึ้นที่ $\pi/2 < \phi_s < 3\pi/2$ โดยมีความเข้มสูงสุดที่ $\phi_s = \pi$ ในทำนองเดียวกันเกิดชั่วใต้ขึ้นบริเวณ $-\pi/2 < \phi_s < \pi/2$ โดยมีความเข้มสูงสุดที่ $\phi_s = 0$ เครื่องจักร 2-ขั้ว เกิดชั่ว 2-ขั้ว เมื่อได้รับการกระตุ้นมีแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนรอบช่องอากาศ mmf_s ด้วยความเร็ว w_e [5]

3.4.3 อุปกรณ์ 3-เฟส

รูป 3.20 แสดงการจัดชุดขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักร 2-ขั้ว 3-เฟส สเตเตอร์มีความสมมาตร ชุดขดลวดทุกชุดเหมือนกันโดยเอกลักษณ์กระจายแบบไซน์ฮุซอร์ด ด้วยจำนวนรอบสมมูล N_s และแกนแม่เหล็กห่างกัน 120 องศา ทิศทางบวกให้ถือจากการทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนรอบช่องอากาศในทิศทวนเข็มนาฬิกา[5]

สมการแรงเคลื่อนแม่เหล็กแต่ละเฟสของชุดขดลวด [5]

$$\text{mmf}_{as} = 0.5 N_s i_{as} \cos \phi_s \quad \dots 3.23$$

$$\text{mmf}_{bs} = 0.5 N_s i_{bs} \cos (\phi_s - 2\pi/3) \quad \dots 3.24$$

$$\text{mmf}_{cs} = 0.5 N_s i_{cs} \cos (\phi_s + 2\pi/3) \quad \dots 3.25$$

สมการกระแสแต่ละเฟสของชุดขดลวด [5]

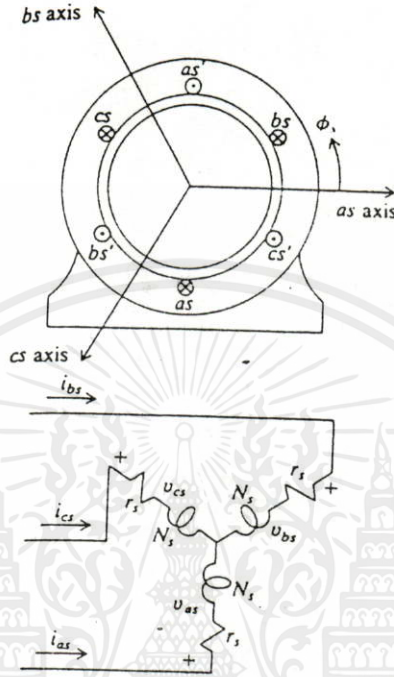
$$i_{as} = \sqrt{2} I_s \cos [w_e t + \theta_{esi}(0)] \quad \dots 3.26$$

$$i_{bs} = \sqrt{2} I_s \cos [w_e t - \frac{2}{3}\pi + \theta_{esi}(0)] \quad \dots 3.27$$

$$i_{cs} = \sqrt{2} I_s \cos [w_e t + \frac{2}{3}\pi + \theta_{esi}(0)] \quad \dots 3.28$$

$$\text{mmf}_s = \text{mmf}_{as} + \text{mmf}_{bs} + \text{mmf}_{cs} \quad \dots\dots 3.29$$

$$\text{mmf}_s = \frac{N_s}{2} \sqrt{2} I_s \frac{3}{2} \cos[\omega_e t + \theta_{esi}(0) - \phi_s] \quad \dots\dots 3.30$$



รูป 3.20 ชุดขดลวดสเตเตอร์ เครื่องจักร 2-ขั้ว 3-เฟส[5]

หากเราเปรียบเทียบ mmf_s จากอุปกรณ์ 2-เฟส กับอุปกรณ์ 3-เฟส เห็นได้ว่าเหมือนกันยกเว้นขนาดของ mmf_s เนื่องจากอุปกรณ์ 3-เฟส มากกว่า mmf_s เนื่องจากอุปกรณ์ 2-เฟส อยู่ $3/2$ เท่า[5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ข้อกำหนดในทฤษฎีเบื้องต้น

ในการอธิบายลักษณะและคุณสมบัติทางกายภาพของเครื่องจักรด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้เป็นหลักเกณฑ์ หรือทฤษฎีการทำงานเบื้องต้นของเครื่องจักรในลักษณะโครงสร้างที่แตกต่าง กันออกไป เพื่อลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ จึงสมมติให้เครื่องจักรเป็นเครื่องจักรในอุดมคติ

4.1 ข้อสมมติเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ [1],[4]

- 1) ไม่มีการอ้อมตัวในแกนเหล็ก เมื่อสนามแม่เหล็ก 2 สนามเกิดปฏิกิริยากัน สามารถแบ่งคิดได้ที่ละสนาม และค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง กับ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมของชุดขดลวดในเครื่องจักรไม่ขึ้นกับค่าของกระแส
- 2) แรงแเคลื่อนแม่เหล็ก และเส้นแรงแม่เหล็กผ่านช่องอากาศ คิดเฉพาะค่าองค์ประกอบอันดับหนึ่งที่กระจายในช่องอากาศ (ไม่คิดฮาร์โมนิคอื่น) ซึ่งจะสมมาตรกันรอบแกนแม่เหล็กของขดลวด
- 3) ไม่คิดผลจากสลอท และ ขดลวดที่กระจายประกอบด้วยตัวนำขนาดเล็กไม่คิดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ
- 4) วงจรแม่เหล็กไม่มีการสูญเสียจากฮิสเตอร์ซิส และกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

4.2 ค่าความเหนี่ยวนำของการพันขดลวดแบบกระจายและแบบรวม

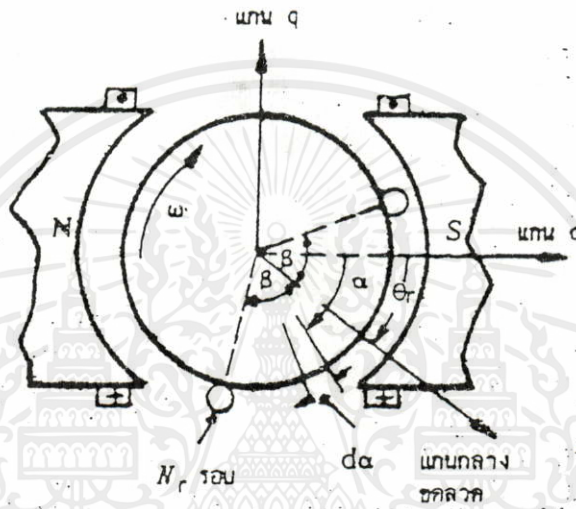
ในหัวข้อนี้เป็นลักษณะโครงสร้างทั่วไปของเครื่องจักรไฟฟ้าที่ใช้งาน อธิบายด้วยสมการแรงดันของชุดขดลวด และ สมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า อันเป็นสมการทั่วไปของเครื่องจักรซึ่งเกี่ยวข้องกับกับสัมประสิทธิ์ความเหนี่ยวนำตัวเอง และความเหนี่ยวนำของชุดขดลวด ด้วยเหตุนี้ก่อนทำการวิเคราะห์ลักษณะของเครื่องจักร จำเป็นต้องรู้ความเหนี่ยวนำของชุดขดลวดในเครื่องจักรที่ใช้ก่อน ลักษณะทางกายภาพของการพันขดลวดในเครื่องจักรจริงมี 2 แบบ แบบหนึ่งมีการพันกระจายคลอบคลุมผิวตัวนำแม่เหล็กฝังในช่องสลอท และ อีกแบบมีการพันแบบรวมหรือเป็นก้อนพันจำนวนหลายรอบ ในการแสดงค่าความเหนี่ยวนำเริ่มจากหาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศซึ่งไม่เป็นรูปไซนูซอยด์ อาศัยข้อสมมติว่าคิดเฉพาะองค์ประกอบอันดับหนึ่ง ไม่รวมฮาร์โมนิคที่เกิดจากการกระจายความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก หรือแม้แต่ขดลวดที่พันแบบกระจายในท้ายสุด ก็ต้องแปลงให้อยู่ในรูปชุดขดลวดที่พันเป็นก้อนเพื่อความง่ายในการวิเคราะห์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการ ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนั้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ความเหนี่ยวนำตัวเอง และความเหนี่ยวนำร่วมของชุดขดลวดพันรวมเป็นก้อน

พิจารณาเครื่องจักร 2-ขั้ว ดังรูป 4.1 ลักษณะโรเตอร์เป็นทรงกระบอก รัศมี r_r ยาว และลักษณะสเตเตอร์มีขั้วขาคี่เหลี่ยมที่มีชุดขดลวดพันเป็นก้อน จำนวนรอบ N_s จ่ายไฟกระแส i_s เพื่อสร้างสนามกระตุ้นผ่านช่องอากาศ ชุดขดลวดโรเตอร์มีจำนวนรอบ N_r พันแบบรวมระยะขั้วสั้น ระยะห่างมุมทางไฟฟ้า 2β แกนไดเร็กต์ และแกนควอดราเจอร์ เป็นแกนสมมติและตั้งฉากกัน เขียนแทนด้วย แกน d และ แกน q แกนทั้งสองจะแบ่งเครื่องจักรออกสมมาตรกัน และกำหนดแกนแม่เหล็กชุดขดลวดโรเตอร์ทำมุมทางไฟฟ้ากับแกน d ด้วยมุม θ_r rad [1]



รูป 4.1 ขดลวดพันแบบเป็นก้อนที่โรเตอร์ ระยะขั้วสั้น [1]

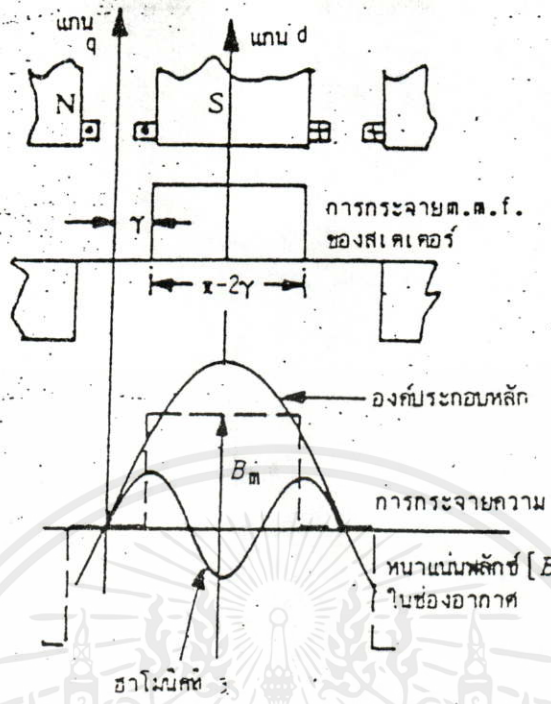
4.2.1.1 ความเหนี่ยวนำร่วม

ไดอะแกรมรูป 4.2 สร้างขึ้นจากการตัด และคลี่ขยายรูป 4.1 และแสดงค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของช่องอากาศที่กระจายอยู่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก $B(\alpha)$ ซึ่งสมมาตรกันโดยรอบแกน d ให้แกน d เป็นแกนอ้างอิง และสมมติ $B(\alpha)$ มีลักษณะกระจายรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่าสูงสุดเป็น B_m และความกว้างเชิงมุม $\pi-2\gamma$ เราสามารถเขียน $B(\alpha)$ ในรูปอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังนี้[1]

$$B(\alpha) = \frac{4B_m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos(2n-1)\gamma \cos(2n-1)\alpha \right] \quad \dots 4.1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจาก แอมแปร์-เทออร์น ในชุดขดลวด ช่องอากาศยาว g และความกว้างขั้ว $(\pi-2\gamma)$ เขียนแทนด้วย B_m มีค่าตามสมการ [1]

$$B_m = \mu H = \mu N_s i_s / g \quad \dots 4.2$$



รูป 4.2 แสดงการกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็ก และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ผ่านช่องอากาศ ด้านสเตเตอร์[1]

แทนค่าสมการ 4.2 ลงในสมการ 4.1[1]

$$B(\alpha) = i_s \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} K_{2n-1} \cos(2n-1)\alpha \right] \quad \dots 4.3$$

$$K_{2n-1} = \frac{4\mu}{\pi g} N_s \cos(2n-1)\gamma \quad \dots 4.4$$

ค่าความเหนี่ยวนำพิจารณาจากเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำของ พิจารณาสวนเล็ก ๆ ของผิวโรเตอร์ rd ในรูป 4.1 จะได้เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำของชุดขดลวดโรเตอร์ [1]

$$d\lambda_r = N_r i_r B(\alpha) d\alpha \quad \dots 4.5$$

เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำทั้งหมดในโรเตอร์เป็น [1]

$$\lambda_r = 2N_r i_r l_r \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^2} K_{2n-1} \cos(2n-1)\theta_r \sin(2n-1)\beta \right] \quad \dots 4.6$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ความเหนี่ยวนำร่วมของชุดขดลวดสเตเตอร์ และโรเตอร์ L_{sr} คือ λ_r / i_r [1]

$$L_{Sr} = 2N_r I_r \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^2} K_{2n-1} \cos(2n-1)\theta_r \sin(2n-1)\beta \right] \quad \dots 4.7$$

จากสมการ 4.3 กับ 4.7 จะเห็นได้ว่าค่าฮาร์มอนิกของความเหนี่ยวนำรวมประกอบด้วยฮาร์มอนิกของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กอันดับเดียวกัน ลักษณะฮาร์มอนิกของความเหนี่ยวนำรวมอาจอยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นถ้า $\sin(2n-1)\beta = 0$ หรือ $(2n-1) = \pi/\beta$ ดังนั้น [1]

$$2\beta = 2\pi/(2n-1) \quad \dots 4.8$$

การลดฮาร์มอนิกที่ 3 นั่นคือ $n=2$ ต้องวางขดขดลวดให้มีระยะห่างเป็น

$$2\beta = 2\pi/3 = 120$$

พิจารณาลำดับขั้นต่อไปนี้ [1]

1) ขดขดลวดโรเตอร์มีระยะขั้ว $\beta = 1/2$

$$L_{Sr} = 2N_r I_r \left[K_1 \cos\theta_r + \frac{K_3}{3^2} \cos 3\theta_r + \frac{K_5}{5^2} \cos 5\theta_r + \dots \right] \quad \dots 4.9$$

2) คิดเฉพาะองค์ประกอบอันดับหนึ่งของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก นั่นคือ $n=1$

$$L_{Sr} = 2N_r I_r K_1 \sin\beta \cos\theta_r = M_{Sr} \sin\beta \cos\theta_r \quad \dots 4.10$$

3) คิดระยะขั้ว $B = 1/2$ และคิดเฉพาะค่าองค์ประกอบอันดับหนึ่ง

$$L_{Sr} = 2N_r I_r K_1 \cos\theta_r = M_{Sr} \cos\theta_r \quad \dots 4.11$$

4.2.1.2 ความเหนี่ยวนำตัวเอง

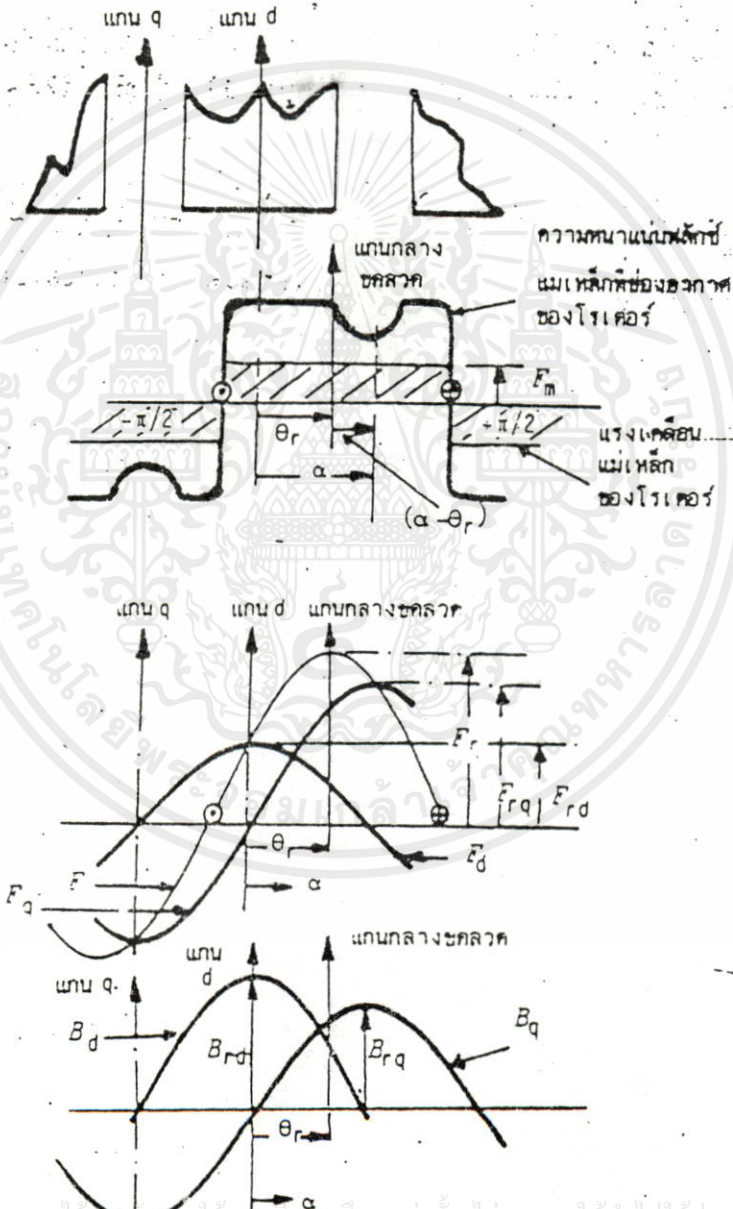
เครื่องจักรที่มีโครงสร้างดังรูป 4.1 แรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดขดลวดโรเตอร์อันเนื่องมาจากความต้านทานแม่เหล็กในช่องอากาศจะแปรตามตำแหน่ง ด้วยเหตุที่ความต้านทานแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงทำให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศเปลี่ยนขนาดไป ดังแสดงได้ดังรูป 4.3 ในการหาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศที่กระจายอยู่ เป็นเรื่องยากที่จะทำการโดยตรงจากการอินทิเกรตเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องขดขดลวดโรเตอร์ จำเป็นต้องอาศัยการประมาณค่าในการหาความเหนี่ยวนำตัวเอง[1]

พิจารณาขดขดลวดโรเตอร์ ระยะขั้วเต็ม และแรงเคลื่อนแม่เหล็กกระจายเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เราคิดเพียงองค์ประกอบอันดับหนึ่งที่เป็นไซน์ฮาร์มอนิกแทนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่าสูงสุดมีค่าเป็น F_r แตก F_r เข้าตามแกน d และ แกน q มีค่าสูงสุดเป็น F_{rd} และ F_{rq} ทั้งสองค่ามีการกระจายเป็นรูปไซน์ฮาร์มอนิกของ F_d และ F_q ด้วย เมื่อความต้านทานแม่เหล็กแตกต่างกัน F_d, F_q มีการกระจายของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไม่เป็นไซน์ฮาร์มอนิก แต่กระจายโดยรอบแกนอ้างอิงอย่างสมมาตรในช่องอากาศ ดังนั้นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กก็คิดเฉพาะค่าองค์ประกอบ

อันดับหนึ่งโดยแยกออกเป็น B_d และ B_q มีค่าสูงสุดเป็น B_{rd} กับ B_{rq} ดังรูป 4.3 ถ้ากำหนดว่า เครื่องจักรมีช่องอากาศ 2 ช่อง ที่สร้างขึ้นมีค่าสม่ำเสมอ คือช่องอากาศ g_d ตามแกน d และช่องอากาศ g_q ตามแกน q ในขณะเดียวกันความต้านทานแม่เหล็กของแกน d น้อยกว่า แกน q ดังนั้น $g_q > g_d$

$$F_{rd} = F_r \cos \theta_r \quad \dots\dots 4.12$$

$$F_{rq} = F_r \cos (\theta_r + \pi/2) = -F_r \sin \theta_r \quad \dots\dots 4.13$$



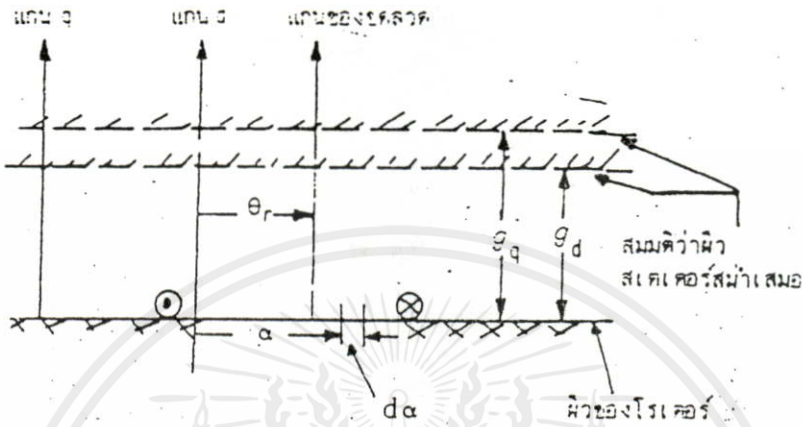
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.3 การกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ผ่านช่องอากาศบนแกน 2 แกน[1]

กำหนดแกน d เป็นแกนอ้างอิง องค์ประกอบแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่กระทำเป็นมุมห่างจาก แกน d เท่ากับ α

$$F_{\alpha d} = F_{rd} \cos \alpha = F_r \cos \theta_r \cos \alpha \quad \dots 4.14$$

$$F_{\alpha q} = F_{rq} \cos (\alpha + \pi/2) = F_r \sin \theta_r \sin \alpha \quad \dots 4.15$$



รูป 4.4 สมมติฐานการเกิดช่องอากาศ 2 แกน ที่สม่ำเสมอ[1]

จากรูป 4.4 ค่าความนำแม่เหล็กของพื้นที่ $r d \alpha$ เป็น [1]

$$d\Delta_d = \mu r d \alpha / g_d \quad \dots 4.16$$

$$d\Delta_q = \mu r d \alpha / g_q \quad \dots 4.17$$

เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวขดล่องขดลวดโรเตอร์ d_r [1]

$$d\lambda_r = N_r (d\Delta_d F_{\alpha d} + d\Delta_q F_{\alpha q})$$

$$d\lambda_r = N_r \mu r d [(F_{\alpha d} / g_d) + (F_{\alpha q} / g_q)] \quad \dots 4.18$$

ความนำแม่เหล็กของขดลวดเต็มระยะขั้ว [1]

$$\Delta_d = \mu r / g_d \quad \dots 4.19$$

$$\Delta_q = \mu r / g_q \quad \dots 4.20$$

ดังนั้น [1]

เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\lambda_r = \frac{N_r}{\pi} d \alpha [\Delta_d F_{\alpha d} + \Delta_q F_{\alpha q}] \quad \dots 4.21$$

แทนค่าสมการ 4.14 กับ 4.15 ลงในสมการ 4.21 และอินทิเกรตหาเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยว คล้องทั้งหมด [1]

$$\lambda_r = \frac{F_r N_r}{\pi} [(\Delta_d + \Delta_q) + (\Delta_d - \Delta_q) \cos 2\theta_r] \quad \dots 4.22$$

จากรูป 4.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็กรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (จำนวน แอมแปร์-เทิร์น ที่ผ่านช่อง อากาศทั้งสอง) มีค่าสูงสุดเป็น $F_m = N_r i_r / 2$ แรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์ที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม ผืนผ้าสามารถไขอนุกรมฟูเรียร์แสดงแทนได้ดังสมการ 4.2 เมื่อ $\gamma = 0$ และเขียนมุม α ด้วย $(\alpha - \theta_r)$ จาก $\gamma = 0$ ชุดขดลวดถือเป็นการพันระยะซ้ำเต็ม และแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ กระจายอยู่ สมมาตรกันโดยรอบแกนโรเตอร์[1]

$$F(\alpha - \theta_r) = \frac{4}{\pi} F_m \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos(2n-1)(\alpha - \theta_r) \right] \quad \dots 4.23$$

คิดเฉพาะองค์ประกอบอันดับหนึ่ง [1]

$$F(\alpha - \theta_r) = \frac{4}{\pi} F_m \cos(\alpha - \theta_r) \quad \dots 4.24$$

ค่าสูงสุดขององค์ประกอบอันดับหนึ่ง เกิดขึ้นเมื่อแกนโรเตอร์วางทับอยู่กับแกน d นั้น คือ $\alpha = \theta_r$ [1]

$$F_r = \frac{4F_m}{\pi} = \frac{2N_r i_r}{\pi} \quad \dots 4.25$$

แทนค่าสมการ 4.25 ลงในสมการ 4.22 [1]

$$\lambda_r = \frac{2}{\pi^2} N_r^2 i_r [(\Delta_d + \Delta_q) + (\Delta_d - \Delta_q) \cos 2\theta_r] \quad \dots 4.26$$

ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของโรเตอร์ [1]

$$L_r = \lambda_r / i_r = L_{r1} + L_{r2} \cos 2\theta_r \quad \dots 4.27$$

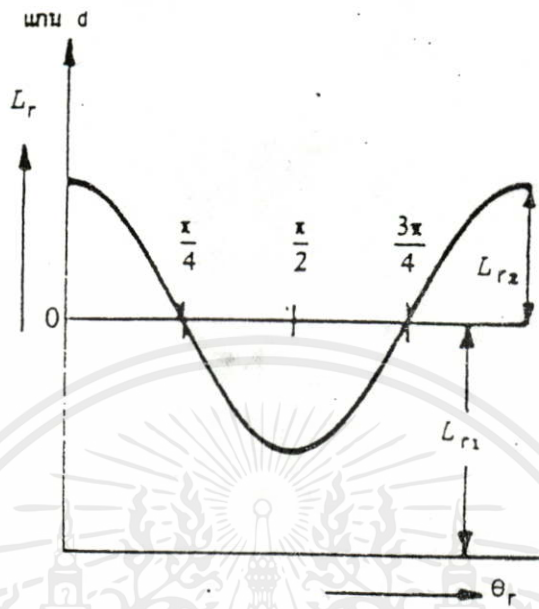
เมื่อ [1]

$$L_{r1} = \frac{2}{\pi^2} N_r^2 [\Delta_d + \Delta_q] \quad \dots 4.28$$

และ [1] อีกทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

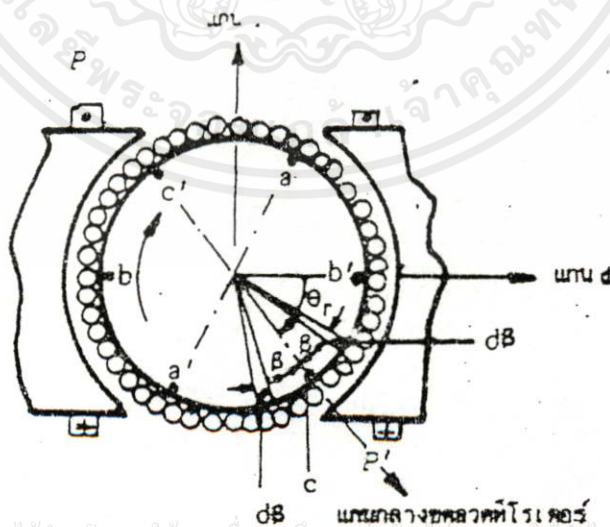
$$L_{r2} = \frac{2}{\pi^2} N_r^2 [\Delta_d - \Delta_q] \quad \dots 4.29$$

ดังนั้นความเหนี่ยวนำตัวเองของโรเตอร์จากเครื่องจักรมีการผันแบบรวม และมีชั่วชาเลี่ยนท์ความเหนี่ยวนำตัวเองประกอบด้วยค่าคงที่ กับฮาร์โมนิคที่ 2 รวมกันดังรูป 4.5 [1]



รูป 4.5 ความเหนี่ยวนำของชุดขดลวดขณะเคลื่อนที่ โครงสร้างมีชั่วชาเลี่ยนท์ [1]

4.2.2 ความเหนี่ยวนำตัวเอง และความเหนี่ยวนำร่วมของการพันชุดขดลวดแบบกระจาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.6 การกระจายขดลวดตัวนำบนโรเตอร์อย่างสม่ำเสมอ [1]

จากรูป 4.6 แสดงผิวหน้าโรเตอร์รูปทรงกระบอก และคลุ่มด้วยตัวนำกระจายอยู่เต็มผิวโรเตอร์อย่างสม่ำเสมอ จำนวนตัวนำ Z ตัว อนุกรมกันต่อองศาเรเดียนไฟฟ้า เมื่อเริ่มต้นขดลวดที่ต่อเป็นเป็นเฟสเดียวกันพันในลักษณะตรงข้ามกัน คือ ตำแหน่ง P และ P' ทำให้แนวแกนสนามแม่เหล็กของขดขดลวดเฟสเดียวอยู่ที่ตำแหน่ง P และ P' ทำมุม θ_r กับแกน d [1]

4.2.2.1 ความเหนี่ยวนำร่วม

เมื่อกระตุ้นขดขดลวดสเตเตอร์ที่มีขั้วขาละเอียด ทำให้เกิดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกระจายในช่องอากาศ ซึ่งเหมือนกับสมการ 4.2 เทียบกับแกน d ดังรูป 4.6 ส่วนย่อย $d\beta$ มีจำนวนตัวนำ $Zd\beta$ ตัว คิดเสมือนกับการพันขดลวดแบบรวม คือ $Zd\beta$ รอบ และมีระยะห่างแต่ละช่วง 2β ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องส่วนย่อย หาได้จากสมการ 4.8 โดยมี $N_r = Zd\beta$ [1]

$$d\lambda_r = 2Z\beta i_s l_r \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^2} K_{2n-1} \cos(2n-1)\theta_r \sin(2n-1)\beta \right] \quad \dots 4.30$$

เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องทั้งหมดในขดขดลวดเฟสเดียว หาได้จากการอินทิเกรตสมการ 4.30 โดยมีขอบเขตการอินทิเกรตตั้งแต่ 0 ถึง π

$$\lambda_r = 4Zi_s l_r \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^3} K_{2n-1} \cos(2n-1)\theta_r \right] \quad \dots 4.31$$

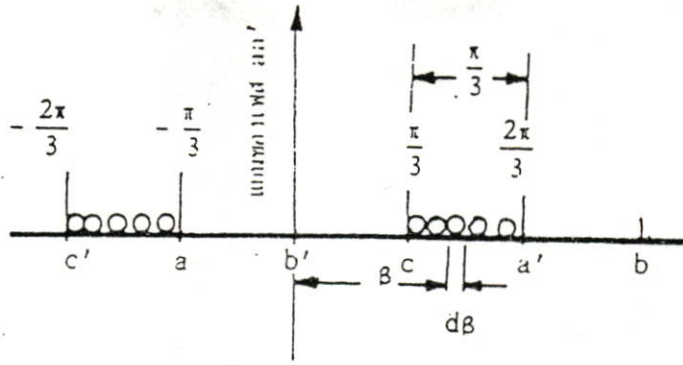
ความเหนี่ยวนำร่วม [1]

$$L_{sr} = 4Zl_r \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^3} K_{2n-1} \cos(2n-1)\theta_r \right] \quad \dots 4.32$$

$$L_{sr} = 4Zl_r \left[K_1 \cos\theta_r - \frac{K_3}{3} \cos 3\theta_r + \frac{K_5}{5} \cos 5\theta_r - \dots \right] \quad \dots 4.33$$

เปรียบเทียบสมการ 4.9 กับ 4.33 เห็นได้ว่าลักษณะความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกระจายเหมือนกัน แต่ความเหนี่ยวนำร่วมของการพันแบบกระจายเมื่อฮาร์โมนิคอันดับสูงจะลดลงเร็วกว่าการพันแบบรวม ดังนั้นการพันขดลวดแบบรวม ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศประกอบด้วยฮาร์โมนิคของความเหนี่ยวนำร่วมอยู่ด้วย แต่ในการพันขดลวดแบบกระจายฮาร์โมนิคของความเหนี่ยวนำร่วมมีขนาดเล็ก ทำให้คิดเฉพาะค่าองค์ประกอบอันดับหนึ่งได้ [1]

$$L_{sr} = 4Zl_r K_1 \cos\theta_r = M_{sr} \cos\theta_r \quad \dots 4.38$$



รูป 4.7 แสดงการตีแผ่ตัวนำเฟส aa' [1]

จากรูป 4.6 แสดงชุดขดลวด 3-เฟส มีจุดเชื่อมต่อเป็น a, b และ c การหาความเหนี่ยวนำร่วมของเฟสใดเฟสหนึ่งใน 3 เฟส หาได้จากสมการ 4.34 เพียงเปลี่ยนขอบเขตของการอินทิเกรตและแนวแกนแม่เหล็กอ้างอิง ดังรูป 4.7 พิจารณาชุดขดลวดเฟส aa' เราได้ขอบเขตการอินทิเกรตเป็น $\beta = 2\pi/3$ และ $\beta = \pi/3$ [1]

$$L_{aa} = 2Zl r \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^3} K_{2n-1} \cos(2n-1)\theta_r \left(\cos(2n-1)\frac{\pi}{3} - \cos(2n-1)\frac{2\pi}{3} \right) \right] \dots 4.35$$

แทนค่า $n = 1$ [1]

$$L_{aa} = 2Zl r \left[K_1 \cos \theta_r + 2 \frac{K_3}{3^3} \cos 3\theta_r + \frac{K_5}{5^3} \cos 5\theta_r + \dots \right] \dots 4.36$$

กรณีเฟส bb' มีแกนแม่เหล็กที่ตำแหน่ง $(\theta_r - 2\pi/3)$ [1]

$$L_{bb} = 2Zl r \left[K_1 \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + 2 \frac{K_3}{3^3} \cos 3\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{K_5}{5^3} \cos 5\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + \dots \right] \dots 4.37$$

กรณีเฟส cc' มีแกนแม่เหล็กที่ตำแหน่ง $(\theta_r + 2\pi/3)$ [1]

$$L_{cc} = 2Zl r \left[K_1 \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + 2 \frac{K_3}{3^3} \cos 3\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{K_5}{5^3} \cos 5\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \dots \right] \dots 4.38$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
คิดเฉพาะองค์ประกอบอันดับหนึ่ง [1] เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{aa} = 2Zl r K_1 \cos \theta_r = \frac{1}{2} M_{sr} \cos \theta_r \dots 4.39$$

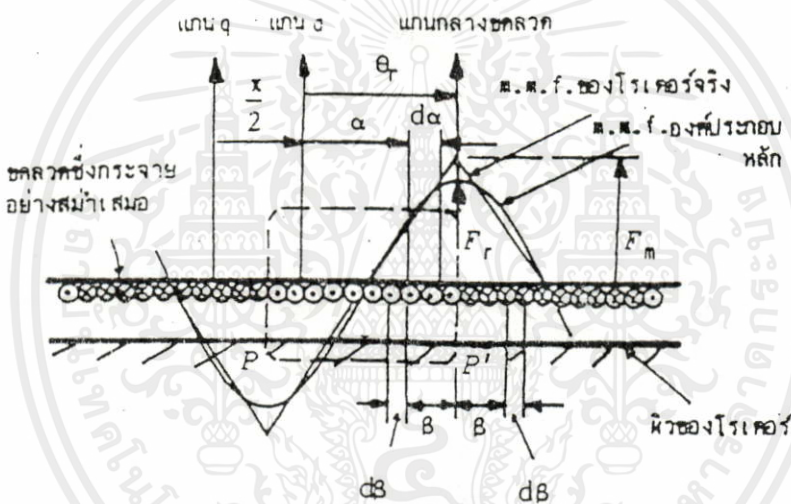
$$L_{bb} = 2Zl r K_1 \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) = \frac{1}{2} M_{sr} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \quad \dots 4.40$$

$$L_{cc} = 2Zl r K_1 \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) = \frac{1}{2} M_{sr} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \quad \dots 4.41$$

4.2.2.2 ความเหนียวนำตัวเอง

ชุดขดลวดในโรเตอร์ที่กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ นำมาตัด และ คลี่ออกเป็นไดอะแกรมได้ดังรูป 4.8 แหล่งจ่ายไฟเฟสเดียวจ่ายเข้าที่จุด P และ P' ด้วยกระแส i_r สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กกระจายรูปสามเหลี่ยม แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวมจาก P ถึง P' เกิดจากกระแส i_r แรงเคลื่อนแม่เหล็กจึงมีค่าเท่ากับ $Z\pi i_r$ รูปสามเหลี่ยมมีค่าสูงสุดเป็น F_m ซึ่งเท่ากับ $2\pi i_r/2$

$$F_m = Z\pi i_r/2 \quad \dots 4.47$$



รูป 4.8 การกระจายแรงเคลื่อนแม่เหล็กตามตำแหน่งของขดลวดที่วางกระจายสม่ำเสมอ [1]

ใช้แกนชุดขดลวดเป็นแกนอ้างอิง $\beta = 0$ เขียนแรงเคลื่อนแม่เหล็กในรูปอนุกรมฟูเรียร์ [1]

$$F(\beta) = \frac{8}{\pi} F_m \left[\cos \beta + \frac{1}{3^2} \cos 3\beta + \frac{1}{5^2} \cos 5\beta + \dots \right] \quad \dots 4.42$$

คิดเฉพาะองค์ประกอบอันดับหนึ่ง [1]

$$F(\beta) = \frac{8}{\pi} F_m \cos \beta \quad \dots 4.43$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไปว่ากรณีใดที่อื่น อีกทั้งห้ามมิให้อัปโหลดขึ้นเว็บไซต์สาธารณะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F(\beta) = \frac{8}{\pi} F_m = \frac{4}{\pi} Z i_r \quad \dots 4.44$$

เราสามารถแยก F_r ให้อยู่ในแกน d และ แกน q อาศัยวิธีในหัวข้อ 4.2.1 อันเป็นการหาความเหนี่ยวนำตัวเองของการพันชุดขดลวดแบบรวมมาใช้หาความเหนี่ยวนำตัวเองของการพันชุดขดลวดแบบกระจาย จากรูป 4.8 เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำล้อมส่วนย่อยมีตัวนำ $Zd\beta$ รอบและมุมระยะห่างชุดขดลวด 2β ใช้วิธีดังสมการ 4.22 แต่เปลี่ยนขอบเขตการอินทิเกรตเป็น $\theta_r - \beta$ ถึง $\theta_r + \beta$ [1]

$$d\lambda_r = \frac{8Z^2}{\pi^2} d\beta i_r [\Delta_d \cos^2 \theta_r + \Delta_q \sin^2 \theta_r] \sin \beta \quad \dots 4.45$$

เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำล้อมทั้งหมดของโรเตอร์ที่มีชุดขดลวดพันแบบกระจาย [1]

$$\lambda_r = \frac{8Z^2 i_r}{\pi^2} [(\Delta_d + \Delta_q) + (\Delta_d - \Delta_q) \cos 2\theta_r] \quad \dots 4.46$$

ความเหนี่ยวนำตัวเองมีค่าเป็น [1]

$$L_r = \lambda_r / i_r = L_{r1} + L_{r2} \cos 2\theta_r \quad \dots 4.47$$

เมื่อ $L_{r1} = \frac{8Z^2}{\pi^2} [\Delta_d + \Delta_q]$

และ $L_{r2} = \frac{8Z^2}{\pi^2} [\Delta_d - \Delta_q]$

เห็นได้ว่าความเหนี่ยวนำตัวเองของการพันชุดขดลวดทั้งสองแบบมีลักษณะเหมือนกัน [1]

4.3 ไคอะแกรมการพันชุดขดลวดแบบรวม

ตามรูป 4.10 แสดงทรานสดิวเซอร์ (transducer) แบบหมุนที่เป็นระบบกระตุ้นคู่ 2-ขั้ว สเตเตอร์ และโรเตอร์มีการพันชุดขดลวดแบบรวม ป้อนแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา v_s กับ v_r สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา กำหนดโรเตอร์หมุนทิศทางตามเข็มนาฬิกา ความเร็วเชิงมุม w_r rad/sec สนามแม่เหล็กระหว่างโรเตอร์ กับ สเตเตอร์ทำมุมกัน θ_r rad [1]

กรณีทรานสดิวเซอร์หลายขั้ว มุม และ ความเร็วเชิงมุมโรเตอร์มีความสัมพันธ์กันดังนี้ [1]

$$\theta_r = (\text{จำนวนคู่ขั้ว}) * \theta_m \quad \dots 4.48$$

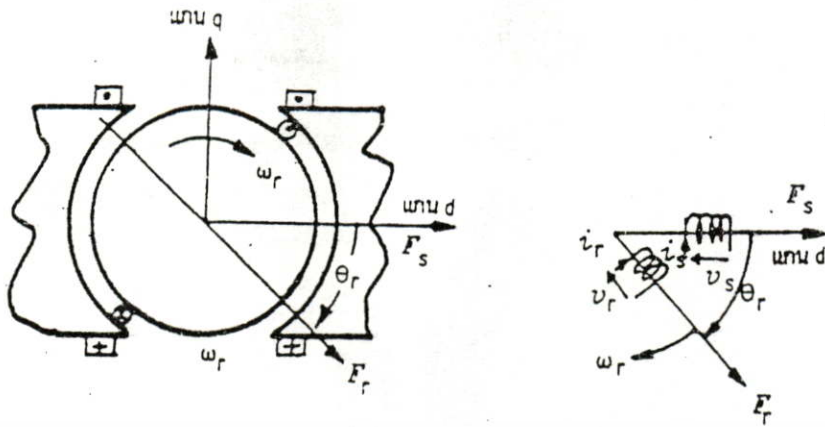
$$w_r = (\text{จำนวนคู่ขั้ว}) * \omega_m \quad \dots 4.49$$

เมื่อ w_r และ θ_r เป็นค่าทางไฟฟ้า

w_m และ θ_m เป็นค่าทางกลศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ลักษณะของเครื่องจักรที่มีชุดขดลวดหลายชุด ผลที่ได้จะทับกับชุดขดลวดชุดเดิม การหาสมการแรงดัน และ สมการแรงบิด หาได้จากรูปแบบทรานสดิวเซอร์ในรูป 4.9 อันเป็นทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์เครื่องจักรหมุนทั่วไป [1]



รูป 4.9 โดอะแกรมการพันขดขดลวดแบบรวม แทนทรานดิเวอร์แบบหมุน ระบบกระตุ้นคู่ (กระตุ้นสนามแม่เหล็กสองทาง)[1]

4.3.1 สมการแรงดันเหนี่ยวนำ

เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องทั้งหมดของขดขดลวดประกอบด้วย 2 ส่วน คือเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องตัวเอง กับ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องร่วม [1]

$$\lambda_s = L_s i_s + L_{sr} i_r \quad \dots 4.50$$

$$\lambda_r = L_r i_r + L_{sr} i_s \quad \dots 4.51$$

สมการแรงดันของขดขดลวด [1]

$$v_s = i_s R_s + p \lambda_s \quad \dots 4.52$$

$$v_r = i_r R_r + p \lambda_r \quad \dots 4.53$$

เมื่อ p เขียนแทน d/dt แทนค่า λ_s และ λ_r

$$v_s = i_s R_s + L_s p i_s + i_s p L_s + L_{sr} p i_r + i_r p L_{sr} \quad \dots 4.54$$

$$v_r = i_r R_r + L_r p i_r + i_r p L_r + L_{sr} p i_s + i_s p L_{sr} \quad \dots 4.55$$

โดยปกติ L_s และ L_r เป็นฟังก์ชันของมุม θ_r และเวลา t พิจารณาแรงดันเหนี่ยวนำตามสมการ 4.54 กับ 4.55 เราสามารถแปลงรูปได้ดังนี้ [1]

$$i_r p L_r = i_r \frac{dL_r}{dt} \frac{d\theta_r}{dt} = i_r \frac{dL_r}{d\theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} = i_r \omega_r \frac{dL_r}{dt}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

นำกลับไปแทนค่าในสมการ 4.54 กับ 4.55 [1]

$$v_s = i_s R_s + L_s p i_s + L_{sr} p i_r + w_r i_s \frac{dL_s}{d\theta_r} + w_r i_r \frac{dL_{sr}}{d\theta_r} \quad \dots 4.56$$

$$v_r = i_r R_r + L_r p i_r + L_{sr} p i_s + w_r i_r \frac{dL_r}{d\theta_r} + w_r i_s \frac{dL_{sr}}{d\theta_r} \quad \dots 4.57$$

เขียนในรูปเมตริกซ์ [1]

$$\begin{bmatrix} v_s \\ v_r \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{sr} & L_r \end{bmatrix} p + w_r \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{sr} & L_r \end{bmatrix} \right\} \times \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad \dots 4.58$$

แรงดันเหนี่ยวนำในสมการ 4.58 ประกอบด้วย 2 ส่วน คือแรงดันเหนี่ยวนำตัวเอง และแรงดันเหนี่ยวนำร่วม ซึ่งมาจากฟังก์ชันตรีโกณมิติของเวลาของกระแส ในขณะที่เทอมแรงดันจากการหมุนตัดสนามแม่เหล็ก เป็นฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรความเหนี่ยวนำเทียบกับมุมของโรเตอร์ที่เปลี่ยนไป จากสมการ 4.58 กำหนดเมตริกซ์ต่าง ๆ ดังนี้ [1]

$$\begin{aligned} [R] = R &= \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \\ [L] = L &= \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{sr} & L_r \end{bmatrix} \\ [G] = G &= \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{sr} & L_r \end{bmatrix} = \frac{dL}{d\theta_r} \\ [v] = v &= \begin{bmatrix} v_s \\ v_r \end{bmatrix}, \quad [i] = i = \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \\ v &= [R + Lp + w_r G] i \quad \dots 4.59 \end{aligned}$$

ลักษณะทางกายภาพของแรงดันที่สำคัญเกิดจากความต้านทานแม่เหล็ก เพื่อความสะดวกเราจะเขียนเมตริกซ์ G ในรูปความนำแม่เหล็ก

$$L_{sr} = N_s N_r \Delta_{sr}$$

$$L_s = N_s^2 \Delta_s$$

$$L_r = N_r^2 \Delta_r$$

เมตริกซ์ G เขียนได้ดังนี้

$$G = \begin{bmatrix} N_s^2 \frac{d\Delta_s}{d\theta_r} & N_s N_r \frac{d\Delta_{sr}}{d\theta_r} \\ N_s N_r \frac{d\Delta_{sr}}{d\theta_r} & N_r^2 \frac{d\Delta_r}{d\theta_r} \end{bmatrix} \quad \dots 4.60$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 4.74 จะเห็นได้ว่าเทอมแรงดันเป็นผลจากความนำแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงขณะหมุน ชุดขดลวดในสเตเตอร์ของเครื่องจักรที่มีโรเตอร์แบบรูปทรงกระบอก จะมองเห็นความนำ

แม่เหล็กในช่องอากาศคงที่ นั่นคือ $d\Delta_S/d\theta_r=0$ และเครื่องจักรที่มีสเตเตอร์รูปทรงกระบอก จะมองเห็นความนำแม่เหล็กในช่องอากาศเป็นค่าคงที่ นั่นคือ $dL_r/d\theta_r = 0$ และ ทุกโครงสร้างของ สเตเตอร์ กับโรเตอร์ พื้นที่ช่องอากาศระหว่างขดลวดในสเตเตอร์กับโรเตอร์เปลี่ยนแปลงขณะ หมุน Δ_{sr} เป็นฟังก์ชันของ θ_r [1]

แทนค่าความนำแม่เหล็กจากหัวข้อ 4.2 เขียนสมการแรงดันแยกพิจารณาเป็นกรณีต่าง ๆ ได้ ดังนี้

1) ไม่มีขั้วขาคายสิทธิ์ โครงสร้างสเตเตอร์ และโรเตอร์ เป็นรูปทรงกระบอก [1]

$$L_r = \text{constant}$$

$$L_s = \text{constant}$$

$$L_{sr} = M_{sr} \cos\theta_r$$

ดังนั้น สมการแรงดันในรูปเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} v_s \\ v_r \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \cos\theta_r \\ M_{sr} \cos\theta_r & L_r \end{bmatrix} \right\} p + w_r \begin{bmatrix} 0 & -M_{sr} \sin\theta_r \\ -M_{sr} \sin\theta_r & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \dots 4.61$$

2) ตัวใดตัวหนึ่งมีขั้วขาคายสิทธิ์ สมมติให้โรเตอร์รูปทรงกระบอก มีขั้วขาคายสิทธิ์ที่สเตเตอร์ [1]

$$L_r = L_{r1} + L_{r2} \cos 2\theta_r$$

$$L_s = \text{constant}$$

$$L_{sr} = M_{sr} M \cos\theta_r$$

ดังนั้นสมการแรงดันในรูปเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} v_s \\ v_r \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \cos\theta_r \\ M_{sr} \cos\theta_r & L_{r1} + L_{r2} \cos 2\theta_r \end{bmatrix} \right\} p + w_r \begin{bmatrix} 0 & -M_{sr} \sin\theta_r \\ -M_{sr} \sin\theta_r & -2L_{r2} \sin 2\theta_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \dots 4.62$$

3) สเตเตอร์ กับโรเตอร์ต่างก็มีขั้วขาคายสิทธิ์ โครงสร้างเครื่องจักรลักษณะนี้ไม่พบในเครื่องจักรใช้งานจริง จึงไม่กล่าวถึงในที่นี้ [1]

4.3.2 สมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า

จากบทที่ 2 พลังงานที่ถูกเก็บในช่องอากาศของระบบกระตุ้นคู่ คือ

$$w_{fe} = \frac{1}{2} i_s^2 L_s + \frac{1}{2} i_r^2 L_r + i_s i_r L_{sr}$$

$$T_e = \frac{\partial w_{fe}}{\partial \theta_m} = \frac{P}{2} \frac{dw_{fe}}{d\theta_r}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 2 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_e = \frac{P}{2} \left[\frac{1}{2} i_s^2 \frac{dL_s}{d\theta_r} + \frac{1}{2} i_r^2 \frac{dL_r}{d\theta_r} + i_s i_r \frac{dL_{sr}}{d\theta_r} \right] \dots 4.63$$

เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสมมาตร

5.1 บทนำ

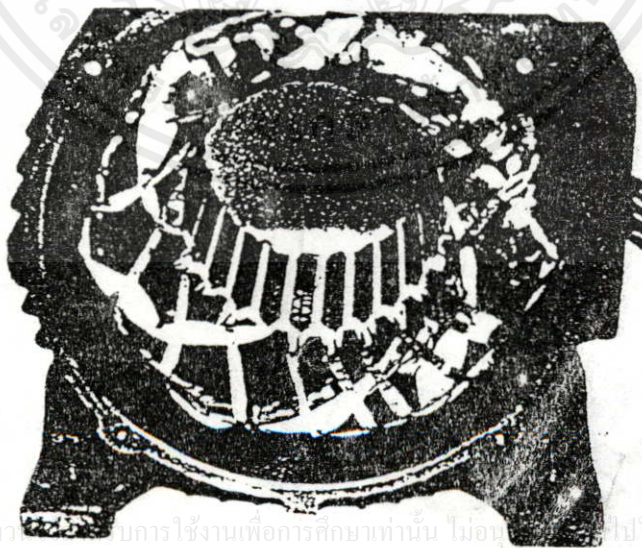
เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถใช้งานได้ทั้งลักษณะมอเตอร์ หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยปกตินำมาใช้ในลักษณะมอเตอร์ เพราะจะมีข้อเสียมากหากใช้ในลักษณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำอาจเป็นเฟสเดียว หรือหลายเฟสก็ได้ หากเป็นเครื่องจักรหลายเฟสมักหมายถึงแบบ 3-เฟส ซึ่งแบ่งได้ 2 ชนิด ตามโครงสร้างของโรเตอร์

1) มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (squirrel cage induction motor) ไม่มีวงแหวนลื่น (slip ring) ติดอยู่ที่ตัวโรเตอร์ อาจเรียกอีกอย่างว่า "non-slip ring machines" [2]

2) มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์พันด้วยขดลวด (wound rotor induction motor) การพันตัวโรเตอร์อาจเป็น 2-เฟส หรือ 3-เฟส ก็ได้โดยต้องทำให้ขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ เท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ต้องการวงแหวนลื่นที่ตัวโรเตอร์ เพื่อสามารถติดต่อกับวงจรภายนอก ดังนั้นอาจเรียกว่า "slip ring machines" ทั้งสองแบบต่างก็มีหลักการทำงานเช่นเดียวกัน ความแตกต่างอยู่ที่โครงสร้างของโรเตอร์และในส่วนของสเตเตอร์มีโครงสร้างเหมือนกัน [2]

5.1.1 โครงสร้าง

5.1.1.1 สเตเตอร์ (stator) ขดลวดพันอยู่ในสล็อตบรรจุโดยรอบสเตเตอร์ อาจเป็นเฟสเดียว หรือหลายเฟสก็ได้ ทำด้วยแผ่นลามิเนตบางอัดเป็นรูปทรง [2],[3]

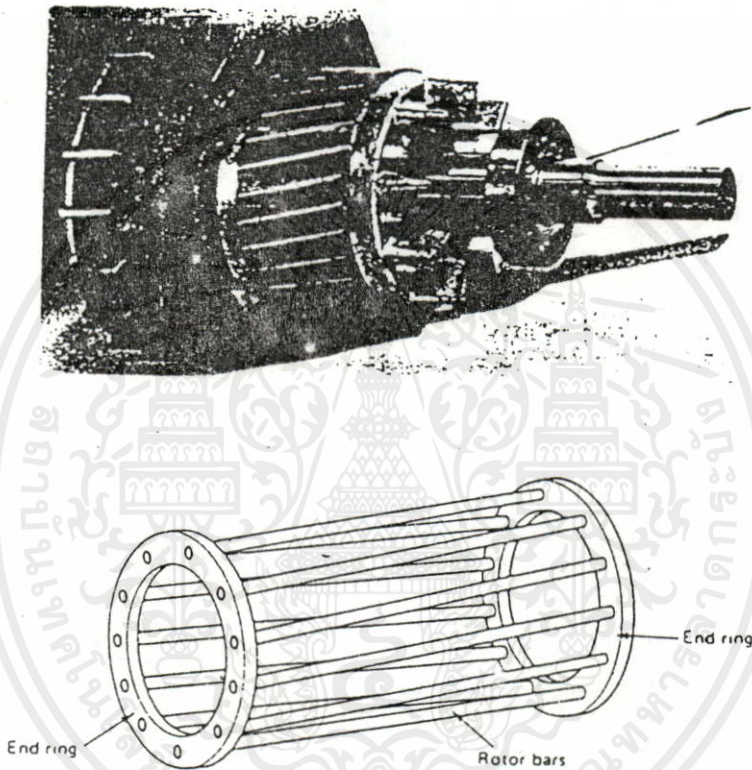


รูป 5.1 ตัวอย่างโครงสร้างสเตเตอร์[2],[3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.2 โรเตอร์ (rotor) แบ่งได้เป็น 2 แบบ

a) กรงกระรอก (squirrel cage) ตัวนำฝังภายในโรเตอร์โดยรอบตามผิวทรงกระบอก โดยลัดวงจรตัวนำชุดนี้ที่ปลายทั้งสองด้วยตัวนำรูปวงแหวน ส่วนใหญ่จะฝังลักษณะเฉียงกับแกนเพื่อลด magnetic hum ทำให้โรเตอร์หมุนได้เรียบขึ้น จำนวนขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์เท่ากับขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนสเตเตอร์ b) ขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor) การพันขดลวดบนโรเตอร์ต้องพันให้จำนวนขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์เท่ากับที่ปรากฏบนสเตเตอร์ แต่จำนวนเฟสไม่จำเป็นต้องเท่ากัน

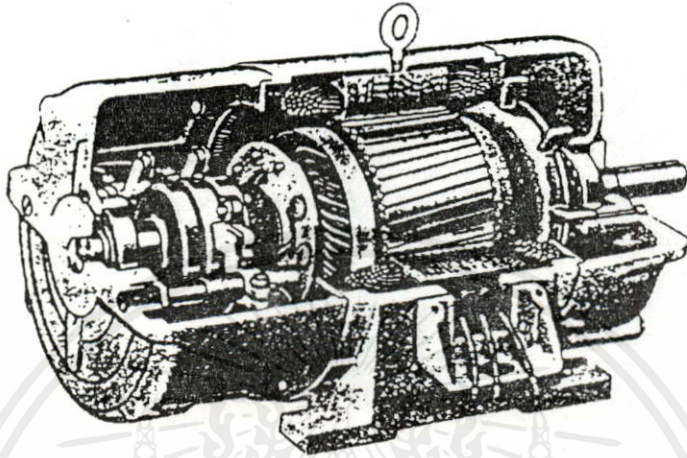


รูป 5.2 โครงสร้างโรเตอร์กรงกระรอก [3]

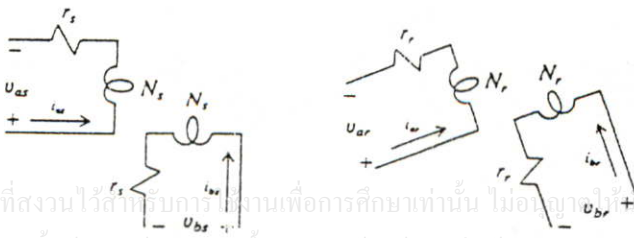
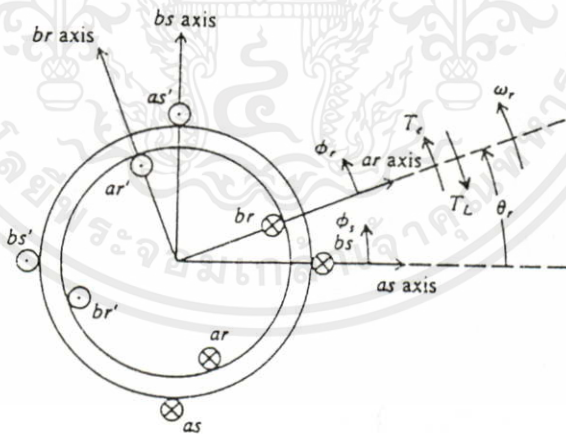
5.1.2 หลักการทำงาน

เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ไม่มีวงจรไฟฟ้าเชื่อมต่อกันระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ กระแสที่ไหลในแท่งตัวนำของโรเตอร์เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำของวงจรโรเตอร์ อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ โดยขนาดของแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กบนตัวนำโรเตอร์ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายหม้อแปลงไฟฟ้าที่ส่วนหุติยภูมิสามารถเคลื่อนที่ได้ สนามแม่เหล็กลัพท์บนสเตเตอร์หมุนคล้ายกับการหมุนของแม่เหล็กถาวรด้วยความเร็วเชิงโคโรนัสทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กของตัวนำบนโรเตอร์ ผลก็คือ เกิดแรงบิดของโรเตอร์ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ ดังนั้น

แรงบิดจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วโรเตอร์น้อยกว่าความเร็วซิงโครนัส ถ้าโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ตัวนำบนโรเตอร์จะมองไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก ไม่เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ ไม่มีกระแสในวงจรโรเตอร์ [2],[7]



รูป 5.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์พันด้วยขดลวด [3]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้นอีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 5.4 เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสมมาตร 2-ขั้ว 2-เฟส[5]

5.2 เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 2-เฟส

ตามรูป 5.4 แสดงเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 2-ขั้ว 2-เฟส ชุดขดลวดสเตเตอร์มีการพันกระจายแบบไซน์ซออยด์ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ในขณะเดียวกันชุดขดลวดโรเตอร์ก็มีการพันกระจายแบบไซน์ซออยด์ มีระยะห่างกัน 90 องศา คือชุดขดลวด ar และ br ความต้านทานรวมของชุดขดลวดทั้งสองเท่ากัน นั่นคือสเตเตอร์ กับโรเตอร์สมมาตรกัน ด้วยเหตุนี้จึงเรียก เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสมมาตร (symmetrical induction machine) ตามรูป 5.4 ระยะช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์เท่ากันโดยตลอด (uniform air gap) โดยปกติชุดขดลวดโรเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำการลัดวงจรไว้ ($v_{ar}=v_{br}=0$) ในขณะที่ชุดขดลวดสเตเตอร์ต่อกับแหล่งจ่ายพลังงาน ในอีกกรณีหนึ่งเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำอาจใช้ในลักษณะ มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบกระตุ้นคู่ (doubly-fed induction motor) คือชุดขดลวดโรเตอร์ต่อกับแหล่งจ่ายพลังงานผ่านทางแปรงถ่าน และวงแหวนลื่น [5]

จากบทที่ 3 การขจัดเชิงมุมของสเตเตอร์เขียนแทนด้วย ϕ_s แกน a_s เป็นแกนอ้างอิง จากรูป 5.4 การขจัดเชิงมุมของโรเตอร์เขียนแทนด้วย ϕ_r แกน a_r เป็นแกนอ้างอิง ความเร็วเชิงมุม ω_r โดยมี θ_r เป็นการขจัดเชิงมุมระหว่างแกน a_r กับแกน a_s ดังนั้นหากกำหนด จุดบนพื้นผิวโรเตอร์ด้วยตำแหน่งการขจัดเชิงมุม ϕ_r เราอาจปรับตำแหน่งให้ไปอยู่บนพื้นผิวของสเตเตอร์ด้วยตำแหน่งเชิงมุม ϕ_s ตามความสัมพันธ์ [5]

$$\phi_s = \phi_r + \theta_r \quad \dots 5.1$$

แรงบิดไฟฟ้ากลศาสตร์ T_e และแรงบิดภาวะ T_L ทิศบวกของ T_e ทิศตามการเพิ่มของ θ_r แต่ T_L มีทิศบวกตรงข้ามกับการหมุน แรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบช่องอากาศเนื่องจากชุดขดลวด a_s กับ b_s ตามสมการ 3.9 และ 3.10 เราอาจเขียนแรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบช่องอากาศของชุดขดลวดโรเตอร์ a_r กับ b_r ได้ดังนี้ กำหนด N_r คือจำนวนรอบสมมูลย์ของชุดขดลวดโรเตอร์[5]

$$\text{mmf}_{ar} = \frac{N_r}{2} i_{ar} \cos \phi_r \quad \dots 5.2$$

$$\text{mmf}_{br} = \frac{N_r}{2} i_{br} \cos \phi_r \quad \dots 5.3$$

ในบทที่ 3 กระแสในชุดขดลวดสเตเตอร์ของอุปกรณ์ 2-ขั้ว 2-เฟส สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนรอบช่องอากาศขนาดคงที่ในสภาวะคงตัว ตามสมการ 3.22 ผลของมันทำให้ได้ขั้วแม่เหล็กที่หมุนได้เช่นกัน และระบบแม่เหล็กนี้หมุนโดยรอบช่องอากาศด้วยความเร็วเชิงมุม ω_e ตามกระแสสเตเตอร์ เริ่มพิจารณาแรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบช่องอากาศเนื่องจากกระแสโรเตอร์ ความเร็วของโรเตอร์คงที่ที่สภาวะคงตัว กระแสสเตเตอร์เขียนได้ตามสมการ 3.18 กับ 3.19 และเราอาจเขียนสมการกระแสโรเตอร์ได้ดังนี้ [5]

$$i_{ar} = \sqrt{2} I_r \cos \left[(\omega_e - \omega_r)t + \theta_{eri}(0) \right] \quad \dots 5.4$$

$$I_{br} = \sqrt{2}I_r \sin[(w_e - w_r)t + \theta_{er}(0)] \quad \dots\dots 5.5$$

เลือกเวลาที่ศูนย์, $\theta_{esi}(0)$, ตำแหน่งที่เวลาศูนย์ของกระแสเตเตอร์ และ $\theta_{er}(0)$ หาได้จากค่าชั่วขณะของกระแสเตเตอร์ และกระแสโรเตอร์ ทำให้ความถี่ของกระแสโรเตอร์จึงเป็นผลต่างของความเร็วเชิงมุม w_e ของกระแสเตเตอร์ และความเร็วเชิงมุม w_r ของโรเตอร์ เราพบว่าความถี่นี้คือ ความถี่ของกระแสโรเตอร์ระหว่างสภาวะคงตัวโดยไม่คำนึงว่าเป็น ระบบกระตุ้นเดี่ยว (singly-fed) หรือ ระบบกระตุ้นคู่ (doubly-fed)[5]

$$mmf_r = mmf_{ar} + mmf_{br} \quad \dots\dots 5.6$$

$$mmf_r = \frac{N_r}{2} \sqrt{2}I_r \cos[(w_e - w_r)t + \theta_{er}(0) - \theta_r] \quad \dots\dots 5.7$$

กำหนดเทอมโคไซน์คงที่ และเดริเวทิฟเทียบกับเวลา [5]

$$\frac{d\theta_r}{dt} = w_e - w_r \quad \dots\dots 5.8$$

สมการ 5.8 หมายถึง mmf_r หมุนด้วยความเร็ว $w_e - w_r$ เทียบกับโรเตอร์ ถ้า $w_e > w_r$ การหมุนมีทิศทวนเข็มนาฬิกาเทียบกับโรเตอร์ ก่อนอื่นพิจารณาชั่วแม่เหล็ก โดยปกติ $\theta_{esi}(0)$ กับ $\theta_{er}(0)$ ไม่เป็นศูนย์พร้อมกัน ที่เวลา $t=0$ mmf_r เป็นฟังก์ชันโคไซน์ของ ϕ_r เส้นแรงแม่เหล็กออกจากโรเตอร์ และเข้าสู่ช่องอากาศที่ตำแหน่ง $-\pi/2 < \phi_r < \pi/2$ ซึ่งก็คือขั้วเหนือ และเข้าสู่โรเตอร์จากช่องอากาศที่ตำแหน่ง $\pi/2 < \phi_r < 3\pi/2$ ซึ่งก็คือขั้วใต้ ดังนั้นจึงปรากฏชั่วแม่เหล็กเนื่องจากกระแสเตเตอร์ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม w_e เทียบกับสเตเตอร์ และ ขั้วแม่เหล็กซึ่งเกิดจากกระแสโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว $w_e - w_r$ เทียบกับโรเตอร์ ถ้าขั้วแม่เหล็กจากสเตเตอร์ (stator poles) และ ขั้วแม่เหล็กจากโรเตอร์ (rotor poles) หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากันรอบช่องว่างอากาศ ระยะที่แตกต่างกันของเส้นแรงแม่เหล็กนี้เองเป็นตัวสร้างแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าอันเป็นเหตุมาจากการเกิดแรงกระทำระหว่างระบบแม่เหล็กหมุนทั้งสองที่หมุนสอดคล้องกัน สามารถเขียนความสัมพันธ์ของระยะขจัดบนโรเตอร์ ϕ_r กับระยะขจัดบนสเตเตอร์ ϕ_s จากสมการ 5.1 ทำการเดริเวทิฟเทียบกับเวลา [5]

$$\frac{d\phi_s}{dt} = \frac{d\phi_r}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \quad \dots\dots 5.9$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าแทนค่าสมการ 5.8 และ $d\theta_r/dt = w_r$ [5] หา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d\phi_s}{dt} = w_e - w_r + w_r = w_e \quad \dots\dots 5.10$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบช่องอากาศจากกระแสโรเตอร์ ($m_m f_r$) หมุนรอบช่องว่างอากาศที่ w_e เทียบกับสเตเตอร์ นั่นคือขั้วจากสเตเตอร์ และขั้วจากโรเตอร์ ต่างก็หมุนรอบช่องอากาศด้วยความเร็วเชิงมุม w_e หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า $m_m f_r$ หมุนด้วยความเร็ว $w_e - w_r$ เทียบกับโรเตอร์ถ้าเราไปสังเกตบนโรเตอร์ซึ่งหมุนด้วยความเร็ว w_r เราจะมองเห็น $m_m f_r$ หมุนด้วยความเร็ว $w_e - w_r$ ถ้าเราออกจากโรเตอร์และสังเกต $m_m f_r$ จากส่วนไม่เคลื่อนที่ เรา จะเห็นโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว w_r และเห็น $m_m f_r$ หมุนด้วยความเร็ว $(w_e - w_r) + w_r = w_e$ เพราะ $m_m f_s$ กับ $m_m f_r$ หมุนด้วยความเร็วเท่ากันจึงสามารถสร้างแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าเฉลี่ยขึ้น ความถี่ของกระแสโรเตอร์ที่สภาวะคงตัวเป็น $w_e - w_r$ โดยไม่คำนึงว่าใช้งานเครื่องจักรในระบบ singly-fed หรือ doubly-fed โดยปกติเครื่องจักรเหนี่ยวนำที่ใช้งานจะลัดวงจรโรเตอร์ กระแสถูกเหนี่ยวนำขึ้นในวงจรโรเตอร์โดยเส้นแรงแม่เหล็กจาก $m_m f_s$ อย่างไรก็ตามเพื่อเหนี่ยวนำกระแสขึ้นในวงจรโรเตอร์ ตัวโรเตอร์ต้องหมุนด้วยความเร็วที่แตกต่างจากความเร็วของ $m_m f_s$ จึงจะมีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กบนโรเตอร์ [5]

กล่าวได้ว่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนเพลลาของเครื่องจักร เพราะปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็กจากกระแสสเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กจากกระแสโรเตอร์ ถ้าไม่มีกระแสโรเตอร์ก็จะไม่เกิดแรงบิด ดังนั้นเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถสร้างแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวทุกความเร็วโรเตอร์ยกเว้น $w_r = w_e$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่ซิงโครไนซ์กับสนามแม่เหล็กหมุนจากกระแสสเตเตอร์ ($m_m f_s$) จะไม่เกิดกระแสเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ จึงไม่สามารถสร้างแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ยิ่งไปกว่านั้นอุปกรณ์จะแสดงอาการปฏิกิริยามอเตอร์เมื่อ $w_r < w_e$ และแสดงอาการปฏิกิริยาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อโรเตอร์ถูกขับจากตัวต้นกำลังผ่านทางเพลลาด้วยความเร็วมากกว่า w_e [5]

5.3 สมการแรงดัน และความเหนี่ยวนำชุดขดลวด

สมการแรงดันของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามรูป 5.1 เขียนได้ดังนี้[5]

$$v_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad \dots 5.11$$

$$v_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \quad \dots 5.12$$

$$v_{ar} = r_r i_{ar} + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \quad \dots 5.13$$

$$v_{br} = r_r i_{br} + \frac{d\lambda_{br}}{dt} \quad \dots 5.14$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า กำหนด r_s เป็นความต้านทานของชุดขดลวดสเตเตอร์ และ r_r เป็นความต้านทานชุดขดลวดโรเตอร์ เราอาจเขียนสมการแรงดันในรูปเมตริกซ์[5]

$$v_{abs} = r_s i_{abs} + p \lambda_{abs} \quad \dots 5.15$$

$$v_{abr} = r_r i_{abr} + p \lambda_{abr} \quad \dots 5.16$$

กำหนด i_{im} เป็น identity matrix

p เขียนแทน d/dt

$$r_s = \begin{vmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{vmatrix} = r_s i_{im} \quad \dots 5.17$$

$$r_r = \begin{vmatrix} r_r & 0 \\ 0 & r_r \end{vmatrix} = r_r i_{im} \quad \dots 5.18$$

การวิเคราะห์เครื่องจักรไฟฟ้า กำหนดให้ระบบแม่เหล็กมีลักษณะเชิงเส้น ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำอาจเขียนได้ในลักษณะเชิงเส้นของ ความเหนี่ยวนำกับกระแส [5]

$$\lambda_{as} = L_{sas} i_{as} + L_{sabs} i_{bs} + L_{sar} i_{ar} + L_{sabr} i_{br} \quad \dots 5.19$$

$$\lambda_{bs} = L_{bsas} i_{as} + L_{bsbs} i_{bs} + L_{bsar} i_{ar} + L_{bsbr} i_{br} \quad \dots 5.20$$

$$\lambda_{ar} = L_{aras} i_{as} + L_{arbs} i_{bs} + L_{arar} i_{ar} + L_{arbr} i_{br} \quad \dots 5.21$$

$$\lambda_{br} = L_{bras} i_{as} + L_{brbs} i_{bs} + L_{brar} i_{ar} + L_{brbr} i_{br} \quad \dots 5.22$$

กำหนด [5]

$$[F_{abs}]^T = [f_{as} \ f_{bs}] \quad \dots 5.23$$

$$[F_{abr}]^T = [f_{ar} \ f_{br}] \quad \dots 5.24$$

เมื่อ f แทน กระแส, แรงดัน หรือเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ [5]

$$\lambda_{abs} = L_s i_{abs} + L_{sr} i_{abr} \quad \dots 5.25$$

$$\lambda_{abr} = (L_{sr})^T i_{abs} + L_r i_{abr} \quad \dots 5.26$$

เราอาจเขียนได้อีกแบบดังนี้ [5]

$$\begin{vmatrix} \lambda_{abs} \\ \lambda_{abr} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{abs} \\ i_{abr} \end{vmatrix} \quad \dots 5.27$$

สำหรับชุดขดลวดสเตเตอร์ หรือโรเตอร์ ที่มีชุดขดลวดแต่ละเฟสเหมือนกันโดยเอกลักษณ์ และสมมาตรกัน ความเหนี่ยวนำตัวเองของแต่ละเฟสมีค่าเท่ากัน เช่น $L_{sas} = L_{bsbs}$ เขียนแทนด้วย L_{ss} หรือ $L_{rar} = L_{brbr}$ เขียนแทนด้วย L_{rr} [5]

$$L_{ss} = L_s + L_{ms} \quad \dots 5.28$$

$$L_{rr} = L_r + L_{mr} \quad \dots 5.29$$

L_{ls} เป็นความเหนี่ยวนำรั่วไหลและ L_{ms} เป็นความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก เครื่องจักรถูกออกแบบให้มีความเหนี่ยวนำรั่วไหลน้อยที่สุด ปกติประมาณ 10 % ของความเหนี่ยวนำตัวเอง[5]

$$L_{ms} = N_s^2 / \mathfrak{R}_m \quad \dots 5.30$$

$$L_{mr} = N_r^2 / \mathfrak{R}_m \quad \dots 5.31$$

\mathfrak{R}_m : reluctance of the path of the magnetizing

$$L_{ms} = N_s^2 \pi \mu r / 4g \quad \dots 5.32$$

$$L_{mr} = N_r^2 \pi \mu r / 4g \quad \dots 5.33$$

μ : ความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก ; r : รัศมีเฉลี่ยของช่องอากาศ

l : ความยาวตามแกนของช่องอากาศ ; g : ความยาวช่องอากาศตามแนวรัศมี

เนื่องจากชุดขดลวดสเตเตอร์ตั้งฉากซึ่งกันและกัน เช่นเดียวกับชุดขดลวดโรเตอร์แสดงได้ดังรูป 5.4 จึงดูเหมือนว่าไม่มีการเชื่อมต่อระหว่างชุดขดลวด a_s กับ b_s (L_{asbs} หรือ L_{bsas}) และชุดขดลวด a_r กับ b_r (L_{arbr} หรือ L_{brar}) แต่ถึงอย่างไรทุกสิ่งที่กล่าวมาเป็นเรื่องของสมมุติ การพันชุดขดลวดกระจายแบบไซนูซอยด์ โดยมีขดลวดชุดหนึ่งอยู่ในตำแหน่งที่มีความหนาแน่นการพันสูงสุด การกระจายชุดขดลวดตามความจริงคล้ายกับรูป 3.13 ลองพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างชุดขดลวด a_s กับ b_s สิ่งหนึ่งที่ทำให้เชื่อได้ว่าการเชื่อมต่อ คือ กระแสในชุดขดลวด $a_{s1}-a_{s1}'$ ในรูป 3.13 สร้างเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมกับชุดขดลวด b_s และกระแสเดียวกันนี้ไหลผ่านชุดขดลวด $a_{s3}-a_{s3}'$ สร้างเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมกับชุดขดลวด b_s ทิศทางตรงข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็กจากชุดขดลวด $a_{s1}-a_{s1}'$ ถ้าชุดขดลวดสเตเตอร์ หรือชุดขดลวดโรเตอร์กระจายกันอย่างสมมาตรโดยรอบแกนตั้งฉาก แสดงว่าไม่มีการเชื่อมต่ออยู่จริงในเครื่องจักรที่มีช่องอากาศสม่ำเสมอโดยรอบ นั่นคือ $L_{asbs}, L_{bsas}, L_{arbr}$ และ L_{brar} เป็นศูนย์ แต่ในเครื่องจักร 3-เฟส ชุดขดลวดแต่ละเฟสกระจายห่างกัน 120 องศาจะปรากฏการเชื่อมต่อระหว่างชุดขดลวดแต่ละเฟส เราอาจเขียนความเหนี่ยวนำเครื่องจักร 2-เฟส ได้ดังนี้[5]

$$L_s = \begin{vmatrix} L_{ss} & 0 \\ 0 & L_{ss} \end{vmatrix} = L_{ss} \text{lim} \quad \dots 5.34$$

$$L_r = \begin{vmatrix} L_{rr} & 0 \\ 0 & L_{rr} \end{vmatrix} = L_{rr} \text{lim} \quad \dots 5.35$$

ชุดขดลวดสเตเตอร์เคลื่อนที่สัมพันธ์กับชุดขดลวดโรเตอร์ ด้วยเหตุนี้จะปรากฏการเชื่อมต่อระหว่างชุดขดลวดสเตเตอร์ กับชุดขดลวดโรเตอร์ และการเชื่อมต่อแปรตามตำแหน่ง (θ_p) ของชุดขดลวดโรเตอร์เทียบกับชุดขดลวดสเตเตอร์ ตัวอย่างเช่นเมื่อชุดขดลวด a_s กับ a_r อยู่

ตำแหน่งเดียวกัน $\theta_r = 0$ ขนาดการเชื่อมต่อระหว่างชุดขดลวดทั้งสองมีค่าสูงสุด ถ้ากำหนดทิศ
 บวก i_{as} และ i_{ar} อาศัยกฎมือขวาทำให้เรารู้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กพร้อมมีอยู่จริงตำแหน่ง $\theta_r = 0$
 ความเหนี่ยวนำร่วมมีค่าสูงสุด [5]

เมื่อ $\theta_r = 0$ ชุดขดลวดอยู่แนวเดียวกัน

$$L_{asar} = N_s N_r / \mu_m : \theta_r = 0 \quad \dots 5.36$$

เมื่อ $\theta_r = \pi/2$ ชุดขดลวด a_s ตั้งฉากกับชุดขดลวด a_r

$$L_{asar} = 0 : \theta_r = \pi/2 \quad \dots 5.37$$

เมื่อ $\theta_r = \pi$ ชุดขดลวดอยู่แนวเดียวกันอีกครั้งแต่ทิศตรงกันข้าม

$$L_{asar} = -N_s N_r / \mu_m : \theta_r = \pi \quad \dots 5.38$$

เมื่อ $\theta_r = 3\pi/2$ ชุดขดลวด a_s ตั้งฉากกับชุดขดลวด a_r

$$L_{asar} = 0 : \theta_r = 3\pi/2 \quad \dots 5.39$$

จากบทที่ 4 เราทราบว่าความเหนี่ยวนำร่วมเป็นรูปไซน์ซอซายด์ ประกอบกับสมการ 5.36 ถึง
 5.39 เรากำหนด L_{sr} และ ประมาณ L_{asar} หรือ L_{aras} ได้เป็น [5]

$$L_{sr} = N_s N_r / \mu_m \quad \dots 5.40$$

$$L_{asar} = L_{aras} = L_{sr} \cos \theta_r \quad \dots 5.41$$

ความเหนี่ยวนำร่วมตามรูป 5.4 [5]

$$L_{asbr} = -L_{sr} \sin \theta_r \quad \dots 5.42$$

$$L_{bsar} = L_{sr} \sin \theta_r \quad \dots 5.43$$

$$L_{bsbr} = L_{sr} \cos \theta_r \quad \dots 5.44$$

เขียนในรูปเมตริกซ์

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{vmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{vmatrix} \quad \dots 5.45$$

ถ้ากลับทิศ i_{bs} สมการ 5.41 และ 5.42 ไม่เปลี่ยนแปลง แต่สมการ 5.43 และ 5.44 เปลี่ยนเครื่องหมายบวกเป็นลบ ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างสเตเตอร์ กับโรเตอร์เป็นฟังก์ชันไซน์ซอซายด์ของ θ_r ตามการเคลื่อนที่ซึ่งสัมพันธ์กัน ความยุ่งยากในการวิเคราะห์เครื่องจักรเกิดขึ้นที่จุดนี้ เพราะเมื่อเราเดริเวทีฟสมการแรงดันเทียบกับเวลา เทอมเส้นแรงแม่เหล็กก็ยกคัลลึงจะยุ่งยากขึ้น[5]

$$\frac{d(L_{\text{asar}} i_{\text{as}})}{dt} = i_{\text{as}} \frac{dL_{\text{asar}}}{dt} + L_{\text{asar}} \frac{di_{\text{as}}}{dt} \quad \dots 5.46$$

เช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า อาศัยอัตราส่วนการพันมาใช้แปลงตัวแปรไปด้านสเตเตอร์[5]

$$i'_{\text{abr}} = [N_r/N_s] i_{\text{abr}} \quad \dots 5.47$$

$$v'_{\text{abr}} = [N_s/N_r] v_{\text{abr}} \quad \dots 5.48$$

$$\lambda'_{\text{abr}} = [N_s/N_r] \lambda_{\text{abr}} \quad \dots 5.49$$

$$r'_r = [N_s/N_r]^2 r_r \quad \dots 5.50$$

สมการ 5.15 กับ 5.16 อาจเขียนได้เป็น [5]

$$v_{\text{abs}} = r_s i_{\text{abs}} + p \lambda_{\text{abs}} \quad \dots 5.51$$

$$v'_{\text{abr}} = r'_r i'_{\text{abr}} + p \lambda'_{\text{abr}} \quad \dots 5.52$$

แทนค่าตัวแปรที่แปลงค่าลงในสมการ 5.27 [5]

$$\begin{bmatrix} \lambda'_{\text{abs}} \\ \lambda'_{\text{abr}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \\ \frac{N_s}{N_r} (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i'_{\text{abs}} \\ i'_{\text{abr}} \end{bmatrix} \quad \dots 5.53$$

เมื่อ

$$L'_r = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_r = \begin{bmatrix} L_{rr} & 0 \\ 0 & L_{rr} \end{bmatrix} \quad \dots 5.54$$

เนื่องจาก L_{ms} และ L_{mr} อาจเขียนได้ตามความสัมพันธ์ของสมการ 5.30 และ 5.31 [5]

$$L'_{rr} = L'_{lr} + \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{mr} = L'_{lr} + L_{ms} \quad \dots 5.55$$

$$\frac{N_s}{N_r} L_{sr} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad \dots 5.56$$

เปรียบเทียบสมการ 5.30 กับ 5.40 [5]

$$\frac{N_s}{N_r} L_{sr} = L_{ms} \quad \dots 5.57$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เขียนสมการ 5.56 ในทอม L_{ms} [5] เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad \dots 5.58$$

สมการ 5.43 เขียนได้เป็น

$$\begin{vmatrix} \lambda'_{abs} \\ \lambda'_{abr} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} L_s & L'_{sr} \\ (L'_{sr})^T & L_r \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i'_{abs} \\ i'_{abr} \end{vmatrix} \quad \dots\dots 5.59$$

5.4 แรงบิด

$$T_e(i, \theta_r) = \frac{P}{2} \frac{\partial w_e(i, \theta_r)}{\partial \theta_r} \quad \dots\dots 5.60$$

ในระบบแม่เหล็กเชิงเส้นพลังงานสะสมในรูปสนามแม่เหล็ก w_f กับพลังงานสนามเทียบ w_c มีค่าเท่ากัน และเขียนพลังงานสะสมในรูปสนามแม่เหล็กได้เป็น [5]

$$\begin{aligned} w_f(i, \theta_r) = & \frac{1}{2} L_{ss} i_{as}^2 + \frac{1}{2} L_{ss} i_{bs}^2 + \frac{1}{2} L_{rr} i_{ar}^2 \\ & + L_{ms} i_{as} i_{ar} \cos \theta_r - L_{ms} i_{as} i_{br} \sin \theta_r \\ & + L_{ms} i_{bs} i_{ar} \sin \theta_r + L_{ms} i_{bs} i_{br} \cos \theta_r \end{aligned} \quad \dots\dots 5.61$$

แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสมมาตร P-ขั้ว [5]

$$T_e = -\frac{P}{2} L_{ms} [(i_{as} i_{ar} + i_{bs} i_{br}) \sin \theta_r + (i_{as} i_{br} - i_{bs} i_{ar}) \cos \theta_r] \quad \dots\dots 5.62$$

5.5 เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3-เฟส

เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสมมาตร 2-ขั้ว 3-เฟส ตามรูป 5.5 ชุดขดลวดสเตเตอร์ กับชุดขดลวดโรเตอร์ ต่างก็มีการพันกระจายแบบไซน์ชอยด์ด้วยขดลวดที่เหมือนกันโดยเอกลักษณ์ 3 ชุด แกนแม่เหล็กห่างกัน 120 องศาในการวิเคราะห์เครื่องจักร 3-เฟส เริ่มด้วยการขยายความจากการวิเคราะห์เครื่องจักร 2-เฟส ทฤษฎีทางตรีโกณมิติมีความจำเป็นมากขึ้น[5]

5.5.1 สมการแรงดัน และความเหนี่ยวนำชุดขดลวด

สมการแรงดันของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสมมาตร 3-เฟส [5]

$$v_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad \dots\dots 5.63$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด 5.64

$$v_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \quad \dots\dots 5.64$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีก 5.65

$$v_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \quad \dots\dots 5.65$$

$$v_{ar} = r_r i_{ar} + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \quad \dots\dots 5.66$$

$$v_{br} = r_r i_{br} + \frac{d\lambda_{br}}{dt} \quad \dots 5.67$$

$$v_{cr} = r_r i_{cr} + \frac{d\lambda_{cr}}{dt} \quad \dots 5.68$$

เขียนในรูปเมตริกซ์[5]

$$v_{abcs} = r_s i_{abcs} + p\lambda_{abcs} \quad \dots 5.69$$

$$v_{abc r} = r_r i_{abc r} + p\lambda_{abc r} \quad \dots 5.70$$

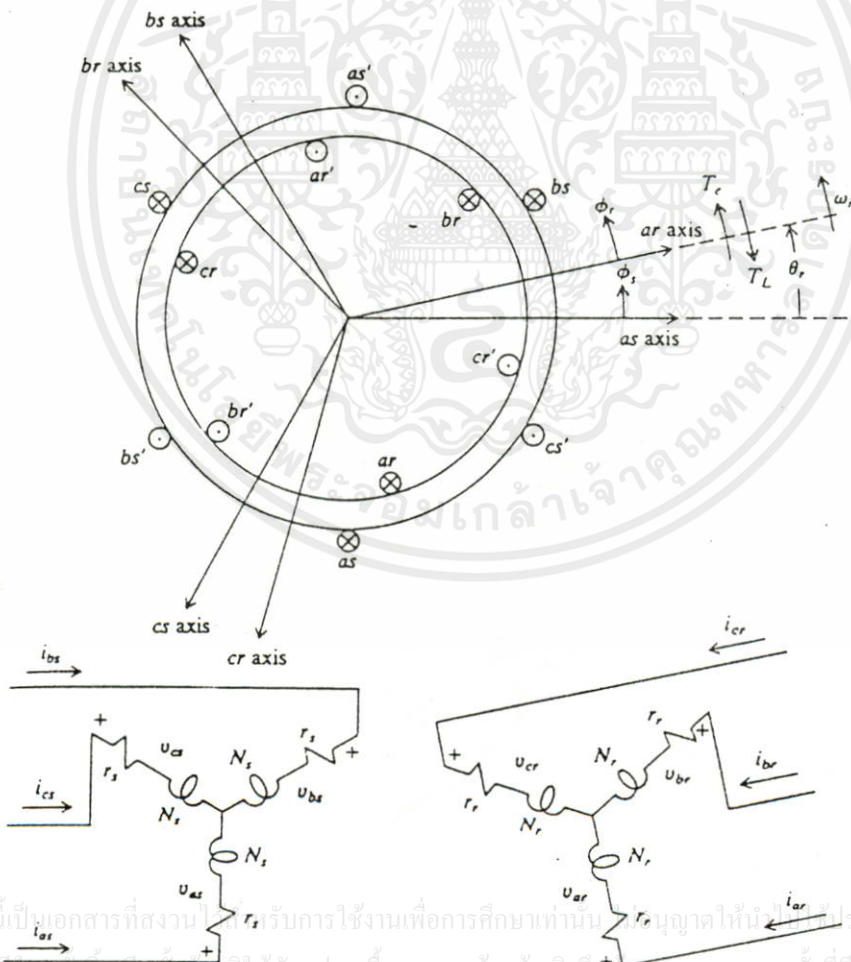
กำหนด $(f_{abcs})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}] \quad \dots 5.71$

$$(f_{abc r})^T = [f_{ar} \ f_{br} \ f_{cr}] \quad \dots 5.72$$

และ $r_s = r_s I_{im} \quad \dots 5.73$

$$r_r = r_r I_{im} \quad \dots 5.74$$

เมื่อ f หมายถึง แรงดัน , กระแส หรือ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง[5]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น

รูป 5.5 เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดสมมาตร 2-ขั้ว 3-เฟส[5]

สมการเส้นแรงแม่เหล็กเกี้ยวคล้อง

$$\begin{vmatrix} \lambda & abc_s \\ \lambda & abc_r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{abc_s} \\ i_{abc_r} \end{vmatrix} \quad \dots 5.75$$

ความเหนี่ยวนำตัวเองทุกตัวมีค่าคงที่ เนื่องจากไม่มีขั้วขาสีเส้นที่ทั้งสเตเตอร์ หรือโรเตอร์อีก ทั้งปรากฏความเหนี่ยวนำร่วมขึ้นระหว่างขดขดลวดแต่ละเฟสของสเตเตอร์ หรือของโรเตอร์ พิจารณาขดขดลวด a_s กับ b_s สมมติว่าเราหมุนขดขดลวด b_s ไป 120 องศา ทิศทางตามเข็มนาฬิกา ขณะนี้ขดขดลวด a_s กับ b_s อยู่แนวเดียวกัน กล่าวอีกอย่างว่ามันยึดติดกันด้วยความเหนี่ยวนำร่วม [5]

$$L = N_s N_r / \mu_m = L_{ms} \quad \dots 5.76$$

จับขดขดลวด b_s กลับมาตำแหน่งเดิม ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ความเหนี่ยวนำร่วมแปรตามตำแหน่ง ϕ_s ตามการหมุนของขดขดลวด b_s ลักษณะไซน์ฮายด์ [5]

$$L_{asbs} = L_{ms} [\cos \phi_s]_{\phi=2\pi/3} = -L_{ms}/2 \quad \dots 5.77$$

ผลที่ตามมาเราเขียนเมตริกซ์ความเหนี่ยวนำได้เป็น [5]

$$L_s = \begin{vmatrix} L_{ss} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L_{ss} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L_{ss} \end{vmatrix} \quad \dots 5.78 \quad ; \quad L_r = \begin{vmatrix} L_{rr} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L_{rr} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L_{rr} \end{vmatrix} \quad \dots 5.79$$

เมื่อ $L_{ss} = L_{ls} + L_{ms}$ และ $L_{rr} = L_{lr} + L_{mr}$

เราสามารถเขียนเมตริกซ์ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดขดลวดสเตเตอร์ กับขดขดลวดโรเตอร์ได้ดังนี้ [5]

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{vmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{vmatrix} \quad \dots 5.80$$

เมื่อ $L_{sr} = N_s N_r / \mu_m$ 5.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรทางโรเตอร์ทุกตัวอาจแปลงสู่ขดขดลวดด้านสเตเตอร์ โดยผ่านทางอัตราส่วนการ

พัน [5]

$$i'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} i_{abcr} \quad \dots 5.82$$

$$v'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} v_{abcr} \quad \dots 5.83$$

$$\lambda'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{abcr} \quad \dots 5.84$$

สมการ 5.69 กับ 5.70 จะกลายเป็น [5]

$$v_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad \dots 5.85$$

$$v'_{abcr} = r'_r i'_{abcr} + p \lambda'_{abcr} \quad \dots 5.86$$

เมื่อ $r'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 r_r \quad \dots 5.87$

สมการเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวดอง [5]

$$\begin{vmatrix} \lambda'_{abcs} \\ \lambda'_{abcr} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} L_s & L'_{sr} \\ (L'_{sr})^T & L_r \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{vmatrix} \quad \dots 5.88$$

โดยกำหนด [5]

$$L'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} = \frac{L_{ms}}{L_{sr}} L_{sr} \quad \dots 5.89$$

$$L'_r = \begin{vmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L'_{lr} + L_{ms} \end{vmatrix} \quad \dots 5.90$$

5.5.2 แรงบิด

แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้ามีทิศบวกตามอากัปกิริยามอเตอร์

$$T_e = \frac{P}{2} L_{ms} \left\{ \begin{aligned} & \left[i_{as} (i'_{ar} - \frac{1}{2} i'_{br} - \frac{1}{2} i'_{cr}) + i_{bs} (i'_{br} - \frac{1}{2} i'_{ar} - \frac{1}{2} i'_{cr}) + i_{cs} (i'_{cr} - \frac{1}{2} i'_{ar} - \frac{1}{2} i'_{br}) \right] \sin \theta_r \\ & + \frac{\sqrt{3}}{2} \left[i_{as} (i'_{br} - i'_{cr}) + i_{bs} (i'_{cr} - i'_{ar}) + i_{cr} (i'_{ar} - i'_{br}) \right] \cos \theta_r \end{aligned} \right\}$$

.....5.91

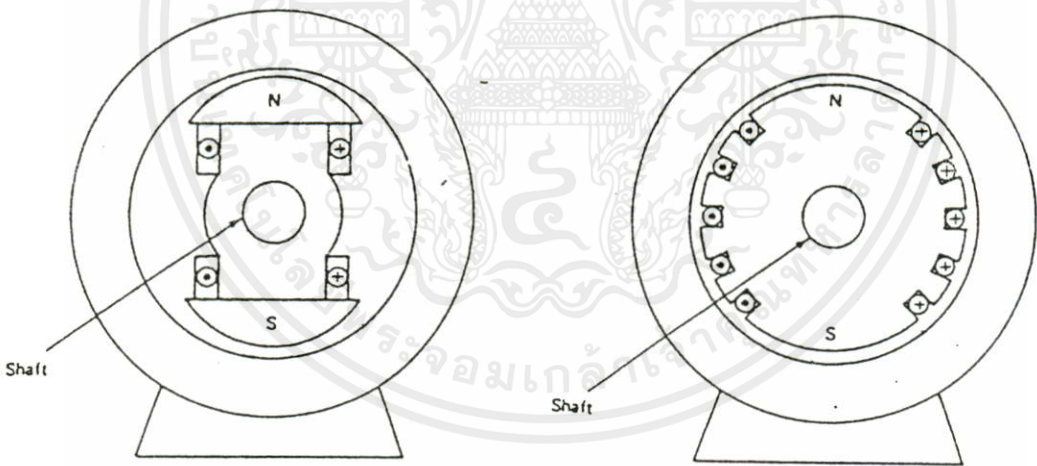
บทที่ 6 เครื่องจักรซิงโครนัส

6.1 บทนำ

เครื่องจักรซิงโครนัส (synchronous machines) คือ เครื่องแปรรูปพลังงานไฟฟ้ากลศาสตร์ที่โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่ไม่ว่าภาระจะมากหรือน้อยก็ตาม โดยความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ซิงโครไนซ์กับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน หรือขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากชุดขดลวดสเตเตอร์กับขั้วแม่เหล็กของชุดขดลวดโรเตอร์ซึ่งหมุนไปพร้อมกัน (lock in) [2],[3]

6.1.1 โครงสร้างของเครื่องจักรซิงโครนัส

1) สเตเตอร์ (stator) ทำหน้าที่ยึดขดลวดอาร์มาเจอร์ที่บรรจุในสลอต ทำจากแผ่นลามิเนตบางหลายแผ่นประกอบอัดเป็นรูปทรง สาเหตุที่นำขดลวดอาร์มาเจอร์ไว้ที่สเตเตอร์ เพื่อความสะดวกในการนำไฟเข้า หรือออกได้จำนวนมากโดยไม่ทำให้เกิดประกายไฟ (spark) หรือมีบ้างแต่ก็น้อยมาก [3]

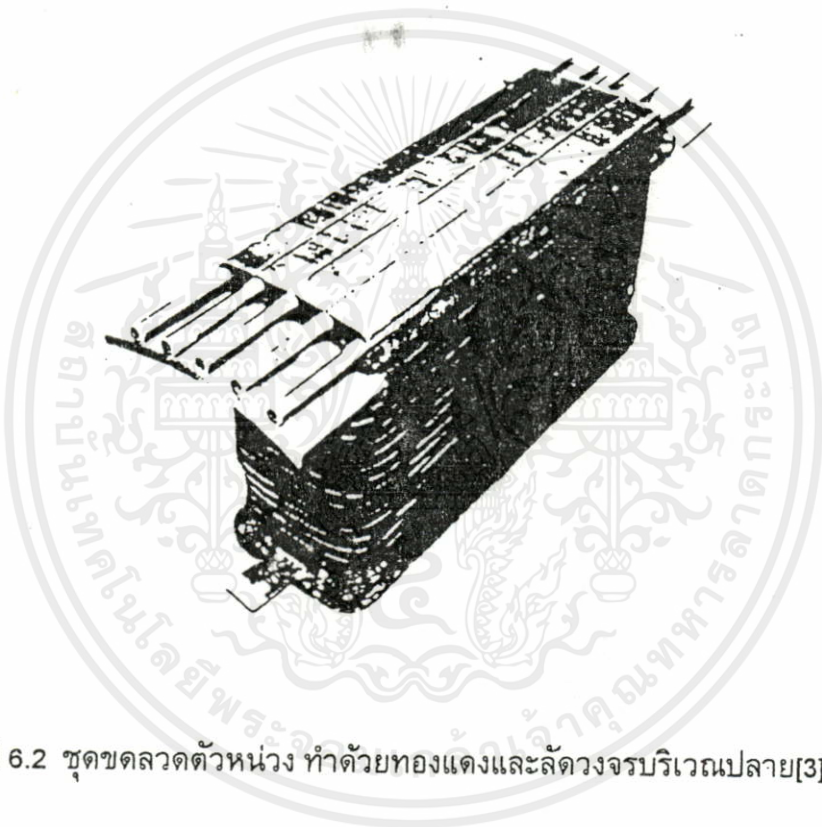


รูป 6.1 โรเตอร์ของเครื่องจักรซิงโครนัส[3]

2) โรเตอร์ (rotor) แบ่งได้ 2 ประเภทคือ มีขั้วขาลื่น กับไม่มีขั้วขาลื่นเนื่องจากโรเตอร์อยู่ภายใต้อำนาจที่เปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก จึงทำด้วยแผ่นลามิเนตบาง เพื่อลดความสูญเสียจากกระแสไหลวน [3]

3) ระบบกระตุ้น (field winding) หลังจากเพลลาของเครื่องจักรซิงโครนัสถูกขับจาก ตัวต้นกำลังภายนอก จนกระทั่งความเร็วใกล้เคียงความเร็วซิงโครนัส จากนั้นทำการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง

ผ่านทางแปรงถ่าน และวงแหวนลื่นเข้าสู่ชุดขดลวดสนามของโรเตอร์ เพื่อกระตุ้นให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กสัมพันธ์กับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของชุดขดลวดสเตเตอร์ สร้างแรงบิดที่ความเร็วซิงโครนัส หรือเกิดการประกบติดระหว่างขั้วแม่เหล็กโรเตอร์ กับขั้วแม่เหล็กสเตเตอร์ ทำให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส กระแสกระตุ้นอาจได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ขนาดเล็กที่เรียกว่าเอกไซเตอร์ (exciter) ซึ่งติดอยู่กับแกนตอนปลายของเครื่องจักรซิงโครนัส หรืออาจถูกขับด้วยมอเตอร์แยกต่างหาก 4) ชุดขดลวดตัวหน่วง (damper winding) เป็นแท่งทองแดงที่ลัดวงจรทางด้านปลายวางตัวอยู่บริเวณหน้าขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ ดังรูป 6.2 ทำหน้าที่หน่วงการสั่นของโรเตอร์เนื่องจากการเพิ่มหรือลดของภาระ อีกทั้งช่วยในการเริ่มต้นหมุนเมื่อทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ [3]

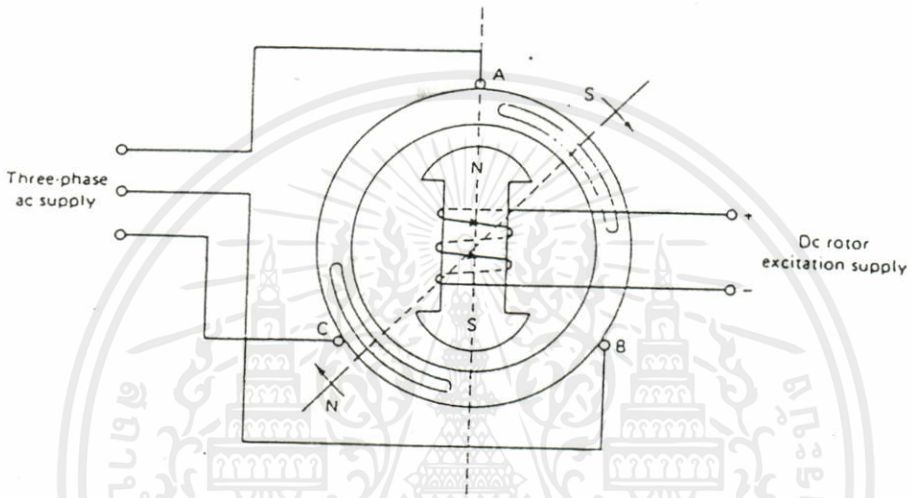


รูป 6.2 ชุดขดลวดตัวหน่วง ทำด้วยทองแดงและลัดวงจรบริเวณปลาย[3]

6.1.2 หลักการทำงาน

เครื่องจักรซิงโครนัส 3-เฟส ใช้ชุดขดลวดหลัก 2 ชุด โดยชุดขดลวดกระตุ้นสนามได้รับการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง กับชุดขดลวดพันกระจาย 3-เฟส ซึ่งจะผลิต หรือดึงไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นอยู่กับว่าในขณะนั้นทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือมอเตอร์ไฟฟ้า แรงเคลื่อนแม่เหล็กของชุดขดลวดทั้งสอง คิดเฉพาะองค์ประกอบอันดับหนึ่งไม่คิดฮาร์โมนิกอื่น แรงเคลื่อนแม่เหล็กของสนามกระตุ้นอยู่กับที่เมื่อเทียบกับชุดขดลวดกระตุ้นสนาม ส่วนแรงเคลื่อนแม่เหล็กของผลรวมสนามแม่เหล็กทั้ง 3-เฟส จะหมุนไปโดยรอบเมื่อเทียบกับชุดขดลวดที่พันกระจาย 3-เฟส สนามแม่เหล็กหมุนจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส w rad/sec แรงเคลื่อนแม่เหล็กของทั้งสองชุดขดลวดที่กระจายอยู่ในช่องอากาศต้องรักษาความแตกต่างของเฟสอย่างคงที่ ความแตก

ต่างเฟสที่คงที่ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กได้รับจากเครื่องจักรมี 2 ลักษณะ ลักษณะแรกให้ชุดขดลวด 3-เฟส คงที่ ส่วนชุดขดลวดกระตุ้นสนามหมุนด้วยความเร็ว $w_r = w$ rad/sec และ ชิงโครไนซ์กับแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากสเตเตอร์ที่หมุนไปโดยรอบในรูปของสนามแม่เหล็ก ทางกลับกันอีกลักษณะหนึ่งให้ชุดขดลวด กระตุ้นสนามอยู่กับที่ ชุดขดลวดพันกระจาย 3-เฟส หมุนด้วยความเร็ว $w_r = w$ rad/sec ทิศตรงข้ามกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่หมุนไป โดยปกติชุดขดลวดพันกระจาย 3-เฟส มักอยู่บนสเตเตอร์ และชุดขดลวดกระตุ้นสนามอยู่บนโรเตอร์ ดังรูป 6.3 [5]



รูป 6.3 มอเตอร์ซิงโครนัส 2-ขั้ว[3]

ลักษณะการทำงานเป็นมอเตอร์ซิงโครนัส หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ที่สภาวะปกติ มุม θ ที่แตกต่างกันระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากสเตเตอร์ กับโรเตอร์ เป็นฟังก์ชันของภาระทางกลศาสตร์หรือไฟฟ้า ถ้าภาระเพิ่มขึ้นโดยไม่ทำให้เกิดความไม่สมดุลย์ที่โรเตอร์ มุม θ และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า T_e จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดหนึ่ง T_e มีค่าสูงสุดเรียกแรงบิดที่จุดวิกฤตถ้าภาระเพิ่มขึ้นอีก สนามแม่เหล็กของสเตเตอร์กับโรเตอร์ที่เกาะติดกันอยู่ (หรือมุมที่แตกต่างกันระหว่างเฟสของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่คงที่) จะหลุดออกจากกัน (pull out) เครื่องจักรเสียภาวะซิงโครนัสในระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดภาวะเสียการซิงโครนัส เซอร์กิตเบรกเกอร์จะปลดวงจรชุดขดลวดสเตเตอร์ออกเพื่อป้องกันกระแสเกินพิกัดในชุดขดลวดทั้ง 3-เฟส[5]

ลักษณะสำคัญของการทำงานเป็นเครื่องจักรซิงโครนัสคือ โรเตอร์ต้องหมุนด้วยความเร็วเท่าความเร็วซิงโครนัส มอเตอร์ซิงโครนัสไม่สามารถเริ่มต้นเดินเครื่องได้เอง ต้องหาวิธีมาช่วยในการเริ่มเดินเครื่อง ที่นิยมกันมากคือใช้ชุดขดลวดที่ลัดวงจรไว้ ซึ่งเรียกว่าชุดขดลวดตัวหน่วง (damper winding) อีกทั้งช่วยลดการเสียดสมดุลย์ทางความเร็วได้อีกด้วย ชุดขดลวดตัวหน่วงวางฝังที่ผิวของโครงสร้างขั้วที่ให้สนามกระตุ้น สภาพเริ่มต้นของชุดขดลวดกระตุ้นสนามยังไม่

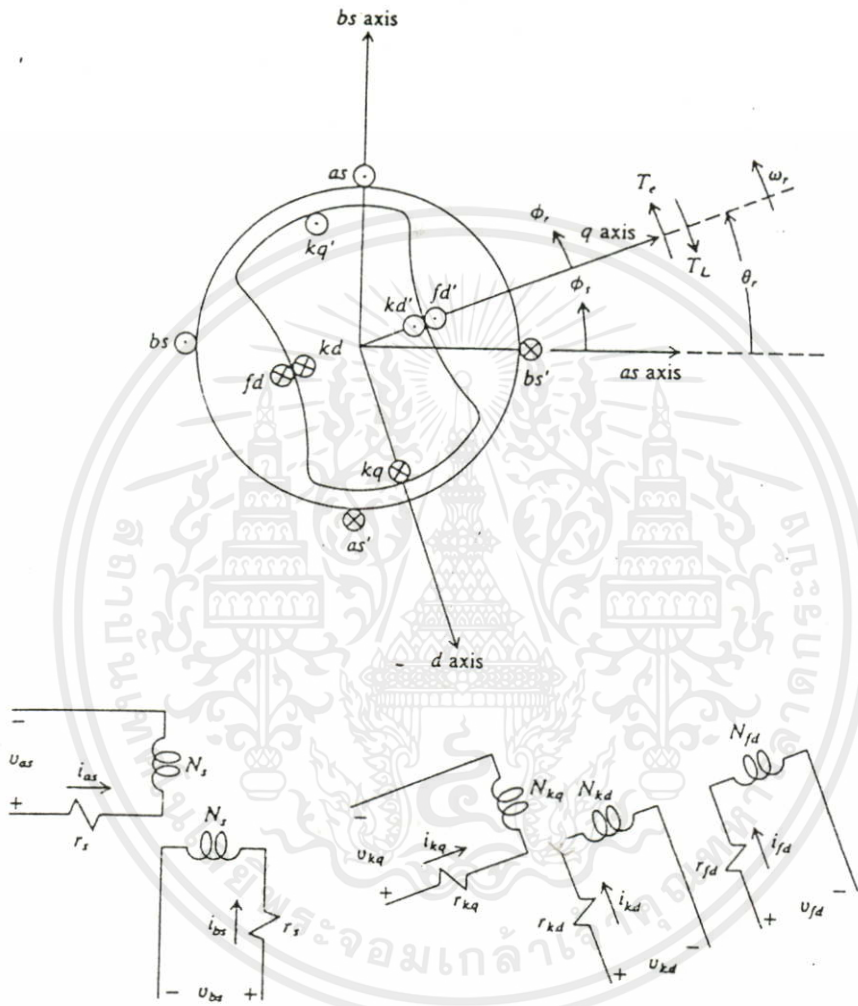
ได้รับ กระแสกระตุ้นเมื่อป้อนกระแสเข้าสู่ชุดขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3-เฟส ชุดขดลวดตัวห่นวง ประพฤติตัวในลักษณะวงจรกรงกระรอกในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำให้เครื่องจักรหมุนจนความเร็ว ใกล้ความเร็วซิงโครนัส จึงทำการจ่ายกระแสให้กับชุดขดลวดกระตุ้นสนาม ทำให้โรเตอร์ สามารถหมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วซิงโครนัส และพร้อมรับภาระ ประโยชน์อีก อย่างของชุดขดลวดตัวห่นวง คือลดการเสียมวลย์ทางกลของโรเตอร์โดยรอบความเร็วซิงโคร นัส (สูง หรือต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส) เรียกอาการลักษณะนี้ว่าฮันท์ดิง (hunting) เมื่อมีสภาพ เสียมวลย์ทางความเร็ว ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของ ภาระทางกลศาสตร์หรือทางไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระมุม θ ที่แตกต่างกันระหว่างแรง เคลื่อนแม่เหล็ก 2 ชุด จะคงที่อยู่ระยะหนึ่งของจุดก่อนเกิดการรบกวน จากนั้นแรงบิดทาง กลศาสตร์กับแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า T_m กับ T_e ซึ่งไม่เท่ากันทำให้เกิดความแตกต่างของแรงบิด ส่งผลให้มีความเร่งหรือความหน่วงเกิดขึ้นที่โรเตอร์ขึ้นอยู่กับ การเพิ่มหรือลดของภาระ แรง เคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองชุดจะปรับมุม θ จนกระทั่งความเร่ง หรือความหน่วงเป็นศูนย์ T_m จะเท่า กับ T_e แต่เนื่องจากแรงเฉื่อยของโรเตอร์อาจเกิดการพุ่งเกิน (overshoot) ซึ่งมักปรากฏในอา การฮันท์ดิงขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงชุดขดลวดตัวห่นวงจะเคลื่อนที่ไปตัดเส้นแรงแม่เหล็กใน ช่องอากาศ เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ และได้กระแสไหลครบวงจรภายในชุดขดลวดตัวห่นวง ตาม กฎของเลนส์เมื่อมีการกระทำของการหน่วงเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศ กับเส้นแรง แม่เหล็กจากชุดขดลวดตัวห่นวง ก่อให้เกิดแรงบิดต่อต้านการฮันท์ดิงของโรเตอร์ กล่าวอย่าง ง่ายก็คือ หากเกิดการเสียมวลย์ทางความเร็วโรเตอร์จะเกิดกระแสเหนี่ยวนำที่ชุดขดลวดตัว ห่นวง สร้างแรงบิดในลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำแก้ไขความเร็วที่เพิ่มขึ้น หรือลดลงให้กลับ สู่ความเร็วซิงโครนัส [5]

เกือบทั้งหมดของพลังงานไฟฟ้าผลิตขึ้นจากเครื่องจักรซิงโครนัส และเกือบทั้งหมดใช้เครื่อง จักรซิงโครนัส 3-เฟส แต่เราก็สามารถทำนายพฤติกรรมทางไฟฟ้า และกลศาสตร์โดยเริ่มจาก เครื่องจักรซิงโครนัส 2-เฟส ชนิดมีขั้วขาละเอียด เพื่อลดความซับซ้อน แล้วจึงเพิ่มการวิเคราะห์ เป็น 3-เฟส ในภายหลัง [5]

6.2 เครื่องจักรซิงโครนัส 2-เฟส

เครื่องจักรซิงโครนัส 2-ขั้ว 2-เฟส ชนิดมีขั้วขาละเอียดตามรูป 6.4 ชุดขดลวดสเตเตอร์ เหมือนกันโดยเอกลักษณ์ มีการพันกระจายแบบไซน์ซออยด์ดังที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 ลักษณะ ทางไฟฟ้าของโรเตอร์อาจประมาณได้จากชุดขดลวดกระตุ้นสนาม และชุดขดลวดตัวห่นวง (ชุด ขดลวด k_q กับ k_d ตามรูป 6.4) โรเตอร์ใช้แบบแผ่นลามีเนทมีขั้วขาละเอียดพร้อมชุดขดลวดตัว ห่นวงแบบกรง สำหรับเครื่องจักรที่มีจำนวนขั้วสูงขณะที่เครื่องจักรแบบความเร็วสูงโรเตอร์ใช้ แบบทรงกระบอกตันอาจมีชุดขดลวดตัวห่นวงหรือไม่ก็ได้ คุณลักษณะทางไฟฟ้าของชุดขด ลวดตัวห่นวงหาได้จากการทดสอบ กำหนดให้ชุดขดลวดตัวห่นวงมีการพันประมาณได้เป็นไซ นุซออยด์ตำแหน่งวางห่างกัน 90 องศา ชุดขด ลวด k_d มีแกนแม่เหล็กเหมือนกับชุดขดลวด k_q

สมมุติจำนวนรอบ N_{kd} ความต้านทาน r_{kd} แกนแม่เหล็กของชุดขดลวด kq อยู่ห่างไป 90 องศาของแกนแม่เหล็กชุดขดลวด $kd(fd)$ สมมุติจำนวนรอบ N_{kq} ความต้านทาน r_{kq} รูป 6.6 แสดงโครงสร้างโรเตอร์ของเครื่องจักร 2-เฟส ซึ่งจะเหมือนกันสำหรับเครื่องจักรหลายเฟส 2-ขั้ว ในบางกรณีความถูกต้องของคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโรเตอร์ทำได้โดย กำหนดชุดขดลวดตัวหน่วง 2 ตัว หรือมากกว่าในแต่ละแกนแม่เหล็ก (kq_1, kq_2, \dots และ kd_1, kd_2, \dots) [5]



รูป 6.4 เครื่องจักรซิงโครนัสมีขั้วขาคี่ 2-ขั้ว 2-เฟส[5]

แกนแนวขวางแกน q (quadrature axis) และแกนแนวตรงแกน d (direct axis) ถือเป็นแกนแม่เหล็กของเครื่องจักรซิงโครนัสซิงโครนัส รูป 6.4 แกน q เป็นแกนแม่เหล็กของชุดขดลวด kq และแกน d เป็นแกนแม่เหล็กของชุดขดลวด fd กับ kd โดยมี ϕ_s เป็นการขจัดเชิงมุมของสเตเตอร์เทียบกับแกน as และ ϕ_r เป็นการขจัดเชิงมุมของโรเตอร์เทียบกับแกน qd , ω_r เป็นความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ และ θ_r เป็นการขจัดเชิงมุมวัดจากแกน as ไปยังแกน d ถ้ากำหนดจุดบนพื้นผิวโรเตอร์ด้วยตำแหน่งเชิงมุม ϕ_r เราอาจปรับตำแหน่งนี้ไปอยู่บนพื้นผิวของสเตเตอร์ ตาม

$$\phi_s = \phi_r + \theta_r$$

T_e เป็นแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า และ T_L เป็นแรงบิดภาระโดย T_e มีค่าบวกตามที่ θ_r และ T_L มีทิศบวกตรงข้ามกับทิศการหมุน เครื่องจักรซิงโครนัสมีความสมมาตรที่สเตเตอร์ แต่ไม่สมมาตรที่โรเตอร์ เนื่องจากชุดขดลวดโรเตอร์ไม่เหมือนกันโดยเอกลักษณ์ (จำนวนรอบไม่เท่ากัน ความต้านทานไม่เท่ากัน) และในกรณีมีขั้วขาลื่นทำให้แกน q ไม่เหมือนกับแกน d [5]

เมื่อจ่ายกระแสสภาวะคงตัวให้กับสเตเตอร์ ทำให้สเตเตอร์สร้าง $m\text{mf}_s$ หมุนรอบช่องอากาศด้วยความเร็ว w_e ตามความเร็วเชิงมุมของกระแสสเตเตอร์ดังสมการ 3.22 ลัดวงจรที่ชุดขดลวดตัวหน่วงจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้ชุดขดลวดกระตุ้นสนามผ่านทางแปรงถ่าน และวงแหวนลื่น ผลของกระแส i_{fd} ทำให้สร้าง $m\text{mf}_r$ ซึ่งอยู่กับที่เมื่อเทียบกับโรเตอร์ แรงเคลื่อนแม่เหล็กจากสเตเตอร์ กับโรเตอร์มีความเร็วเชิงมุมเท่ากัน เพื่อให้ค่าเฉลี่ยของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าไม่เป็นศูนย์โรเตอร์จึงต้องหมุนด้วยความที่เร็วซิงโครไนซ์กับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนรอบช่องอากาศของสเตเตอร์ ($w_r = w_e$) กลไกหลักของการสร้างแรงบิดคือปฏิกิริยาระหว่าง $m\text{mf}_s$ กับ $m\text{mf}_r$ อย่างไรก็ตามหากเครื่องจักรมีขั้วขาลื่นก็จะมีแรงบิดรีลัคแตนซ์เกิดขึ้นด้วย ตามรูป 6.4 ช่องอากาศไม่สม่ำเสมอ แกน q มีค่าความต้านทานแม่เหล็กของทางเดินแม่เหล็กสูงกว่าแกน d จากบทที่ 3 แรงบิดรีลัคแตนซ์เกิดจากความพยายามทำให้ความต้านทานแม่เหล็กน้อยมีค่าน้อยที่สุด นั่นคือในเครื่องจักรซิงโครนัสมีขั้วขาลื่น แรงบิดรีลัคแตนซ์พยายามจัดให้ความต้านทานแม่เหล็กของทางเดินแม่เหล็กน้อยที่สุด ด้วยการทำให้แกน d อยู่แนวเดียวกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กพัลส์รอบช่องอากาศ ($m\text{mf}_s + m\text{mf}_r$) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับแรงบิดรวมแล้ว แรงบิดรีลัคแตนซ์มีค่าน้อยมาก ส่วนเครื่องจักรซิงโครนัสชนิดโรเตอร์ทรงกระบอกไม่เกิดแรงบิดรีลัคแตนซ์ [5]

6.3 สมการแรงดัน และความเหนี่ยวนำชุดขดลวด

สมการแรงดันของเครื่องจักรซิงโครนัส 2-ขั้ว 3-เฟส ตามรูป 6.6 [5]

$$v_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad \text{..... 6.2}$$

$$v_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \quad \text{..... 6.3}$$

$$v_{kq} = r_{kq} i_{kq} + \frac{d\lambda_{kq}}{dt} \quad \text{..... 6.4}$$

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{d\lambda_{fd}}{dt} \quad \text{..... 6.5}$$

$$v_{kd} = r_{kd} i_{kd} + \frac{d\lambda_{kd}}{dt} \quad \text{..... 6.6}$$

เขียนในรูปเมตริกซ์ [5]

$$v_{abs} = r_s i_{abs} + p \lambda_{abs} \quad \dots 6.7$$

$$v_{qdr} = r_i i_{qdr} + p \lambda_{qdr} \quad \dots 6.8$$

กำหนด [5]

$$(f_{abs})^T = [f_{as} \ f_{bs}]$$

$$(f_{qdr})^T = [f_{kq} \ f_{kd} \ f_{kr}]$$

$$r_s = \begin{vmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{vmatrix} \quad \dots 6.9 \quad ; \quad r_r = \begin{vmatrix} r_{kq} & 0 & 0 \\ 0 & r_{fd} & 0 \\ 0 & 0 & r_{kd} \end{vmatrix} \quad \dots 6.10$$

เราอาจเขียนสมการเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องได้ดังนี้

$$\lambda_{as} = L_{asas} i_{as} + L_{asbs} i_{bs} + L_{askq} i_{kq} + L_{asfd} i_{fd} + L_{askd} i_{kd} \quad \dots 6.11$$

$$\lambda_{bs} = L_{bsas} i_{as} + L_{bsbs} i_{bs} + L_{bskq} i_{kq} + L_{bsfd} i_{fd} + L_{bskd} i_{kd} \quad \dots 6.12$$

$$\lambda_{kq} = L_{kqas} i_{as} + L_{kqbs} i_{bs} + L_{kqkq} i_{kq} + L_{kqfd} i_{fd} + L_{kqkd} i_{kd} \quad \dots 6.13$$

$$\lambda_{fd} = L_{fdas} i_{as} + L_{fdbs} i_{bs} + L_{fdkq} i_{kq} + L_{fdfd} i_{fd} + L_{fdkd} i_{kd} \quad \dots 6.14$$

$$\lambda_{kd} = L_{kdas} i_{as} + L_{kdbbs} i_{bs} + L_{kdkq} i_{kq} + L_{kdfd} i_{fd} + L_{kdkd} i_{kd} \quad \dots 6.15$$

ในกรณีชั่วคราวเลียนที่ช่องอากาศไม่สม่ำเสมอ ความเหนี่ยวนำตัวเองของชุดขดลวดสเตเตอร์ และความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างชุดขดลวดสเตเตอร์ กับชุดขดลวดโรเตอร์ เป็นฟังก์ชันของ θ_r พิจารณา L_{asas} ที่ $\theta_r=0$ จากรูป 6.6 ความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของ L_{asas} น้อยกว่าที่ $\theta_r = \pi/2$ ความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กที่ $\theta_r=0$ เขียนแทนด้วย L_{mq} เนื่องจากแกน q (ส่วนทางเดินแม่เหล็กที่มีความต้านทานแม่เหล็กสูง) อยู่แนวเดียวกับแกนแม่เหล็กของชุดขดลวด as [5]

$$L_{asas} = L_{Is} + L_{mq} : \theta_r = 0 \quad \dots 6.16$$

เมื่อ L_{Is} คือความเหนี่ยวนำรั่วไหลของชุดขดลวดสเตเตอร์

$$L_{mq} = N_s^2 / \mathfrak{M}_{mq} \quad \dots 6.17$$

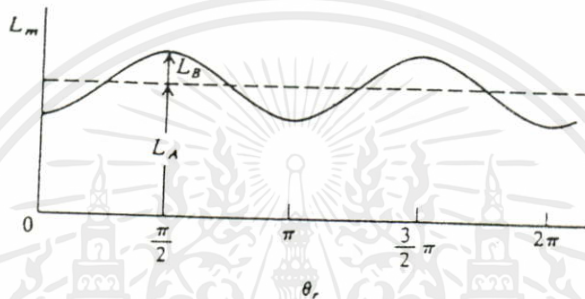
\mathfrak{M}_{mq} เป็นความต้านทานแม่เหล็กสมมูลย์ของทางเดินแม่เหล็กแกน q เขียนแทนด้วย $\mathfrak{M}_m(0)$ พิจารณา $\theta_r = \pi/2$ แกน d (ส่วนทางเดินแม่เหล็กที่มีความต้านทานแม่เหล็กต่ำอยู่แนวเดียวกับแกนแม่เหล็กของชุดขดลวด as เขียนแทนด้วย L_{md} [5]

$$L_{asas} = L_{Is} + L_{md} : \theta_r = \pi/2 \quad \dots 6.18$$

$$L_{md} = N_s^2 / R_{md}$$

..... 6.19

R_{md} เป็นความต้านทานแม่เหล็กสมมูลย์ของทางเดินแม่เหล็กของแกน d เขียนแทนด้วย $R_m(\pi/2)$ เนื่องจาก $R_{mq} > R_{md}$ ทำให้ $L_{mq} < L_{md}$ ค่าน้อยที่สุดของ L_{asas} เกิดขึ้นที่ $\theta_r = 0$ และ $\theta_r = \pi$ ในทำนองเดียวกันค่าสูงสุดของ L_{asas} เกิดขึ้นที่ $\theta_r = \pi/2$ และ $\theta_r = 3\pi/2$ ความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงโดยรอบบริเวณค่าเฉลี่ย(ซึ่งต้องมีค่าบวก) จากบทที่ 4 เราทราบว่าการเปลี่ยนแปลงอยู่ในรูปไซน์ซอซอดต์ตามฟังก์ชัน $2\theta_r$ ตามรูป 6.5 กำหนด L_A เป็นค่าเฉลี่ย และ L_B เป็นแอมพลิจูดของการเปลี่ยนแปลงลักษณะไซน์ซอซอดต์โดยรอบค่าเฉลี่ย[5]



รูป 6.5 การเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กโดยประมาณ [5]

$$L_{mq} = L_A - L_B \quad \text{..... 6.20}$$

$$L_{md} = L_A + L_B \quad \text{..... 6.21}$$

แทนค่าสมการ 6.17 กับ 6.19 ลงในสมการ 6.20 กับ 6.21 ตามลำดับเพื่อหาค่า L_A กับ L_B [5]

$$L_A = \frac{N_s^2}{2} \left[\frac{1}{R_{mq}} + \frac{1}{R_{md}} \right] \quad \text{.....6.22}$$

$$L_B = \frac{N_s^2}{2} \left[\frac{1}{R_{mq}} - \frac{1}{R_{md}} \right] \quad \text{.....6.23}$$

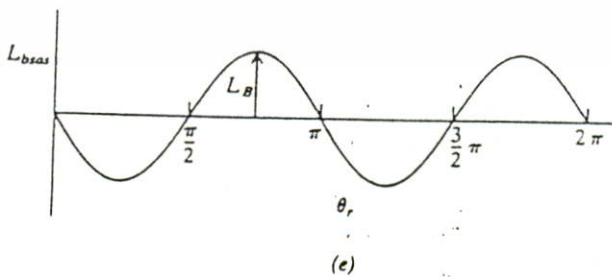
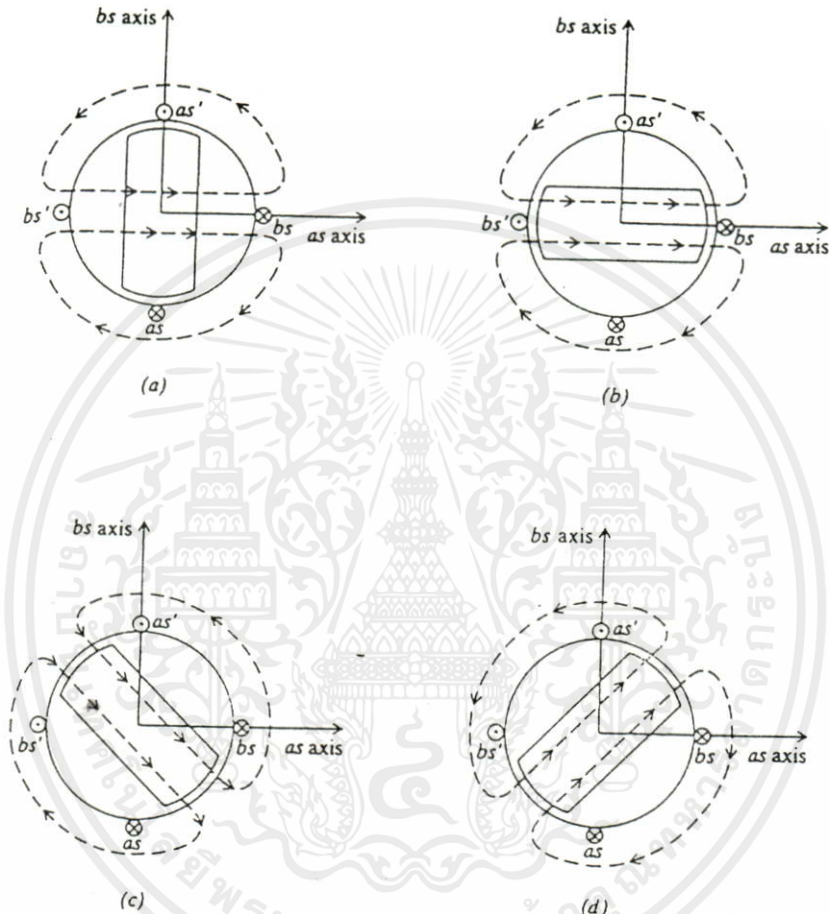
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การเปลี่ยนแปลงลักษณะไซน์ซอซอดต์ตามฟังก์ชัน $2\theta_r$ [5]

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{asas} = L_s + L_A - L_B \cos 2\theta_r \quad \text{..... 6.24}$$

หากช่องอากาศสม่ำเสมอ ในกรณีเครื่องจักรมีโรเตอร์ทรงกระบอก $\omega_{mq} = \omega_{md}$ ทำให้ $L_B = 0$ ในทำนองเดียวกันของข้อข้างเสียนท์ [5]

$$L_{bsbs} = L_s + L_A + L_B \cos 2\theta_r \quad \dots 6.25$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก รูป 6.6 ทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กชุดขั้วตลวด as[5] ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาความเหนี่ยวนำร่วมในชุดขดลวดสเตเตอร์ L_{asbs} , L_{bsas} ชุดขดลวดทั้งสองตั้งฉากกันทำให้การเชื่อมต่อร่วมเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของช่องอากาศ ตามรูป 6.6 เมื่อตำแหน่งของโรเตอร์เปลี่ยนไป (ในรูปแสดงเฉพาะทางเดินแม่เหล็กของชุดขดลวด as)) ปรากฏการเชื่อมต่อขึ้นเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กสร้างจากชุดขดลวดหนึ่งไปคล้องอีกชุดขดลวดหนึ่ง และเราพบว่า $L_{asbs} = L_{bsas}$ [5]

ตามรูป 6.6 ก เมื่อ $\theta_r = 0, \pi$ และ 2π หรือ $\theta_r = \pi/2$ หรือ $3\pi/2$ จากรูป 6.6 ข L_{bsas} มีค่าเป็นศูนย์ ณ ตำแหน่งนี้ไม่มีช่องสำหรับเส้นแรงแม่เหล็กของชุดขดลวดหนึ่งผ่านไปยังอีกชุดขดลวดหนึ่งเมื่อโรเตอร์หมุนทิศทวนเข็มนาฬิกาจาก 0 ไปยัง $\pi/2$ ทำให้โครงร่างทางเดินแม่เหล็กของโรเตอร์เปลี่ยนแปลง เส้นแรงแม่เหล็กจากชุดขดลวด as มีช่องผ่านไปยังชุดขดลวด bs โดยมีการเชื่อมต่อสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $\theta_r = \pi/4$ ตามรูป 6.6 ค ตำแหน่งคล้ายกันนี้เกิดขึ้นอีกที่ตำแหน่ง $\theta_r = 3\pi/4$ และ $7\pi/4$ ตามรูป 6.6 ง เครื่องหมายของความเหนี่ยวนำหาได้จาก กำหนดทิศบวกของกระแส และอาศัยกฎมือขวา ข้อมูลทั้งสองบอกให้เราทราบว่า L_{asbs} หรือ L_{bsas} เป็นลบที่ตำแหน่ง $\theta_r = \pi/4, 5\pi/4, \dots$ (เส้นแรงแม่เหล็กของชุดขดลวดตรงข้ามทิศบวกของกระแส) และเป็นบวกที่ $\theta_r = 3\pi/4, 7\pi/4, \dots$ เราสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง L_{bsas} กับ θ_r ได้ดังรูป 6.6 ง [5]

$$L_{bsas} = L_{asbs} - L_B \sin 2\theta_r \quad \dots 6.26$$

เขียนสมการเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง 6.11-6.15 ในรูปเมตริกซ์[5]

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abs} \\ \lambda_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{abs} \\ i_{qdr} \end{bmatrix} \quad \dots 6.27$$

เขียนเมตริกซ์ L_s ได้เป็น

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{asas} & L_{asbs} \\ L_{bsas} & L_{bsbs} \end{bmatrix}$$

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta_r & -L_B \sin 2\theta_r \\ -L_{ls} \sin 2\theta_r & L_{ls} + L_A + L_B \cos 2\theta_r \end{bmatrix} \quad \dots 6.28$$

จากบทที่ 4 เราทราบว่า ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างชุดขดลวดสเตเตอร์ กับโรเตอร์เปลี่ยนแปลงแบบไซน์ซอซิด์ตามฟังก์ชัน θ_r เราสามารถเขียนความเหนี่ยวนำร่วมได้ดังนี้ [5]

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{askq} & L_{asfd} & L_{askd} \\ L_{bskq} & L_{bsfd} & L_{bskd} \end{bmatrix}$$

$$L_{sr} = \begin{vmatrix} L_{skq} \cos \theta_r & L_{sfd} \sin \theta_r & L_{skd} \sin \theta_r \\ L_{skq} \sin \theta_r & -L_{sfd} \cos \theta_r & -L_{skd} \cos \theta_r \end{vmatrix} \quad \text{.....6.29}$$

ความเหนี่ยวนำตัวเองของโรเตอร์

$$L_r = \begin{vmatrix} L_{kqkq} & L_{kqfd} & L_{kqkd} \\ L_{fdkq} & L_{fdfd} & L_{fdkd} \\ L_{kdkq} & L_{kdfd} & L_{kdkd} \end{vmatrix}$$

$$L_r = \begin{vmatrix} L_{lkq} + L_{mkq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{lfd} + L_{mfd} & L_{fdkd} \\ 0 & L_{fdkd} & L_{lkd} + L_{mkd} \end{vmatrix} \quad \text{.....6.30}$$

ตามเมตริกซ์ความเหนี่ยวนำข้างต้น ตัวบ่งชี้ 1 แสดงถึงความเหนี่ยวนำรั่วไหล ส่วนตัวบ่งชี้ skq, sfd และ skd หมายถึงความเหนี่ยวนำร่วมสูงสุดระหว่างชุดขดลวดสเตเตอร์ กับชุดขดลวดโรเตอร์ [5]

$$L_{skq} = (N_{kq}/N_s) L_{mq} \quad \text{..... 6.31}$$

$$L_{sfd} = (N_{fd}/N_s) L_{md} \quad \text{..... 6.32}$$

$$L_{skd} = (N_{kd}/N_s) L_{md} \quad \text{..... 6.33}$$

$$L_{mkq} = (N_{kq}/N_s)^2 L_{mq} \quad \text{.....6.34}$$

$$L_{mfd} = (N_{fd}/N_s)^2 L_{md} \quad \text{..... 6.35}$$

$$L_{mkd} = (N_{kd}/N_s)^2 L_{md} \quad \text{..... 6.36}$$

$$L_{fkd} = (N_{kd}/N_{fd}) L_{mfd} = (N_{fd}/N_{kd}) L_{mkd} \quad \text{..... 6.37}$$

เราอาจแปลงตัวแปรโรเตอร์ โดยอาศัยอัตราส่วนการพัน [5]

$$i_j' = \frac{N_j}{N_s} i_j \quad \text{..... 6.38}$$

$$v_j' = \frac{N_s}{N_j} v_j \quad \text{..... 6.39}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ j เขียนแทน kq , fd หรือ kd สมการเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง 6.27 อาจนำมาเขียนได้ดังนี้ [5]

$$\begin{vmatrix} \lambda_{abs} \\ \lambda_{qdr} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} L_s \\ (L_{sr})^T \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} L_{sr} \\ L_r \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{abs} \\ i_{qdr} \end{vmatrix} \quad \dots 6.41$$

เมื่อ

$$L_{sr} = \begin{vmatrix} L_{mq} \cos \theta_r & L_{md} \sin \theta_r & L_{md} \sin \theta_r \\ L_{mq} \sin \theta_r & -L_{md} \cos \theta_r & -L_{md} \cos \theta_r \end{vmatrix} \quad \dots 6.42$$

$$L_r = \begin{vmatrix} L_{lkq} + L_{md} & 0 & 0 \\ 0 & L_{lfd} + L_{md} & 0 \\ 0 & 0 & L_{lkd} + L_{md} \end{vmatrix} \quad \dots 6.43$$

สมการแรงดันในทอมตัวแปรเครื่องจักร อาศัยอัตราส่วนการผัน แปลงสู่ด้านสเตเตอร์ เขียนความสัมพันธ์ในรูปเมตริกซ์ [5]

$$v_{abs} = r_s i_{abs} + p \lambda_{abs} \quad \dots 6.44$$

$$v_{qdr} = r_r i_{qdr} + p \lambda_{qdr} \quad \dots 6.45$$

เขียนในทอมความเหนี่ยวนำ [5]

$$\begin{vmatrix} v_{abs} \\ v_{qdr} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_s + pL_s & pL_{sr} \\ p(L_{sr})^T & r_r + pL_r \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{abs} \\ i_{qdr} \end{vmatrix} \quad \dots 6.46$$

โดยสมาชิกของเมตริกซ์ r_r และ L_r มีค่าดังนี้ [5]

$$r_j = \left(\frac{N_s}{N_j} \right)^2 r_j \quad \dots 6.47$$

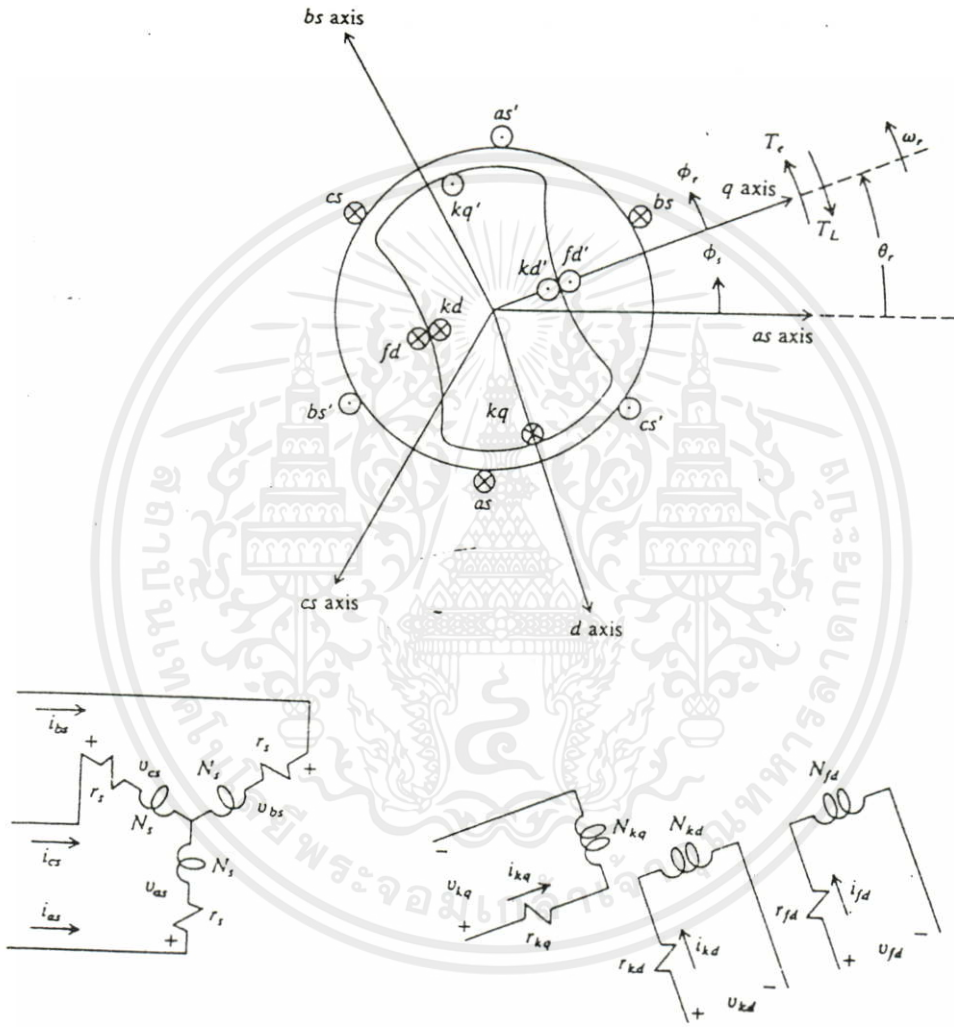
$$L_j = \left(\frac{N_s}{N_j} \right)^2 L_j \quad \dots 6.48$$

6.4 แรงบิด เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าคุณจะได้ $\frac{P}{2} \frac{\partial w_e(i, \theta_r)}{\partial \theta_r}$ ก็ตามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้6.49

กรณีระบบแม่เหล็กเชิงเส้น

$$\frac{P}{2} \left\{ \begin{array}{l} \frac{L_{md} - L_{mq}}{2} \left\{ (i_{as}^2 - i_{bs}^2) \sin 2\theta_r - 2i_{as}i_{bs} \cos 2\theta_r \right\} \\ -L_{mq}i_{kq} \left\{ i_{as} \sin \theta_r - i_{bs} \cos \theta_r \right\} \\ +L_{md}(i_{fd}' + i_{kd}') (i_{as} \cos \theta_r + i_{bs} \sin \theta_r) \end{array} \right\} \dots 6.50$$



รูป 6.7 เครื่องจักรซิงโครนัส 2-ขั้ว 3-เฟส มีขั้วขาลีเยนท์[5]

6.5 เครื่องจักรซิงโครนัส 3-เฟส

เครื่องจักรซิงโครนัส 2-ขั้ว 3-เฟส แสดงดังรูป 6.7 ชุดขดลวดสเตเตอร์เหมือนกันโดยเอกลักษณ์ และมีการพันกระจายแบบไซน์ซวยด์ แกนแม่เหล็กอยู่ห่างกัน 120 องศา การวิเคราะห์ใช้แนวทางต่อเนื่องจากเครื่องจักรซิงโครนัส 2-ขั้ว 2-เฟส ดังที่กล่าวมาในหัวข้อก่อน เพียงแต่เพิ่มตัวแปรชุดขดลวดสเตเตอร์เฟส c [5]

6.5.1 สมการแรงดัน และความเหนี่ยวนำชุดขดลวด

สมการแรงดันของเครื่องจักรซิงโครนัส 2-ขั้ว 3-เฟส เป็นไปตามสมการ 6.2-6.6 เพียงเพิ่มสมการแรงดันของชุดขดลวดเฟส c [5]

$$v_c = r_s i_{cs} + d\lambda_{cs}/dt \quad \dots 6.51$$

เขียนในรูปเมตริกซ์[5]

$$v_{abcs} = r_s i_{abcs} + p\lambda_{abcs} \quad \dots 6.52$$

$$v_{qdr} = r_r i_{qdr} + p\lambda_{qdr} \quad \dots 6.53$$

กำหนด [5]

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}]$$

$$(f_{qdr})^T = [f_{kq} \ f_{fd} \ f_{kd}]$$

เมตริกซ์ r_r เหมือนกับสมการ 6.10 และเมตริกซ์ r_s เป็นไดอะโกนอลเมตริกซ์ที่สมาชิกมีค่าเท่ากัน เขียนสมการเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวขดล้องได้ดังนี้[5]

$$\begin{vmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{qdr} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{abcs} \\ i_{qdr} \end{vmatrix} \quad \dots 6.54$$

$$L_s = \begin{vmatrix} L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta_r & -\frac{L_A}{2} - L_B \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & -\frac{L_A}{2} - L_B \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) \\ -\frac{L_A}{2} - L_B \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & L_{ls} + L_A - L_B \cos 2(\theta_r - \pi) & -\frac{L_A}{2} - L_B \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) \\ -\frac{L_A}{2} - L_B \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) & -\frac{L_A}{2} - L_B \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + L_A - L_B \cos 2(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \end{vmatrix} \quad \dots 6.55$$

$$L_{sr} = \begin{vmatrix} L_{skq} \cos \theta_r & L_{sfd} \sin \theta_r & L_{skd} \sin \theta_r \\ L_{skq} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{sfd} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{skd} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{skq} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sfd} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{skd} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{vmatrix} \quad \dots 6.56$$

เมตริกซ์ L_{sr} เหมือนกับสมการ 6.30 ความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของสเตเตอร์ มีค่าใหม่ซึ่งเขียนได้ดังนี้ [5] อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{mq} = (3/2)(L_A - L_B) \quad \dots 6.57$$

$$L_{md} = (3/2)(L_A + L_B) \quad \dots 6.58$$

ตามสมการ 6.57 กับ 6.58 ทำให้ด้านขวาของสมการ 6.31-6.36 ต้องคูณด้วย 2/3 เพื่อให้ทำให้แอมพลิจูดถูกต้อง นั่นคือความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของสเตเตอร์ตามสมการ 6.57 กับ 6.58 ทำให้อัตราส่วนจำนวนรอบของกระแสโรเตอร์เป็น 2:3 จากสมการ 6.38 ในส่วนของอัตราส่วนจำนวนรอบแรงดันโรเตอร์ และเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องไม่เปลี่ยนแปลงจากสมการ 6.39 กับสมการ 6.40 [5]

$$\begin{vmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda'_{qdr} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} L_s & L'_{sr} \\ \frac{2}{3}(L'_{sr})^T & L_r \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{abcs} \\ i_{qdr} \end{vmatrix} \quad \dots\dots 6.59$$

เมื่อ

$$L'_{sr} = \begin{vmatrix} L_{mq} \cos \theta_r & L_{md} \sin \theta_r & L_{md} \sin \theta_r \\ L_{mq} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{md} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{md} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{mq} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{md} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{md} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{vmatrix} \quad \dots\dots 6.60$$

เมตริกซ์ L_r เป็นไปตามสมการ 6.43 แต่ใช้ค่าของ L_{mq} กับ L_{md} ตามสมการ 6.57 กับ 6.58 สมการแรงดันเขียนได้ดังนี้ [5]

$$v_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad \dots\dots 6.61$$

$$v'_{qdr} = r'_r i'_{qdr} + p \lambda'_{qdr} \quad \dots\dots 6.62$$

เขียนสมการแรงดันในเทอมความเหนี่ยวนำรูปเมตริกซ์ [5]

$$\begin{vmatrix} v_{abcs} \\ v'_{qdr} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_s + pL_s & pL'_{sr} \\ \frac{2}{3}p(L'_{sr})^T & r'_r + pL_r \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{abcs} \\ i_{qdr} \end{vmatrix} \quad \dots\dots 6.63$$

6.5.2 แรงบิด

แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้ามีทิศบวกตามอาก์ปกริยามอเตอร์

$$T_e = \frac{P}{2} \left\{ \begin{array}{l} \frac{L_{md} - L_{mq}}{3} \left[(i_{as}^2 - \frac{i_{bs}^2}{2} - \frac{i_{cs}^2}{2} - i_{as}i_{bs} - i_{as}i_{cs} + 2i_{bs}i_{cs}) \sin 2\theta_r \right. \\ \left. + \frac{\sqrt{3}}{2} (i_{bs}^2 + i_{cs}^2 - 2i_{as}i_{bs} + 2i_{as}i_{cs}) \cos 2\theta_r \right] \\ - L_{mq} i'_{kq} \left[(i_{as} - i_{bs} - i_{cs}) \sin \theta_r - \frac{\sqrt{3}}{2} (i_{bs} - i_{cs}) \cos \theta_r \right] \\ + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd}) \left[(i_{as} - \frac{i_{bs}}{2} - \frac{i_{cs}}{2}) \cos \theta_r + \frac{\sqrt{3}}{2} (i_{bs} - i_{cs}) \sin \theta_r \right] \end{array} \right\} \quad \dots\dots 6.64$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น กรุณาแจ้งผู้จัดทำเอกสารฉบับนี้หากมีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

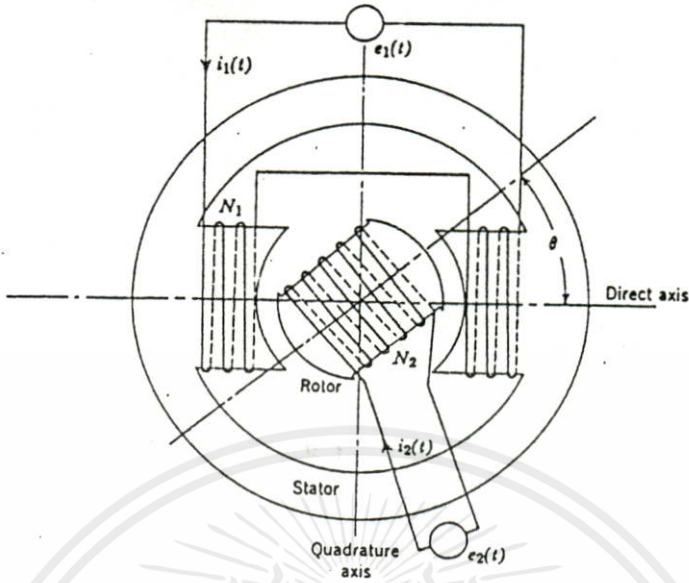
7.1 แนวความคิดพื้นฐาน

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแบ่งได้ 2 ชนิดโดยอาศัยโครงสร้างโรเตอร์คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์กรงกระรอก และ มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดขดลวดพันรอบโรเตอร์ ในการประยุกต์ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ (Doubly-Fed Induction Motor) พื้นฐานความคิดที่นำมาใช้คือ หลักการเบื้องต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และมอเตอร์ซิงโครนัส การใช้งานที่สภาวะปกติของมอเตอร์ซิงโครนัส สเตเตอร์จะต่อกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากภายนอก ส่วนโรเตอร์ต่อกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง กระแสในวงจรสเตเตอร์สร้างสนามแม่เหล็กหมุนเกาะติดไปกับสนามแม่เหล็กเนื่องจากกระแสในวงจรโรเตอร์ โดยสนามแม่เหล็กนี้หมุนไปพร้อมกับการหมุนของโรเตอร์ สนามแม่เหล็กทั้งสองต่างเกิดปฏิกิริยาซึ่งกัน และกัน ได้แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าหมายความว่าโรเตอร์ต้องหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรไนซ์กับสนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์เพื่อให้แรงบิดเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ ในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำการใช้งานของสเตเตอร์เหมือนกับมอเตอร์ซิงโครนัส แต่ลัดวงจรโรเตอร์ วงจรโรเตอร์จะรองรับการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์ เพื่อเหนี่ยวนำแรงดันผลักระแสไหลครบวงจรในโรเตอร์ เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ต้องหมุนด้วยความเร็วที่น้อยกว่าความเร็วเชิงโคโรไนซ์

กฎของเลนส์ "แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีทิศทางในลักษณะที่จะสร้างกระแสเพื่อต่อต้านการเปลี่ยนแปลงเสมอ" ในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำเราป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเข้าที่โรเตอร์ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งแรงเคลื่อนแม่เหล็กรอบช่องอากาศเนื่องจากการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กที่วงจรโรเตอร์ มีผลให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำเพื่อต่อต้านการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ผลที่ได้คือโรเตอร์จะหมุนตามทิศทางแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนรอบช่องอากาศของสเตเตอร์ ในทำนองเดียวกันถ้าเรานำมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์พันด้วยขดลวดมาใช้โดยป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับผ่านแปรงถ่าน และวงแหวนลื่น เพื่อสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุน ของโรเตอร์เองอีกหนึ่งชุด ถ้าเข้าไปอยู่ที่วงจรสเตเตอร์เราจะต้องพบการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ถ้าสเตเตอร์สามารถหมุนได้สเตเตอร์คงต้องหมุนตามแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนรอบช่องอากาศของโรเตอร์เช่นกันหากเราลัดวงจรสเตเตอร์ไว้

จากที่กล่าวมา วิธีที่น่าจะเป็นไปได้คือ นำมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์พันด้วยขดลวดมาประยุกต์ด้วยการป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายเดียวกันเข้าที่ขดขดลวดสเตเตอร์กับขดขดลวดโรเตอร์ เพียงแต่กลับลำดับเฟสที่ป้อนให้กับขดขดลวดชุดใดชุดหนึ่ง เพื่อให้ขดขดลวดทั้งสองต่างก็สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนรอบช่องอากาศในทิศทางเสริมกัน อีกทั้งทำให้ความเร็วเนื่องจากการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองซิงโครไนซ์กัน ผลที่ได้ก็คือความเร็วในการหมุนของโรเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ของความเร็วแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนแต่ละชุด (แหล่ง

จ่ายเดียวกัน แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนที่สร้างย่อมมีความเร็วในการหมุนเท่ากัน)



รูป 7.1 ตัวอย่างวงจรแม่เหล็กในระบบกระตุ้นคู่ [8]

ในการวิเคราะห์แรงบิดเชิงวงจรมแม่เหล็ก แรงบิดจากระบบกระตุ้นเดี่ยวหากไม่มีข้อผิดพลาด ต้องกำหนดส่วนวงจรมแม่เหล็กที่ไม่ได้รับการกระตุ้นเป็นข้อผิดพลาด เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์เราจะวิเคราะห์เครื่องจักร 2-ขั้ว 1-เฟส [1]

7.2 ประเภทของเครื่องจักรตามสมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า

สมการแรงบิดหลักมูลของเครื่องจักร ในทอมความเหนียวนำ ตามสมการ 4.66

$$T_e = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{d\theta} + i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta} \quad \dots 7.1$$

จากสมการ 7.1 เราสามารถแบ่งชนิดของเครื่องจักรออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ

7.2.1 The single-excited reluctance motor

ในระบบกระตุ้นเดี่ยว ทอม L_2 กับ L_{12} จะไม่เกิดขึ้น สมการแรงบิดลดรูปลงเหลือเพียง [5],[8],[9],[10]

$$T_e = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\theta} \quad \dots 7.2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารงานวิจัยสำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการทำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีเครื่องจักร 2-ขั้ว จากบทที่ 4 ทำให้เราทราบว่าความเหนียวนำเปลี่ยนแปลงแบบไซ

นูซอยต์ตามฟังก์ชัน 2θ ตามสมการ

$$L_1 = L_A + L_B \cos 2\theta \quad \dots 7.3$$

เดริเวทีฟสมการ 7.3 เทียบกับ θ

$$\frac{dL_1}{d\theta} = -2L_B \sin 2\theta \quad \dots 7.4$$

กำหนด

$$i_1 = I_1 \cos \omega t \quad \dots 7.5$$

แทนค่าสมการ 7.4 กับ 7.5 ลงในสมการ 7.2

$$\begin{aligned} T_e &= -L_B I_1^2 \cos^2 \omega t \sin 2\theta \\ T_e &= -\frac{L_B I_1^2}{2} [\sin 2\theta + \sin 2\theta \cos 2\omega t] \\ T_e &= -\frac{L_B I_1^2}{2} \left[\sin 2\theta + \frac{1}{2} \sin(2\theta + 2\omega t) + \frac{1}{2} \sin(2\theta - 2\omega t) \right] \quad \dots 7.6 \end{aligned}$$

ภายใต้เงื่อนไขการทำงานตามฟังก์ชัน θ กำหนด β เป็นตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ที่เวลา $t = 0$ ดังนั้น $\theta = \omega t + \beta$ เดริเวทีฟเทียบกับเวลา $d\theta/dt = \omega$ หรือกล่าวได้ว่าความเร็วการหมุนเชิงโคโรไนซ์กับความถี่ของแหล่งจ่ายพลังงาน

$$T_e = -\frac{L_B I_1^2}{2} \left[\sin(2\omega t + 2\beta) + \frac{1}{2} \sin(4\omega t + 2\beta) + \frac{1}{2} \sin(2\beta) \right] \quad \dots 7.7$$

ค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันไซน์ขอยอดซึ่งขึ้นกับเวลา t ใน 1 คาบ มีค่าเป็นศูนย์

$$T_{av} = \frac{1}{4} L_B I_1^2 \sin 2\beta \quad \dots 7.8$$

แรงบิดรีลัคแตนซ์เป็นสัดส่วนกับ $\sin 2\beta$ เมื่อ β เป็นการขจัดซึ่งมีระยะคงที่จากตำแหน่งเชิงโคโรไนซ์ หรือ ตำแหน่ง "in line" อาจเรียก β ได้ว่ามุมของแรงบิด (torque angle)

7.2.2 The synchronous machine

กรณีช่องว่างอากาศสม่ำเสมอ เครื่องจักรไม่มีขั้วขาสีเยนทร์ ความนำแม่เหล็กมีค่าคงที่ ทำให้ L_1 และ L_2 คงที่ สมการแรงบิดเหมือนกับสมการ 7.2 เครื่องจักรเชิงโคโรไนซ์มีลักษณะระบบอิสระเป็นเอกสารที่สวนไว้ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า กระตุ้นดู ชุดขดลวดสเตเตอร์ได้รับไฟฟ้ากระแสสลับ ส่วนชุดขดลวดโรเตอร์ได้รับไฟฟ้ากระแสตรง

$$i_1 = I_S \cos \omega t$$

$$i_2 = I_r$$

$$L_{12} = L_{sr} = M \cos \theta$$

$$\frac{dL_{12}}{d\theta} = \frac{dL_{sr}}{d\theta} = -M \sin \theta \quad \dots\dots 7.9$$

แทนค่าเหล่านี้ลงในสมการ 7.2

$$T_e = I_s I_r \cos \omega t (-M \sin \theta)$$

$$T_e = -\frac{I_s I_r}{2} M [\sin(\theta + \omega t) + \sin(\theta - \omega t)] \quad \dots\dots 7.10$$

เนื่องจาก $\theta = \omega t + \beta$ เติร์เวทิกเทียบกับเวลา $d\theta/dt = \omega$ กล่าวได้ว่าความเร็วการหมุนเชิงโคโรนัสกับความเร็วของแหล่งจ่ายพลังงาน

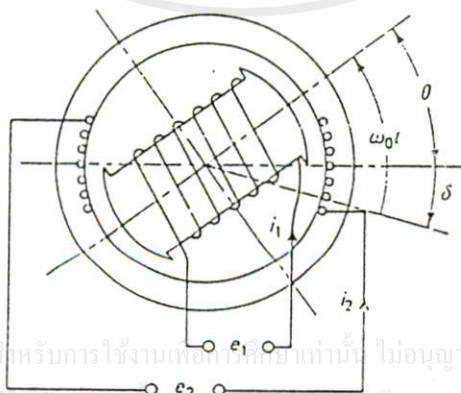
$$T_e = -\frac{1}{2} I_s I_r M [\sin(2\omega t + \beta) + \sin \beta] \quad \dots\dots 7.11$$

ค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันไซน์ซอซอด์ที่ขึ้นกับเวลา ใน 1 คาบ มีค่าเป็นศูนย์

$$T_{av} = \frac{1}{2} I_s I_r M \sin \beta \quad \dots\dots 7.12$$

ข้อสังเกต [10]

- 1) แรงบิดนี้คือ แรงบิดการกระตุ้น (excitation torque) เป็นสัดส่วนกับมุม β
- 2) เครื่องจักรเชิงโคโรนัสไม่สามารถเริ่มต้นเดินเครื่องได้ด้วยตัวเอง เครื่องจักรจะสร้างแรงบิดเฉลี่ยที่ไม่เป็นศูนย์ได้เมื่อความเร็วโรเตอร์เชิงโคโรนัสกับความเร็วแหล่งจ่าย
- 3) เครื่องจักรเชิงโคโรนัสที่มีขั้วขาคี่ และมีการกระตุ้นคู่ ทำงานที่ความเร็วเชิงโคโรนัสด้วยแรงบิดรีลัคแตนซ์ กับแรงบิดการกระตุ้นรวมกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดเบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 7.2 แสดงความสัมพันธ์ $\theta = \omega t + \beta$ [11]

7.2.3 Induction motor

กรณีช่องว่างอากาศสม่ำเสมอ ชุดขดลวดสเตเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันที่ชุดขดลวดโรเตอร์

$$i_1 = I_s \cos \omega_s t$$

$$i_2 = I_r \cos \omega_r t$$

$$L_{12} = L_{sr} = M \cos \theta$$

$$\theta = \omega_m t + \beta$$

$$\omega_m = \text{ความเร็วการหมุนของโรเตอร์} = \omega_s - \omega_r$$

เมื่อเริ่มการวิเคราะห์ถือว่า ω_s, ω_r และ ω_m มีค่าไม่เท่ากัน สมการแรงบิดเหมือนกับสมการ 7.2 แทนค่าต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำลงในสมการ 7.2

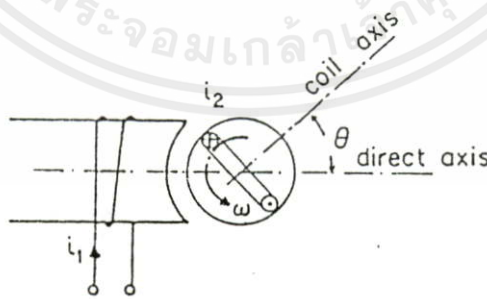
$$T_e = (I_s \cos \omega_s t)(I_r \cos \omega_r t)(-\sin(\omega_m t + \beta)) \quad \dots 7.13$$

$$T_e = -\frac{I_s I_r M}{4} [\sin(2\omega_s t + \beta) + \sin(-2\omega_r t + \beta) + \sin(2\omega_s t + \beta) + \sin \beta] \quad \dots 7.14$$

$$T_{av} = \frac{1}{4} I_s I_r M \sin \beta \quad \dots 7.15$$

7.2.4 The DC machine

เมื่อขดลวดหมุนโดยรอบแกนสนามกระตุ้นซึ่งเป็นแกนร่วมกับแกนขดลวด ($\theta=0$) จะปรากฏเส้นแรงแม่เหล็กเกี้ยวคล้องสูงสุดขึ้นที่ขดลวด ตามข้อกำหนดเส้นแรงแม่เหล็กมีการกระจายรูปไซนูซอยด์ในช่องว่างอากาศ ความเหนี่ยวนำร่วมเป็นฟังก์ชันของการจัดเชิงมุม L_{12} ซึ่งมีค่าเท่ากับ $M_D \cos \theta$ ตัวชี้ d หมายถึงแกนไดเรกต์ (direct axis) ของสนามกระตุ้น ตามรูป 7.3 [10]

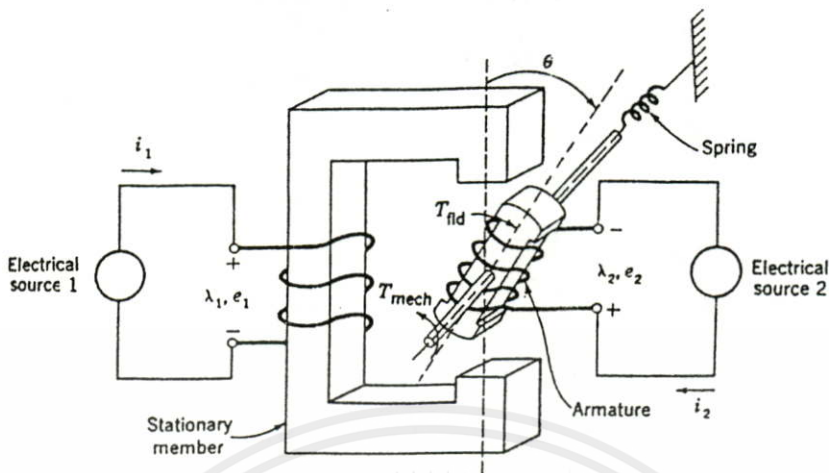


รูป 7.3 แสดงแกนไดเรกต์ และ แกนขดลวด [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตาม การเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_e = i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta}$$

$$T_e = -i_1 i_2 M_D \sin \theta \quad \dots 7.16$$

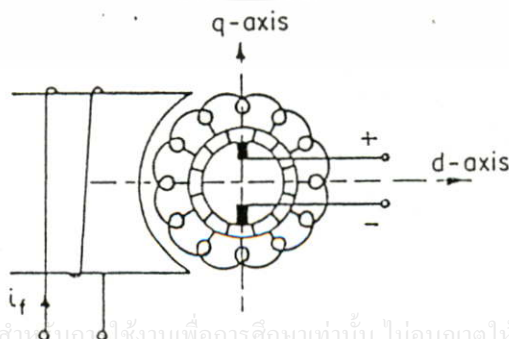


รูป 7.4 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดตามการหมุนของโรเตอร์ [6]

เมื่อ $\theta = \pi$: $T_e = i_1 i_2 M_d$ อากัปกริยาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$\theta = -\pi$: $T_e = -i_1 i_2 M_d$ อากัปกริยามอเตอร์

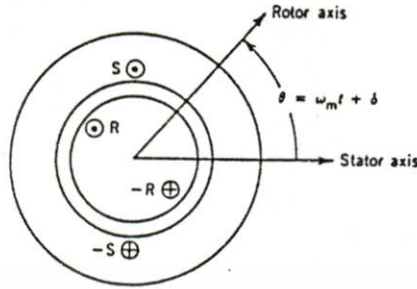
เครื่องหมายบวกแสดงถึง แรงบิดมีทิศตรงข้ามการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ในขณะที่เครื่องหมายลบแสดงถึงแรงบิดมีทิศตามการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ในเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงชุดขดลวดโรเตอร์ต้องมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ และต่อเนื่อง พร้อมทั้งต้องมีคอมมิวเตเตอร์ และ แปรงถ่านเตรียมไว้ที่ $\theta = \pm 90$ องศา [10]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับคณาจารย์ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 7.5 แสดงตำแหน่งคอมมิวเตเตอร์ และแปรงถ่าน [10]

7.3 การพิจารณาสมการแรงบิดโดยอาศัยเงื่อนไขความเร็วของการหมุน



รูป 7.6 การสร้างแรงบิดในเครื่องจักรทรงกระบอก [9]

ในหัวข้อนี้ เราจะพยายามหาสมการแรงบิดทั่วไปของเครื่องจักรที่มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอกไม่มีขั้วขาลื่นที่สเตเตอร์ และโรเตอร์ เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะโครงสร้างเป็นทรงกระบอก จากนั้นอาศัยเงื่อนไขความเร็วเพื่อหาแรงบิดกรณีต่าง ๆ พิจารณาภาพตัดขวางเครื่องจักร 2-ขั้ว 1-เฟส ทรงกระบอกดังรูป 7.6 ชุดขดลวดสเตเตอร์ กับชุดขดลวดโรเตอร์วางตัวอยู่ในสล็อตบนผิวโครงสร้างของสเตเตอร์กับโรเตอร์ เราตัดผลจากสล็อตไม่นำมาคิด ความต้านทานแม่เหล็กของทางเดินแม่เหล็กเป็นอิสระต่อตำแหน่งของโรเตอร์ทำให้มองได้ว่า L_s กับ L_r คงที่จึงไม่มีแรงบิดรีลัคแตนซ์เกิดขึ้น ส่วนความเหนี่ยวนำรวมแปรตามตำแหน่งของโรเตอร์ [7]

$$T_e = i_s i_r \frac{dL_{sr}}{d\theta}$$

$$L_{sr} = M \cos \theta$$

$$i_s = I_s \cos \omega_s t$$

$$i_r = I_r \cos (\omega_r t + \alpha)$$

$$\theta = \omega_m t + \beta$$

กำหนด

ω_m = ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์

ω_s = ความเร็วเชิงมุมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนรอบช่องอากาศจากชุดขดลวดสเตเตอร์

ω_r = ความเร็วเชิงมุมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนรอบช่องอากาศจากชุดขดลวดโรเตอร์

ไม่ว่า α = มุมเฟสระหว่างกระแสสเตเตอร์ กับกระแสโรเตอร์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

β = ตำแหน่งโรเตอร์ที่เวลา $t = 0$

สมการทั่วไปของแรงบิดเครื่องจักรทรงกระบอก

$$T_e = -I_s I_r M \cos w_s t + \cos(w_r t + \alpha) \sin(w_m t + \beta) \quad \dots 7.17$$

$$T_e = -\frac{I_s I_r M}{4} \begin{bmatrix} \sin\{(w_m + (w_s + w_r))t + \alpha + \beta\} \\ + \sin\{(w_m - (w_s - w_r))t - \alpha + \beta\} \\ + \sin\{(w_m + (w_s + w_r))t - \alpha + \beta\} \\ + \sin\{(w_m - (w_s - w_r))t + \alpha + \beta\} \end{bmatrix} \quad \dots 7.18$$

สมการ 7.18 ถือเป็นสมการทั่วไปของสมการแรงบิดเครื่องจักรชนิดไม่มีขั้วขาลื่นเห็นได้ว่าแรงบิดเปลี่ยนแปลงลักษณะไซน์ซายด์ตามเวลา ค่าเฉลี่ยแรงบิดแต่ละเทอมใน 1 คาบ มีค่าเป็นศูนย์ ยกเว้นกรณีที่สัมประสิทธิ์ของเวลา t เป็นศูนย์ ซึ่งหมายความว่าเกี่ยวข้องกับความเร็วเชิงมุมที่เกิดขึ้นตามความสัมพันธ์ [7]

$$w_m = \pm [w_s \pm w_r] \quad \dots 7.19$$

สมการ 7.19 และ สมการ 7.18 อธิบายได้ว่า เครื่องจักรจะสามารถสร้างแรงบิดเฉลี่ยเมื่อมีการหมุนในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ที่ความเร็วเชิงมุมของการหมุนโรเตอร์คือ ผลรวมหรือผลต่างระหว่างความถี่เชิงมุมของกระแสโรเตอร์ กับกระแสสเตเตอร์ จากแนวคิดเบื้องต้นว่าด้วยการประยุกต์ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ ซึ่งถือเป็นการรวมลักษณะของมอเตอร์ซิงโครนัส กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้าด้วยกัน เราจึงพิจารณาความเร็วเป็น 2 กรณี

1) $w_r = 0, \alpha = 0, w_m = w_s$ หมายถึงโรเตอร์ได้รับไฟฟ้ากระแสตรง I_r ตามความสัมพันธ์ของสมการ 7.19 นำไปแทนค่าสมการแรงบิด 7.18 [9]

$$T_e = -\frac{I_s I_r M}{2} [\sin(2w_s t + \beta + \sin \beta)] \quad \dots 7.20$$

$$T_{av} = \frac{1}{2} I_s I_r M \sin \beta \quad \dots 7.21$$

ถ้าเครื่องจักรหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส $w_m = w_s$ มันจะสร้างแรงบิดเฉลี่ยพร้อมทั้งมีการแปลงพลังงานอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นหลักพื้นฐานของเครื่องจักรซิงโครนัส โดยมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่โรเตอร์ และกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับที่สเตเตอร์สังเกตได้ว่าที่ $w_m = 0$

เครื่องจักรไม่สามารถสร้างแรงบิดเฉลี่ย มันจึงไม่สามารถเริ่มเดินเครื่องได้ด้วยตัวเอง

2) $w_m = w_s - w_r$ ชุดขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ทำงานด้วยไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่างกัน และ เครื่องจักรทำงานด้วยความเร็วที่ไม่ใช่ความเร็วซิงโครนัส ($w_m = w_s, w_m = w_r$) [9]

$$T_e = -\frac{I_s I_r M}{4} \left[\begin{array}{l} \sin(2\omega_s t + \alpha + \beta) + \sin(-2\omega_r t - \alpha + \beta) \\ + \sin(2\omega_s t - 2\omega_r t - \alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta) \end{array} \right] \quad \dots 7.22$$

$$T_{av} = \frac{1}{4} I_s I_r M \sin(\alpha + \beta) \quad \dots 7.23$$

กรณีนี้คือหลักการพื้นฐานของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งชุดขดลวดสเตเตอร์ได้รับการกระตุ้นจากไฟฟ้ากระแสสลับ และเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันขึ้นที่ชุดขดลวดโรเตอร์ สังเกตว่าเมื่อ $\omega_m = 0$ เครื่องจักรไม่สามารถสร้างแรงบิดเฉลี่ยได้ จึงเป็นเหตุผลว่ามันไม่สามารถเริ่มต้นหมุนได้ด้วยตัวเอง [9]

7.4 แนวความคิดพื้นฐานที่นำมาประยุกต์เพื่ออธิบายความเป็นไปได้

จากหัวข้อ 7.2 กับ 7.3 เราสามารถทำนายลักษณะของเครื่องจักรได้จากสมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าหลักมูล ดังสมการที่ 7.1 และเมื่อนำมาประกอบกับสมการที่ 7.19 เป็นสมการความสัมพันธ์ด้านความเร็วเชิงมุม ซึ่งเครื่องจักรสามารถสร้างแรงบิดเฉลี่ยขึ้นมาหากความเร็วเชิงมุมมีความสัมพันธ์กันดังสมการ พิจารณาหัวข้อ 7.2.2 พร้อมกับ 7.2.3 การใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ เราอาจมองในลักษณะของการเกิดระบบกระตุ้นคู่ขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำคล้ายกับที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ซิงโครนัส แต่เป็นระบบกระตุ้นคู่ซึ่งแตกต่างจากมอเตอร์ซิงโครนัสตรงที่เราป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับกระตุ้นโรเตอร์ ไม่ใช่การป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงดังเช่นมอเตอร์ซิงโครนัส ดังนั้นวงจรโรเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้นจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับย่อมต้องสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนของตัวเองอีก 1 ชุด ที่ไม่ใช่แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนจากการเหนี่ยวนำซึ่งต้องรอการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก ด้วยการกระตุ้นด้านสเตเตอร์ ถ้าเราทำการป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับพร้อมกันทั้งสองด้าน สเตเตอร์และโรเตอร์ย่อมสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนของตัวเองขึ้นมาคนละ 1 ชุด ด้วยวิธีการที่เหมาะสมเราต้องทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนทั้งสองชุดนี้ซิงโครไนซ์กัน เพื่อสร้างแรงบิดที่มีเสถียรภาพคล้ายกับการกระตุ้นคู่ในมอเตอร์ซิงโครนัส เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสแล้ว มีผลทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์เกาะติดไปกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์ (หมุนไปเพราะเกาะติดกับโรเตอร์)

วิธีทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนของชุดขดลวดทั้งสองซิงโครไนซ์กัน พร้อมทั้งมีทิศทางเสริมกันเพื่อให้เกิดเสถียรภาพของแรงบิดใช้แนวความคิดง่าย ๆ คือ ใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ชุดขดลวดทั้งสองแหล่งเดียวกัน แต่กลับลำดับเฟสที่ชุดขดลวดชุดใดชุดหนึ่ง พร้อมปรับแต่งกระแส และแรงดันที่ป้อน เริ่มต้นการวิเคราะห์จึงกำหนดให้กระแสที่ป้อนเข้าให้ชุดขดลวดทั้งสองมีเฟสต่างกันเป็นมุมเฟส α เสียก่อน ประกอบกับสมการแรงบิด 7.18 ของหัวข้อ 7.3 ในความจริงเราอาจใช้สมการ 7.13 ได้เช่นกันเพราะมาจากพื้นฐานเดียวกันเพียงแต่กระแสโรเตอร์ที่ใช้แทนค่าตามสมการแรงบิดหลักมูล ต้องมีมุมเฟส α มาเกี่ยวข้อง ในที่สุดผลที่ได้จะเหมือนกัน

พิจารณาความสัมพันธ์ทางความเร็วเชิงมุมสมการ 7.19 พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะสร้างแรงบิดเฉลี่ยขึ้นถ้า w_m มีความเร็วเชิงมุมเท่ากับผลบวกของความเร็วเชิงมุมเนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนทั้งสอง

$$w_m = w_s + w_r = 2w$$

$$w_s = w_r = w$$

$$T_e = -\frac{I_s I_r M}{4} [\sin(3wt + \alpha + \beta) + \sin(-\alpha + \beta) + \sin(2wt - \alpha + \beta) + \sin(2wt + \alpha + \beta)] \dots 7.24$$

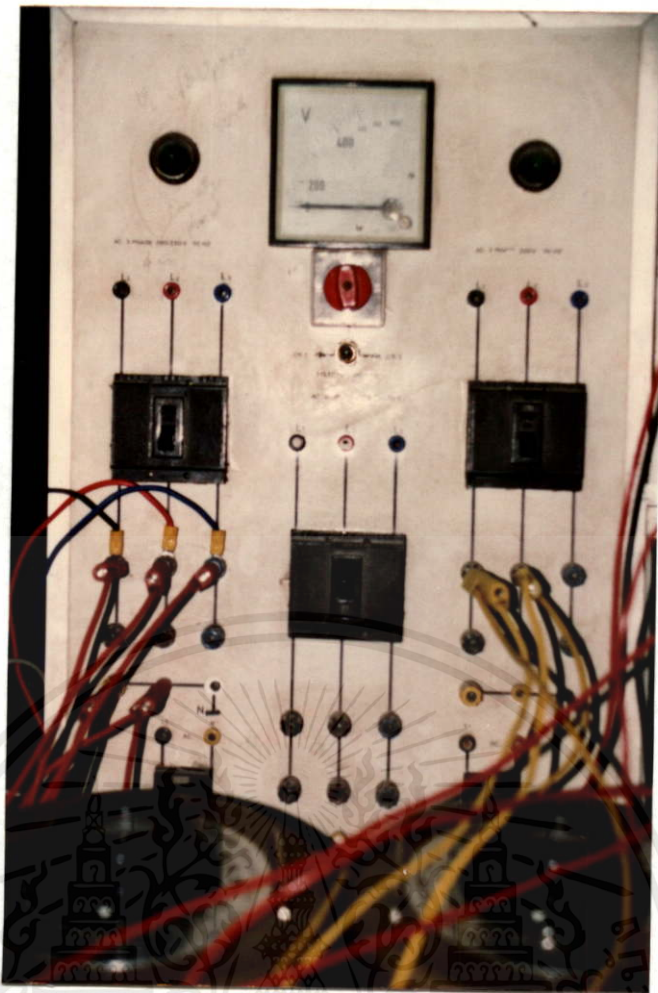
$$T_{av} = \frac{1}{4} I_s I_r M \sin(\alpha - \beta) \dots 7.25$$

7.5 การทดลอง

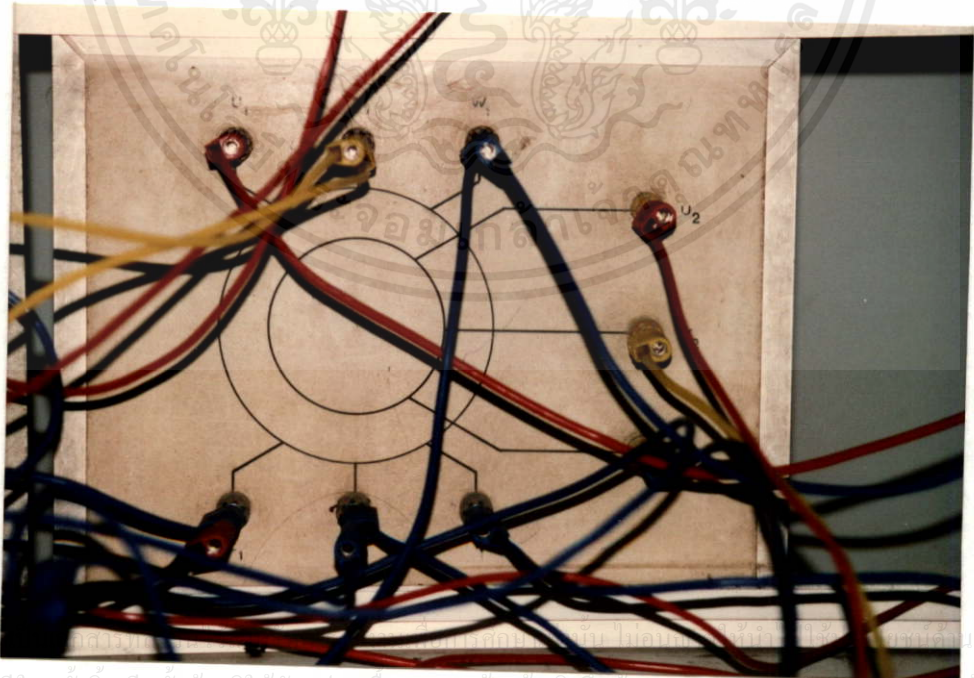
สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์พันด้วยขดลวด ที่นำมาประยุกต์ใช้ในลักษณะมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ ไม่สามารถเริ่มหมุนด้วยตัวเองจนมีความเร็วเป็นสองเท่าของความเร็วจึงทำได้ จำเป็นต้องใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก (separate excite dc.motor) มาเป็นตัวต้นกำลังจากภายนอกช่วยขับเคลื่อนได้ความเร็วจึงต้องการ โดยต่อเข้ากับแกนของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ทดลองดังรูป 7.8 เมื่อได้ความเร็วสองเท่าความเร็วจึงทำการป้อนกำลังไฟกระแสสลับที่ซิงโครไนซ์กันแล้วให้กับสเตเตอร์ และโรเตอร์โดยมีขั้นตอนของการซิงโครไนซ์กระแส กับแรงดันตามโพล์ชาร์ตท้ายบท ตามรูป 7.7 แสดงลักษณะการป้อนกำลังไฟให้มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่โดยชุดหนึ่งจ่ายให้กับสเตเตอร์ และ อีกชุดหนึ่งจ่ายให้โรเตอร์ จากนั้นตัดตัวต้นกำลังคือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงออกจากระบบ ด้วยวิธีค่อย ๆ ลดแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงตัวนี้ ในขั้นนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำจะทำงานในลักษณะมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ สร้างแรงบิดขึ้นด้วยตัวเอง และทำงานที่ความเร็วสองเท่าความเร็วพิกัดโดยไม่ต้องอาศัยตัวต้นกำลังมาช่วยหมุน เมื่อได้มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่แล้ว ทำการต่อภาระทางไฟฟ้าให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งต่อกับเพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ทดลอง สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงตัวนี้ก็คือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงตัวที่ใช้เป็นตัวต้นกำลังช่วยหมุนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ทดลองนั่นเอง

ในการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ อาศัยซิงโครสโคป (synchroscope) ช่วยในการทดลอง โดยตั้งแรงดันที่จ่ายด้านสเตเตอร์ เท่ากับ 220 V และ ด้านโรเตอร์ เท่ากับ 115 V (Line to Line สำหรับโรเตอร์)

เพื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำใช้งานภาวะปกติความเร็ว 1500 รอบ และมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวเดียวกัน แต่ใช้งานลักษณะป้อนกำลังไฟคู่ ทำงานที่ความเร็ว 3000 รอบ ได้ทำการทดลอง 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

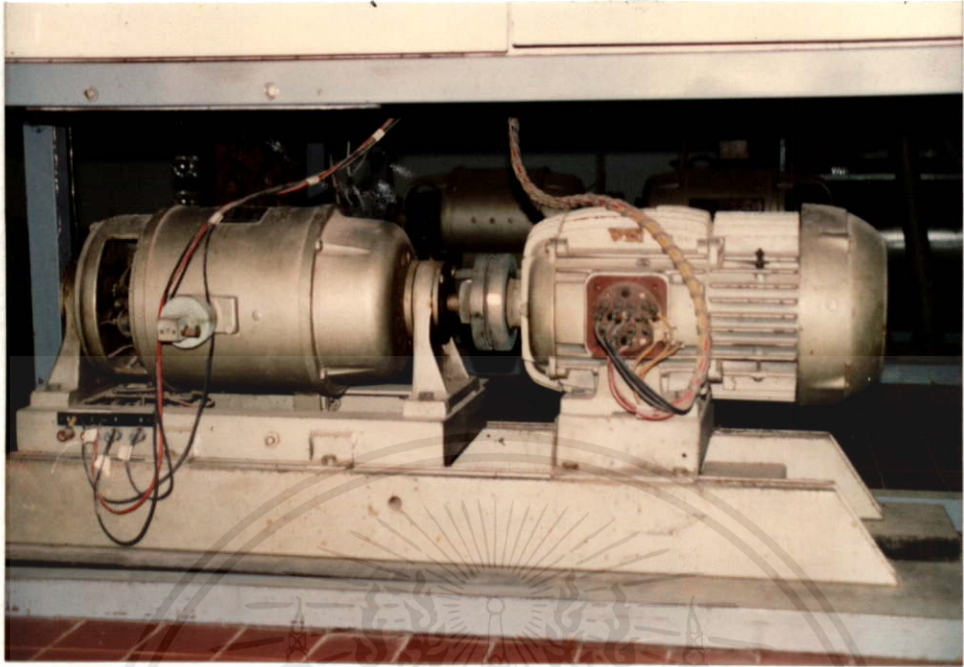


ก) supply

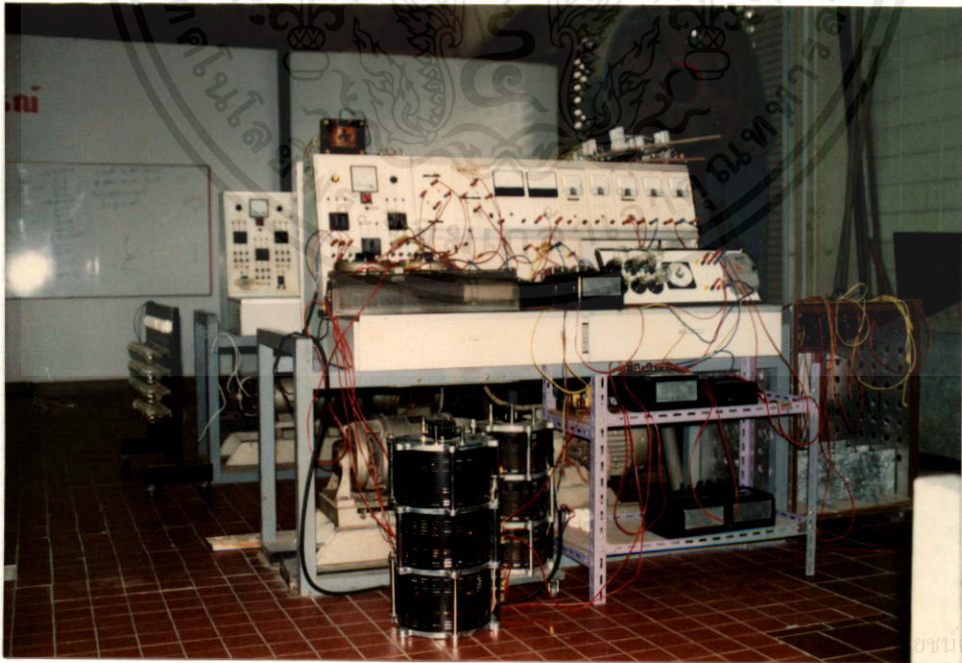


ข) วงจรมอเตอร์

รูป 7.7 แสดงลักษณะการป้อนกำลังไฟให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่



รูป 7.8 แสดงลักษณะการ coupling ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



เอกส

งบนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 7.9 แสดงอุปกรณ์การทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

7.5.1 หากคุณสมบัติมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้

เพื่อหาคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประสิทธิภาพของมอเตอร์ ได้ทำการทดลอง 2 แบบ ดังนี้

- การทดสอบไม่มีภาระ (No-Load Test)
- การทดสอบยึดโรเตอร์ (Block Rotor Test)

เมื่อทดสอบทั้ง 2 ชั้ดังกล่าวเรียบร้อยแล้ว คำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ

7.5.2 การทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ภาวะปกติ

การทดลองภาวะปกติมอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วประมาณ 1500 รอบต่อนาที เกิดสลิปของความเร็วดทดลองต่อภาระบันทึกผลเพื่อการวิเคราะห์ วงจรการทดลองแสดงดังรูป 7.7

7.5.3 การทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

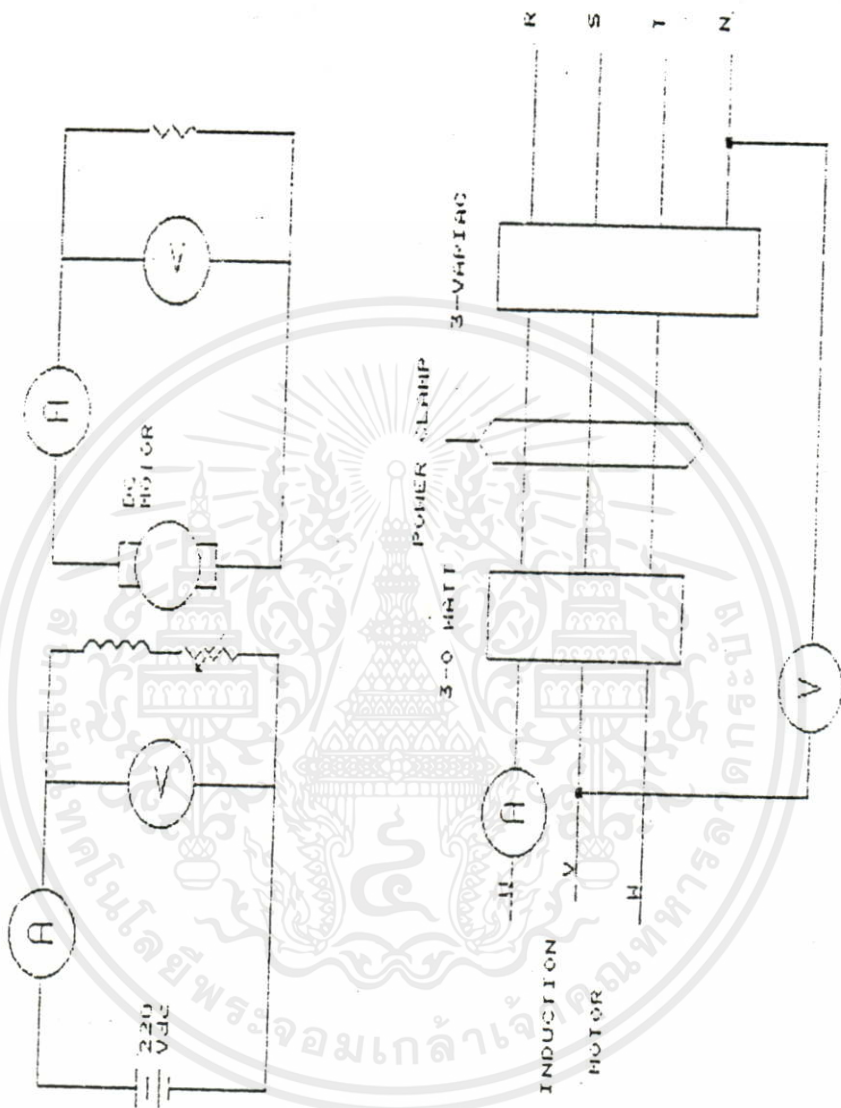
การทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ มอเตอร์มีความเร็วประมาณ 300 รอบต่อนาที วงจรการทดลองดังรูป 7.8 ลำดับการทำงานตามโฟลว์ชาร์ต

7.5.4 อุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง

- | | |
|---------------------------|-------|
| 1) VARIAC 3-PHASE | 2 ตัว |
| VARIAC 1-PHASE | 2 ตัว |
| 2) WATTMETER 1-PHASE | 1 ตัว |
| WATTMETER 3-PHASE | 3 ตัว |
| 3) DC. AMMETER 30 A | 1 ตัว |
| DC. AMMETER 1 A | 1 ตัว |
| 4) DC. VOLTMETER 300 V | 2 ตัว |
| 5) AC. AMMETER 30 A | 1 ตัว |
| AC. AMMETER 10 A | 1 ตัว |
| 6) AC. VOLTMETER 300 V | 2 ตัว |
| 7) DIODE BRIDGE RECTIFIER | 2 ตัว |
| 8) REOSTAT 990 OHMS | 2 ตัว |
| 9) CLAMP AMMETER | |
| 10) POWER CLAMP | |
| 11) TRANSFORMER | |
| 12) TECHO METER | |
| 13) OSCILLOSCOPE | |

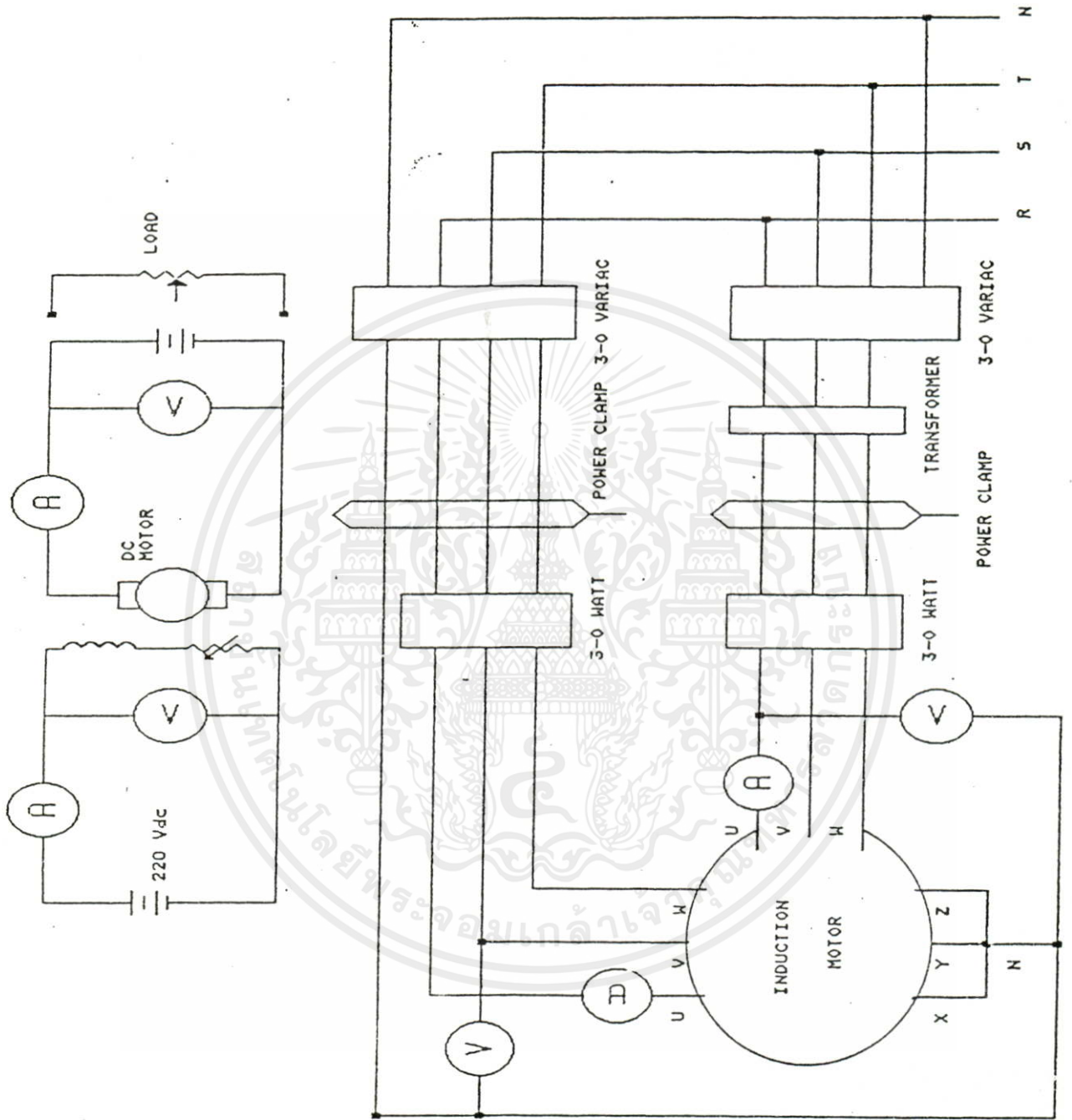
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



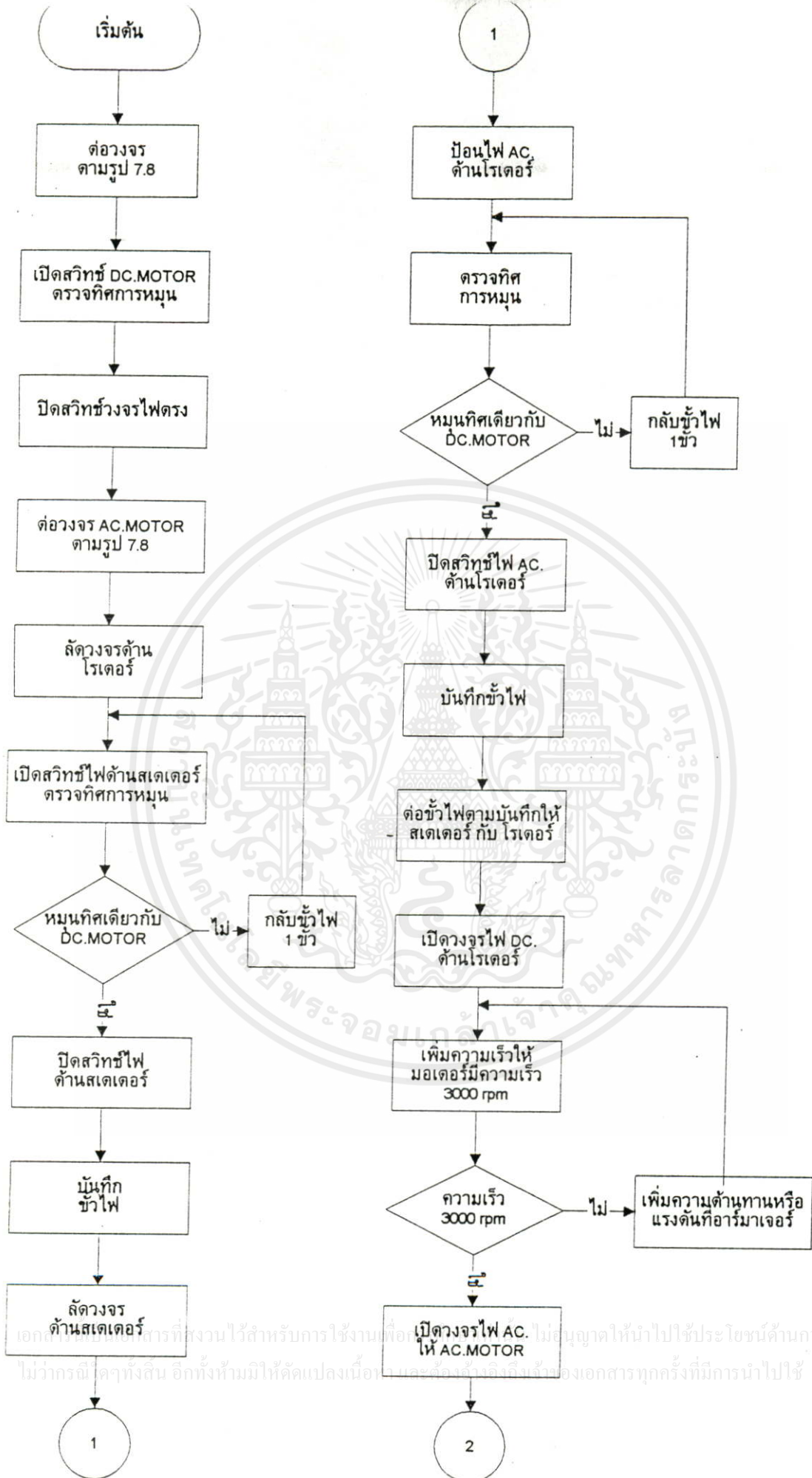
รูป 7.10 วงจรการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำภาวะปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

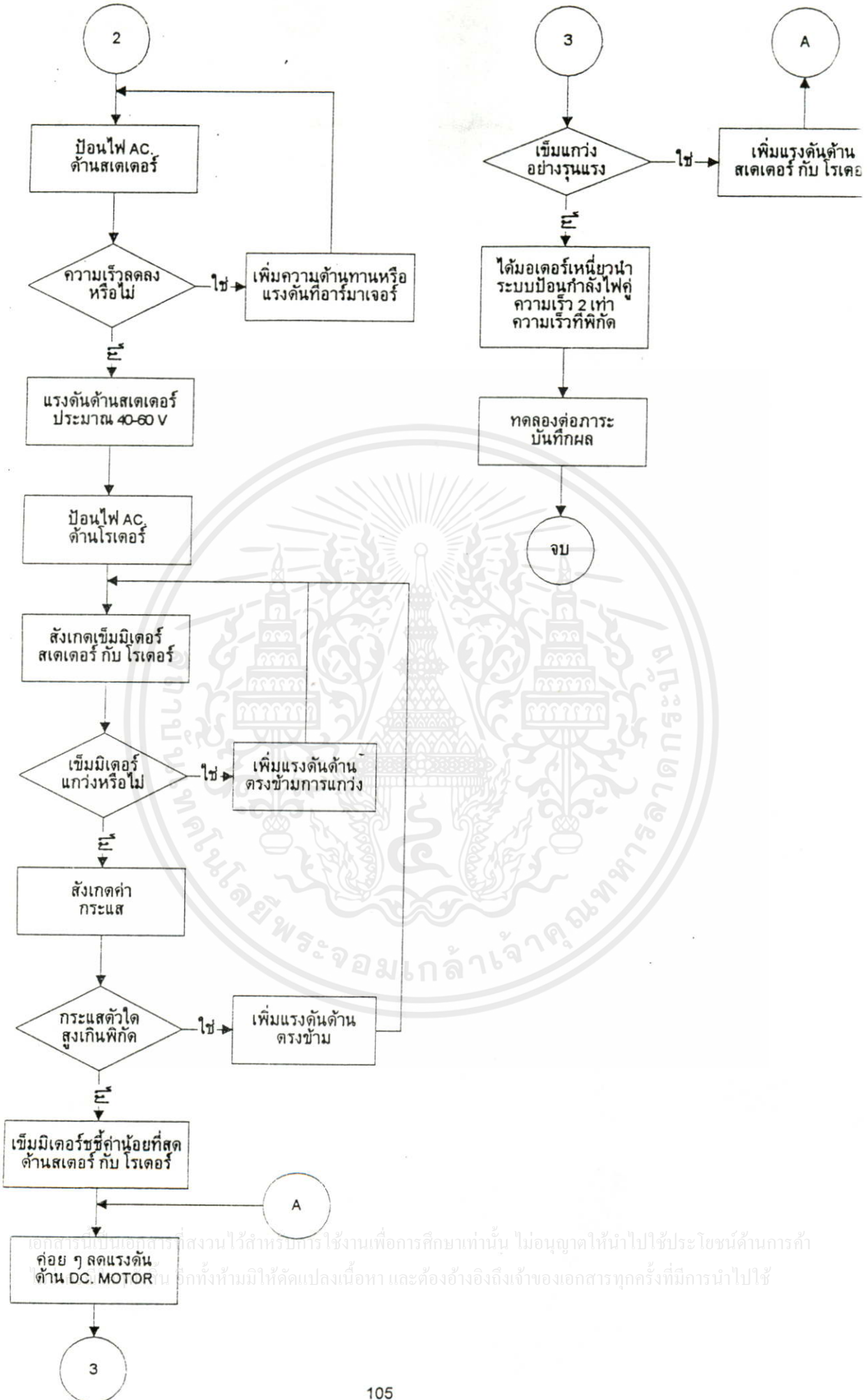


รูป 7.11 วงจรการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลห้องปฏิบัติการใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลเชิงอื่นของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

ผลการทดลอง

ผลการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำป้อนทั้งสองระบบ นำเสนอในรูปของตาราง โดยตารางที่ 1-6 เป็นตารางแสดงผลการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟปกติ และ ตารางที่ 7-13 เป็นตารางแสดงผลการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

สัญลักษณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในตารางมีความหมายดังนี้

R_0	=	ทดสอบไม่มีภาระ
I_r	=	กระแสโรเตอร์
I_s	=	กระแสสเตเตอร์
V_r	=	แรงดันโรเตอร์
V_s	=	แรงดันสเตเตอร์
P_r	=	กำลังที่โรเตอร์
P_s	=	กำลังที่สเตเตอร์
P_{in}	=	กำลังอินพุท
P_{out}	=	กำลังเอาต์พุท
w_r	=	ความเร็วการหมุนของโรเตอร์
$\cos \theta_r$	=	เพาเวอร์แฟคเตอร์ที่โรเตอร์
$\cos \theta_s$	=	เพาเวอร์แฟคเตอร์ที่สเตเตอร์
I_L	=	กระแสภาระ
I_f	=	กระแสฟิลด์
V_a	=	แรงดันภาระ
V_f	=	แรงดันสนามฟิลด์
eff_{sys}	=	ประสิทธิภาพของระบบ
eff_m	=	ประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ
$slip$	=	ค่าไถล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟปกติ แรงดันภาระ $V_a = 220 \text{ Vdc}$

No.1	I_s	I_r	P_{in}	$\cos\theta$	w_r	V_r	I_r	I_L	P_{out}	slip	T_{shaft}	eff_s	eff_m
R ₀	5.60	2.30	875	0.24	1490	142	0.30	0.00	0	0.01		0.00	0.00
R ₁	5.80	5.10	1300	0.34	1471	158	0.34	1.80	396	0.02	16.15	30.46	36.92
R ₂	6.00	5.50	1700	0.43	1454	172	0.37	3.50	770	0.03	31.77	45.29	54.90
R ₃	6.40	6.90	2200	0.52	1439	185	0.40	5.30	1166	0.04	48.62	53.00	64.24
R ₄	6.85	9.60	2700	0.60	1427	200	0.43	7.00	1540	0.05	64.75	57.04	69.14
R ₅	7.25	13.20	3100	0.65	1431	221	0.48	8.80	1936	0.06	81.17	62.45	75.70
R ₆	7.50	16.50	3400	0.69	1405	232	0.49	9.80	2156	0.06	92.07	63.41	76.86
R ₀	5.50	2.60	900	0.25	1489	140	0.29	0.00	0	0.01		0.00	0.00
R ₁	5.50	3.20	1100	0.30	1479	144	0.30	0.90	198	0.01	8.03	18.00	21.82
R ₂	5.60	4.20	1340	0.36	1470	152	0.32	1.80	396	0.02	16.16	29.55	35.82
R ₃	5.70	5.30	1950	0.52	1461	158	0.32	2.56	563	0.03	23.13	28.88	35.01
R ₄	5.80	6.20	1780	0.46	1454	165	0.35	3.50	770	0.03	31.77	43.26	52.43
R ₅	6.00	8.70	2050	0.52	1446	173	0.36	4.40	968	0.04	40.17	47.22	57.24
R ₆	6.50	10.30	2420	0.56	1435	188	0.40	6.20	1364	0.04	57.03	56.36	68.32
R ₇	6.70	10.60	2700	0.61	1424	200	0.42	7.05	1551	0.05	65.35	57.44	69.63
R ₈	7.00	11.40	2880	0.62	1418	209	0.44	7.90	1738	0.05	73.54	60.35	73.15
R ₉	7.20	12.50	3180	0.67	1413	220	0.46	8.80	1936	0.06	82.21	60.88	73.39
R ₁₀	7.50	16.50	3400	0.69	1405	232	0.49	9.80	2156	0.06	92.07	63.41	76.86

ตารางที่ 1

No.2	I_s	I_r	P_{in}	$\cos\theta$	w_r	V_r	I_r	I_L	P_{out}	slip	T_{shaft}	eff_s	eff_m
R ₀	4.80	5.00	970	0.31	1490	150	0.31	0.00	0	0.01		0.00	0.00
R ₁	5.10	3.50	1400	0.42	1471	162	0.34	1.80	396	0.02	16.15	28.29	34.29
R ₂	5.40	4.20	1620	0.45	1462	170	0.35	2.65	583	0.03	23.93	35.99	43.62
R ₃	5.80	6.60	2100	0.55	1445	183	0.38	4.40	968	0.04	40.19	46.10	55.87
R ₄	6.00	8.80	2500	0.63	1428	200	0.42	6.20	1364	0.05	57.31	54.56	66.13
R ₅	6.60	11.30	2900	0.67	1414	218	0.45	7.90	1738	0.06	73.75	59.93	72.64
R ₀	5.10	2.50	700	0.21	1489	140	0.29	0.00	0	0.01		0.00	0.00
R ₁	5.30	2.80	950	0.27	1481	144	0.30	0.49	378	0.01	15.31	13.47	37.54
R ₂	5.55	4.20	1500	0.41	1463	160	0.33	2.60	572	0.02	23.46	38.13	46.22
R ₃	5.80	5.80	1870	0.49	1449	176	0.37	4.40	968	0.03	40.08	51.76	62.75
R ₄	6.10	11.30	2360	0.59	1430	195	0.40	6.20	1364	0.05	57.23	57.80	70.06
R ₅	6.60	11.30	2900	0.67	1414	218	0.45	7.90	1738	0.06	73.75	59.93	72.64

ตารางที่ 2

No.3	I_s	I_r	P_{in}	$\cos\theta$	w_r	V_r	I_f	I_L	P_{out}	slip	T_{shaft}	eff_s	eff_m
R ₀	5.20	4.40	730	0.21	1489	148	0.30	0.00	0	0.01		0.00	0.00
R ₁	5.45	4.90	1130	0.31	1466	164	0.34	2.80	616	0.02	25.21	54.51	66.08
R ₂	5.65	6.30	1600	0.43	1450	176	0.37	3.50	770	0.03	31.86	48.13	58.33
R ₃	6.05	5.80	2100	0.53	1434	293	0.40	5.30	1166	0.04	48.79	55.52	67.30
R ₄	6.50	9.40	2670	0.62	1420	210	0.44	7.10	1562	0.05	66.00	58.50	70.91
R ₅	6.80	11.00	2840	0.63	1414	220	0.45	8.00	1760	0.06	74.68	61.97	75.12
R ₀	5.20	2.30	780	0.23	1491	138	0.29	0.00	0	0.01		0.00	0.00
R ₁	5.30	3.30	960	0.27	1478	146	0.30	0.90	198	0.01	8.04	20.63	25.00
R ₂	5.50	4.70	1300	0.36	1460	163	0.33	2.60	572	0.03	23.51	44.00	53.33
R ₃	5.90	6.30	1800	0.46	1444	174	0.36	4.40	968	0.04	40.22	53.78	65.19
R ₄	6.35	8.60	2300	0.55	1428	198	0.41	6.20	1364	0.05	57.31	59.30	71.88
R ₅	6.80	11.30	2840	0.63	1414	220	0.45	8.00	1760	0.06	74.68	61.97	75.12

ตารางที่ 3

No.4	I_s	I_r	P_{in}	$\cos\theta$	w_r	V_r	I_f	I_L	P_{out}	slip	T_{shaft}	eff_s	eff_m
R ₀	4.90	1.90	650	0.20	1489	141	0.31	0.00	0	0.01		0.00	0.00
R ₁	5.05	3.90	900	0.27	1474	156	0.33	1.30	286	0.02	11.64	31.78	38.52
R ₂	5.15	5.10	1200	0.35	1461	165	0.35	2.65	583	0.03	23.94	48.58	58.89
R ₃	5.30	6.00	1520	0.43	1450	174	0.37	4.00	880	0.03	36.41	57.89	70.18
R ₄	5.60	7.30	1900	0.51	1438	185	0.39	5.30	1166	0.04	48.65	61.37	74.39
R ₅	5.90	9.10	2280	0.59	1427	196	0.42	6.65	1463	0.05	61.51	64.17	77.78
R ₆	6.30	12.30	2680	0.64	1415	214	0.45	8.00	1760	0.06	74.62	65.67	81.84
R ₇	6.60	13.40	2900	0.67	1405	223	0.47	8.90	1958	0.06	83.62	67.52	81.84
R ₀	4.55	1.70	650	0.22	1490	138	0.29	0.00	0	0.01		0.00	0.00
R ₁	4.90	3.00	830	0.26	1486	146	0.31	0.90	198	0.01	7.99	23.86	28.92
R ₂	5.10	4.60	1120	0.33	1468	155	0.32	2.20	484	0.02	19.78	43.12	52.38
R ₃	5.20	5.20	1450	0.42	1450	165	0.35	3.50	770	0.03	31.86	53.10	64.37
R ₄	5.40	8.90	1790	0.50	1442	176	0.37	4.90	1078	0.04			
R ₅	5.75	9.60	2190	0.58	1434	187	0.39	6.20	1364	0.04	57.07	62.28	75.49
R ₆	6.15	11.90	2520	0.62	1418	202	0.42	7.50	1650	0.05	69.82	65.48	79.37
R ₇	6.60	13.40	2900	0.67	1405	223	0.47	8.90	1958	0.06	83.62	67.52	81.84

ตารางที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.5	I_s	I_r	P_{in}	$\cos\theta$	w_r	V_r	I_r	I_L	P_{out}	slip	T_{shaft}	eff_s	eff_m
R ₀	4.90	1.70	670	0.21	1491	144	0.31	0.00	0	0.01		0.00	0.00
R ₁	4.98	2.30	1000	0.30	1476	155	0.33	1.30	286	0.02	11.63	28.60	34.67
R ₂	5.05	4.00	1300	0.39	1460	165	0.35	2.60	572	0.03	23.51	44.00	53.33
R ₃	5.30	4.80	1600	0.46	1454	174	0.36	3.95	869	0.03	35.86	54.13	65.83
R ₄	5.50	8.60	1980	0.55	1438	186	0.39	5.30	1166	0.04	48.65	58.89	71.38
R ₅	5.90	9.20	2230	0.57	1426	196	0.41	6.60	1452	0.05	61.09	65.11	78.92
R ₆	6.35	10.60	2650	0.63	1413	214	0.45	7.95	1749	0.06	74.27	66.00	80.00
R ₇	6.70	13.70	2920	0.66	1406	220	0.48	8.85	1947	0.06	83.09	66.68	80.82
R ₀	4.90	1.50	700	0.22	1490	138	0.29	0.00	0	0.01		0.00	0.00
R ₁	4.95	3.70	870	0.27	1475	145	0.30	0.90	198	0.02	8.05	28.60	34.67
R ₂	5.20	5.40	1230	0.36	1465	154	0.32	2.20	484	0.02	19.82	44.00	53.33
R ₃	5.30	6.60	1450	0.41	1453	167	0.35	3.50	770	0.03	37.79	54.13	65.83
R ₄	5.55	8.70	1800	0.49	1443	177	0.37	4.85	1067	0.04	44.37	58.89	71.38
R ₅	5.85	10.00	2200	0.57	1429	190	0.40	6.20	1364	0.05	57.27	65.11	78.92
R ₆	6.20	10.70	2550	0.62	1418	208	0.44	7.50	1650	0.05	69.82	66.00	80.00
R ₇	6.70	13.70	2920	0.66	1406	220	0.48	8.85	1947	0.06	83.09	66.68	80.82

ตารางที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.6	I_s	I_r	P_{in}	$\cos\theta$	w_r	V_r	I_r	I_L	P_{out}	slip	T_{shaft}	eff_s	eff_m
R ₀	5.00	2.10	600	0.18	1489	141	0.31	0.00	0	0.01		0.00	0.00
R ₁	5.00	2.60	780	0.24	1478	150	0.33	0.90	198	0.01	8.04	25.38	30.77
R ₂	5.10	4.00	1020	0.30	1465	158	0.34	1.80	396	0.02	16.22	38.82	47.06
R ₃	5.20	4.40	1210	0.35	1459	164	0.35	2.65	583	0.03	23.98	48.18	58.40
R ₄	5.30	5.30	1400	0.40	1449	172	0.37	3.50	770	0.03	31.88	55.00	66.67
R ₅	5.52	6.00	1800	0.49	1434	182	0.39	4.90	1078	0.04	45.10	59.89	72.59
R ₆	5.95	8.60	2300	0.59	1425	198	0.43	6.60	1452	0.05	61.14	63.13	76.52
R ₇	6.20	11.50	2500	0.61	1417	210	0.45	7.50	1650	0.06	69.87	66.00	80.00
R ₈	6.50	12.80	2790	0.65	1408	218	0.46	8.40	1848	0.06	78.75	66.24	80.29
R ₉	6.80	13.00	3080	0.69	1400	230	0.49	9.30	2046	0.07	87.69	66.43	80.52
R ₀	4.90	1.80	680	0.21	1481	135	0.29	0.00	0	0.01		0.00	0.00
R ₁	5.00	3.20	1000	0.30	1474	147	0.31	1.30	286	0.02	11.64	28.60	34.67
R ₂	5.10	4.20	1300	0.39	1454	158	0.32	2.65	583	0.03	24.06	44.85	54.36
R ₃	5.30	7.30	1570	0.45	1448	167	0.35	4.00	880	0.03	36.46	56.05	67.94
R ₄	5.45	8.40	1800	0.50	1442	174	0.37	4.85	1067	0.04	44.40	59.28	71.85
R ₅	5.65	10.50	2050	0.55	1433	184	0.39	5.75	1265	0.04	52.97	61.71	74.80
R ₆	5.90	11.60	2280	0.59	1427	191	0.41	6.60	1452	0.05	61.05	63.68	77.19
R ₇	6.20	12.00	2580	0.63	1416	202	0.43	7.50	1650	0.06	69.91	63.95	77.52
R ₈	6.48	12.70	2750	0.64	1410	214	0.45	8.40	1848	0.06	78.64	67.20	81.45
R ₉	6.80	13.00	3080	0.69	1400	230	0.49	9.30	2046	0.07	87.69	66.43	80.52

ตารางที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

$V_s = 220 \text{ volt}$; $V_r = 115 \text{ volt}$; $w_r = 3000 \text{ rpm}$; $V_a = 220 \text{ Vdc}$.

No.1	I_s	I_r	P_s	P_r	$\cos\theta_s$	$\cos\theta_r$	P_m	I_r	I_L	P_{out}	T_{shaft}	eff_s	eff_m
R ₀	5.70	2.00	1000	425	0.27	0.56	1425	0.08	0.00	0		0.00	0.00
R ₁	5.80	4.00	1300	675	0.34	0.89	1975	0.09	2.20	484	9.68	24.51	29.70
R ₂	6.20	4.90	1500	900	0.37	0.82	2400	0.09	4.00	880	17.6	36.67	44.44
R ₃	6.50	6.30	1700	1125	0.40	0.83	2825	0.10	5.70	1254	25.08	44.39	53.81
R ₄	6.90	8.00	1950	1375	0.43	0.87	3325	0.11	7.50	1650	33.00	49.62	60.15
R ₅	6.80	8.90	2150	1675	0.48	0.72	3825	0.12	9.30	2046	40.92	53.49	64.84
R ₆	7.00	10.00	2350	1850	0.51	0.69	4200	0.12	10.60	2332	46.64	55.52	67.30
R ₇	7.50	11.80	2700	2125	0.55	0.92	4825	0.14	12.40	2728	54.56	56.54	68.53
R ₈	7.60	13.00	2900	2400	0.58	0.93	5300	0.15	14.10	3102	62.04	58.53	70.94
R ₉	7.90	14.00	3000	2550	0.58	0.89	5550	0.16	15.00	3300	66.00	59.46	72.07
R ₀	5.60	3.50	1000	450	0.27	0.62	1450	0.08	0.00	0		0.00	0.00
R ₁	5.40	4.00	1100	550	0.31	0.71	1650	0.08	0.90	198	3.96	24.51	29.70
R ₂	5.85	4.40	1300	750	0.34	0.91	2050	0.08	2.70	598	11.96	36.67	44.44
R ₃	6.00	5.50	1500	975	0.38	0.92	2475	0.09	4.40	968	19.36	44.39	53.81
R ₄	6.35	6.60	1750	1200	0.42	0.83	2950	0.10	6.20	1364	27.28	49.62	60.15
R ₅	6.40	7.80	1950	1450	0.46		3400	0.10	8.00	1760	35.20	53.49	64.84
R ₆	6.85	9.35	2200	1725	0.49	0.82	3925	0.11	9.80	2156	43.12	55.52	67.30
R ₇	7.10	10.60	2400	1950	0.51	0.91	4350	0.13	11.50	2530	50.60	56.54	68.53
R ₈	7.35	12.00	2750	2250	0.57	0.89	5000	0.14	13.30	2926	58.52	58.53	70.94
R ₉	7.90	14.00	3000	2550	0.58	0.89	5550	0.16	15.00	3300	66.00	59.46	72.07

ตารางที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

$V_s = 220$ volt ; $V_r = 110$ volt ; $w_r = 3000$ rpm ; $V_a = 220$ Vdc.

No.2	I_s	I_r	P_s	P_r	$\cos\theta_s$	$\cos\theta_r$	P_m	I_r	I_L	P_{out}	T_{shat}	eff_s	eff_m
R ₀	5.65	2.00	950	425	0.25	0.64	1375	0.08	0.00	0		0.00	0.00
R ₁	5.90	3.60	1100	600	0.28	0.73	1700	0.09	1.80	396	7.92	23.29	28.24
R ₂	5.80	4.60	1300	750	0.34	0.85	2050	0.09	3.10	682	13.64	33.27	40.33
R ₃	6.10	5.80	1600	1000	0.40	0.88	2600	0.10	4.90	1078	21.56	41.46	50.26
R ₄	6.60	7.00	1850	1250	0.42	0.91	3100	0.10	6.60	1452	29.04	46.84	56.77
R ₅	6.45	8.20	2050	1500	0.48	0.72	3550	0.11	8.40	1848	36.96	52.06	63.10
R ₆	7.00	9.50	2250	1700	0.49	0.77	3950	0.12	9.60	2112	42.24	53.47	64.81
R ₇	7.10	10.30	2400	1925	0.51	0.94	4325	0.13	11.0	2420	48.4	55.95	67.82
R ₈	7.55	12.00	2650	2175	0.53	0.94	4825	0.14	12.80	2816	56.32	53.36	70.74
R ₉	7.50	13.20	2900	2450	0.49	0.91	5350	0.15	14.60	3212	64.24	60.04	72.77
R ₁₀	7.90	14.70	3200	2750	0.61	0.85	5950	0.16	16.30	3586	71.72	60.27	73.05
R ₀	5.40	3.00	900	450	0.25	0.75	1350	0.08	0.00	0		0.00	0.00
R ₁	5.60	4.10	1200	700	0.32	0.71	1900	0.09	2.20	484	9.68	25.47	30.88
R ₂	5.90	5.10	1400	900	0.36	0.76	2300	0.09	4.00	880	17.6	38.26	46.38
R ₃	6.00	6.30	1600	1175	0.40	0.83	2775	0.10	5.70	1254	25.08	45.19	54.77
R ₄	6.30	7.60	1850	1375	0.44	0.85	3225	0.10	7.50	1650	33.00	51.16	62.02
R ₅	6.60	9.00	2100	1650	0.48	0.84	3750	0.11	9.30	2046	40.92	54.56	66.13
R ₆	6.80	10.20	2300	1900	0.51	0.92	4200	0.12	11.00	2420	48.40	57.62	69.84
R ₇	7.00	11.60	2600	2200	0.56	0.91	4800	0.14	12.80	2816	56.32	58.67	71.11
R ₈	7.50	13.00	2900	2450	0.59	0.92	5350	0.15	14.60	3212	64.24	60.04	72.77
R ₉	7.90	14.70	3200	2750	0.61	0.85	5950	0.16	16.30	3586	71.72	60.27	73.05

ตารางที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

$V_s = 220 \text{ volt}$; $V_r = 110 \text{ volt}$; $w_r = 3000 \text{ rpm}$; $V_a = 220 \text{ Vdc}$.

No.3	I_s	I_r	P_s	P_r	$\cos\theta_s$	$\cos\theta_r$	P_{in}	I_r	I_L	P_{out}	T_{shaft}	eff_s	eff_m
R ₀	5.70	2.00	950	425	0.25	0.58	1375	0.08	0.00	0		0.00	0.00
R ₁	6.20	4.00	1200	650	0.29	0.71	1850	0.09	2.20	484	9.68	26.16	37.71
R ₂	6.20	5.10	1400	900	0.34	0.78	2300	0.10	4.00	880	17.60	38.26	46.38
R ₃	6.20	6.50	1600	1125	0.39	0.92	2725	0.10	5.80	1276	25.52	46.83	56.76
R ₄	6.50	7.90	1800	1375	0.42	0.92	3175	0.10	7.50	1650	33.00	51.97	62.99
R ₅	6.60	9.10	2100	1625	0.48	0.86	3725	0.11	9.30	2046	40.92	54.93	66.58
R ₆	6.90	10.45	2300	1900	0.51	0.86	4200	0.12	11.00	2420	48.40	57.62	69.84
R ₇	7.10	11.90	2600	2175	0.55	0.86	4775	0.13	12.80	2816	56.32	58.97	71.48
R ₈	7.50	13.40	2850	2450	0.58	0.92	5300	0.15	14.60	3212	64.24	60.60	73.46
R ₉	7.70	14.20	3000	2600	0.59	0.91	5600	0.16	15.40	3388	67.76	60.50	73.33
R ₀	5.50	2.00	850	425	0.23	0.54	1275	0.08	0.00	0		0.00	0.00
R ₁	5.50	3.20	900	600	0.24	0.66	1500	0.08	1.40	308	6.16	20.53	24.89
R ₂	5.70	4.70	1200	800	0.32	0.68	2000	0.09	3.10	682	13.64	34.10	41.33
R ₃	5.80	5.70	1300	1050	0.34	0.73	2350	0.09	4.90	1078	21.56	45.87	55.60
R ₄	6.00	7.00	1500	1250	0.38	0.80	2750	0.10	6.60	1452	29.04	52.80	64.00
R ₅	6.30	8.20	1800	1500	0.43	0.82	3300	0.11	8.40	1848	36.96	56.00	67.88
R ₆	6.60	9.50	2050	1750	0.47	0.90	3800	0.12	10.10	2222	44.44	58.47	70.88
R ₇	6.85	11.00	2450	2025	0.54	0.87	4475	0.13	11.90	2618	52.36	58.50	70.91
R ₈	7.30	12.50	2700	2300	0.56	0.86	5000	0.14	13.60	2992	59.84	59.84	72.53
R ₉	7.70	14.20	3000	2600	0.59	0.91	5600	0.16	15.40	3388	67.76	60.50	67.76

ตารางที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

$V_s = 2200$ volt ; $V_r = 110$ volt ; $w_r = 3000$ rpm ; $V_a = 220$ Vdc.

No.4	I_s	I_r	P_s	P_r	$\cos\theta_s$	$\cos\theta_r$	P_{in}	I_f	I_L	P_{out}	T_{shaft}	eff_s	eff_m
R ₀	5.60	1.90	800	425	0.22	0.56	1225	0.08	0.00	0		0.00	0.00
R ₁	5.80	4.00	1000	650	0.26	0.71	1650	0.09	2.20	484	9.68	29.33	35.56
R ₂	5.90	5.10	1200	900	0.31	0.76	2100	0.10	4.00	880	17.60	41.90	50.79
R ₃	6.10	6.70	1450	1125	0.36	0.76	2575	0.10	5.70	1254	25.08	48.70	59.03
R ₄	6.20	7.80	1650	1375	0.40	0.82	3025	0.11	7.50	1650	33.00	54.55	66.12
R ₅	6.50	9.20	1900	1650	0.44	0.82	3550	0.12	9.30	2046	40.92	57.63	69.86
R ₆	7.05	11.30	2350	2025	0.51	0.87	4375	0.13	11.90	2618	52.36	59.84	72.53
R ₇	7.40	13.00	2600	2325	0.53	0.85	4925	0.14	13.70	3014	60.28	61.20	74.18
R ₈	7.70	14.20	2950	2600	0.58	0.86	5550	0.16	15.40	3388	67.76	61.05	73.99
R ₀	5.30	3.00	800	400	0.23	0.64	1200	0.08	0.00	0		0.00	0.00
R ₁	5.50	3.50	900	575	0.25	0.78	1475	0.08	1.40	308	6016	20.88	25.31
R ₂	5.70	4.70	1150	775	0.31	0.74	1925	0.09	3.10	682	13.64	35.43	42.94
R ₃	5.95	5.90	1350	1000	0.34	0.73	2350	0.09	4.90	1078	21.56	45.87	55.60
R ₄	6.10	7.00	1600	1250	0.40	0.78	2850	0.10	6.60	1452	29.04	50.95	61.75
R ₅	6.40	8.60	1850	1500	0.44	0.77	3350	0.10	8.40	1848	36.96	55.16	66.87
R ₆	6.45	9.15	1950	1650	0.46	0.79	3600	0.11	9.30	2046	40.92	56.83	68.89
R ₇	6.75	10.40	2200	1900	0.49	0.85	4100	0.12	11.00	2420	48.40	59.02	71.54
R ₈	7.20	12.60	2600	2300	0.55	0.85	4900	0.14	13.60	2992	59.84	61.06	74.01
R ₉	7.70	14.20	2950	2600	0.58	0.86	5550	0.16	15.40	3388	67.76	61.05	73.99

ตารางที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

$V_s = 220$ volt ; $V_r = 110$ volt ; $w_r = 3000$ rpm ; $V_a = 220$ Vdc.

No.5	I_s	I_r	P_s	P_r	$\cos\theta_s$	$\cos\theta_r$	P_{in}	I_r	I_L	P_{out}	T_{shat}	eff_s	eff_m
R ₀	4.70	7.10	950	500	0.31	0.45	1450	0.08	0.00	0		0.00	0.00
R ₁	5.00	6.70	1150	675	0.35	0.69	1825	0.09	1.80	396	7.92	21.70	26.30
R ₂	5.30	6.50	1350	875	0.39	0.80	2225	0.09	3.50	770	15.40	34.61	41.95
R ₃	5.60	6.70	1600	1100	0.43	0.91	2700	0.10	5.30	1166	23.32	43.19	52.35
R ₄	6.00	7.40	1800	1325	0.45	0.96	3125	0.10	7.10	1562	31.24	49.98	60.59
R ₅	6.35	8.50	2050	1575	0.49	0.83	3625	0.11	8.80	1936	38.72	53.41	64.74
R ₆	6.60	9.20	2200	1700	0.51	0.98	3900	0.12	9.60	2112	42.24	54.15	65.64
R ₇	7.00	10.60	2400	1850	0.52	0.83	4250	0.12	11.40	2508	50.16	59.01	71.53
R ₈	7.50	12.50	2700	2250	0.55	0.93	4950	0.14	13.20	2906	58.12	58.67	71.11
R ₉	8.20	14.40	3000	2550	0.55	0.92	5550	0.15	14.50	3190	63.80	57.48	69.67
R ₀	4.80	7.10	1000	620	0.32	0.53	1620	0.08	0.00	0		0.00	0.00
R ₁	5.00	6.60	1200	700	0.36	0.52	1900	0.08	1.80	396	7.92	20.84	25.26
R ₂	5.15	6.40	1300	850	0.38	0.67	2150	0.08	2.60	572	11.44	26.60	32.25
R ₃	5.45	6.50	1500	1000	0.42	0.73	2500	0.09	4.40	968	19.36	38.72	46.93
R ₄	5.80	7.00	1750	1200	0.46	0.87	2950	0.09	6.20	1364	27.28	46.24	56.05
R ₅	6.15	7.80	1900	1450	0.47	0.74	3350	0.10	7.90	1738	34.76	51.88	62.89
R ₆	6.60	9.20	2200	1700	0.51	0.98	3900	0.11	9.60	2112	42.24	54.15	65.64
R ₇	7.00	10.70	2450	1975	0.53	0.57	4425	0.12	11.50	2530	50.60	57.18	69.30
R ₈	7.55	12.40	2700	2275	0.54	0.47	4975	0.14	13.20	2904	58.08	58.37	70.75
R ₉	8.20	14.40	3000	2550	0.55	0.42	5550	0.15	14.50	3190	63.80	57.48	69.67

ตารางที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

$V_s = 220$ volt ; $V_r = 110$ volt ; $w_r = 3000$ rpm ; $V_a = 220$ Vdc.

No.6	I_s	I_r	P_s	P_r	$\cos\theta_s$	$\cos\theta_r$	P_{in}	I_r	I_L	P_{out}	T_{shaft}	eff_s	eff_m
R ₀	4.75	6.65	1000	500	0.32	0.37	1500	0.08	0.00	0		0.00	0.00
R ₁	5.00	6.20	1200	650	0.36	0.54	1850	0.09	1.75	385	7.70	20.81	25.23
R ₂	5.40	6.10	1400	850	0.39	0.67	2250	0.09	3.50	770	15.4	34.22	41.48
R ₃	5.75	6.50	1600	1075	0.42	0.80	2675	0.10	5.30	1166	23.32	43.59	52.83
R ₄	6.15	7.40	1850	1300	0.46	0.86	3150	0.10	7.05	1551	31.02	49.24	59.68
R ₅	6.60	8.70	2100	1550	0.48	0.96	3650	0.11	8.80	1936	38.72	53.04	64.29
R ₆	7.10	10.40	2350	1800	0.50	0.77	4150	0.12	10.60	2332	46.64	56.19	68.11
R ₇	7.70	12.20	2650	2100	0.52	0.94	4750	0.13	12.40	2728	54.56	57.43	69.61
R ₈	8.40	15.00	3000	2425	0.54	0.88	5425	0.14	14.10	3102	62.04	57.18	69.31
R ₀	4.80	6.25	900	500	0.28	0.58	1400	0.08	0.00	0		0.00	0.00
R ₁	5.00	6.10	1100	675	0.33	0.53	1775	0.08	1.70	374	7.48	21.07	25.54
R ₂	5.40	6.00	1350	875	0.38	0.82	2225	0.09	3.50	770	15.40	34.61	41.95
R ₃	5.90	6.40	1650	1100	0.42	0.70	2750	0.09	5.20	1144	22.88	41.60	50.42
R ₄	6.30	7.40	1900	1350	0.46	0.85	3250	0.10	6.70	1474	29.48	45.35	54.97
R ₅	6.65	8.80	2100	1575	0.48	0.91	3675	0.11	8.80	1936	38.72	52.68	63.85
R ₆	7.20	10.20	2400	1850	0.51	0.94	4250	0.12	10.50	2310	46.20	54.35	65.88
R ₇	7.70	12.10	2650	2100	0.52	0.87	4750	0.13	12.40	2728	54.56	57.43	69.61
R ₈	8.40	15.00	3000	2425	0.54	0.88	5425	0.14	14.10	3102	62.04	57.18	69.31

ตารางที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

$V_s = 220$ volt ; $V_r = 110$ volt ; $w_r = 3000$ rpm ; $V_a = 220$ Vdc.

No.7	I_s	I_r	P_s	P_r	$\cos\theta_s$	$\cos\theta_r$	P_{in}	I_r	I_L	P_{out}	T_{shaft}	eff_s	eff_m
R ₀	5.10	6.00	1100	475	0.33	0.33	1575	0.08	0.00	0		0.00	0.00
R ₁	5.40	5.70	1300	650	0.39	0.57	1950	0.09	1.80	396	7.92	20.31	24.62
R ₂	5.80	5.70	1500	850	0.42	0.64	2350	0.09	3.50	770	15.40	32.77	39.72
R ₃	6.20	6.20	1700	1075	0.47	0.87	2775	0.09	5.30	1166	23.32	42.02	50.93
R ₄	6.50	6.20	2000	1300	0.48	0.90	3300	0.10	7.05	1551	31.02	47.00	56.97
R ₅	6.90	8.40	2200	1550	0.51	0.93	3750	0.11	8.80	1936	38.72	51.63	62.58
R ₆	7.40	10.20	2500	1825	0.51	0.97	4325	0.12	10.60	2332	46.64	53.92	65.36
R ₇	7.80	12.20	2600	2100	0.51	0.91	4700	0.13	12.40	2728	54.56	58.04	70.35
R ₈	8.50	15.00	2950	2450	0.53	0.85	5400	0.14	14.20	3124	62.48	57.85	70.12
R ₉	9.00	16.80	3200	2700	0.54	0.85	5900	0.15	14.80	3256	65.12	55.19	66.89
R ₀	4.90	5.80	1000	500	0.31	0.36	1575	0.08	0.00	0		0.00	0.00
R ₁	5.10	5.40	1150	675	0.34	0.56	1950	0.09	1.80	396	7.92	21.70	26.30
R ₂	5.45	5.50	1350	875	0.38	0.63	2350	0.09	3.50	792	15.84	35.60	43.15
R ₃	5.80	6.10	1600	1100	0.42	0.84	2775	0.09	5.30	1166	23.32	43.19	52.35
R ₄	6.30	7.20	1800	1325	0.43	0.83	3300	0.10	7.05	1540	30.80	49.28	59.73
R ₅	6.60	8.60	2050	1575	0.47	0.96	3750	0.11	8.80	1848	36.96	50.98	61.79
R ₆	7.10	10.20	2300	1850	0.49	0.91	4325	0.12	10.60	2332	46.64	56.19	68.11
R ₇	7.80	12.10	2650	2125	0.51	1.00	4700	0.13	12.40	2728	54.56	57.13	69.25
R ₈	8.40	14.40	2900	2425	0.52	0.91	5400	0.14	14.20	3102	62.04	58.25	70.61
R ₉	9.00	16.80	3200	2700	0.54	0.85	5900	0.15	14.80	3256	65.12	55.19	66.89

ตารางที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์พันด้วยขดลวด สามารถนำมาใช้งานในลักษณะมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ โดยมีกำลังเอาต์พุตเพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่าของกำลังเอาต์พุตเมื่อใช้งานลักษณะมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติ อีกทั้งความเร็วการหมุนของโรเตอร์ในระบบป้อนกำลังไฟคู่เป็น 2 เท่าของความเร็วซิงโครนัส โดยมีความสัมพันธ์ของกำลังเอาต์พุต แรงบิดที่เพลลา และความเร็วการหมุนโรเตอร์เป็นไปตามสมการ 9.1

$$P_{o/p} = T_{\text{shaft}} \omega_m$$

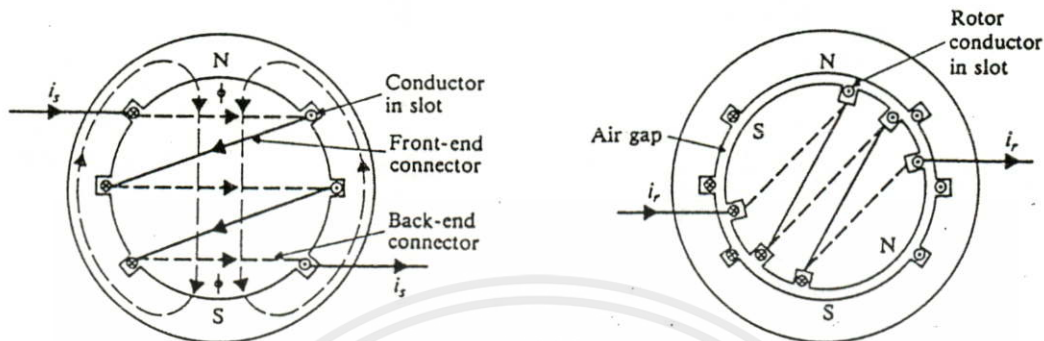
..... 9.1

สิ่งที่น่าสนใจในการวิเคราะห์คือ พฤติกรรมการสร้างแรงบิดที่เพลลาซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าที่เครื่องจักรสร้างขึ้น และความเร็วการหมุนโรเตอร์ว่ามีความสัมพันธ์กับการสร้างแรงบิดอย่างไร การวิเคราะห์เราจึงเริ่มจากหลักการพื้นฐานของการสร้างแรงบิด และความเร็วการหมุนของเครื่องจักร ที่มีโครงสร้างทรงกระบอกด้านสเตเตอร์ และด้านโรเตอร์ เพื่อง่ายต่อความเข้าใจจึงเริ่มจากเครื่องจักร 1-เฟส

9.1 เครื่องจักรโครงสร้างทรงกระบอก

เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์พันด้วยขดลวดที่ใช้ในการทดลอง มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอกทั้งด้านสเตเตอร์ และโรเตอร์ การพิจารณาการสร้างแรงบิด และความเร็วของการหมุนจึงนำเครื่องจักรทรงกระบอกมาวิเคราะห์ สมการ 6.1 เป็นสมการแรงบิดหลักมูลของเครื่องแปรรูปพลังงานไฟฟ้ากลศาสตร์ เทอมที่ 1 และ 2 ทางด้านขวาของสมการ คือ แรงบิดรีลัคแตนซ์ (reluctance torque) ความหมายของแรงบิดรีลัคแตนซ์บอกว่าเครื่องจักรที่อาศัยความต้านทานแม่เหล็กในการสร้างแรงบิด และแปรรูปพลังงานต้องทำงานที่ความเร็วซิงโครนัส ถ้าแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าของสเตเตอร์ กับโรเตอร์มีความถี่ต่างกัน ทำให้เครื่องจักรเกิดความเร็วซิงโครนัสสองค่าซึ่งแตกต่างกันเนื่องจากแรงบิดรีลัคแตนซ์ 2 เทอม มีเพียงหนึ่งในสองของความเร็วซิงโครนัสจะให้แรงบิดที่เหมาะสม ในขณะที่แรงบิดอีกเทอมหนึ่งทำให้เกิดความเร็วซึ่งทำให้เครื่องจักรไม่มีเสถียรภาพ ด้วยเหตุนี้หากต้องการความหลากหลายทางความเร็วการทำงานของเครื่องจักร จึงจำเป็นต้องกำจัดเทอมแรงบิดรีลัคแตนซ์ออกอย่างน้อยหนึ่งเทอม หรือทั้งสองเทอม และให้ความสนใจไปยังเทอมความเหนี่ยวนำร่วม แรงบิดรีลัคแตนซ์จะไม่เกิดขึ้น ถ้าเดริเวทิฟ ความเหนี่ยวนำตัวเองเทียบกับเวลาเป็นศูนย์ หมายความว่าความเหนี่ยวนำตัวเองต้องคงที่ เมื่อเครื่องจักรเกิดการหมุน แต่ถ้าเราไปสังเกตการณ์บนจุดใดจุดหนึ่งบนพื้นผิวสเตเตอร์ หรือ โรเตอร์ จะต้องไม่พบความเปลี่ยนแปลงของช่องอากาศโครงสร้างที่สอดคล้องกับเงื่อนไข คือทรงกระบอก หากต้องการให้ความเหนี่ยวนำตัวเองของโรเตอร์คงที่ สเตเตอร์ต้องมี

โครงสร้างเป็นทรงกระบอก ทำให้ $dL_r/d\theta = 0$ ในทำนองเดียวกันหากต้องการให้ความเหนี่ยวนำตัวเองของสเตเตอร์คงที่ โครงสร้างของโรเตอร์ต้องเป็นทรงกระบอกเช่นกัน ทำให้ $dL_{sr}/d\theta = 0$ ตามรูป 9.1 แสดงโครงสร้างทรงกระบอกทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์

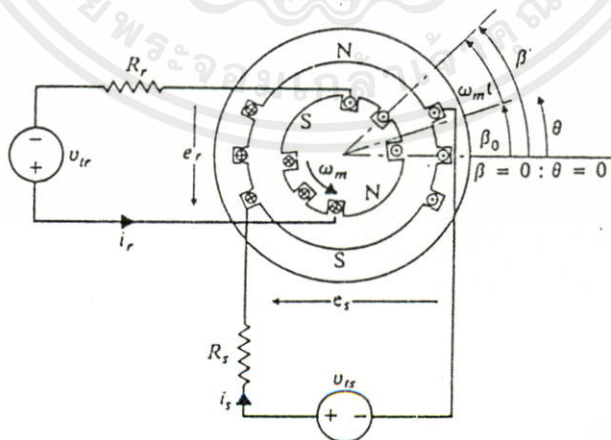


รูป 9.1 ก) โครงสร้างสเตเตอร์ทรงกระบอก ข) โรเตอร์ทรงกระบอกในสเตเตอร์ทรงกระบอก[7]

สมการแรงบิดของเครื่องจักรที่มีโครงสร้างสเตเตอร์ กับโรเตอร์ต่างก็เป็นทรงกระบอก ลดรูปเหลือเพียงเทอมความเหนี่ยวนำร่วม

$$T = i_s i_r \frac{dL_{sr}}{d\theta}$$

.....9.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 9.2 การสร้างแรงบิดของเครื่องจักรทรงกระบอก [7]

ตามรูป 9.2 เป็นลักษณะการสร้างแรงบิดของเครื่องจักร 1-เฟส ซึ่งจะให้ผลของแรงบิดเหมือนกับที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 7.3 กล่าวคือ ถ้ามีการกระตุ้นชุดขดลวดสเตเตอร์ กับโรเตอร์จะได้สมการแรงบิดเป็นไปตามสมการ 7.18 [7]

$$T = -\frac{I_s I_r M}{4} \begin{bmatrix} \sin\{(w_m + (w_s + w_r))t + \alpha + \beta\} \\ + \sin\{(w_m - (w_s + w_r))t - \alpha + \beta\} \\ + \sin\{(w_m + (w_s - w_r))t - \alpha + \beta\} \\ + \sin\{(w_m - (w_s - w_r))t + \alpha + \beta\} \end{bmatrix} \quad \dots 9.3$$

ตามสมการ 9.3 เครื่องจักร 1-เฟส จะสามารถสร้างแรงบิดเฉลี่ยเมื่อความเร็วเชิงมุมมีความสัมพันธ์ตามสมการ [7]

$$w_m = \pm (w_s \pm w_r) \quad \dots 9.4$$

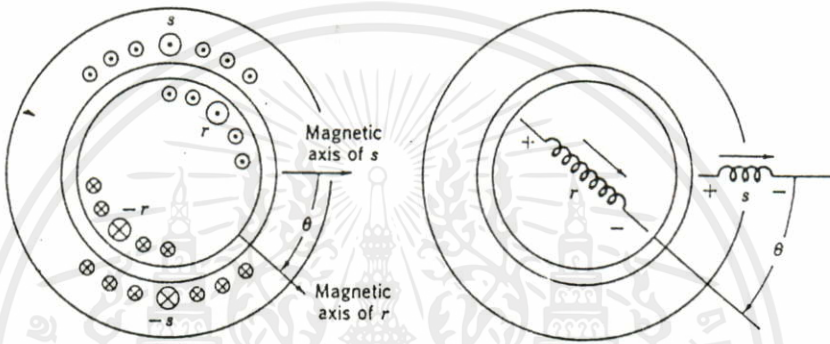
แต่ละเงื่อนไขของความเร็วเชิงมุมที่ให้ผลสอดคล้องกับสมการ 9.4 สามารถสร้างแรงบิดเฉลี่ยและเกิดการแปรรูปพลังงาน พิจารณาสมการ 9.3 ยกเว้นกรณีการทำงานของเครื่องจักร 1-เฟส ในลักษณะตัวขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง (dc rotary actuator) แรงบิดที่สร้างขึ้นที่เวลาต่างกันไม่เท่ากันเนื่องจากเทอมไซน์ซายด์ แรงบิดที่ได้ไม่คงที่มีการแกว่งซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่พึงปรารถนาในมอเตอร์ หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพราะอาจทำให้เกิดการแกว่งของความเร็ว การสั่นสะเทือนเสียงรบกวน และการสูญเสียพลังงาน ผลสืบเนื่องที่ตามมาคือ การแกว่งของกำลังงานจากการแปรรูปพลังงานตามรูป 9.2 ดังนั้นการแกว่งของพลังงานเป็นลักษณะของระบบที่ถูกกระตุ้นโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 1-เฟส ซึ่งสามารถปรับปรุงแก้ไขโดยอาศัยแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหลายเฟส ที่ให้การแปรรูปพลังงานคงที่ในระบบสมดุล โดยเราจะทำความเข้าใจในหัวข้อต่อไปว่า ระบบกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหลายเฟสสามารถให้แรงบิดคงที่ได้หรือไม่ [6],[7]

9.2 การสร้างแรงบิดของเครื่องจักรทรงกระบอก

ในตอนท้ายของหัวข้อ 9.1 ได้กล่าวถึงแนวทางแก้ไขการแกว่งของพลังงานจากการแปรรูปพลังงาน โดยอาศัยกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหลายเฟสป้อนให้กับเครื่องจักรชุดขดลวดหลายเฟส เพื่อสร้างแรงบิดคงที่ เราพิจารณาศึกษาการสร้างแรงบิดออกเป็น 2 ลักษณะซึ่งอยู่บนหลักการพื้นฐานเดียวกัน

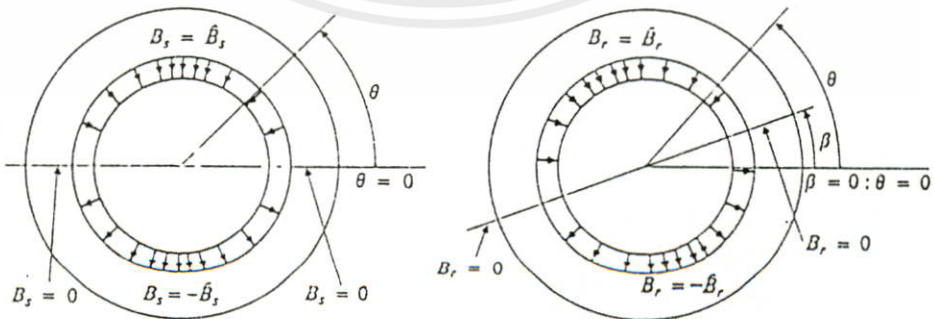
ลักษณะแรกมองเครื่องจักรพิจารณาเชิงไฟฟ้า ซึ่งมีความเหนี่ยวนำร่วมกับตำแหน่งมุมของ โรเตอร์ โดยเขียนเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวขดลวด และพลังงานสนามเทียบสะสมในช่องอากาศในรูปของกระแส กับความเหนี่ยวนำ แรงบิดหาได้จากการเดริเวทิฟพลังงานสนามเทียบต่อตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์

ลักษณะที่สองเรามองเครื่องจักรในลักษณะของชุดขดลวด 2 ชุด ซึ่งสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นในช่องอากาศเมื่อถูกกระตุ้นด้วยกำลังไฟฟ้า ชุดขดลวดหนึ่งอยู่บนสเตเตอร์ และชุดขดลวดหนึ่งอยู่บนโรเตอร์ อาศัยข้อกำหนดที่เหมาะสมของสนามแม่เหล็ก เราสามารถหาเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง และพลังงานสะสมในช่องอากาศในรูปสนามแม่เหล็ก แรงบิดถูกสร้างขึ้นเพื่อทำให้สนามแม่เหล็กเนื่องจากชุดขดลวดสเตเตอร์ และโรเตอร์เข้ามาอยู่แนวเดียวกัน เหมือนกับการจัดเรียงตัวเองของแม่เหล็กถาวร มุมมองการสร้างแรงบิดแบบนี้นำไปสู่ลักษณะทางกายภาพอย่างง่ายของพฤติกรรมเครื่องจักรชนิดหมุนที่สภาวะคงตัว



ก) ชุดขดลวดแบบกระจาย ข) ภาพแทนแสดงทางไฟฟ้า

รูป 9.3 เครื่องจักร 2 ขั้ว ช่องอากาศสม่ำเสมอ[6]



ก) สเตเตอร์

ข) โรเตอร์

รูป 9.4 การกระจายแบบไซนูซอยด์ของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศ[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.2.1 the couple-circuit viewpoint

พิจารณาเครื่องจักรดังรูป 9.3 ชุดขดลวดหนึ่งอยู่บนสเตเตอร์ ส่วนอีกชุดขดลวดหนึ่งอยู่บนโรเตอร์ การพันชุดขดลวดกระจายทุกสล็อตในลักษณะไขว้กัน ดังนั้นรูปคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กประมาณได้เป็นไขว้กันตามรูป 9.3 ก ด้านขดลวด s-s กับ r-r เป็นตำแหน่งแนวศูนย์กลางของตัวนำที่ประกอบขึ้นเป็นชุดขดลวดแบบกระจาย เราอาจเขียนรูป 9.3 ก แทนได้ด้วยรูป 9.3 ข ซึ่งแสดงทิศทางการกระแส และแรงดันไว้ด้วย กระแสไฟฟ้าสร้างสนามแม่เหล็กในช่องอากาศตามทิศทางลูกศรดังแสดงได้ด้วยรูป 9.4 [6]

การพิจารณาแรงบิดลักษณะนี้ได้เคยศึกษามาแล้ว

$$w_{fld} = \frac{1}{2}L_{ss}i_s^2 + \frac{1}{2}L_{rr}i_r^2 + M i_s i_r \cos \theta \quad \dots 9.5$$

L_{ss}, L_{rr} : มีค่าคงที่

$$L_{sr} = M \cos \theta$$

$$T = \frac{\partial w_{fld}}{\partial \theta} = \frac{\partial w_{fld}}{\partial \theta} \frac{d\theta}{d\theta} \quad \dots 9.6$$

$$T = -M i_s i_r \sin \theta \quad \dots 9.7$$

กรณีเครื่องจักร P-ขั้ว

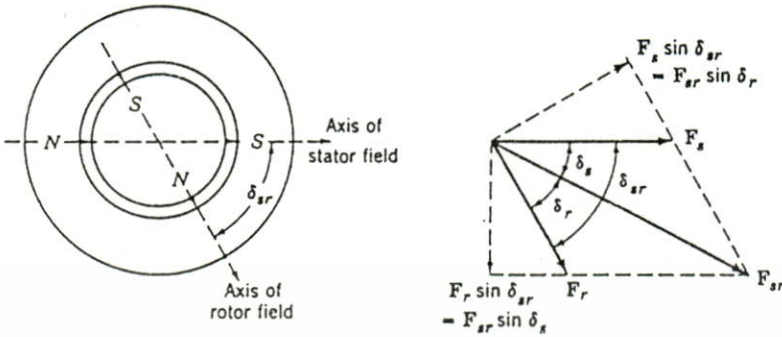
$$T = -\frac{P}{2} M i_s i_r \sin \theta = -\frac{P}{2} M i_s i_r \sin \frac{P}{2} \theta_m \quad \dots 9.8$$

การพิจารณาแรงบิดในมุมมองนี้จะมีเทอมของกระแสติดอยู่ในสมการ ถ้าหากเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ แรงบิดที่สร้างขึ้นในเครื่องจักร 1-เฟส ไม่คงที่ ถ้าหากเป็นระบบหลายเฟส การพิจารณาแรงบิดในเทอมของกระแสก็ไม่สามารถบอกได้ว่า แรงบิดที่สร้างมีลักษณะคงที่อย่างไร

9.2.2 the magnetic field viewpoint

ในหัวข้อ 9.2.1 เราพิจารณาคุณสมบัติของเครื่องจักรเชิงไฟฟ้า ในรูปความเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้า สมการแรงบิดที่ได้ให้ความเข้าใจต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรน้อยมาก ในส่วนของหัวข้อนี้เราพิจารณาแรงบิดเชิงแม่เหล็ก กระแสในชุดขดลวดของเครื่องจักรสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นในช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์ กับโรเตอร์ ทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กครบรอบวงโดยสมบูรณ์ผ่านทางสเตเตอร์กับโรเตอร์ สภาวะแบบนี้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับการปรากฏของขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์ และโรเตอร์ตามแนวของแกนแม่เหล็กแสดงดังรูป 9.5 ก สำหรับเครื่องจักร 2-ขั้ว ที่มีช่องอากาศสม่ำเสมอ แรงบิดถูกสร้างขึ้นเพื่อทำให้สนามแม่เหล็กสองสนามเข้ามา

อยู่แนวแกนแม่เหล็กแกนเดียวกัน แรงบิดเป็นสัดส่วนกับผลของแอมพลิจูดจากคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์ กับโรเตอร์ อีกทั้งเป็นฟังก์ชันของมุม δ_{sr} ระหว่างแกนแม่เหล็กทั้งสอง[6]



ก) โมเดล ข) เวกเตอร์ mmf

รูป 9.5 เครื่องจักร 2-ขั้ว[6]

เกือบทั้งหมดของเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากชุดขดลวดสเตเตอร์กับโรเตอร์จะผ่านช่องอากาศ และคล้อยชุดขดลวดทั้งสองเป็นเส้นแรงแม่เหล็กร่วม (mutual flux) ในการวิเคราะห์เชิงแม่เหล็ก จากเส้นแรงแม่เหล็กเราต้องหาพลังงานสนามเทียบที่สะสมในช่องอากาศในรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็กสเตเตอร์กับโรเตอร์ เมื่อหาพลังงานสนามเทียบได้เราก็สามารถหาแรงบิดได้ [6]

กำหนดให้ส่วนประกอบตามแนวสัมผัสของสนามแม่เหล็กในช่องอากาศ สามารถตัดทิ้งไปได้เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนประกอบตามแนวรัศมี กล่าวอีกนัยหนึ่งเส้นแรงแม่เหล็กร่วมผ่านช่องอากาศโดยตรง และกำหนดอีกว่าความยาวตามแนวรัศมี g (ระยะระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์) มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับรัศมีของโรเตอร์หรือสเตเตอร์ ด้วยข้อกำหนดนี้เราสามารถตัดความแตกต่างระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กที่ผิวโรเตอร์ หรือสเตเตอร์ไปได้ สนามแม่เหล็กในช่องอากาศคิดเฉพาะ H หรือ B ตามแนวรัศมี ความเข้มแปรตามมุมเส้นรอบวง [6]

$$H_g = F_{sr} \quad \dots 9.9$$

F หมายถึงแรงเคลื่อนแม่เหล็กลักษณะคลื่นตามฟังก์ชันของมุมโดยรอบเส้นรอบวง รูปคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์กับโรเตอร์มีความสัมพันธ์กับไซน์ของมุมเฟสระหว่างแกนแม่เหล็กทั้งสอง (δ_{sr} มุมทางไฟฟ้า) เราสามารถเขียนเวกเตอร์ F_s กับ F_r ตามแกนแม่เหล็กของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กสเตเตอร์กับโรเตอร์ ตามรูป 9.5 ข ผลลัพธ์แรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองเขียนด้วยเวกเตอร์ F_{sr} ซึ่งกระทำในช่องอากาศ [6]

$$F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos \delta_{sr} \quad \dots 9.10$$

$$H_{peak} = F_{sr}/g \quad \dots 9.11$$

เมื่อ F เป็นค่าสูงสุดของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

พิจารณาพลังงานสนามเทียบสะสมในช่องอากาศ ความหนาแน่นพลังงานสนามแม่เหล็กเทียบที่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก H มีค่า $(\mu_0/2)H^2$ ความหนาแน่นพลังงานสนามเทียบเฉลี่ยตามปริมาตรของช่องอากาศเป็น $\mu_0/2$ คูณค่าเฉลี่ยของ H^2 และค่าเฉลี่ยของไซน์เป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด[6]

$$\text{Average Co-energy Density} = \frac{\mu_0}{2} \frac{H_{peak}^2}{2} = \frac{\mu_0}{4} \frac{F_{sr}^2}{g^2} \quad \dots 9.12$$

$$\text{The Total Co-energy} = w_{fld}$$

$$w_{fld} = (\text{average co-energy density}) (\text{volume of air gap})$$

กำหนด

D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของช่องอากาศ

l ความยาวตามแกนของช่องอากาศ

g ระยะช่องอากาศ

μ_0 ความซึมซาบได้ในอากาศ

$$w_{fld} = \frac{\mu_0 F_{sr}^2}{4g^2} Dlg = \frac{\mu_0 D l F_{sr}^2}{4g} \quad \dots 9.13$$

จากสมการ 9.10 พลังงานสนามเทียบในช่องอากาศสามารถเขียนในเทอมของค่าสูงสุดของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กสแตเตอร์กับโรเตอร์ และมุมเฟสระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสอง [6]

$$w_{fld} = \frac{\mu_0 D l}{4g} [F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos \delta_{sr}] \quad \dots 9.14$$

กรณีเครื่องจักร 2-ขั้ว[6]

$$T = \frac{\partial w_{fld}}{\partial \delta_{sr}} = -\frac{\mu_0 D l}{2g} F_s F_r \sin \delta_{sr} \quad \dots 9.15$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่อนุญาตให้นำไปตีพิมพ์อื่น อีเมลล์ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีเครื่องจักร P-ขั้ว[6]

$$T = -\frac{P \mu_0 D l}{2g} F_s F_r \sin \delta_{sr} \quad \dots 9.16$$

สมการแรงบิด 9.16 บอกให้เราทราบว่าแรงบิดขึ้นกับค่าสูงสุดของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก F_s กับ F_r และไซนซ์ของมุมทางไฟฟ้า δ_{sr} เครื่องหมายลบบอกถึงการพยายามจัดแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองให้อยู่แนวเดียวกัน เปรียบเทียบสมการ 9.7 กับ 9.15 เราทราบว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้า จากจุดนี้ชี้ให้เห็นว่าการหาแรงบิดทั้งสองลักษณะให้ผลสอดคล้องกัน จากสมการ 9.15 หากเราใช้เครื่องจักร 3-เฟส ป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3-เฟส ที่สมดุลย์จะสามารถสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนขนาดคงที่ถึงแม้ว่ากระแสจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาทำให้สามารถสร้างแรงบิดคงที่ขึ้นได้ [6]

9.3 เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับหลายเฟส

เครื่องจักรที่อาศัยการกระตุ้นจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ หรือเกิดไฟฟ้ากระแสสลับโดยตัวของมันเอง เราเรียกว่าเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ (alternating-current machine) เงื่อนไขการสร้างแรงบิดคงที่ในเครื่องจักรโครงสร้างทรงกระบอกตามหัวข้อ 9.2.2 เขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$T = -KF_s F_r \sin \delta_{sr} \quad \dots 9.17$$

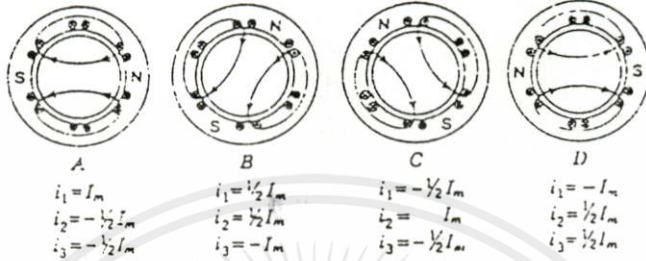
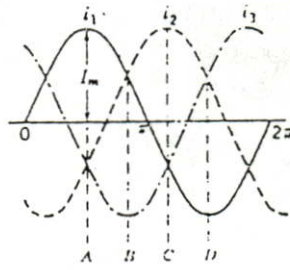
สมการนี้แสดงให้เห็นว่า เครื่องจักรสามารถสร้างแรงบิดคงที่ขึ้นได้ ถ้าแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองชุดมีขนาดคงที่ และการจัดเชิงมุมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองคงที่

9.3.1 เงื่อนไขการสร้างแรงบิดคงที่

การสร้างแรงบิดคงที่ของเครื่องจักร ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโรเตอร์ หรือเมื่อเวลาต่างกัน ความเป็นไปได้ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขคือ ต้องมีแรงเคลื่อนแม่เหล็กลักษณะคลื่นซึ่งมีขนาดคงที่ 2 ชุด และการจัดเชิงมุมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองชุดคงที่ ตามโครงสร้างของเครื่องจักรทั่วไป ชุดขดลวดสเตเตอร์มีอยู่กับที่ และชุดขดลวดโรเตอร์มีการหมุนเนื่องจากการหมุนของโรเตอร์ เงื่อนไขที่สอดคล้องสามารถทำให้มุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองชุดคงที่มี 3 วิธี[7]

1) ถ้าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์อยู่กับที่ ต้องทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์อยู่กับที่ ถึงแม้ว่าจะมีการหมุนของชุดขดลวดโรเตอร์

2) ถ้าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์อยู่กับที่เมื่อเทียบกับชุดขดลวดโรเตอร์ แรงเคลื่อนแม่เหล็กสเตเตอร์ต้องหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วการหมุนของโรเตอร์ เทียบกับชุดขดลวดสเตเตอร์ซึ่งอยู่กับที่ 3) มีการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองชุดเทียบกับชุดขดลวดของตัวเอง โดยอาศัยความเร็วการหมุนของโรเตอร์ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองหมุนด้วยความเร็วที่เท่ากันเทียบกับสเตเตอร์ (ตำแหน่งที่อยู่กับที่) หรือแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองเสมือนอยู่กับที่เมื่อเปรียบเทียบซึ่งกันและกัน



รูป 9.6 แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน เครื่องจักร 2-ขั้ว 3-เฟส [2]

การสร้างแรงบิดคงที่ทั้ง 3 เงื่อนไข ต้องทำให้ขนาดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองคงที่ วิธีที่สามารถทำได้คือใช้เครื่องจักร 3-เฟส เมื่อป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3-เฟส กระแสที่ไหลในแต่ละเฟสมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วย แต่ผลลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กเนื่องจากกระแสทั้งสามเฟส ทำให้ได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนขนาดคงที่ แสดงได้ดังรูป 9.6 ตามรูปมองคล้ายกับการหมุนของขั้วแม่เหล็กถาวร แต่ในความเป็นจริงเกิดจากตำแหน่งแรงแม่เหล็กของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งเปลี่ยนแปลงตามกระแสที่ได้รับ ผลลัพธ์ที่เกิดจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์เปลี่ยนตำแหน่งนี้ ก็เหมือนกับลักษณะที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กจริงหรือขั้วแม่เหล็กถาวรที่สามารถปรับความแรงของขั้วแม่เหล็กโดยอัตโนมัติเมื่อกระแสเปลี่ยนไป[6],[7]

เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงอาศัยคอมมิวเตเตอร์ เพื่อให้การขจัดเชิงมุมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กคงที่ โดยคอมมิวเตเตอร์ทำให้แกนแรงเคลื่อนแม่เหล็กโรเตอร์อยู่กับที่ และลักษณะนี้เป็นตัวอย่างเงื่อนไขข้อ 1 ของการสร้างแรงบิดคงที่ เงื่อนไขสำคัญของความสัมพันธ์ด้านความเร็วในการแปรรูปพลังงานของเครื่องจักรโครงสร้างทรงกระบอกที่มีชุดขดลวดสเตเตอร์ กับโรเตอร์อย่างละ 1 ชุดเป็นไปตามสมการ 9.4 [7]

เครื่องจักรชุดขดลวดหลายเฟสที่สเตเตอร์กับโรเตอร์ เนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กโรเตอร์ต้องหมุนทิศเดียวกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กสเตเตอร์ เพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการสร้างแรงบิดคงที่ สำหรับเครื่องจักรที่สเตเตอร์กับโรเตอร์เป็นแบบชุดขดลวดหลายเฟส เงื่อนไขทางความเร็วในการสร้างแรงบิดคงที่เป็นไปตามสมการ 9.18 [7]

$$\omega_m = \omega_s \pm \omega_r$$

..... 9.18

9.3.2 เครื่องจักรซิงโครนัส

วิธีการสร้างแรงบิดคงที่ตามเงื่อนไขข้อที่ 2 โดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วการหมุนโรเตอร์เทียบกับสเตเตอร์ แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์อยู่กับที่เมื่อเทียบกับโรเตอร์ หรือกล่าวในทางกลับกันโรเตอร์ต้องหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ เครื่องจักรซิงโครนัสหลายเฟส แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์หมุนด้วยความเร็ว ω_s rad/s ความเร็วสัมพันธ์กับความถี่ของแหล่งป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหลายเฟสที่ป้อนให้สเตเตอร์เมื่อ $\omega_m = \omega_s$ เงื่อนไขที่ให้ความสอดคล้องกับความสัมพันธ์ความเร็วตามสมการ 9.18 คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กโรเตอร์ความเร็วการหมุนเป็นศูนย์ $\omega_r = 0$ หมายความว่าซิงโครนัสโรเตอร์ถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง



รูป 9.7 แกนแรงเครื่องแม่เหล็กของเครื่องจักรซิงโครนัส[7]

ถ้าซิงโครนัสโรเตอร์ได้รับการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ซิงโครนัสโรเตอร์จะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กอยู่กับที่เทียบกับโรเตอร์ คล้ายกับลักษณะของแม่เหล็กถาวร เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว $\omega_m = \omega_s$ มองดูเหมือนกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กโรเตอร์หมุนรอบช่องอากาศโดยมีขนาดคงที่ ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กโรเตอร์หมุนเทียบกับสเตเตอร์ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็ว แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ เครื่องจักรสามารถสร้างแรงบิดคงที่ขึ้น และแปลงรูปพลังงานโดยไม่มีการแกว่งของพลังงาน ลักษณะทางกายภาพแสดงได้ดังรูป 9.7[5],[7]

ในเครื่องจักรหลายเฟสที่มีความเร็วการหมุนโรเตอร์ซิงโครนัสกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ เรียกว่าเครื่องจักรซิงโครนัส สมการแรงบิดเป็นไปตามสมการ 9.17 เมื่อมุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองน้อยกว่าศูนย์ แรงบิดมีค่ามากกว่าศูนย์ เครื่องจักรมีอาภักดิ์ปฏิกิริยามอเตอร์ เพราะแรงบิดที่สร้างขึ้นเป็นบวก และกระทำตามทิศทางการหมุน ถ้าเครื่องจักรถูกขับโดยตัวต้นกำลังทางกลศาสตร์ที่เพลา มุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองเป็นบวก แรง

บิดมีค่าเป็นลบ เกิดการแปรรูปพลังงานลักษณะตรงข้าม คือเครื่องจักรมีอากัปภิกขัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า[7]

เราอาจมองการสร้างแรงบิดของเครื่องจักรในลักษณะของขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ขั้วแม่เหล็กเกิดขึ้นบนนิวสเตรเตอร์ และนิวโรเตอร์แสดงได้ดังรูป 9.7 ทำให้เกิดการดูด หรือผลักของขั้วแม่เหล็ก ตำแหน่งที่ปรากฏขั้วแม่เหล็กตรงกับค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สร้างจากสเตเตอร์และโรเตอร์ การกระจายความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศเป็นผลมาจากผลลัพธ์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศปรากฏขึ้นที่มุมใดมุมหนึ่งระหว่างแกนแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสอง เนื่องจากความเร็วการหมุนโรเตอร์เท่ากับความเร็วการหมุนเส้นแรงแม่เหล็กกลัฟในช่องอากาศ ชุดขดลวดโรเตอร์จึงมองไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อย ด้วยเหตุนี้จึงไม่มีการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าในชุดขดลวดโรเตอร์ [7]

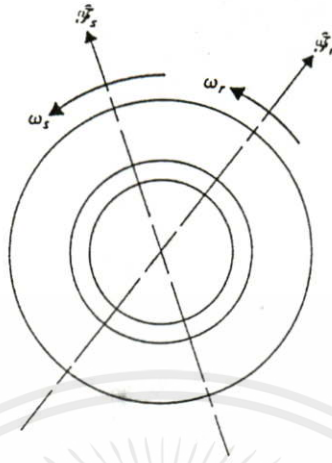
จากตำแหน่งหยุดนิ่ง $w_m = 0$ ไม่มีการสร้างแรงบิดเฉลี่ย ดังนั้นเครื่องจักรซิงโครนัสไม่มีแรงบิดเริ่มแรก (starting torque)

9.3.3 เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ตามเงื่อนไขข้อที่ 3 ของการสร้างแรงบิดคงที่ ต้องมีการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กสเตเตอร์กับโรเตอร์เทียบกับชุดขดลวดตัวเองเมื่อถูกกระตุ้น เนื่องจากชุดขดลวดโรเตอร์พันอยู่บนโรเตอร์ซึ่งหมุนในขณะที่เครื่องจักรทำงาน โดยอาศัยความเร็วการหมุนโรเตอร์ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนทั้งสองมีความเร็วเท่ากันเทียบกับสเตเตอร์ หรือเสมือนอยู่กับที่เมื่อเปรียบเทียบซึ่งกันและกัน ความเร็วการหมุนต้องมีความสัมพันธ์กันตามสมการ 9.18 เพื่อความสะดวกเริ่มวิเคราะห์จากเครื่องจักรเหนี่ยวนำ 2-ขั้ว ชุดขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์พันแบบกระจายหลายเฟสการสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนของชุดขดลวดทั้งสองทำได้โดย ป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหลายเฟสกระตุ้นชุดขดลวดสเตเตอร์ และอาศัยหลักการเหนี่ยวนำกำลังไฟฟ้าจากกระแสสเตเตอร์เพื่อสร้างกำลังไฟฟ้ากระแสสลับกระตุ้นชุดขดลวดโรเตอร์ ความเร็วการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนที่สร้างขึ้นมีความสัมพันธ์กับความถี่ของกำลังไฟฟ้าที่กระตุ้นชุดขดลวด เนื่องจากเราทำการป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับด้านสเตเตอร์ เราจึงเรียกความเร็วการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ว่าความเร็วซิงโครนัส และเพราะเราอาศัยหลักการเหนี่ยวนำกำลังไฟฟ้าด้านโรเตอร์จึงเรียกว่าเครื่องจักรเหนี่ยวนำ [7]

กระตุ้นสเตเตอร์ด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3-เฟส ความถี่ w_s rad/s กระแสในชุดขดลวดสเตเตอร์สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ ความเร็ว w_s rad/s เทียบกับสเตเตอร์เรียกว่าความเร็วซิงโครนัส กำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นโรเตอร์ ความถี่ w_r rad/s เทียบกับโรเตอร์สามารถแสดงลักษณะทางกายภาพได้ด้วยรูป 9.8 โดยมีลำดับเฟสในชุดขดลวดทั้งสองทำให้ทิศหมุนแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีทิศวกดังรูป หากเราละเลยไม่สนใจที่มาของกำลังไฟฟ้ากระตุ้นชุด

ขดลวด มองได้เหมือนกับว่าเครื่องจักรทำงานในลักษณะเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับระบบ
 กระตุ้นคู่ (doubly-fed polyphase machine)



รูป 9.8 แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนเมื่อกระตุ้นสเตเตอร์กับโรเตอร์[7]

เครื่องจักรเหนี่ยวนำทำงานโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำกำลังไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นขดลวดโรเตอร์จากกำลังไฟฟ้ากระแสสลับกระตุ้นขดลวดสเตเตอร์ กระแสสเตเตอร์สร้างเส้นแรงแม่เหล็กรอบช่องอากาศคล่องขดขดลวดทั้งสอง ถ้าความเร็วการหมุนของโรเตอร์เท่ากับความเร็วเชิงโคโรนัส ขดขดลวดโรเตอร์จะมองไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก ไม่เกิดการเหนี่ยวนำกำลังไฟฟ้ากระตุ้นขดลวดโรเตอร์ ทำให้ไม่มีแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์ ผลคือไม่มีการสร้างแรงบิดขึ้นในเครื่องจักร ดังนั้นการทำงานของเครื่องจักรเหนี่ยวนำมี 2 ลักษณะคือ ความเร็วการหมุนโรเตอร์น้อยกว่าความเร็วเชิงโคโรนัส ($w_m < w_s$) และความเร็วการหมุนโรเตอร์มากกว่าความเร็วเชิงโคโรนัส ($w_m > w_s$) การทำงานทั้งสองลักษณะความสัมพันธ์ทางความเร็วต้องสอดคล้องกับสมการ 9.18 จึงทำให้เครื่องจักรสามารถสร้างแรงบิดคงที่

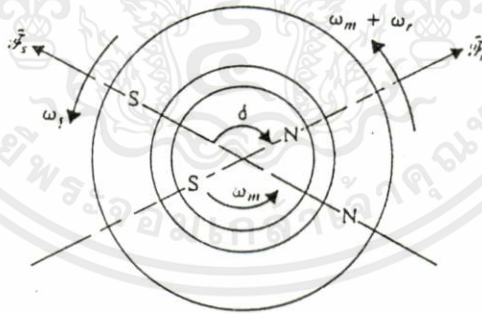
1) การทำงานของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ ภาวะ $w_m < w_s$

ภาวะการทำงานลักษณะนี้เกิดขึ้นโดยกระตุ้นขดลวดสเตเตอร์ด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3-เฟส ความถี่ w_s rad/s จากตำแหน่งหยุดนิ่ง $w_m = 0$ กระแสสเตเตอร์สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ ความเร็ว w_s rad/s เกิดการเหนี่ยวนำกำลังไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นในขดขดลวดโรเตอร์ ความถี่ w_r rad/s กระแสโรเตอร์สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์ ความเร็ว w_r rad/s จากตำแหน่งหยุดนิ่ง $w_s = w_r$ สร้างแรงบิดทำให้ โรเตอร์เริ่มหมุนทิศเดียวกันกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ เราเห็นได้ว่าการกระตุ้นขดลวดโดยวิธีนี้ไม่มีโอกาสที่ความเร็วการหมุนโรเตอร์มากกว่าความเร็วเชิงโคโรนัส [7]

พิจารณาทิศทางการหมุน จากตำแหน่งโรเตอร์อยู่กับที่ $\omega_m = 0$ แรงบิดที่เกิดขึ้นทำให้โรเตอร์เริ่มหมุนจนกระทั่งความเร็วเป็น ω_m (ไม่มีภาระ) ในขณะเดียวกัน ω_r ต้องลดลง เพื่อให้สอดคล้องกับความสัมพันธ์ทางความเร็วของการสร้างแรงบิด ปรากฏการณ์การปรับความเร็วเกิดขึ้นโดยอัตโนมัติในเครื่องจักร กล่าวคือกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำในชุดขดลวดโรเตอร์จะมีความถี่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วการหมุนโรเตอร์ สมมติให้กระแสสเตเตอร์ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ที่ขั้วขั้วหมุนทวนเข็มนาฬิกา โรเตอร์จะหมุนทิศทวนเข็มนาฬิกาด้วย ภาวะการทำงาน $\omega_m < \omega_s$ ตามกฎของเลนส์ กำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในชุดขดลวดโรเตอร์มีผลสร้างเส้นแรงแม่เหล็กต่อต้านการเปลี่ยนแปลง คิดอย่างง่ายว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์กำลังห่างจากชุดขดลวดโรเตอร์เส้นแรงแม่เหล็กจากกระแสเหนี่ยวนำต้องมีผลทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์หมุนตามแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ นั่นคือแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนทั้งสองหมุนทิศทางเดียวกัน จากทั้งหมดที่กล่าวมานี้ ความสัมพันธ์ทางความเร็วเพื่อสร้างแรงบิดคงที่เมื่อเครื่องจักรทำงานที่ภาวะ $\omega_m < \omega_s$ เขียนได้ดังสมการที่ 9.19 และแสดงลักษณะทางกายภาพได้ดังรูป 9.9 [7]

$$\omega_m = \omega_s - \omega_r$$

..... 9.19



รูป 9.9 แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนเครื่องจักรเหนี่ยวนำ $\omega_m < \omega_s$ [7]

เมื่อความเร็วการหมุนมีความสัมพันธ์ตามสมการ 9.19 หมายความว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กสเตเตอร์กับโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเท่ากันเทียบกับสเตเตอร์ เราสามารถหาความเร็วการหมุนโรเตอร์เทียบกับสเตเตอร์ (ω_r/ω_s) โดยนำความเร็วการหมุนโรเตอร์รวมกับความเร็วการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์ เพราะชุดขดลวดโรเตอร์พันอยู่บนโรเตอร์ซึ่งหมุนในขณะเครื่องจักรทำงาน ทิศทางตามที่เกิดขึ้นจริงตามปรากฏการณ์ภายในเครื่องจักร

$$w_r/s = w_m + w_r = w_s$$

.....9.20

จากสมการ 9.20 แสดงว่าเครื่องจักรสามารถสร้างแรงบิดคงที่ และเกิดการแปรรูปพลังงาน โดยไม่มีการแกว่งของพลังงาน พฤติกรรมเครื่องจักรลักษณะนี้เป็นอากัปกริยามอเตอร์

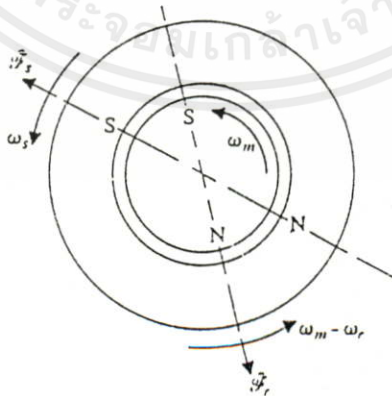
2) การทำงานของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ ภาวะ $w_m > w_s$

ตามวิธีการกระตุ้นเครื่องจักรเหนี่ยวนำภาวะที่หนึ่ง เป็นไปไม่ได้ที่จะทำให้ความเร็วการหมุนโรเตอร์มากกว่าความเร็วซิงโครนัส การทำงานของเครื่องจักรเหนี่ยวนำภาวะ $w_m > w_s$ นอกจากการป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้สเตเตอร์ เรายังต้องป้อนพลังงานกลศาสตร์ให้โรเตอร์เพื่อขับโรเตอร์ให้หมุนด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วซิงโครนัส

พิจารณาทิศทางการหมุน เมื่อความเร็วการหมุนโรเตอร์มากกว่าความเร็วซิงโครนัส และมีทิศทางการหมุนทิศเดียวกัน กำหนดทิศทวนเข็มนาฬิกา ในขณะนี้ชุดขดลวดโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วมากกว่าชุดขดลวดสเตเตอร์ ตามกฎของเลนส์ กำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำในชุดขดลวดโรเตอร์ต้องเพิ่มเส้นแรงแม่เหล็กที่ลดลง ส่งผลให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์หมุนเข้าหาแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ หมายความว่าทิศหมุนแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองตรงข้ามกัน บอกให้เราทราบว่าลำดับเฟสของกระแสสเตเตอร์กับโรเตอร์มีการกลับลำดับเฟสกัน เพื่อสร้างแรงบิดคงที่ตามสมการความสัมพันธ์ทางความเร็วภาวะการทำงาน $w_m > w_s$ เขียนได้ดังสมการ 9.21 และ แสดงลักษณะทางกายภาพด้วยรูป 9.10 [7]

$$w_m = w_s + w_r$$

..... 9.21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูป 9.10 การทำงานเครื่องจักรเหนี่ยวนำ ภาวะ $w_m > w_s$ [7]

ตรวจสอบแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์เทียบกับสเตเตอร์ ความเร็วการหมุนต้องเท่ากับ ความเร็วการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ การทำงานของเครื่องจักรจึงสามารถ แรงบิดคงที่ และเกิดการแปรรูปพลังงานที่ไม่มีการแกว่งของพลังงาน

$$w_{r/s} = w_m - w_r = w_s$$

..... 9.22

การทำงานของเครื่องจักรเหนี่ยวนำตามวิธีนี้ พฤติกรรมการทำงานของเครื่องจักรเป็นอกัป กริยาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพราะนอกจากการป้อนกำลังไฟฟ้าด้านสเตเตอร์แล้ว เราต้อง ป้อนพลังงานกลศาสตร์ด้านโรเตอร์ด้วย

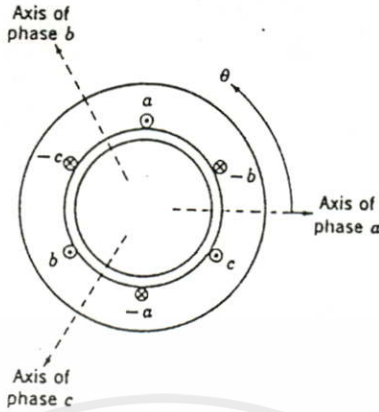
9.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ เป็นการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์พันด้วย ขดลวดมาประยุกต์เพื่อเพิ่มกำลังเอาต์พุต ดังนั้นจึงจัดเป็นเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับหลาย เฟสชนิดหนึ่ง แต่ที่แยกจากหัวข้อ 9.3 เนื่องจากการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟ คู่ไม่เคยปรากฏในงานวิจัยมาก่อน อย่างไรก็ตามพฤติกรรมการทำงานต้องตั้งอยู่บนหลักการพื้น ฐานของการสร้างสร้างบิดในเครื่องจักรทั่วไป

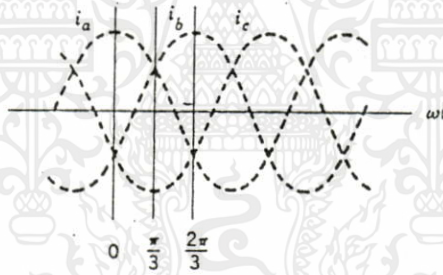
9.4.1 การกระตุ้นขดลวด

การกระตุ้นขดลวดของมอเตอร์ซึ่งโครนิสทำโดยป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับด้านสเตเตอร์ และป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงด้านโรเตอร์ ส่วนการกระตุ้นขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำโดยป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับด้านสเตเตอร์เพียงด้านเดียว และอาศัยการเหนี่ยวนำกำลัง ไฟฟ้ากระตุ้นขดลวดโรเตอร์

การกระตุ้นขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบกระตุ้นคู่ทำดังนี้ ป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ให้ขดลวดสเตเตอร์ และกลับลำดับเฟสของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดสเต เตอร์แล้วนำไปป้อนให้กับขดลวดโรเตอร์ โดยต้องทำให้กระแส และแรงดันที่ป้อนให้ขดลวด ทั้งสองซึ่งโครนิสกัน พิจารณาการสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ โดยไม่คำนึง ถึงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดโรเตอร์ ถือว่าป้อนกำลังไฟฟ้ากระตุ้นขดลวดสเตเตอร์ เพียงด้านเดียว กระแสในขดลวดสเตเตอร์สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ ตามรูป 9.9-9.11 เป็นการสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนของเครื่องจักร 2-ขั้ว 3-เฟส การเปลี่ยนแปลง ของกระแสแต่ละเฟสของขดลวดสเตเตอร์ทำให้ได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนขนาดคงที่ ความ เร็วการหมุน w_s rad/s สัมพันธ์กับความถี่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ได้รับ ตามรูป 9.11 แรงเคลื่อน แม่เหล็กหมุนสเตเตอร์หมุนทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ผลทำให้โรเตอร์หมุนตามทิศทางการหมุน ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์

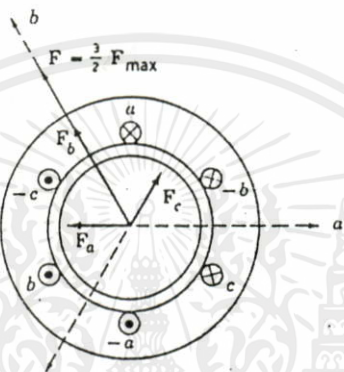
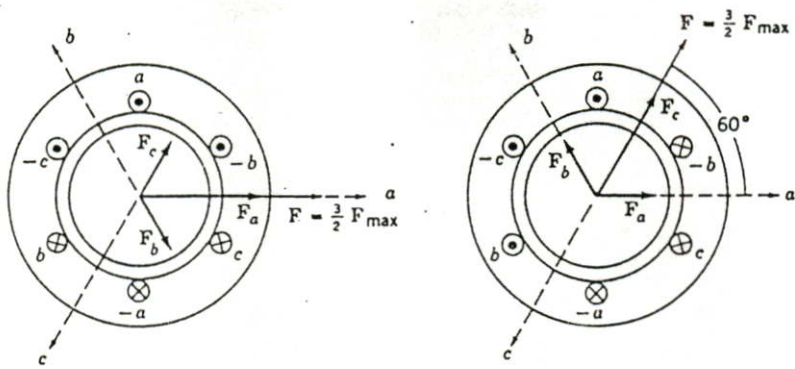


รูป 9.11 ชุดขดลวดสเตเตอร์ เครื่องจักร 2-ขั้ว 3-เฟส[6]



รูป 9.12 กระแสแต่ละเฟส [6]

พิจารณาการสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์ โดยป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับกระตุ้น ชุดขดลวดโรเตอร์เพียงด้านเดียว แหล่งจ่ายแหล่งเดียวกับที่ป้อนด้านสเตเตอร์แต่ลำดับเฟสกลับกัน ชุดขดลวดโรเตอร์สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์ตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสซึ่งเกิดขึ้นในแต่ละเฟสที่ได้รับ ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์หมุนทิศตามเข็มนาฬิกาตรงข้ามกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ ความเร็วการหมุน ω_r rad/s สัมพันธ์กับความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ถ้าหากยึดโรเตอร์ไว้ และสเตเตอร์สามารถเคลื่อนที่หรือหมุนได้ สเตเตอร์ควรจะหมุนทิศตามเข็มนาฬิกาตามทิศทางการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์ ตามโครงสร้างของเครื่องจักรในความเป็นจริงสเตเตอร์ไม่สามารถหมุนได้ แรงกระทำที่เกิดบนสเตเตอร์ทำให้ได้แรงปฏิกิริยาขึ้นบนโรเตอร์ ผลทำให้โรเตอร์หมุนทิศทวนเข็มนาฬิกา



รูป 9.13 การสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนตามการเปลี่ยนแปลงของกระแส 3-เฟส[6]

9.4.2 ลักษณะการทำงาน

เมื่อเราทำการป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3-เฟส กระตุ้นชุดขดลวดสเตเตอร์ กับโรเตอร์ซึ่งขึงโครโมเนียมและแรงดันกันแล้ว สเตเตอร์กับโรเตอร์ต่างก็สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนของตัวเอง ความเร็วการหมุนเทียบกับชุดขดลวดตัวเองสัมพันธ์กับความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ได้รับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ความเร็ว ω_s rad/s ทิศทางหมุนทวนเข็มนาฬิกา แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์ ความเร็ว ω_r rad/s ทิศหมุนตามเข็มนาฬิกา โดยความเร็วการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนทั้งสองเท่ากัน เพราะได้รับการกระตุ้นจากแหล่งจ่ายเดียวกัน

จากการทดลองใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ ถึงแม้ว่าผลการทดลองจะทำให้ได้เครื่องจักรที่มีพฤติกรรมการทำงานในลักษณะเครื่องจักรขึงโครโมเนียม คือความเร็วการหมุนโรเตอร์คงที่เป็นสองเท่าความเร็วขึงโครโมเนียมทุกภาวะที่สามารถรับได้ แต่ไม่ใช่เครื่องจักรขึงโครโมเนียมเพราะความเร็วการหมุนโรเตอร์มากกว่าความเร็วขึงโครโมเนียม อย่างไรก็ตามการสร้างแรงบิดคงที่ตามความสัมพันธ์ของความเร็วการหมุนยังคงต้องอยู่บนพื้นฐานของเครื่องจักรทั่วไปความสัมพันธ์ของความเร็วการหมุนต้องเป็นไปตามสมการ 9.18 ส่วนการสร้างแรงบิดคงที่ตรงกับเงื่อนไขข้อที่ 3 เช่นเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติ คือมีแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์กับโรเตอร์

เทียบกับชุดขดลวดตัวเอง แต่อาศัยความเร็วการหมุนโรเตอร์ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนทั้งสองมีความเร็วเท่ากันเมื่อเทียบกับสเตเตอร์ อีกทั้งมีทิศการหมุนทิศเดียวกัน ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนทั้งสองเสมือนอยู่กับที่เมื่อเปรียบเทียบกับซึ่งกันและกัน สร้างแรงบิดคงที่ และแปรรูปพลังงานโดย ไม่มีการแกว่งของพลังงาน

9.4.3 ความเร็วการหมุน และแรงบิด

ถึงแม้ว่าพฤติกรรมการทำงานมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ไม่ใช่ลักษณะของเครื่องจักรซิงโครนัสหรือเครื่องจักรเหนี่ยวนำ การที่เครื่องจักรสามารถแปรรูปพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพแสดงว่าความสัมพันธ์ด้านความเร็วสำหรับการสร้างแรงบิดคงที่สอดคล้องกับสมการ 9.18 ทำให้เงื่อนไขข้อที่ 3 ของการสร้างแรงบิดคงที่เป็นจริง เนื่องจากการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำมาประยุกต์ใช้ การอธิบายความสัมพันธ์ทางความเร็วเพื่อสร้างแรงบิดคงที่จึงนำความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานของเครื่องจักรเหนี่ยวนำมาใช้ ซึ่งอาจพิจารณาได้ 2 ลักษณะ คือ พฤติกรรมของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ หรือภาวะการทำงานของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ

กรณีแรก พิจารณาจากพฤติกรรมของเครื่องจักรเหนี่ยวนำมีอากัปกริยามอเตอร์ ใช้ความสัมพันธ์ของความเร็วการหมุนตามสมการ 9.19 โดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์กับโรเตอร์ทิศทางการหมุนสวนทางกัน และโรเตอร์หมุนทิศทวนเข็มนาฬิกาตามลักษณะของแรงบิดที่เกิดขึ้น ดังนั้นความเร็วการหมุนโรเตอร์ที่เป็นไปได้เพื่อสร้างแรงบิดคงที่ ต้องมีความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส เพื่อให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์กับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์มีความเร็วเท่ากันเมื่อเทียบกับสเตเตอร์

$$w_m = w_s - (-w_r) = 2w_s \quad \dots\dots 9.23$$

กรณีที่สอง พิจารณาเครื่องจักรเหนี่ยวนำมีภาวะการทำงานความเร็วการหมุนโรเตอร์มากกว่าความเร็วซิงโครนัส ($w_m > w_s$) แต่เครื่องจักรมีอากัปกริยามอเตอร์ ตามหลักพื้นฐานภาวะการทำงานลักษณะนี้เครื่องจักรทำงานได้เมื่อแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ทิศทางการหมุนตรงข้ามกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการกระตุ้นชุดขดลวด เราอาจนำความสัมพันธ์ทางความเร็วของสมการ 9.21 เพื่อหาความเร็วการหมุนโรเตอร์ที่เหมาะสมในการสร้างแรงบิดมาใช้

$$w_m = w_s + w_r = 2w_s \quad \dots\dots 9.24$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จากสมการ 9.23 และ 9.24 ไม่ว่าเราพิจารณาค่าความสัมพันธ์ทางความเร็วการหมุน ลักษณะใดก็ตาม เรายังคงได้ความเร็วการหมุนโรเตอร์ที่เหมาะสมในการสร้างแรงบิดคงที่เป็น 2 เท่าของความเร็วซิงโครนัสสอดคล้องกับผลการทดลอง ด้วยความเร็วการหมุนโรเตอร์ทำให้แรงเคลื่อน

แม่เหล็กหมุนสเตเตอร์กับโรเตอร์มีความเร็วการหมุนเท่ากันเมื่อเทียบกับสเตเตอร์ สอดคล้องกับการสร้างแรงบิดคงที่เพื่อแปรรูปพลังงานโดยไม่มีกระแสของพลังงาน

$$w_{r/s} = w_m - w_r = w_s$$

..... 9.25

ถ้าเรามองภาพการทำงานโดยรวมไม่คำนึงถึงที่มาของกำลังไฟฟ้ากระตุ้นชุดขดลวดโรเตอร์ มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติก็มีพฤติกรรมการทำงานคล้ายกับเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับระบบกระตุ้นคู่ โดยมีความถี่ของกำลังไฟฟ้ากระตุ้นชุดขดลวดโรเตอร์เปลี่ยนแปลงตามความเร็วการหมุนโรเตอร์ ชุดขดลวดโรเตอร์สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนที่มีความเร็วการหมุนเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของกำลังไฟฟ้าที่มากกระตุ้น ทำให้ความสัมพันธ์ทางความเร็วการหมุน สอดคล้องกับเงื่อนไขการสร้างแรงบิดคงที่ การเปลี่ยนแปลงความถี่ของกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นเพราะ กำลังไฟฟ้ากระตุ้นชุดขดลวดโรเตอร์เป็นกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งถูกสร้างขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำลง เมื่อความเร็วการหมุนโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำลงจึงมีลักษณะไม่คงที่ ทำให้กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีความถี่ไม่คงที่

มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบกระตุ้นคู่ จัดเป็นเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับระบบกระตุ้นคู่ โดยความเร็วการหมุนโรเตอร์มากกว่าความเร็วซิงโครนัส ทำให้ชุดขดลวดมองเห็นการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำลง แต่เป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะคงที่เพราะความเร็วการหมุนโรเตอร์คงที่ตลอดการทำงาน กำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจึงมีความถี่คงที่ จากจุดนี้มองเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ความเร็วการหมุนโรเตอร์ที่เหมาะสมมีเพียงค่าเดียว โดยความเร็วการหมุนโรเตอร์ต้องทำให้ความถี่ของกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จะเกิดขึ้น เท่ากับความถี่ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อน

9.4.5 สาเหตุของการซิงโครไนซ์กระแส และแรงดัน

มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ทำงานด้วยความเร็วการหมุนโรเตอร์เป็น 2 เท่าของความเร็วซิงโครนัส ตามหลักพื้นฐานของเครื่องจักร การทำงานที่ภาวะความเร็วการหมุนโรเตอร์ไม่เท่ากับความเร็วซิงโครนัส ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำลงสร้างแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในชุดขดลวดสเตเตอร์ และโรเตอร์ ตามกฎของเลนส์ ชุดขดลวดทั้งสองต้องสร้างกระแสเหนี่ยวนำเพื่อต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ชุดขดลวดได้รับ จนกระทั่งการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นหมดไป อย่างไรก็ตามเครื่องจักรจะสามารถแปลงพลังงานได้อย่างต่อเนื่อง และมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ ความเร็วการหมุนมีความสัมพันธ์ตามสมการ 9.18 ขึ้นแรกเราพิจารณาการป้อนกำลังไฟฟ้าเพียงด้านใดด้านหนึ่ง แล้ววิเคราะห์ผลของกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น ตามเงื่อนไขความเร็วการหมุนโรเตอร์เป็น 2 เท่าความเร็วซิงโครนัส

พิจารณาการป้อนกำลังไฟฟ้าเฉพาะด้านสเตเตอร์ เพื่อสังเกตแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์จากกระแสเหนี่ยวนำ ภาวะการทำงานของเครื่องจักร คือ ความเร็วการหมุนโรเตอร์มากกว่าความเร็วการหมุนแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ (สองเท่าความเร็วซิงโครนัส $w_m = 2w_s$) กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในชุดขดลวดโรเตอร์ มีลำดับเฟสสลับกับ กระแสที่ป้อนให้สเตเตอร์ ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์จากกระแสเหนี่ยวนำ (w_r) มีทิศทางการหมุนตรงข้ามกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ (w_s) โดยกระแสเหนี่ยวนำที่ชุดขดลวดโรเตอร์เป็นตัวสร้างเส้นแรงแม่เหล็กต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ชุดขดลวดโรเตอร์สังเกตเห็น และความถี่ของกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในชุดขดลวดโรเตอร์ ต้องมีผลทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์มีความสัมพันธ์ทางความเร็วเป็นไปตามสมการ 9.18

$$w_m = w_s + w_r$$

$$w_r = 2w_s - w_s = w_s \quad \text{.....9.26}$$

ในทำนองเดียวกัน หากเราป้อนกำลังไฟฟ้านำด้านโรเตอร์เพียงด้านเดียว โดยลำดับเฟสสลับกับลำดับเฟสที่ป้อนให้ด้านสเตเตอร์ และความเร็วการหมุนโรเตอร์เป็นสองเท่าของความเร็วการหมุนแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์ เพื่อเลียนแบบภาวะการทำงานที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ สมมติว่าโรเตอร์อยู่กับที่ แต่ให้สเตเตอร์หมุนตามทิศทางการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์ ภาวะการทำงานของเครื่องจักร $w_m > w_s$ (ในขณะนี้ w_r คือความเร็วซิงโครนัส) ชุดขดลวดสเตเตอร์ต้องสร้างกระแสเหนี่ยวนำเพื่อต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยกระแสเหนี่ยวนำสเตเตอร์มีลำดับเฟสสลับกับกระแสโรเตอร์ที่ป้อน ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์จากกระแสเหนี่ยวนำ (w_s) มีทิศทางการหมุนตรงข้ามกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์ (w_r)

กระแสเหนี่ยวนำที่ชุดขดลวดสเตเตอร์เป็นตัวสร้างเส้นแรงแม่เหล็กต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ชุดขดลวดสเตเตอร์สังเกตเห็น และความถี่ของกระแสเหนี่ยวนำในชุดขดลวดสเตเตอร์ต้องทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์มีความสัมพันธ์ทางความเร็วเป็นไปตามสมการ 9.18

$$w_m = w_{si} + w_r$$

$$w_{si} = 2w_r - w_r = w_r = w_s \quad \text{.....9.27}$$

มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ ทำงานด้วยความเร็วการหมุนโรเตอร์ไม่เท่ากับความเร็วซิงโครนัส แต่เป็น 2 เท่าของความเร็วซิงโครนัส ตามหลักการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ภาวะการทำงานที่ความเร็วการหมุนโรเตอร์ไม่เท่ากับความเร็วซิงโครนัส ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องชุดขดลวด ชุดขดลวดสร้างกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อต่อ

ด้านการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น การชิงโครไนซ์กระแส และแรงดันที่ป้อนให้ชุดขดลวดสเตเตอร์กับโรเตอร์เพื่อทำให้กระแสที่ป้อนให้ชุดขดลวดทั้งสองสร้างเส้นแรงแม่เหล็กต่อต้านการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้พอดีจนกระทั่งไม่มีการเหนี่ยวนำกำลังไฟฟ้าขึ้นที่ชุดขดลวดทั้งสองด้าน หรืออาจกล่าวได้ว่าการชิงโครไนซ์กระแส และแรงดันเพื่อไม่ให้เกิดการเหนี่ยวนำกำลังไฟฟ้าขึ้นที่ชุดขดลวดทั้งสอง อาศัยกำลังไฟฟ้าที่ป้อนแทนการเหนี่ยวนำกำลังไฟฟ้าในชุดขดลวด ดังนั้นความกระแสที่ป้อนให้ชุดขดลวดทั้งสองด้านต้องมีความถี่ และลำดับเฟสตรงกับกระแสเหนี่ยวนำที่จะเกิดขึ้น กล่าวคือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ชุดขดลวดทั้งสองมีลำดับเฟสสลับกัน แต่มีความถี่เท่ากันตามความสัมพันธ์ 9.26 และ 9.27 เพื่อทำให้เครื่องจักรมีเสถียรภาพในการทำงาน และสามารถแปรรูปพลังงานได้อย่างต่อเนื่อง

9.6 เปรียบเทียบมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองระบบ

การใช้งานของเครื่องจักรจริงสิ่งที่เราพิจารณาคือ กำลังเอาต์พุต และประสิทธิภาพของเครื่องจักร จากสมการ 9.1 กำลังเอาต์พุตขึ้นกับความเร็วการหมุน และแรงบิด ส่วนประสิทธิภาพเป็นคุณสมบัติประจำของเครื่องจักรซึ่งหาได้จากการทดลอง

9.6.1 เปรียบเทียบความเร็วการหมุนโรเตอร์

หากเราทำเป็นละเลยไม่สนใจว่า กำลังไฟฟ้ากระแสสลับในชุดขดลวดโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติได้มาจากการเหนี่ยวนำ เรามองแต่เพียงว่าชุดขดลวดทั้งสองถูกกระตุ้นด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์กับโรเตอร์จากกระแสในชุดขดลวดแต่ละชุดนั่นคือเครื่องจักรทำงานในลักษณะเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับระบบกระตุ้นคู่ (doubly-fed polyphase machine) โดยความเร็วการหมุนโรเตอร์น้อยกว่าความเร็วชิงโครไนส์ และความเร็วการหมุนต้องมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับสมการ 9.18 เครื่องจักรจึงมีเสถียรภาพในการทำงาน

มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ มีลักษณะของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับระบบกระตุ้นคู่ สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ กับโรเตอร์จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนให้ชุดขดลวดทั้งสอง โดยทำงานที่ความเร็วการหมุนโรเตอร์เป็นสองเท่าของความเร็วชิงโครไนส์ ทำให้ความเร็วการหมุนมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับสมการ 9.18 และเครื่องจักรมีเสถียรภาพในการทำงาน

ตามลักษณะการทำงาน ความเร็วการหมุนโรเตอร์ที่ทำให้เครื่องจักรสร้างแรงบิดคงที่ขึ้นได้ต้องทำให้ความเร็วการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์กับโรเตอร์หมุนความเร็วเท่ากันเทียบกับสเตเตอร์ มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติความเร็วการหมุนโรเตอร์น้อยกว่าความเร็วชิงโครไนส์ ส่วนมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ความเร็วการหมุนโรเตอร์เป็นสองเท่าความเร็วชิงโครไนส์ แสดงว่าความเร็วการหมุนโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ (w_{ms}) น้อยกว่าความเร็วการหมุนโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

(w_{md}) ประมาณสองเท่า (มากกว่าสองเท่าเล็กน้อย)

$$w_{md} > 2w_{ms} : w_{md} = 2w_{sd}$$

..... 9.28

9.6.2 เปรียบเทียบแรงบิด

จากการศึกษาพื้นฐานการสร้างแรงบิดของเครื่องจักรทั่วไป เครื่องจักรซิงโครนัส และเครื่องจักรเหนี่ยวนำ หากพิจารณาเชิงไฟฟ้าเราพบว่า แรงบิดขึ้นกับความเหนี่ยวนำ กระแสในแต่ละเฟสของชุดขดลวดแต่ละชุด และมุมเฟส θ_r ดังสมการ 5.91 หากพิจารณาเชิงแม่เหล็ก แรงบิดขึ้นกับขนาดแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์กับโรเตอร์ มุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสอง และตัวแปรของเครื่องจักร (D, l, g) ตามสมการ 9.16 ซึ่งขนาดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนขึ้นกับกระแสนั้นเอง ส่วนตัวแปรเครื่องจักรสามารถพิจารณาในรูปความเหนี่ยวนำได้ การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติ กับมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบกระตุ้นคู่ มีลักษณะเหมือนกันคือ มีแรงเคลื่อนแม่เหล็กสเตเตอร์กับโรเตอร์เทียบกับชุดขดลวดตัวเอง และความเร็วการหมุนโรเตอร์ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนทั้งสองมีความเร็วเท่ากันเทียบกับสเตเตอร์ โดยมีความสัมพันธ์ของความเร็วการหมุนสอดคล้องกับการสร้างแรงบิดคงที่ในเครื่องจักร กล่าวอีกนัยหนึ่งคือเครื่องจักรสามารถทำงานสภาวะเสถียรได้หรือไม่ขึ้นกับความสัมพันธ์ของความเร็วการหมุน แต่ความเร็วการหมุนไม่มีผลต่อขนาดแรงบิดที่สร้าง ขนาดของแรงบิดขึ้นกับขนาดแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์กับโรเตอร์ที่ทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน เราทราบว่าขนาดแรงเคลื่อนแม่เหล็กขึ้นกับกระแสที่ไหลในชุดขดลวด หมายความว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองระบบใช้สมการแรงบิดสมการ เดียวกันหากมีโครงสร้างเหมือนกัน

ตามการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองระบบ เราใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำตัวเดียวกัน ดังนั้นค่าตัวแปรคงที่ของเครื่องจักรเหมือนกัน เมื่อต้องการเปรียบเทียบแรงบิดที่เกิดขึ้นตัวแปรที่มีผลต่อขนาดแรงบิดคือ กระแสสเตเตอร์กับกระแสโรเตอร์ (I_s, I_r) ตามผลการทดลองกระแสสูงสุด I_{smax} กับ I_{rmax} ในการสร้างแรงบิดเพื่อรับภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นแรงบิดสูงสุดที่สร้างขึ้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองระบบไม่น่าจะแตกต่างกันมากนัก

จากผลการทดลอง เราพบว่าแรงบิดสูงสุดที่สร้างขึ้นจากมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ น้อยกว่าแรงบิดสูงสุดที่สร้างขึ้นจากมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติอยู่ประมาณ 12 N-m ซึ่งส่งผลให้เราไม่สามารถเพิ่มกำลังเอาต์พุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ได้ถึงสองเท่าของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติ อันมีสาเหตุจากการสูญเสียที่เพิ่มขึ้น โดยดูได้จากการสูญเสียที่ภาวะไร้ภาระของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่มีค่าประมาณสองเท่าของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติ คิดเป็นตัวเลขประมาณ 650 watt ลองคำนวณกำลังสูญเสียนี้ออกมาเป็นแรงบิดที่มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟปกติสร้างขึ้นได้ประมาณ 13 N-m จากตัวเลขที่กล่าวมา การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบ

ป้อนกำลังไฟคู่ต่ำกว่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติ และส่งผลให้กำลังเอาต์สูงสุดที่ได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ไม่ถึงสองเท่าของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติ

$$T_{dmax} < T_{smax} : T_{dshaft}(max) < T_{sshift}(max) \quad \dots\dots 9.29$$

9.5.3 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุท

กำลังเอาต์พุทสามารถหาได้จากสมการ 9.1 แรงบิดที่เพลลาของเครื่องจักรขึ้นกับแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากปฏิกิริยาของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสองชุดในเครื่องจักรนั่นเอง จากหัวข้อ 9.5.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติความเร็วการหมุนโรเตอร์น้อยกว่าความเร็วซิงโครนัส โดยความเร็วการหมุนโรเตอร์แตกต่างกันตามภาระที่ได้รับ ส่วนมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ความเร็วการหมุนโรเตอร์เท่ากับสองเท่าของความเร็วซิงโครนัสคงที่ทุกภาระที่สามารถรับได้ กำหนด P_s เป็นกำลังเอาต์พุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติ และ P_d เป็นกำลังเอาต์พุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

$$P_s < T_{shaft} * \omega_s \quad \dots\dots 9.30$$

$$P_d = 2T_{shaft} * \omega_s \quad \dots\dots 9.31$$

เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุทสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองระบบ ตามสมการ 9.30 กับ 9.31 กำลังเอาต์พุทสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่มากกว่ากำลังเอาต์พุทสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติประมาณ 2 เท่า (มากกว่าสองเท่าเล็กน้อย) สาเหตุหลักที่ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อนำมาใช้ลักษณะระบบกระตุ้นคู่มีกำลังเอาต์พุทเพิ่มขึ้นคือ ความเร็วการหมุนโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของความเร็วซิงโครนัส มอเตอร์เหนี่ยวนำตัวเดียวกัน กระแสสเตเตอร์และกระแสโรเตอร์สูงสุดมีค่าใกล้เคียงกันแรงบิดสูงสุดควรจะทำกันโดยประมาณ เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุทสูงสุดระหว่างผลการทดลอง กับสมการ 9.30 และ 9.31 ตามผลการทดลองเราไม่สามารถเพิ่มกำลังเอาต์พุทสูงสุดได้ถึงสองเท่าของการใช้ในลักษณะระบบปกติ เมื่อนำมอเตอร์เหนี่ยวนำมาใช้ในลักษณะระบบกระตุ้นคู่ สาเหตุมาจากความสูญเสียในชุดขดลวด (winding loss) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเราป้อนกำลังไฟฟ้าด้านโรเตอร์ ส่งผลให้แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ลดลงไม่สามารถสร้างแรงบิดได้เท่ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟปกติ

9.6.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพ

เปรียบเทียบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองระบบที่ภาระต่างกัน การสูญเสียในชุดขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนป้อนกำลังไฟคู่เกิดขึ้นทั้งทางด้านสเตเตอร์ และโรเตอร์

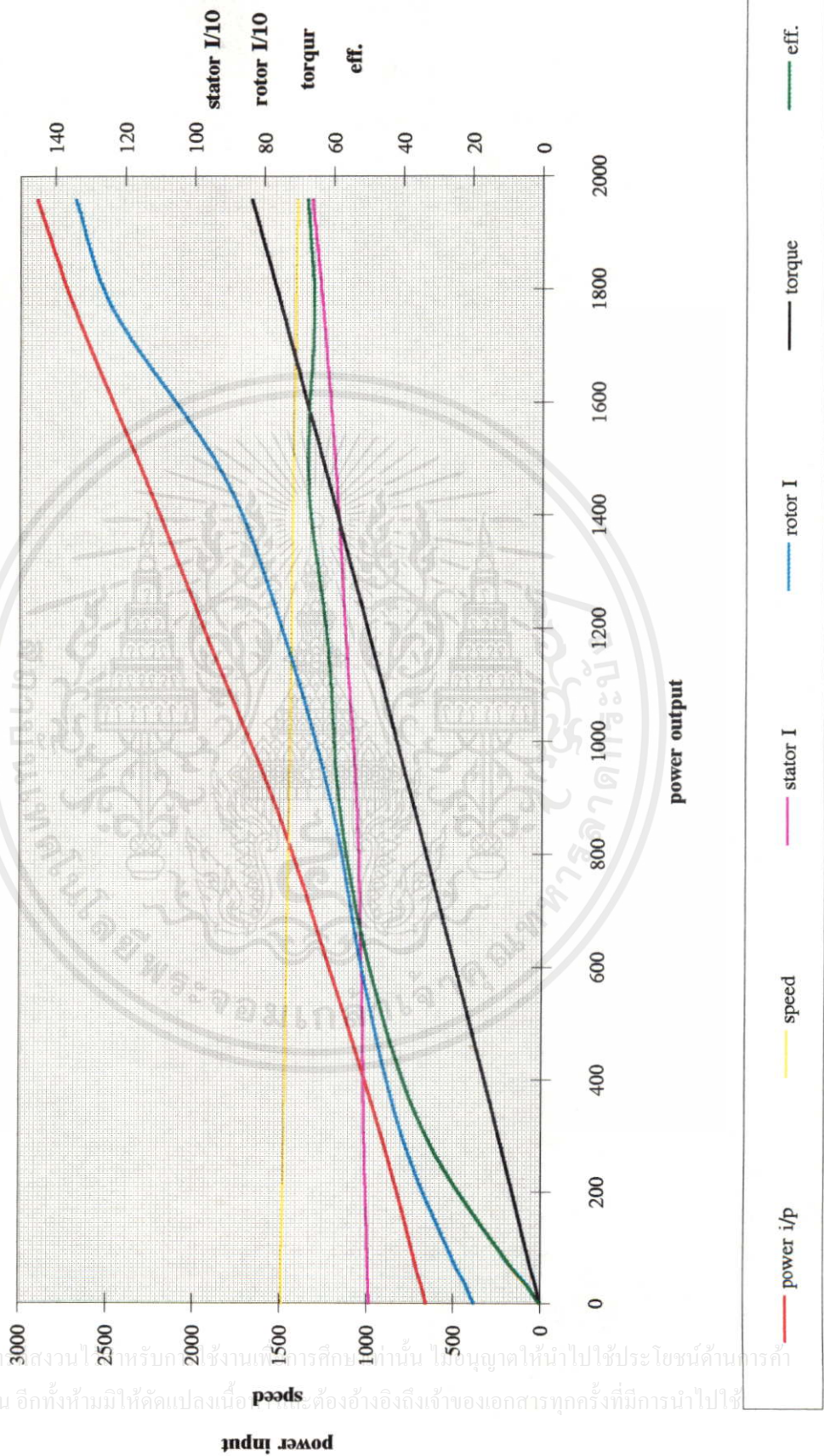
พฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดการสูญเสียคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ทุกภาระการทำงาน โดยดูได้จากกำลังอินพุตที่ต้องป้อนให้มอเตอร์เมื่อไม่มีภาระ การสูญเสียส่วนนี้เกิดขึ้นที่ทุกภาระการทำงาน ดังนั้นภาวะการทำงานของเครื่องจักรประสิทธิภาพจะสูงขึ้นเมื่อภาระเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลอง มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่มีประสิทธิภาพต่ำกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติเล็กน้อย อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากกำลังสูญเสียที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

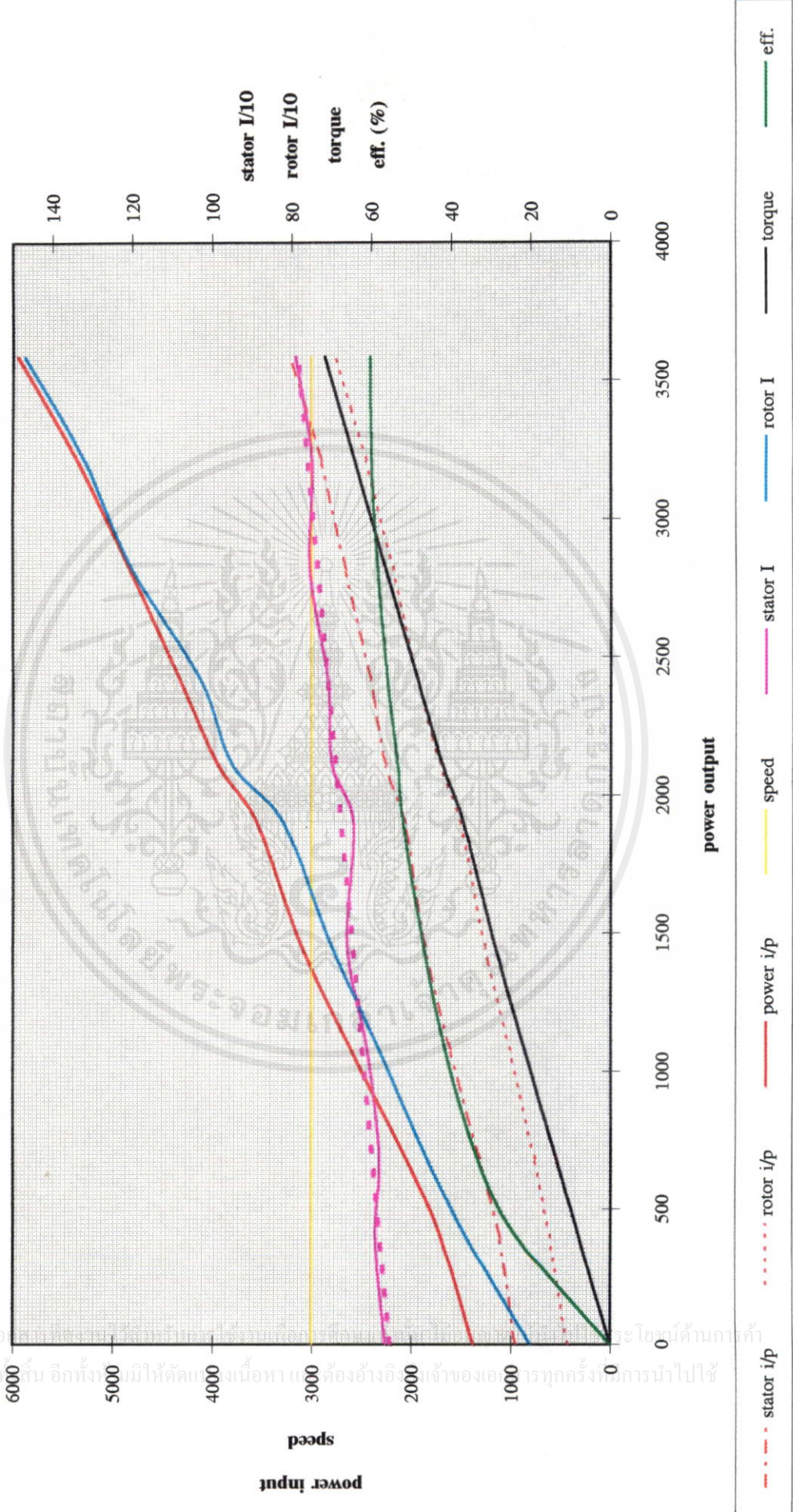


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ 9.1 กราฟผลการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติ

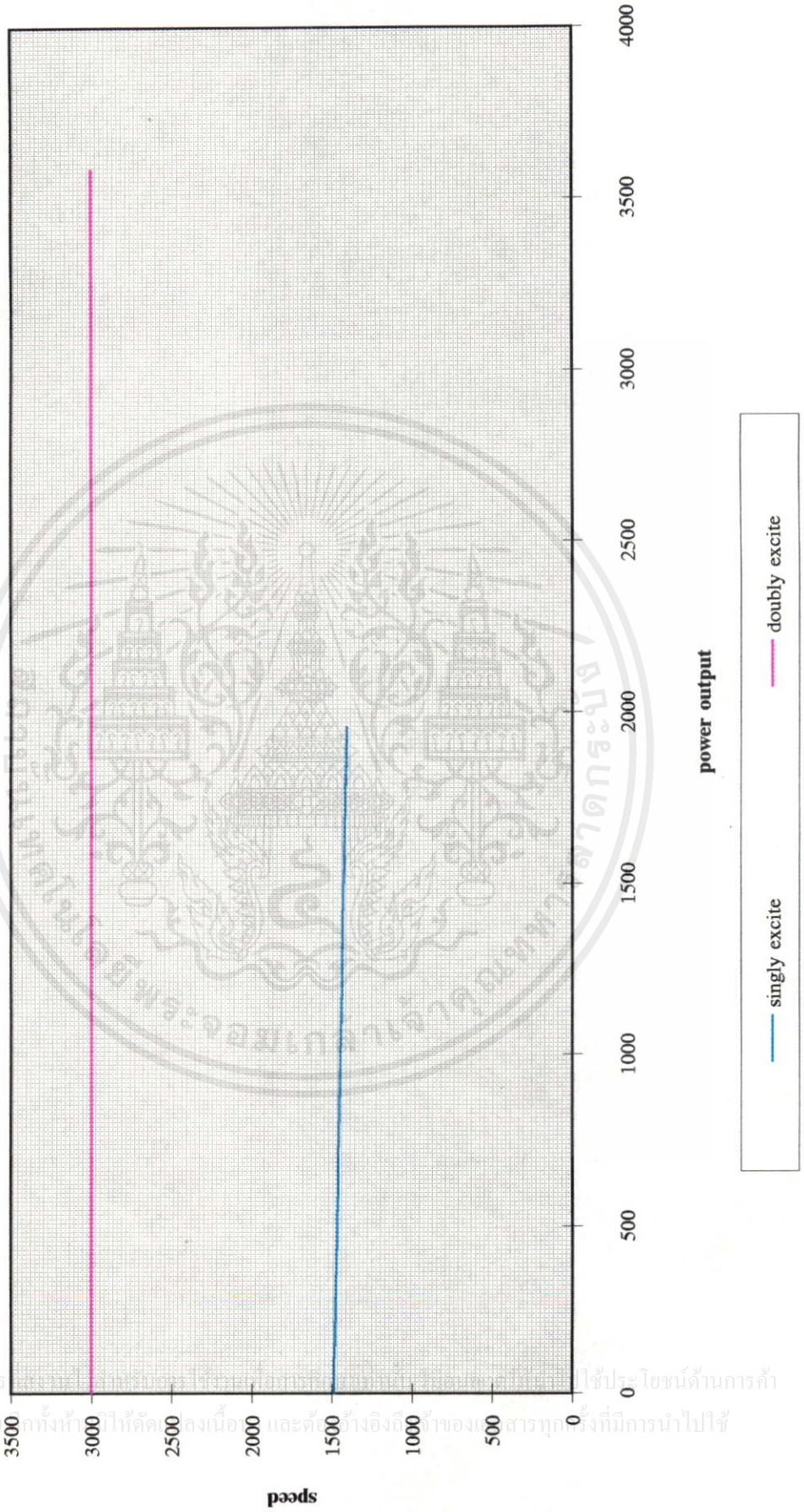


กราฟ 9.2 กราฟผลการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบกำลังไฟคู่



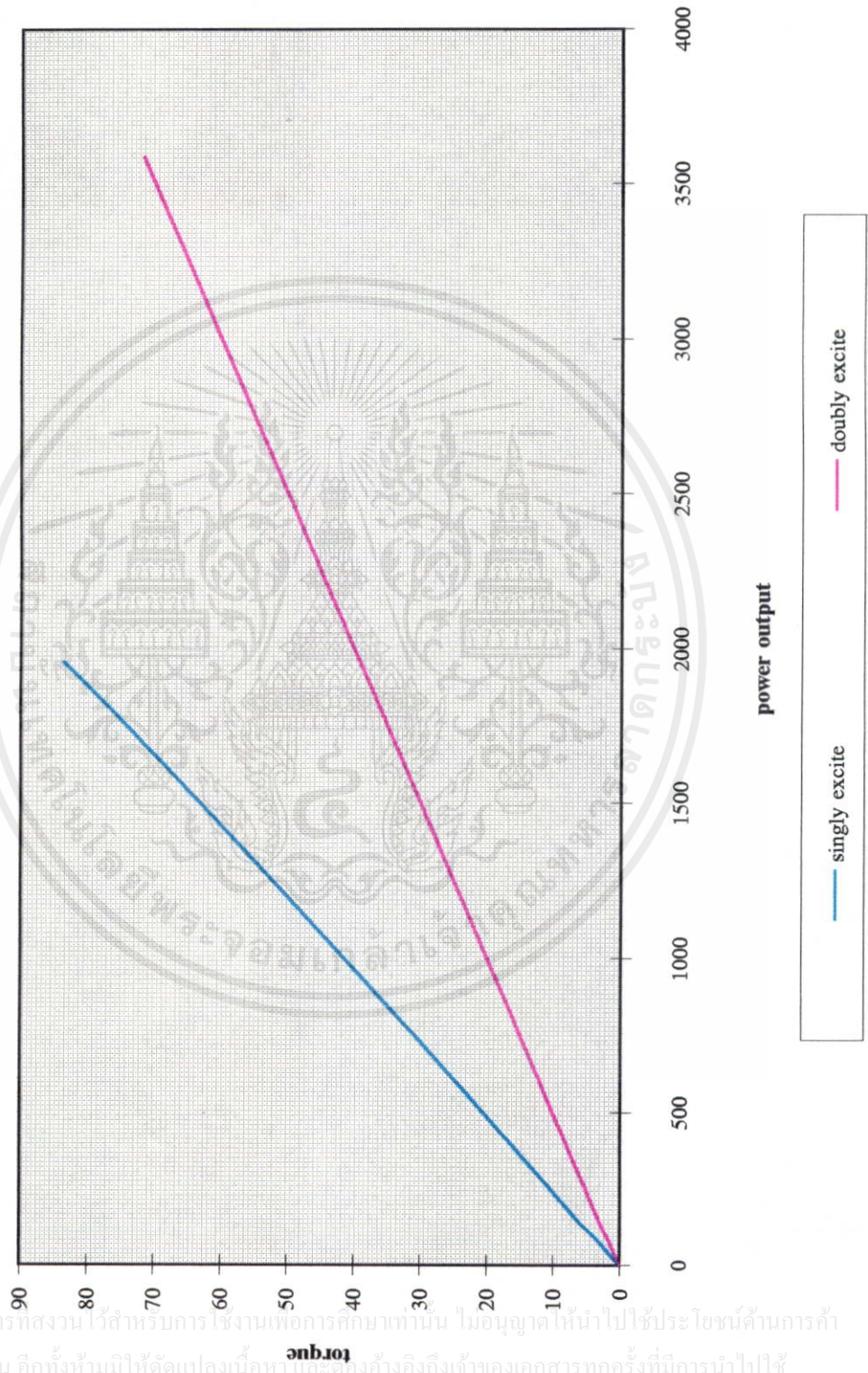
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 ไม่ว่าการตีพิมพ์ครั้งนี้มีให้คัดลอกเนื้อหาและข้อมูลใดๆ จากเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย

กราฟ 9.3 กราฟเปรียบเทียบความเร็วการหมุนโรเตอร์



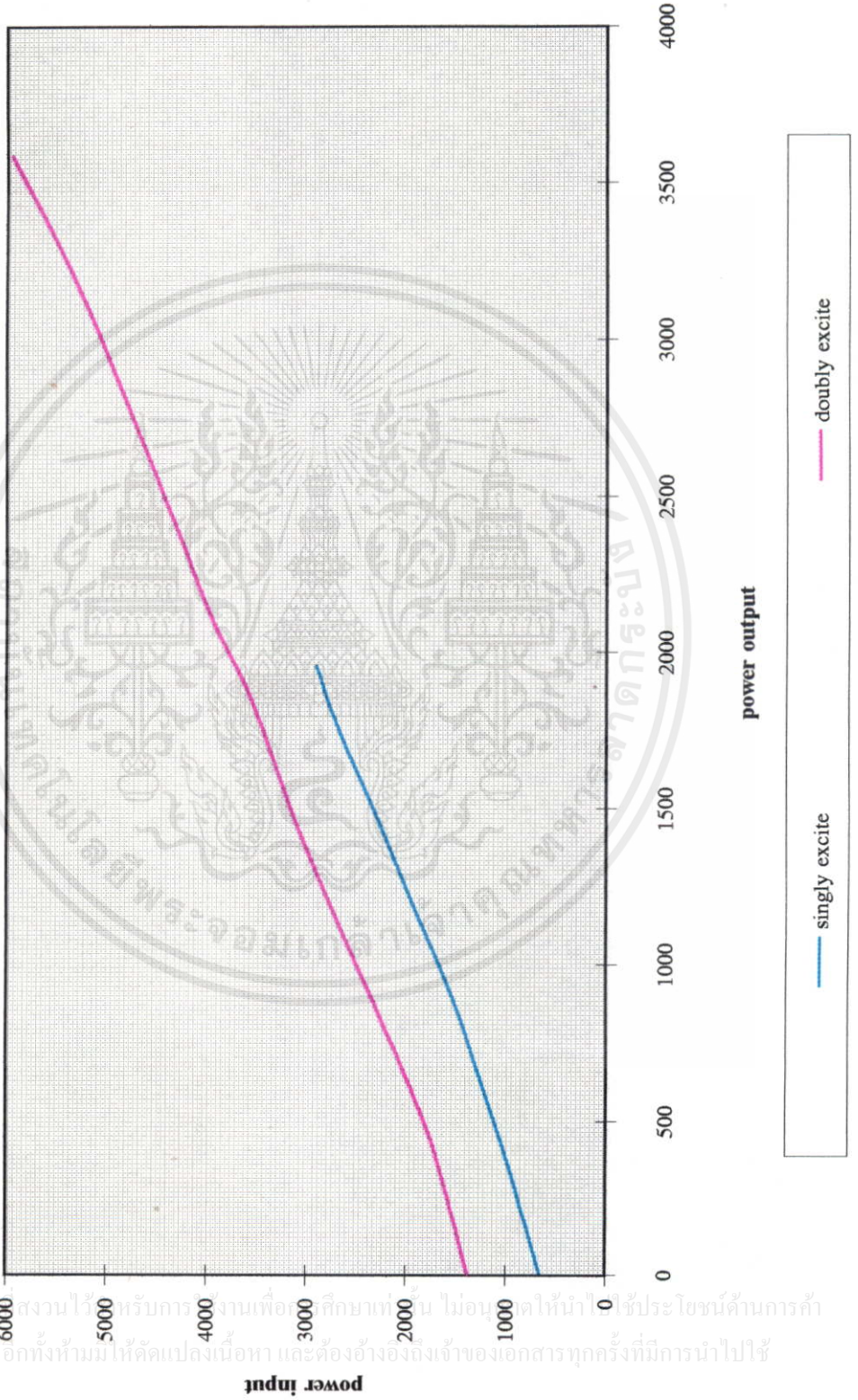
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 02-214-9434 หรือ 02-214-9435

กราฟ 9.4 กราฟเปรียบเทียบแรงบิด



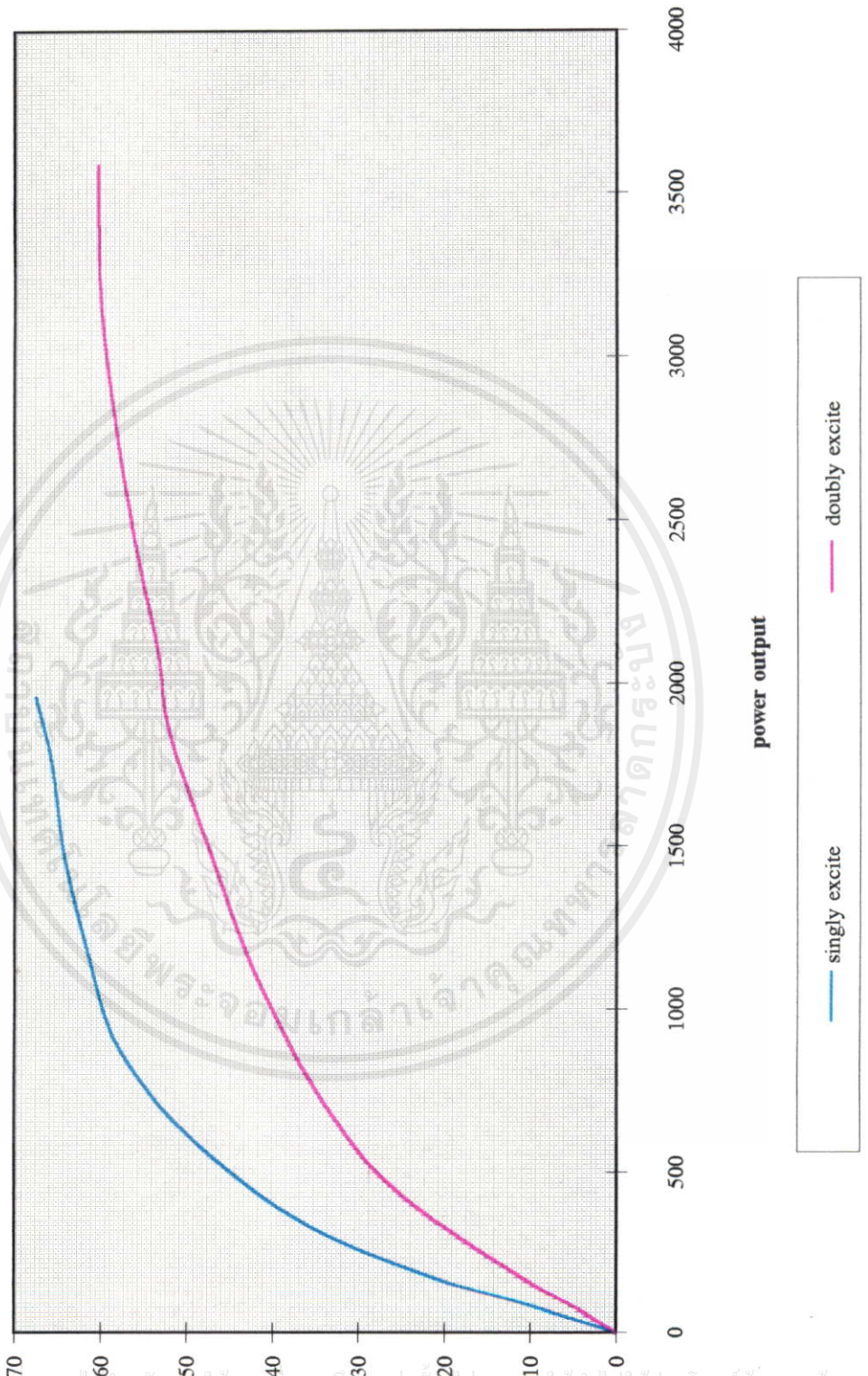
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ 9.5 กราฟเปรียบเทียบ power output



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ 9.6 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดขดลวดพันรอบโรเตอร์ นอกจากใช้งานตามปกติที่พบกันโดยทั่วไปแล้วสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในลักษณะเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับระบบกระตุ้นคู่ โดยการป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับกระตุ้นขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งอาศัยกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายแหล่งเดียวกัน แต่อาศัยการป้อนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมทำให้เครื่องจักรสามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ความเร็วการหมุนโรเตอร์เป็นสองเท่าความเร็วซิงโครนัสคงที่ทุกภาระที่สามารถรับได้ การประยุกต์ใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบกระตุ้นคู่ไม่เคยปรากฏในงานวิจัยชิ้นใดมาก่อนโดยมีข้อดีที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำตัวเดียวกันเมื่อนำมาประยุกต์ใช้งานลักษณะมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบกระตุ้นคู่ สามารถเพิ่มกำลังเอาต์พุตขึ้นได้เกือบสองเท่าของกำลังเอาต์พุตเดิม

10.1 เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับระบบป้อนกำลังไฟคู่

เครื่องจักรซิงโครนัสจัดเป็นเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับระบบกระตุ้นคู่ชนิดหนึ่ง แต่การกระตุ้นขดลวดโรเตอร์อาศัยกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องจักรทำงานโดยมีความเร็วการหมุนโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัสทุกภาระที่สามารถรับได้ ดังนั้นมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบกระตุ้นคู่จึงไม่ใช่มอเตอร์ซิงโครนัสเพราะเหตุผลสองประการคือ 1) ความเร็วการหมุนโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบกระตุ้นคู่ไม่ใช่ความเร็วซิงโครนัส และ 2) มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่กระตุ้นขดลวดโรเตอร์ด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ในเชิงปฏิบัติการป้อนกำลังไฟฟ้ากระตุ้นขดลวดขณะเครื่องจักรทำงาน คงไม่สะดวกหากต้องการปรับตัวแปรโดยการเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระตุ้นขดลวดมีความถี่คงที่ ความเร็วการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์กับโรเตอร์ต้องคงที่ตามความถี่ของกำลังไฟฟ้าที่กระตุ้นขดลวด จากความสัมพันธ์ทางความเร็วการหมุนเพื่อสร้างแรงบิดคงที่ในเครื่องจักร ความเร็วการหมุนโรเตอร์ที่เหมาะสมจึงมีเพียงค่าเดียว ในขณะนี้อาจกล่าวได้ว่าเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับระบบกระตุ้นคู่เกิดเสถียรภาพในการทำงานโดยมีความเร็วการหมุนโรเตอร์ที่เหมาะสมกับการสร้างแรงบิดคงที่เพียงค่าเดียว หรือความเร็วการหมุนโรเตอร์ต้องคงที่เมื่อเครื่องจักรทำงานสภาวะคงตัว

เนื่องจากเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับระบบกระตุ้นคู่มีความเร็วการหมุนโรเตอร์ที่เหมาะสมในการสร้างแรงบิดคงที่เพียงค่าเดียว จากตำแหน่งโรเตอร์อยู่นิ่งเมื่อกระตุ้นขดลวดเครื่องจักรไม่มีแรงบิดเริ่มแรกด้วยตัวเอง เพราะความสัมพันธ์ของความเร็วไม่สอดคล้องกับสมการ 9.18 เครื่องจักรไม่สามารถสร้างแรงบิดขึ้นได้ ต้องอาศัยตัวต้นกำลังจากภายนอกมาขับเคลื่อนได้ ความเร็วการหมุนโรเตอร์ที่ต้องการเสียก่อน เมื่อได้ความเร็วที่ต้องการแล้วทำการกระตุ้นขดลวด

ลวดเครื่องจักรจึงจะสามารถสร้างแรงบิดขึ้น
พลังงาน

เกิดการแปรรูปพลังงานที่ไม่มีการแกว่งของ

10.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่

10.2.1 ลักษณะการทำงาน

โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในลักษณะระบบกระตุ้นคู่ คือ 1) ชุดขดลวดโรเตอร์ต้องสามารถติดต่อกับวงจรมอเตอร์ภายนอกได้ และ 2) การพันชุดขดลวดสเตเตอร์กับโรเตอร์ต้องสมดุลย์กัน ดังนั้นมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดที่มีโครงสร้างเหมาะสม คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดขดลวดพันรอบโรเตอร์

การกระตุ้นชุดขดลวดสเตเตอร์กับโรเตอร์ด้วยวิธีการอาศัยแหล่งจ่ายแหล่งเดียวกัน แต่กลับลำดับเฟส และซิงโครไนซ์กระแสกับแรงดัน ความเร็วการหมุนโรเตอร์จะเป็น 2 เท่าของความเร็วซิงโครไนส์

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่ว่าจะเป็นระบบปกติ หรือระบบป้อนกำลังไฟคู่ การกระตุ้นชุดขดลวดสเตเตอร์กับโรเตอร์มีลักษณะคล้ายกัน พฤติกรรมการสร้างแรงบิดเหมือนกัน คือมีแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ กับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์ โดยอาศัยความเร็วการหมุนโรเตอร์ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนทั้งสองมีความเร็วการหมุนเท่ากันเมื่อเทียบกับสเตเตอร์การอธิบายแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองระบบสามารถใช้สมการเดียวกัน ตามการทดลองใช้เครื่องจักรตัวเดียวกันทั้งสองระบบ ตัวแปรคงที่ของเครื่องจักรทุกตัวจึงเท่ากัน แรงบิดสูงสุดสามารถพิจารณาได้จากกระแสสเตเตอร์สูงสุด และกระแสโรเตอร์สูงสุด เราพบว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ให้ค่ากระแสสูงสุดมากกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติเล็กน้อย ความเร็วการหมุนโรเตอร์ไม่เท่ากับความเร็วซิงโครไนส์ เป็นสาเหตุของการสร้างกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำในชุดขดลวดหนึ่งเนื่องจากกระแสของอีกชุดขดลวดหนึ่ง ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ชุดขดลวดสเตเตอร์กับโรเตอร์ต้องสัมพันธ์กัน โดยอาศัยวิธีการซิงโครไนซ์กระแสและแรงดันที่ป้อนให้ชุดขดลวดทั้งสอง รวมกับความเร็วการหมุนโรเตอร์ที่เหมาะสมของการทำงาน ทำให้กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น กับกระแสที่ป้อนมีลำดับเฟสตรงกัน และมุมเฟสตรงกันสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนจากกระแสเหนี่ยวนำ โดยมีความเร็วการหมุนเท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนจากกระแสที่ป้อนเครื่องจักรจึงทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ และการซิงโครไนซ์กระแสกับแรงดันมีส่วนช่วยให้เครื่องจักรสามารถสร้างแรงบิดสูงสุดให้เกิดขึ้นได้จริงตามเงื่อนไขการสร้างแรงบิดคงที่ และความสัมพันธ์ทางความเร็วเพื่อสร้างแรงบิด เราอาจจะสามารถใช้แหล่งจ่ายพลังงานสองแหล่งที่มีความถี่แตกต่างกันกระตุ้นชุดขดลวด โดยแหล่งหนึ่งป้อนทางด้านสเตเตอร์ และอีกแหล่งหนึ่งป้อนทางด้านโรเตอร์ แต่ความเร็วการหมุนโรเตอร์ต้องทำให้ความเร็วการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กสเตเตอร์ เท่ากับ ความเร็วการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์ เช่น แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้านด้านสเตเตอร์มีความถี่เป็นสองเท่าของด้านโรเตอร์ แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ ความเร็วการหมุน 2ω rad/s และแรงเคลื่อน แม่เหล็ก

หมุนโรเตอร์ ความเร็วการหมุน w rad/s ทิศทางการหมุนตรงข้ามกัน ความเร็วการหมุนโรเตอร์ที่เหมาะสม คือ $-w$ rad/s การป้อนกำลังไฟฟ้าต้องทำการสลับลำดับเฟส และซิงโครไนซ์กระแสและแรงดัน พิจารณาหัวข้อ 9.5.4 ตามสมการ 9.26 แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนโรเตอร์เนื่องจากกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ความเร็วการหมุนเป็น w เท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ป้อน และตามสมการ 9.27 แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์เนื่องจากกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ความเร็วการหมุนเป็น $2w$ เท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนเนื่องจากกำลัง ไฟฟ้าที่ป้อน หมายความว่าความถี่ของกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำเท่ากับความถี่ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อน

จากสมการ 9.26

$$w_m = w_s + w_r$$

$$w_r = w_m - w_s$$

$$= 3w - 2w$$

$$= w$$

จากสมการ 9.27

$$w_m = w_{si} + w_r$$

$$w_{si} = w_m - w_r$$

$$= 3w - w$$

$$= 2w$$

10.2.2 ผลการทำงาน

เราสามารถแสดงผลการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติได้ด้วยกราฟ 10.1 และแสดงผลการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟฟ้คู่ดังกราฟ 10.2 ส่วนกราฟ 10.3-10.5 เป็นกราฟเปรียบเทียบกำลังเอาต์พุต แรงบิด และประสิทธิภาพของการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองระบบ

ตามหลักการ มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟฟ้คู่ควรจะให้กำลังเอาต์พุตสูงสุด มากกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติประมาณสองเท่า แต่จากผลการทดลองกำลังเอาต์พุตสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบกระตุ้นคู่ไม่ถึงสองเท่าของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติ เพราะแรงบิดที่ลดลงจากการสูญเสียคงที่ซึ่งเพิ่มขึ้น สาเหตุน่าจะมาจากการออกแบบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ไม่ได้ถูกออกแบบให้ใช้งานลักษณะระบบกระตุ้นคู่ คือ ไม่ได้ออกแบบให้มีการป้อนกำลังไฟฟ้ากระตุ้นชุดขดลวดโรเตอร์เมื่อมีการป้อนกำลังไฟฟ้าด้านโรเตอร์ทำให้เกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้นเนื่องจากความสูญเสียในชุดขดลวด ผลจากกำลังเอาต์พุตสูงสุดตามการทดลองไม่เป็นไปตามหลักการ ส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟฟ้คู่ต่ำกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติ ถ้ากำลังเอาต์พุตสูงสุดเป็นไปตามหลักการ ประสิทธิภาพของการ

ใช้งานระบบกระตุ้นคู่น่าจะสูงกว่าเมื่อใช้งานระบบกระตุ้นเดี่ยว หรืออย่างน้อยที่สุดก็ควรใกล้เคียงกัน

10.2.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

1) กำลังเอาต์พุตเพิ่มขึ้น มอเตอร์เหนี่ยวนำตัวเดียวกันเมื่อนำมาใช้งานในระบบกระตุ้นคู่สามารถให้กำลังเอาต์พุตเพิ่มขึ้นประมาณสองเท่าของการใช้งานในระบบปกติ การเพิ่มกำลังเอาต์พุตเท่ากับเป็นการลดขนาดของมอเตอร์ ส่งผลให้ราคามอเตอร์ต่ำลง

2) ความเร็วการหมุนโรเตอร์คงที่เท่ากับสองเท่าของความเร็วซิงโครนัส เราอาจนำมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบกระตุ้นคู่มาใช้แทนมอเตอร์ซิงโครนัส เพราะตามโครงสร้างของเครื่องจักรความยืดหยุ่นของการทำงาน การบำรุงรักษา ราคา และความแข็งแรงทนทาน มอเตอร์เหนี่ยวนำได้เปรียบมอเตอร์ซิงโครนัส

3) ความเร็วการหมุนโรเตอร์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของพิกัดความเร็วเดิม เราอาจนำมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่มาใช้ใช้งานลักษณะมอเตอร์ความเร็วสูง และอาจเปลี่ยนความเร็วการหมุนโรเตอร์โดยการเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

4) ใช้เป็นเครื่องตรวจจับความถี่ เพราะความถี่ของกำลังไฟฟ้าสัมพันธ์กับความเร็วการหมุนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุน ถ้าความสัมพันธ์ทางความเร็วการหมุนไม่สอดคล้องกับการสร้างแรงบิดคงที่ เครื่องจักรจะไม่มีเสถียรภาพในการทำงาน

10.2.4 ข้อเสียที่พบในการทดลอง

1) ไม่มีแรงบิดเริ่มแรก การเริ่มทำงานต้องอาศัยตัวต้นกำลังกลศาสตร์จากภายนอกช่วยขับเคลื่อนเพลานกกระทงโรเตอร์มีความเร็วการหมุนเป็นสองเท่าของความเร็วที่พิกัด

2) ต้องปรับแต่งกระแส และแรงดัน เพราะเราต้องซิงโครไนซ์กระแส กับแรงดันก่อนป้อนให้กับสเตเตอร์ และโรเตอร์ ทำให้เครื่องจักรยังไม่เหมาะในเชิงปฏิบัติ

10.2.5 แนวทางแก้ไข

การแก้ไขปัญหาด้านแรงบิดเริ่มแรก เราอาจใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำที่สามารถเปลี่ยนขั้วได้มาใช้ในการทดลอง เช่น เริ่มเดินมอเตอร์ที่ 2 ขั้ว จนกระทั่งได้ความเร็ว 3000 rpm แล้วทำการป้อนกระแส และแรงดันที่ซิงโครไนซ์กันแล้วให้สเตเตอร์ กับโรเตอร์ พร้อมกับเปลี่ยนให้มอเตอร์ทำงานที่ 4 ขั้ว จากลักษณะการทำงานดังกล่าวมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สามารถเปลี่ยนขั้วได้นี้ต้องมีชุดวงแหวนลื่น (slip ring) 2 ชุดที่โรเตอร์ กล่าวคือ มีถึง 6 วงแหวนลื่น (1 ชุด มี 3 วงแหวนลื่น) ชุดหนึ่งเพื่อใช้ขณะเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ อีกชุดหนึ่งสำหรับป้อนกำลังไฟฟ้าให้โรเตอร์เมื่อถูกใช้งานลักษณะมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแก้ไขปัญหาด้านการซิงโครไนซ์กระแส และแรงดัน เพื่อความสะดวกในการใช้งาน อาจออกแบบให้มอเตอร์มีจำนวนรอบของการพันขดลวดด้านสเตเตอร์ เท่ากับ ด้านโรเตอร์ เพื่อ

ทดสอบหาวิธีการชิงโครไนซ์กระแส และแรงดันที่ต้องป้อนเข้าสู่ระบบ จนกระทั่งมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถชิงโครไนซ์กระแส และแรงดันได้ด้วยตัวเอง เมื่อถูกนำมาใช้ในลักษณะมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ อีกทั้งยังอาจสามารถหาวิธีลดความสูญเสียลงที่ซึ่งเกิดขึ้นได้อีกด้วย ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และเพิ่มกำลังเอาต์พุตได้ถึงสองเท่าของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อใช้งานในระบบปกติ

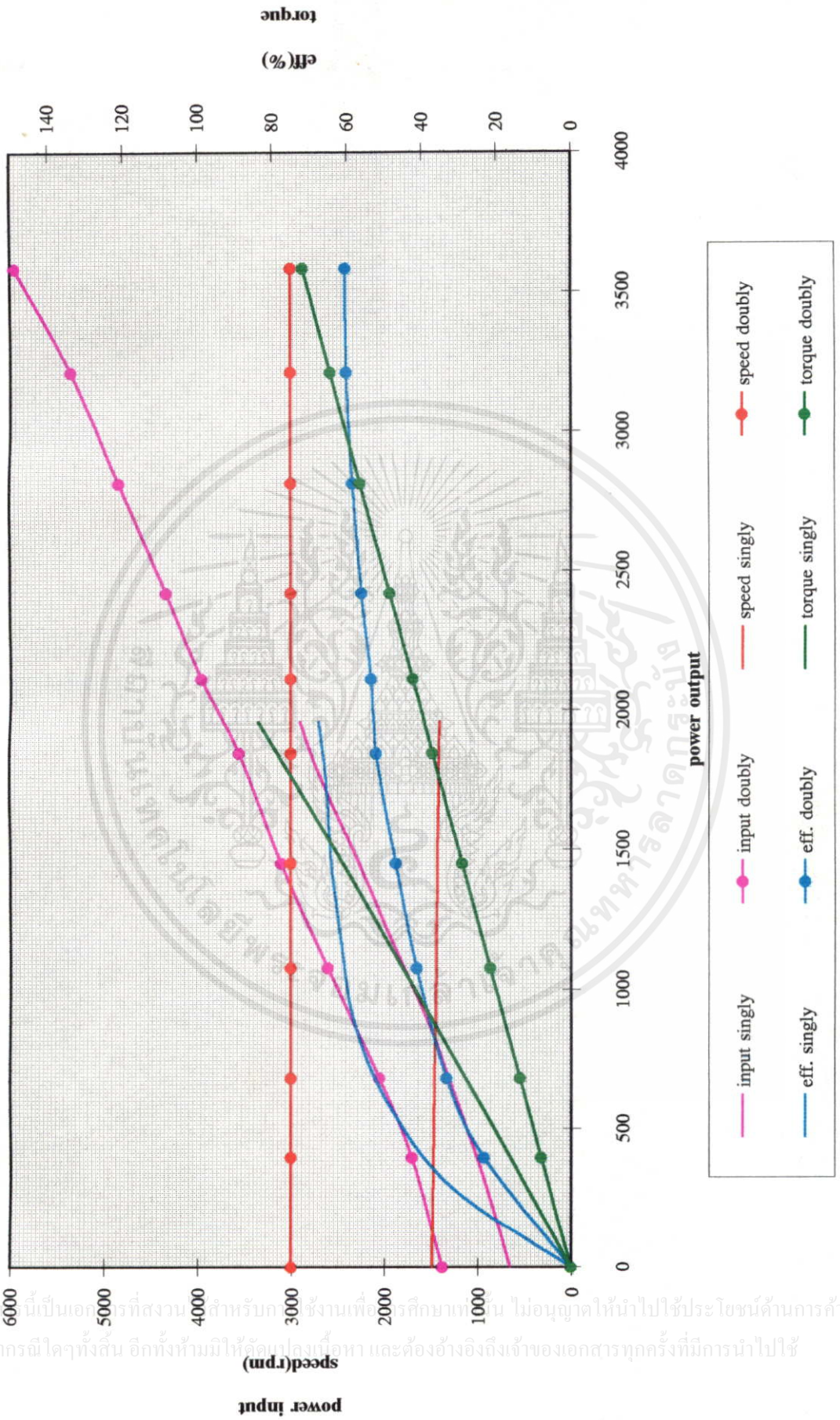
จากแนวทางแก้ปัญหาที่กล่าวมา อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้เขียนได้พยายามจัดสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำต้นแบบที่จะนำมาศึกษาการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยพยายามติดต่อหาผู้ที่จะพันขดลวด และลักษณะโครงสร้างพิเศษของมอเตอร์เหนี่ยวนำต้นแบบ แต่ลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต้องมีวงแหวนเส้นถึง 2 ชุด ที่โรเตอร์ และการจัดสร้างเพียงตัวเดียว ทำให้ราคาสูงมาก อีกทั้งหาผู้สร้างให้ไม่ได้ด้วยเหตุผลทางการค้าของบริษัทผู้สร้างที่ว่าเสียเวลามากในการจัดสร้าง และไม่คุ้มกับการจัดสร้างเพียงตัวเดียว

10.3 สรุป

จากการทดลองประยุกต์ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ พบว่าเราสามารถเพิ่มความเร็วมอเตอร์ และกำลังเอาต์พุตสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้จริง หากพิจารณาแรงบิดสูงสุด มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่จะให้แรงบิดสูงสุดมากกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำระบบปกติเล็กน้อย โดยดูได้จากกระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นตามผลการทดลอง ตามหลักแล้วกำลังเอาต์พุตสูงสุดเมื่อใช้งานลักษณะระบบกระตุ้นคู่ควรจะสูงกว่านี้ อย่างน้อยน่าจะประมาณสองเท่าของการใช้งานระบบปกติ สาเหตุของกำลังเอาต์พุตต่ำกว่าที่ควรจะเป็น เพราะมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลองหรืออาจกล่าวได้ว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไป ไม่ได้ถูกออกแบบมาให้ใช้งานลักษณะมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่ คือโรเตอร์ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อรับการป้อนกำลังไฟฟ้าจากภายนอก การเพิ่มกำลังเอาต์พุตด้วยวิธีการป้อนกำลังไฟคู่ เปรียบเทียบกับการป้อนกำลังไฟปกติ เท่ากับเป็นการลดขนาดของมอเตอร์ลง หากมีวิธีการที่เหมาะสมจนสามารถเอาชนะข้อเสียที่พบในการทดลอง อาจนำมาซึ่งเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับชนิดใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง ขนาดเล็กลงแต่รับภาระได้เท่ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้งานอยู่ทั่วไป และอาจสามารถนำมอเตอร์เหนี่ยวนำระบบกระตุ้นคู่ใช้แทนมอเตอร์ชิงโครไนส์เพราะความเร็วมอเตอร์ที่เป็นสองเท่าของความเร็วชิงโครไนส์ที่ทุกภาระซึ่งสามารถรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ 10.1 กราฟเปรียบเทียบการทำงานมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้อัปโหลดขึ้นเว็บไซต์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. ดร. พีรศักดิ์ วรสุนทรโอสธ. "เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 วงจรแม่เหล็ก และเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง", สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, 2523.
2. ผศ. สัมพันธ์ หาญชล. "เครื่องกลไฟฟ้า 2 เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ", สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตธนบุรี, 2531.
3. มงคล ทองสงคราม. "เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ", รามการพิมพ์, 2535
4. Denis O'Kelly. "Performance and Control of Electrical Machines", International Editions, McGraw-Hill Company (UK) Limited, 1991.
5. Paul C. Krause , Oleg Wasynczuk, "Electromechanical MOTION DEVICES" , International Editions, McGraw-Hill, Inc., 1989.
6. A.E. Fitzgerald , Charles Kingsley, Jr. , Stephen D. Umans , "Electrical Machinery" , SI Metric Edition, McGraw-Hill, Inc., 1985.
7. G.R. Slemon , A. Straughen, "ELECTRIC MACHINES" , Addison-Wesley Publishing Company, Inc. , 1980.
8. George J. Thaler , Milton L. Wilcox , "ELECTRIC MACHINES Dynamic and Steady state" , International Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1966.
9. P.C. Sen , "PRINCIPLES OF ELECTRIC MACHINES AND POWER ELECTRONICS" , John Wiley & Sons, Inc. , 1989
10. R.E. Steven, "ELECTRICAL MACHINES AND POWER ELECTRONICS" , Van Nostrand Reinhold (UK) Co, Ltd. , 1983
11. J.F. Lindsay , M.H. Rashid , "ELECTROMECHANICS AND ELECTRICAL MACHINERY" , Prentice-Hall , Inc. , Engle Woodcliffs, New Jersey, 1986.
12. Leander W. Matsch , J. Derald Morgan , "ELECTROMAGNETIC AND ELECTROMECHANICAL MACHINERY" , Third Edition , Harper & Row, Publishers, Inc., 1986.
13. M.G. Say, "Alternating current Machines", 5th Edition, Longman Scientific & Technical, England, 1983.
14. M. Kostenko & L. Piotrovsky, "Electrical Machine vol.2", 3rd Edition, Moscow, MIR, 1977.
15. H. Hopwood, "Alternating Current Motor Winding", Bombay, D.B. Tarapore-vala, 1970

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 การทดสอบไว้ภาระ (Open Circuit Test)

แรงดัน 220 volt

กระแส 5.5 Amp.

มุม θ 83.61 องศา

เมื่อทำการทดสอบไว้ภาระ วัดค่าแรงดันต้านโรเตอร์ โดยป้อนกำลังไฟด้านสเตเตอร์ได้ผลดังนี้

V_{sup}	20	60	100	120	140	160	180	200	220
V_r	8	24	39	43	55	64	73	83	92

2 การทดสอบยึดโรเตอร์

แรงดัน 50 volt

กระแส 7.9 Amp.

มุม θ 63 องศา

3 ทำ VI Method เพื่อหาความต้านทาน R_s

	$U_s X_s$	$V_s Y_s$	$W_s Z_s$	$U_s X_s$	$V_s Y_s$	$W_s Z_s$
I(A)	9.4	8.0	10.25	5.9	11.25	6.25
V(V)	22.2	19.45	20.3	15.8	28.65	17.3
R_s	2.36	2.44	2.57	2.68	2.54	2.77

เฉลี่ยค่า $R_s = 2.56 \Omega$

4 ทำ VI Method เพื่อหาความต้านทาน R_r

	$U_r V_r$	$U_r W_r$	$V_r W_r$	$U_r V_r$	$V_r W_r$	$U_r W_r$
I(A)	5.0	5.2	4.75	9.75	9.75	9.75
V(V)	5.74	6.8	6.4	9.8	10.2	10.7
$2R_r$	1.14	1.31	1.35	1.01	1.05	1.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่ออาจารย์ผู้สอน หรือติดต่อฝ่ายวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นาย กฤตยา ยวงเงิน
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 25 ตุลาคม พ.ศ. 2509
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
สถานที่สำเร็จการศึกษา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2530
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	1. การพัฒนาเครื่องทดสอบคุณภาพฉนวน 2. การใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำระบบป้อนกำลังไฟคู่
ประสบการณ์การทำงาน	เจ้าหน้าที่ ฝ่ายปฏิบัติการ และ บริการ บริษัท อินเตอร์กราวด์ เทคโนโลยีส์(ประเทศไทย) จำกัด
อาชีพปัจจุบัน	เจ้าหน้าที่ ฝ่ายปฏิบัติการ และ บริการ บริษัท อินเตอร์กราวด์ เทคโนโลยีส์(ประเทศไทย) จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้