

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น วันที่ 30 เดือน พ.ค. ปี 2566
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

รถไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยพลังงานสนามแม่เหล็ก

TRAIN DRIVEN BY ELECTROMOTIVE FLUX



นายปิติพงศ์

มาตุเวช

นายวิทยา

ผิวผ่อง

นางสาวณัฐรัตน์

เดชทองคำ

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....48323

วัน, เดือน, ปี 10 ต.ค. 2546

.b.....

.i.....

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ปีการศึกษา 2545

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง รถไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยพลังงานสนามแม่เหล็ก

Train Driven by Electromotive Flux

วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของลิเนียร์มอเตอร์
- 2) เพื่อออกแบบรถไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้านเดียว
- 3) เพื่อสร้างแบบจำลองรถไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้านเดียว
- 4) เพื่อทดสอบและทดลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้าน

เดียว

- 5) เพื่อนำแบบจำลองรถไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้านเดียวไปพัฒนาใช้ในการขนส่งในอนาคต

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ความรู้เกี่ยวกับ โครงสร้างและหลักการทำงานของลิเนียร์มอเตอร์
- 2) ได้โครงสร้างต้นแบบรถไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้านเดียว
- 3) ได้ต้นแบบจำลองรถไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้านเดียว
- 4) ได้ผลการทดลองจากการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้านเดียว
- 5) นำแบบจำลองนี้ไปพัฒนาสร้างเป็นรถไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นขนาดใหญ่ที่ใช้ใน

การขนส่งผู้โดยสารในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อหัวข้อ	รถไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยพลังงานสนามแม่เหล็ก	
นักศึกษา	นายปิติพงศ์ มาตุเวช	นายวิทยา ผิวผ่อง
	นางสาวณัฐรัตน์ เดชทองคำ	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิสุทธิ์ อธิพรธรรม	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์สุรพงษ์ สิริพงศ์ดี	
หลักสูตร	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต	
สาขาวิชา	เทคโนโลยีการควบคุมทางอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2545	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้น ซึ่งออกแบบจำลองรถไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้น โดยกำหนดให้สเตเตอร์เป็นตัวรถ และให้โรเตอร์เป็นราง เมื่อจ่ายไฟ 3 เฟสให้แก่ขดลวดที่สเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปในแนวราบ และเกิดแรงผลักดันกับรางทำให้ตัวรถเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้น ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบขนส่งมวลชน เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ประหยัดพลังงาน และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย

II

Thesis Title	Train Drived by Electromotive Flux	
Students	Mr. Pitipong	Matuwet
	Mr. Wittaya	Pungpang
	Miss Nuttarath	Dettongcom
Advisor	Assist.Prof. Wisuit	Atiporntrum
Co- Advisor	Mr. Surapong	Siripongdee
Education Level	Bachelor of science in Industrial Education	
Program in	Industrial Instrument Technology	
Academic Year	2002	

ABSTRACT

This project report is maked to educate operation of linear induction motor. To design model of linear induction motor train. Which given the train body is stator and the Aluminium rail is rotor. When taken the power of electricity 3 phase into stator coil. By the system of the magnetic field of traveling with transverse flux. That cause magnetic flux moving in linear direction and attack force between rail and train body (stator) make that train body move along the rail. Linear induction motor is used to apply in highspeed transport system. Because of high efficiency , saving power ncluding less effected to environment.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากการสนับสนุน ทั้งด้านคำแนะนำ และการช่วยเหลือตลอดจนแนวความคิดในการแก้ปัญหาต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำโครงการนี้ ซึ่งได้รับจากบุคคลต่อไปนี้ บิดา มารดา ของคณะผู้จัดทำ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิสุทธิ์ อธิพรธรรม และ อาจารย์สุรพงษ์ สิริพงษ์ดี ผู้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ

และเพื่อน ๆ ทุกคนที่ช่วยเหลือทั้งร่างกายและแรงใจจนทำให้โครงการนี้ประสบผลสำเร็จ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปริญญานิพนธ์	1
1.2 บิดความสามารถของ โครงการ	2
1.3 เนื้อหาโดยสังเขป	2
บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ	4
2.1 วิวัฒนาการของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้น (LIM)	4
2.2 การประยุกต์ใช้งาน	5
2.2.1 การใช้งานด้านความเร็วสูง (High Speed Applications)	5
2.2.2 การใช้งานด้านความเร็วต่ำ (Low Speed Applications)	5
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของแม่เหล็กไฟฟ้า	7
2.3.1 กฎของการเหนี่ยวนำ	7
2.3.2 การค้นพบของเออร์สเตด	8
2.3.3 กฎมือขวา	8
2.3.4 กฎของแอมแปร์	9
2.3.5 การหาความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกตัวนำ	9
2.3.6 การหาความเข้มสนามแม่เหล็กภายในเนื้อตัวนำ	10
2.3.7 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B)	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.4 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)	
2.4.1 ตัวอย่างวงจรแม่เหล็ก	12
2.4.2 วงจรแม่เหล็กที่ประกอบด้วยวัสดุมากกว่า 1 ชนิด	14
2.5 สภาพการซึมซาบและความต้านทานวงจรแม่เหล็ก	16
2.6 หลักการของการเกิดสนามแม่เหล็ก	17
2.7 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์เชิงเส้น	18
2.8 ที่มาของสมการพื้นฐาน LIM	22
2.9 สมการสนามแม่เหล็กที่แอร์แก๊ป (The Air Gap Field Equation)	41
2.10 กฎเกณฑ์การออกแบบปรับปรุงค่าที่ดี (A Design Criterion : The Goodness Factor)	42
บทที่ 3 การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน	
3.1 การออกแบบความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้น	45
3.2 การออกแบบการพันขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้น	48
3.3 การออกแบบโรเตอร์	49
3.4 การออกแบบวงจรควบคุม	50
บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง	
4.1 การทดสอบโดยวิธี Locked-Rotor Test	51
4.2 ผลการทดสอบโดยวิธี Locked-Rotor Test	51
บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางการแก้ไข และพัฒนา	
5.1 บทสรุป	52
5.2 ปัญหาจากการออกแบบ และสร้าง	52
5.3 แนวทางการพัฒนา	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
ภาคผนวก ก เครื่องต้นแบบ	53
ภาคผนวก ข วงจร และแผ่นวงจรพิมพ์	55
ภาคผนวก ค ฟังก์การทำงาน	57
ภาคผนวก ง รายการอุปกรณ์	59
ภาคผนวก จ คู่มือการใช้งาน	61
ภาคผนวก ฉ รายละเอียด และคุณสมบัติ	64
บรรณานุกรม	67
ประวัติผู้แต่ง	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบเครื่องกลไฟฟ้าแบบหมุนกับแบบเชิงเส้น	21
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ Locked-Rotor Test	51
ตารางที่ ๙.1 คุณสมบัติของขดลวด	65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการจินตนาการของมอเตอร์เชิงเส้น	4
รูปที่ 2.2 การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นมาใช้ในการขนส่ง	5
รูปที่ 2.3 การขับเคลื่อนส่วนต่างๆ ของเครน	6
รูปที่ 2.4 ระบบสายพานลำเลียงวัตถุดิบในการผลิต	6
รูปที่ 2.5 ระบบนำทางเครื่องบินสู่ Run-Way	6
รูปที่ 2.6 ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กถูกกำหนดโดยทิศทางกรไลของกระแส	7
รูปที่ 2.7 ภูมิข้อหาของเฟลมมิ่ง	9
รูปที่ 2.8 กระแสไหลผ่านตัวนำเปลี่ยนตามฟังก์ชัน Sine	9
รูปที่ 2.9 ความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกตัวนำ	10
รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะทาง	11
รูปที่ 2.11 วงจรแม่เหล็กไฟฟ้าตามสมการ $\theta = F/(R_a + R_b)$	12
รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า	14
รูปที่ 2.13 วงจรแม่เหล็กที่ประกอบด้วยวัสดุมากกว่า 1 ชนิด	14
รูปที่ 2.14 วงจรไฟฟ้าตามสมการ $\theta = F/(R_a + R_b)$	16
รูปที่ 2.15 ขั้วแม่เหล็กของ เครื่องกลไฟฟ้า แบบหมุน Direction of Field travel	17
รูปที่ 2.16 ขั้วแม่เหล็กของ เครื่องกลไฟฟ้า แบบเชิงเส้นและสนามแม่เหล็กที่หมุน ในมอเตอร์แบบหมุนก็จะกลายเป็นสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ไปในแนว ราบ (Travelling Wave)	18
รูปที่ 2.17 การเกิดแรงของมอเตอร์ชนิดเชิงเส้น	19
รูปที่ 2.18 แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็ก เมื่อไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เข้าที่สเตเตอร์	20
รูปที่ 2.19 แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่	20
รูปที่ 2.20 รูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส	21
รูปที่ 2.21 แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น	22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.22 การแทนกระแสน้ำผ่าน J' และ J'' เมื่อสมมติว่าไม่มีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ	41
รูปที่ 3.1 ขนาดของสเตเตอร์	48
รูปที่ 3.2 การวางขดลวดในร่องสลีต	49
รูปที่ 3.3 การวางแผนอลูมิเนียมบนราง	48
รูปที่ 3.4 วงจรควบคุม	50
รูปที่ ก.1 การวางขดลวด	54
รูปที่ ก.2 การวางแผนอลูมิเนียมบนรางหลัก	54
รูปที่ ข.1 วงจรควบคุม	56
รูปที่ ค.1 ผังการทำงาน	
รูปที่ จ.1 การวางขดลวด	62
รูปที่ จ.2 วงจรควบคุม	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

มอเตอร์แวนะรนบเป็นเครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่ง อิริค เรทเวท วิศวกรไฟฟ้าชาว อังกฤษเป็นผู้ค้นคว้า โดยดัดแปลงมาจากหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุน (Rotating Machine) ซึ่งมีการเคลื่อนที่ในเชิงมุมและในการใช้งานมีการสูญเสีย (Losses) มาก เนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ เช่น การนำเอาไปใช้ขับสายพานขับเคลื่อนล้อจะเกิดการสูญเสียเนื่องจาก ความฝืด (Friction Loss) และความเฉื่อย (Inertia Loss) แต่เมื่อเกิดการคิดสร้างเครื่องจักรกล ไฟฟ้าเชิงเส้นขึ้นมา ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ทางแนวราบได้โดยไม่มีการเสียดสีกันระหว่างตัวรางกับ ตัวรถจึงทำให้ลดอุปกรณ์บางส่วนและการสูญเสียลงได้ นอกจากนี้จุดที่น่าสนใจยิ่งกว่านี้คือ การ นำเอาเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นมาใช้ในการขนส่ง เนื่องจากคุณสมบัติของมันเคลื่อนที่ได้เร็ว มาก จากการค้นคว้าเรื่องสารแม่เหล็กและวิธีการของตัวนำยิ่งยวดสามารถทำให้เครื่องกลไฟฟ้ามีน้ำ หนักลดลงอย่างมาก

ในการจะศึกษาเรื่องของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นนั้น ผู้ศึกษาจำเป็นจะ ต้องมีความรู้พื้นฐานทางด้านวงจรแม่เหล็กเป็นอย่างดีเสียก่อน ซึ่งหลักการโดยส่วนมากจะเกี่ยว ข้องกับเรื่องสนามแม่เหล็กทั้งสิ้น ซึ่งหลักการของแม่เหล็กขั้นพื้นฐาน พอจะกล่าวรายละเอียดได้ ดังนี้

หลักการและพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นหรือเครื่องกลไฟฟ้าเชิงเส้น เป็นที่รู้จัก กันมานานแล้วและเริ่มมีการวิจัยพัฒนาไปใช้ในงานอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้น โดยส่วนมากจะเน้น ไปทางด้านรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ระบบสายพานในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น เนื่องจากการ นำไปใช้งานจะไม่มีการสูญเสียเนื่องจาก ความฝืด (Friction) แรงเฉื่อย (Inertia Loss) จุดที่ น่าสนใจก็คือการนำเอาเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นมาใช้ในการขนส่ง เนื่องจากคุณสมบัติของ มันสามารถที่จะสร้างแรงขึ้นมาในแนวราบได้ คือการดูดขับเคลื่อนและแรงยกในแนวตั้งซึ่งจะทำให้ เกิดการเคลื่อนที่ได้เร็วมาก แต่การวิจัยค้นคว้าทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นยังมีอุปสรรค

ทางการเงินที่ใช้ในการลงทุนสูงและต้องใช้เทคโนโลยีบางอย่างที่สูงพอสมควรเช่นการวิจัยในเรื่องของตัวนำยิ่งยวด (Super Conductor) ซึ่งจะทำให้ประหยัดพลังงานมากยิ่งขึ้น น้ำหนักก็จะลดลงอย่างมาก โดยปัจจุบันเริ่มจะมีการใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้น สารพวกนี้สามารถให้ความเข้มสนามแม่เหล็กได้หลายสิบเท่าของจุดอิ่มตัวในสารพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferro Magnetics Materials)

1.2 ขีดความสามารถของโรงงาน

- 1) สามารถออกแบบให้รถไฟจำลองนี้ขับเคลื่อน โดยไม่ต้องอาศัยแรงกระทำจากภายนอก
- 2) สามารถวิ่งด้วยความเร็วประมาณ 50 กิโลเมตร/ชั่วโมง
- 3) สามารถบรรทุกน้ำหนักได้มากกว่า 50 กิโลกรัม
- 4) ตัวรถจะถูกจำกัดการวิ่งเฉพาะในรางที่มีแผ่นอลูมิเนียมหรือโลหะอื่นที่เป็นสารแม่เหล็กวางอยู่ และมีขนาดของ Air gap ไม่มากกว่า 5 มิลลิเมตร
- 5) มีผู้ควบคุมการเดินน้ำ-ถอยหลังของตัวรถ

1.3 เนื้อหาโดยสังเขป

เนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็นบทต่างๆ เพื่อสะดวกต่อการศึกษาและทำความเข้าใจ ในแต่ละบทจะประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ ประกอบด้วยเนื้อหาดังนี้ คือ วิวัฒนาการของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น, การประยุกต์ใช้งาน, ทฤษฎีพื้นฐานของแม่เหล็กไฟฟ้า, วงจรแม่เหล็ก, สภาพการซึมซาบและความต้านทานวงจรแม่เหล็ก, หลักการของการเกิดสนามแม่เหล็ก, หลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชิงเส้น, ที่มาของสมการพื้นฐาน LIM, สมการสนามแม่เหล็กที่แอร์เก็บ, กฎเกณฑ์การออกแบบปรับปรุงค่าที่ดี

บทที่ 3 การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน กล่าวถึงเนื้อหาที่เกี่ยวกับการออกแบบความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้น, การออกแบบการพันขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้น, การออกแบบโรเตอร์, การออกแบบวงจรควบคุม

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง ประกอบด้วย การทดสอบและผลการทดสอบโดยวิธี Locked-Rotor Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางการแก้ไข และพัฒนา ในการจัดทำโครงการ ปัญหาที่เกิดขึ้น และได้เสนอแนวทางการแก้ไขปัญหา รวมทั้งแนวทางการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ภาคผนวก ก เครื่องต้นแบบ

ภาคผนวก ข วงจรและแผ่นวงจรพิมพ์

ภาคผนวก ค ผังการทำงาน

ภาคผนวก ง รายการอุปกรณ์

ภาคผนวก จ คู่มือการใช้งาน

ภาคผนวก ฉ รายละเอียดและคุณสมบัติ



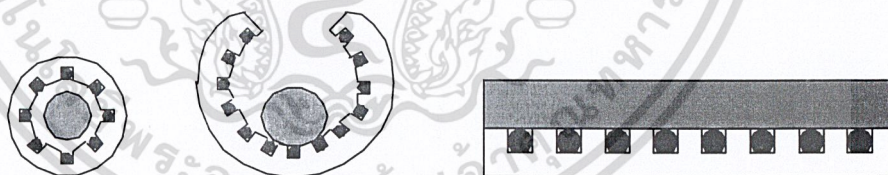
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 วิวัฒนาการของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้น (LIM)

มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้น (LIM) ได้รับการพัฒนามาจากมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหมุน โดยการวิเคราะห์แรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Force) เราจะเปรียบเทียบมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงมุม (Polyphase Rotary Induction Motor) กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น (Linear Induction Motor) ในทางจินตนาการ เมื่อผ่าเครื่องจักรกลแบบหมุน (Rotary Machine) ตามแนวรัศมีแล้วคลี่ออก ส่วน Rotor จะแทนแผ่นตัวนำ (Conduction Plate) ดังรูปที่ 2.1 โดยกำหนดส่วน Stator เป็นด้าน Primary และส่วน Rotor เป็นด้าน Secondary จะพบว่า ด้าน Primary (แกนเหล็กและขดลวด) จะมีความยาวจำกัดค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า “Active Length” ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น (LIM) ปลายทั้งสองด้านของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น (LIM) จะเรียกว่า “Entry End and Exit End” จะเป็นส่วนที่เกิดปรากฏการณ์ “End Effect” (หรือ Edge Effect) ซึ่งจะไม่เกิดในเครื่องจักรกลแบบหมุน (Rotary Machine) ทั่ว ๆ ไปปรากฏการณ์ End Effect นี้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น (LIM)



(ก) มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหมุน (ข) คลี่ออกในแนวรัศมี

(ค) มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

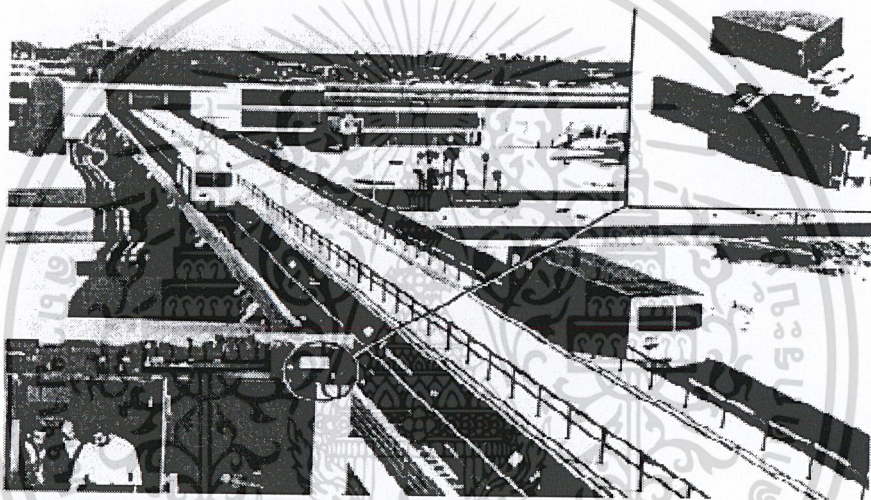
รูปที่ 2.1 กระบวนการจินตนาการของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การประยุกต์ใช้งาน

2.2.1 การใช้งานด้านความเร็วสูง (High Speed Applications)

ใช้กับการขนส่งทางบกซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ดีกว่าเครื่องจักรกลแบบหมุน (Rotary Machine) เพราะไม่ต้องมีชุดเฟืองและเพลลา อย่างเช่นในทวีปเอเชีย ประเทศญี่ปุ่นได้นำหลักการมอเตอร์เชิงเส้นไปพัฒนาเป็นรถไฟความเร็วสูงชื่อว่า MAGLEV (Magnetic Levitation) ซึ่งสามารถวิ่งด้วยความเร็วที่มากกว่า 300 ไมล์/ชั่วโมง



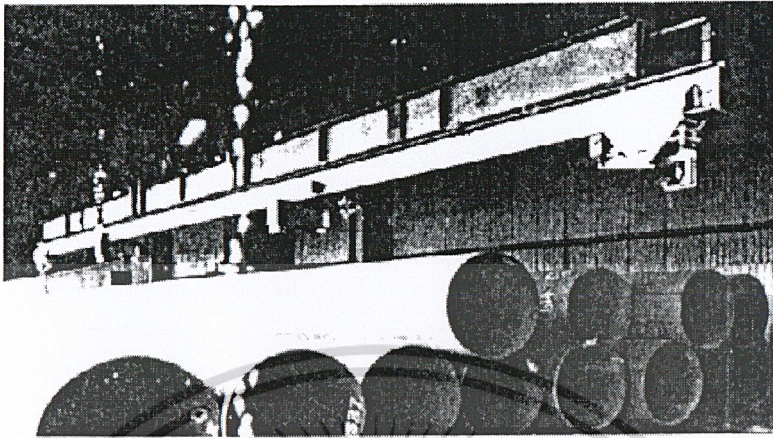
รูปที่ 2.2 การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นมาใช้ในการขนส่ง

2.2.2 การใช้งานด้านความเร็วต่ำ (Low Speed Applications)

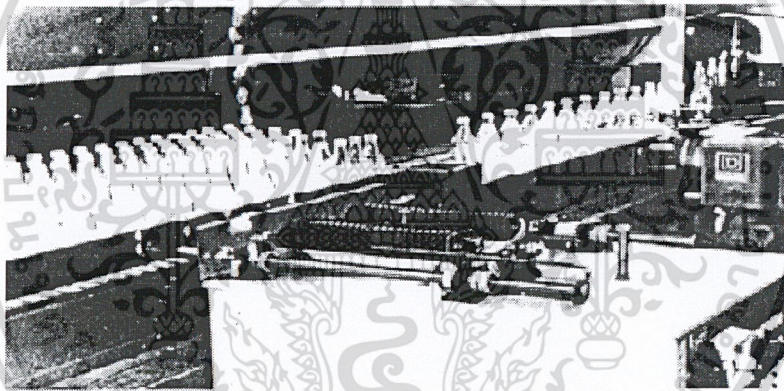
นิยมนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น

- 1) ใช้ในการขับเคลื่อนส่วนต่างๆ ของเครน
- 2) ใช้ในระบบสายพานลำเลียงวัตถุดิบในการผลิต
- 3) ใช้ในการเปิด ปิดประตู
- 4) ใช้ในระบบนำทางเครื่องบินสู่ Run-Way

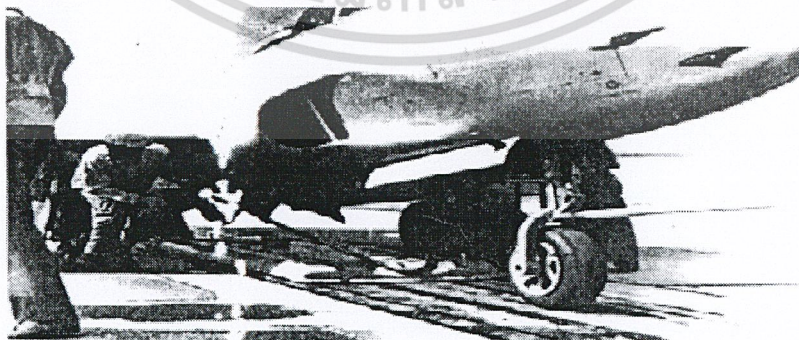
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การขับเคลื่อนส่วนต่างๆ ของเครน



รูปที่ 2.4 ระบบสายพานลำเลียงวัตถุดิบในการผลิต



รูปที่ 2.5 ระบบนำทางเครื่องบินสู่ RUN-WAY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

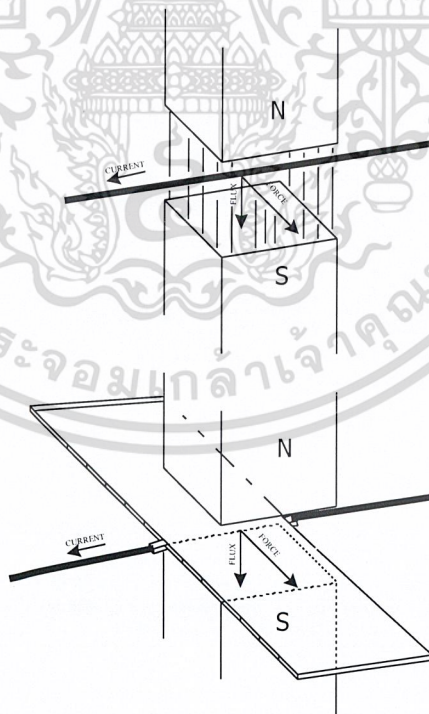
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของแม่เหล็กไฟฟ้า

2.3.1 กฎของการเหนี่ยวนำ

ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ฟาราเดย์ได้เป็นผู้ค้นพบในปี ค.ศ. 1831 ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ว่าด้วยการเกิดการเหนี่ยวนำของแรงเคลื่อนไฟฟ้า และต่อมาได้มีการพัฒนาโดย เคนซ์ ซึ่งพอที่จะสรุปกฎเหล่านี้ได้คือ

กฎข้อที่ 1 กฎของเคนซ์ (Lenz' s Law) กล่าวได้ว่าในวงจรปิดใด ๆ ก็ตามซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสในวงจร ย่อมทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในวงจรนั้น ๆ โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมานั้นจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการไหลของกระแสในวงจรนั้น

กฎข้อที่ 2 กฎของฟาราเดย์ (Faraday ' s Law) กล่าวไว้ว่าการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายของขดลวดหรือลูปนั้น ๆ จะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ล้อมรอบขดลวดนั้น ๆ หรือการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายของเส้นลวดตัวนำอันนั้น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการที่ตัวนำตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กนั้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา



รูปที่ 2.6 ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กถูกกำหนดโดยทิศทางการไหลของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การค้นพบของเออร์สเตด

ในปี ค.ศ. 1891 Hanchristain Oersted ค้นพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) รอบ ๆ ตัวนำและขนาดของแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแปรผันกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำนั้น ขนาดของสนามแม่เหล็กจะแทนด้วยจำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Line of Force) ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย φ

$$\varphi \propto I \tag{2.1}$$

$$\varphi = K \quad (\text{ในอากาศ } K \text{ คงที่}) \tag{2.2}$$

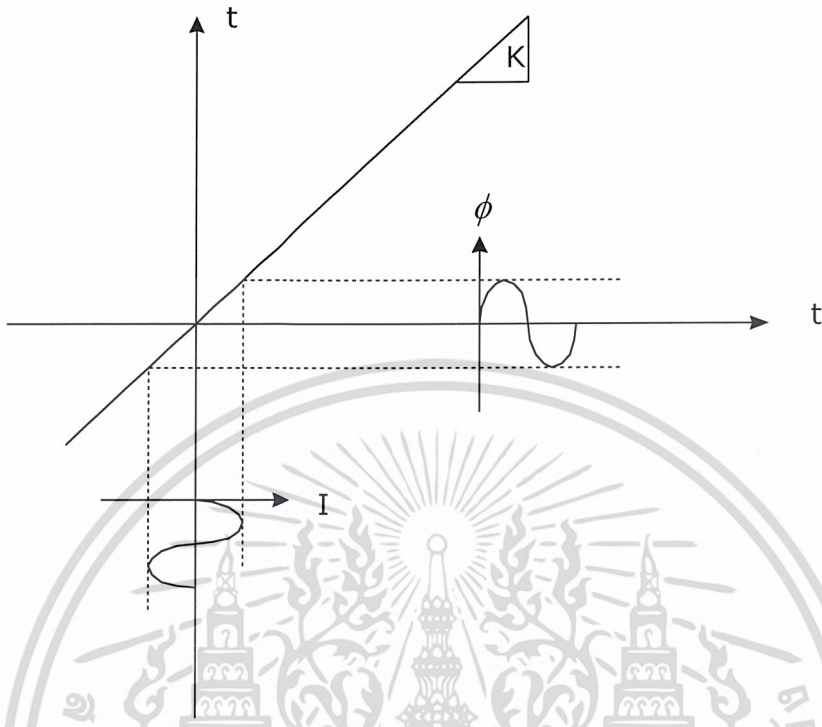
2.3.3 กฎมือขวา

ใช้มือขวากำรอบตัวนำนิ้วหัวแม่มือชี้ทิศทางของกระแสที่ไหลในตัวนำ นิ้วทั้งสี่ที่เหลือจะชี้ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กฎมือขวาของเฟลมมิง

ถ้ากระแสที่ไหลผ่านตัวนำเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันของ Sine เส้นแรงแม่เหล็ก ก็จะเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของ Sine เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กระแสไหลผ่านตัวนำเปลี่ยนตามฟังก์ชัน Sine

2.3.4 กฎของแอมแปร์

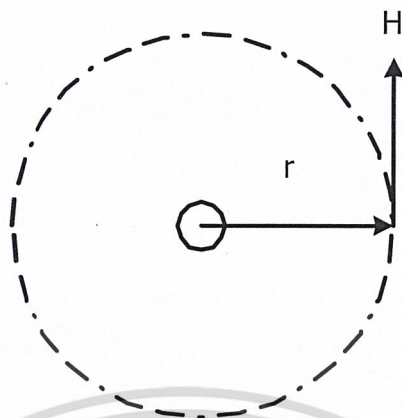
ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้ ผลบวกของผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับความยาวของเส้นปิดในทิศทางของเส้นปิดรอบเส้นปิดใด ๆ มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่เส้นปิดนั้นล้อมอยู่ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\int H \cos dl = \int di \quad (2.3)$$

2.3.5 การหาความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกตัวนำ

เมื่อพิจารณาตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า I แอมแปร์ไหลผ่าน ถ้าเลือกเส้นปิดที่เป็นเส้นรอบวงของวงกลมรัศมี r โดยที่จุดศูนย์กลางอยู่ที่ตัวนำความยาวของเส้นปิดจะมีค่าเท่ากับ $2\pi r$ ดังรูปที่ 2.9 จะล้อมกระแสไฟฟ้า I แอมแปร์ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุดใด ๆ บนเส้นรอบวงจะมีค่าเท่ากัน เนื่องจากห่างจากตัวนำเท่ากัน ให้มีค่าเป็น H ทิศทางของ H ตั้งฉากกับรัศมีของ H ที่ทำกับเส้นปิดทุกตำแหน่งมีค่า $= 0$ องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกตัวนำ

จากกฎของแอมแปร์ จะได้

$$\begin{aligned} \int H \cos dl &= I \\ H \int \cos dl &= I \\ H \times dl &= I \\ H \times 2r\pi &= I \\ H &= \frac{I}{2\pi r} \quad \text{มีหน่วยเป็น A/m} \end{aligned} \tag{2.4}$$

เป็นสูตรการหาความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกตัวนำ จากสมการจะพบว่าความสนามแม่เหล็ก (H) มีค่าสูงสุดที่ผิวของตัวนำ

2.3.6 การหาความเข้มสนามแม่เหล็กภายในเนื้อตัวนำ

ให้ J เป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็น A / m^2

$$J = \frac{I}{A} \tag{2.5}$$

จากกฎของแอมแปร์

$$\int H \cos \theta = \int di \tag{2.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเส้นปิดที่พิจารณาเพื่อหาค่าภายในตัวนำ ทำให้กระแสภายในเส้นปิดมีค่าไม่คงที่และมีค่าน้อยกว่ากระแสที่ผิวตัวนำ
จำนวนกระแสที่เส้นปิดล้อมรอบ

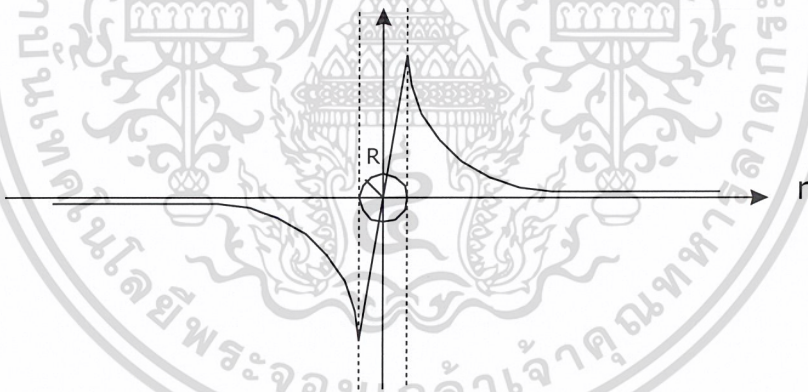
$$I = J \times A \tag{2.7}$$

$$\int Hdl = J \times A \tag{2.8}$$

$$H \times 2r\pi = \frac{I}{R^2} \times r^2 \tag{2.9}$$

จากสมการจะเห็นว่า ความเข้มสนามแม่เหล็กตรงจุดศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับศูนย์ เนื่องจากไม่มีกระแสไฟฟ้าที่ปิดล้อมรอบอยู่เลย

จากสมการหาความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกและภายในตัวนำ สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะทางได้ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะทาง

2.3.7 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B)

คือ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยพื้นที่โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด

$$B = \frac{\varphi}{A} \quad (\text{มีหน่วยเป็น } \text{Wb/m}^2, \text{ Tesla}) \tag{2.10}$$

และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีความสัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ตามสมการ

$$B = \mu H \tag{2.11}$$

หรือ $B = \mu_0 \mu_r$ (2.12)

โดยที่ $\mu = \mu_0 \mu_r$ (2.13)

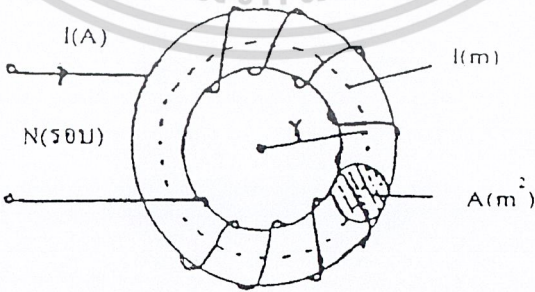
μ_0 = ความซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศ

μ_r = ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์วัสดุ

2.4 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)

2.4.1 ตัวอย่างวงจรแม่เหล็ก

เป็นวงจรแม่เหล็กแบบง่าย รูปวงแหวนพันด้วยขดลวดจำนวน N รอบอย่างสม่ำเสมอ มีความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (μ_r) คงที่ รัศมีเฉลี่ยของวงแหวนเท่ากับ r และมีกระแสไฟฟ้า I แอมแปร์ไหลผ่าน



รูปที่ 2. 11 วงจรแม่เหล็กไฟฟ้าตามสมการ $\theta = \frac{F}{(R_a + R_b)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำกฎของแอมแปร์มาประยุกต์ได้ โดยเลือกเส้นรอบวงซึ่งมีรัศมีเฉลี่ย r เป็นเส้นปิดและความเข้มสนามแม่เหล็กทุก ๆ จุดบนเส้นปิดมีค่าเท่ากัน ดังนั้น จากกฎของแอมแปร์

$$\int H \cos dl = \int_s dl \quad (2.14)$$

พิจารณากระแสไฟฟ้าที่อยู่ภายในเส้นปิด เมื่อพันขดลวดจำนวน N รอบ และมีกระแส I แอมแปร์ จะเห็นว่าภายในเส้นปิดจะมีกระแสรวมทั้งหมดเท่ากับ NI แอมแปร์

$$\int_s dl = NI \quad (2.15)$$

ดังนั้น

$$H \int \cos dl = NI$$

$$H \int dl = NI \quad (\cos = 1)$$

$$H \times 2\pi r = NI$$

$$H = \frac{NI}{2\pi r}$$

$$(2.16)$$

จาก

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

$$(2.17)$$

ดังนั้น

$$\frac{B}{\mu_0 \mu_r} = \frac{NI}{2\pi r}$$

$$B = \frac{NI \mu_0 \mu_r}{2\pi r}$$

$$(2.18)$$

จาก

$$B = \frac{\phi}{A}$$

ดังนั้น

$$\phi = \frac{NI \mu_0 \mu_r A}{2\pi r}$$

$$\phi = \frac{NI \mu_0 \mu_r A}{I} \quad (I = 2\pi r)$$

$$\phi = \frac{NI}{(I / \mu_0 \mu_r A)}$$

$$\phi = \frac{F}{R}$$

$$(2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$F = \text{Magnetomotive Force (mmf.)}$ มีค่าเท่ากับ NI

$R = \text{Magnetic Reluctance}$ มีค่าเท่ากับ $\frac{l}{\mu_0 \mu_r A}$

$\phi = \text{เส้นแรงแม่เหล็ก}$

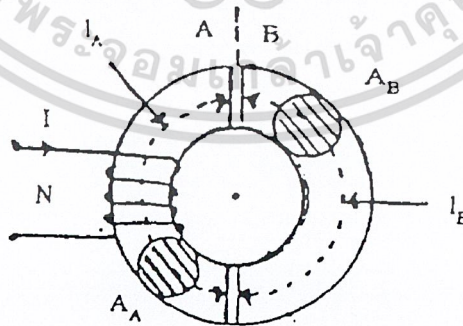
สมการ $\phi = \frac{F}{R}$ เมื่อเปรียบเทียบกับกฎของโอห์มคือ $I = \frac{E}{R}$ ในวงจรไฟฟ้า ซึ่งมี

ความหมายว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้า E ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านวงจร ซึ่งมีค่าความต้านทาน R เป็นตัวจำกัดกระแสไฟฟ้าในวงจร ในทำนองเดียวกันในวงจรแม่เหล็กคล้ายกับว่าสามารถเขียนวงจรแม่เหล็กให้อยู่ในรูปไฟฟ้าได้ดังนี้ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า

2.4.2 วงจรแม่เหล็กที่ประกอบด้วยวัสดุมากกว่า 1 ชนิด



รูปที่ 2.13 วงจรแม่เหล็กที่ประกอบด้วยวัสดุมากกว่า 1 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าวงจรแม่เหล็กรูปวงแหวนประกอบด้วย วัสดุ A และ วัสดุ B ให้ I_a และ I_b เป็นความยาวเฉลี่ยของวงจรแม่เหล็กในส่วนของวัสดุ A และ วัสดุ B

A_a และ A_b เป็นพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ A และ B

U_a และ U_b เป็นความเข้มสนามแม่เหล็กสัมผัสของวัสดุ A และ B

H_a และ H_b เป็นความเข้มสนามแม่เหล็กของวัสดุ A และ B

จากกฎของแอมแปร์ จะได้

$$\int H \cos \theta = \int_s di \tag{2.20}$$

$$H \cdot I_a + H \cdot I_b = NI$$

$$\left(\frac{B}{\mu_o \mu_r}\right) I_a + \left(\frac{B}{\mu_o \mu_r}\right) I_b = NI$$

$$\left(\frac{\phi}{\mu_o \mu_r A_a}\right) I_a + \left(\frac{\phi}{\mu_o \mu_r A_b}\right) I_b = NI$$

จาก

$$R = \frac{l}{\mu_o \mu_r A}$$

ดังนั้น

$$\phi_a R_a + \phi_b R_b = NI \tag{2.21}$$

เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กถูกบังคับให้ไหลภายในพื้นที่หน้าตัดเดียวกันดังนั้น

$$\phi_a = \phi_b \text{ จึงให้เท่ากับ } \phi$$

ก็จะได้ว่า

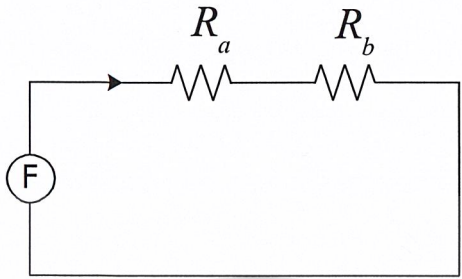
$$\phi (R_a + R_b) = NI$$

$$\phi = \frac{NI}{(R_a + R_b)}$$

$$\phi = \frac{F}{(R_a + R_b)} \tag{2.22}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเขียนให้อยู่ในรูปวงจรไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรไฟฟ้าตามสมการ $\theta = \frac{F}{(R_a + R_b)}$

2.5 สภาพการซึมซาบและความต้านทานวงจรแม่เหล็ก (Permeability and Reluctance)

สภาพการซึมซาบของแม่เหล็ก คือ ตัวกลางตัวหนึ่งที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หรือ เส้นแรงแม่เหล็กได้มากน้อยต่างกันไป เช่น ถ้ามีขดลวดขดหนึ่งพันอยู่รอบแกนไม้ โดยมีกระแสจำนวนหนึ่งไหลผ่านก็จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นจำนวนหนึ่ง ในทำนองเดียวกัน ถ้าใช้แกนเหล็กขนาดเท่ากันเข้าไปแทน จะทำให้ได้เส้นแรงแม่เหล็กมากกว่า แสดงว่าแกนเหล็กมีสภาพการซึมซาบแม่เหล็กสูงกว่าไม้

ความต้านทานด้านแม่เหล็ก คือ ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งอาจจะ เป็นอากาศหรือวัสดุอะไรก็ได้ที่อยู่ในบริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กส่งไปถึง โดยจะมีค่ามากกว่าหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ ความต้านทานนี้จะต้านการส่งเส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจากแหล่งกำเนิดให้ลดลงไปและความต้านทานทางด้านแม่เหล็ก นี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวหนึ่งที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่านไป เพื่อให้ครบวงจรของตัวมันเอง และเป็นสัดส่วนผกผันกับพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลตัดผ่าน รวมทั้งเป็นสัดส่วนผกผันกับความซึมซาบแม่เหล็ก ด้วยดังนั้นจะได้ว่า

$$R = \frac{1}{\mu_o \times A} \quad : \quad \mu_r = 1 \text{ ; ในอากาศ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

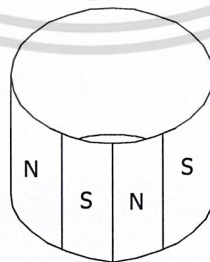
สำหรับวงจรแม่เหล็กที่มีสภาพการซึมซาบตลอด จะได้ว่า

$$R = \frac{1}{\mu \times A} \quad ; \quad \mu = \mu_o \mu_r \quad (2.23)$$

2.6 หลักการของการเกิดสนามแม่เหล็ก

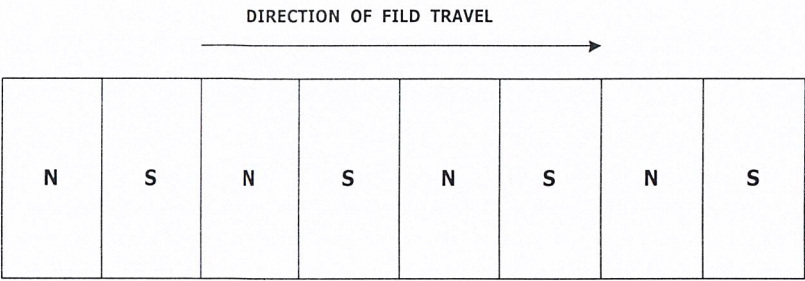
สนามแม่เหล็กหมุนนี้ เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดที่พันอยู่รอบเครื่องกลไฟฟ้า โดยที่กระแสที่ไหลในแต่ละเฟสมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามค่าของตัวที่จ่ายกระแสจึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามไปด้วยซึ่งทำให้เกิดคล้ายกับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในนั้นเกิดจากการหมุนของแม่เหล็กถาวร แต่ความเป็นจริงแล้วมันเกิดจากตำแหน่งของแรงลัพท์ของเส้นแรงแม่เหล็กแปรเปลี่ยนไปตามค่ากระแสที่ได้รับซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

จะเห็นได้ว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้านี้ได้มีการพันขดลวดอยู่ที่ สเตเตอร์ โดยแต่ละเฟสจะมีมุมต่างกันอยู่ 120 องศาไฟฟ้าไปตามลำดับของเฟส 1,2,3 หรือ R,Y,B ตามลำดับดังนั้นเมื่อจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส เข้าไปที่ สเตเตอร์ โดยจะต่อแบบสตาร์ (Star) หรือเดลต้า (Delta) ก็ได้ ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสในแต่ละเฟสที่ขดลวดของตัวอยู่กับที่ ได้รับ แต่ละจุดของการแปรเปลี่ยนนั้น ทำให้เกิดผลลัพท์ของสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตำแหน่งไปด้วยสนามแม่เหล็กหมุน ที่เกิดขึ้นนี้เมื่อเปรียบเทียบกับให้เห็นได้ชัดเจน ก็จะคล้ายกับขั้วแม่เหล็กถาวรสองขั้ว ซึ่งจะถูกหมุนไปรอบโรเตอร์และในกรณีที่เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นซึ่งจะคล้ายกับการผ่านมอเตอร์แบบหมุน แล้วเคลื่อนออกเมื่อผ่านออกแล้วก็จะได้ขั้วแม่เหล็กเรียงกันในแนวราบ ดังรูปที่ 2.15 , 2.16



รูปที่ 2.15 ขั้วแม่เหล็กของเครื่องกลไฟฟ้าแบบหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ขั้วแม่เหล็กของ เครื่องกลไฟฟ้า แบบเชิงเส้นและสนามแม่เหล็กที่หมุนในมอเตอร์แบบ หมุน ก็จะกลายเป็นสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ไปในแนวราบ (Travelling Wave)

2.7 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์เชิงเส้น

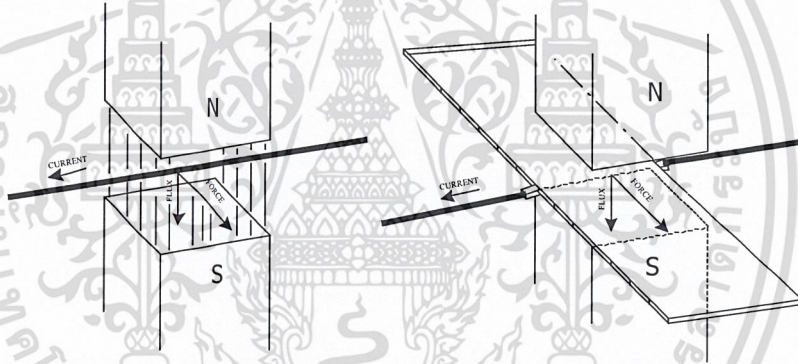
หลักการของเครื่องจักรไฟฟ้าชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (Linear Induction Motor) เป็นที่รู้จักแพร่หลายมาเป็นเวลานาน แต่อย่างไรก็ดีการนำมาประยุกต์ใช้ในทางวิศวกรรมเพิ่งเริ่มมีการค้นคว้าวิจัยทดลองในระยะสี่สิบปีที่ผ่านมา โดยเฉพาะเน้นหนักไปในทางสร้างมอเตอร์เชิงเส้นขับเคลื่อนรถไฟขนส่งชนิดยกความเร็วสูง การทดลองโครงการดังกล่าวต้องอาศัยการสนับสนุนทางการเงินเป็นจำนวนมาก พร้อมทั้งเทคโนโลยีบางอย่าง เช่นการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยตัวนำสมบรูณ์ซึ่งสามารถให้ความเข้มสนามแม่เหล็ก ทางทฤษฎีได้หลายสิบเท่าของจุดอิ่มตัว ในสนามแม่เหล็กพวกเฟอร์โรแมกเนติกธรรมดา เมื่อใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจะ ไม่มีการสูญเสียทางไฟฟ้าเลยแต่ระบบหลักการนี้จำเป็นจะต้องอาศัยอุณหภูมิที่ต่ำมาก โดยอาศัยฮีเลียมเหลวและไฮโดรเจนเหลวเป็นตัวรักษาอุณหภูมิปัจจุบันการค้นคว้าวิจัยทางด้านเชิงกลไฟฟ้าแบบเชิงเส้นได้ มีการค้นคว้าสารตัวใหม่ๆ เพื่อให้มีคุณสมบัติดังกล่าวที่อุณหภูมิสูงขึ้น ปัจจุบันยังคงอยู่ที่ 25 เคลวิน

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น จะประกอบไปด้วยขดลวดพันทางด้านสเตเตอร์ (Primart) และขดลวดทางด้านโรเตอร์ (Secondary) ขดลวดทางด้านสเตเตอร์ที่พันอยู่กับสล็อตจะเป็นแบบ 3 เฟส (Poly Phase Winding) โดยเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟส (AC poly phase) เข้าไปยังขดที่เรียงกันตามเฟสซีเวน อย่างเป็นลำดับ ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ขึ้น ซึ่งจะเคลื่อนที่จากปลายข้างหนึ่งไปยังอีกข้างหนึ่งด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed ; V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย	$V = 2pf$	(เมตร/วินาที)	(2.24)
เมื่อ	$p =$ ความกว้างของโพลพิช	(เมตร)	
	$f =$ ความถี่	(เฮิรต์)	

สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่นี้จะมีลักษณะคล้ายกับ โรเตตัง ฟิลด์ (Rotating Field) ของ เครื่องกลไฟฟ้าแบบทรงกระบอก (Cylindrical Machine) และจากลักษณะของการเกิดการ กระเพื่อมของสนามแม่เหล็กไปตามแนวยาวเช่นนี้จะเหมือนกับการไหลของกระแส น้ำ จึงเรียก อีกอย่างหนึ่งว่า แมกเนติกรีเวอร์ (Magnetic River) จากการเกิดแรงที่ด้านโรเตอร์สามารถอธิบาย ได้ด้วยหลักการของ กฎมือซ้าย และกฎมือขวาของเฟลมมิง โดยแสดงให้เห็นจากรูปดังนี้



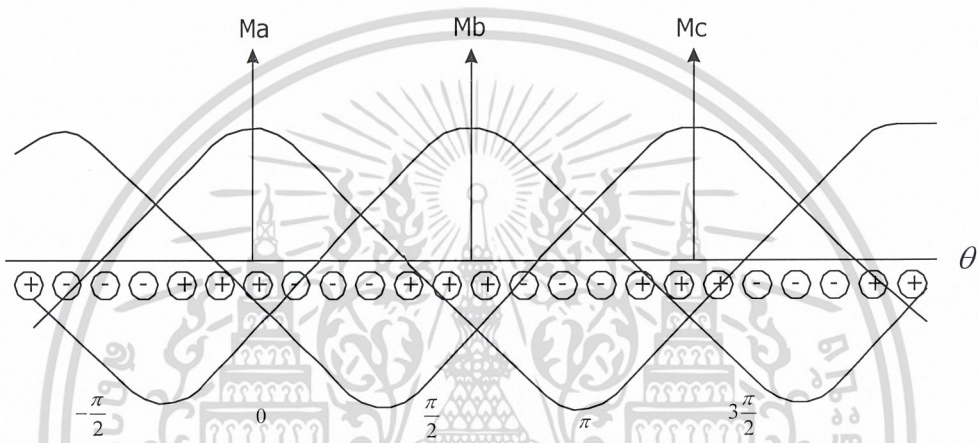
รูปที่ 2.17 การเกิดแรงของมอเตอร์ชนิดเชิงเส้น

จากรูปที่ 2.17 เส้นลวดนี้จะเปรียบเสมือนกับ โรเตอร์และแท่งสี่เหลี่ยมที่มีฟลักซ์แม่เหล็กออกมาจะ เปรียบเสมือนกับสเตเตอร์ ในเครื่องกลไฟฟ้าแบบเชิงเส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่สร้างออกมาจะมีการ เคลื่อนที่ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว สมมติให้การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตามทิศทางของลูก ศรตามรูปที่ 2.18 จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่เหนี่ยวนำ ขึ้นที่ตัวนำกลมซึ่งจะหาทิศทางได้จากกฎ มือขวาและสมมติว่าตัวนำนี้ครบวงจรจะทำให้เกิดกระแสไหลขึ้น และมีทิศทางเข้าไปที่กระดาด จากนั้นก็ให้กฎมือซ้ายหาทิศทางของแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งจะได้แรงในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่ เหล็กเคลื่อนที่ ถ้าสมมติว่าฟลักซ์แม่เหล็กไม่เคลื่อนที่แต่มีกระแสไหลเข้าตัวนำกลม ตัวนำจะ เคลื่อนที่เช่นเดียวกัน แต่เมื่อเคลื่อนที่หลุดพ้นจากบริเวณที่มีฟลักซ์ไปแล้วก็หยุด แต่ในเครื่องกล

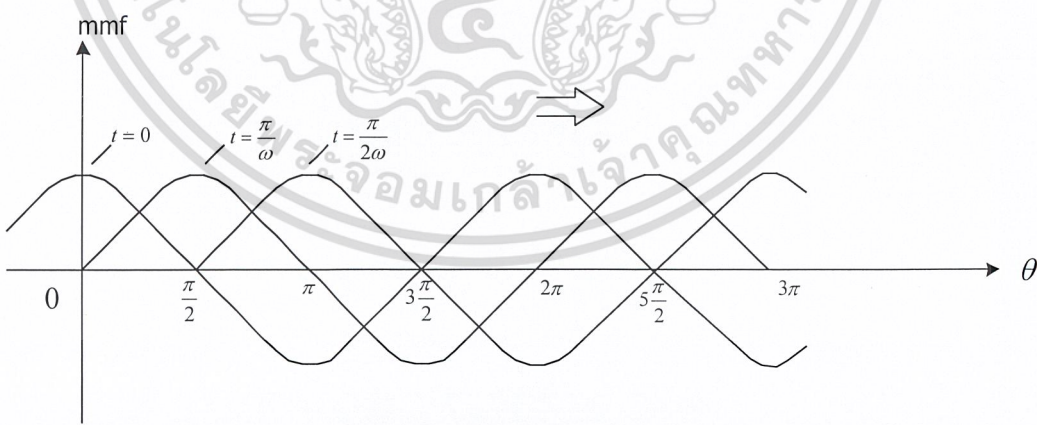
ไฟฟ้าแบบเชิงเส้นนั้นเส้นแรงแม่เหล็ก จะมีการเคลื่อนที่จึงทำให้เกิดแรงผลักดันต่อเนื่องขึ้นด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปเรื่อย ๆ สำหรับแรงยกนั้นสามารถที่จะอธิบาย โดยใช้หลักการที่ว่าเมื่อทางด้านสเตเตอร์สร้างฟลักซ์ขึ้น ที่โรเตอร์ก็จะสร้างฟลักซ์ขึ้นมาในทิศทางตรงกันข้ามจึงเหมือนกับขั้วแม่เหล็กเดียวกัน จึงทำให้เกิดแรงผลักขึ้นได้

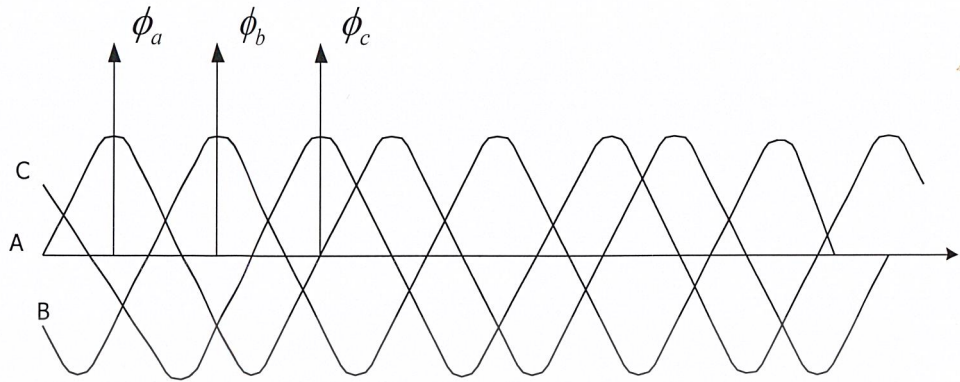
เราสามารถอธิบายการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าชนิดนี้ได้ ก็อาศัยการเคลื่อนที่แม่เหล็กไฟฟ้าตามแนวเส้นตรง โดยอาศัยการจ่ายไฟกระแสสลับ 3 เฟส ป้อนเข้าไปในขดลวดทั้งสามอัน เป็นผลทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.19 และ รูปที่ 2.20



รูปที่ 2.18 แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็ก เมื่อไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เข้าที่สเตเตอร์



รูปที่ 2.19 แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่



รูปที่ 2.20 รูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบเครื่องกลไฟฟ้าแบบหมุนกับแบบเชิงเส้น

เครื่องกลไฟฟ้าแบบหมุน	เครื่องกลไฟฟ้าแบบเชิงเส้น
1) โครงสร้างเป็นรูปทรงกระบอก	1) โครงสร้างจะมีรูปร่างเป็นเชิงเส้น
2) สนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่แบบหมุน	2) สนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่เป็นแนวตรง
3) ขดลวดทางด้านสเตเตอร์จะเป็นส่วนที่อยู่กับที่	3) ขดลวดทางด้านสเตเตอร์จะเป็นส่วนที่อยู่กับที่ หรือเคลื่อนที่ก็ได้
4) โรเตอร์จะเป็นแบบกรงกระรอกมีแผ่นอลูมิเนียมฝังอยู่ใต้ผิวของโรเตอร์โดยโรเตอร์จะเป็นตัวเคลื่อนที่เป็นวงกลม	4) โรเตอร์แผ่นอลูมิเนียมวางอยู่ในแนวระนาบ ซึ่งจะอยู่กับที่ หรือเคลื่อนที่ก็ได้
5) เคลื่อนที่โดยการมี Shaft ฝังอยู่เป็นแกนกลางของโรเตอร์	5) เคลื่อนที่แบบร่อนนำร่องและให้สเตเตอร์หรือโรเตอร์เป็นตัวเคลื่อนที่ก็ได้
6) มีแบร์ริงรองรับแกนโรเตอร์เพื่อให้การหมุนคล่องตัวและสมดุล	6) มีล้อยึดที่ตัวรถหรือโรเตอร์เพื่อให้การเคลื่อนที่คล่องตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ที่มาของสมการพื้นฐาน LIM

ก่อนการออกแบบรายละเอียดต่าง ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น (LIM) เราจะต้องมาหาวิธีวิเคราะห์มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น (LIM) อย่างสั้นๆ โดยตอนแรกเราจะพิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นในอุดมคติ (Idealized LIM) (ไม่คิด End Effect)

โดยการวิเคราะห์ Electrical Machine จะมีอยู่ 2 วิธีคือ

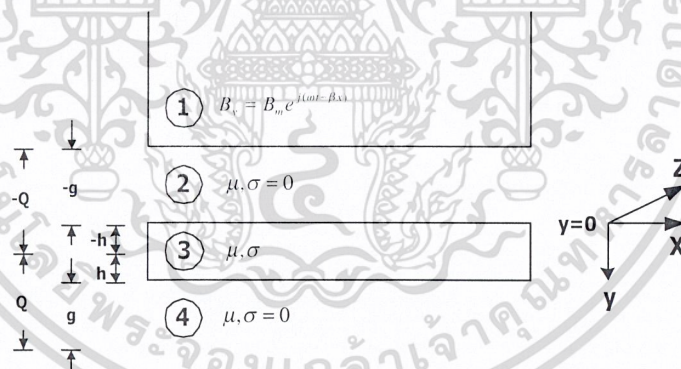
- 1) The Lumped-parameter Circuit Theory Method
- 2) Distributed- parameter Field Theory Method

แต่วิธี 1) จะสะดวกในการวิเคราะห์มากกว่า โดยใช้ Maxwell's Equation และ Electromagnetic Field Theory

เราจะวิเคราะห์ไป 2 แนวทาง คือ

- 1) ให้ส่วน Secondary มีความหนาเป็น Infinity
- 2) ให้ส่วน Secondary มีความหนาจำกัด

2.8.1 การคำนวณแรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น



รูปที่ 2.21 แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

ดังรูปที่ 2.21 Model นี้ มีความหนาทางด้าน Secondary เป็น h จุด Coordinate Origin อยู่ที่ผิวของด้าน Secondary โดยข้อกำหนด 10 ข้อจากก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ นอกจากนี้ Air Gap จะถูกสมมติให้เล็กมากจนไม่เกิดการพอง หรือแยกสลาย (Fringing or Decay) ของ B-Field ใน Air Gap โดยรูปที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชั้นที่ 1 Primary
- ชั้นที่ 2 Air Gap
- ชั้นที่ 3 Secondary
- ชั้นที่ 4 Air below The Secondary

มีข้อกำหนดเพื่อให้่ายต่อการวิเคราะห์ดังนี้

- 1) ทุกชั้นจะขยายไปในทิศทาง x อย่างไม่มีสิ้นสุด (Infinity)
- 2) ชั้น Secondary ขยายไปในทิศทาง y อย่างไม่มีสิ้นสุด
- 3) Excitation Winding อยู่ใน Slot ที่ชั้น Primary
- 4) ชั้น Secondary จะเคลื่อนที่ไปในทิศทาง x เท่านั้น
- 5) ค่าคงที่ต่างๆ ทางกายภาพ (The Physical Constant) จะคงที่ตลอดเช่น ระยะ Air Gap ความกว้าง , ความหนา
- 6) สาร ferromagnetic จะไม่เกิด Saturated
- 7) การเปลี่ยนใดๆในทิศ z จะไม่สนใจ
- 8) กระแสจะไหลในทิศ z เท่านั้น
- 9) ด้าน Primary ทำจาก Laminated Core ซึ่ง Conductivity ในทิศทาง z จะไม่คิด
- 10) การ Flux ใน Air Gap เป็น Sinusoidal Curve

จากสมการของ Maxwell’s Equation ในรูป Differential Form จะได้

Static Field:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot D &= \rho V, & \nabla \times E &= 0 \\ \nabla \cdot B &= 0, & \nabla \times H &= J \end{aligned}$$

(2.25)

Time Changing Field

$$\nabla \times H = J + \left(\frac{\partial D}{\partial t} \right)$$

(2.26)

$$\nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t}$$

(2.27)

The force Law (แรง F ที่เกิดจากประจุไฟฟ้า Q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว U ผ่านสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F=Q(E+U \times B)$$

newtons

Ohm’s Law (สำหรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J ที่เกิดจากประจุไฟฟ้า Q เคลื่อนที่อยู่ที่)

ในตัวนำไฟฟ้า $J = \sigma E \qquad A/m^2$

ในสนามแม่เหล็ก E และสนามแม่เหล็ก B :

$$J = \sigma(E + U \times B) \qquad A/m^2 \qquad (2.28)$$

เมื่อ $\sigma = \text{Conductivity mhos/m}^2$

จากสมการเหล่านี้ เราจะสามารถหาที่มาของสมการพื้นฐานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน LIM จากรูปที่ 2.21 ถ้าค่า Displacement Current Density D/t ไม่คิด (ที่ค่า Power Frequency) ดังนั้นสมการ (2.2) จะได้

$$\nabla \times H = J \qquad (2.29)$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \left(\frac{B}{\mu} \right) &= J \\ \nabla \times B &= \mu J \\ &= \mu \sigma (E + U \times B) \end{aligned} \qquad (2.30)$$

ในเรื่องสนามแม่สนามเหล็กสถิตย์ จะหา Magnetic Vector Potential (A) ซึ่งเป็นศักดาทางไฟฟ้าที่เกิดจาก Current Distribution

โดย $B = \nabla \times A \qquad (2.31)$

แทนสมการ(2.31) ใน(2.30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla \times (\nabla \times A) = \mu \sigma (E + U \times B) \qquad (2.32)$$

$$(\nabla \cdot A) - \nabla^2 A = \mu \sigma \left(-\frac{\partial A}{\partial t} + U \times (\nabla \times A) \right) \quad (2.33)$$

แต่ $\nabla \cdot D = 0$ (เพราะไม่มีประจุไฟฟ้าอิสระ) ดังนั้นก็สามารถสมมติได้ว่า $\nabla \cdot A = 0$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} -\nabla^2 A &= \mu \sigma \left(-\frac{\partial A}{\partial t} + U \times (\nabla \times A) \right) \\ \nabla^2 A &= \mu \sigma \left(-\frac{\partial A}{\partial t} + U \times (\nabla \times A) \right) \end{aligned} \quad (2.34)$$

เมื่อมีการกระตุ้นที่เหมาะสม ทางด้าน Primary จะสร้าง Traveling Field ใน Air Gap ซึ่งจะเคลื่อนที่ในทิศทาง y คือ

$$B_y = B_m e^{j(\omega t - \rho x)} \quad (2.35)$$

โดยให้ $\frac{\partial}{\partial x} = -j\beta$ และ $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$ และ A จะขึ้นในทิศทางแกน z โดยไม่เป็นฟังก์ชันของ z

$$A_{(x,y,t)} = A(y) e^{j(\omega t - \beta x)} a_z \quad (2.36)$$

เขียนสมการ (2.34) ใหม่ได้

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = \mu \sigma \left(j\omega A_z + \frac{U \times \partial A_z}{\partial x} \right) \quad (2.37)$$

โดยกำหนดให้

$$A(y) e^{j(\omega t - \beta x)} = A_z \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
และ $U = U_x a_x$ (2.39)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้สมการ (2.36) เป็นสมการพื้นฐาน ผลลัพธ์ของสมการจะขึ้นอยู่กับกำการจัดขอบเขต และปริมาณของข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์แม่เหล็กไฟฟ้า Machine โดยใน Model ที่เรา ใช้จะมี Air Gab Field ที่เกิดจากทางด้าน Primary ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว Synchronous Speed, U_s และมี Slip, S กับความเร็วด้าน Secondary เป็น U_x โดย

$$U_x = (1-s)U_s \quad (2.40)$$

จาก $\frac{\partial}{\partial x} = -j\beta$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} &= [(-j\beta)^2 (A_z)] \\ &= A_z \beta^2 \end{aligned} \quad (2.41)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (2.37) จะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = A_z \beta^2 \left(1 + \frac{j\mu\sigma_s U_s}{\beta} \right) \quad (2.42)$$

กำหนดให้

$$\alpha^2 = \beta^2 \left(1 + \frac{j\mu\sigma_s U_s}{\beta} \right) \quad (2.43)$$

ในชั้นที่ 2 และ ชั้นที่ 4 (Region 2,4) ซึ่งเป็น Air Gab มี $= 0$ สมการ (2.41) จะถูกลดเหลือ

$$\frac{d^2 A_z}{dy^2} - \beta^2 A_z = 0 \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในชั้นที่ 3 (Region 3) ซึ่งเป็นด้าน Secondary สมการ (2.41) จะเป็น

$$\frac{d^2 A_z}{dy^2} - \alpha^2 A_z = 0 \tag{2.45}$$

ทำการแก้สมการ Second-order differential equation สามารถเขียนได้ว่า

$$A_{z2} = \left(C_1 e^{\beta_y} + C_2 e^{-\beta_y} \right) e^{j(\omega t - \beta_x)} \tag{2.46}$$

$$A_{z3} = \left(C_3 e^{\alpha_y} + C_4 e^{-\alpha_y} \right) e^{j(\omega t - \beta_x)} \tag{2.47}$$

$$A_{z4} = \left(C_5 e^{\beta_y} + C_6 e^{-\beta_y} \right) e^{j(\omega t - \beta_x)} \tag{2.48}$$

ทำการแก้สมการ หาค่าคงที่ C_3 และ C_4 โดยเราใช้สภาพขอบเขตดังนี้

$$\begin{aligned} y = Q, & \quad B_{y4} = B_m e^{j(\omega t - \beta_x)} \\ y = -Q, & \quad B_{y2} = B_m e^{j(\omega t - \beta_x)} \\ y = h, & \quad B_{y3} = B_{y4} \text{ และ } H_{y3} = H_{y4} \\ y = -h, & \quad B_{y2} = B_{y3} \text{ และ } H_{y2} = H_{y3} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (2.31)

$$B = \nabla \times A$$

จาก
$$\nabla \times A = \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ $\nabla \times A = \nabla \times A$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อกำหนด ข้อที่ 7 จะได้

$$\nabla \times A_z = \frac{\partial A_z}{\partial y} a_x - \frac{\partial A_z}{\partial x} a_y \quad (2.49)$$

ดังนั้นจะได้

$$B_2 = \beta (C_1 e^{\beta_y} - C_2 e^{-\beta_y}) e^{j(\omega t - \beta_x)} a_x + j\beta (C_1 e^{\beta_y} + C_2 e^{-\beta_y}) e^{j(\omega t - \beta_x)} a_y \quad (2.50)$$

$$B_3 = \beta (C_3 e^{\beta_y} - C_4 e^{-\beta_y}) e^{j(\omega t - \beta_x)} a_x + j\beta (C_3 e^{\beta_y} + C_4 e^{-\beta_y}) e^{j(\omega t - \beta_x)} a_y \quad (2.51)$$

$$B_4 = \beta (C_5 e^{\beta_y} - C_6 e^{-\beta_y}) e^{j(\omega t - \beta_x)} a_x + j\beta (C_5 e^{\beta_y} + C_6 e^{-\beta_y}) e^{j(\omega t - \beta_x)} a_y \quad (2.52)$$

พิจารณาที่ $y = Q, B_{y4} = B_m e^{j(\omega t - \beta_x)}$ โดยหาจากสมการ (2.49)

$$\begin{aligned} B_{y4} &= j\beta (C_5 e^{\beta_y} + C_6 e^{-\beta_y}) e^{j(\omega t - \beta_x)} \\ B_m e^{j(\omega t - \beta_x)} &= j\beta (C_5 e^{\beta_y} + C_6 e^{-\beta_y}) e^{j(\omega t - \beta_x)} \\ B_m &= j\beta (C_5 e^{\beta_y} + C_6 e^{-\beta_y}) e^{j(\omega t - \beta_x)} \\ C_5 e^{\beta_Q} + C_6 e^{-\beta_Q} &= \frac{B_m}{j\beta} \end{aligned} \quad (2.53)$$

พิจารณาที่ $y = -Q, B_{y2} = B_m e^{j(\omega t - \beta_x)}$ โดยหาจากสมการ (2.49), (2.50)

$$\begin{aligned} B_{y2} &= j\beta (C_1 e^{\beta_Q} + C_2 e^{-\beta_Q}) e^{j(\omega t - \beta_x)} \\ B_m e^{j(\omega t - \beta_x)} &= j\beta (C_1 e^{\beta_Q} + C_2 e^{-\beta_Q}) e^{j(\omega t - \beta_x)} \\ B_m &= j\beta (C_1 e^{\beta_Q} + C_2 e^{-\beta_Q}) e^{j(\omega t - \beta_x)} \\ C_1 e^{\beta_Q} + C_2 e^{-\beta_Q} &= \frac{B_m}{j\beta} \end{aligned} \quad (2.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาที่ $y = h$, $B_{y3} = B_{y4}$ และ $H_{y3} = H_{y4}$ โดยหาจากสมการ (2.51),(2.52)

$$\begin{aligned} j\beta\left(C_3e^{\alpha_h}+C_4e^{-\alpha_h}\right)e^{j(\omega t-\beta x)} &= j\beta\left(C_5e^{\beta_h}+C_6e^{-\beta_h}\right)e^{j(\omega t-\beta x)} \\ C_3e^{-\beta_h}+C_4e^{\beta_h} &= C_5e^{-\alpha_h}+C_6e^{\alpha_h} \end{aligned} \tag{2.55}$$

และที่ $H_{x3} = H_{x4}$ จะได้ว่า

$$H_{x3} = \frac{B_{x3}}{\mu} \tag{2.56}$$

$$H_{x4} = \frac{B_{x4}}{\mu_o} \tag{2.57}$$

จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\alpha\left(C_3e^{\alpha_h}-C_4e^{-\alpha_h}\right)e^{j(\omega t-\beta x)}}{\mu} &= \frac{B\left(C_5e^{\beta_h}-C_6e^{-\beta_h}\right)e^{j(\omega t-\beta_h)}}{\mu_o} \\ C_3e^{\alpha_h}-C_4e^{-\alpha_h} &= \frac{\mu B}{\alpha\mu_o}\left(C_5e^{\beta_h}-C_6e^{-\beta_h}\right) \end{aligned} \tag{2.58}$$

พิจารณาที่ $y = h$, $B_{y2} = B_{y3}$ และ $H_{y2} = H_{y3}$ โดยหาจากสมการ (2.51),(2.52)

$$\begin{aligned} j\beta\left(C_1e^{\alpha_h}+C_2e^{-\alpha_h}\right)e^{j(\omega t-\beta x)} &= j\beta\left(C_3e^{\beta_h}+C_4e^{-\beta_h}\right)e^{j(\omega t-\beta x)} \\ C_1e^{-\beta_h}+C_2e^{\beta_h} &= C_3e^{-\alpha_h}+C_4e^{\alpha_h} \end{aligned} \tag{2.59}$$

และที่ $H_{x3} = H_{x4}$ จะได้ว่า

$$H_{x2} = \frac{B_{x2}}{\mu_o} \tag{2.60}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{x3} = \frac{B_{x3}}{\mu} \quad (2.61)$$

จะได้ว่า

$$\frac{B(C_1 e^{\alpha_h} - C_2 e^{-\alpha_h}) e^{j(\omega t - \beta_x)}}{\mu_0} = \frac{\alpha(C_3 e^{\beta_h} - C_4 e^{-\beta_h}) e^{j(\omega t - \beta_h)}}{\mu} \quad (2.62)$$

$$C_1 e^{-\beta_h} + C_2 e^{\beta_h} = C_3 e^{-\alpha_h} + C_4 e^{\alpha_h}$$

ทำการแก้สมการ จากสมการที่ (2.53) = (2.54)

$$\frac{B_m}{j\beta} = C_5 e^{\beta_0} + C_6 e^{-\beta_0} = C_1 e^{\beta_0} + C_2 e^{-\beta_0} \quad (2.63)$$

จะได้ว่า $C_5 = C_2$ และ $C_6 = C_1$

นำสมการที่ (2.63) แทนค่าลงในสมการที่ (2.55)

$$C_3 e^{\alpha_h} + C_4 e^{-\alpha_h} = C_2 e^{-\beta_h} + C_1 e^{\beta_h} \quad (2.64)$$

จากสมการที่ (2.64) = (2.59)

$$C_3 e^{\alpha_h} + C_4 e^{-\alpha_h} = C_3 e^{-\alpha_h} + C_4 e^{\alpha_h}$$

$$\therefore C_3 = C_4 \quad (2.65)$$

จากสมการที่ (2.59) และ สมการที่ (2.62)

$$C_1 e^{-\beta_h} = C_3 e^{-\alpha_h} + C_4 e^{\alpha_h} - C_2 e^{\beta_h} \quad (2.66)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_1 e^{-\beta_h} = \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} C_3 e^{-\alpha_h} + C_4 e^{\alpha_h} + C_2 e^{\beta_h} \quad (2.67)$$

จากสมการที่ (2.66) = (2.67)

$$C_3 e^{-\beta_h} + C_4 e^{\alpha_h} - C_2 e^{\beta_h} = \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} (C_3 e^{-\beta_h} + C_4 e^{\alpha_h}) + C_2 e^{\beta_h}$$

$$C_3 e^{-\alpha_h} \left[1 - \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right] + C_4 e^{\alpha_h} \left[1 + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right] - 2C_2 e^{\beta_h} = 0 \quad (2.68)$$

จากสมการที่ (2.54)

$$C_2 = \left[\frac{B_m}{j\beta} - C_1 e^{-\beta_Q} \right] \frac{1}{e^{\beta_Q}}$$

$$= \left[\frac{B_m}{j\beta} - C_1 e^{-\beta_Q} \right] \frac{1}{e^{\beta_Q}}$$

นำสมการที่ (2.69) แทนค่าในสมการที่ (2.68)

$$C_3 e^{-\alpha_h} \left[1 - \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right] + C_4 e^{\alpha_h} \left[1 + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right] - 2C_2 e^{\beta_h} = 2e^{\beta_h} \left[\frac{B_m}{j\beta} - C_1 e^{-\beta_Q} \right] \frac{1}{e^{\beta_Q}}$$

$$C_3 e^{-\alpha_h} \left[1 - \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right] + C_4 e^{\alpha_h} \left[1 + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right] - 2C_2 e^{\beta_h} = 2 \frac{B_m}{j\beta} e^{\beta(h-Q)} - 2C_1 \quad (2.69)$$

จากสมการที่ (2.55) และสมการที่ (2.58)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $C_5 e^{\beta_h} = C_3 e^{\alpha_h} + C_4 e^{-\alpha_h} - C_6 e^{-\beta_h}$
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
C_5 e^{\beta_h} &= (C_3 e^{\alpha_h} + C_4 e^{-\alpha_h}) \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} + C_6 e^{-\beta_h} \\
C_3 e^{\alpha_h} + C_4 e^{-\alpha_h} - C_6 e^{-\beta_h} &= \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} C_3 e^{\alpha_h} - \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} C_4 e^{-\alpha_h} + C_6 e^{-\beta_h} \\
C_3 e^{-\alpha_h} \left[1 - \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right] + C_4 e^{-\alpha_h} \left[1 + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right] &= 2C_6 e^{-\beta_h}
\end{aligned} \tag{2.70}$$

จากสมการที่ (2.63) จะได้ $C_6 = C_1$ นั่นคือ

$$\begin{aligned}
C_3 e^{-\alpha_h} \left[1 - \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right] + C_4 e^{-\alpha_h} \left[1 + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right] &= 2C_6 e^{-\beta_h} \\
\therefore 2C_1 &= e^{\beta_h} \left[C_3 e^{\alpha_h} \left[1 - \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right] + C_4 e^{-\alpha_h} \left[1 + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right] \right]
\end{aligned} \tag{2.71}$$

นำสมการที่ (2.72) แทนค่าในสมการที่ (2.70)

$$\begin{aligned}
C_3 e^{\alpha_h} \left[1 - \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right] + C_4 e^{-\alpha_h} \left[1 + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right] &= \frac{2B_m}{j\beta} e^{\beta(h-Q)} - e^{\beta_h} e^{\beta(h-2Q)} \\
&\left[C_3 e^{\alpha_h} \left(1 - \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right) + C_4 e^{-\alpha_h} \left(1 + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right) \right]
\end{aligned} \tag{2.72}$$

$$= \frac{2B_m}{j\beta} e^{\beta(h-Q)} - e^{\beta_h} e^{\beta(h-2Q)} \left[C_3 e^{\alpha_h} \left(1 - \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right) + C_4 e^{-\alpha_h} \left(1 + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right) \right]$$

$$\frac{2B_m}{j\beta} e^{\beta(h-Q)} = C_3 \left(1 - \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right) \left((e^{\beta(2h-2Q)} e^{\alpha_h}) + e^{-\alpha_h} \right) + C_4 \left(1 + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(e^{\alpha_h} + \left(e^{-\alpha_h} \cdot e^{\beta(2h-2Q)} \right) \right) \quad (2.73)$$

จากรูปที่ 2.21 ได้ $Q = g + h$ และ $h - Q = -g$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{2B_m}{j\beta} e^{\beta(h-Q)} &= C_3 \left(1 - \frac{\mu\alpha}{\mu\beta} \right) \left(\left(e^{\beta(2h-2Q)} \cdot e^{\alpha_h} \right) + e^{-\alpha_h} \right) + C_4 \left(1 + \frac{\mu\alpha}{\mu\beta} \right) \left(e^{\alpha_h} + \left(e^{-\alpha_h} \cdot e^{\beta(2h-2Q)} \right) \right) \\ \frac{2B_m}{j\beta} e^{\beta g} &= C_3 \left(1 - \frac{\mu\alpha}{\mu\beta} \right) \left(\left(e^{-2\beta g} \cdot e^{\alpha_h} \right) + e^{-\alpha_h} \right) + C_4 \left(1 + \frac{\mu\alpha}{\mu\beta} \right) \left(e^{\alpha_h} + \left(e^{-\alpha_h} \cdot e^{-2\beta g} \right) \right) \end{aligned} \quad (2.74)$$

นำสมการที่ (2.65) แทนค่าในสมการที่ (2.74) จะได้

$$\begin{aligned} C_3 \left[\left(1 - \frac{\mu\alpha}{\mu\beta} \right) \left(\left(e^{-2\beta g} \cdot e^{\alpha_h} \right) + e^{-\alpha_h} \right) + \left(1 + \frac{\mu\alpha}{\mu\beta} \right) \left(e^{\alpha_h} + \left(e^{-\alpha_h} \cdot e^{-2\beta g} \right) \right) \right] &= \frac{2B_m}{j\beta} e^{-\beta g} \\ \therefore C_3 &= \frac{\frac{2B_m}{j\beta} e^{-\beta g}}{\left(1 - \frac{\mu\alpha}{\mu\beta} \right) \left(\left(e^{-2\beta g} \cdot e^{\alpha_h} \right) + e^{-\alpha_h} \right) + \left(1 + \frac{\mu\alpha}{\mu\beta} \right) \left(e^{\alpha_h} + \left(e^{-\alpha_h} \cdot e^{-2\beta g} \right) \right)} \end{aligned} \quad (2.75)$$

พิจารณาที่

$$\begin{aligned} &\left[\left(1 - \frac{\mu\alpha}{\mu\beta} \right) \left(\left(e^{-2\beta g} \cdot e^{\alpha_h} \right) + e^{-\alpha_h} \right) + \left(1 + \frac{\mu\alpha}{\mu\beta} \right) \left(e^{-\alpha_h} \left(e^{-\alpha_h} \cdot e^{-2\beta g} \right) \right) \right] \\ &= \left[e^{-\alpha_h} - \frac{\mu\alpha}{\mu\beta} e^{-\alpha_h} + \left(e^{-2\beta g} \cdot e^{\alpha_h} \right) - \frac{\mu\alpha}{\mu\beta} \left(e^{-2\beta g} \cdot e^{\alpha_h} \right) \right] + \\ &\left[e^{\alpha_h} + \frac{\mu\alpha}{\mu\beta} e^{\alpha_h} + \left(e^{-\alpha_h} \cdot e^{-2\beta g} \right) - \frac{\mu\alpha}{\mu\beta} \left(e^{-\alpha_h} \cdot e^{-2\beta g} \right) \right] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} &= \left(e^{\alpha_h} + e^{-\alpha_h} \right) + \left[e^{-2\beta_g} \left(e^{\alpha_h} + e^{-\alpha_h} \right) \right] + \left[\frac{\mu_o \alpha}{\mu \beta} \left(e^{\alpha_h} - e^{-\alpha_h} \right) \right] - \\ &\quad \left[\frac{\mu_o \alpha}{\mu \beta} e^{-2\beta_g} \left(e^{\alpha_h} - e^{-\alpha_h} \right) \right] \\ &= \left(e^{\alpha_h} + e^{-\alpha_h} \right) \left(1 + e^{-2\beta_g} \right) + \left(e^{\alpha_h} - e^{-\alpha_h} \right) \left[\frac{\mu_o \alpha}{\mu \beta} - \frac{\mu_o \alpha}{\mu \beta} e^{-2\beta_g} \right] \end{aligned} \tag{2.76}$$

นำ $\frac{2}{2}$ คูณตลอดสมการ

$$= 2 \left(\frac{e^{\alpha_h} + e^{-\alpha_h}}{2} \right) \left(1 + e^{-2\beta_g} \right) + 2 \left(\frac{e^{\alpha_h} - e^{-\alpha_h}}{2} \right) \left(\frac{\mu_o \alpha}{\mu \beta} - \frac{\mu_o \alpha}{\mu \beta} e^{-2\beta_g} \right) \tag{2.77}$$

จากสมการ Hyperbolic Function ในรูปของ Exponential

$$\begin{aligned} \cosh \alpha_h &= \frac{e^{\alpha_h} + e^{-\alpha_h}}{2} \\ \sinh \alpha_h &= \frac{e^{\alpha_h} - e^{-\alpha_h}}{2} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (2.77) จะได้

$$= 2 \left(1 + e^{-2\beta_g} \right) \cdot \cosh \alpha_h + \sinh \alpha_h \left(2 \frac{\mu_o \alpha}{\mu \beta} \left(1 - e^{-2\beta_g} \right) \right) \tag{2.78}$$

นำสมการที่ (2.78) แทนค่าในสมการที่ (2.75)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
C_3 &= \frac{2B_m e^{-\beta_g}}{j\beta} \frac{1}{2 \left(\left(1 + e^{-2\beta_g}\right) \cosh \alpha h + \sinh \alpha h \frac{\mu o \alpha}{\mu \beta} \left(1 - e^{-2\beta_g}\right) \right)} \\
&= \frac{B_m}{j\beta \left(\left(e^{-2\beta_g} \cdot e^{\beta_g}\right) \cosh \alpha h + \frac{\mu o \alpha}{\mu \beta} \left(e^{\beta_g} - e^{\beta_g} \cdot e^{-2\beta_g}\right) \sinh \alpha h \right)} \\
&= \frac{B_m}{j\beta \left(\left(e^{\beta_g} + e^{-\beta_g}\right) \cosh \alpha h + \frac{\mu o \alpha}{\mu \beta} \left(e^{\beta_g} - e^{-\beta_g}\right) \sinh \alpha h \right)} \quad (2.79)
\end{aligned}$$

พิจารณาที่

นำ $\frac{2}{2}$ คูณตลอด

$$\begin{aligned}
&j\beta \left(\left(e^{\beta_g} + e^{-\beta_g}\right) \cosh \alpha h + \frac{\mu o \alpha}{\mu \beta} \left(e^{\beta_g} - e^{-\beta_g}\right) \sinh \alpha h \right) \\
&= 2j\beta \left(\frac{\left(e^{\beta_g} + e^{-\beta_g}\right)}{2} \cosh \alpha h + \frac{\mu o \alpha}{\mu \beta} \frac{\left(e^{\beta_g} - e^{-\beta_g}\right)}{2} \sinh \alpha h \right) \\
&= 2j\beta \left(\cosh \beta_g \cdot \cosh \alpha h + \frac{\mu o \alpha}{\mu \beta} \sinh \beta_g \sinh \alpha h \right) \\
\therefore C_3 &= \frac{B_m}{2j\beta \left(\cosh \beta_g \cdot \cosh \alpha h + \frac{\mu o \alpha}{\mu \beta} \sinh \beta_g \sinh \alpha h \right)} \quad (2.80)
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.47)

$$A_3 = \left(C_3 e^{\alpha_y} + C_4 e^{-\alpha_y} \right) e^{j(\omega t - \beta x)} a_z$$

เมื่อ $C_3 = C_4$ ดังนั้นจะได้

$$A_3 = \left(C_3 e^{\alpha_y} + e^{-\alpha_y} \right) e^{j(\omega t - \beta x)} a_z \tag{2.81}$$

นำ $\frac{2}{2}$ คูณตลอดสมการ

$$\begin{aligned} A_3 &= \frac{\left(C_3 e^{\alpha_y} + e^{-\alpha_y} \right)}{2} e^{j(\omega t - \beta x)} a_z \\ &= 2 C_3 \cosh \alpha_y e^{j(\omega t - \beta x)} a_z \end{aligned} \tag{2.82}$$

แทนค่า C_3 ลงในสมการที่ (2.81)

$$\begin{aligned} A_3 &= 2 \cosh \alpha_y e^{j(\omega t - \beta x)} \left[\frac{B_m}{2 j \beta \left(\cosh \beta_g \cos \alpha h + \frac{\mu_o}{\mu \beta} \sinh \beta_g \sinh \alpha h \right)} \right] a_z \\ &= \left[\frac{B_m \cosh \alpha_y e^{j(\omega t - \beta x)}}{j \beta \left(\cosh \beta_g \cos \alpha h + \frac{\mu_o \alpha}{\mu \beta} \sinh \beta_g \sinh \alpha h \right)} \right] a_z \end{aligned} \tag{2.83}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎีของ Lorents force equation ที่กล่าวว่า

$$F = J \times B$$

โดย

$$J = \alpha(E + U \times B)$$

เนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นที่ชั้นที่ (3) เพราะว่าชั้นที่ (1) และ (2) มีค่า $\sigma = 0$

จากสมการที่ (2.47)

$$A_3 = (C_3 e^{\alpha_y} + C_4 e^{-\alpha_y}) e^{j(\omega t - \beta x)} a_z$$

จากสมการที่ (2.31)

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t}$$

$$\therefore E_3 = -j\omega (C_3 e^{\alpha_y} + C_4 e^{-\alpha_y}) e^{j(\omega t - \beta x)} a_z \quad (2.84)$$

จากสมการที่ (2.51) จะได้

$$B_3 = \alpha (C_3 e^{\alpha_y} - C_4 e^{-\alpha_y}) e^{j(\omega t - \beta x)} a_x + j\beta (C_3 e^{\alpha_y} + C_4 e^{-\alpha_y}) e^{j(\omega t - \beta x)} a_y$$

ดังนั้น

$$F_3 = J_3 \times B_3 \quad (2.85)$$

เมื่อ

$$J_3 = \sigma (E_3 + U \times B_3) \quad (2.86)$$

นำสมการที่ (2.85) แทนค่าในสมการที่ (2.86)

$$F_3 = \sigma (E_3 \times B_3 + U \times B_3 \times B_3) \quad (2.87)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.84)

$$E_3 = -j\omega(A_3) \quad (2.88)$$

จากสมการที่ (2.81)

$$B_3 = -j\beta(A_3) \quad (2.89)$$

นำสมการที่ (2.88) และสมการที่ (2.89) แทนค่าในสมการที่ (2.87)

$$F_3 = -\sigma(E_{z3} \times B_{y3} + U_x \times B_{y3} \times B_{y3})a_x + \sigma(E_{z3} \times B_{y3} + U_x \times B_{y3} \times B_{y3})a_y \quad (2.90)$$

เนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นมีทิศทางไปตามแนวแกน X เท่านั้น ดังนั้น

$$F_3 = -\sigma(E_{z3} \times B_{y3} + U_x \times B_{y3} \times B_{y3})a_x - \sigma(E_{z3} \times B_{y3}) - \sigma(+U_x \times B_{y3} \times B_{y3})a_x \quad (2.91)$$

ทำการเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปของ Time-average

$$\begin{aligned} \langle F \rangle &= \frac{-\sigma \operatorname{Re} \left[(-j\omega A_3)(-j\beta A_3)^* \right]}{2} - \frac{\sigma \operatorname{Re} \left[((1-s)V_s)(j\beta A_3)(j\beta A_3)^* \right]}{2} \\ &= \frac{\sigma \beta^2 S V_s \operatorname{Re} (A_3 \cdot A_3^*)}{2} \end{aligned} \quad (2.92)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (2.83) แทนค่าในสมการที่ (2.92) จะได้

$$\begin{aligned}
 \langle F \rangle &= \frac{\sigma \beta^2 s U_s \left[B_m B_m \cdot e^{j(\omega t - \beta x)} \cdot e^{-j(\omega t - \beta x)} \operatorname{Re}(\cosh \alpha_y \cdot \cosh^* \alpha_y) \right]}{2 \left[jB - jB [\cosh \beta_g \cosh \alpha_h] + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \sinh \beta_g \sinh \alpha_h \right]} \\
 &= \frac{\sigma \beta^2 s U_s B_m^2 \operatorname{Re}(\cosh \alpha_y \cdot \cosh^* \alpha_y)}{2 \beta^2 \left[\cosh \beta_g \cosh \alpha_h + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \sinh \beta_g \sinh \alpha_h \right]^2} \\
 &= \frac{\sigma s U_s B_m^2 \operatorname{Re}(\cosh \alpha_y \cdot \cosh^* \alpha_y)}{2 \left[\cosh \beta_g \cosh \alpha_h + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \sinh \beta_g \sinh \alpha_h \right]^2} \quad (2.93)
 \end{aligned}$$

พิจารณา $\operatorname{Re}(\cosh \alpha_y \cdot \cosh^* \alpha_y)$

$$\begin{aligned}
 \operatorname{Re}(\cosh \alpha_y \cdot \cosh^* \alpha_y) &= \left[\frac{e^{\alpha_y} + e^{-\alpha_y}}{2} \right] \left[\frac{e^{\alpha_y} + e^{-\alpha_y}}{2} \right] \quad (2.94) \\
 &= \frac{1}{4} \left[e^{\alpha_y} \cdot e^{\alpha_y} + e^{\alpha_y} \cdot e^{-\alpha_y} + e^{-\alpha_y} \cdot e^{\alpha_y} + e^{-\alpha_y} \cdot e^{-\alpha_y} \right]
 \end{aligned}$$

กำหนดให้ $(a = m_1 + jm_2)$ แทนค่าในสมการที่ (2.94)

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{4} \left[e^{(m_1 + jm_2)y} \cdot e^{(m_1 + jm_2)y} + e^{(m_1 + jm_2)y} \cdot e^{-(m_1 + jm_2)y} + e^{-(m_1 + jm_2)y} \cdot e^{(m_1 + jm_2)y} + e^{-(m_1 + jm_2)y} \cdot e^{-(m_1 + jm_2)y} \right] \\
 &= \frac{1}{4} \left[e^{2m_1 y} + e^{2jm_2 y} + e^{-2m_2 y} + e^{-2m_1 y} \right] \quad (2.95)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก $e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$

ดังนั้นจาก (2.94) จะได้

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{2} \left[\cosh 2m_1 y + \frac{1}{2} \left(\cos 2m_2 y + j \sin 2m_2 y + \cos(-2m_2 y) \right) + j \sin(-2m_2 y) \right] \\
 &= \frac{1}{2} \left[\cosh 2m_1 y + \frac{1}{2} \left(\cos 2m_2 y \right) \right] \\
 &= \frac{1}{2} \left[\cosh 2m_1 y + \left(\cos 2m_2 y \right) \right] \tag{2.96}
 \end{aligned}$$

นำสมการที่ (2.96) แทนค่าในสมการที่ (2.93)

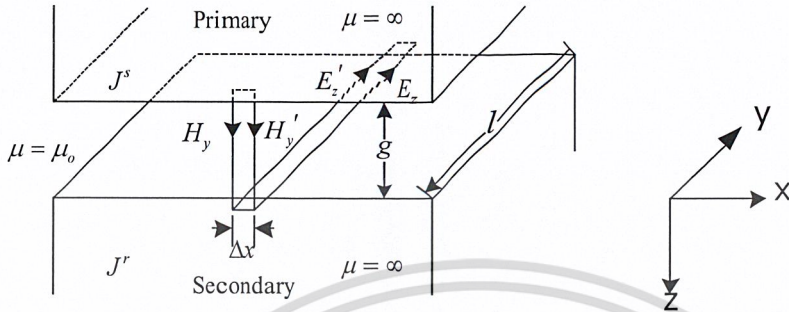
$$\langle F_{x3} \rangle = \frac{\sigma_s U_s B^2 m (\cosh 2m_1 y + \cos 2m_2 y)}{4 \left[\cosh \beta h \cosh \alpha h + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \sinh \beta_g \sinh \alpha h \right]^2} \tag{2.97}$$

แรงที่เกิดขึ้นมีทิศทางตามแนวแกน x เป็น wavelength สำหรับความกว้างทั้งหมด (1) มีทิศทางตามแนวแกน z

$$\begin{aligned}
 \langle F_x \rangle &= \frac{\sigma_s U_s B^2 m \lambda \int_{-l/2}^{l/2} \int_{-h}^h (\cosh 2m_1 y + \cos 2m_2 y) dy dz}{4 \left[\cosh \beta_g \cosh \alpha h + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \sinh \beta_g \sinh \alpha h \right]^2} \\
 &= \frac{\alpha S V_s B^2 m \lambda l \left[\left(\sinh 2m_1 h / m_1 \right) + \left(\sinh 2m_2 h / m_2 \right) \right]}{4 \left[\cosh \beta_g \cosh \alpha h + \frac{\mu_0 \alpha}{\mu \beta} \sinh \beta_g \sinh \alpha h \right]^2} \tag{2.98}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 สมการสนามแม่เหล็กที่แอร์แก๊ป (The Air Gap Field Equation)



รูปที่ 2.22 การแทนกระแสแผ่น J^s และ J^r เมื่อสมมติว่าไม่มีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

สนามแม่เหล็กที่แอร์แก๊ปถูกสร้างขึ้นมาจากกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสบาง ๆ ด้านปฐมภูมิและสนามแม่เหล็กที่แอร์แก๊ป จะนำเข้มารวมไว้ในสมการสนามแม่เหล็กที่แอร์แก๊ป

กำหนดให้กระแสด้านปฐมภูมิ และ ทุติยภูมิแทนด้วยกระแสแผ่นบาง ๆ J^s และ J^r ตามลำดับ มีความเข้มเป็นแบบเชิงเส้น สมมติให้กระแสไหลในทิศทาง z เท่านั้น และความเข้มขาบของวัสดุแกนกลางมีค่าเป็นอนันต์ เมื่อพิจารณารูปที่ 2.24 ประกอบ (สมมติว่าไม่มีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างด้านปฐมภูมิและ ทุติยภูมิ) จะได้ว่า

$$H'_y = \frac{\partial H_y}{\partial x} \Delta x + H_y \quad (2.99)$$

และ

$$E'_y = \frac{\partial E_z}{\partial x} \Delta x + E_y \quad (2.100)$$

จาก Ampere's Law :

$$\int H \cdot dl = \int J \cdot ds \quad (2.101)$$

เอกสารจะได้เอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้ $\frac{\partial H_y}{\partial x} = J^s + J^r$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.102) คำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (2.103)$$

และจาก Ohm's Law

$$J_x = \sigma E_z \quad (2.104)$$

โดย Surface Conductivity ดังนั้นสมการ (2.99)-(2.104) จะเป็น

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = \mu_0 \sigma \frac{\partial H_y}{\partial x} + \frac{\partial J^2}{\partial x} \quad (2.105)$$

หรือในเทอมของ B_y จะได้

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} - \left[\frac{\mu_0 \sigma}{g} \cdot \frac{\partial B_y}{\partial t} \right] = \left[\frac{\mu_0}{g} \cdot \frac{\partial J^2}{\partial x} \right] \quad (2.106)$$

สมการที่ (2.106) จะเรียกว่า “สมการสนามแม่เหล็กที่แอร์แก๊ป” (Air Gap Field Equation) ในกรณีที่มีความเร็วสัมพัทธ์ (U_x) เกิดขึ้นระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ สมการสนามแม่เหล็กที่แอร์แก๊ปจะเปลี่ยนไป

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} - \left[\frac{\mu_0 \sigma U_x}{g} \cdot \frac{\partial B_y}{\partial t} \right] - \left[\frac{\mu_0 \sigma}{g} \cdot \frac{\partial B_y}{\partial t} \right] = \left[\frac{\mu_0}{g} \cdot \frac{\partial J^2}{\partial x} \right] \quad (2.107)$$

สำหรับ LIM เรายังคงใช้สมการ (2.69) และการคำนวณ Relative Motion โดยจะใช้จุดเด่นของ Slip Frequency จาก $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega s$, ซึ่ง ω คือ Primary Angular และ s คือ อัตราส่วนสลิป ดังนั้นเมื่อทราบค่ากระแสเชิงผ่านทางด้านปฐมภูมิ ก็จะสามารถหาค่าการกระจายความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กที่แอร์แก๊ปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 กฎเกณฑ์การออกแบบปรับปรุงค่าที่ดี (A Design Criterion : The Goodness Factor)

ในการบ่งบอกหรือวัดคุณภาพของ LIM จะใช้ค่า Goodness Factor (G) ซึ่งมีวิธีหาได้หลายวิธี เช่น ในมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น (LIM) ค่า Primary Current Sheet จะได้

$$J^s = J_m e^{j(\omega t - \beta x)} \quad (2.108)$$

โดยค่านี้จะแปลงไปด้าน Secondary โดยใช้ $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega_s$ ดังนั้นค่า By ผิดด้าน Secondary จากสมการ (2.106) ได้

$$j\beta^2 B_y - \frac{1}{2}(j\omega_s \mu_o \sigma) B_y = \frac{1}{g} \mu_o (-j\beta) J_m \quad (2.109)$$

ดังนั้นเราจะได้

$$B_y = \frac{(j\mu_o \beta / g) J_m}{\beta^2 + (j\omega_s \mu_o \sigma / g)} = \frac{\mu_o J_m}{g\beta(sG - j)} \quad (2.110)$$

โดย

$$G = \frac{\omega \mu_o \sigma}{g\beta^2} \quad (2.111)$$

สมการ (2.111) จะเป็นค่า Goodness Factor เพราะมันเป็นส่วนจริง (Real Part) ของ Field By จากสมการ (2.111)

$$G = \frac{2f\mu_o\sigma\tau^2}{\pi g} \quad (2.112)$$

เมื่อ τ = ระยะ Pole Pitch ในที่สุดก็จะได้ค่านิยามของค่าปรับปรุงที่ดี ที่ฟันดาเมนทอล เอกสารสำหรับเชคคั่นนี้ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G = \frac{X_m}{R_e} \quad (2.113)$$

โดย

X_m = Magnetizing Reactance

R_e = Secondary Resistance

ค่าปรับปรุงที่ดีนี้จะเป็นดัชนีที่เป็นประโยชน์ในการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้นเบื้องต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน

3.1 การออกแบบความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้น

ในโครงการนี้ต้องการออกแบบความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

$B_m = 0.3 \text{ Wb/m}$ ในช่องอากาศ air gap 5 mm ที่เกิดจากตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้น ที่มีขนาดฟลักซ์ 3 เฟส 380 volt 2 pole แบบ double side ขนาดโครงสร้าง $10 \times 13.4 \times 10 \text{ cm}$

จาก Faraday ' law สามารถหาการเหนี่ยวนำค่าไฟฟ้า (induce voltage) ได้จากสมการ

$$e(t) = \frac{Nd\phi(t)}{dt} \quad (3.1)$$

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก $\phi(t)$ เป็น sinusoidal ดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำ ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับ

$$emf = 4.44 fNABm \quad (3.2)$$

เมื่อ emf = induce voltage มีหน่วยเป็น volt
 f = ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ มีหน่วยเป็น Hz
 N = จำนวนของขดลวดต่อเฟส มีหน่วยเป็น รอบ
 A = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กต่อเฟส มีหน่วยเป็น m^2
 B_m = ค่าสูงสุดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Wb/m^2

โดยออกแบบให้

$$emf = 220 \text{ volts}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$A = 0.005 \text{ m}^2$$

$$B_m = 0.3 \text{ Wb/m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากสมการที่ 3.2 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} N &= \frac{emf}{4.44 \times f \times A \times Bm} \\ N &= \frac{220}{4.44 \times 50 \times 0.005 \times 0.3} \\ &= 660.7 \text{ รอบ} \\ &\approx 661 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

และ
จาก

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \tag{3.4}$$

$$N i = \phi \mathcal{R} \tag{3.5}$$

จากสมการที่ 3.3 และ 3.4 จะได้ว่า

$$i = \frac{\phi \cdot l}{N \mu A} = \frac{Bm \times l}{\mu N} \tag{3.6}$$

เมื่อคิดค่าความซาบซึมสัมพันธ์ของแกนเหล็กมีค่าสูงมากๆ จะมีผลทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็กมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ จึงคิดเฉพาะช่องอากาศ ซึ่งที่ระยะ l_g เท่ากับ g ดังนั้น

$$\begin{aligned} i &= \frac{Bm \times 2 \times g}{\mu_o \times N} \\ &= \frac{0.3 \times 0.005}{4\pi \times 10^{-7} \times 661} \\ &= 1.8 \text{ A} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการคำนวณพื้นที่หน้าตัดของขดลวดโดยกำหนดเลือกใช้ $\text{Current density} = 8 \text{ Amp} / \text{mm}^2$

ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของขดลวด $= \frac{1.8}{8}$
 $= 0.225 \text{ mm}^2$

(หมายเหตุ ในการออกแบบใช้งานจริง Current density ไม่ควรเกิน $5 \text{ Amp} / \text{mm}^2$)

จากตารางที่ 3.1 เลือกใช้ลวดทองแดงอบน้ำยามาตรฐาน AWG เบอร์ 23 มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.259

ดังนั้นขนาดของพื้นที่ลวดทั้งหมด $= 0.259 \times 661 = 171 \text{ mm}^2$

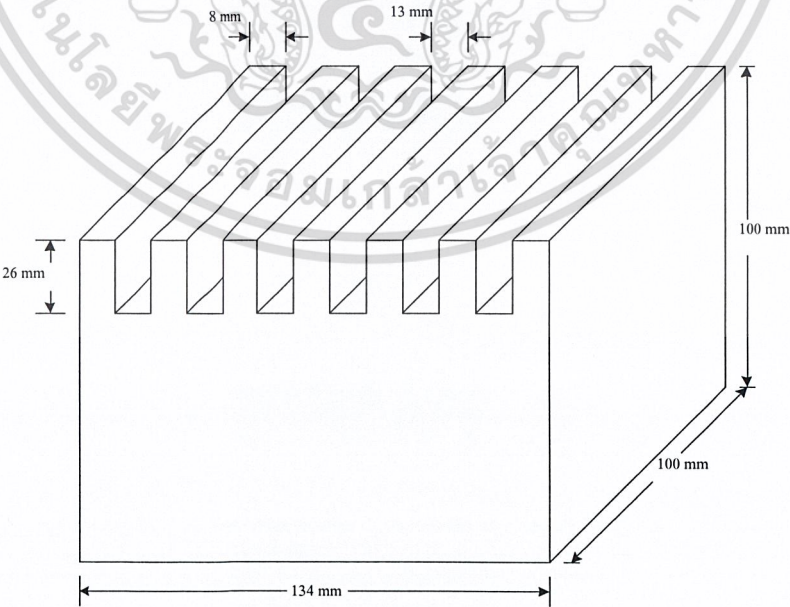
เลือกใช้อัตราส่วนพื้นที่ลวดต่อพื้นที่สล็อต $= 0.5$

เพราะฉะนั้น $\frac{\text{พื้นที่สล็อต}}{\text{พื้นที่ลวด}} = \frac{\text{พื้นที่ลวด}}{\text{อัตราส่วนพื้นที่ลวดต่อพื้นที่สล็อต}}$
 $= \frac{171}{0.5} = 342 \text{ mm}^2$

กำหนดขนาดโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นได้ดังนี้

ระยะโพลพิช $= 0.063 \text{ m}$
ระยะสล็อตกว้าง $= 0.013 \text{ m}$
ระยะฟันกว้าง $= 0.008 \text{ m}$
ระยะสล็อตลึก $= 0.026 \text{ m}$

ซึ่งมีลักษณะรูปร่างและขนาดของชุดสเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น ดังรูปที่ 3.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.1 ขนาดของสเตเตอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและเผยแพร่ข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความเร็วเชิงโคจรนี้ มีค่าเท่ากับ

$$V_s = 2 \times \text{ระยะโพลพิช} \times f$$

เมื่อระยะโพลพิชเท่ากับ 0.063 m

$$f = 50 \text{ Hz}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} V_s &= 2 \times 0.063 \times 50 \\ &= 6.3 \text{ m/s} \end{aligned}$$

3.2 การออกแบบการพันขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเชิงเส้น

ในโครงการนี้ การพันขดลวดเป็นแบบ 3 เฟส ชั้นเดียว (Single Layer Winding) โดยจะใช้เป็นส่วนด้านปฐมภูมิซึ่งมีการเคลื่อนที่

กำหนดให้ มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นเป็นแบบ 2 pole

$$\text{จำนวนสล็อต / โพล / เฟส} = 1$$

จาก จำนวนสล็อตทั้งหมด = (จำนวนสล็อต / โพล / เฟส $\times$ จำนวนโพล $\times$ จำนวนเฟส)

$$= 1 \times 2 \times 3$$

$$= 6 \text{ สล็อต}$$

$$\text{จำนวนโพลพิช} = \frac{\text{สล็อต}}$$

$$\text{โพล}$$

$$= \frac{6}{2}$$

$$= 3 \text{ สล็อต}$$

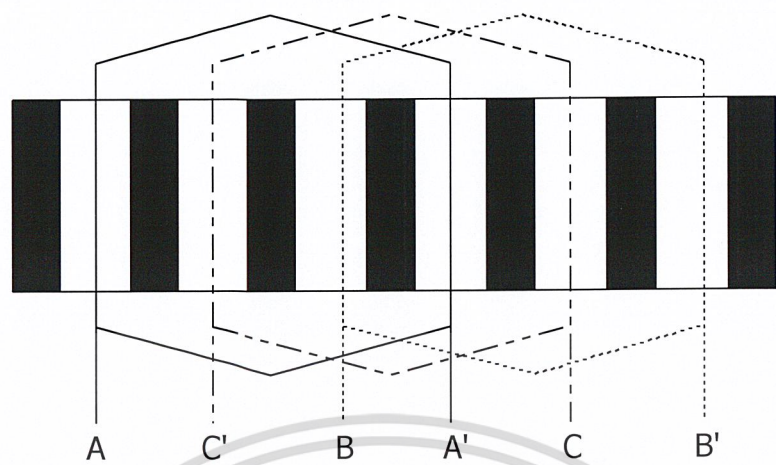
$$\text{มุมระหว่างสล็อต} = \frac{180}{\text{สล็อต / โพล / เฟส}}$$

$$= \frac{180}{1 \times 3}$$

$$= 60 \text{ องศาทางไฟฟ้า}$$

เนื่องจากขดลวดแต่ละเฟสห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ดังนั้นขดลวดแต่ละเฟสจึงวางห่างกัน 2 ช่วงสล็อต

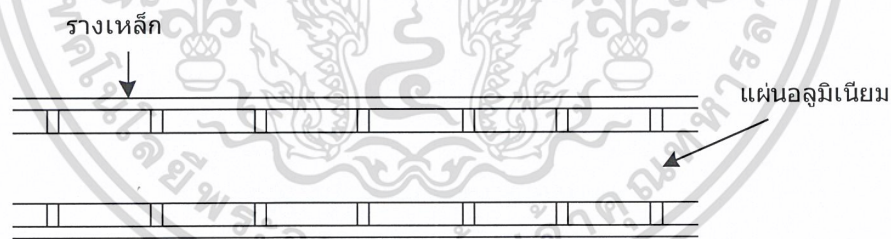
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การวางขดลวดในร่องสลีต

3.3 การออกแบบโรเตอร์

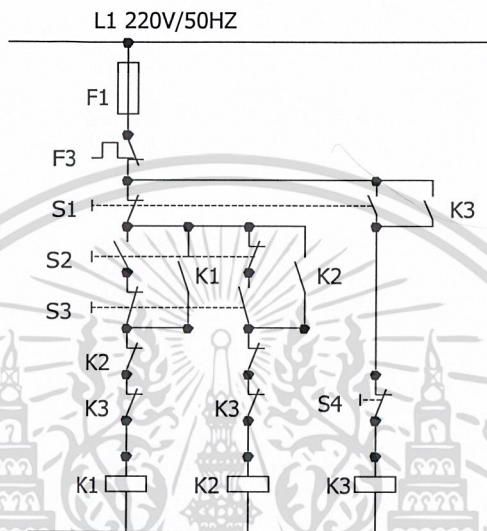
การออกแบบโรเตอร์ซึ่งออกแบบโดยใช้หลักการทำเป็นรางรองรับส่วนของแบร์ริงซึ่งทำหน้าที่เป็นล้อของตัวแบบจำลองรถไฟฟ้าและมีแผ่นอลูมิเนียมซึ่งวางติดอยู่ตรงกลางรางทำหน้าที่เป็นโรเตอร์ ดังแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การวางแผ่นอลูมิเนียมบนราง

3.4 การออกแบบวงจรควบคุม

วงจรควบคุมจะใช้ในการเดินหน้า-ถอยหลัง และการเบรก โดยจะใช้แมกเนติก คอนแทกเตอร์ เป็นตัวช่วยในการตัดต่อวงจร ในส่วนของวงจรเบรก จะใช้ Dc Brake



รูปที่ 3.4 วงจรควบคุม

ลำดับขั้นตอนการทำงาน

- 1) เมื่อกด Switch (S2) ตัวรถไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปด้านหน้า
- 2) เมื่อกด Switch (S1) จะทำให้ตัวรถไฟฟ้าหยุดการทำงานพร้อมกับถูกเบรกด้วยระบบ Dynamic Brake
- 3) เมื่อตัวรถไฟฟ้าหยุดนิ่งแล้วก็ทำการกด Switch (S4) เพื่อการปลดระบบ Dynamic Brake
- 4) หากต้องการให้ตัวรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ถอยหลังต้องกด Switch (S3)
- 5) กระทำตั้งแต่ข้อ 2 เมื่อต้องการให้ตัวรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปอีกด้านหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง และผลการทดลอง

4.1 การทดสอบโดยวิธี Locked-Rotor Test

ป้อนแรงดันให้แก่มอเตอร์และ Locked-Rotor ไม่ให้เคลื่อนที่ วัดกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ $S = 1$ ซึ่งการทดลองนี้จะต้องป้อนแรงดันให้น้อยกว่าอัตราที่กำหนด โดยอย่าให้กระแสเกินอัตราที่กำหนดด้วย

4.2 ผลการทดสอบโดยวิธี Locked-Rotor Test

การทดสอบ Linear Motor โดยวิธี Locked-Rotor Test ที่ระยะ Air Gap เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ Locked-Rotor Test

Line Votage (V)	Line Current (A)
100	1.2
120	1.5
140	1.7
160	1.9
180	2.2
200	2.4
220	2.8
240	3.0
260	3.2
280	3.4
300	3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป ปัญหา แนวทางการแก้ไข และพัฒนา

5.1 บทสรุป

การออกแบบและการสร้างแบบจำลองรถไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น ซึ่งประยุกต์มาจากเครื่องกลไฟฟ้าแบบหมุน และมีการพัฒนาเพื่อใช้ในระบบขนส่งมวลชนความเร็วสูง ในการออกแบบใช้หลักการออกแบบเครื่องกลไฟฟ้าแบบหมุน แล้วนำขนาดมิติที่ได้มาแปลง เป็นมิติเชิงเส้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

- 1) ชิ้นงานมีน้ำหนักมาก ทำให้ยากลำบากในการเคลื่อนย้าย
แนวทางการแก้ไข ทำตัวรถให้เล็กลงหรือโครงของตัวรถใช้วัสดุอื่นทำให้น้ำหนักเบาลงได้
- 2) ขดลวดมีขนาดใหญ่ ทำให้เวลาขดลวดเกิดช่องว่างระหว่างขดลวดมากทำให้จำนวนรอบที่ได้คำนวณไว้คลาดเคลื่อน
แนวทางการแก้ไข ลดขนาดขดลวดและเพิ่มจำนวนรอบ

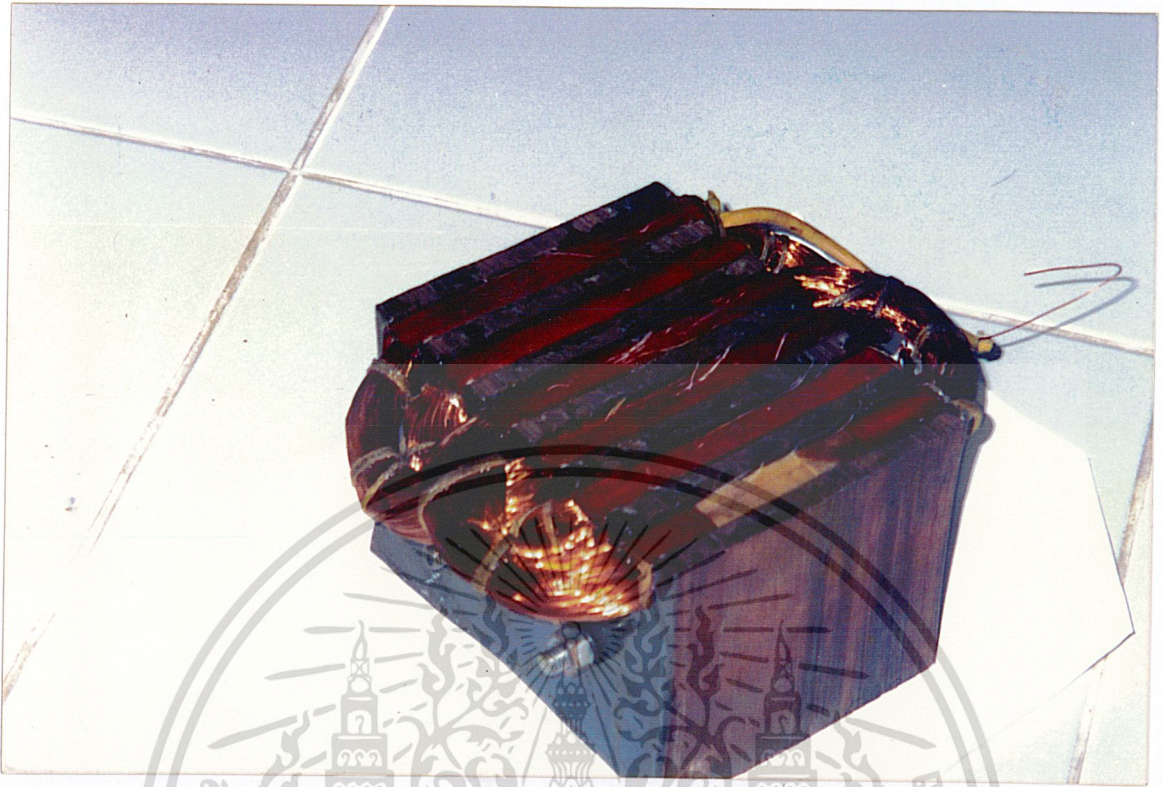
5.3 แนวทางการพัฒนา

- 1) การพันขดลวดต้องระมัดระวัง เพื่อป้องกันการเกิดรอยขีดข่วนที่ผิวฉนวนของขดลวด เพราะอาจทำให้เกิดการ Short ได้
- 2) ผิวโลหะของแกนสเตเตอร์ต้องทำการเคลือบน้ำยาป้องกันสนิม เพื่อให้สนามแม่เหล็กเดินทางได้สะดวก
- 3) หลังการพันขดลวดต้องทำการเคลือบฉนวนวานิชอีกครั้ง เพื่อป้องกันการ Short turn
- 4) การพันขดลวดควรให้สมดุลกันทั้งสองด้านข้างของตัวรถ เพื่อให้เกิดการสมดุลของสนามแม่เหล็ก
- 5) ในการทดลองเนื่องจากแหล่งจ่ายแรงดันและกระแสมีค่าสูง จึงต้องต่ออุปกรณ์ป้องกัน เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดกับผู้ทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



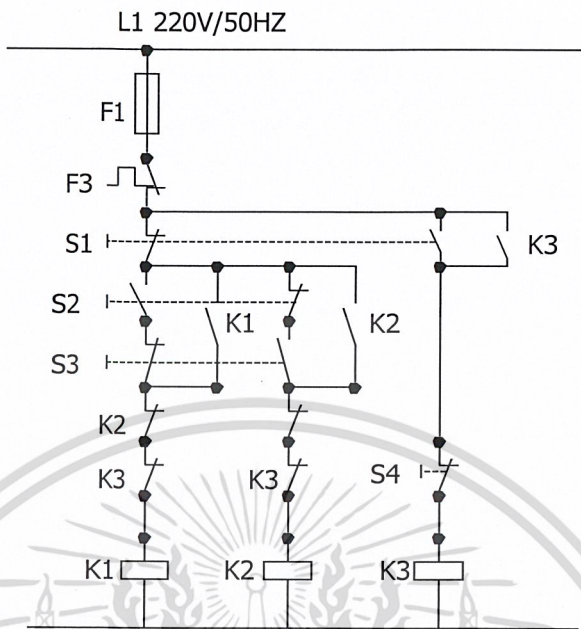
รูปที่ ก.1 การวางขวดขวด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ก. 2 การวางแผนอูมเนียมบนรางเหล็ก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

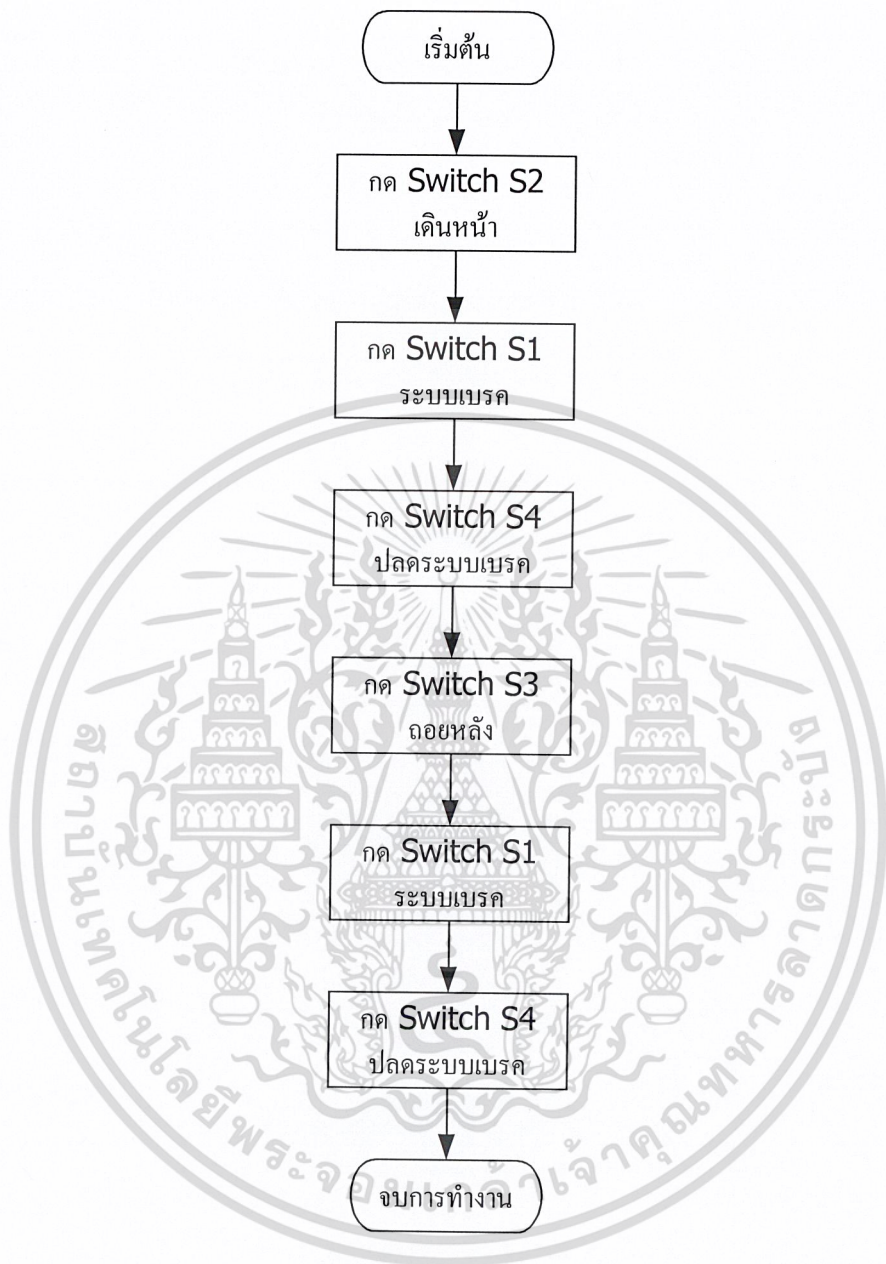


รูปที่ ข.1 วงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.1 ผังการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง
รายการอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการอุปกรณ์

1) ตัวรถ

รายการ	จำนวน/ขนาด
1) เหล็กฉากขนาด 1 นิ้ว	0.3×0.6 เมตร
2) ลูกปิ่นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว	2 ตลับ
3) แกนเหล็กทำจาก Laminated Sicicon Steel	0.1×0.1×0.134 เมตร
4) ขดลวดทองแดงเบอร์ 23 SWG	667 รอบ

2) ราง

รายการ	จำนวน/ขนาด
1) แผ่นอลูมิเนียมหนา 5 มิลลิเมตรกว้าง 15 ซม. หนา 5 ม.ม	6 เมตร
2) เหล็กฉากขนาด 1 นิ้ว	12 เมตร

3) ตู้ควบคุม

รายการ	จำนวน/ขนาด
1) แมกเนติกส์ คอนแทคเตอร์	3 ตัว
2) โอเวอร์โหลด	1 ตัว
3) เซอร์กิตเบรกเกอร์ ขนาด 30 แอมป์	1 ตัว
4) Putbutton Switch	4 ตัว
5) หลอดไฟแสดงการทำงาน	3 หลอด
6) หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลท์	1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



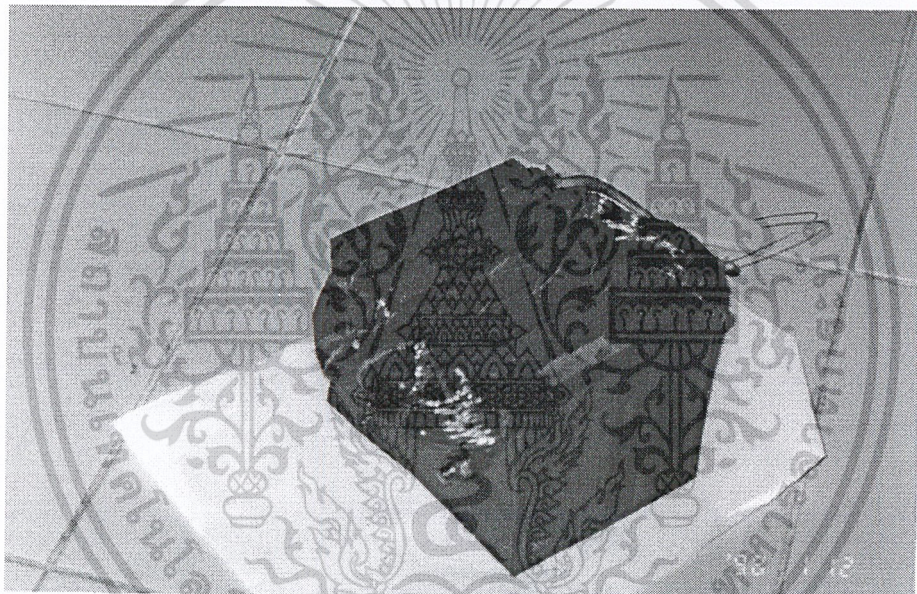
ภาคผนวก จ
คู่มือการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือการใช้

รถไฟฟ้าขับเคลื่อนโดยสนามแม่เหล็ก

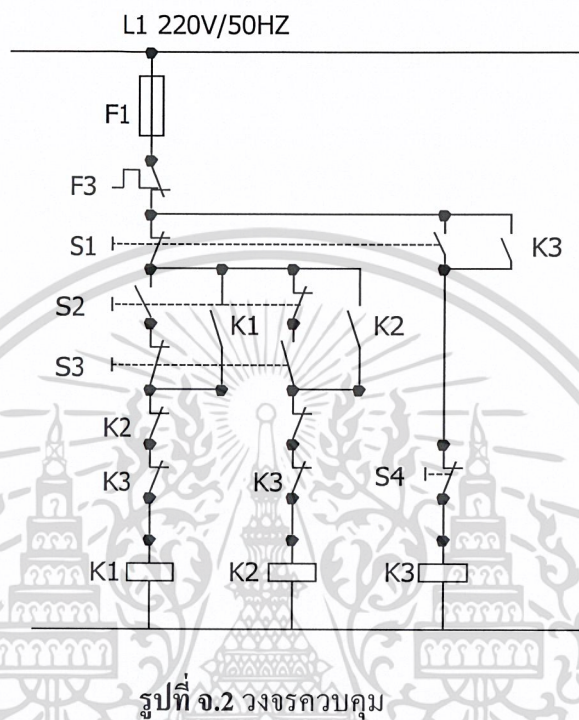
รถไฟฟ้าคันนี้ดัดแปลงมาจากหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุน ซึ่งทำให้ลดการสูญเสียเนื่องจากความฝืด (Friction Loss) และความเฉื่อย (Inertia Loss) จุดที่น่าสนใจคือการนำเอาเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นมาใช้ในการขับเคลื่อน เนื่องจากคุณสมบัติของตัวรถไฟฟ้านี้เคลื่อนที่ได้เร็ว ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานมากยิ่งขึ้น น้ำหนักก็จะเบาลงอย่างมาก



รูปที่ จ.1 การวางขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุม



ลำดับขั้นตอนการทำงาน

- 1) เมื่อกด Switch (S2) ตัวรถไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปด้านหน้า
- 2) เมื่อกด Switch (S1) จะทำให้ตัวรถไฟฟ้าหยุดการทำงานพร้อมกับถูกเบรกด้วยระบบ

Dynamic Brake

- 3) เมื่อตัวรถไฟฟ้าหยุดนิ่งแล้วก็ทำการกด Switch (S4) เพื่อการปลดระบบ Dynamic

Brake

- 4) หากต้องการให้ตัวรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ถอยหลังต้องกด Switch (S3)
- 5) กระทำตั้งแต่ข้อ 2 เมื่อต้องการให้ตัวรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปอีกด้านหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง

รายละเอียด และคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ น.1 คุณสมบัติของขดลวด

Gauge no.	AWG			SWG		
	Daimeter	Cross-Section		Daimeter	Cross-Section	
	(Inch)	(mm)	(mm ²)	(Inch)	(mm)	(mm ²)
1	0.2893	7.384	42.41	0.30	7.62	46.50
2	0.2576	6.543	33.63	0.2760	7.01	38.59
3	0.2294	5.826	26.67	0.2520	6.40	32.17
4	0.2043	5.189	21.15	0.2320	5.89	27.25
5	0.1819	4.62	16.77	0.2120	5.38	22.73
6	0.1620	4.115	13.30	0.1920	4.88	18.70
7	0.1443	3.665	10.55	0.1760	4.47	15.69
8	0.1285	3.264	8.367	0.1600	4.06	12.95
9	0.1144	2.906	6.631	0.1440	3.65	10.52
10	0.1019	2.588	5.261	0.1280	3.25	8.30
11	0.0907	2.30	4.17	0.1160	2.95	6.84
12	0.0808	2.05	3.31	0.1040	2.64	5.47
13	0.0720	1.83	2.63	0.0920	2.34	4.30
14	0.0641	1.63	2.08	0.0800	2.03	3.24
15	0.0571	1.45	1.65	0.0720	1.83	2.63
16	0.0508	1.29	1.31	0.0640	1.63	2.09
17	0.0453	1.15	1.04	0.0560	1.42	1.58
18	0.0403	1.02	0.823	0.0480	1.22	1.17
19	0.0359	0.912	0.635	0.0400	1.02	0.817
20	0.0320	0.813	0.519	0.0360	0.914	0.656
21	0.0285	0.724	0.412	0.0320	0.813	0.519
22	0.0253	0.643	0.324	0.0280	0.711	0.397
23	0.0226	0.574	0.259	0.0240	0.61	0.292
24	0.0201	0.511	0.205	0.0220	0.559	0.245

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่โรงเรียนได้ให้สำหรับการใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ น.1 (ต่อ) คุณสมบัติของขดลวด

Gauge no.	AWG			SWG		
	Diameter		Cross-Section	Diameter		Cross-Section
	(Inch)	(mm)		(Inch)	(mm)	
25	0.0179	0.455	0.162	0.0200	0.508	0.203
26	0.0159	0.404	0.128	0.0108	0.457	0.164
27	0.0142	0.361	0.102	0.0164	0.4166	0.136
28	0.0126	0.320	0.0804	0.0148	0.376	0.111
29	0.0113	0.287	0.0647	0.0136	0.3454	0.0935
30	0.0100	0.254	0.0507	0.0124	0.315	0.0779
31	0.0089	0.226	0.0401	0.0116	0.2946	0.0682
32	0.0080	0.203	0.0324	0.0108	0.2743	0.0592
33	0.0071	0.180	0.0255	0.0100	0.254	0.0507
34	0.0063	0.160	0.0201	0.0092	0.2337	0.0429
35	0.0056	0.142	0.0159	0.0084	0.2134	0.0358
36	0.0050	0.127	0.0127	0.0076	0.193	0.0293
37	0.0045	0.114	0.0103	0.0068	0.1727	0.0234
38	0.0040	0.102	0.00811	0.0060	0.1524	0.0182
39	0.0035	0.069	0.00621	0.0052	0.132	0.0137
40	0.0031	0.079	0.00487	0.0048	0.1219	0.0117
41	0.0028	0.071	0.00397	0.0044	0.1118	0.0098
42	0.0025	0.064	0.00317	0.0040	0.1016	0.0081
43	0.0022	0.056	0.00245	0.0036	0.0914	0.0065
44	0.0020	0.051	0.00203	0.0032	0.0813	0.0052
45	0.0018	0.047	0.00157	0.0028	0.0711	0.0039
46	0.0016	0.040	0.00125	0.0024	0.0610	0.0029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

Daniel H Braymer , A.B.,E.E. And A.C. Roe. **Rewinding And Connecting Alternating Current Motors.** Mcgraw – Hill Book Company , Inc. New York And London 1932.

E.R., Laitwaite. **Trainsport Without Wheels.** Paul Elek Science London.1977

Syed A.Nasar, Ph.D.**Linear Electric Motors.**Printice Hall U.S.A.

Yamamura , Sakae.**Theory Of Linear Induction Motors.**2nd edition : John Wiley & sons.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปฏิญานพนธ์	นายปิติพงศ์ มาตุเวช
วันเดือนปีเกิด	1 กรกฎาคม พ.ศ. 2523
สถานที่เกิด	จังหวัดตรัง
ภูมิลำเนา	13/1 ถนนรถไฟ อำเภอกันตัง จังหวัดตรัง 92110
ที่อยู่ปัจจุบัน	หอพักฟูลัน 111/51 ถนนอ่อนนุช-ลาดกระบัง ซอยลาดกระบัง 48 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
โทรศัพท์	0-2739-0998 ห้อง 107
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนเทศบาลบ้านคลองภาษี จังหวัดตรัง
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนกันตังพิทยากร จังหวัดตรัง
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ(ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคตรัง
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคตรัง
ปริญญาตรี	สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ผลงานที่ได้รับรางวัล	-
ทุนการศึกษา	-
คติพจน์	อย่าเชื่อในสิ่งที่คุณเห็น เพราะสิ่งที่คุณเห็นไม่ใช่ สิ่งที่คุณคิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปฏิญานพนธ์

นายวิทยา ผิวพ่อง

วันเดือนปีเกิด

25 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522

สถานที่เกิด

จังหวัดตรัง

ภูมิลำเนา

32/18 ถนนรถไฟ อำเภอกันตัง จังหวัดตรัง 92110

ที่อยู่ปัจจุบัน

หอพักฟู้ฮัน 111/51 ถนนอ่อนนุช-ลาดกระบัง

ซอยลาดกระบัง 48 แขวงลาดกระบัง

เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทรศัพท์

0-2739-0998 ห้อง 109

ประวัติการศึกษา

ประถมศึกษา

โรงเรียนทุ่งฮั่วไชยเขียว จังหวัดตรัง

มัธยมศึกษาตอนต้น

โรงเรียนกันตังพิทยากร จังหวัดตรัง

ประกาศนียบัตรวิชาชีพ(ปวช.)

วิทยาลัยเทคนิคตรัง

ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ปวส.)

วิทยาลัยเทคนิคตรัง

ปริญญาตรี

สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

ผลงานที่ได้รับรางวัล

-

ทุนการศึกษา

-

คติพจน์

ฝันให้ไกลไปให้ถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญานิพนธ์	นางสาวณัฐรัตน์ เดชทองคำ
วันเดือนปีเกิด	17 มกราคม พ.ศ. 2522
สถานที่เกิด	จังหวัดนครศรีธรรมราช
ภูมิลำเนา	266/32 ถนนราชดำเนิน ตำบลท่าวัง อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80000
ที่อยู่ปัจจุบัน	หอพักฟูอัน 111/51 ถนนอ่อนนุช-ลาดกระบัง ซอยลาดกระบัง 48 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
โทรศัพท์	0-2739-0998 ห้อง 108
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนวัดพระมหาธาตุ จังหวัดนครศรีธรรมราช
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนกัลยาณีศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ(ปวช.)	วิทยาลัยเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมการต่อเรือ นครศรีธรรมราช
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคนครศรีธรรมราช
ปริญญาตรี	สาขาวิชาเทคโนโลยีการควบคุมทางอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมวิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ผลงานที่ได้รับรางวัล	-
ทุนการศึกษา	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
คุณต้องทดแทน ความเห็นต้องชำระ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้