



แม่เหล็กไฟฟ้า

Magnetic Repulsion Bearing



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีผู้อื่นใช้

034920

ปีการศึกษา ๒๕๖๗

เบริ่งแม่เหล็กไฟฟ้า

โดย

นายธนา	เดี้ยววณิชย์	34103137
นายพรเทพ	สิริเฉลิมพงศ์	34104232
นายวิทยา	นัตร์รัตนกุลชัย	34106326
นางสาวศศิกร	อารีธรรมศิริกุล	34107366

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผศ. ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

ภาคเรียนที่ 2 / ปีการศึกษา 2537

เรื่อง แบร็งแม่เหล็กไฟฟ้า

นักศึกษา

นายธนา เตียววณิชย์ 34103137

นายพรเทพ สิริเฉลิมพงศ์ 34104232

นายวิทยา ฉัตรรัตนกุลชัย 34106326

น.ส.ศศิกร อารีธรรมศิริกุล 34107366

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

บทคัดย่อ

เครื่องจักรกลในปัจจุบันมีประสิทธิภาพและสมรรถนะการทำงานสูง โดยทั่วไปจะต้องทำงานที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งแบร็งโดยทั่วไปไม่สามารถทนต่อสภาวะการทำงานได้ จึงได้มีการพัฒนาแบร็งซึ่งอาศัยแรงแม่เหล็กขึ้นเพื่อใช้ในสภาวะการทำงานดังกล่าว

สำหรับแบร็งแม่เหล็กที่เราได้ทำการศึกษาออกแบบและพัฒนาประกอบเป็นชุดทดลองขึ้นเพื่อการทดลองการทำงาน จะเป็นแบร็งแม่เหล็กซึ่งอาศัยแรงผลักระหว่างแม่เหล็กถาวร และ แม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแรงยกเพลาให้ลอยขึ้น จึงสามารถทำงานได้โดยไม่มีสัมผัสระหว่างผิวโลหะ ทำให้ปราศจากพลังงานสูญเสียที่เกิดเนื่องจากแรงเสียดทาน และไม่เกิดการสึกหรอ ซึ่งมีค่าสูงในแบร็งทั่วไป แบร็งแม่เหล็กจึงมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า

ชุดทดลองแบร็งแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบจะสามารถรับภาระ (น้ำหนักของเพลา) ได้ 0.5 กิโลกรัม ที่สภาวะการทำงานที่เพลาหมุนด้วยความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที โดยจะมีระยะช่องอากาศซึ่งสามารถปรับค่าได้ขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่เราป้อนให้แม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่เมื่อเพลาเริ่มหมุนจะเกิดการแกว่งขึ้น เราจะต้องพยายามปรับค่ากระแสเพื่อให้การหมุนของเพลาเสถียรขึ้นจนสามารถใช้งานได้ สำหรับระยะห่างระหว่างแกนแม่เหล็กไฟฟ้า และ แม่เหล็กถาวรที่ปรับไว้ค่าหนึ่ง ๆ จะมีค่ากระแสที่จ่ายให้แม่เหล็กไฟฟ้าเพียงค่าเดียวเท่านั้นที่จะทำให้การหมุนของเพลาเสถียรได้ในสภาวะการทำงานหนึ่ง ๆ

จากการศึกษาทดลอง ชุดทดลองจะสามารถทำงานได้ที่สภาวะความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที เมื่อช่องอากาศมีระยะ 5 มิลลิเมตร เราจะต้องจ่ายค่ากระแสให้แก่ขดลวดแกนเหล็กสายล่างมีค่าเป็น 7 แอมแปร์ และ ค่ากระแสให้แก่ขดลวดแกนเหล็กสายบนมีค่าเป็น 6 แอมแปร์ และสำหรับช่องอากาศมีระยะ 15 มิลลิเมตร เราจะต้องจ่ายกระแสให้แก่ขดลวดแกนเหล็กสายล่างมีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น 8 แอมแปร์ และ ค่ากระแสที่ให้แก่ขดลวดแกนเหล็กสายบนมีค่าเป็น 5 แอมแปร์ สำหรับรายละเอียดของการศึกษาออกแบบและพัฒนาจะกล่าวถึงต่อไปในเนื้อหาของปริญาานิพนธ์ฉบับนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Magnetic Repulsion Bearing

Dhana Deawwanich 34103137

Pornthep Sirichalermpong 34104232

Wittaya Chatrattanagulchai 34106326

Sasikorn Areethamsirikul 34107366

Advisor

Assit.Prof.Dr.Mongkol Mongkolwongroj

ABSTRACT

Nowadays machines that have high efficiency and high capable operate at high compression ratio and high temperature. Generally, material and lubricant that use for bearing cannot endure these increased requirements. Therefore, development in bearing system at present use magnetic force.

Magnetic bearing experimental set that we studied, designed and developed for testing its operation is magnetic bearing operating with repulsion force between permanent magnetic and electro magnetic. That repulsion force will left the shaft of the magnetic bearing up in horizontal level, hence there is no friction force and can operate at rotating speed without energy loss caused friction. These will not create stress and corrosion that have high value in normal bearing and make the magnetic bearing be a long-life machine.

The magnetic bearing that we designed can left load 0.5 kilogram (weight of the shaft) at operating condition for rotational speed 1500 rpm and air gap length depending on current that is supplied to electro magnetic core can vary. Therefore, when the shaft began to rotate, it will oscillate. Then we attempt to vary the current for making the rotation of shaft to run to steady state condition. For a value of air gap length, the magnetic bearing can operate at the steady state condition with only a value of current.

From the study of magnetic bearing experimental set, the experimental set can operate at the rotational speed of 1500 rpm. When the air gap length is 5 milimeter, the current in the lower line of electro magnetic core is equal to 7 Amp and the current in the upper line of electro magnetic core is equal to 6 Amp. And when the air gap length is 15 mm, the current in the lower line of electro magnetic core is equal to 8 Amp and the current in the upper line

of electro magnetic core is equal to 5 Amp. For the detail of the study, design and development is continued explained in this thesis.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
สารบัญภาพ	
สารบัญตาราง	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ข้อได้เปรียบของแบริ่งแม่เหล็กแรงผลัก (Magnetic Repulsion Bearing) ที่มีต่อแบริ่งแม่เหล็กแรงดูด (Magnetic Attractive Bearing)	1
1.2 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก และแรงแม่เหล็ก	3
บทที่ 2 วงจรแม่เหล็กและคุณสมบัติของสารแม่เหล็ก	5
2.1 mmf และเส้นแรงแม่เหล็ก (flux)	5
2.2 การคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ L	13
2.3 ศักไฟฟ้าเหนี่ยวนำอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแส	15
2.4 การสูญเสียพลังงานภายในสารแม่เหล็ก	15
2.5 แม่เหล็กถาวร	33
บทที่ 3 การวิเคราะห์วงจรแม่เหล็กสำหรับระบบแบริ่งแม่เหล็ก ไฟฟ้าแรงผลัก (MRB) ที่ออกแบบ	38
บทที่ 4 หลักการพื้นฐานและขั้นตอนในการออกแบบชุดแบริ่งแม่เหล็ก	45
4.1 กำหนดหาแรงยก โดยประมาณของชุดทดลอง Magnetic Bearing ที่ได้ออกแบบไว้	45
4.2 ค่าตัวแปร (parameter) ที่มีผลต่อแรงยกของระบบ	46
4.3 การคำนวณเพื่อตรวจสอบค่าที่เลือกใช้ในการออกแบบ	48
4.4 สรุปข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบชุด MRB	49
บทที่ 5 การออกแบบวางโครงสร้างของชุดแบริ่งแม่เหล็กไฟฟ้า	53
5.1 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กที่ส่งออกมาจากชุดแม่เหล็กที่ออกแบบ	53
5.2 การพิจารณาออกแบบจำนวนและตำแหน่งการวางแกนเหล็กสำหรับ แบริ่งแม่เหล็กแรงผลัก	55
บทที่ 6 หลักการทำงานพื้นฐานของชุดทดลองแบริ่งแม่เหล็กแรงผลัก	62
6.1 การทำงานของส่วนประกอบชุดแบริ่งแม่เหล็กแรงผลัก	62
6.2 ตัวแปร (parameter) และชุดทดลองแบริ่งแม่เหล็กแรงผลักที่สามารถ ปรับค่าได้	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
บทที่ 7 แบบจำลองการสั้นและสมการการเคลื่อนที่ของระบบ MRB ที่ออกแบบไว้	72
บทที่ 8 การทดลองตรวจสอบการทำงานชุดเบร้งแม่เหล็กไฟฟ้า	80
กิตติกรรมประกาศ	88
บรรณานุกรม	89
ภาคผนวก	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงแรงคูดของแม่เหล็กแรงคูดที่มีค่าน้อยลง	2
รูปที่ 1.2 แสดงระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กที่มีค่าน้อยลง	3
รูปที่ 2.1 เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก	6
รูปที่ 2.2 วงแหวนทอรอย	9
รูปที่ 2.3 วงจรแม่เหล็ก	9
รูปที่ 2.4 วงจรแม่เหล็กชนิดมีช่องอากาศ	9
รูปที่ 2.5 วงจรแม่เหล็กของเครื่องจักร ไฟฟ้า	9
รูปที่ 2.6 แสดงหาค่าตัวเหนี่ยวนำร่วม	14
รูปที่ 2.7 คัดคาไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแส	15
รูปที่ 2.8 แสดงวงจรรีเลย์	16
รูปที่ 2.9 แสดง Energy และ Co Energy	17
รูปที่ 2.10 เส้น โค้งกำเนิดแม่เหล็กของเหล็กแผ่นซิลิกอน L63, L 68 และ L75	23
รูปที่ 2.11 การสูญเสียพลังงานในแกนเหล็กแผ่นซิลิกอน L63 ที่ความถี่ต่าง ๆ	24
รูปที่ 2.12 การสูญเสียพลังงานในแกนเหล็กแผ่นซิลิกอน L63 ที่ความถี่ 50 Hz	26
รูปที่ 2.13 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ในวงจรแม่เหล็ก ขณะเพิ่มและลดอำนาจแม่เหล็ก	29
รูปที่ 2.14 ถ่ายจาก CRO แสดง Hysteresis Loop ของเหล็ก Z10 ขณะ $B_{max} = 1.2$ เทสลา	29
รูปที่ 2.15 เส้น โค้ง Hysteresis เหล็กแผ่นซิลิกอน L63, L68	30
รูปที่ 2.16 แสดงภาพตัดขวางของวงจร Reactor Core ในรูป 2.3	31
รูปที่ 2.17 แสดงภาพถ่ายจาก CHO Hysteresis Loop ของเหล็ก Z10 ที่ได้จากการทดลองขณะถึงจุดอิ่มตัว	34
รูปที่ 2.18 กราฟแสดงเส้น โค้งลดอำนาจแม่เหล็กของสารแม่เหล็กถาวรบางชนิด	35
รูปที่ 2.19 แม่เหล็กถาวร	34
รูปที่ 2.20 แสดงวงจรแม่เหล็กถาวร	37
รูปที่ 3.1 แสดงวงจรแบบที่ 2	39
รูปที่ 3.2 แสดงวงจรแบบที่ 3 และ วงจรไฟฟ้าเสมือน	40
รูปที่ 3.3 แสดงการวิเคราะห์วงจรแบบที่ 4	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 3.4 แสดงการคำนวณจากกราฟเส้นโค้งลดอำนาจแม่เหล็ก	43
รูปที่ 3.5 แสดงวงจรแบบที่ 5	44
รูปที่ 4.1 แสดงแรงยกที่ได้จากแกนเหล็กอ่อน 2 ตัว	45
รูปที่ 4.2 แสดงพื้นที่หน้าตัด (A)	46
รูปที่ 4.3 แสดงพื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการคำนวณ (Am)	47
รูปที่ 4.4 แสดงค่าตัวแปร (parameter) ที่เลือกคำนวณค่าโดยประมาณสำหรับ ใช้ในการคำนวณหาค่าแรงทางกลศาสตร์ (fmech)	48
รูปที่ 4.5 แสดงการคำนวณจากกราฟเส้นโค้งลดอำนาจแม่เหล็ก	48
รูปที่ 4.6 แสดงวงจรเครื่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์	52
รูปที่ 5.1 แสดงเส้นแรงแม่เหล็ก	53
รูปที่ 5.2 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กผลักดัน	54
รูปที่ 5.3 ชุดทดลองที่วาง (Magnetic Repulsion Bearing) 1 ตัวไว้ตำแหน่งกลางเพลลา	55
รูปที่ 5.4 ชุดทดลองที่วาง (Magnetic Repulsion Bearing) 2 ตำแหน่ง ที่ปลายทั้ง 2 ข้างของเพลลา	56
รูปที่ 5.5 แสดงลักษณะการวางแกนเหล็กจำนวนต่าง ๆ กันสำหรับ Magnetic Repulsion Bearing 1 ตัว	57
รูปที่ 5.6 แสดงแรงผลักดันเนื่องจากการวางแกนเหล็กจำนวน 2 แกน	57
รูปที่ 5.7 แสดงแรงผลักดันเนื่องจากการวางแกนเหล็กจำนวน 4 แกน	58
รูปที่ 5.8 แสดงรูปแบบการวางแกนเหล็ก	59
รูปที่ 5.9 แสดงแรงผลักดันเนื่องจากการวางแกนเหล็กแบบ "X"	60
รูปที่ 5.10 แสดงแรงผลักดันเนื่องจากการวางแกนเหล็กแบบ "+"	60
รูปที่ 5.11 แสดงฐานและลักษณะการวางแกนเหล็กอ่อนรูปตัว "E"	61
รูปที่ 6.1 แสดงชุดทดลองแบร์ริงแม่เหล็ก (Magnetic Repulsion Bearing)	62
รูปที่ 6.2 แสดงข้อแม่เหล็กจากการพันแกนเหล็ก 2 แบบ	63
รูปที่ 6.3 แสดงการปรับตำแหน่งของแม่เหล็กถาวรตามแนวแกนเพลลา	65
รูปที่ 6.4 แสดงระยะที่กำหนดให้มีการปรับตำแหน่งของแม่เหล็กถาวร	66
รูปที่ 6.5 แสดงเพลลาอูมิเนียมกลึงเกลียวและปลอกเกลียวสวมลงในแม่เหล็กวงแหวน	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 6.6 แสดงการปรับระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและแม่เหล็กถาวร(L)แสดงเฉพาะ MRB 1 ตัว	67
รูปที่ 6.7 แสดงโครงจับยึดแกนเหล็ก	68
รูปที่ 6.8 แสดงการต่อขดลวดของแกนเหล็กสายล่างแบบอนุกรมเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ	69
รูปที่ 6.9 แสดงการต่อขดลวดของแกนเหล็กสายล่างแบบขนานเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ	70
รูปที่ 7.1 แสดงแกนอิสระของระบบ MRB 2 แกน คือแกนมุม θ และ มุม ϕ	73
รูปที่ 7.2 แสดงแกนอิสระของระบบ (แกน θ) โดยมองรูปที่ 7.1 จากด้าน A	73
รูปที่ 7.3 แสดงแกนอิสระของระบบ (แกน ϕ) โดยมองรูปที่ 7.1 จากด้าน B	73
รูปที่ 7.4 แสดงการจำลองระบบ MRB	74
รูปที่ 7.5 แสดงแบบจำลองการสั่นในแกนอิสระ θ	75
รูปที่ 7.6 แสดงการทดลองหาค่า k	77
รูปที่ 7.7 แสดง Block diagram ของระบบ	79
รูปที่ 8.1 แสดงแบบ 3 มิติของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า (MRB)	86
รูปที่ 8.2 แสดงภาพถ่ายชุดทดลองแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบไว้	87

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 แสดงค่า μ_r max และจุดอิมิตัวของสารแม่เหล็กบางชนิด	7
ตาราง 2.2 เหล็กแผ่นฉลิกอนมาตราฐานเปรียบเทียบ	22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

แบริ่งแม่เหล็ก (Magnetic Bearing) ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาโดยทั่วไปนั้น จะเป็น แบริ่งแม่เหล็กแรงดูด (Attractive Magnetic Bearing) ซึ่งอาศัยแรงดูดของสารแม่เหล็ก ยกเพลาให้ลอยขึ้น แบริ่งแม่เหล็กแรงดูด (Attractive Magnetic Bearing) ปัจจุบันได้มีการพัฒนา จนสามารถนำออกมาใช้งานได้ โดยใช้แรงดูดของสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic) ซึ่งแบริ่งแม่เหล็ก Magnetic Bearing ชนิดอาศัยแรงดึงดูดเช่นนี้ จะทำให้เกิดสภาวะการทำงานที่ไม่เสถียรขึ้น (แกนเพลาไม่เข้าสู่สภาวะเสถียรที่จุดศูนย์กลางการหมุนได้ด้วยตัวเอง (Self-centering)) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมี ระบบควบคุมแบบป้อนกลับได้ สำหรับกระตุ้นแรงแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic) เพื่อควบคุมให้เพลาเข้าสู่สภาวะเสถียรที่จุดศูนย์กลางการหมุน และ ปรับสภาพการกระตุ้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด เพื่อให้โหลดเข้าสู่สภาวะสมดุล สำหรับแบริ่งแม่เหล็กแรงดูด (Magnetic Attractive Bearing) ซึ่งมีค่าความเหนียว (Stiffness) สูง จำเป็นต้องใช้ ระบบควบคุมที่มีอัตราขยาย (gain) สูง และมีช่วง bandwidth กว้าง เพื่อควบคุมระบบให้เข้าสู่สภาวะเสถียร ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แบริ่งแม่เหล็กแรงดูด (Magnetic Attractive Bearing) ที่มีเสถียรภาพเป็นระบบที่ยุ่งยากซับซ้อนมาก

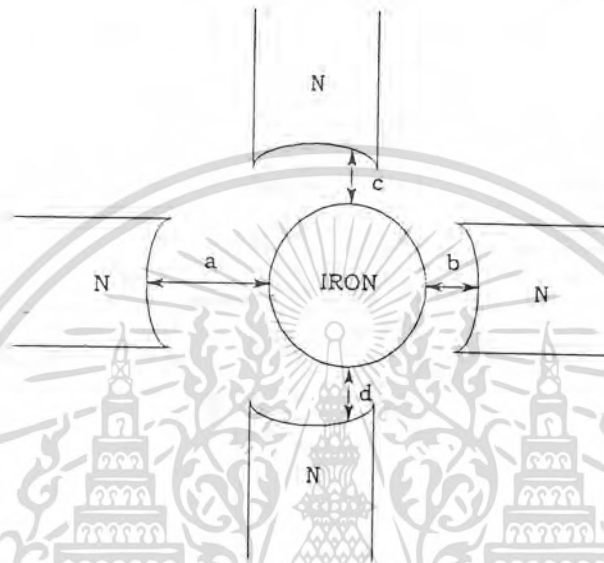
แบริ่งแม่เหล็กแรงผลัก (Magnetic Repulsion Bearing) ซึ่งอาศัยแรงผลักของสารแม่เหล็กที่มีขั้วตรงกันข้าม ยกเพลาให้ลอยขึ้น จะสามารถแก้ปัญหาความยุ่งยากซับซ้อนที่เกิดขึ้นในระบบแบริ่งแม่เหล็กแรงผลัก (Attractive Magnetic Bearing) ได้ โดยที่จะมีสภาวะการทำงานที่เสถียร แกนเพลาสามารถเข้าสู่สภาวะเสถียรที่จุดศูนย์กลางการหมุนได้ โดยไม่ต้องใช้ระบบควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากแรงผลักของสารแม่เหล็ก ที่มีขั้วตรงกันข้ามจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กลดน้อยลง โดยจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

1.1 ข้อได้เปรียบของ แบริ่งแม่เหล็กแรงผลัก (Magnetic Repulsion Bearing) ที่มีต่อแบริ่งแม่เหล็กแรงดูด (Magnetic Attractive Bearing)

สำหรับระบบของ แบริ่งแม่เหล็ก (Magnetic Bearing) เมื่อเพลาเริ่มต้นหมุน หรือเพลามีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการหมุน รวมทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบ จะทำให้ การหมุนของเพลาที่ใช้แบริ่งแม่เหล็ก (Magnetic Bearing) เป็นตัวรองรับ เกิดสภาวะไม่สมดุลขึ้น นั่นคือจะมีการแกว่งของเพลาเกิดขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องทำให้การแกว่งของเพลาลดน้อยลงเรื่อยๆ จนในที่สุด ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลหรือเสถียร นั่นคือไม่มีการแกว่งของเพลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

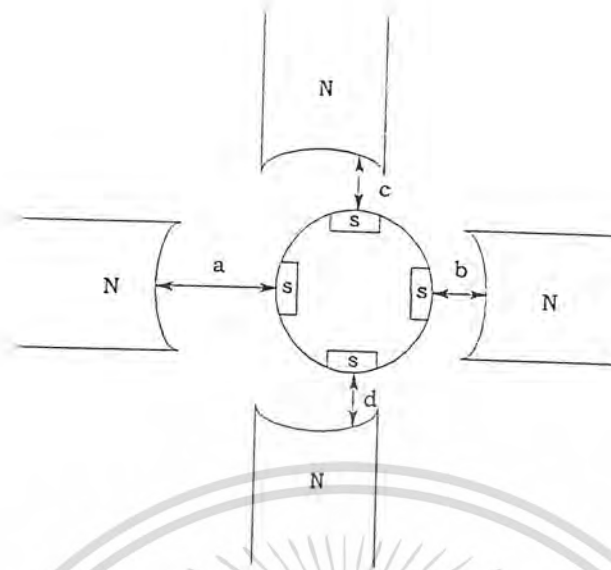
ในกรณีของแบริ่งแม่เหล็กแรงดูด(Magnetic Attractive Bearing) แรงดูดของสารแม่เหล็กและแกนเหล็กมีค่าลดน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เมื่อการหมุนของเพลานำเหล็กไม่เสถียร เพลาก็จะแกว่งทำให้ระยะ b ลดลง ซึ่งจะทำให้แรงดูดเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ระยะ a เพิ่มขึ้น ทำให้แรงดึงดูดลดน้อยลง เป็นผลให้เพลากว้างมากขึ้นเรื่อยๆ จะเห็นได้ว่า ระบบจะไม่มีทางเข้าสู่สภาวะเสถียรได้ด้วยตัวเอง จึงจำเป็นต้องใช้ระบบควบคุม เพื่อปรับค่าแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กทั้ง 4 ให้เหมาะสม



รูปที่ 1.1 แสดงแรงดูดของแบริ่งแม่เหล็กแรงดูดที่มีค่าลดน้อยลง

จึงจะสามารถทำให้การหมุนของเพลานำเข้าสู่สภาวะสมดุล ทั้งนี้ระบบควบคุมที่ใช้จะต้องมีประสิทธิภาพ ไม่งั้นนั่นแล้วเพลาก็จะแกว่งมากขึ้นเรื่อยๆ หรือใช้เวลานาน กว่าจะทำให้เพลานำเข้าสู่สภาวะเสถียรอีกครั้ง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ระบบ แบริ่งแม่เหล็กแรงดูด(Magnetic Attractive Bearing) ยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากต้องมีระบบควบคุมด้วยเสมอ

ส่วนในกรณีของแบริ่งแม่เหล็กแรงผลัก (Magnetic Repulsion Bearing) จะพบว่า แรงผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กที่ตรงกันข้ามจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กทั้งสองมีค่าน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 1.2 เมื่อการหมุนของเพลานำเริ่มไม่สมดุล เพลาก็จะเริ่มแกว่ง ทำให้ระยะ b ลดลง ซึ่งจะทำให้แรงผลักเพิ่มมากขึ้น ทำให้เพลานำถูกผลักกลับออกมา ในขณะที่ระยะ a เพิ่มขึ้น ทำให้แรงผลักลดลง เป็นผลให้เพลากว้างน้อยลงๆ จนในที่สุด เพลานำจะเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เองโดยไม่ต้องใช้ระบบควบคุม เนื่องจากระบบสามารถเข้าสู่สภาวะเสถียรได้โดยธรรมชาติ จึงทำให้สามารถตัดปัญหา ความยุ่งยากซับซ้อนของระบบควบคุมออกได้



รูปที่ 1.2 แสดงระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กที่มีค่าน้อยลง

1.2 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก และแรงแม่เหล็ก

ความสามารถในการรับโหลด ของ แบริ่งแม่เหล็กแรงผลัก (Magnetic Repulsion Bearing) จะขึ้นอยู่กับ ความดันแม่เหล็ก (Magnetic pressure) และพื้นที่รับโหลด (Loading Area) ในระบบแบริ่งแม่เหล็กแรงผลัก (Magnetic Repulsion Bearing) ความดันแม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นโดย การกระตุ้นให้เกิดแรงแม่เหล็กขึ้นใน แบริ่งแม่เหล็กแรงผลัก (Magnetic Repulsion Bearing) ซึ่งเป็นแรงกระทำต่อสารแม่เหล็กที่อยู่ในแกนเพลลา

ความดันแม่เหล็ก(Magnetic pressure) จะมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก โดย :

$$P \cong \frac{B^2}{2\mu_0}$$

โดยที่ P = ความดันแม่เหล็ก (Magnetic pressure)

B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density)

μ_0 = ค่าความซึมซาบ (permeability) ของอากาศ

ด้วยเหตุนี้ ถ้าต้องการเพิ่มความดันแม่เหล็กให้สูงขึ้น เพื่อให้ แบริ่งแม่เหล็กแรงผลัก(Magnetic Repulsion Bearing) สามารถรับโหลดได้เพิ่มมากขึ้น เราจะต้องเพิ่มความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กให้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) สามารถสร้างขึ้นได้ 3 วิธี คือ

1. สร้างจากสารแม่เหล็กถาวร (permanent magnet) ซึ่งมีอำนาจแม่เหล็กอยู่ในตัวเอง
2. สร้างจากสาร ferromagnetic โดยผ่านกระแสเข้าไปจะทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้น
3. สร้างจากแกนอากาศ (air core)

สำหรับโครงการนี้ เราจะสนใจเกี่ยวกับการสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก จากสาร ferromagnetic โดยผ่านไฟ
กระแสตรง (DC) เข้าไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วงจรแม่เหล็กและคุณสมบัติของสารแม่เหล็ก

2.1 mmf และเส้นแรงแม่เหล็ก (flux)

2.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H

ทั้ง B และ H เป็นเวกเตอร์ที่จุดใดจุดหนึ่ง ซึ่งความเข้มของสนามแม่เหล็ก H ที่จุดนั้นจะทำให้เกิดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่จุดนั้นด้วย เราอาจเขียนความสัมพันธ์ได้โดยสมการง่าย ๆ ดังนี้

$$B = \mu H \quad (2-1)$$

เมื่อ B เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา (T)

H เป็นความเข้มของสนามแม่เหล็ก ที่จุดนั้นมีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร หรือ แอมแปร์-เทอรันต่อเมตร (A/m) หรือ (AT/m)

μ เป็นความซึมซาบได้ของตัวกลาง (permeability) มีหน่วยเป็นเฮนรี่ต่อเมตร (H/m) หรือ เวเบอร์ต่อแอมป์-เทอรันเมตร (W/AT-m)

ความซึมซาบได้ของตัวกลาง μ นี้ ทำให้สามารถจำแนกสารตัวกลางออกได้เป็น 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารนั้น กล่าวคือให้

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2-2)$$

μ_0 เป็นตัวคงค่าของสมการเราเรียกว่าตัวซึมซาบแม่เหล็กในห้วงอวกาศ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m) ส่วน μ_r จะเป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบกับสารนั้นๆ มีคุณสมบัติแม่เหล็กได้เป็นที่เท่าของ μ_0

- สารใดมีค่า μ_r มากกว่า 1 เล็กน้อย สารนั้นจัดเป็นชนิด Paramagnetic Material เช่น อากาศ, ไม้

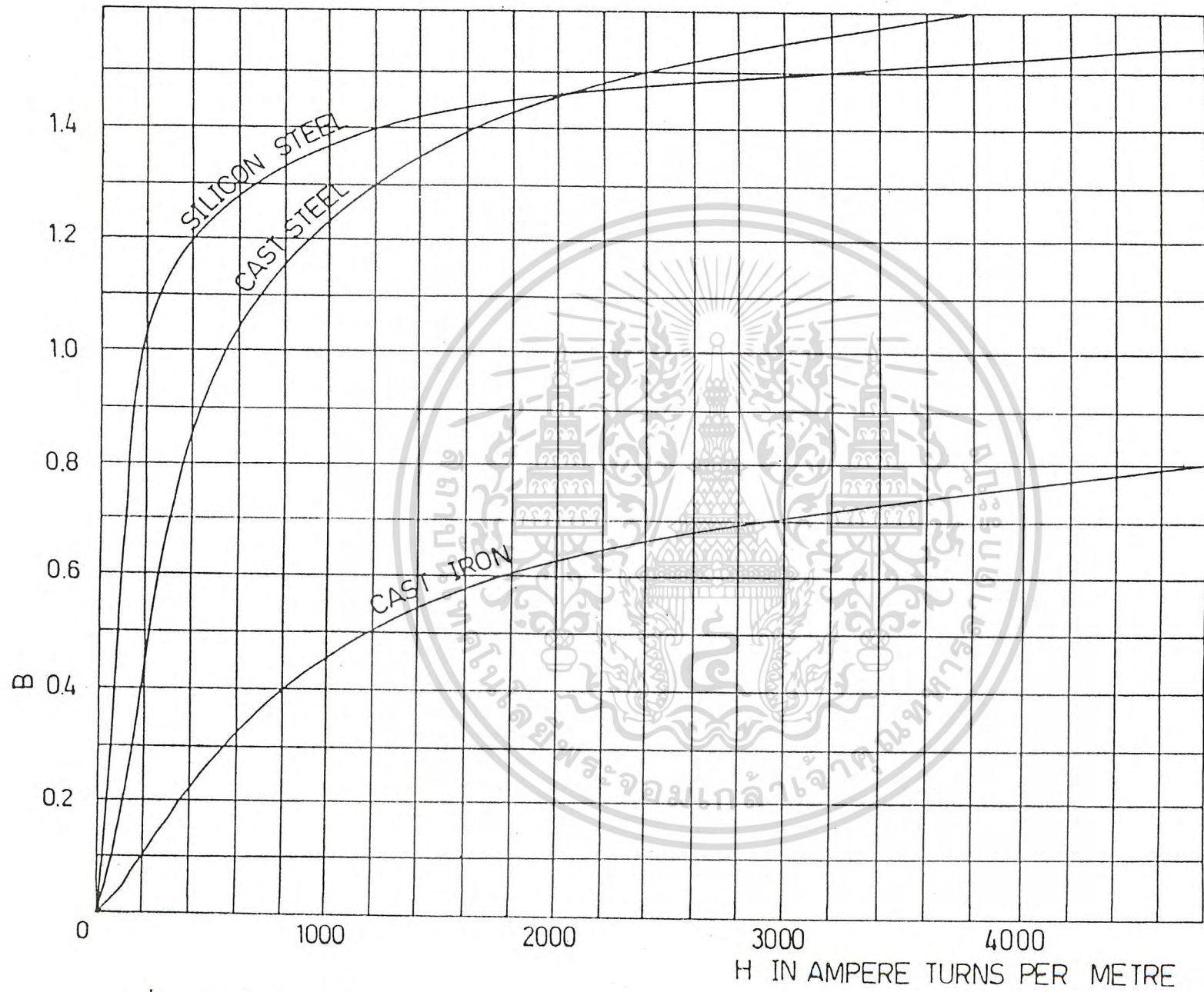
- สารใดมีค่า μ_r น้อยกว่า 1 สารนั้นจัดเป็นชนิด Diamagnetic Material เช่น พลาสติก, อลูมิเนียม หรือสารตัวนำสมบูรณ์ซึ่งมี $\mu_r = 0$

- สารที่มีค่า μ_r สูงมาก ๆ จัดเป็นพวก Ferromagnetic Material โดยทั่วไปค่า μ_r มีค่าอยู่ระหว่าง 1000 - 1000000 โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic Material)

และแม้ในสารชนิดเดียวกัน ที่ค่าของความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน ค่าของ μ_r จะไม่เท่ากัน ลักษณะความสัมพันธ์ของสารแม่เหล็กจากรูป 2.1 จะเห็นได้ว่า จากสมการ 2-1 เราอาจเขียนใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก

ตาราง 2.1 แสดงค่า μ_r max และจุดอิ่มตัวของสารแม่เหล็กบางชนิด

ชนิดของแม่เหล็ก	ส่วนผสมอื่น จากเหล็ก	μ_r max	Bs จุดอิ่มตัว (T)
เหล็ก	05% ของอื่น	6 000 – 9 000	2.2
เหล็ก	0.05% ของอื่น	20 000 – 300 000	2.2
เหล็กกล้าซิลิกอน	4% Si	7 000	2.0
เหล็กกล้าซิลิกอน เวียงแนวรีด	3% Si	40 000	2.0
48 Permalloy	48% Ni	60 000	1.6
Monimax	47% Ni, 3% Mo	35 000	1.45
78 Permalloy	78.5% Ni	70 000	1.05
Mo Permalloy	4% Mo, 79% Ni	90 000	0.87
Supermalloy	5% Mo, 79% Ni	900 000	0.79
Sinimax	43% Ni, 3% Si	35 000	1.1
Mumetal	5% Cu, 2% Cr 77% Ni	90 000	0.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_o H} \quad (2-1ก)$$

ค่าความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรง และจะมีระดับหนึ่ง ซึ่งแม้เราจะเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กมากขึ้นไปอีก แต่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่เปลี่ยนแปลง จุดที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีกนี้ เราจะเรียกเป็นจุดอิ่มตัวของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของสารนั้น และค่าของ μ_r ที่มีค่าสูงที่สุดของสารใดๆ จะสามารถได้จากการลากเส้นตรงไปสัมผัสกับเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H นี้ เราเรียกว่าเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก

ตาราง 2.1 แสดงค่าสูงสุดของ μ_r และจุดอิ่มตัวของสารแม่เหล็กบางชนิด

2.1.2 mmf และกฎของแอมแปร์

แรงเคลื่อนแม่เหล็กระหว่างจุดกำเนิดสองจุด a และ b จะมีค่าคำนวณได้จากสูตร

$$F = \int_a^b H dl \quad (2-3)$$

เมื่อ F เป็นแรงเคลื่อน มีหน่วยเป็นแอมแปร์หรือแอมแปร์เทอรัน (A หรือ AT)

กฎของแอมแปร์เป็นกฎแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กใช้ในการคำนวณต่างๆ ดังนี้

$$\int_s J da = \oint_{closed\ curve} H dl \quad (2-4)$$

เมื่อ J เป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อตารางเมตร

ดังนั้น $\int_s J da$ แสดงถึงปริมาณของกระแสทั้งหมดที่เห็นยวนำให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก (ซึ่งอยู่ใน closed curve ของวงจรมแม่เหล็กที่เราเลือกไว้) และทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็มีทิศทางตามกฎมือขวา เมื่อกระแส I ไหลอยู่ในขดลวดนั้น เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ทางด้านซ้ายของสมการ 2.4 ก็จะมีค่าเป็น Ni คือจำนวนกระแสทั้งหมดที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก และสมการ 2.4 ก็จะกลายเป็น

$$Ni = \oint H dl \quad (2-5)$$

ซึ่งถ้าคิดเส้นรอบวง R_1 จะได้

$$H_1(2\pi R_1) = Ni$$

ถ้าคิดที่เส้นรอบวง R_2 จะได้

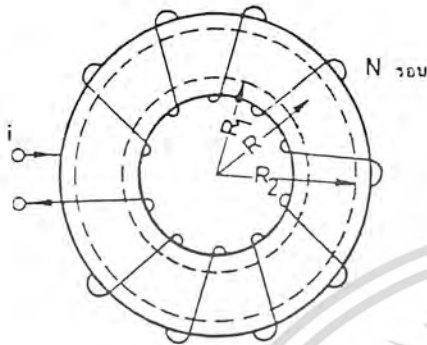
$$H_2(2\pi R_2) = Ni$$

ค่าของสนามแม่เหล็กภายในวงแหวนทอรรอยโดยเฉลี่ยจะมีค่าหาได้จากสมการ

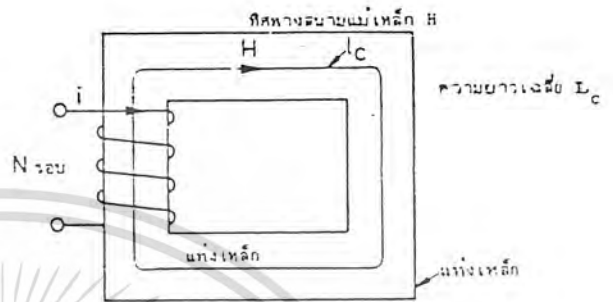
$$H(2\pi R) = Ni$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

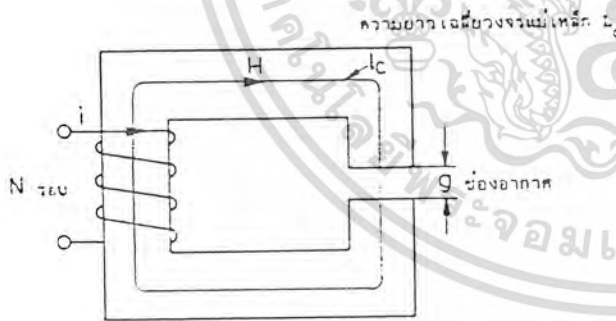
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



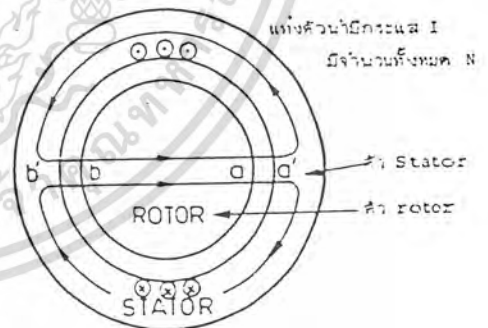
รูปที่ 2.2 วงแหวนทอรอย



รูปที่ 2.3 วงจรแม่เหล็ก



รูปที่ 2.4 วงจรแม่เหล็กชนิดมีช่องอากาศ



รูปที่ 2.5 วงจรแม่เหล็กของเครื่องจักรไฟฟ้า

เมื่อ R เป็นรัศมีโดยเฉลี่ยของวงแหวนทอรรอย

ความยาว $2\pi R$ เป็นความยาวเฉลี่ยของวงจรมแม่เหล็ก ซึ่งค่าความยาวเฉลี่ยของวงจรมแม่เหล็กนี้จะเป็นค่าที่เรานำมาใช้คำนวณ และโดยทั่วไปจะคิดว่าสนามแม่เหล็กภายในส่วนตัดขวางของวงจรม จุดใดจุดหนึ่งจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากันตลอด เพราะฉะนั้นวงจรมแม่เหล็กในรูป 2.3 สามารถใช้สมการ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ

$$Ni = HI$$

เมื่อ I เป็นความยาวเฉลี่ยของวงจรมแม่เหล็กในรูป 2.3 ซึ่งเราสามารถหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กภายในวงจรมแม่เหล็กนี้ได้

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r \frac{N}{l} i$$

รูป 2.4 แสดงวงจรมแม่เหล็กอันมีตัวกลางสองชนิด ชนิดหนึ่งเป็นช่องอากาศ กรณีนี้จากสมการ 2.5 จะกลายมาเป็น

$$\begin{aligned} Ni &= \int Hdl \text{ ของวงจรมแม่เหล็ก} + \int Hdl \text{ ของวงจรมช่องอากาศ} \\ &= Hl \text{ เหล็ก} + Hg \text{ อากาศ} \\ &= \frac{B}{\mu_0 \mu_r} l + \frac{B}{\mu_0} g \end{aligned}$$

ซึ่งตามธรรมชาติค่า μ_r จะสูงกว่า μ_0 มาก และเมื่อใดที่ค่า $g \gg l/\mu_r$ แล้ว เราสามารถใช้ค่าโดยประมาณในการคำนวณโดยการตัดค่า μ_r ในส่วนของวงจรมที่เป็นสารแม่เหล็กออก คงเหลือแต่ส่วนวงจรมช่องอากาศ

$$\begin{aligned} Ni &\approx Hg \text{ อากาศ} \\ &\approx Bg/\mu_0 \end{aligned}$$

วงจรมแม่เหล็กหลักอีกชิ้นหนึ่งที่เหมาะในการพิจารณาคือวงจรมจากรูป 2.5 อันเป็นวงจรมหลักของเครื่องจักรไฟฟ้าชนิดหมุน โดยทั่วไป โดยมีตัวสเตเตอร์อยู่ภายนอกยึดอยู่กับที่ทำจากสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic Material) มีแท่งตัวนำจำนวน N แท่ง ซึ่งแต่ละแท่งจะมีกระแสไหลผ่านจำนวน I แอมแปร์ อยู่บนตัวสเตเตอร์ ตัวโรเตอร์ ซึ่งหมุนได้อยู่ภายในเป็นสารแม่เหล็กเหมือนกัน กระแสไฟฟ้าจากสเตเตอร์จะเหนี่ยวนำเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นบนวงจรมแม่เหล็กอันนี้ เราสามารถคำนวณหาค่าต่างๆของวงจรมได้ โดยการเลือกเส้นทางในวงจรมแม่เหล็กอันหนึ่ง ในกรณีนี้เลือกจากจุด a ไป a' ไป b' ไป b กลับมายัง a เป็นวงจรมปิด (closed curve) ของสมการ $\oint Hdl$ เพราะฉะนั้นเราจะได้ว่า

$$\begin{aligned} Ni &= \oint_{aa'b'ba} Hdl \\ &= \int_a^{a'} Hdl + \int_{a'}^{b'} Hdl + \int_{b'}^b Hdl + \int_b^a Hdl \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 10 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง $\int_a^{a'} Hdl$ และ $\int_{b'}^b Hdl$ จะเป็นค่า mmf ของช่องอากาศระหว่างตัว โรเตอร์กับสเตเตอร์ทั้งสองด้าน ซึ่งมีขนาดเท่ากัน

$\int_{a'}^b Hdl$ จะเป็นค่า mmf ของตัวสเตเตอร์ ซึ่งเป็นสารแม่เหล็ก $\int_b^{b'} Hdl$ จะเป็นค่า mmf ของตัวโรเตอร์ ซึ่งเป็นสารแม่เหล็ก

$$N_i = 2 \int_a^{a'} Hdl + \text{mmf ในสารแม่เหล็ก}$$

$$\approx 2 Hg$$

เมื่อ g เป็นช่องอากาศ ของเครื่องจักร ไฟฟ้าในนั้นๆ

$$\int_a^{a'} Hdl = Hg \approx \frac{1}{2} N_i$$

ซึ่งทั้ง $\int_a^{a'} Hdl$ หรือ Hg นี้ เราเรียกว่า mmf ที่อยู่ที่จุด a ระหว่างอากาศ g

2.1.3 เส้นแรงแม่เหล็ก (flux)

เส้นแรงแม่เหล็กเป็นปริมาณสเกลาร์ ไม่มีทิศทาง เราอาจหาขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กได้จากนิยามของเส้นแรงแม่เหล็กเป็น Surface Integral ของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B กับพื้นที่ผิว A ซึ่งตั้งฉากกัน

$$\phi = \int_s B dA \quad (2-6)$$

แต่โดยทั่วไปในการศึกษาทฤษฎีเครื่องจักร ไฟฟ้า เราจะแสดงค่าของเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ในแนวเดียวกันกับแกนของค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B

ถ้าค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B มีค่าสม่ำเสมอโดยตลอดแล้ว เราสามารถหาค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ ได้ โดยการคูณพื้นที่หน้าตัด A ที่ตั้งฉากกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก B ในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดนั้น

นั่นคือ

$$\phi = BA \quad (2-7)$$

เมื่อ ϕ เป็นเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวบบอร์ (Wb)

ในวงจรแม่เหล็กอันหนึ่ง เช่น วงจรแม่เหล็กในรูป 2.4 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแส I ทั้งหมด อาจไม่ผ่านตลอดวงจร บางส่วนอาจกระโดดข้ามวงจรแม่เหล็กด้านบนไปสู่วงจรทางด้านล่าง โดยผ่านอากาศรอบข้าง เส้นแรงแม่เหล็กเหล่านี้เราเรียกว่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (leakage flux)

และปรากฏการณ์อีกชนิดหนึ่งในวงจรแม่เหล็กที่มีช่องอากาศคือ เส้นแรงแม่เหล็กระหว่างช่องอากาศจะไม่สม่ำเสมอ ทำให้ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กจะไม่สม่ำเสมอตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 11 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีแนวโน้มที่จะลดลงกว่าในส่วนที่เป็นสารแม่เหล็ก ทั้งนี้เพราะพื้นที่หน้าตัดจริงของช่องอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าธรรมดา ปรากฏการณ์นี้เราเรียกว่า fringing

2.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ กับ mmf

ความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ กับ mmf สามารถเขียนได้เป็นสมการง่าย ๆ ดังนี้

$$\phi = PF \quad (2-8)$$

เมื่อ P เป็นความนำแม่เหล็ก (Permeance) มีหน่วยเป็นเวบเบอร์ต่อแอมแปร์เทอรัน (Wb/AT)

ค่าของความนำแม่เหล็กนั้นเราสามารถหาได้จากรูปลักษณะของตัวกลางแม่เหล็กต่าง ๆ กัน ถ้าเป็นแท่งที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A ตารางเมตร l เมตร มีความยาวและมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กเท่ากับ μ ค่าความนำแม่เหล็กของแท่งนั้นจะเท่ากับ

$$P = \frac{\mu A}{l} \quad (2-9)$$

เรากำหนดค่าความต้านแม่เหล็ก (Reluctance) เป็นส่วนกลับของค่าความนำแม่เหล็ก P โดยถ้าเป็นแท่งที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A ตารางเมตร ความยาว l เมตร และมีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) เท่ากับ μ ค่าความนำแม่เหล็กของแท่งนั้นจะเท่ากับ

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (2-10)$$

R เป็นค่าความต้านแม่เหล็กมีหน่วยเป็นแอมแปร์เทอรันต่อเวบเบอร์ (AT/Wb) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างสมการ 2-9 กับ 2-10

$$PR = \mu v = 1$$

นั่นคือ

$$P = \frac{1}{R} \quad (2-11)$$

และ

$$\mu = \frac{1}{v}$$

จากวงจรแม่เหล็กหลักรูป 2.4 เราจะพิจารณาค่าของเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรนั้น ในรูปของความนำแม่เหล็ก P หรือความต้านแม่เหล็ก R ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Ni &= \frac{Bl}{\mu_o \mu_r} + \frac{Bg}{\mu_o} \\ &= \frac{\phi l_1}{\mu_o \mu_r A_1} + \frac{\phi g}{\mu_o A_2} \end{aligned} \quad (2-12a)$$

$$Ni = \frac{\phi}{P_1} + \frac{\phi}{P_2}$$

หรือ

$$Ni = \phi R_1 + \phi R_2 \quad (2-12b)$$

เมื่อ l_1 เป็นความยาวเฉลี่ยของวงจรสารแม่เหล็ก

A_1 เป็นพื้นที่หน้าตัดของสารแม่เหล็ก

P_1 และ R_1 เป็นค่าความนำแม่เหล็ก และความต้านแม่เหล็กในสารแม่เหล็ก

P_2 และ R_2 เป็นค่าความนำแม่เหล็ก และความต้านแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ (Airgap)

จาก 2-12b แก้สมการหาค่า ϕ ในรูปตัวแปรอื่น

$$\phi = \frac{Ni / R_2}{1 + R_1 / R_2} = \frac{Ni / R_2}{1 + (1 / \mu_r)(l_1 / g)(A_2 / A_1)} \quad (2-13)$$

ถ้ากรณี $(l_1 A_2 / \mu_r A_1 g)$ น้อยกว่า 1 มากๆ เราก็ได้ค่าประมาณ

$$\phi \approx \frac{Ni}{R_2}$$

โดยเฉพาะในช่องอากาศ R_2 เหมือนตัวอย่างที่ทำในครั้งแรก

2.2 การคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ L

2.2.1 นิยามของตัวเหนี่ยวนำ

ในวงจรไฟฟ้าค่านิยามของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่ถูกตัวนำไฟฟ้าเกี่ยวไว้ภายใน (total flux linkage)หารด้วยจำนวนกระแส

$$L = \frac{\Psi}{i} \quad (2-14)$$

เมื่อ L เป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็นเฮนรี่ H

Ψ เป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกเกี่ยวไว้ภายใน มีหน่วยเป็นเวบเบอร์-เทอรัน (Wb-T)

i เป็นกระแสไฟฟ้า หน่วยเป็นแอมแปร์

ปกติค่าความเหนี่ยวนำมี 2 ชนิด คือ ค่าความเหนี่ยวนำในตัวเอง และค่าความเหนี่ยวนำจากวงจรอื่น ซึ่งมีค่านิยามดังนี้

ค่าความเหนี่ยวนำในตัวเอง

$$L = \frac{\Psi}{i} \quad (2-14a)$$

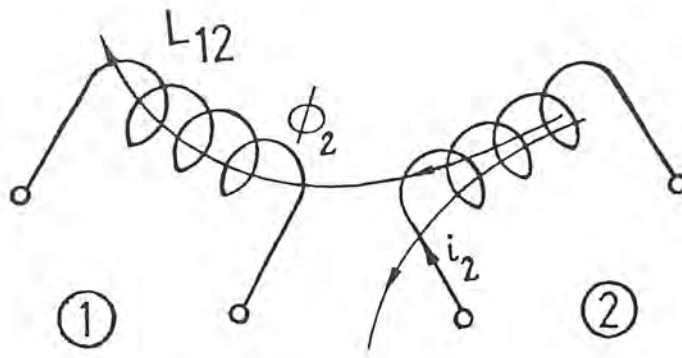
เมื่อ L เป็นค่าความเหนี่ยวนำในตัวเอง

Ψ เป็นเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่ถูกเกี่ยวไว้ภายใน (total flux linkage)

เมื่อวงจรอื่นภายนอกเปิดอยู่ (open circuit)

i เป็นกระแสในวงจรของตัวเอง

ค่าตัวเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)



รูป 2.6 แสดงหาค่าตัวเหนี่ยวนำร่วม

จากรูป 2.6 คำนิยามค่าความเหนี่ยวนำร่วมของวงจร 1 เกิดจากวงจร 2

$$L_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_2} \quad (2-14b)$$

L_{12} เป็นค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดอันที่ 1 อันเกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดอันที่ 2 มีหน่วยเป็นเฮนรี่ (H)

ψ_{12} เป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำอยู่ในขดลวด 1 ซึ่งเกิดขึ้นจากกระแสในขดลวดอันที่ 2 (I_2) มีหน่วยเป็น เวบเบอร์-เทอรัน (Wb-T)

I_2 เป็นกระแสในขดลวดอันที่ 2

2.2.2 ค่า ψ ในวงจรที่ค่าเส้นแรงแม่เหล็กคงที่

วงจรประเภทนี้หมายความว่าถึงวงจรที่มีเส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านเท่ากันตลอดทั้งวงจรในกรณีนี้จะได้

$$\psi = N\phi \quad (2-15)$$

เมื่อ N เป็นขดลวดของวงจรมัน มีหน่วยเป็นรอบ T

ϕ เป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องตลอดวงจรมัน มีหน่วยเป็นเวบเบอร์ Wb

2.2.3 ค่า ψ ในวงจรที่ค่าเส้นแรงแม่เหล็กมีขนาดไม่คงที่

ในวงจรแม่เหล็กของเครื่องจักร ไฟฟ้าโดยทั่วไป แม้ในวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านขดลวดทั้งหมดจะไม่คงที่สม่ำเสมอ เพราะจะมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วออกมาทางด้านข้างระหว่างตัวนำแม้จะเรียงชิดกันเพียงใด เพราะฉะนั้นในการคำนวณ โจทย์ให้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กคงที่จึงเป็นค่าโดยประมาณ ในบางกรณีที่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วระหว่างรอบน้อย จนเราตัดผลของส่วนนั้นออกทิ้งไปได้ไม่ทำให้ค่าผลลัพธ์ผิดไปจากความจริงมาก แต่ในหลายกรณีของวงจรแม่เหล็กของเครื่องจักรไฟฟ้า จะมีเส้นแม่เหล็กไม่สม่ำเสมอตลอดวงจร และการคำนวณต้องคิดค่าของวงจรแต่ละส่วน โดยสามารถคำนวณได้สองวิธี คือ

วิธีแรก จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกเกี่ยวไว้ทั้งหมดเท่ากับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงนี้ 14 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Psi = \sum n d \phi \quad (2-16a)$$

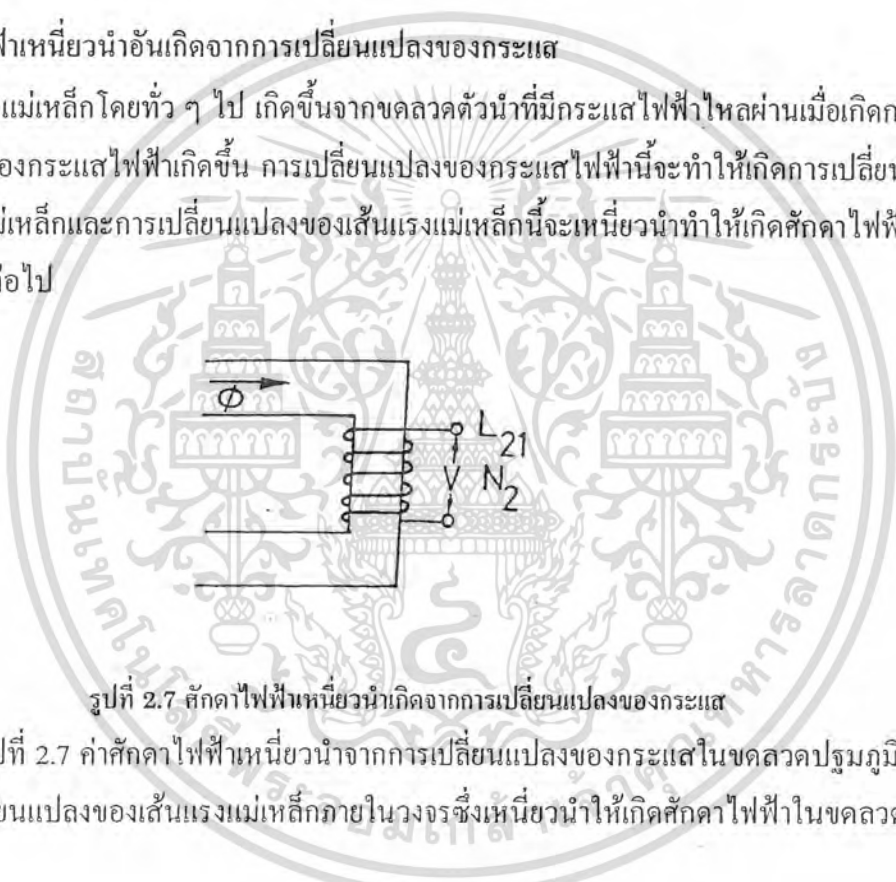
เมื่อให้ n เป็นจำนวนรอบที่ถูกเกี่ยวโดยเส้นแรงแม่เหล็ก จำนวน d ซึ่งแยกออกคิดทีละน้อย $d \phi$ เป็นจำนวนเส้นแรงที่แยกออกจำนวนน้อยเพื่อใช้ช่วยในการคำนวณ วิธีที่ 2 ในการคำนวณจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกเกี่ยวไว้ทั้งหมดเท่ากับ

$$\Psi = \sum \phi dn \quad (2-16b)$$

เมื่อให้ ϕ เป็นจำนวนเส้นแม่เหล็กทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับตัวอย่างจำนวนรอบส่วนเล็กๆ dn เป็นจำนวนรอบแตกออกคิดเป็นส่วนย่อย

2.3 สักคาไฟฟ้าเหนี่ยวนำอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแส

สนามแม่เหล็กโดยทั่ว ๆ ไป เกิดขึ้นจากขดลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กและการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดสักคาไฟฟ้าในขดลวดตัวนำอื่นต่อไป



รูปที่ 2.7 สักคาไฟฟ้าเหนี่ยวนำอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแส

จากรูปที่ 2.7 ค่าสักคาไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสในขดลวดปฐมภูมิ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กภายในวงจรซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดสักคาไฟฟ้าในขดลวดทุติยภูมิ

$$v = \frac{d\Psi}{dx}$$

$$v = N_2 \frac{d\phi}{dx} \quad (2-17)$$

2.4 การสูญเสียพลังงานภายในสารแม่เหล็ก

2.4.1 การสะสมพลังงานแม่เหล็ก

หลักการแปรรูปของพลังงานแม่เหล็กในวงจรต่างๆเราเริ่มพิจารณาวงจรจากรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 15 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยต้องการหาพลังงานที่สะสมในสนามแม่เหล็กอันเกิดขึ้นจากกระแส I ไหลเข้าสู่ขดลวดในวงจร จำนวน N รอบ

เพราะฉะนั้นกำลัง(Power)ที่ปลายทั้งสองของขดลวดอันได้จากอัตราการไหลของพลังงานเข้าสู่ วงจรโดยผ่านขดลวด

$$P = ie \quad (2-18)$$

P มีหน่วยเป็น วัตต์ หรือ จูล/วินาที

e เป็นศักดาที่ให้แก่ขดลวด

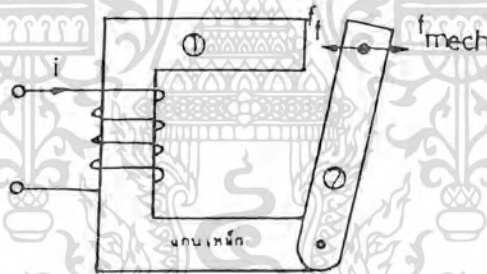
ซึ่งพลังงานทั้งหมดที่ใส่เข้าสู่ขดลวด จากระยะเวลา $t=0$ ถึง $t=t$ เท่ากับ w_{in} ซึ่งมีค่า

$$\begin{aligned} W_{in} &= \int_0^t P dt \\ &= \int_0^t iedt \end{aligned} \quad (2-19)$$

ค่าของศักดาไฟฟ้า e ในสูตร สามารถแทนค่าได้จากศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานไฟฟ้า ของขดลวดและจากการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเส้นแรงที่เกี่ยวข้องอยู่

$$e = Ri + \frac{d\psi}{dt}$$

แทนค่า e ลงในสมการ 2-19 จะได้



รูปที่ 2.8 แสดงวงจรรีเลย์

$$\begin{aligned} W_{in} &= \int_0^t \left(Ri + \frac{d\psi}{dt} \right) i dt \\ &= \int_0^t \left(Ri^2 + i \frac{d\psi}{dt} \right) dt \end{aligned} \quad (2-20)$$

อนึ่งพลังงานความร้อนที่สูญเสียจากค่าความต้านทานของขดลวดเท่ากับ

$$W_{res} = \int_0^t Ri^2 dt$$

เพราะฉะนั้น พลังงานที่ไหลเข้าสู่สนามแม่เหล็กจะมีค่า

$$\begin{aligned}
 W &= W_{in} - W_{res} \\
 &= \int_0^t \left(\frac{id\psi}{dt} \right) dt \\
 &= \int_{\psi(0)}^{\psi(t)} id\psi
 \end{aligned}
 \tag{2-21}$$

จะเห็นได้ว่าพลังงานที่ใส่เข้าสู่สนามแม่เหล็ก จะมีค่าแปรโดยตรงกับค่าศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ e_{in} เมื่อ

$$e_{in} = \frac{d\psi}{dt}$$

จากสมการนี้ ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน ถึงแม้ว่าจะมีกระแสไหลในขดลวดและมีศักดาไฟฟ้าคร่อมขดลวดนั้น นั่นก็จะเป็นการเปลี่ยนแปลงของพลังงานแม่เหล็กที่สะสมอยู่เลยนอกจากจะมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก และถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก พลังงานที่เปลี่ยนไปจะมีค่าแปรตามกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนไป เพราะฉะนั้นพลังงานแม่เหล็กสะสม W_f จะมีค่าจากสมการเท่ากับ

$$W_f - W_f(0) = W = \int_{\psi(0)}^{\psi(t)} id\psi \tag{2-22}$$

เมื่อ $W_f(0)$ เป็นพลังงานแม่เหล็กสะสม เมื่อเวลา $t=0$

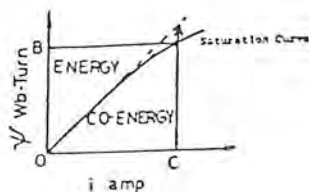
$\psi(0)$ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคดลิ่ง เมื่อเวลา $t=0$

ถ้าตอนเริ่มแรกยังไม่มีการสะสมพลังงานเข้าสู่สนามแม่เหล็กเลย (ก่อนเวลา $t=0$) ดังนั้น พลังงานสะสมเบื้องต้น $W_f(0)$ ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ และไม่มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นเพราะฉะนั้นเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคดลิ่งต้องมีค่าเป็นศูนย์ด้วย กล่าวคือ

$$\psi(0)=0$$

เพราะฉะนั้น พลังงานสะสมทั้งหมดของวงจรแม่เหล็กที่เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคดลิ่ง ψ จะมีค่าเท่ากับ

$$W_f = \int_0^{\psi} id\psi \tag{2-23}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 17 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานอันเกิดจากสนามแม่เหล็กกระจายอยู่บริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก สำหรับกรณีสารแม่เหล็กที่ไม่มีการสูญเสีย และมีค่าซึมซาบของแม่เหล็กคงที่ ความหนาแน่นของพลังงานต่อหน่วยปริมาตรจะมีค่า

$$\begin{aligned} W_f &= \frac{W_f}{A_m l_m} \\ &= \frac{1}{2} \frac{iN\phi}{A_m l_m} \\ &= \frac{1}{2} HB \\ &= \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} \end{aligned}$$

เมื่อ W_f ความหนาแน่นของพลังงานต่อปริมาตรมีหน่วยเป็นจูลต่อลบ.เมตร

H เป็นความเข้มสนามแม่เหล็กหน่วยเป็น แอมแปร์- เทอร์นต่อเมตร

B ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็น เทสลา

μ ความซึมซาบของสารแม่เหล็กหน่วยเป็น เฮนรี่ต่อเมตร

การหาค่าพลังงานที่สะสมอยู่ในสนามแม่เหล็ก ถ้าคำนึงถึงการอิมิตัวของสารแม่เหล็กด้วยแล้ว จะทำได้ยากมากเพราะความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแยกคูลอมบ์ และกระแส I ไม่เป็นเส้นตรง การหาค่าพลังงานจะได้จากสมการ 2-23 คูจากรูป 2.9 จะเป็นพื้นที่ซึ่งเกิดจากการอินทิเกรต กระแส I เมื่อเทียบกับเส้นแรงแยกคูลอมบ์ จะเป็นพื้นที่ OAB เมื่อ $\psi(0)$ และ $\psi(t)=B$ ถ้าเราไม่คิดการสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส พลังงานสะสมขณะเพิ่มเส้นแรงแยกคูลอมบ์ สามารถคายกลับคืนได้ทั้งหมดเมื่อลดเส้นแรงแยกคูลอมบ์ลงสู่สภาพเดิม $\psi(0)$

เราอาจคำนวณหาค่าแรงทางกลศาสตร์ ของวงจรรูปที่ 2.8 ได้โดยอาศัยหลักการทรงจำนวนของพลังงาน

พิจารณาจากรูปที่ 2.8 ถ้าเราเพิ่มพลังงานเข้าไปในวงจรรูปพลังงานไฟฟ้า พลังงานรูปนี้จะต้องเปลี่ยนแปลงต่อเป็นรูปของพลังงานสูญเสียในรูปความร้อน พลังงานสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น และพลังงานกลศาสตร์ เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} [\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใส่เพิ่มในวงจร}] - [\text{พลังงานความร้อนที่สูญเสียไป}] \\ = [\text{พลังงานกลศาสตร์}] + [\text{พลังงานที่สะสมไว้ในสนามแม่เหล็ก}] \end{aligned}$$

จากสมการ 2-21 ถ้าซ้ายมือของสมการนี้ขนาดเท่ากับ

$$W = \int_{\psi(0)}^{\psi(\mu)} i d\psi$$

คิฟเฟอเรนเชียลของสมการนี้จะได้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 18 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dW = I d\psi = f_{mech} dx + dW_f \quad (2-24)$$

จากสมการ 2-24 ถ้ากรณีไม่มีส่วนใดเคลื่อนที่ $f_f = f_{mech}$, $dx=0$

จะได้ $dW_f = I d\psi$

ถ้ากรณีค่าของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับไม่เปลี่ยนแปลง, $d\psi = 0$ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานสะสมมาจากพลังงานทางกลศาสตร์

$$dW_f = f_{mech} dx$$

จากสมการ 2-24 เราสามารถเขียนได้เป็น

$$dW_f = I d\psi - f_{mech} dx \quad (2-25)$$

ซึ่งจากสมการนี้เราเห็นได้ว่าพลังงานแม่เหล็กสะสมในสนามแม่เหล็กจะแปรตามตัวแปร 2 ตัว ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกันคือ ψ และ x เราอาจเขียนรูปของ $dW_f(\psi, x)$ ในรูปของ partial derivative ได้เป็น

$$dW_f(\psi, x) = \frac{\partial W_f}{\partial \psi} d\psi + \frac{\partial W_f}{\partial x} dx \quad (2-26)$$

เทียบกับสมการ 2-25 เราจะได้

$$i = \frac{\partial W_f}{\partial \psi}(\psi, x) \quad (2-27), (2-28)$$

และ

$$f_{mech} = -\frac{\partial W_f}{\partial x}(\psi, x)$$

จากสมการ 2-27 และ 2-28 ทำให้เราสามารถคำนวณหาค่ากระแสและค่าแรงงานที่กระทำในวงจรได้อีกวิธีหนึ่ง

แรงที่กระทำ f_{mech} ที่ได้จะเป็นรูปฟังก์ชันของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับในบางกรณีเราไม่สามารถหาจาก $\frac{\partial W_f}{\partial x}(\psi, x)$ ได้ง่ายๆ จึงจำเป็นต้องหาแรงที่กระทำในรูปของฟังก์ชัน

กล่าวคือในรูปของกระแสในวงจร ดังนั้นเราจึงกำหนดค่า พลังงานเทียบ (Co-Energy) ในรูปของฟังก์ชันของกระแส โดยจากรูปที่ 2.9 พลังงานเทียบ กำหนดโดย

$$W_f' = \int_{i(0)}^{i(t)} \psi di \quad (2-29)$$

จากรูป 2.9 และสมการ 2-29 พลังงานเทียบ W_f' จะเป็นพื้นที่อันเกิดจากการอินทิเกรตเส้นแรง ψ เมื่อเทียบกับกระแส i จะเป็นพื้นที่ OCA เมื่อ $i(0)=0$ และ $i(t)=C$

จากรูป 2.9 เราจะเห็นได้ว่า พลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กรวมกับพลังงานเทียบจะเป็นพื้นที่ OBAC หรือมีค่าเท่ากับผลคูณของ ψ และ i คือ

$$W_f' + W_f = \psi i$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 19 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$W_f'(i,x) = i\Psi - w_f(\Psi, x) \quad (2-30)$$

ทำการดิฟเฟอเรนเชียลฟังก์ชัน 2-30 จะได้

$$dW_f'(i,x) = I d\Psi + \Psi di - dW_f(\Psi, x) \quad (2-31)$$

แทนค่า $dW_f(\Psi, x)$ จากสมการ 2-25 ลงใน 2-31 จะได้

$$dW_f'(i,x) = \Psi di + f_{mech} dx \quad (2-32)$$

ในทำนองเดียวกันกับสมการ 2-25 และ 2-26 เราจะได้

$$dW_f'(i,x) = \frac{\partial W_f'}{\partial i} di + \frac{\partial W_f'}{\partial x} dx \quad (2-33)$$

ซึ่งจะได้ค่า
$$\Psi = \frac{\partial W_f'}{\partial i}(i,x) \quad (2-34)$$

และ

$$f_{mech} = + \frac{\partial W_f'}{\partial x}(i,x) \quad (2-35)$$

จากสมการ 2-35 เราสามารถคำนวณหาแรงทางกลศาสตร์เมื่อทราบค่าพลังงานเทียบเป็นฟังก์ชันของ I และ X ได้อีกทางหนึ่ง

2.4.2 การสูญเสียในแกนเหล็ก

ก. การออกแบบวงจรโดยทั่วไป

การสูญเสียในแกนเหล็กของเครื่องจักรไฟฟ้าทุกชนิด พลังงานที่สูญเสียไปจะถูกจ่ายทิ้งออกมาเป็นรูปของพลังงานความร้อน สารแม่เหล็กที่ใช้ทำเครื่องจักรไฟฟ้าจึงพยายามทำให้มีคุณสมบัติในการสูญเสียในแกนให้น้อยที่สุด โดยมีคุณสมบัติในการซึมซาบแม่เหล็กสูง แต่อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ดังแสดง ในหัวข้อ 2.1 ไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้น ค่าของความซึมซาบแม่เหล็กจึงไม่คงที่ การที่จะกำหนดคุณสมบัติของสารแม่เหล็กแต่ละชนิดลง เพื่อการออกแบบคำนวณ จึงจำเป็นต้องอาศัยเส้นกราฟ แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรค่าต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของแผ่นแกน ความถี่ ชนิดของสารและแนวของการรีดแผ่นเหล็กเป็นต้น ตาราง 2.2 แสดงตัวอย่างค่าการสูญเสียภายในแกนเหล็ก (P) ของเหล็กแผ่นซิลิกอนขนาดความหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตรของบริษัทผู้ผลิตต่างๆกันที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงเหล็กเท่ากับ 1 เทสลา

โดยทั่วไปเหล็กแผ่นซิลิกอนที่ใช้มักมีกรรมวิธีใหญ่ในการผลิตอยู่ 2 ชนิดใหญ่ คือ ชนิดรีดแผ่นเหล็กร้อน และรีดแผ่นเหล็กเย็น

ชนิดรีดร้อน ที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรม แต่เดิมจะมีค่าความซึมซาบได้ ของสารแม่เหล็ก μ ตลอดแนวของแผ่นไม่ว่าทางขวางเฉียงหรือทางตรงแนวรีดจะมีขนาดไม่ต่างกันมากนัก สามารถใช้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ได้ถึงประมาณ 1.4 หรือ 1.5 เทสลา

ชนิดรีดเย็น เรียงแนวรีดจะมีความซึมซาบของสารแม่เหล็ก μ สูงกว่าชนิดแรกมากและค่าการสูญเสียภายในแกนเหล็กก็ลดลงกว่าเดิม ถึงประมาณ 2 เท่า เหล็กชนิดนี้ ก่อนการนำมาใช้หลังจากการรีด ต้องนำไปอบลดความเค้น ในเนื้อเหล็กลง ซึ่งกรรมวิธีการอบใช้อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส แล้ว ค่อยลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ เหล็กชนิดนี้สามารถใช้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ได้ ถึงประมาณ 1.6-1.7 เทสลา เหล็กชนิดนี้ถ้าเราดัดนำมาใช้ขวางหรือเรียงแนวรีด ค่าของความซึมซาบแม่เหล็กจะลดลงอย่างมาก อาจถึง 10-20 เท่า และค่าการสูญเสียของแกนเหล็กจะเพิ่มขึ้นอย่างมากด้วย

ดังนั้นในการเลือกใช้สารแม่เหล็กทำเครื่องจักรไฟฟ้าต่างๆ การออกแบบคำนวณจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติต่างๆของสารแม่เหล็กที่นำมาใช้ด้วย เพราะค่าการสูญเสียภายในแกนเหล็กจะลดลงหมายถึงการประหยัดเนื้อสารแม่เหล็กที่ทำเครื่องจักรลง เมื่อขนาดพื้นที่หน้าตัดของวงจรลดลงจะหมายความว่ารวมไปถึงการประหยัดเนื้อสารตัวนำไฟฟ้า กรอบโครงสร้าง ลดน้ำหนัก ลดค่าใช้จ่ายลดปริมาณต่อหน่วยกำลังที่ได้ของเครื่องจักร ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรให้ดียิ่งขึ้น

การวัดคุณสมบัติของแม่เหล็กพื้นฐานอย่างแรกคือ การวัดความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ในรูปการเหนี่ยวนำด้วยไฟกระแสสลับ หรือ วงของฮิสเทอรีซิส ที่จุดปลายของฮิสเทอรีซิส ที่ค่าของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่างๆกับเมื่อนำมาเป็นกราฟ จะได้กราฟที่เรียกว่า เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก ซึ่งค่าของเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็กได้แสดงในรูป 2.10 ในการคำนวณวงจรแม่เหล็กเป็นลักษณะของแผ่นเหล็กซิลิกอนขนาด 0.5 มิลลิเมตร ที่ใช้ทั่วไปในการทำหม้อแปลงไฟฟ้าและเครื่องจักร ไฟฟ้าอื่นๆ กราฟเหล่านี้จะช่วยในการคำนวณวงจรแม่เหล็กอย่างละเอียดและใช้สำหรับหาค่าของกระแสสูงสุด (peak current) ในวงจรกระแสสลับด้วย

การสูญเสียภายในแกนเหล็กของสารแม่เหล็ก เป็นการสูญเสียออกมาระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กภายในเวลาแต่ละรอบ อันแบ่งออกได้เป็นสองรูป คือ การสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส และการสูญเสียจากกระแสไหลวนในตัวสารแม่เหล็กเอง การสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารแม่เหล็กที่ใช้ต่างๆ กล่าวคือ ส่วนผสมอัตราส่วนของซิลิกอน ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ความหนาแน่นของแผ่นเหล็ก กรรมวิธีการผลิต และค่าสูงสุดของอัตราความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ ดังนั้นเมื่อสารแม่เหล็กออกใช้แล้ว แต่ละอย่างจะมีค่าอันคงที่ มีค่าเปลี่ยนแปลงได้คือค่าของความถี่ที่จะนำไปใช้ และค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B ที่ใช้ ในเครื่องจักรไฟฟ้า การสูญเสียภายในแกนเหล็กจะออกมาในรูปพลังงานความร้อน มีหน่วยเป็นวัตต์ กราฟแสดงความสัมพันธ์ ตัวอย่างการสูญเสียภายในแกนเหล็กของเหล็กชนิด 0.5 มิลลิเมตร L63 ที่ความถี่และค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ต่างๆแสดงไว้ในรูป 2.11 เป็นค่าวัตต์ต่อกิโลกรัมของสารแม่เหล็กที่ใช้ในวงจร

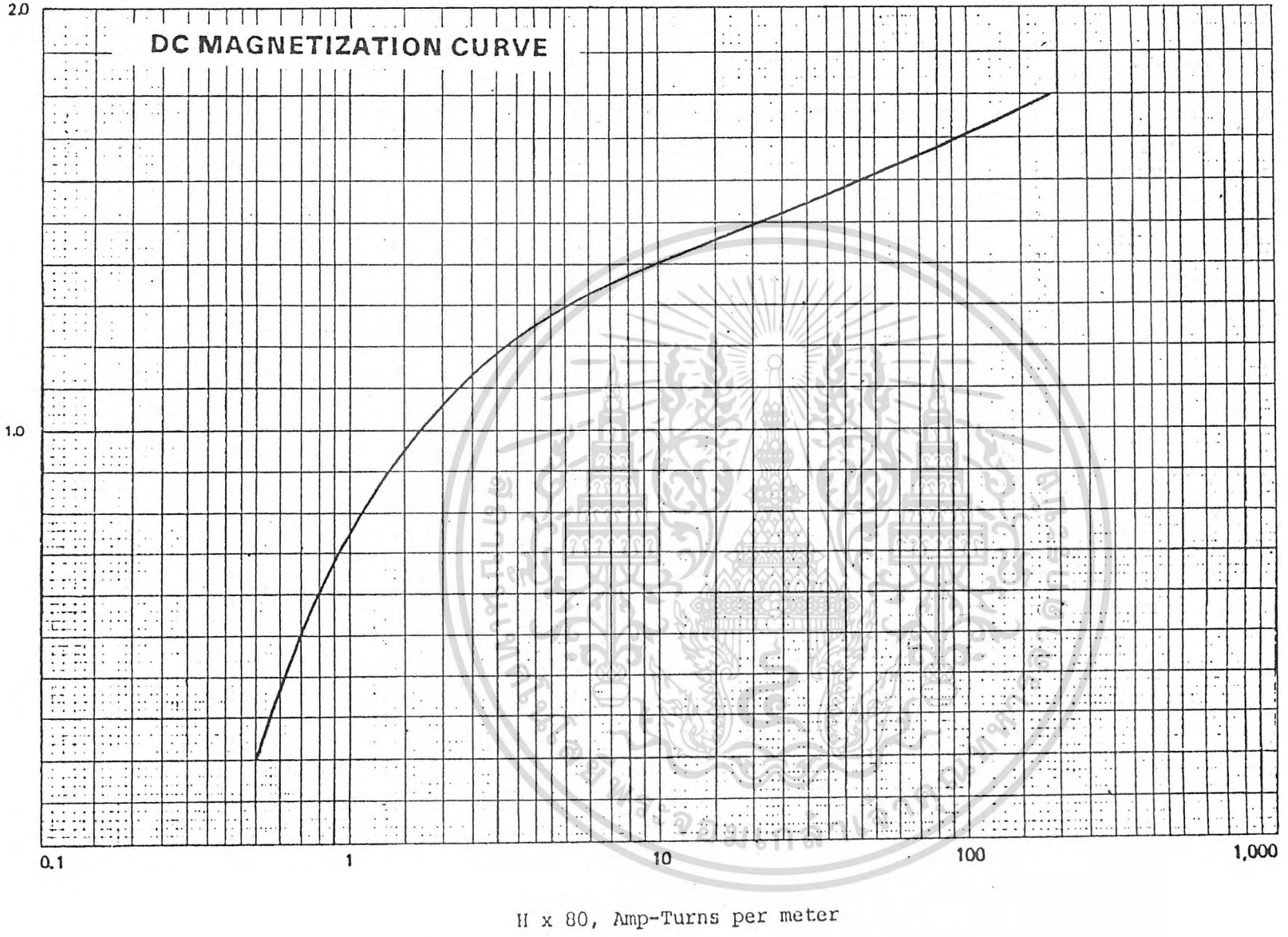
ตาราง 2.2 เหล็กแผ่นซิลิกอนมาตรฐานเปรียบเทียบ

P_{max} ที่ 1 TESLAS, ความถี่ 50 Hz, ความหนา 0.5 mm

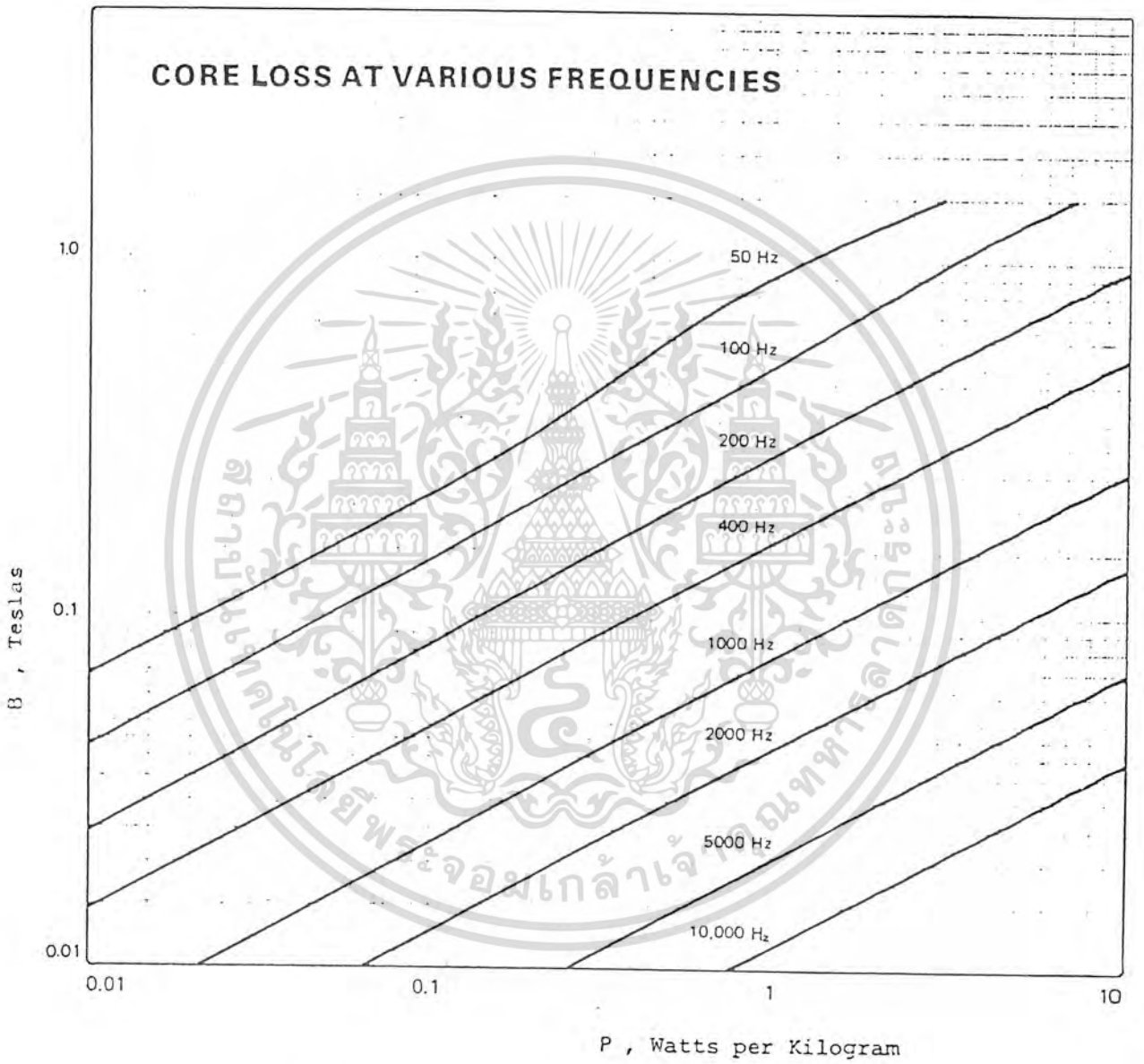
ญี่ปุ่น		เยอรมัน		อเมริกา ¹		อังกฤษ		ออสเตรเลีย	
JISC 2551	SEM 1165	DIN 46400		AISI		BSS 610		LYSAGIT	
GRADE	W/kg	GRADE	W/kg	GRADE	W/kg	GRADE	W/kg	GRADE	W/kg
		1V 1.35	1.35	M 19	1.39			L 63	1.39
S 12	1.45	1V 1.5	1.50	M 22	1.50	B 100	1.52	L 68	1.5
S 14	1.65	1V 1.7	1.70	M 27	1.70	B 107	1.61	L 75	1.65
S 18	2.00	111 2.0	2.00	M 36	1.92	A 146	1.87		
S 20	2.30	111 2.3	2.30	M 43	2.25	A 170	2.25	L 100	2.20
						A 187	2.45		
S 23	2.70	111 2.6	2.60	M 45	2.65	A 216	2.84	L 120	2.65
		11 3.0	3.00						
S 30	3.70	1 3.6	3.60			A 253	3.37	L 160	3.53
				M 47	4.17				
S 40	5.00								
								L 370	

1 คัดเทียบจากแผ่นความหนา 0.42 mm และ 0.63 mm

หมายเหตุ ELECTRICAL STEEL



รูปที่ 2.10 เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็กของเหล็กแผ่นซิลิกอน L63, L68 และ L75



รูปที่ 2.11 การสูญเสียพลังงานในแกนเหล็กแผ่นซิลิกอน L63 ที่ความถี่ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงนี้ **24** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของสารแม่เหล็ก B หรือค่าความสัมพันธ์ระหว่าง rms Volt-Amperes สำหรับ
 สารนี้จะเป็นผลคูณของค่า Pa กับน้ำหนักของสารแม่เหล็กนั้น เราสามารถพิจารณาหาค่า Pa ในสาร
 แม่เหล็กโดยอาศัยวงจรแม่เหล็กเบื้องต้นจากรูป 2.3

กำหนดศักดาไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ f เข้าสู่ขั้วขมมีค่าเท่ากับ v

$$v = \sqrt{2}V \sin 2\pi ft \quad (2-36)$$

เมื่อ v เป็น rms ของศักดาไฟฟ้า หน่วยเป็นโวลต์

f เป็นค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hertz)

t เป็นเวลาหน่วยเป็นวินาที

ค่าของเส้นแรงแม่เหล็กภายในวงจรได้จากสูตร

$$v = N \frac{d\phi}{dt}$$

$$\phi = \frac{1}{N} \int v dt$$

ค่าความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กได้จาก

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

$$= \frac{1}{NA} \int v dt \quad (2-37)$$

เมื่อ N เป็นจำนวนรอบของขดลวดภายในวงจรแม่เหล็ก

A เป็นพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของวงแม่เหล็ก

แทนค่า v ลงในสมการ 2-37

$$B = \frac{\sqrt{2}V}{NA2\pi f} \cos 2\pi ft \quad (2-38)$$

$$= -B_{\max} \cos 2\pi ft$$

เมื่อ

$$B_{\max} = \frac{\sqrt{2}V}{NA2\pi f}$$

$$= \frac{V}{4.44NAf}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_{rms} กับค่า B_{\max} เท่ากับ

$$V_{\text{rms}} = 4.44 B_{\max} A n f \quad (2-39)$$

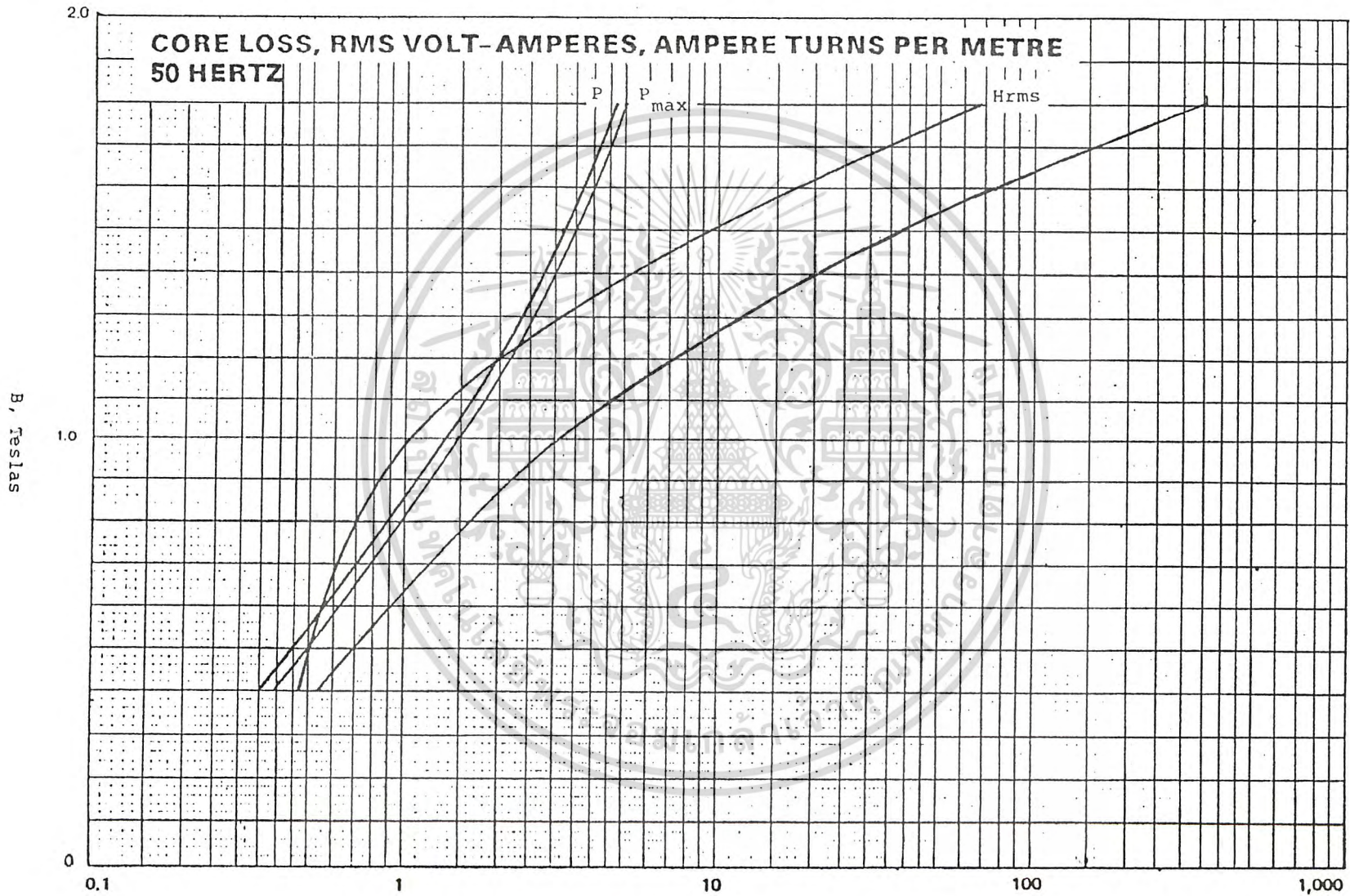
โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นเมื่อ B เป็นฟังก์ชัน Sinusoidal, H จะไม่

เป็นฟังก์ชันตาม B นั่นคือ Non-Sinusoidal เรากำหนดค่านิยามค่า H_{rms} จากค่าของกระแส I_{rms} ได้

ดังนั้นสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ **25** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.12 การสูญเสียภายในแกนเหล็กแผ่นชนิดอน L63 ที่ความถี่ 50 Hz



P Core loss, Watts per Kg.; P_{max} Maximum Core loss, Watts per Kg.
 $H_{rms} \times 100$, Rms Amp - Turn per meter; P_a Rms Volt - Amp. per Kg.

$$H_{rms} = \frac{NI}{l} \text{rms} \quad (2-40)$$

ซึ่งค่า H_{rms} นี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็ก ดังได้แสดงความสัมพันธ์ในรูป

2.12

จากสมการ 2.40 เราสามารถหาค่า I_{rms} ได้ในรูปของ H_{rms} และตัวแปรอื่นๆ ดังนั้นค่าผลคูณของ V_{rms} และ I_{rms} ของ วงจร 2.3 ซึ่งเหนี่ยวนำค่าความเข้มจนถึงค่า B_{max} ได้ดังนี้

$$V_{rms} I_{rms} = 4.44(B_{max} H_{rms}) Al \quad (2-41)$$

สำหรับสารแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น ρ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร น้ำหนักของสารที่ทำในวงจรจะมีค่าเท่ากับ $Al\rho$ กิโลกรัม ดังนั้นค่า P_a rms Volt-Ampares per kilogram จึงมีค่า

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{VI}{Al\rho} \\ &= \frac{4.44f}{\rho} (B_{max} H_{rms}) \end{aligned}$$

ดังนั้นค่า P_a ที่ความถี่ที่กำหนด f จะขึ้นอยู่กับค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B_{max} เท่านั้น เพราะค่าของ H_{rms} ก็ขึ้นอยู่กับค่า B_{max} และไม่ขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นในวงจร เช่น ขนาดและรูปร่างลักษณะของค่า P_a ของเหล็กแบบซิลิกอน ได้แสดงไว้ในรูป 2.12

การเรียงอัดซ้อนเหล็กแผ่นซิลิกอนในวงจรแม่เหล็ก โดยทั่วไปจะมีช่องว่างระหว่างแผ่นอยู่เล็กน้อย ดังนั้นปริมาตรและรูปร่างภายนอกกับปริมาตรของเนื้อแกนเหล็กแท้จึงไม่เท่ากัน เรากำหนดค่า $s.f.$ (staggering factor หรือ space factor) อัตราส่วนช่องว่างโดย

$$s.f. = \text{ปริมาตรของเนื้อแกนเหล็ก} / \text{ปริมาตรภายนอกเมื่อซ้อนกัน}$$

ค่าอัตราส่วน $s.f.$ นี้จะเห็นได้ว่าจะมีค่าน้อยกว่า 1 อยู่เสมอ หรือถ้ากำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ก็จะน้อยกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ โดยทั่วไปค่าอัตราส่วน $s.f.$ ของแกนเหล็กแต่ละอย่างจะต่างกันออกไปตามแต่ชนิดและกรรมวิธีการผลิต การฉาบผิวหน้า การอัดแกนค่า $s.f.$ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.9-0.99 ค่า $s.f.$ ของแผ่นซิลิกอนในตาราง 2.2 จะอยู่ประมาณ 0.97

ข. การสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss)

จากสมการ 2-21 พลังงานที่สะสมอยู่ในสนามแม่เหล็ก มีค่าเท่ากับ

$$W_f = \int_{\psi_1}^{\psi_2} i d\psi$$

ซึ่งสามารถเทียบเป็นตัวแปรของ H และ B ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 i &= \frac{HI}{N} \\
 \phi &= BA \\
 Nd\phi &= NAdB \\
 d\psi &= NAdB \\
 W_f &= \int_{B_1}^{B_2} AIHdB \\
 W_f &= AI \int_{B_1}^{B_2} HdB
 \end{aligned}
 \tag{2-21a}$$

ค่าของ AI เป็นค่าของปริมาตรของวงจรมแม่เหล็ก เพราะฉะนั้นค่า $\int HdB$ เป็นค่าความหนาแน่นของพลังงานที่สะสมต่อหน่วยปริมาตร

ถ้าวงจรมแม่เหล็กประกอบขึ้นจากสารแม่เหล็ก โดยทั่วไปความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรง ขณะเราเพิ่มสนามแม่เหล็กขึ้น ดังเส้นกราฟ oa ของรูปที่ 2.13 และผลของการอินทิเกรตในสมการ 2-21a จะแสดงถึงพื้นที่ที่เกิดจาก o a c o อันเป็นพลังงานที่สะสมขณะเพิ่มสนามแม่เหล็กขึ้น ขณะลดสนามแม่เหล็กลงตามเส้น ab จะคายพลังงานออกเท่ากับพื้นที่ที่เกิดจาก a b c d ซึ่งไม่ทับกับเส้น oa เดิม ทั้งนี้มีพลังงานส่วนหนึ่งส่วนเสียไปในรูปพลังงานความร้อน เท่ากับพื้นที่ o a b o

เมื่อวงจรมแม่เหล็กถูกและลดสนามแม่เหล็กจาก B ไปเป็น -B และกลับไปกลับมา พลังงานที่สูญเสียในรูปของความร้อนจากฮิสเทอรีซิส จะเท่ากับพื้นที่ที่เหมือนดังในรูปดังรูปที่ 2.14 และค่าของจุดที่ความเข้มสนามแม่เหล็กเท่ากับศูนย์ จะยังมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเหลืออยู่ ค่านี้เรียกว่า Br หรือ residual induction และเมื่อเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก H ในทางลบจนกระทั่ง B=0 ค่า H ที่ได้เรียก Hc หรือ coercive force รูป 2.15 แสดงฮิสเทอรีซิสของเหล็กแผ่นซิลิกอน ขณะที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด เท่ากับ J เทสลา

ในการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำวงจรมแม่เหล็ก ในแต่ละรอบการสูญเสียภายในแกนเหล็กอันเกิดจากฮิสเทอรีซิส จะเท่ากับพื้นที่ภายในรูปนั้น ซึ่งจะขึ้นกับค่าของ B และชนิดของสารแม่เหล็ก ดังนั้นค่าของการสูญเสียจากฮิสเทอรีซิสของสารแม่เหล็กที่ความถี่ f จะมีค่าเท่ากับ

$$P_h = K_h f B_{max}^x \tag{2-43}$$

เมื่อ P_h เป็นการสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส มีหน่วยเป็นวัตต์

K_h เป็นค่าคงตัวของวงจรมแม่เหล็กที่ทำการทดลอง

f เป็นค่าความถี่

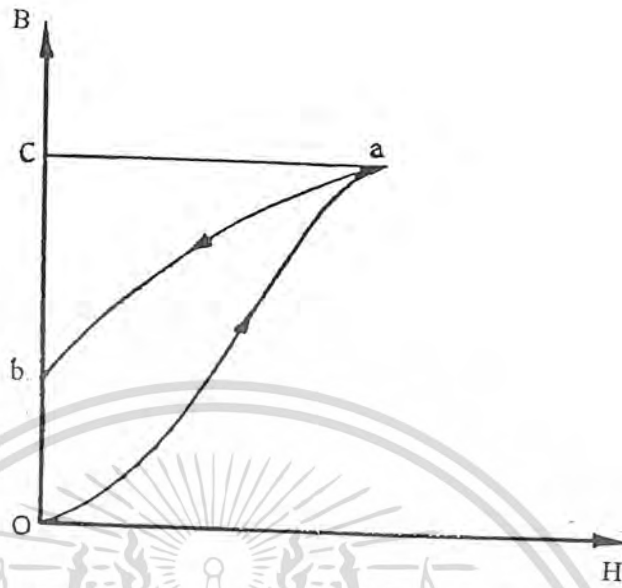
B_{max} เป็นค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด เทสลา

x เรียกว่าค่า Steinmetz's Index จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 แล้วแต่ชนิดของสารแม่เหล็ก

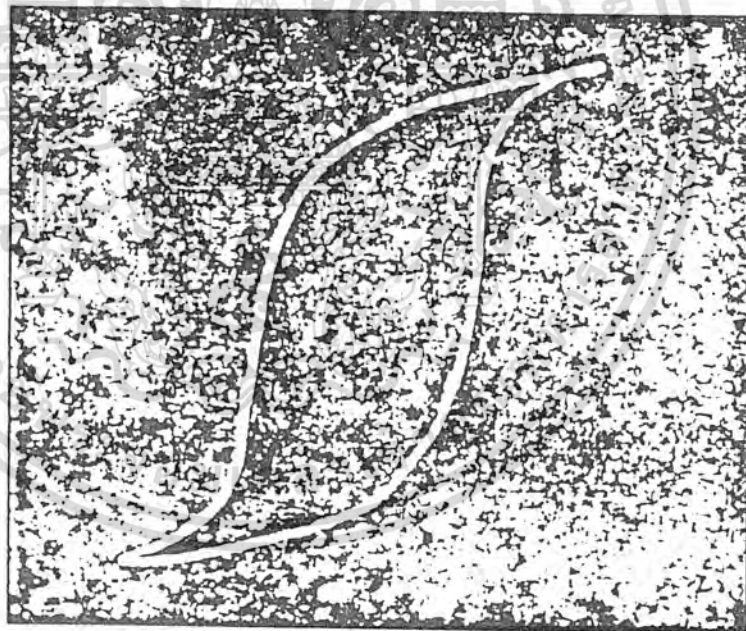
และค่า x นี้ของสารแม่เหล็กชนิดเดียวกันจะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ ในค่า B ที่ไม่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น

เหล็กชนิด Z 10 ของประเทศญี่ปุ่น ได้กำหนดทดลองหาค่า x จะได้ค่าอยู่ระหว่าง 2 ขณะที่มีความเข้มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 28 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

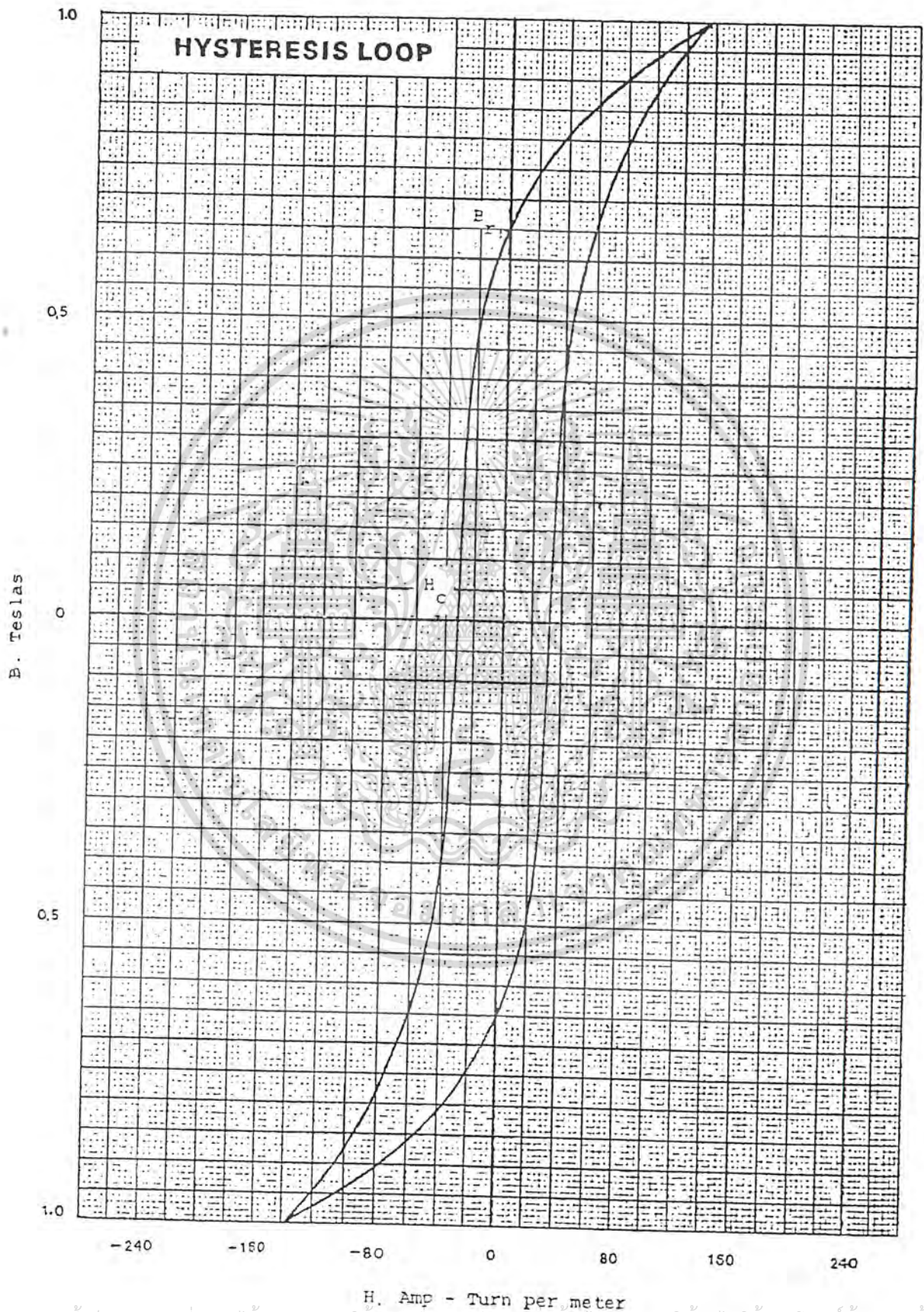


รูปที่ 2.13 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ในวงจรแม่เหล็กขณะเพิ่มและลดอำนาจแม่เหล็ก



รูปที่ 2.14 ถ่ายจาก CRO แสดง Hysteresis Loop ของเหล็ก Z 10 ขณะ $B_{max} = 1.2$ เทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

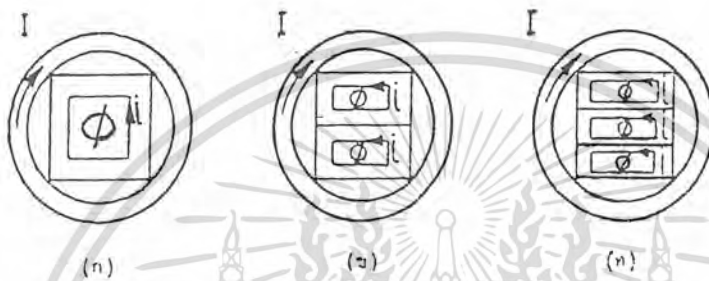


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 2.15 เส้นโค้งฮิสเทอริซิส เหล็กแผ่นซิลิกอน L63 L68

สนามแม่เหล็กต่ำไปจนถึง 1.1 ขณะที่มีความเข้มถึงจุดอิ่มตัวแม่เหล็ก โดยทั่วไปค่า x จะใช้ค่าเท่ากับ 1.6 โดยประมาณ

ค. การสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

การสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กนี้ เกิดจากค่าสูญเสีย I^2R อันเกิดจากกระแสหวนวนภายในสารแม่เหล็กเอง เมื่อถูกเหนี่ยวนำจากวงจรไฟฟ้ากระแสสลับจากขดลวดปฐมภูมิ เราพิจารณาวงจรแม่เหล็กในรูป 2.3 วาดรูปภาคตัดขวางของวงจรนี้ลงเป็นรูป 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงภาคตัดขวางของวงจร Reactor Core ในรูป 2.3

จากรูป 2.16 เมื่อเราป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่วงจรก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้นภายในแกนเหล็กและทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กนั้น ซึ่งค่าเส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ตามค่าของความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนสู่วงจรทางปฐมภูมิ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นในแกนตัวนำ สมมุติรูป ก โดยใช้แกนเป็นแท่งเหล็กคันตลอด ไม่ซ้อนแผ่นค่าศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับ

$$e = \frac{d\phi}{dt}$$

และค่าความต้านทานของแท่งเหล็กคัน

$$R = \frac{l}{\sigma A}$$

ดังนั้น ค่าการสูญเสีย I^2R ในวงจรนี้จะมีค่าเท่ากับ $\frac{e^2}{R}$ ถ้าเราพิจารณาโดยรูป ข ใช้แผ่นเหล็กเรียงเข้าสองแผ่นแทนที่จะเป็นแผ่นเหล็กคัน ดังนั้นค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแต่ละแผ่นจะมีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าเดิม นั่นคือ $\phi/2$ ศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละแผ่น จะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{d\phi / 2}{dt} = e / 2$$

พื้นที่นำไฟฟ้าเฉลี่ยของแต่ละแผ่นลดลงครึ่งหนึ่ง ดังนั้นค่าของความต้านทานไฟฟ้าในแต่ละแผ่นจะเพิ่มขึ้นอีกเท่าหนึ่งนั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 31 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R' = \frac{l}{\sigma A/2} = 2 \frac{l}{\sigma A} 2R$$

ดังนั้นค่าสูญเสีย $I^2 R$ ในแต่ละแผ่นเท่ากับ $\frac{(e/2)^2}{2R} = \frac{e^2}{8R}$

ค่าการสูญเสียรวมทั้งสองแผ่นเท่ากับ $= \frac{e^2}{4R}$

พิจารณารูป ค โดยใช้แผ่นเหล็กเรียง 3 แผ่น จะได้ค่าการสูญเสียทั้งหมดจาก $I^2 R$ เท่ากับ

$$\frac{e^2}{9R}$$

ถ้าใช้ n แผ่นเรียง ค่าการสูญเสีย $i^2 R$ จะมีค่าเท่ากับ $\frac{e^2}{n^2 R}$

เมื่อ $\frac{e^2}{R}$ เป็นค่าการสูญเสียที่ใช้ทั้งสารแม่เหล็กตัน โดยไม่เรียงแผ่น

จากการพิจารณานี้จะเห็นได้ว่า การเรียงแผ่นซ้อน ในวงจรแม่เหล็กจะสามารถลดค่าการสูญเสียจากกระแสไหลวนในวงจรได้ ดังนั้นในการทำเหล็กแผ่นสร้างเครื่องจักรจึงนิยมทำเป็นแผ่นบางเรียงซ้อนกัน โดยแต่ละแผ่นจะใช้สารเคลือบผิวที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูง เช่น ฉาบด้วยวานิช อาจเป็นชั้นเดียว สองชั้นหรือ สามชั้น หรือฉาบด้วยฉนวนอื่น ซึ่งสามารถทนความร้อนเวลาที่นำมาอบลดความเค้นได้

พิจารณาลักษณะการสูญเสียชนิดนี้ จะเห็นได้ว่าขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของแผ่นเหล็ก และค่าการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ถ้าขดลวดปฐมภูมิมีไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ f เฮอertz ก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก มีความถี่ f เกิดขึ้นด้วย

ให้ค่าเส้นแรงแม่เหล็ก $\phi(t)$ มีขนาดเท่ากับ

$$\phi(t) = \phi_{\max} \sin \omega t$$

ดังนั้น ค่าศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเนื้อเหล็ก จะแปรตามค่า ϕ_{\max} และค่า w

$$e \propto \phi_{\max} f$$

เมื่อ $w = 2\pi f$

ดังนั้น ค่าการสูญเสียภายในวงจรอันเกิดจากกระแสไหลวนจะแปรตามกำลังสองของ e ดังนั้น

$$P_e \propto \phi_{\max}^2 f^2$$

เราสามารถเขียนเป็นสูตรได้โดย สมมุติค่าคงตัวในสารแต่ละชนิด และในวงจรแต่ละขนาด ได้ดังนี้

$$P_e = K_e f^2 B_{\max}^2 \quad (2-44)$$

เมื่อ P_e เป็นการสูญเสียในวงจร อันเกิดจากกระแสไหลวน มีหน่วยเป็นวัตต์ จากสมการ 2-43 และ 2-44 ค่าการสูญเสียภายในแกนเหล็กรวม P จะเท่ากับ

$$P = P_h + P_e \quad (2-45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในคู่มือเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ 32 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าของการสูญเสียภายในแกนเหล็กโดยแยกค่าเป็น จากฮิสเทอรีซิสกับกระแสไหลวน อาจทำได้โดยการอ่านค่า P จากกราฟ และคำนวณค่า Ph จากพื้นที่กราฟแล้วหาค่า Pe ได้ หรือในบางครั้งเราสามารถแยกอัตราส่วนการสูญเสียทั้งสองและการสูญเสียรวม โดยอาศัยสมการ 2-45 โดยตรง

โดยการทำการทดสอบสารแม่เหล็กที่ใช้หาค่า P ที่จุด Bmax เท่ากัน ที่ความถี่ต่างๆกันจากสมการ 2-45 จะได้

$$P / f = a + bf \quad (2-45a)$$

เมื่อ $a = K_h B_{max}^x$ ซึ่งเป็นค่าคงตัว

$b = K_e B_{max}^2$ ซึ่งเป็นค่าคงตัว

ซึ่งสมการ 2-45 เมื่อนำมาวาดกราฟของ P/f กับ f จะได้สมการเส้นตรง โดยมีค่าจุดตัดแกน P/f เท่ากับ a และค่าของสโลปของเส้น เท่ากับ b ซึ่งนำมาแยกหาค่าการสูญเสียทั้งสองได้

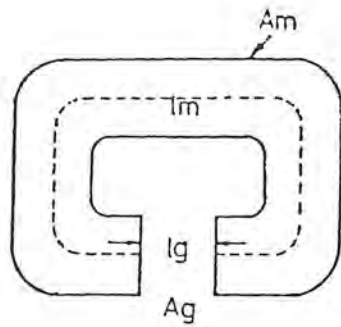
2.5 แม่เหล็กถาวร

คุณสมบัติหลักของเส้นโค้งฮิสเทอรีซิส ของสารแม่เหล็กต่าง ๆ จะมีค่า Residual Induction B_r และ Coercive force H_c ที่การเหนี่ยวนำแม่เหล็กสูงสุด B_{max} จุดเดียวกันจะมีค่าต่างกันออกไป ตามคุณสมบัติของแม่เหล็กที่ใช้ การมีพื้นที่ภายในเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสมากจะแสดงถึงพลังงานที่สูญเสียจากฮิสเทอรีซิสต่อ 1 รอบ เมื่อใช้ไฟกระแสสลับมาก ดังนั้นในการใช้สารแม่เหล็กในวงจรไฟฟ้าสลับที่ต้องการการสูญเสียน้อย สารที่ใช้จึงสามารถเลือกหาสารที่มีพื้นที่ในเส้นฮิสเทอรีซิสน้อย ส่วนในการทำแม่เหล็กถาวรเราต้องใช้สารแม่เหล็กงคุณสมบัติที่เป็นแม่เหล็ก แม้ภายหลังจากที่เราได้ออกกระแสไฟฟ้าออกจากขดลวดตัวนำที่พันอยู่รอบแกนเหล็กแล้วก็ตาม ดังนั้นเราจึงใช้สารแม่เหล็กอีกประเภทหนึ่งซึ่งจะมีพื้นที่ภายในเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสมาก Coercive force H_c สูงใช้ทำเป็นแม่เหล็กถาวร

2.5.1 เส้นโค้ง

พิจารณารูปที่ 2.15 เมื่อเราใช้อำนาจเหนี่ยวนำแม่เหล็กจนถึงจุดสูงสุดเท่ากับหนึ่งเทสลาในวงจร แล้วค่อยๆลดอำนาจเหนี่ยวนำแม่เหล็ก H ลง จนถึงจุด H เท่ากับศูนย์จะยังคงมีเส้นแรงแม่เหล็กหลงเหลืออยู่ในแท่งแม่เหล็กนั้นและมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ B_r เมื่อเราลด H ลงต่อไปทางด้านลบ ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุดศูนย์ ค่า H ในแกนนอนซึ่งเป็นค่าลบ อันนี้เราเรียกว่า H_c หรือ Coercive force ในแกนเหล็กนั้น ซึ่งค่าทั้งสอง B_r และ H_c นี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ถ้าเราเพิ่มการเหนี่ยวนำอำนาจแม่เหล็กขึ้น(เพิ่ม B_{max}) จนกระทั่งถึงจุดอิมิตัวของแม่เหล็ก ดังในรูป 2.17 พื้นที่ภายในเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสจะไม่เพิ่มขึ้นอีกและค่าของ B_r และ H_c ที่จุดนี้จะมีขนาดคงที่และเป็นค่าสูงสุดของสารชนิดนั้นด้วย จุดที่ B_r เป็นค่าสูงสุดเราเรียกว่า Retentive หรือ B_r^S และจุดที่ H_c เป็นค่าสูงสุดเราเรียกว่า Coercivity H_c^S ของสารแม่เหล็กชนิดนั้นและเส้นโค้งฮิสเทอรีซิส

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ 33 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงภาพถ่ายจาก CHO Hysteresis Loop ของเหล็ก Z10 ที่ได้จากการทดลองขณะถึงจุดอิ่มตัว ในส่วนจาก B_{cs} ถึง H_{cs} นี้เราเรียกว่าส่วนโค้ง ลดอำนาจแม่เหล็กของสารแม่เหล็กนั้น รูปเส้นโค้ง ลดอำนาจแม่เหล็ก ของ ALNICO และ COBALT STEEL แสดงไว้ในรูป 2.18 ซึ่งเส้นนี้ใช้นำการออกแบบคำนวณแม่เหล็กของเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น ลำโพงกระจายเสียง ไมโครโฟน และอื่นๆ อีกมาก

หลักการคำนวณแม่เหล็กถาวร พิจารณาวงจรแม่เหล็กถาวรซึ่งมีช่องอากาศจากรูป 2.19 จาก สูตร 2-3 ค่า mmf อันเกิดจากแม่เหล็กถาวรในวงจรแม่เหล็กจะเท่ากับค่าของสนามแม่เหล็กซึ่งตกคร่อม อยู่ระหว่างช่องอากาศ ดังนั้น

$$-H_l(\text{สารแม่เหล็ก}) = H_l(\text{ช่องอากาศ})$$

$$-H_m l_m = H_g l_g$$

$$-H_m = \frac{B_g l_g}{\mu_o l_m} \quad (2-46)$$



รูปที่ 2.19 แม่เหล็กถาวร

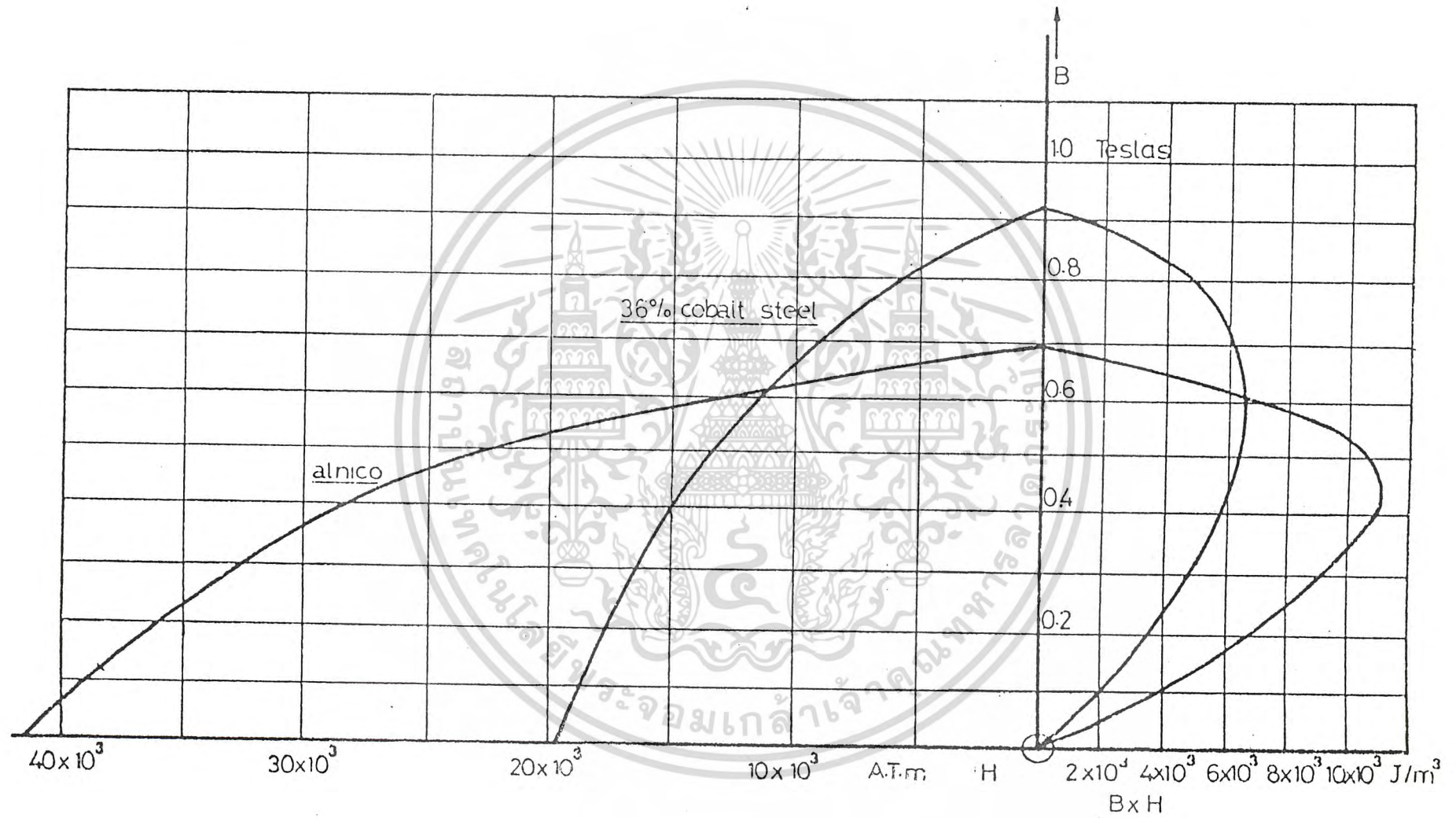
และภายในวงจรแม่เหล็ก ค่าของแม่เหล็กตลอดวงจรเท่ากัน ดังนั้นจะทำให้

$$\phi \text{ ในสารแม่เหล็ก} = \phi \text{ ในอากาศ}$$

$$B_m A_m = B_g A_g \quad (2-47)$$

จากสมการ 2-46 และ 2-47 จะได้

$$\frac{B_m}{H_m} = -\frac{\mu_o A_g l_m}{l_g A_m} \quad (2-48)$$



รูปที่ 2.18 กราฟเส้นโค้งลดอำนาจแม่เหล็กของสารแม่เหล็กถาวรบางชนิด

จากสมการ 2-48 จะเห็นได้ว่าค่าความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการนี้ของ B_m กับ H_m เป็นเส้นตรงซึ่งมีค่า สโลปเท่ากับ $-\frac{\mu_o A_g I_m}{I_g A_m}$ ซึ่งถ้าเราลากเส้นตรงให้ได้ค่าสโลปนี้ขึ้นไปตัดเส้นโค้งลดอำนาจแม่เหล็ก ของสารแม่เหล็กถาวรใด จุดนั้นก็จะเป็จุดใช้งานของแม่เหล็กถาวรนั้น การแก้ปัญหาวงจรแม่เหล็ก ถาวรนั้น อาจแก้ได้อีกวิธีหนึ่งโดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ของวัตถุแม่เหล็กถาวรที่ใช้ใหม่โดยใช้แกน เส้นแรงแม่เหล็ก ϕ และ mmf แทน โดยลากเส้นของช่องอากาศขึ้นตัดเส้นโค้งลดอำนาจแม่เหล็กใหม่โดยถือว่า

$$\phi \text{ ช่องอากาศ} = -\text{mmf}/R \text{ ช่องอากาศ}$$

$$\phi \text{ ช่องอากาศ}/\text{mmf} = -\frac{\mu_o A_g}{I_g}$$

ค่า mmf ของช่องอากาศซึ่งมีขนาดเท่ากับ $H_m l_m$ ดังนั้นค่าสโลปจะมีค่าเท่ากับ

$$\text{slope} = -\frac{\phi_g}{H_m l_m} = -\frac{\mu_o A_g}{I_g} \quad (2-48a)$$

2.5.2 ผลคูณระหว่าง B กับ H

ในการออกแบบวงจรแม่เหล็กที่ตีนั้นจำเป็นต้องออกแบบที่ถูกต้องและดีที่สุด กรณีของแม่เหล็กถาวรเช่นเดียวกัน การออกแบบจำเป็นจะต้องคำนึงถึงราคาของแม่เหล็กถาวรเป็นหลัก ในวงจรที่ต้องการรูปร่างและค่าของส่วนที่ใช้งาน (ส่วนช่องอากาศนั่นเอง)และค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B_g ที่จะกำหนดให้ค่าใช้จ่ายถูกหรือแพงจะขึ้นอยู่กับราคาของวัตถุที่ใช้ทำสารแม่เหล็กเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นราคาจึงแปรตามปริมาตรที่ใช้ของสารแม่เหล็กแต่ละชนิด เราพิจารณาวงจรค่า $B_g I_g$ และ A_g เป็นค่าที่กำหนดให้ ดังนั้นเราจะได้ว่า $\phi_g = B_g A_g$ และค่าความต้านทานแม่เหล็กในวงจรจะมีค่าเท่ากับ

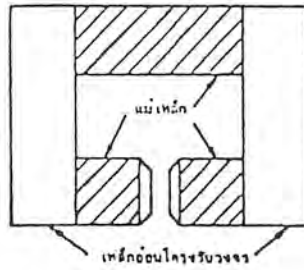
$$R = \frac{l_g}{\mu_o A_g}$$

ค่าปริมาตรที่ใช้ในสารแม่เหล็กถาวรจะมีค่าเท่ากับ $A_m l_m$ ค่า A_m หาได้จากสมการ $\phi = B \times A$

$$A_m = \phi_m / B_m = \phi_g / B_m$$

ค่า L_m หาได้จากสมการ $\oint H dl = NI = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงวงจรแม่เหล็กถาวร

$$I_m H_m = I_g H_g$$

$$I_m = -\frac{I_g H_g}{H_m}$$

$$= -\frac{I_g B_g}{H_m \mu_o}$$

$$= -\frac{I_g A_g B_g}{H_m A_g \mu_o}$$

$$= -\frac{\phi_g R}{H_m}$$

ดังนั้นปริมาณของสารแม่เหล็กที่ใช้

$$= A_m I_m = -\frac{\phi_g^2 R}{B_m H_m} \quad (2-49)$$

ค่าของ H เป็นลบ ทำให้ผลของ V เป็นบวกเสมอ จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ B จากสมการ 2-49 จะเห็นได้ว่าปริมาณของแม่เหล็กถาวรจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ B ผลคูณของ B_m และ H_m จะมีค่าสูงสุดเสมอ

บทที่ 3

การวิเคราะห์วงจรแม่เหล็กสำหรับระบบเบริงแม่เหล็กแรงผลักที่ออกแบบ

วงจรแบบที่ 1

เราอาจคำนวณหาค่าแรงทางกลศาสตร์ (f_{mech}) ของวงจรในรูปที่ 2.8 ได้โดยอาศัยหลักการของกฎทรงพลังงาน จะได้ว่า

[พลังงานไฟฟ้าที่ใส่เพิ่มในวงจร] - [พลังงานความร้อนที่สูญเสียไป] = [พลังงานกลศาสตร์] + [พลังงานที่สะสมไว้ในสนามแม่เหล็ก]

ในกรณีที่ไม่มีส่วนใดเคลื่อนที่ และค่าของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องไม่เปลี่ยนแปลง จะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กจะมาจากพลังงานทางกลศาสตร์

$$dW_f \approx -f_{mech} dx$$

$$\frac{d}{dx} W_f = \frac{d}{dx} (W_f)_{gap} = -f_{mech} = \frac{1}{2} \frac{\phi^2}{A \mu_0}$$

$$f_{mech} = \frac{1}{2} \frac{\phi^2}{A \mu_0}$$

โดยที่

$$H_{core} l_{core} \ll H_{gap} l_{gap}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$NI \cong H_{gap} \chi$$

$$H_{gap} \cong \frac{NI}{\chi}$$

$$B_{gap} \cong \mu_0 \frac{NI}{\chi}$$

$$\phi \cong \mu_0 \frac{NIA}{\chi}$$

จะได้

$$f_{mech} = -\frac{1}{2} I^2 \mu_0 N^2 \frac{A}{\chi^2}$$

วงจรแบบที่ 2

เราอาจคำนวณหาค่าแรงทางกลศาสตร์ (f_{mech}) ของวงจรในรูปที่ 3.1 ได้ด้วยวิธีคล้ายๆกันดังนี้

$$(W_f)_{gap} = 2\left[\frac{1}{2}\mu_0(H_{gap})^2\right]Ax$$

โดยคุณ 2 เนื่องจากมี airgap 2 ช่อง

$$= \mu_0 \left(\frac{\phi}{A\mu_0}\right)^2 Ax = \frac{x\phi^2}{A\mu_0}$$

$$\frac{d}{dx}(W_f) = \frac{d}{dx}(W_f)_{gap} = \frac{\phi^2}{A\mu_0}$$

$$F_{mech} = -\frac{\phi^2}{A\mu_0}$$

โดย $(H)_{core} \ll (H)_{gap} ; NI \cong 2H_{gap}X$

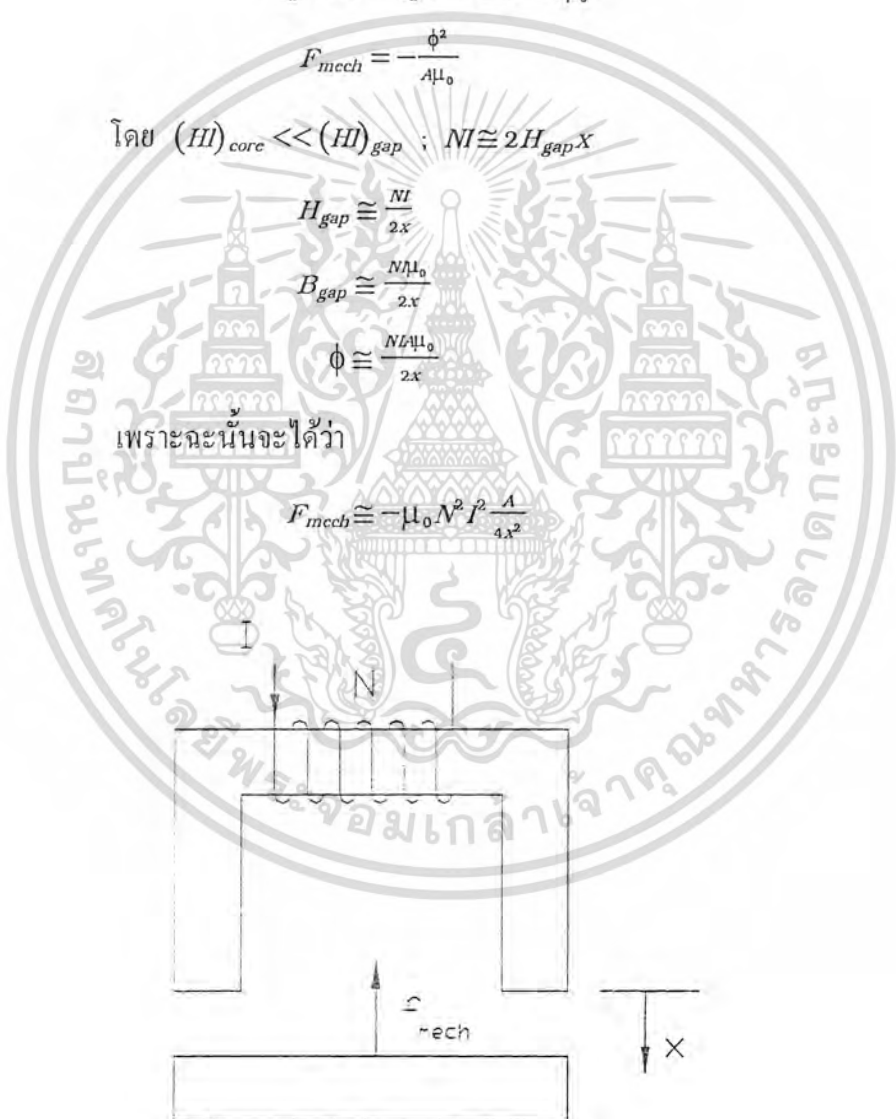
$$H_{gap} \cong \frac{NI}{2x}$$

$$B_{gap} \cong \frac{NI\mu_0}{2x}$$

$$\phi \cong \frac{NI\mu_0}{2x}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

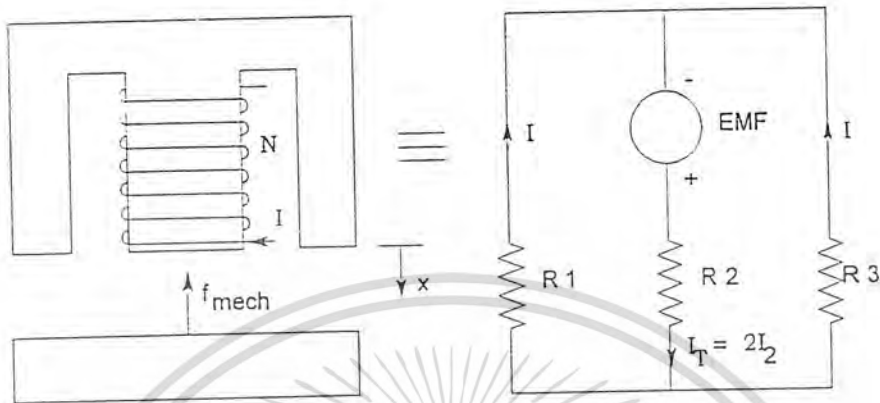
$$F_{mech} \cong -\mu_0 N^2 I^2 \frac{A}{4x^2}$$



รูปที่ 3.1 แสดงวงจรแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรแบบที่ 3



รูปที่ 3.2 แสดงวงจรแบบที่ 3 และวงจรไฟฟ้าเสมือน

$$EMF = IR_T$$

$$\text{โดย } R_T = R_2 + R_1 R_3 (R_1 + R_3)$$

- โดยสมมติให้
1. ค่า μ ของแกนเหล็กมีค่าคงที่
 2. ไม่คิดผลของ fringing effect ที่ airgap
 3. เนื่องจาก $\mu_{core} \gg \mu_0$ เพราะฉะนั้น จะสมมติได้ว่า

$$mmf = NI \cong \mathcal{H}_{gap}$$

จากการเปรียบเทียบ ความสัมพันธ์ระหว่างวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า จะได้ว่า

$$mmf = NI = 2\phi[\mathcal{R}_T] = 2\phi\left[\frac{l_g}{2A\mu_0} + \frac{l_g}{\mu_0} \frac{l_g}{\mu_0} \left(\frac{l_g}{\mu_0} + \frac{l_g}{\mu_0}\right)^{-1}\right]$$

$$NI = 2\phi \frac{l_g}{A\mu_0}$$

เราสามารถคำนวณหาค่าแรงทางกลศาสตร์ f_{mech} ของวงจรได้ โดยวิธีทำนองเดียวกันกับที่ได้

กล่าวมาแล้วดังนี้

$$(W_f)_{gap} = 2\left[\frac{1}{2}\mu_0(H_{gap})^2 Ax\right] + \frac{1}{2}\mu_0(H_{gap})^2 2Ax$$

$$= \mu_0(H_{gap})^2 Ax + \mu_0(H_{gap})^2 Ax = 2\mu_0(H_{gap})^2 Ax$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $H_{gap(1)} = H_{gap(2)}$ จาก $\frac{\phi}{4\mu_0} = \frac{2\phi}{24\mu_0}$

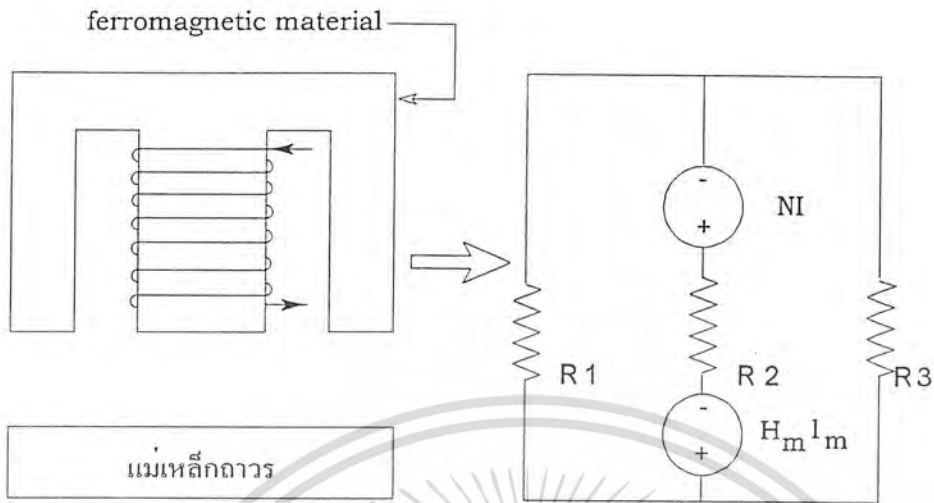
$$\frac{d}{dx}(W_f)_{gap} = \frac{2\phi^2}{4\mu_0} = -f_{mech}$$

$$f_{mech} = \frac{-2\phi^2}{4\mu_0}$$

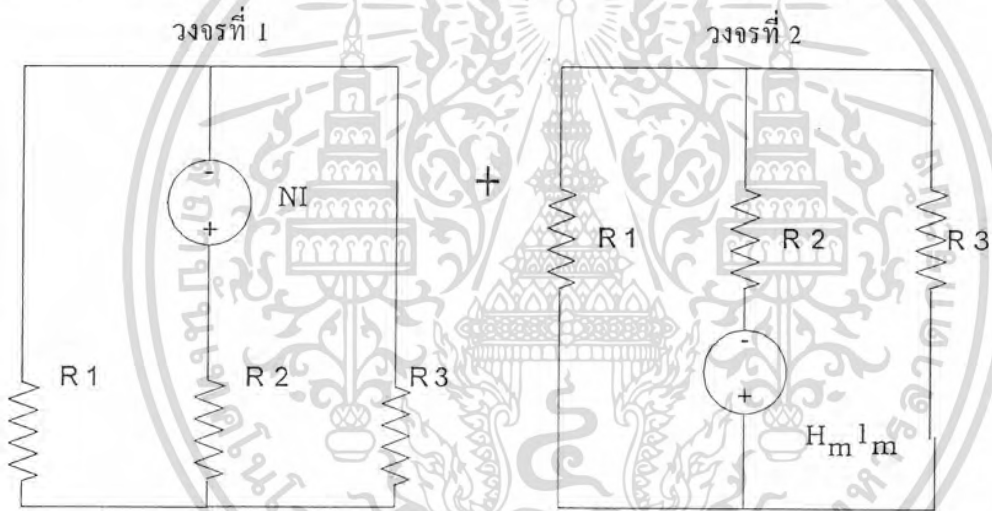
การคำนวณที่ผ่านมามาเราไม่คิดการสูญเสียภายในแกนเหล็กของสารแม่เหล็ก ซึ่งเป็นการสูญเสียออกมาระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กภายในเวลาแต่ละรอบ อันแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ การสูญเสียฮิสเทอรีซิสและการสูญเสียจากกระแสไหลวนในสารแม่เหล็ก ทั้งนี้เนื่องจากเราป้อนไฟกระแสตรงในการกระตุ้นให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในแกนเหล็ก ซึ่งทำให้ค่าสูญเสียภายในแกนเหล็กน้อยกว่าเมื่อใช้ไฟกระแสสลับมากจึงสมมติให้ไม่มีการสูญเสียภายในแกนเหล็กของสารแม่เหล็ก



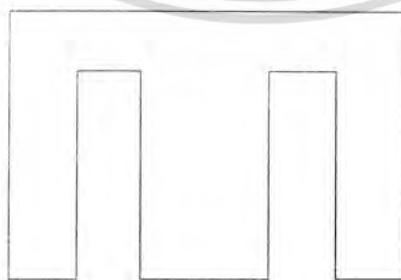
วงจรแบบที่ 4



โดยคิดเสมือนเป็นวงจรไฟฟ้า แล้วใช้วิธี Superposition จะแยกคิดได้เป็น 2 วงจรคือ



พิจารณาวงจรที่ 2 โดยคิดจากวงจรแม่เหล็กดังรูป



แม่เหล็กถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.3 แสดงการวิเคราะห์วงจรแม่เหล็กแบบที่ 4 ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข 42 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$H_m l_m = 2H_{gap} l_{gap}$$

$$H_m = \frac{2B_{gap} l_{gap}}{\mu_o l_m}$$

$$B_m A_m = 2B_{gap} A_{gap}$$

$$\frac{B_m}{H_m} = \frac{-\mu_o l_m A_{gap}}{l_{gap} A_m}$$

จากรูป 2.18 เป็นกราฟเส้นโค้งลวดอำนาจแม่เหล็กของสารแม่เหล็กถาวร ซึ่งโครงการนี้เราใช้สาร

แม่เหล็ก alnico เขียนเส้นตรงซึ่งมีความชัน $= \frac{B_m}{H_m}$



รูปที่ 3.4 แสดงการคำนวณจากกราฟเส้นโค้งลวดอำนาจแม่เหล็ก

เราจะหาค่า B_m ได้จากกราฟ

ดังนั้น หาค่า H_m ได้ และ หาค่า $H_m l_m$ ได้

จากรูปที่ 3.3 จะได้ .

$$NI + H_m l_m = 2\phi \mathcal{R}_T \quad ; \quad \mathcal{R}_T = \frac{l_{gap}}{\mu_o A}$$

$$\frac{\mu_o A (NI + H_m l_m)}{2l_{gap}} = \phi$$

เช่นเดียวกันกับวงจรที่ 3 $f_{mech} = \frac{-2\phi^2}{A\mu_o}$

แทนค่า ϕ จากสมการ(1) ลงไปจะได้ โดยที่ $l_{gap} = X$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

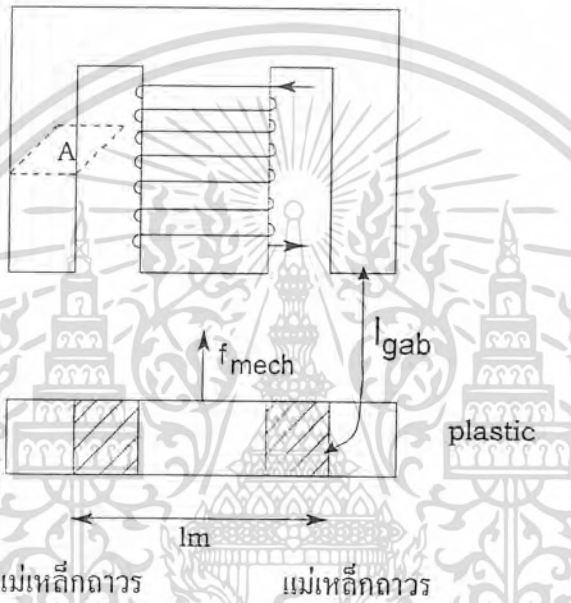
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_{mech} = -\frac{\mu_o A (NI + H_m l_m)^2}{2l_{gap}^2}$$

$$= -\frac{\mu_o A (NI + H_m l_m)^2}{2X^2}$$

เราสามารถประมาณได้ว่า วงจรแบบที่ 5 ดังต่อไปนี้ ให้ f_{mech} ได้เท่ากัน คือ

วงจรแบบที่ 5



แม่เหล็กถาวร แม่เหล็กถาวร
รูปที่ 3.5 แสดงวงจรแบบที่ 5

$$f_{mech} = -\frac{\mu_o A (NI + H_m l_m)^2}{2l_{gap}^2} \quad (3-1)$$

โดยสมมติให้

- ไม่คิดเส้นแม่เหล็กรั่ว(flux leakage)
- l_{gap} มีความยาวเฉลี่ยคงรูป

จากการประมาณในวงจรที่ผ่านมาทั้งหมด เราสามารถคำนวณหาแรงยก(แรงผลัก)ได้โดยประมาณให้

$$\text{แรงดูด} = \text{แรงผลัก}$$

วงจรแบบที่ 5 เราสามารถใช้เป็นวงจรเทียบเคียงกับชุดทดลอง magnetic repulsion bearing ที่ออกแบบไว้ได้

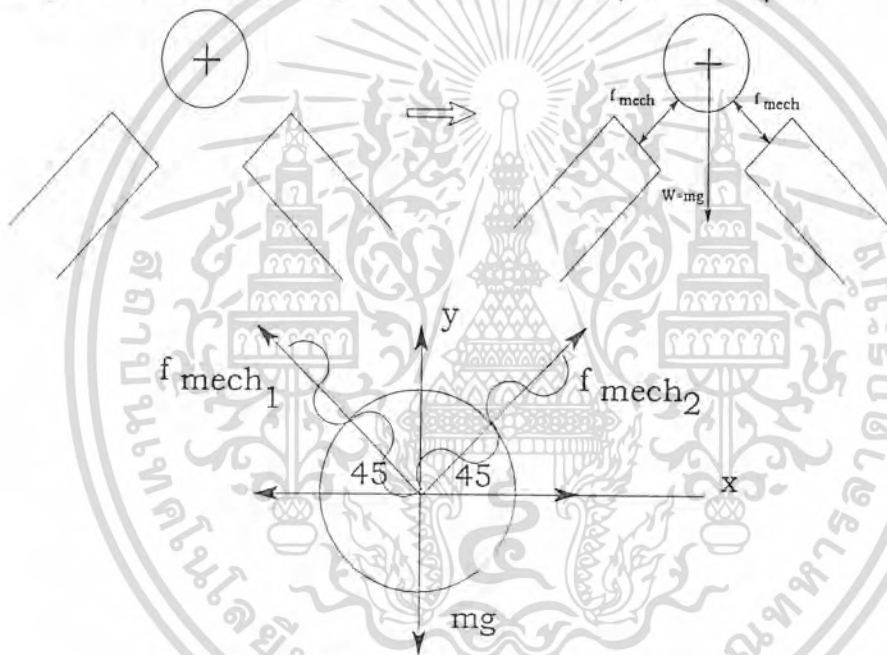
บทที่ 4

หลักการพื้นฐานและขั้นตอนในการออกแบบชุดแม่เหล็ก

4.1 คำนวณหาแรงยกโดยประมาณของชุดทดลอง magnetic bearing ที่ได้ออกแบบไว้

แรงยกที่จะคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้ เป็นค่าโดยประมาณ เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณา ออกแบบชุด magnetic repulsion bearing เช่นจำนวนขดลวดที่จะพันรอบแกนเหล็ก, น้ำหนักเพลลา, น้ำหนักของแม่เหล็กถาวร เป็นต้น

โดยเราจะเริ่มต้นพิจารณาเฉพาะ แรงยกที่ได้จากแกนเหล็กอ่อน 2 ตัวที่รองรับอยู่ด้านล่างของเพลลา ดังรูป เขียน Free Body Diagram ได้ดังนี้ พิจารณาสมดุลเมื่อเพลลาหยุดนิ่ง



รูปที่ 4.1 แสดงแรงยกที่ได้จากเหล็กอ่อน 2 ตัว

กิดสมดุลย์ (state equilibrium) ในแนวแกน X จะได้

$$\begin{aligned} f_{mech1} \cos 45^\circ &= f_{mech2} \cos 45^\circ \\ f_{mech1} &= f_{mech2} \\ &= f_{mech} \end{aligned}$$

กิดสมดุลย์ในแนวแกน Y

$$\begin{aligned} f_{mech1} \sin 45^\circ + f_{mech2} \sin 45^\circ &= mg \\ 2f_{mech} \sin 45^\circ &= mg \end{aligned}$$

$$f_{mech} = \frac{mg}{2 \sin 45^\circ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3-1) จะได้

$$f_{mech} = \frac{mg}{2 \sin 45^\circ} = - \frac{\mu_o A (NI + H_m l_m)^2}{2 l_{gap}^2} \quad (4-1)$$

เราจะทดลองแทนค่าตัวแปรต่างๆโดยประมาณ เพื่อหาจำนวนขดลวดที่ต้องพันรอบแกนเหล็กอ่อน เพื่อให้สามารถรับโหลดได้ตามต้องการ(และเป็นการตรวจสอบได้โดยประมาณว่าขนาดของค่าตัวแปรต่างๆของระบบ MRB ที่ออกแบบไว้ สามารถรับโหลดได้เพียงพอหรือไม่ ระบบที่ออกแบบมีความเป็นไปได้มากเพียงไร) โดยการพิจารณาประมาณค่าต่างๆเราต้องคำนึงถึง

- 1) ขนาดของอุปกรณ์
- 2) สามารถหาได้สะดวกตามท้องตลาด
- 3) ราคาของอุปกรณ์
- 4) ความเหมาะสมของชุดทดลองที่ได้ออกแบบ

นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมในอีกหลายๆด้าน

4.2 ค่าตัวแปร(parameter)ที่มีผลต่อแรงยกของระบบ

การพิจารณา เราจะเลือกใช้ค่าตัวแปรต่างๆตามความเหมาะสมดังนี้

1) น้ำหนักของเพลลาที่ระบบ MRB ต้องรับ(mg): เราจะต้องใช้ MRB 2 ตัวรองรับที่ปลายเพลลาทั้งสองปลาย เพราะฉะนั้นค่า mg ที่คำนวณได้จากสมการ(4-1) จะเป็นครึ่งหนึ่งของน้ำหนักเพลลาทั้งหมดโดยประมาณ ซึ่งสำหรับการออกแบบนี้ เราจะใช้เพลลาซึ่งมีน้ำหนักประมาณ 1 กิโลกรัม ดังนั้น ค่า mg ที่คำนวณได้จากสมการ (4-1) จะต้องมีค่าน้อย 0.5×9.8

2) พื้นที่หน้าตัดของแกนรูปตัว “E” (A):

เพื่อความเหมาะสมในด้านขนาดของระบบเราจะสมมติให้ใช้แกนเหล็กอ่อน ดังนั้นพื้นที่หน้าตัด (A) ที่ใช้ในการคำนวณแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 4.2 แสดงพื้นที่หน้าตัด (A)

ดังนั้นแทนค่า A ในสมการ(4-1)เท่ากับ 1"×0.5"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 46 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กอ่อน(I) : สมมุติให้ใช้ฟัดด์กระแสที่สามารถจ่ายได้โดย D.C.Power Supply ทั่วๆไป ซึ่งจะมีค่าประมาณ 1-3 Amps ดังนั้นแทนค่า I ในสมการ(4-1) เท่ากับ 2 Amps

4) ความยาวเฉลี่ยของช่องอากาศ (Lgaps) : เป็นความยาวเฉลี่ยคั้งแสดงในรูป ซึ่งสมมุติให้ มีค่าโดยประมาณ 2 cm

5) จำนวนขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กอ่อน (N) : เราเลือกใช้แกนเหล็กอ่อนขนาด 1 นิ้วซึ่งสามารถพันขดลวดได้เต็มแกนเหล็ก ประมาณ 950 รอบ ในการคำนวณนี้ เราประมาณค่า N ในสมการ(4-1)ได้เท่ากับ 600 รอบ

6) ค่าซึมซาบแม่เหล็กในห้วงอากาศ(airgap) (μ_0): เป็นค่าคงที่ของสมการ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} (H/m)$

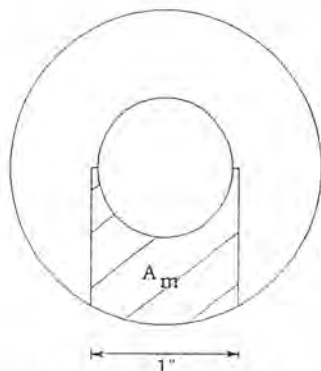
7) ความยาวระหว่างปลายแม่เหล็กถาวรทั้ง 2 ด้าน(Lm) : เป็นความยาวโดยประมาณค่าดังแสดงดังรูป จากการประมาณค่าอย่างเหมาะสม เราจะได้ค่า Lm ที่จะใช้แทนลงในสมการที่(4-1) เท่ากับ 4.68 cm

8) พื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศ(airgap) (Agap) : เราประมาณได้ว่า พื้นที่หน้าตัดของ airgap เท่ากับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กอ่อนรูปตัว "E" (A) เพราะฉะนั้น แทนค่า Agapในสมการที่ 1 เท่ากับ $1" \times 0.5"$

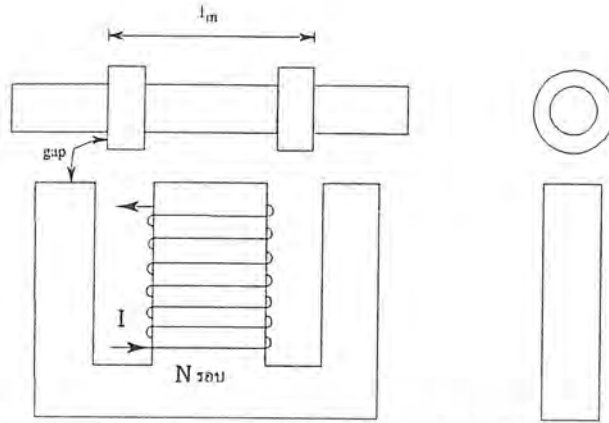
9) พื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็กถาวร (Am): สำหรับการออกแบบนี้ เราเลือกใช้แม่เหล็กถาวรรูปวงแหวน สวมลงบนเพลาคั้งแสดงในรูปที่ 4.3 (พื้นที่แรเงา) ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็กถาวรที่จะนำมาใช้ในการคำนวณจะเป็นพื้นที่หน้าตัดโดยประมาณที่แม่เหล็กถาวรจ่ายเส้นแรงแม่เหล็กออกมาด้านกับเส้นแรงที่จ่ายออกมาจากแกนเหล็กอ่อนเมื่อมีการผ่านกระแสเข้าไป

จากรูปได้พื้นที่ส่วนที่แรเงา (Am) = 2.5×1.2

$$= 3 \text{ cm}^2$$



รูปที่ 4.3 แสดงพื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการคำนวณ (Am) เห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับก๊อปปี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้เห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงค่าตัวแปร(parameter)ที่เลือกกำหนดค่าโดยประมาณ สำหรับใช้ในการคำนวณหาค่าแรงทางกลศาสตร์(f_{mech})

4.3 การคำนวณเพื่อตรวจสอบค่าที่เลือกใช้ในการออกแบบ

จากค่าตัวแปรที่กำหนดขึ้นมา เราจะนำค่าความหนาแน่นของเพลตที่จะสามารถยกได้โดยประมาณ โดยการแทนค่าตัวแปรที่กำหนดในสมการต่างๆดังต่อไปนี้

จากสมการ (4-1)

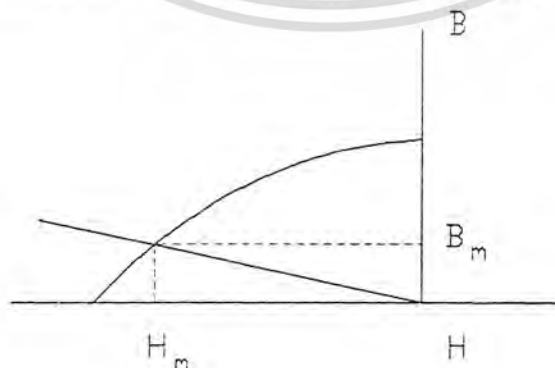
$$\frac{B_m}{H_m} = \frac{\mu_0 l_m A_{gap}}{l_{gap} A_m}$$

แทนค่าตัวแปรลงในสมการได้

$$\begin{aligned} \frac{B_m}{H_m} &= \frac{(4\pi \times 10^{-7})(4.68)(3.125)}{(2)(3)} \\ &= -3.06 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

ค่า $\frac{B_m}{H_m}$ ที่ได้นี้เป็นค่า slope ซึ่งนำไปใช้เขียนเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ -3.06×10^{-6} ลงบนกราฟ

เส้นโค้ง ลอดอำนาจแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก alnico ดังแสดงโดยกราฟรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงการคำนวณจากกราฟเส้นโค้งลอดอำนาจแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข 48 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดตัดของกราฟเส้นตรงความชัน -3.06×10^{-6} และกราฟเส้นโค้งลวดอำนาจแม่เหล็ก จะเป็นจุดที่แสดงค่า B_m (ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก alnico) และความเข้มของสนามแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก alnico (H_m)

จากกราฟจะได้ค่า $B_m = 0.12$ (Teslas) และ $H_m = 38 \times 10^3$ (AT/m)

จากสมการ (4-1)

$$\frac{mg}{2 \sin 45^\circ} = -\frac{\mu_0 A (NI + H_m I_m)^2}{2l_{gap}^2}$$

(เครื่องหมายลบแสดงทิศทางของแรง)

แทนค่าตัวแปรที่กำหนดลงในสมการจะได้

$$\frac{mg}{2(\sqrt{2}/2)} = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(0.000312)[(600 \times 2) + (38 \times 10^3 \times 0.0468)]^2}{2(0.02)^2}$$

$$mg = 6.158$$

$$m = 0.628 \text{ kg}$$

จะเห็นได้ว่า ค่า m ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าน้ำหนักของเพลตที่กำหนดเอาไว้ตอนแรก ซึ่งกำหนดว่าจะยกเพลตหนัก 1 กิโลกรัม โดยใช้ MRB 2 ตัว รับน้ำหนักที่ปลายทั้ง 2 ของเพลตข้างละ 0.5 กิโลกรัม จากการคำนวณโดยประมาณข้างต้น เราพบว่า จะสามารถยกเพลตได้หนัก 1.256 กิโลกรัม เพราะฉะนั้นจึงสามารถใช้ค่าตัวแปรต่างๆที่กำหนดไว้ เป็นค่าพื้นฐานสำหรับใช้ในการออกแบบระบบ MRB ต่อไปได้

4.4 สรุปข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบชุด MRB

- 1) เพลตทำด้วยพลาสติกหรืออูมิเนียม ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าความซึมซาบต่ำ มีน้ำหนักประมาณไม่เกิน 1 กิโลกรัม
- 2) ชุดทดลอง MRB จะออกแบบให้มี MRB 2 ชุด รองรับอยู่ที่ปลายทั้ง 2 ของเพลต
- 3) แรงจากเส้นแรงแม่เหล็ก หรืออำนาจแม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นมา
 - แม่เหล็กถาวร โดยการออกแบบ เราเลือกใช้แม่เหล็กรูปทรงวงแหวน นำมาสวมลงบนเพลต ทั้งหมดจำนวน 4 ตัว (2 ตัวสำหรับชุด MRB ที่วางอยู่แต่ละปลายของเพลต)
 - แกนเหล็กอ่อน รูปตัว "E" ขนาด 1 นิ้ว โดยการเรียงแผ่นเหล็กรูปตัว E ซ้อนกันจนเต็ม (Bobbin) ขนาด $1" \times 1"$

4) เราจะเลือกใช้ ลวดเบอร์ S.W.G.22 ซึ่งมีความโต 0.028 นิ้ว และพื้นที่หน้าตัด 0.404 mm^2 น้ำหนักต่อ 100 เมตร 0.368 กิโลกรัม ความต้านทานต่อ 100 เมตร 4.303 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) จำนวนขดที่พันรอบแกนเหล็กตัว E ขนาด 1 นิ้วจนเต็ม จะออกแบบไว้จำนวน 600 รอบ

6) ความยาวเฉลี่ยของช่องอากาศ(Lgap) มีความยาวไม่ควรเกิน 2 cm

7) D.C.Power supplyซึ่งสามารถปรับค่ากระแสได้ มีพิกัดกระแสประมาณ ไม่น้อยกว่า 2 Amps

นอกจากข้อมูลพื้นฐานที่ได้กล่าวมาแล้ว เรายังต้องพิจารณาถึงเรื่องความเหมาะสม และความสะดวกในการจัดหาอุปกรณ์ เช่น ขนาดของแม่เหล็กรูปวงแหวนจะขึ้นอยู่กับข้อมูลของทางผู้ผลิตด้วย



มอเตอร์ต้นกำลังสำหรับชุดทดลองแม่เหล็กแรงผลัก (Magnetic Repulsion Bearing)

สำหรับชุดทดลอง MAGNETIC REPULSION BEARING ที่ออกแบบไว้ นั้น เราเลือกใช้ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้าจะมีข้อได้เปรียบมากกว่า การเลือกใช้ต้นกำลังแบบอื่น ๆ เช่น มอเตอร์ไฮดรอลิก มอเตอร์ลม และยังคงเหมาะสมกับการใช้งานเป็นต้นกำลังของชุดทดลองที่ออกแบบไว้ นั้น โดยที่มอเตอร์ไฟฟ้าจะมีข้อได้เปรียบดังนี้

1. มีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน
2. สะดวกในการใช้งาน
3. แข็งแรงทนทานและไม่ค่อยมีปัญหาในการใช้งาน
4. การบำรุงรักษาทำได้ง่าย
5. การซ่อมแซมทำได้ง่าย
6. มีความเร็วรอบคงที่ และสามารถปรับความเร็วรอบได้ด้วยวิธีง่าย ๆ
7. ราคาถูก
8. การทำงานไม่ก่อให้เกิดเสียงรบกวนมาก
9. ขนาดของเครื่อง พิกัดของเครื่อง สามารถหาได้เหมาะสมกับลักษณะการทำงานของชุดทดลอง
10. ใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งหาได้สะดวก

มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้งานโดยทั่วไปนั้นมีอยู่หลายชนิด เราจำเป็นต้องเลือกชนิดมอเตอร์ให้เหมาะสมกับงานมากที่สุด โดยสำหรับชุดทดลองที่ออกแบบขึ้นนี้ เราเลือกใช้มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำชนิดเฟสเดียว (Single phase induction motor ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่ใช้ไฟกระแสดับ) เนื่องจากคุณสมบัติของ (induction motor) มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีข้อได้เปรียบและเหมาะสมกับงานมากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดอื่น นั่นคือลักษณะการใช้งานที่ง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน แข็งแรง ดูแลรักษาง่าย และข้อได้เปรียบที่สำคัญของมอเตอร์เหนี่ยวนำก็คือ จะมีความเร็วรอบคงที่ และสามารถเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบได้ง่าย

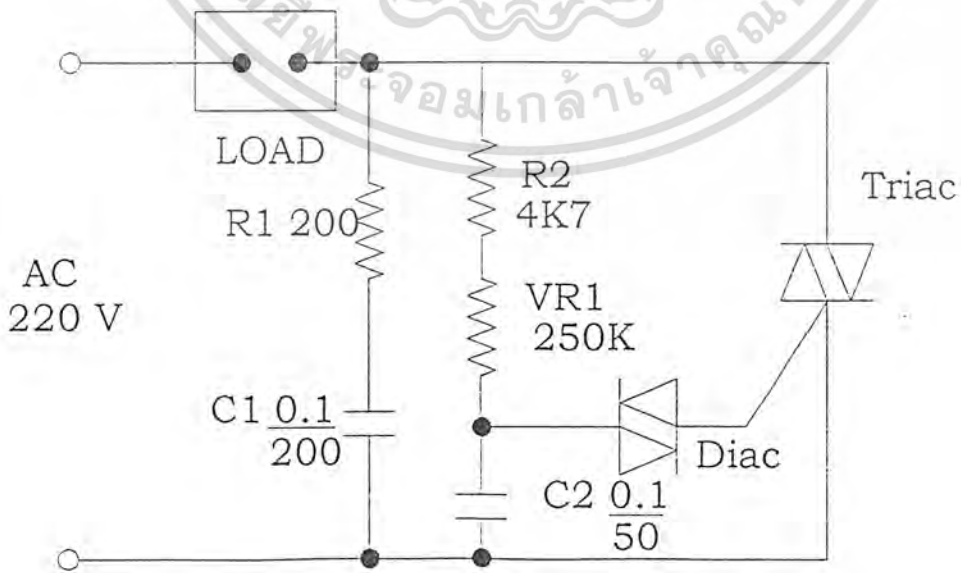
เราเลือกใช้แบบเฟสเดียว (Single phase) ก็ด้วยจากสาเหตุที่ว่า สามารถใช้แหล่งจ่ายไฟสู่มอเตอร์ได้สะดวก คือใช้ไฟเฟสเดียว (ไฟบ้าน)

โดยสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น เราจึงพิจารณาเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียว เป็นต้นกำลังในการขับเพลาของชุดทดลอง Magnetic Repulsion Bearing ซึ่งจะเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 140 W ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า

สำหรับชุดทดลอง MAGNETIC REPULSION BEARING ที่ออกแบบไว้ เราจำเป็นต้องสามารถปรับค่าความเร็วในการหมุนของเพลา เพราะฉะนั้นเราต้องสามารถปรับค่าความเร็วของมอเตอร์ต้นกำลังที่เลือกใช้ได้ ซึ่งสำหรับชุดทดลองของเราจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเฟสเดียว โดยวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว เราสามารถพัฒนาได้จากวงจรรีเฟโซรรมคา โดยจะต้องเพิ่มวงจรสแนบเบอร์(snubber)เข้ามา ดังรูปที่ 1 ซึ่งแสดงวงจรของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ วงจรดังกล่าวจะสามารถใช้ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ตามต้องการ โดยที่ส่วนของวงจรสแนบเบอร์แสดงด้วยวงจรในเส้นประดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยตัวความต้านทาน R₁ และตัวเก็บประจุ C₁ ต่ออนุกรมกัน จะทำหน้าที่ป้องกันมอเตอร์เกิดอาการคราง ถ้าปล่อยไว้นานอาจทำให้มอเตอร์ไหม้ได้ ดังนั้นเราจะสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างต่อเนื่อง โดยการใช้วงจรควบคุมดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งจะระบุขนาดของอุปกรณ์ต่างๆ ไว้ด้วย

รูปที่ 4.6 แสดงวงจรเครื่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์



บทที่ 5

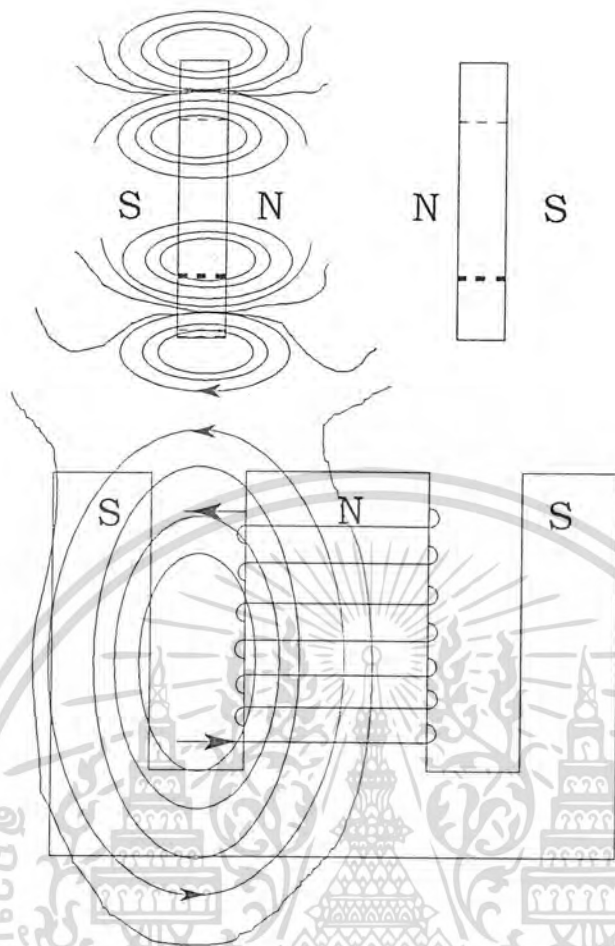
การออกแบบวางโครงสร้างของชุดแม่เหล็กที่ออกแบบไว้

5.1 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กที่ส่งออกมาจากชุดแม่เหล็กที่ออกแบบไว้

รูปที่ 5.1 แสดงทิศทาง และลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ส่งออกมาโดย (รูปที่ 5.1ก) แม่เหล็กถาวรรูปวงแหวน (รูปที่ 5.1ข) แกนเหล็กอ่อนที่ถูกกระตุ้นให้เกิดอำนาจแม่เหล็กโดยผ่านกระแสเข้าไปในขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็กรูปตัว E



รูปที่ 5.2 แสดงทิศทางและลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการวางแม่เหล็กถาวรรูปวงแหวนไว้เหนือแกนเหล็กอ่อนรูปตัว E ดังแสดงในรูป ซึ่งจะพบว่า ทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กตามรูปจะทำให้เกิดแรงผลักขึ้นระหว่างชิ้นแม่เหล็กถาวร และแกนเหล็กอ่อน เราจะสามารถนำหลักการดังที่แสดงในรูปที่ 5.2 มาออกแบบในระบบ MRB เพื่อสร้างแรงยกเพลลา โดยอาศัยแรงผลักจากการออกแบบวางแม่เหล็กเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ผลักกัน



รูปที่ 5.2 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กผลัดกัน

(หมายเหตุ : พิจารณาออกแบบลักษณะรูปแบบการวางแม่เหล็ก ซึ่งทำให้เกิดลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ก่อให้เกิดแรงผลัด โดยที่เราจะสามารถนำรูปแบบของแรงผลัดนี้ ไปประยุกต์ดัดแปลงเป็นแรงยกเพื่อใช้ในการยกเพลาให้ลอยขึ้นสำหรับระบบเบร้งแม่เหล็ก MRB)

5.2 การพิจารณาออกแบบจำนวนและตำแหน่งการวางแกนเหล็กสำหรับแม่เหล็กแรงผลัก

จากข้อมูลพื้นฐานที่ได้มา เราจะออกแบบต่อไป เพื่อเลือกจำนวนแกนเหล็กอ่อน และตำแหน่งการวางลักษณะต่างๆ ให้ได้ชุดทดลอง(Magnetic Repulsion Bearing) ที่ถูกต้องและเหมาะสมที่สุด โดยจะเริ่มพิจารณาเป็นขั้นตอนดังนี้

1) ออกแบบวางตำแหน่ง (Magnetic Repulsion Bearing) 2 ชุดที่ปลายทั้ง 2 ด้านของเพลลา เพื่อช่วยในการปรับโหดและช่วยปรับการแกว่งของเพลลาตามแนวแกน อันเนื่องมาจากการสูญเสียสมดุลย์ทางโมเมนต์(โมเมนต์รวมไม่เท่ากับศูนย์)ให้เข้าสู่ภาวะเสถียร ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ชุดทดลองที่วาง (Magnetic Repulsion Bearing) 1ตัวไว้ตำแหน่งกลางเพลลา

พิจารณารูปที่ 5.3 magnetic bearing จะต้องรับ โหด(น้ำหนักเพลลา)เท่ากับน้ำหนักเพลลา

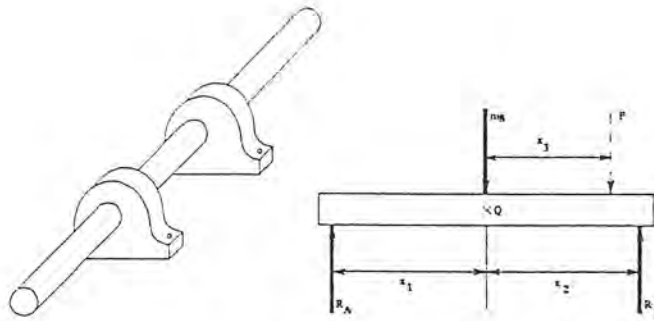
$$R = mg \quad ; \quad \sum M_Q = 0$$

และเมื่อมีแรงกระตุ้น (F) ภายนอกกระทำต่อเพลลาดังรูป จะทำให้เพลลาสูญเสียสมดุลย์ทางโมเมนต์รอบจุด Q

$$\sum M_Q = +F_x$$

(เครื่องหมาย + แสดงทิศโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา)

ซึ่งระบบที่วาง (Magnetic Repulsion Bearing) 1 ตัวตำแหน่งกลางเพลลาดังรูป จะไม่สามารถปรับให้เกิดภาวะเสถียรได้ ไม่ว่าจะเพิ่มหรือลดแรงที่ bearing กระทำต่อเพลลา (R) ก็ตาม



รูปที่ 5.4 ชุดทดลองที่วาง (Magnetic Repulsion Bearing) 2 ตำแหน่งที่ปลายทั้งสองข้างของเพลา

พิจารณารูป 5.4 magnetic bearing แต่ละตัวจะรับโหลด (น้ำหนักเพลา) เท่ากับน้ำหนักเพลา

$$R_A = R_B = \frac{mg}{2} ; \sum M_Q = 0$$

เมื่อมีแรงภายนอก (F) มากระทำที่เพลา ดังรูป ระบบจะสูญเสียสมดุลย์ทางโมเมนต์รอบจุด Q

$$\sum M_Q = R_A x_1 + F x_3 - R_B x_2$$

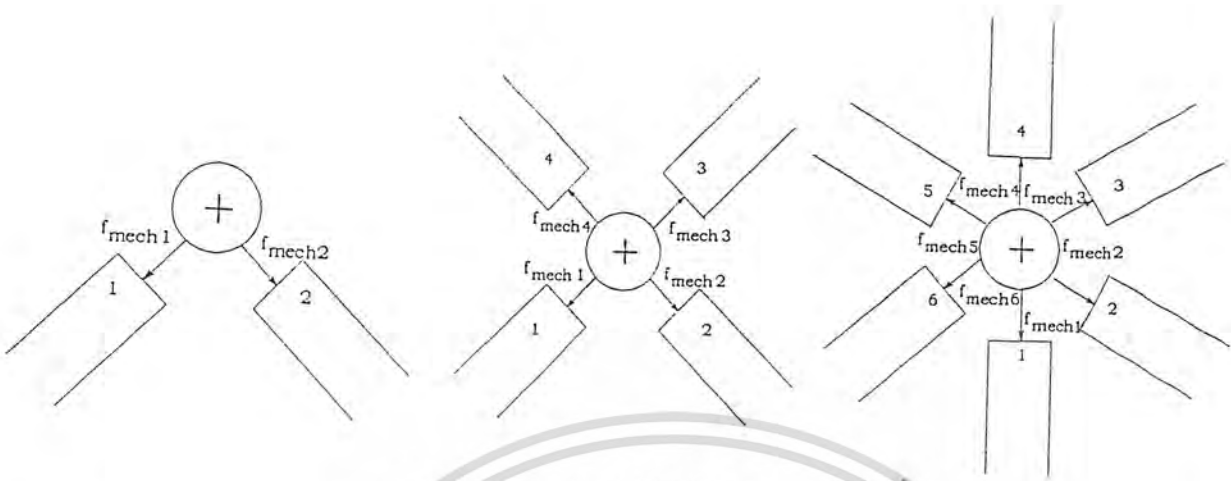
$$\sum M_Q = +F x_3$$

แต่ระบบจะสามารถปรับตัวเองให้เข้าสู่สภาวะเสถียรได้ ($\sum M_Q = 0$) โดยการเพิ่ม R_B เพื่อให้

$$\sum M_Q = R_A x_1 + F x_3 - R_B x_2 = 0$$

ด้วยเหตุนี้เราจึงเลือก (Magnetic Repulsion Bearing) 2 ตัวที่ตำแหน่งปลายทั้งสองของเพลา

2) ออกแบบให้วางแกนเหล็กอ่อนทั้งหมด 4 แกน สำหรับแบร์ริงแม่เหล็ก (Magnetic Repulsion Bearing) 1 ตัว เพื่อช่วยปรับการแกว่งของเพลาตามแนวรัศมีให้เข้าสู่สมดุลย์ และเพื่อความเหมาะสมในด้านขนาดของชุดแบร์ริงแม่เหล็ก (Magnetic Repulsion Bearing) นอกจากนี้ยังง่ายต่อการควบคุมอีกด้วย
พิจารณารูปที่ 5.5



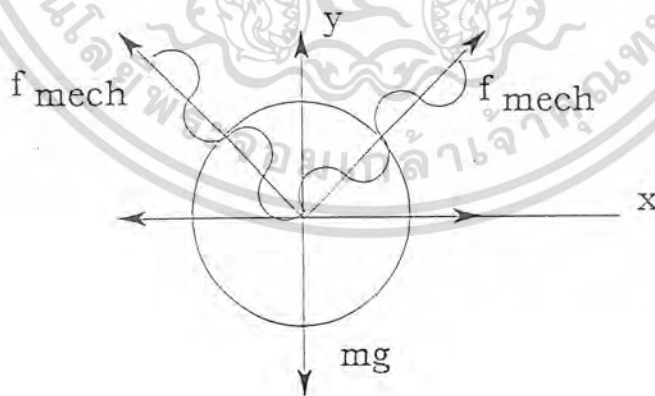
รูปที่ 5.5ก วางแกนเหล็ก 2 แกน

รูปที่ 5.5ข วางแกนเหล็ก 4 แกน

รูปที่ 5.5ค วางแกนเหล็ก 6 แกน

รูปที่ 5.5 แสดงลักษณะการวางแกนเหล็กจำนวนต่างๆกัน สำหรับ Magnetic Repulsion Bearing 1 ตัว

พิจารณารูป 5.5ก เขียน free body diagram ได้ดังนี้



รูปที่ 5.6 แสดงแรงผลักเนื่องจากการวางแกนเหล็กจำนวน 2 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ **57** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีผลต่อการตอบสนองของระบบ จะสามารถปรับค่าได้ตามระยะจัดในทิศทาง $+x$, $-x$, $+y$ และ $-y$ ทำให้ผลตอบสนองของระบบเร็วขึ้น และในกรณีที่ระบบถูกกระตุ้นอย่างรุนแรงนั้น ระบบจะมีขอบเขตในการควบคุมสถานะสมดุลย์มากกว่า สามารถควบคุมได้ละเอียดกว่า เส้นแรงแม่เหล็กภายในระบบมีความสม่ำเสมอมากกว่าแบบที่ใช้แกนเหล็ก 2 แกน

พิจารณารูปที่ 5.5ค ในทำนองเดียวกันกับการพิจารณารูปแบบอื่น ๆ จะเห็นว่าระบบสมดุลย์ทางสถิตยศาสตร์ และสามารถปรับตัวเองเข้าสู่สถานะเสถียรได้ โดยที่ให้ผลตอบสนองเร็วกว่าใน 2 แบบแรก นอกจากนี้ยัง สามารถควบคุมได้ละเอียดกว่าเส้นแรงแม่เหล็กภายในระบบมีความสม่ำเสมอ และต่อเนื่องมากกว่า และสามารถรับน้ำหนักเพลลา (load หรือเพลลา) ได้มากขึ้นกว่าใน 2 ระบบแรก อย่างไรก็ตาม สำหรับระบบที่วางแกนเหล็กอ่อน 6 แกน จะทำให้ชุดทดลองมีขนาด และน้ำหนักมากขึ้น รวมทั้งการควบคุม จะมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าในระบบที่วางแกนเหล็กอ่อน 4 แกน

โดยการพิจารณาความเหมาะสมในด้านต่าง ๆ เราจึงเลือกออกแบบให้วางแกนเหล็กอ่อน 4 แกน รอบเพลลาสำหรับ magnetic Repulsion Bearing 1 ชุด

3) ออกแบบให้วางแกนเหล็กอ่อน 4 แกนในแนวทแยงมุม รูปตัว "X" ดังแสดงในรูปที่ 5.8 เพื่อช่วยให้ Magnetic Repulsion Bearing สามารถรับ Load ได้มากกว่า



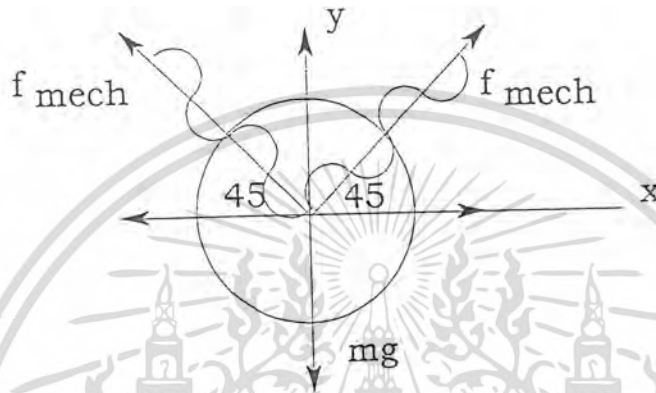
รูปที่ 5.8ก แสดงการวางแกนเหล็กรูป "X"

รูปที่ 5.8ข แสดงการวางแกนเหล็กรูป "+"

รูปที่ 5.8 แสดงรูปแบบการวางแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 59 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้แกนเหล็กอ่อนที่ผ่านกระแสเข้าไปเท่ากันให้แรงแม่เหล็ก f_{mech} ได้เท่ากันในทุกแกน
 พิจารณารูปที่ 5.8 จะได้ว่า การวางแกนเหล็กลักษณะ "X" ดังแสดงในรูป 5.8ก จะสามารถรับน้ำหนักเพลลา
 ได้มากกว่าการวางแกนเหล็กในลักษณะ "+" ดังแสดงในรูป 5.8ข ดังพิจารณาจาก free body diagram ดังนี้

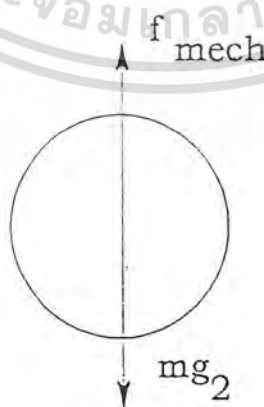


รูปที่ 5.9 แสดงแรงผลึกเนื่องจากการวางแกนเหล็กแบบ "X"

$$mg_1 = 2(f_{mech} \sin 45)$$

$$= 1.7 f_{mech}$$

free body diagram สำหรับรูปที่ 5.8ก โดยพิจารณาเฉพาะ แรงที่มีผลต่อการรับน้ำหนักเพลลาโดยตรง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 5.10 แสดงแรงผลึกเนื่องจากการวางแกนเหล็กแบบ "+"
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเป็น 60 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$mg_2 = f_{mech}$$

free body diagram สำหรับรูป 5.8ข พิจารณาเฉพาะ แรงที่มีผลต่อการรับน้ำหนักเพลลาโดยตรง

$$mg_2 < mg_1$$

ด้วยเหตุนี้จึงเลือกออกแบบ ให้วางแกนเหล็กอ่อน 4 แกนในแนวทแยงมุม (รูปตัว "X")

รูปที่ 5.11 แสดงลักษณะการวางแกนเหล็กอ่อนรูปตัว "E" และตำแหน่งของแม่เหล็กถาวรรูปวงแหวน สำหรับชุดทดลอง Magnetic Repulsion Bearing ซึ่งประกอบด้วย bearing จำนวน 2 ตัว



รูปที่ 5.11 แสดงตำแหน่งและลักษณะการวางแกนเหล็กอ่อนรูปตัว "E"

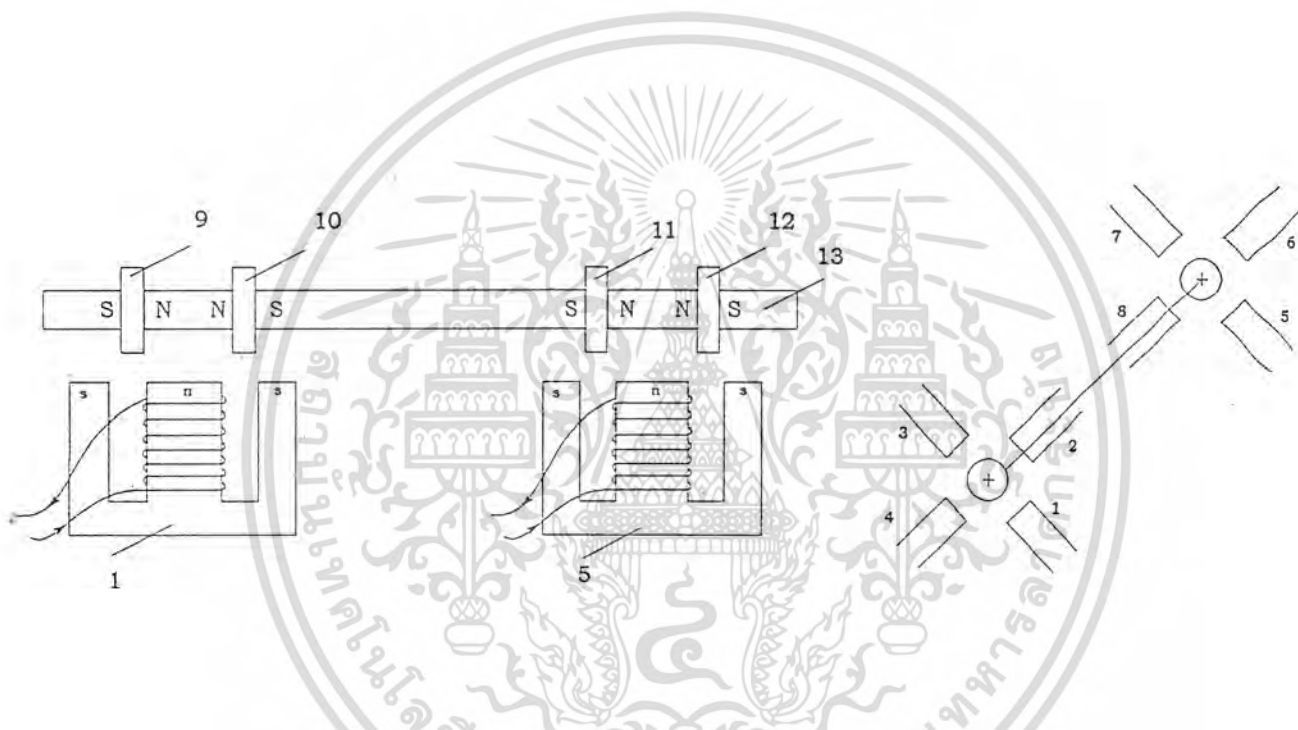
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 61 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

หลักการทํางานพื้นฐานของชุดทดลองเบริงแม่เหล็กแรงผลัก

6.1 การทํางานของส่วนประกอบชุดเบริงแม่เหล็กแรงผลัก

รูปที่ 6.1 แสดงชุดทดลอง Magnetic Repulsion Bearing ที่ออกแบบ โดยชุดทดลองจะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้



รูปที่ 6.1 แสดงชุดทดลองเบริงแม่เหล็ก (Magnetic Repulsion Bearing)

หมายเลข 1-8 แกนเหล็กอ่อนรูปตัว "E" ขนาด 1"X1" พื้นขดลวดเบอร์ s.w.g. 22 รอบแกนจนเต็ม 600 รอบ

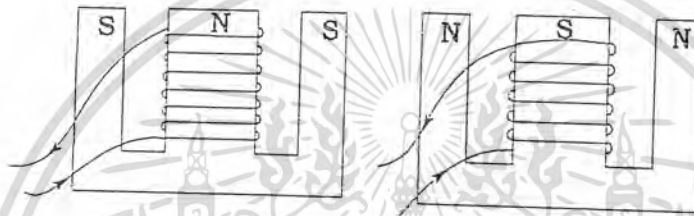
หมายเลข 9-12 แม่เหล็กถาวรลักษณะเป็นวงแหวน ทำจากสารแม่เหล็ก alnico

หมายเลข 13 เพลาลูมิเนียม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9/16 นิ้ว ขาวทั้งหมด 18 นิ้ว

จากรูปที่ 6.1 เมื่อยังไม่มีการผ่านกระแสไฟ (กระแสตรง)เข้าขดลวด แกนเหล็กอ่อนรูปตัว "E" หมายเลข 1-8 จะอยู่ในสภาวะที่ปราศจากอำนาจแม่เหล็ก ทำให้เพลานหมายเลข 13 ไม่ได้ถูกยกให้ลอยขึ้น ยังคงวางนิ่งอยู่บนแกนเหล็กอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ**62**และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อต้องการให้ระบบ Magnetic Repulsion Bearing เริ่มทำงานเพื่อรองรับการหมุนของเพลลา เราจะต้องทำการป้อนไฟกระแสตรง เข้าไปในขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็กอ่อนทั้ง 8 แกน เมื่อแกนเหล็กอ่อนถูกกระตุ้น จะทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้นภายใน เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก(flux)ไหลวนอยู่ในแกนเหล็ก ซึ่งส่งผลให้ปลายของเหล็กอ่อนรูปตัว "E" กลายเป็นขั้วแม่เหล็กดังแสดงในรูป 6.1 ซึ่งการจัดเรียงขั้วแม่เหล็กที่ปลายแกนเหล็กกว่าจากกลางของแกนเหล็กจะเป็นขั้วเหนือ(N)หรือขั้วใต้(S)นั้น สามารถพิจารณาโดยใช้กฎมือขวา หรือสังเกตจากลักษณะการพันขดลวด ดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แสดงขั้วแม่เหล็กจากการพันแกนเหล็ก 2 แบบ

อำนาจแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นโดยแกนเหล็กอ่อนดังแสดงในรูปนี้ จะส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างแม่เหล็กถาวรรูปวงแหวนที่สวมอยู่บนเพลลาและแกนเหล็กอ่อนที่ผ่านกระแสไฟเข้าไป โดยที่อำนาจแม่เหล็กทั้งสองจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก(flux)ไหลสวนทิศกัน ซึ่งทำให้เกิดเป็นแรงผลักระหว่างแม่เหล็กที่มีขั้วเหมือนกัน แรงผลักระหว่างแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นนี้จะถูกใช้เป็นที่แรงผลักระหว่างเพลลาให้ลอยขึ้น โดยที่แรงแม่เหล็กจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก(B)ของสารแม่เหล็กถาวร และแกนเหล็กอ่อนที่ถูกกระตุ้น ซึ่งค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรรูปวงแหวนนั้น เรากำหนดให้มีค่าคงที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้แต่ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กอ่อนเราสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้โดยการปรับกระแสที่ป้อนเข้าขดลวด โดยที่ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กอ่อนจะแปรผันโดยตรงกับค่ากระแสที่ป้อนเข้าขดลวด (ถ้าปรับค่ากระแสที่ป้อนเข้าขดลวดให้ป้อนเข้าขดลวดให้เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กอ่อนเพิ่มขึ้น ทำนองเดียวกันถ้าปรับให้ค่ากระแสลดลง ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กลดลงด้วย)

จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงสรุปได้ว่า แรงผลักระหว่างแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ค่ากระแสที่ป้อนเข้าขดลวด โดยจะแปรผันตรงกัน คือถ้าเราเพิ่มค่ากระแสจะทำให้ได้แรงผลักระหว่างแม่เหล็กที่มีค่ามากขึ้น และถ้าเราลดค่ากระแสลงก็จะทำให้ได้แรงผลักระหว่างแม่เหล็กที่ลดลง

จากรูปที่ 6.1 แกนเหล็กอ่อนหมายเลข 1,4,5 และ 8 แรงผลึกที่ถูกสร้างขึ้นจากอำนาจแม่เหล็กของแกนเหล็กอ่อนเหล่านี้ จะทำหน้าที่เป็นแรงที่ใช้สำหรับยกเพลลาให้ลอยขึ้น ส่วนแกนเหล็กอ่อนหมายเลข 2,3,6 และ 7 จะให้แรงผลึกเพื่อใช้เป็นแรงสำหรับการปรับสมดุลย์ของระบบ ให้สามารถเข้าสู่สถานะเสถียร (self centering) ได้ด้วยตนเอง ดังนี้จึงจำเป็นที่แรงผลึกที่เกิดขึ้นจากแกนเหล็กอ่อนหมายเลข 1, 4, 5 และ 8 ต้องมีค่ามากกว่า แรงผลึกที่สร้างขึ้นจากแกนเหล็กอ่อนหมายเลข 2, 3, 6 และ 7 ด้วยเหตุนี้ ในการป้อนกระแสเข้าขดลวด เราจึงต้องป้อนกระแสเข้าขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กหมายเลข 1,4,5 และ 8 ให้มากกว่า กระแสที่ป้อนเข้าขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กหมายเลข 2,3,6 และ 7 และเพื่อให้เพลลาอยู่ในสถานะที่สมดุลย์ กระแสที่ป้อนเข้าขดลวดของแกนเหล็กหมายเลข 1,4,5 และ 8 จะต้องเท่ากับหมุดและกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดของแกนเหล็กหมายเลข 2,3,6 และ 7 ก็ต้องมีค่าเท่ากับหมุดเช่นเดียวกัน

เราจึงออกแบบให้ชุดทดลอง MRB ใช้ power supply (ตัวจ่ายกระแสไฟตรง DC generator) 2 ตัว เพื่อแยกกันจ่ายกระแส 2 สายอย่างเป็นอิสระแก่กัน ได้แก่สายบน (หมายเลข 2,3,6 และ 7) และสายล่าง (หมายเลข 1,4,5 และ 8)

สำหรับการเริ่มต้นใช้งานชุดทดลอง MRB ที่ได้ออกแบบไว้ เราต้องเริ่มจากการป้อนกระแสไฟเข้าขดลวดของแกนเหล็กอ่อนหมายเลข 1,4,5 และ 8 ซึ่งต้องนานกันอยู่ (สายล่าง) เพื่อสร้างแรงผลึกแม่เหล็กสำหรับยกเพลลาให้ลอย โดยที่เพลายังคงหยุดนิ่ง ไม่มีการหมุน เมื่อเพลาริเริ่มหมุนซึ่งจะทำให้เกิดการแกว่งของเพลานั้น ก็จะทำการป้อนกระแสไฟเข้าขดลวดสายบน (หมายเลข 2,3,6 และ 7) เพื่อสร้างแรงผลึกแม่เหล็กสำหรับการปรับสมดุลย์ของระบบ ทำให้การแกว่งของเพลาลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สถานะเสถียรได้

เมื่อต้องการหยุดการทำงาน จะต้องบังคับให้เพลาหมุนอยู่หยุดหมุนให้สนิท แล้วจากนั้นจึงตัดกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสายบนออก แล้วค่อย ๆ ลดกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสายล่างออกจนกระทั่งเป็นศูนย์ เป็นอันเสร็จสิ้นการทำงาน

6.2 ตัวแปร (parameter) และชุดทดลอง Magnetic Repulsion Bearing ที่สามารถปรับค่าได้

ชุดทดลอง Magnetic Repulsion Bearing ที่จะทำการออกแบบเพื่อใช้ทำการทดลองนั้นเราจะต้องออกแบบโครง หรือตัวจับยึดชุด Magnetic Repulsion Bearing เพื่อที่จะสามารถปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อแรงยกของเพลลาและสภาวะเสถียรของระบบ(การแกว่งของเพลลา) โดยทางนี้มีปัจจัยหรือตัวแปรต่าง ๆ มากมายที่มีผลต่อแรงยกของเพลลา และการปรับสมดุลของเพลลาหรือการแกว่งของเพลลา แต่อย่างไรก็ตามเพื่อจำกัดการศึกษาทดลองให้แคบเข้า เราจะทำการพิจารณาให้ตัวแปรอื่น ๆ มีค่าคงที่ ไม่จำเป็นต้องทำการออกแบบเพื่อให้สามารถปรับค่าได้ เราจะทำการออกแบบเพื่อให้สามารถปรับค่าได้ เฉพาะตัวแปรที่สำคัญ และ สนใจจะศึกษาเท่านั้น

ตัวแปร(parameter) หรือ ปัจจัยที่สำคัญ ที่เรามุ่งสนใจจะศึกษาในโครงการนี้ ได้แก่

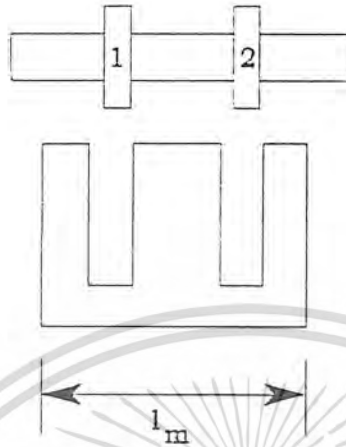
1) ตำแหน่งของวงแหวนแม่เหล็กถาวรทั้ง 4 ตัวที่สวมอยู่บนเพลลาอลูมิเนียม โดยเราจะทำการให้แม่เหล็กถาวรสามารถเลื่อนตำแหน่งไปตามแนวแกนของเพลลาได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 แสดงการปรับตำแหน่งของแม่เหล็กถาวรตามแนวแกนเพลลา

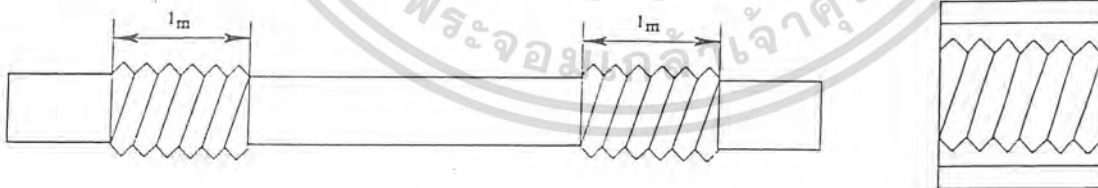
รูปที่ 6.3 แสดงการปรับตำแหน่งของแม่เหล็กถาวรในแนวแกนเพลลา ลูกศรแสดงทิศทางการเลื่อนตำแหน่งของแม่เหล็กถาวร

โดยระยะการปรับของแม่เหล็กถาวร จะมีขอบเขตการปรับระยะ โดยพิจารณาว่าเมื่อแม่เหล็กถาวรถูกเลื่อนตำแหน่งออกจากแกนเหล็กอ่อนรูปตัว "E" แล้ว อำนาจแม่เหล็กระหว่างแม่เหล็กถาวรและแกนเหล็กอ่อน ที่ส่งผลต่อกันจะลดลงมากจนไม่มีผลต่อการพิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 6.4 ขอบเขตของระยะที่จะกำหนดให้มีการปรับตำแหน่งของแม่เหล็กถาวรได้ก็คือ ระยะ l_m ดังรูป โดยแม่เหล็กถาวรหมายเลข 1 และ 2 สามารถปรับเลื่อนตำแหน่งได้อย่างอิสระภายในขอบเขตระยะ l_m ตามแนวแกนเพลลา โดยรูปที่ 6.4 จะแสดงเฉพาะชุด Magnetic Repulsion Bearing เพียงชุดเดียวเท่านั้น



รูปที่ 6.4 แสดงระยะที่กำหนดให้มีการปรับตำแหน่งของแม่เหล็กถาวร

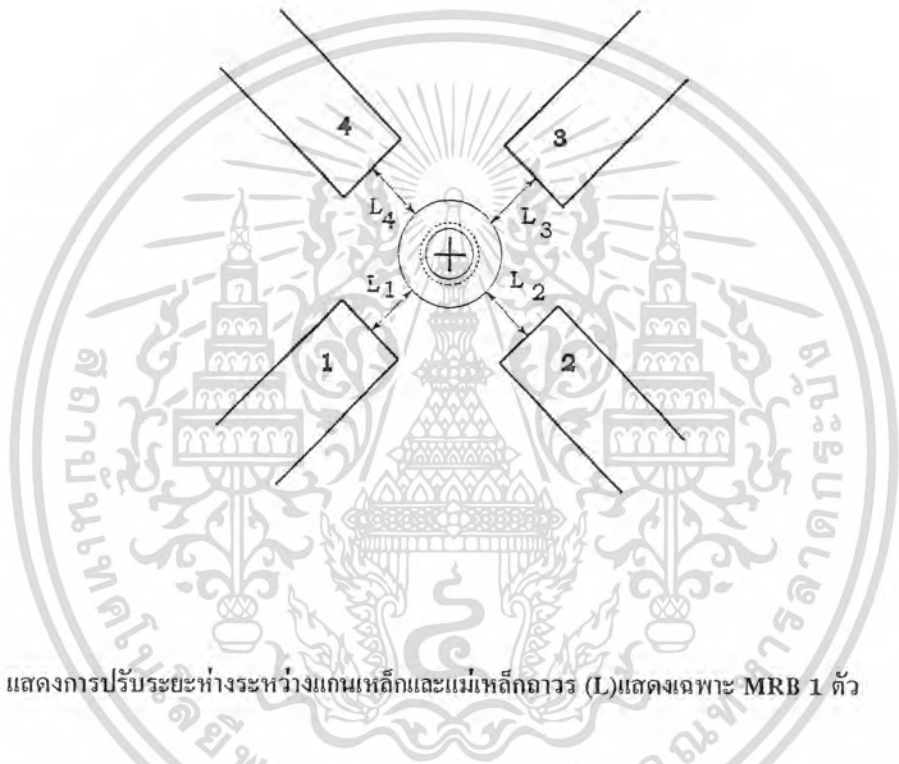
เราจะทำการออกแบบให้ปรับตำแหน่งของแม่เหล็กถาวรรูปวงแหวนได้โดยใช้เกลียว นั่นคือเราจะ
 กิ่งเกลียวบนตัวเฟลาอลูมิเนียม และ กิ่งปลอกเกลียวสวมลงในแม่เหล็กวงแหวนดังแสดงในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 แสดงเฟลาอลูมิเนียมกิ่งเกลียวและปลอกเกลียวสวมลงในแม่เหล็กวงแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 66 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและแม่เหล็กถาวร เป็นระยะ L ดังแสดงในรูปที่ 6.6 โดยเราจะต้อง ออกแบบโครงจับยึดแกนเหล็กอ่อน ให้สามารถที่จะปรับระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและแม่เหล็กถาวรได้ รูปได้ และ ต้องสามารถปรับระยะ (L) สำหรับแกนเหล็กอ่อนได้ทั้ง 8 แกน โดยที่การปรับของแต่ละแกน เป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 6.6 แสดงการปรับระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและแม่เหล็กถาวร (L) แสดงเฉพาะ MRB 1 ตัว

ระยะ L ที่สามารถปรับค่าได้นี้ ไม่ใช่ระยะช่องอากาศ (l_{gap}) ที่ใช้ในการคำนวณจรรยาแม่เหล็ก แต่ การปรับระยะ L นี้ จะมีผลต่อระยะ l_{gap} ของวงจรรยาแม่เหล็กโดยตรง นั่นคือ ถ้าเราเพิ่มระยะห่างระหว่าง แกนเหล็ก (ระยะ L) จะมีผลให้ระยะช่องอากาศ (l_{gap}) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ (f_{mech}) แรงผลักรแม่เหล็กลด ลงด้วย ในทางกลับกัน ถ้าเราลดระยะ L ลงก็จะทำให้ระยะ l_{gap} ของวงจรรยาแม่เหล็กลดลง ซึ่งทำให้แรงผลักร แม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น

สำหรับการออกแบบโครงจับยึดแกนเหล็กทั้ง 8 แกน เพื่อให้เลื่อนระยะ L ดังรูป เข้า-ออกได้โดย เป็นอิสระต่อกันนั้น เราอาจออกแบบได้หลายแบบ เมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมและความสะดวกแล้ว เราจะพิจารณาให้สามารถปรับระยะได้โดยใช้มือรับ ซึ่งจะทำให้โครงสร้างไม่ยุ่งยากซับซ้อน ง่ายต่อการ ปรับระยะ และสามารถปรับระยะของแกนเหล็กแต่ละแกนได้อย่างเป็นอิสระ ดังนั้นจึงออกแบบให้แกน การปรับระยะ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อที่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กถูกยึดติดกับโครง โดยการใช้สลักเกลียวขันให้แน่น และสามารถปรับระยะ L ได้โดยใช้มือปรับจนได้ระยะตามที่ต้องการ แล้วขันสลักเกลียวยึดแกนเหล็กติดกับโครงให้แน่นก็เป็นอันเรียบร้อย ดังแสดงในรูป 6.7 ซึ่งสามารถปรับระยะ L ได้ตามต้องการ



รูปที่ 6.7 แสดงโครงจับยึดแกนเหล็ก

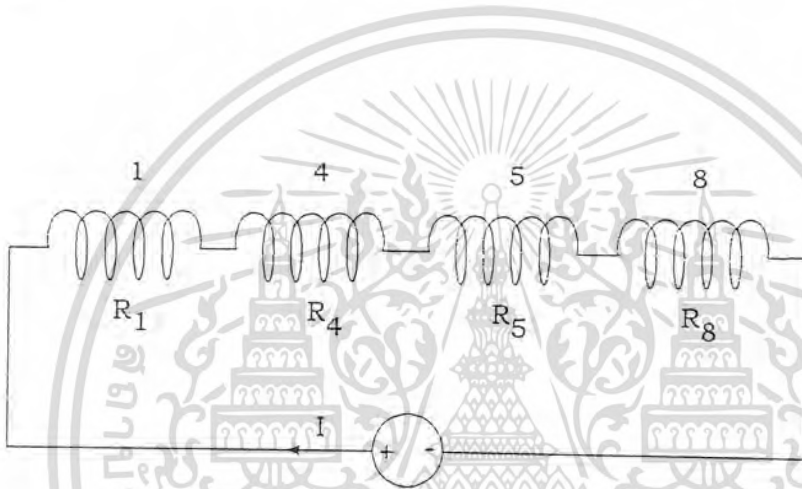
3) กระแสที่จ่ายเข้าขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก ในการทำให้แกนเหล็กอ่อนมีอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้นนั้น เราจะต้องจ่ายไฟกระแสตรงเข้าไปในขดลวดซึ่งพันอยู่รอบแกนเหล็กอ่อน (สำหรับแกนเหล็กอ่อนรูปตัว "E" จะพันขดลวดรอบแกนกลางของแกนเหล็ก) เพื่อทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (flux) ไหลในแกนเหล็กอ่อน โดยที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสที่จ่ายเข้าขดลวด นั่นคือ ถ้าเราเพิ่มกระแสจะทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นด้วย ในทางกลับกันถ้าเราลดกระแสลง จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลง และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กก็ลดลง เราได้ทราบมาแล้วว่า ค่าแรงผลักแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็ก จะมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่า เมื่อเราเพิ่มกระแสให้มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้แรงผลักแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น ซึ่งหมายถึง ชุด Magnetic Repulsion Bearing จะสามารถรับโหลด (น้ำหนักเพลา) ได้มากขึ้น แต่ถ้าเราลดกระแสลง จะทำให้แรงผลักแม่เหล็กลดลงตามไปด้วย

สำหรับชุดทดลอง Magnetic Repulsion Bearing ที่ออกแบบ เราจะใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC. Power Supply) ที่สามารถปรับค่ากระแสที่จ่ายออกมาได้ เป็นอุปกรณ์จ่ายไฟให้กับขดลวด ดังนั้น เราจึงสามารถปรับค่ากระแสที่จ่ายให้ขดลวดได้ตามต้องการ โดยเราจะใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC. เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ 68 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Power Supply) 2 เครื่อง แยกจ่ายไฟเข้าแกนสายบนและสายล่าง ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ดังนั้นเราสามารถปรับกระแสที่จ่ายเข้าขดที่พันเหล็กอ่อนหมายเลข 1,4,5 และ 8 (สายล่าง) กับ ขดที่พันรอบแกนเหล็กหมายเลข 2, 3, 6 และ 7 (สายบน) ได้ อย่างอิสระแก่กัน

การต่อแหล่งจ่ายไฟตรงเข้ากับขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กทั้งสายบนและสายล่าง สามารถต่อได้ 2 วิธี

3.1) ต่ออนุกรม จะต่อขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กในสายเดียวกัน แบบอนุกรมเข้ากับแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 แสดงการต่อขดลวดของแกนเหล็กสายล่างแบบอนุกรมเข้ากับแหล่งจ่าย

โดยที่ R_1, R_4, R_5, R_8 คือ ค่าความต้านทานของขดที่พันรอบแกนเหล็กอ่อนหมายเลข 1,4,5 และ 8 ตามลำดับ และมีค่าความต้านทานเท่ากัน การต่อแบบอนุกรมทำให้กระแสไหลผ่าน R ทุกตัวเท่ากันหมด นั่นคือ

$$I_1 = I_4 = I_5 = I_8 = I$$

และความต่างศักย์ที่ตกคร่อมความต้านทานแต่ละตัวจะต้องเท่ากันหมด

$$V_1 = V_4 = V_5 = V_8 = IR$$

กำลังงานที่จ่ายให้แต่ละขดเท่ากันหมด

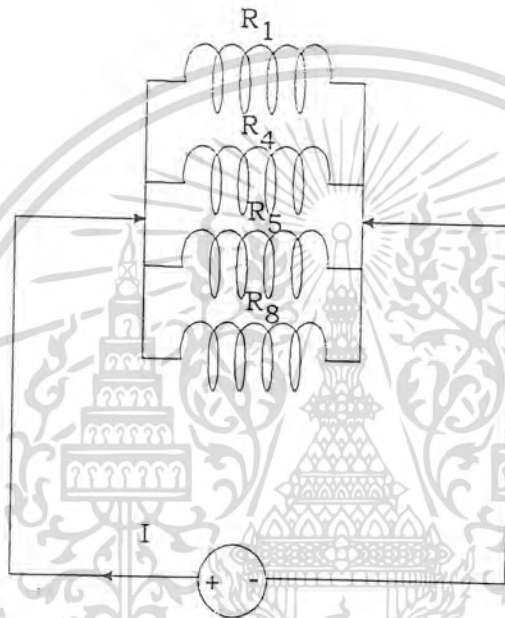
$$P = IV = I^2R$$

สำหรับการต่อขดลวดของแกนเหล็กสายบนก็สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน โดยที่ สามารถประมาณ ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = R_8 = R$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้จำนวนขดที่พันรอบแกนเหล็กอ่อนเท่ากันหมดทุกแกน

3.2) ต่อขนาน ต่อขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กอ่อนสายเดียวกันแบบขนาน เข้ากับแหล่งจ่ายไฟ ตรงดังแสดงในรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 แสดงการต่อขดลวดของแกนเหล็กสายล่างแบบขนานเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ

ประมาณได้ว่า $R_1 = R_4 = R_5 = R_8 = R$

เนื่องจากการต่อแบบขนานดังนั้นกระแสแยกไหลในแต่ละขดจะเท่ากัน คือ

$$I_1 = I_4 = I_5 = I_8 = I/4$$

ความต่างศักย์ตกคร่อมแต่ละขดจะเท่ากันคือ

$$V = IR/4$$

กำลังงานที่จะจ่ายให้กับขดลวดที่ต่อขนานกันอยู่ในแต่ละขดคือ

$$P = IV/4 = I^2R/16$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการต่อขดลวดแกนเหล็กสายบนก็ทำได้ในทำนองเดียวกัน

จากการต่อขดลวดทั้ง 2 วิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าถ้าแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจ่ายกระแสให้เท่ากันการต่อแบบอนุกรมจะมีกระแสไหลผ่านขดลวดมากกว่าการต่อขดลวดแบบขนานซึ่งทำให้ได้แรงผลักแม่เหล็กมากกว่าด้วย ในทางกลับกันถ้าแหล่งจ่ายให้ความต่างศักย์เท่ากัน การต่อแบบขนานจะให้ความต่างศักย์คร่อมขดลวดได้มากกว่าการต่อแบบอนุกรม ซึ่งจะทำได้กำลังงานมากกว่า เป็นผลให้ได้แรงผลักแม่เหล็กมากกว่าด้วย

เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟของเราสามารถจ่ายความต่างศักย์ได้สูง ดังนั้นเราจึงเลือกต่อขดลวดแบบขนาน ซึ่งจะทำให้เกิดแรงผลักได้มากกว่าการต่อแบบอนุกรม

4) ความเร็วรอบของเพลา การหมุนของเพลาสำหรับชุดทดลอง Magnetic Repulsion Bearing จะใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลัง โดยส่งกำลังผ่านข้อต่ออ่อนมาเข้าเพลา โดยมอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์กระแสสลับ (AC. Motor) ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบได้โดยใช้อุปกรณ์ปรับความเร็วมอเตอร์ (ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของมอเตอร์กระแสสลับและอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไว้ในท้ายบทที่ 4) ดังนั้นเราสามารถปรับความเร็วรอบของเพลาได้โดยปรับจากความเร็วรอบของมอเตอร์นั่นเอง

บทที่ 7

แบบจำลองการสั่นและสมการการเคลื่อนที่ของระบบ MRB ที่ออกแบบไว้

หัวข้อที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมการสั่น (Vibration) ของระบบ MRB ที่ออกแบบไว้ซึ่งมีความจำเป็นมาก สำหรับใช้ในการวิเคราะห์สภาวะการทำงานของระบบว่า ระบบที่ออกแบบไว้นั้นมีเสถียรภาพหรือไม่ และเมื่อถูกกระตุ้นจากแรงภายนอก ระบบจะสามารถปรับตัวเองเข้าสู่เสถียรได้หรือไม่ เพื่อใช้ในการพิจารณาว่า เราจำเป็นต้องใช้ระบบควบคุมเข้าช่วย นอกจากนี้เรายังสามารถศึกษาถึงผลตอบสนองของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถนำผลตอบสนองที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกันได้ ด้วยเหตุดังกล่าวข้างต้นจะเห็นว่า การศึกษาพฤติกรรมการสั่นของระบบมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการที่จะสามารถนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ปรับปรุงและพัฒนาการทำงานของระบบต่อไปเพื่อให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ในการศึกษาถึงพฤติกรรมการสั่นของระบบ เราจะต้องทำการสร้างแบบจำลองการสั่นขึ้นมาแทนระบบที่เราออกแบบไว้จริง โดยกำหนดข้อสมมติต่าง ๆ ขึ้นมาให้ใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริงของระบบมากที่สุด จากแบบจำลองการสั่นที่ได้ เราจะหาสมการการเคลื่อนที่ของระบบขึ้นมา เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาผลตอบสนองและสภาวะการทำงานของระบบที่ออกแบบไว้ได้

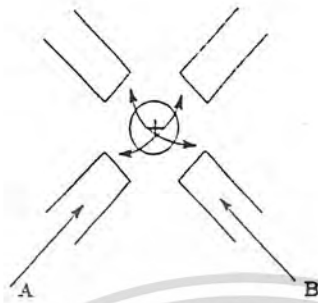
สำหรับระบบทำงานทั่วไป สามารถแบ่งออกกว้าง ๆ ได้เป็น Linear และ Non Linear System (ระบบเชิงเส้นและระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น) ระบบเชิงเส้นเราจะสามารถทำการวิเคราะห์ระบบได้ โดยการใช้เทคนิคในทางคณิตศาสตร์ช่วย ส่วนระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นยังเป็นที่รู้จักกันน้อยมาก จะไม่ค่อยทำการศึกษากัน เนื่องจากการวิเคราะห์ทำได้ยุ่งยากซับซ้อน อย่างไรก็ตามเราสามารถทำการประมาณให้เป็นระบบเชิงเส้นได้อย่างใกล้เคียงโดยการกำหนดเงื่อนไขและข้อสมมติบางประการขึ้นมา รวมถึงอาจมีการใช้ผลจากการทดลองเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ได้ สำหรับระบบ MRB ที่ออกแบบไว้ก็จัดว่าเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในการศึกษาเราจะทำการกำหนดเงื่อนไขข้อสมมติต่าง ๆ ขึ้น เพื่อให้สามารถประมาณระบบ MRB ให้เป็นระบบเชิงเส้นได้อย่างใกล้เคียงถูกต้องและเหมาะสมที่สุด

พฤติกรรมการสั่น (Vibration) แบ่งได้ 2 ชนิด คือ Free Vibration และ Force Vibration โดย Free Vibration คือ การสั่นที่เกิดขึ้นภายใต้แรงภายในระบบ ไม่มีแรงกระตุ้นจากภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง และ Force Vibration จะเป็นการสั่นที่เกิดขึ้นภายใต้การกระตุ้นจากแรงภายนอก

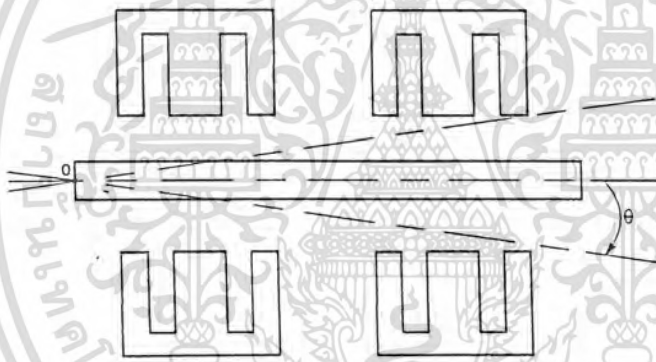
พิจารณาให้การสั่นของระบบ MRB เป็นการสั่นแบบ Free Vibration โดยมีจำนวนแกนอิสระที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของระบบ 2 แกน (2 Degrees of Freedom) ซึ่งบอกตำแหน่งมุมของการหันเหของเพลาทัง 2 แกนดังแสดงในรูปที่ 7.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

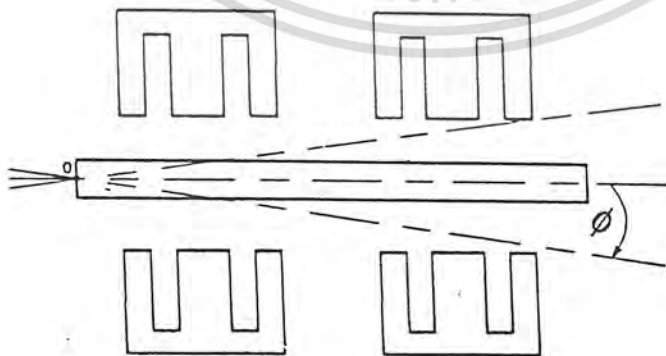
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.1 แสดงแกนอิสระของระบบ MRB 2 แกน คือ แกนมุม และมุม ϕ



รูปที่ 7.2 แสดงแกนอิสระของระบบ (แกน) โดยมองรูปที่ 1 จากด้าน A



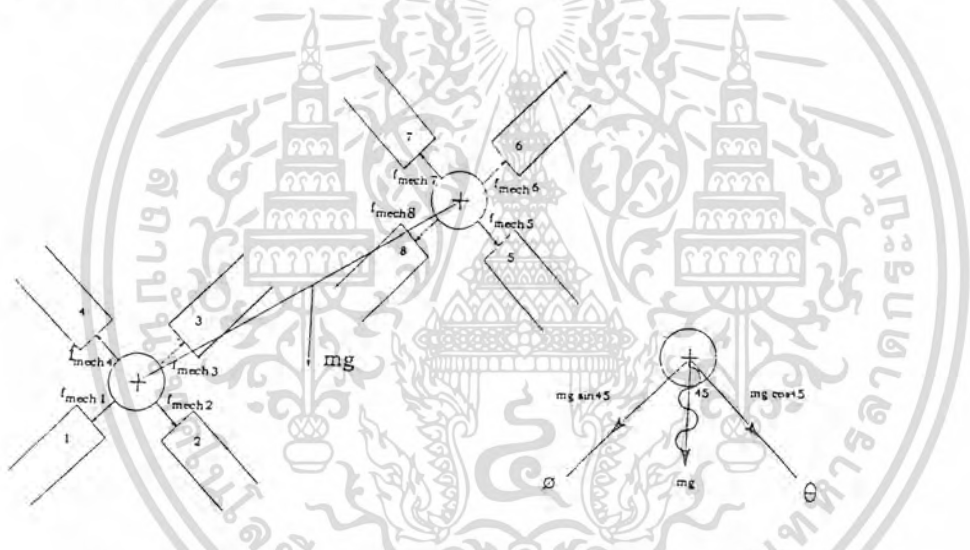
รูปที่ 7.3 แสดงแกนอิสระของระบบ (แกน ϕ) โดยมองรูปที่ 7.1 จากด้าน B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงนี้ **73** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

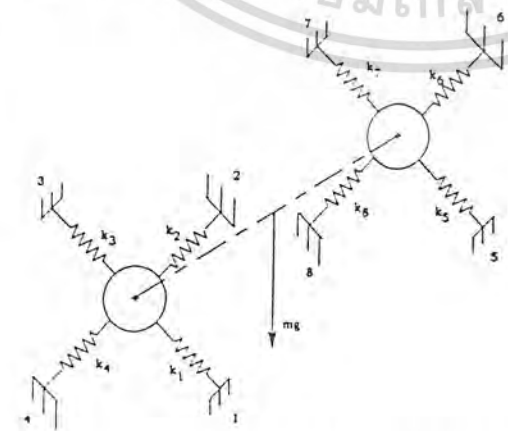
โดยที่จุด O (จุดหมุน) คือ จุดหมุนของเพลาสั่งต่อเข้ากับเพลาส่งกำลังของมอเตอร์โดยใช้ข้อต่ออ่อน

สำหรับระบบของเราซึ่งเป็น Free Vibration และมีแกนอิสระ (Degrees of Freedom) สองแกน เราจะสามารถสร้างแบบ Normal Mode Vibration โดยที่แบบจำลองการสั่นพื้นฐานของระบบอย่างง่ายโดยทั่วไป จะบ่งชี้การสั่นของระบบขึ้นแทนสถานะการสั่นของระบบจริง โดยสมมติให้การสั่นของระบบเป็น ประกอบด้วย มวล (Mass) , สปริงไร้น้ำหนัก (Massless spring) และ Damper อย่างไรก็ตามสำหรับการสั่นแบบ Free Vibration นั้นผลของตัว Damper ที่มีต่อพฤติกรรมของการสั่นของระบบจะน้อยมาก จนสามารถประมาณให้ตัดทิ้งได้

ด้วยเหตุที่กล่าวมาข้างต้น จึงสามารถกำหนดให้ระบบเป็น Normal mode vibration ซึ่งเป็นการสั่นแบบ Free Vibration ที่ไม่เกิดผลจากตัว Damper (Simple undamped spring-mass system) สามารถเขียนแบบจำลองการสั่น ได้ดังรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 ก แสดงสถานะการทำงานที่แท้จริงของระบบ MRB ที่ออกแบบ



รูปที่ 7.4 ข แสดงแบบจำลองการสั่น (spring-mass model) ของระบบ MRB

รูปที่ 7.4 แสดงการจำลองระบบ MRB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 74 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.4ก แสดงระบบ Magnetic Repulsion Bearing ที่ออกแบบไว้ ประกอบด้วยแกนเหล็ก 8 แกน วางตำแหน่งดังแสดงในรูป โดยแต่ละแกนจะส่งแรงผลัก(f_{mech}) ออกมากระทำต่อเพลลา เพื่อยกเพลลาให้ลอยขึ้น ซึ่งที่สภาวะสมดุล จะได้

$$f_{mech1} = f_{mech4} = f_{mech5} = f_{mech8}$$

และ $f_{mech2} = f_{mech3} = f_{mech6} = f_{mech7}$

โดยที่ $f_{mech2} < f_{mech1}$

mg คือ น้ำหนักเพลลา ซึ่งสามารถแตกแรงออกให้อยู่ในแนวแกนเหล็กได้ ดังรูป

รูปที่ 7.4ข แสดงแบบจำลองการสั่น โดยใช้แบบจำลองมวล-สปริง (spring-mass model)

แทนระบบจริงที่สภาวะสมดุล จะได้ว่า

$$(k_1 = k_4 = k_5 = k_8) > (k_2 = k_3 = k_6 = k_7)$$

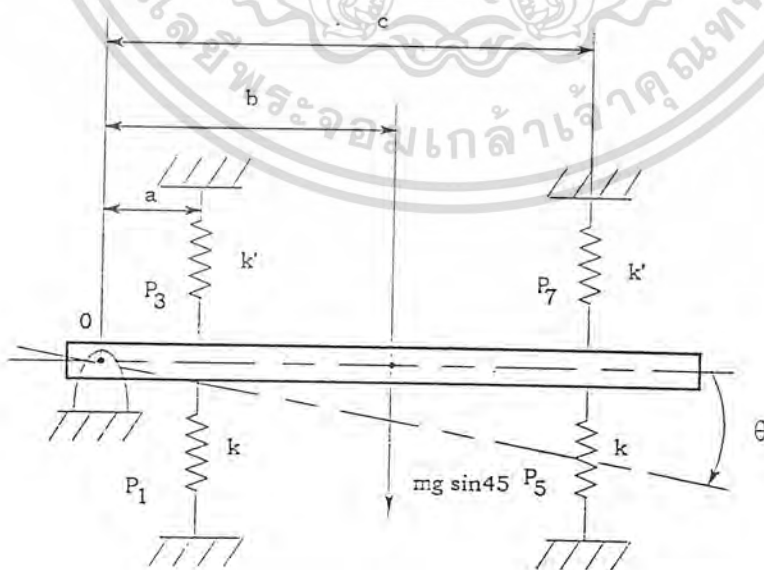
กำหนดให้ $k_1 = k_4 = k_5 = k_8 = k$

และ $k_2 = k_3 = k_6 = k_7 = k'$

โดยที่ $k > k'$

เราจะวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ และ พฤติกรรมการสั่นของระบบ โดยจะแยกพิจารณาสำหรับแกนอิสระแต่ละแกน ดังต่อไปนี้

พิจารณาแกนอิสระ (θ): สามารถเขียนแบบจำลองการสั่นในแกนอิสระ θ ได้ดังแสดงในรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 แสดงแบบจำลองการสั่นในแกนอิสระ, θ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 75 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7.5 จุด o ซึ่งเป็นจุดหมุนของเพลา จะเป็นจุดที่เพลาต่อกับเพลาขับโดยใช้ข้อต่ออ่อน ซึ่งจะทำให้เกิดการแกว่งในแนว θ ทั้งนี้เนื่องจาก ที่ได้เคยกล่าวมาแล้วว่าเราจะต้องป้อนกระแสเข้าขดลวดซึ่งพันอยู่รอบแกนเหล็กสายล่าง ให้มากกว่าแกนเหล็กสายบน เพราะฉะนั้น จะได้ว่า

$$k > k'$$

โดยกำหนดเงื่อนไขดังนี้

1. สปริงที่ใช้มีค่า (stiffness) เท่ากับ k และ k' ดังแสดงในรูป และไม่คิดน้ำหนักของสปริงทั้ง 4 ตัว
2. เพลาวางขนานกับแนวระดับที่ตำแหน่งสมดุลย์ของระบบ
3. ที่ตำแหน่งสมดุลย์ของเพลา (ขนานกับแนวระดับ) สปริงจะมีแรงเท่ากับ P_1, P_3, P_5, P_7 (แรงที่สปริงพยายามยึดตัวออกมาหลักเพลาทั้งหมด)

ภายใต้การหมุนของเพลาไปเป็นมุม θ ดังรูป จะได้

เขียนสมการโมเมนต์รอบจุด O ได้ดังนี้

$$\sum M_o = J_o \ddot{\theta}$$

$$\sum M_o = -(P_1 + ka\theta)a + (mg \sin 45^\circ)b - (P_5 + kc\theta)c + (P_3 - k'a\theta)a + (P_7 - k'c\theta)c$$

โดยที่ $-P_1 a - P_5 c + P_3 a + P_7 c + (mg \sin 45^\circ)b = 0$

ที่ตำแหน่งสมดุลย์ของเพลา (เพลาวางอยู่ในแนวระดับ) ด้วยเหตุนี้เราจึงสามารถพิจารณาเฉพาะ โมเมนต์ของแรงที่เกิดเนื่องจากกระยะขจัด θ นั่นคือ

$$\sum M_o = J_o \ddot{\theta} = -ka^2\theta - kc^2\theta - k'a^2\theta - k'c^2\theta$$

$$\sum M_o = J_o \ddot{\theta} = -(ka^2 + kc^2 + k'a^2 + k'c^2)\theta$$

สามารถเขียนสมการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$\ddot{\theta} + \left(\frac{ka^2 + kc^2 + k'a^2 + k'c^2}{J_o} \right) \theta = 0$$

โดยที่สภาวะการทำงานของชุดทดสอบ Magnetic Repulsion Bearing สภาวะหนึ่งๆ จะมีค่า k, k', a, c และ J_o คงที่ เพราะฉะนั้น

$$\frac{ka^2 + kc^2 + k'a^2 + k'c^2}{J_o} = \text{ค่าคงที่}$$

แทนด้วยค่า A จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ $\ddot{\theta} + A\theta = 0$ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ **76** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสภาวะการทำงานหนึ่ง ๆ สามารถคำนวณค่า A ได้ดังนี้

$$J_o = \text{moment of inertia} = \pi r^4$$

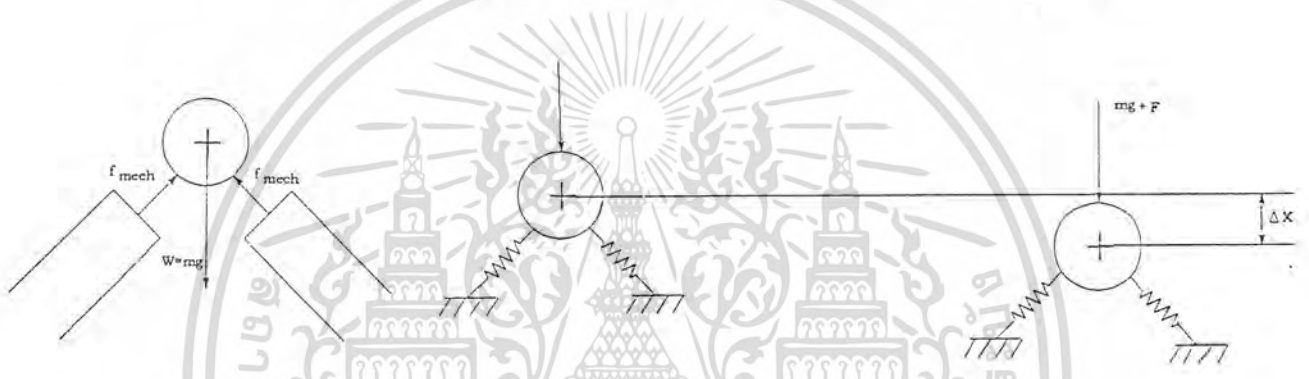
r = เส้นผ่าศูนย์กลางของเพลลา

a, c = ระยะตามแนวแกนเพลลา ดังแสดงในรูปที่ 7.5

สำหรับค่า k, k' คือ ค่า stiffness ของแรงแม่เหล็ก ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยใช้การ

ทดลอง โดยจะแสดงวิธีการทดลองหาค่า k ดังต่อไปนี้ (รายละเอียดในการทดลองหาค่า k จะกล่าวถึงในผลทดลอง พร้อมทั้งแสดงผล)

หลักการในการทดลองหาค่า k, k' เราจะแยกค่า k และ k' ทีละค่า ดังแสดงในรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.6 แสดงการทดลองหาค่า k

โดยที่ F = แรงกด (นิวตัน)

Δx = ระยะที่เพลลาเคลื่อนที่ลง (เมตร)

จากการกระจายแรง (F) และ ระยะขจัด (Δx) ออกตามแกนของสปริงจะได้

$$k = \frac{F \cos^2 45}{\Delta x}$$

โดยที่ค่า k ของแรงแม่เหล็ก จะขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่จ่ายเข้าขดลวดซึ่งพันอยู่รอบแกนเหล็กอ่อน ถ้าเราเพิ่มค่ากระแสจะทำให้ค่า k เพิ่มขึ้น และ ถ้าวัดค่ากระแสลง ก็จะทำให้ค่า k ของแรงแม่เหล็กลดลงด้วย

สมการที่ (7-1) เป็นสมการการเคลื่อนที่ของระบบ Magnetic Repulsion Bearing โดยที่ไม่มีผลของแรงจากภายนอกมากระทำต่อระบบ ดังจะเห็นได้ว่า ด้านขวาของสมการจะมีค่าเป็นศูนย์ ในกรณีที่มีแรงภายนอกมากระทำต่อระบบ ด้านขวาของสมการจะต้องเป็นฟังก์ชันของแรงภายนอกที่มากระทำ

สำหรับชุดทดลองที่ออกแบบจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ต้นกำลัง ซึ่งจะส่งถ่ายกำลังผ่านข้อต่ออ่อนมาเข้าเพลลา ดังนั้นจะเห็นว่า แรงภายนอกที่มากระทำต่อเพลลา ก็คือแรงบิด(Torque) ของมอเตอร์นั่นเอง

เราสามารถเขียนสมการเคลื่อนที่ได้เป็น

$$\ddot{\theta} + \left(\frac{ka^2 + kc^2 + k'a^2 + k'c^2}{J_0} \right) \theta = T(t) \quad (7-2)$$

โดยที่ $T(t)$ คือฟังก์ชันของแรงบิดที่เวลาใด
การศึกษาในที่นี้จะกำหนดให้ $T(t)$ เป็นค่าคงที่ ซึ่ง

$$P = Tw$$

โดยที่ P คือกำลังงาน(Power)ที่จ่ายออกจากมอเตอร์

w คือความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งกำหนดให้มีค่าคงที่ที่สภาวะการทำงานหนึ่งๆ

T คือแรงบิด(Torque)

จากสมการการเคลื่อนที่ของระบบซึ่งมีแรงบิดภายนอกจากมอเตอร์มากระทำ(สมการที่ 7-2) เราจะสามารถนำไปหาเสถียรภาพของระบบที่ออกแบบได้ว่า มีเสถียรภาพหรือไม่ และจากสมการการเคลื่อนที่ดังกล่าว เรายังสามารถใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบต่อแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งวิธีที่จะใช้หาเสถียรภาพและผลตอบสนองของระบบนั้น สามารถใช้การวิเคราะห์ได้หลายลักษณะ ซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสม

สำหรับการวิเคราะห์ในส่วนต่อไปนี้จะใช้การแปลงลาปลาซ(Laplace Transform) สมการการเคลื่อนที่(สมการ7-2)ให้อยู่ในรูปของลาปลาซแล้วนำไปหา Transfer Function เมื่อได้ Transfer Function ของระบบแล้ว เราสามารถทำการศึกษาผลตอบสนองของระบบในรูปแบบต่าง ๆ ได้ โดยการใช้โปรแกรมแสดงผลการตอบสนอง ริงเป็นโปรแกรมประยุกต์ที่สามารถใช้งานได้ง่าย

โดยจะแสดงขั้นตอนในการหาผลตอบสนองของระบบ โดยการวิเคราะห์จาก Transfer Function ดังนี้

จากสมการการเคลื่อนที่

$$\ddot{\theta} + A\theta = T(t)$$

โดยที่

$$A = \left(\frac{ka^2 + kc^2 + k'a^2 + k'c^2}{J_0} \right) \theta \quad (7-3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ J_0 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ **78** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้การแปลงลาปลาซจะได้

$$\begin{aligned} (S^2\theta_{(s)} - S\theta_{(0)} - \dot{\theta}_{(0)}) + A\theta_{(s)} &= T_{(s)} \\ \theta_{(s)} &= \frac{T_{(s)}}{(S^2 + A)} + \frac{S\theta_{(0)} + \dot{\theta}_{(0)}}{(S^2 + A)} \end{aligned} \quad (7-4)$$

ผลตอบสนอง $\theta(t)$ สามารถหาได้จากการ inverse laplace สมการ (7-4) โดยที่เทอมแรก ทางด้านขวามือของสมการ จะแทนสภาวะ forced vibration และเทอมที่สองจะแสดงผลตอบสนอง ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขสภาวะเริ่มต้น

โดยสำหรับระบบ Magnetic Repulsion Bearing ที่เรากำลังพิจารณา จะมีเงื่อนไขสภาวะ เริ่มต้น คือ

$$\dot{\theta}_{(0)} = 0$$

$$\theta_{(0)} = 0$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$\theta_{(s)} = \frac{T_{(s)}}{(S^2 + A)}$$

จะได้ว่า impedance transform คือ

$$Z(s) = \frac{T(s)}{\theta(s)} = S^2 + A$$

และ admittance transform ซึ่งคือส่วนกลับของ impedance transform คือ

$$H(s) = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{(s^2 + A)}$$

สามารถเขียน block diagram ได้ดังรูปที่ 1 โดยที่ transform function ของระบบก็คือ admittance transform $H(s)$ นั้นเอง

$$\text{Input } T(s) \rightarrow \boxed{H(s)} \rightarrow \text{Output } \theta(s)$$

รูปที่ 7.7 แสดง block diagram ของระบบ

ซึ่งเมื่อเราทราบค่า transfer function $H(s)$ เราจะสามารถนำไปวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบได้ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป plot กราฟ แสดงผลตอบสนองออกมา

บทที่ 8

การทดลองตรวจสอบการทำงานชุด MRB

เนื้อหาที่จะกล่าวถึงในบทนี้ จะเป็นการนำเอาชุดทดลอง MRB ที่ได้ทำการศึกษามาออกแบบไว้มาทดลองตรวจสอบการทำงานเพื่อที่จะสามารถนำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อใช้ปรับปรุงและพัฒนารูปแบบของ MRB ต่อไป เราจะวางขอบเขตการทดลองโดยกำหนดจุดประสงค์ของการทดลองไว้ดังนี้

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อตรวจสอบการทำงานของชุดทดลอง MRB ที่ได้ออกแบบขึ้นมาว่ามีปัญหาและข้อบกพร่องในการทำงานหรือไม่ สามารถทำงานได้ในระดับที่น่าพอใจ หรือ ต้องมีการปรับปรุงรูปแบบของ MRB ใหม่

2. เพื่อทดลองปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ สามารถปรับค่าได้ เพื่อให้เพลากลูกกลิ้งอยู่ในตำแหน่งสมดุลย์ และ เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสถานะสมดุลย์ของเพลานะหุคหนึ่ง

3. เพื่อศึกษาว่า ความเร็วของเพลามีผลต่อการทำงานของชุดทดลอง MRB อย่างไร

เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. ชุด MRB
2. มอเตอร์
3. ข้อต่ออ่อน
4. อุปกรณ์วัดระยะเบี่ยงเบนของเพล่า (Dial guage)
5. อุปกรณ์จ่ายกระแสตรง (DC. Power Supply)

การทดลอง

- จัดวางชุดทดลอง MRB ที่ทำการออกแบบไว้เรียบร้อยแล้ว
- ติดชุดทดลอง MRB ให้อยู่ในแนวเดียวกัน (จุดศูนย์กลางของชุด MRB ทั้งหมดวางในแนวเดียวกัน)
- ต่ออุปกรณ์จ่ายกระแสตรง (DC. Power Supply) เข้าขลวดแกนเหล็กทั้งหมดให้เรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ **80** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจัดวางชุดทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้วเราจะทำการทดลองตรวจสอบการทำงานของชุด MRB โดยจะทำการทดลองเป็นช่วง ๆ ดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1 จะเป็นการทดลองปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สามารถปรับค่าได้เพื่อหาจุดสมดุลของเพลาในขณะที่เพลาหยุดนิ่งตามขั้นตอนดังนี้

1) ปรับระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและแม่เหล็กถาวร โดยเริ่มปรับจากระยะห่างที่มีค่าน้อยที่สุด

2) ปรับค่ากระแสที่จ่ายเข้าขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กในสายล่างโดยเพิ่มค่ากระแสอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเพลาถูกยกขึ้นอยู่ในตำแหน่งสมดุล (แกนเพลาวางอยู่ในแนวระดับ) เมื่อได้ตำแหน่งที่สมดุลแล้ว เราจะเริ่มปรับค่าความเร็วรอบของเพลาเพิ่มขึ้นทีละนิก แล้วสังเกตการแกว่งของเพลาแล้วทำการบันทึกผล เสร็จแล้วลดความเร็วรอบของเพลาลงจนหยุดนิ่ง

3) ปรับค่ากระแสที่จ่ายเข้าขดลวดสายล่าง ให้เพิ่มขึ้นเป็นขั้น ๆ ซึ่งจะทำให้เพลาถูกยกสูงขึ้นสูงกว่าตำแหน่งสมดุล แล้วทำการปรับค่ากระแสที่จ่ายเข้าขดลวดสายบนอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเพลาถูกกดต่ำลงจนถึงจุดสมดุล เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 2 เมื่อได้ตำแหน่งสมดุลแล้ว ก็ให้เริ่มปรับค่าความเร็วรอบของเพลา สังเกตและบันทึกผล แล้วลดความเร็วรอบลงจนกระทั่งเพลาหยุดนิ่ง

4) ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 3 ซ้ำโดยเพิ่มกระแสที่จ่ายเข้าขดลวดสายล่างเป็นขั้น ๆ จนกระทั่งกระแสที่จ่ายเข้าขดลวดสายล่างถูกเพิ่มขึ้นจนถึงพิกัดกระแสที่ขดลวดสามารถรับได้

ผลการทดลองช่วงที่ 1

ระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและแม่เหล็ก (mm)	กระแสที่จ่ายเข้าขดลวดแกนเหล็ก(Amp)		การแกว่งของเพลา
	สายล่าง	สายบน	
5	5.5	0	ไม่เสถียร
	6.0	3.50	ไม่เสถียร
	6.5	4.25	ไม่เสถียร
	7.0	5.25	ไม่เสถียร
	7.5	6.50	ไม่เสถียร
	8.0	7.00	ไม่เสถียร
15	7.0	0	ไม่เสถียร
	7.5	4.50	ไม่เสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและแม่เหล็ก (mm)	กระแสที่จ่ายเข้าขดลวดแกนเหล็ก(Amp)		การแกว่งของเพลา
	สายล่าง	สายบน	
25	8.0	5.75	ไม่เสถียร
	9.0	4.25	ไม่เสถียร
	9.5	4.75	ไม่เสถียร
	10.0	5.00	ไม่เสถียร

หมายเหตุ การทดลองช่วงที่ 1 ผลที่ได้จากการสังเกตการแกว่งของเพลาจะเห็นว่าการแกว่งของเพลาไม่เสถียรในทุกกรณีซึ่งจะทำให้เราไม่สามารถวิเคราะห์การทำงานของระบบ MRB ได้ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องทำการทดลองเพื่อตรวจสอบการทำงานต่อไปอีกในช่วงที่ 2

การทดลองช่วงที่ 2 ทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

- 1) ปรับระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและแม่เหล็กถาวร โดยเริ่มปรับจากระยะห่างที่มีค่าน้อยที่สุด
- 2) เพิ่มกระแสเข้าขดลวดแกนเหล็กสายล่างอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเพลาถูกยกให้ลอยขึ้น เราจะเริ่มทำการหมุนเพลา แล้วทำการปรับเพิ่มกระแสสายล่างขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่าที่คิดว่าขดลวดจะสามารถทนได้ สังเกตการแกว่งของเพลาตลอดระยะเวลาที่ทำการปรับกระแส
- 3) ปรับระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและ แม่เหล็กถาวรเพิ่มขึ้นอีกแล้วทำการทดลองข้อที่ 2 ซ้ำ

ผลการทดลองช่วงที่ 2

ระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและแม่เหล็ก (mm)	กระแสที่จ่ายเข้าขดลวดแกนเหล็ก(Amp)	การแกว่งของเพลา
5	3.5	ไม่เสถียร
	4.5	ไม่เสถียร
	5.5	ไม่เสถียร
	6.5	ไม่เสถียร
	7.5	ไม่เสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและแม่เหล็ก (mm)	กระแสที่จ่ายเข้าขดลวดแกนเหล็ก(Amp)	การแกว่งของเพลลา
15	5.5	ไม่เสถียร
	6.5	ไม่เสถียร
	7.5	ไม่เสถียร
25	8.0	ไม่เสถียร
	9.0	ไม่เสถียร

การทดลองช่วงที่ 3

- 1) ปรับระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและแม่เหล็กถาวร โดยเริ่มปรับจากระยะห่างที่มีค่าน้อยที่สุด (5 mm)
- 2) ปรับกระแสที่จ่ายเข้าขดลวดแกนเหล็กในสายล่างเพิ่มขึ้นทีละนิกโดยอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเพลลาถูกยกลอยขึ้น
- 3) หมุนเพลลาแล้วสังเกตดู การแกว่งของเพลลา
- 4) ค่อย ๆ เพิ่มกระแสที่จ่ายเข้าขดลวดแกนเหล็กในสายบน พยายามปรับกระแสที่จ่ายเข้าสายบน จนการหมุนของเพลลาเสถียร
- 5) บันทึกผลค่ากระแสที่จ่ายเข้าขดลวดสายบนและสายล่าง (โดยสนใจเฉพาะค่าที่ ทำให้การหมุนของเพลลาเสถียร)
- 6) ทำการทดลองข้อ 2, 3, 4 และ 5 ซ้ำ โดยเพิ่มกระแสที่จ่ายให้ขดลวดสายล่างทีละ 0.5 Amps
- 7) ปรับระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและแม่เหล็กถาวร เพิ่มขึ้นเป็น 15 และ 25 mm ตามลำดับ แล้วทำการทดลองซ้ำแบบเดิม

ผลการทดลองช่วงที่ 8

ระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและแม่เหล็ก (mm)	กระแสที่จ่ายเข้าขดลวดแกนเหล็ก(Amp)		การแกว่งของเพลา
	สายล่าง	สายบน	
5	7	6	เสถียร
15	8	5	เสถียร
25*	-	-	-

ที่ระยะห่าง 25 mm ไม่สามารถทำการบันทึกผลได้เนื่องจาก กระแสเกินพิกัดที่ขดลวดสามารถรับได้



สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1) การทำงานของชุด แบริ่งแม่เหล็ก จำเป็นจะต้องมีการจ่ายกระแสเข้าขดลวดสายล่าง เพื่อทำให้เกิดแรงแม่เหล็กยกเพลลาให้ลอยขึ้นได้ โดยที่ขณะที่เพลลาหยุดนิ่ง การจ่ายกระแสเพียงแค่ว่าสายล่างก็เพียงพอที่จะทำให้เพลลาถูกยกขึ้นได้อย่างสมดุลย์ แต่เมื่อเพลลาเริ่มหมุนเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการแกว่งของเพลลา ซึ่งการจ่ายเพียงแค่กระแสสายล่างไม่สามารถควบคุมเพลลาให้เข้าสู่สถานะเสถียรได้ จำเป็นต้องมีการจ่ายกระแสในขดสายบน เพื่อเป็นการควบคุมให้เพลลาวิ่งเข้าสู่สถานะเสถียร (ไม่มีแกว่ง) ได้

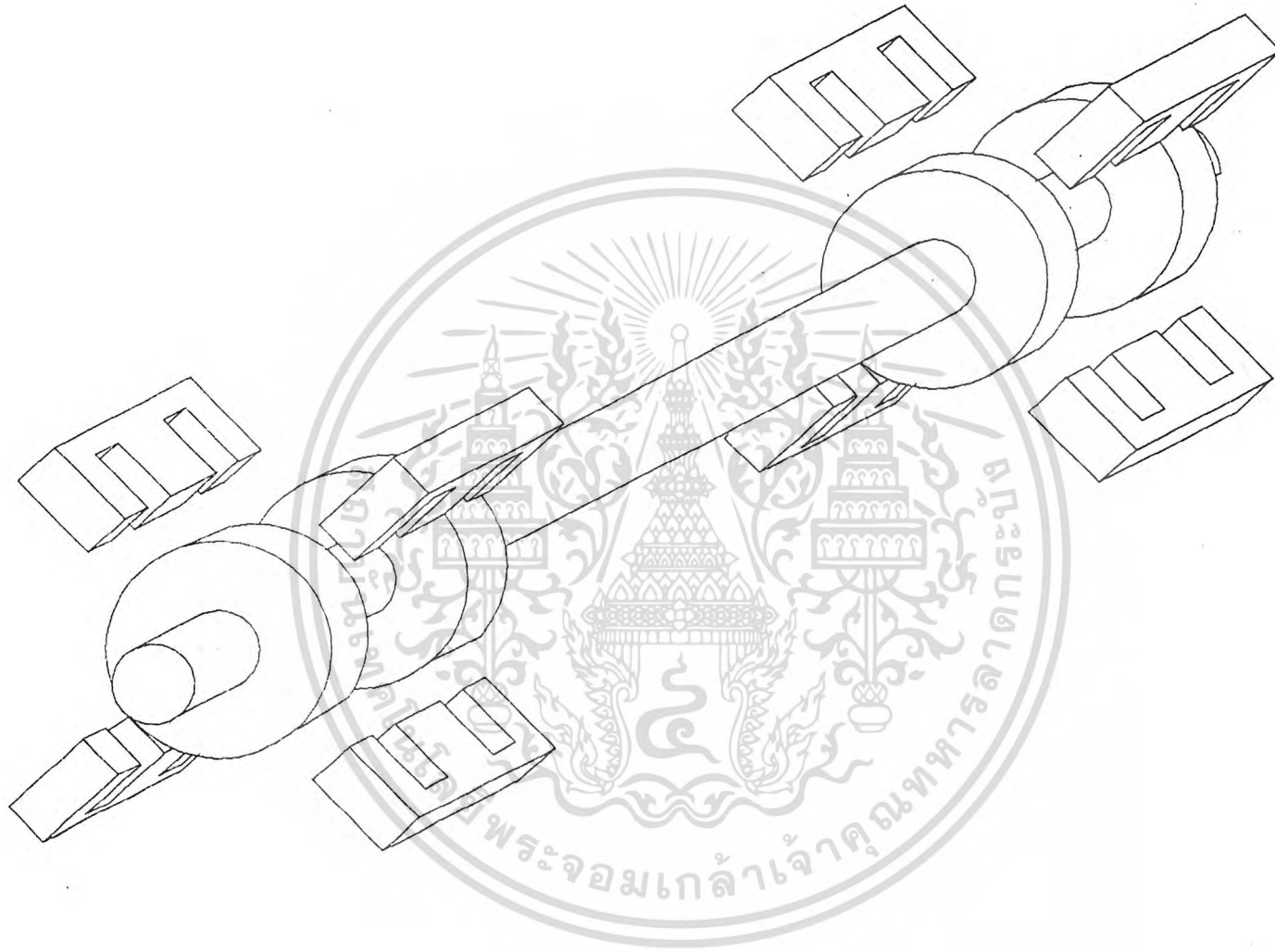
2) เมื่อทำการปรับค่าตัวแปรต่างๆ ให้เพลลาถูกยกลอยอยู่ที่ตำแหน่งสมดุลย์กลางแบริ่ง โดยที่เพลลายังไม่เกิดการหมุน แต่เมื่อมีการหมุนของเพลลาเกิดขึ้น ไม่จำเป็นว่าเพลลาจะค้างหมุนอยู่ในสถานะเสถียรได้ เนื่องจากเมื่อเพลลาเริ่มหมุน จะถูกกระตุ้นด้วยแรงบิดเริ่มแรกของเพลลา ทำให้เพลลาเกิดการแกว่ง ซึ่งถ้าระบบไม่สามารถควบคุมให้เข้าสู่สถานะเสถียรได้ เพลลาจะแกว่งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไม่สามารถทำงานได้

3) สำหรับระยะห่างระหว่างแกนเหล็กและแม่เหล็กที่ปรับไว้ค่าหนึ่งๆ จะมีค่ากระแสที่จ่ายขดสายบนและสายล่าง เพียงชุดเดียวเท่านั้น ที่จะทำให้การหมุนของเพลลาอยู่ในสถานะเสถียรได้

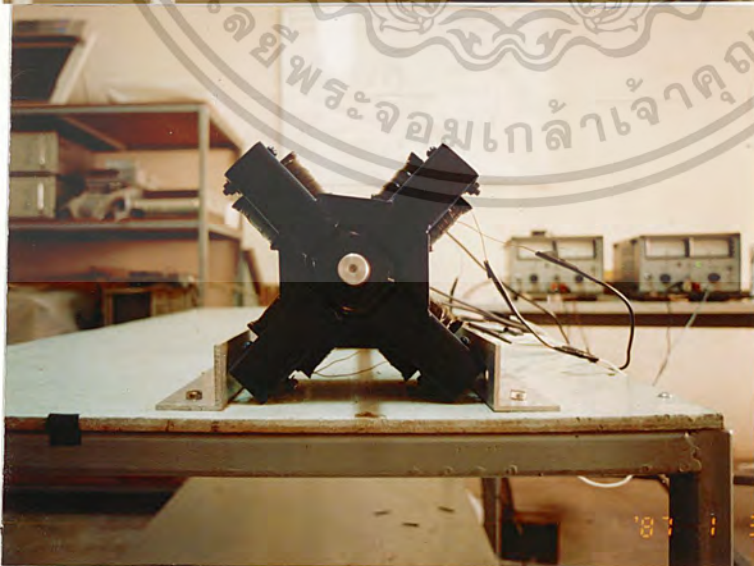
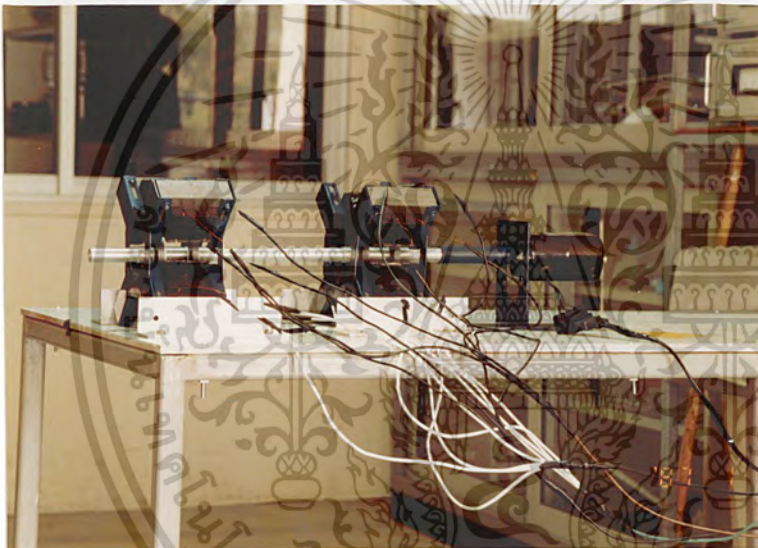
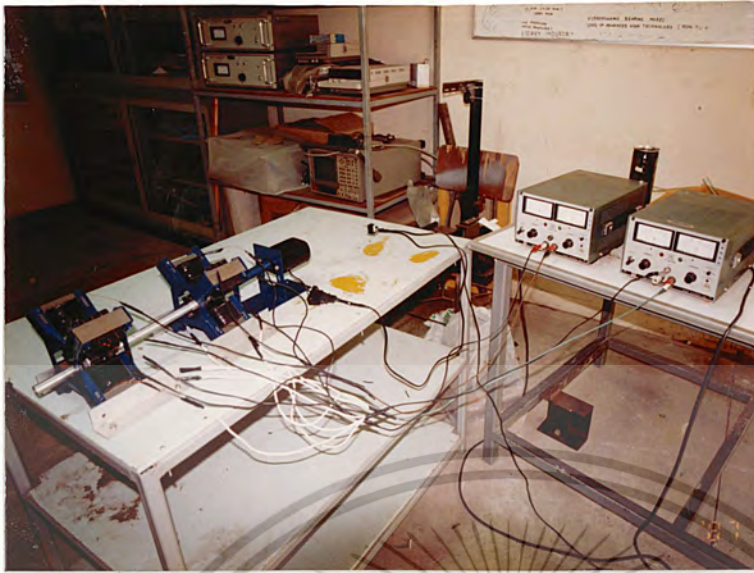
4) ผลตอบสนองต่อการแกว่งของเพลลาที่วิ่งเข้าสู่สถานะเสถียรค่อนข้างช้า เนื่องจากใช้การควบคุมให้เพลลาเสถียรได้ โดยคุณสมบัติของระบบเพียงอย่างเดียว ไม่มีการใช้อุปกรณ์ควบคุมระบบ เช่นตัวsensor ตัวแปลงสัญญาณแต่อย่างใด

5) ที่สถานะการหมุนอย่างเสถียร เมื่อมีการเพิ่มความเร็วยิ่งขึ้น จะทำให้การหมุนของเพลลาไม่เสถียรมากขึ้น และจะเริ่มแกว่งที่ค่าความเร็วรอบสูงๆ

6) การปรับค่าตัวแปรต่างๆ ในการทดลองค่อนข้างหยาบ เนื่องจากชุดทดลองและอุปกรณ์ทดลองจนเครื่องวัดที่ใช้ ไม่สามารถให้ค่าที่ละเอียดอย่างพอเพียง ทำให้สามารถบันทึกผลได้น้อย การวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการทำงานของระบบทำได้ยาก



รูปที่ 8.1 แสดงแบบ 3 มิติของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า (MRB)



รูปที่ 8.2 แสดงภาพถ่ายชุดทดลองเบร็กรั้งแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิติกรรมประกาศ

การศึกษาโครงการพิเศษเรื่องแม่เหล็กแรงผลัก (Magnetic Repulsion Bearing) ได้รับความสำเร็จล่วงหน้า เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ ทั้งด้านข้อมูลและเครื่องมือจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ จึงใคร่ขออนุญาตนำชื่อของบุคคลและหน่วยงานที่มีพระคุณดังกล่าว อ้างอิงด้วยความขอบคุณเป็นอย่างยิ่งในที่นี้

- ผศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา กรุณาให้กำลังใจ, คำปรึกษาและข้อมูล

- อ.จำลอง ปรามแก้ว กรุณาให้คำปรึกษา

- คุณชลิดา อานันท์นิตย์ กรรมการผู้จัดการบริษัท ICELANDIC CO,LTD

กรุณาให้คำปรึกษาข้อมูลสำหรับแม่เหล็กถาวรชนิดต่าง ๆ

- บริษัท ICELANDIC CO,LTD ช่วยเหลือด้านอุปกรณ์แม่เหล็ก

- คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ นับแต่อดีตจนปัจจุบัน

และขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้คำปรึกษา, ข้อมูล และ กำลังใจอันเป็นประโยชน์
อย่างยิ่งในความสำเร็จของโครงการพิเศษนี้

นาย ธนา เคี้ยววนิชย์

นาย พรเทพ สิริเฉลิมพงศ์

นาย วิทยา ฉัตรรัตนกุลชัย

นางสาว ศศิกร อารีธรรมศิริกุล

คณะผู้จัดทำ

บรรณานุกรม

1. ดร.วริทธิ์ อึ้งภากรณ์, ชาญณรงค์งาน "การออกแบบเครื่องจักร" ซีเอ็ด
2. ศจ. ดร. พงศ์ศักดิ์ วรสุนทรโรสด, "เครื่องจักรไฟฟ้า 1"
3. A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Stephen D. Umans "Electric Machinery" Mc Graw Hill International Edition.
4. William W. Seto "Mechanical Vibration" Mc Graw Hill International Edition.
5. William T. Thomson "Theory of Vibration with applications" Prentice-Hall International Editions.
6. Edward A. Knoth, John P. Barber "Magnetic Repulsion Bearing For Turbine Engines" IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 24, No. 6, November 1988
7. Alan R. Millner, Lexington, Mass. "Magnetic Bearing" , United States Patent, May 19, 1981
8. Rainer Sindlinger, Hirschberg; Josef Hammer, Rotenberg, both of Fed. Rep. of Germany , "Magnetic Bearing Assembly", United States Patent, Oct. 13, 1981
9. Heinz Wehde, Rothenberg, Fed. Rep. of Germany, "Magnetic bearing Arrangement", United States Patent, Jul. 20, 1982
10. Fumio Matsumura, Takeshi Yoshimoto, "System Modeling And Control Design of a Horizontal-Shaft Magnetic-Bearing System", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 22, No. 3, May 1988



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1. ตารางเทียบขนาดลวด

SWG	Nominal copper dia. (d)		d ⁴	Fine covering			Medium covering			
				Nominal overall dia. (d _o)	S ₁ = 1.26d _o - 1.15d	S ₂ = d _o - 1.15d	Nominal overall dia. (d _o)	S ₁ = 1.26d _o - 1.15d	S ₂ = d _o - 1.15d	
	in	mm	mm ⁴	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
50*	0.001 0	0.025 4	4.16 × 10 ⁻⁷	0.030 99*	0.009 83	0.001 78				
49*	0.001 2	0.030 5	8.63 × 10 ⁻⁷	0.036 32*	0.010 7	0.001 27				
48*	0.001 6	0.040 6	2.73 × 10 ⁻⁶	0.046 86*	0.012 3	0.000 127				
47	0.002 0	0.050 8	6.66 × 10 ⁻⁶	0.057 40	0.013 9	-0.001 02	0.061 21	0.018 7	0.002 80	
46	0.002 4	0.061 0	1.38 × 10 ⁻⁵	0.069 47	0.017 4	-0.000 635	0.073 91	0.023 0	0.003 81	
45	0.002 8	0.071 1	2.56 × 10 ⁻⁵	0.080 14	0.019 2	-0.001 65	0.086 49	0.027 2	0.004 70	
44	0.003 2	0.081 3	4.36 × 10 ⁻⁵	0.091 57	0.021 9	-0.001 91	0.109 5	0.033 1	0.006 99	
43	0.003 6	0.091 4	6.99 × 10 ⁻⁵	0.101 6	0.022 9	-0.003 56	0.110 5	0.034 0	0.005 33	
42	0.004 0	0.102	1.07 × 10 ⁻⁴	0.114 3	0.027 2	-0.002 54	0.123 2	0.038 4	0.006 35	
41	0.004 4	0.112	1.56 × 10 ⁻⁴	0.125 7	0.029 9	-0.002 79	0.135 9	0.042 7	0.007 37	
40	0.004 8	0.122	2.21 × 10 ⁻⁴	0.135 9	0.031 0	-0.004 32	0.147 3	0.045 4	0.007 11	
39	0.005 2	0.132	3.04 × 10 ⁻⁴	0.148 6	0.035 3	-0.003 30	0.160 0	0.049 7	0.008 13	
38	0.006 0	0.152	5.39 × 10 ⁻⁴	0.168 9	0.037 6	-0.006 35	0.180 3	0.052 0	0.005 08	
37	0.006 8	0.173	8.90 × 10 ⁻⁴	0.194 3	0.046 2	-0.004 31	0.205 7	0.060 6	0.007 11	
36	0.007 6	0.193	1.39 × 10 ⁻³	0.214 6	0.048 4	-0.007 37	0.227 3	0.064 4	0.005 33	
35	0.008 4	0.213	2.07 × 10 ⁻³	0.236 2	0.052 3	-0.009 14	0.250 2	0.069 9	0.004 83	
34	0.009 2	0.234	2.98 × 10 ⁻³	0.256 5	0.054 5	-0.012 2	0.271 8	0.073 7	0.003 05	
33	0.010 0	0.254	4.16 × 10 ⁻³	0.279 4	0.060 0	-0.012 7	0.294 6	0.079 2	0.002 54	
32	0.010 8	0.274	5.66 × 10 ⁻³	0.301 0	0.063 8	-0.014 5	0.316 2	0.083 0	0.000 76	
31	0.011 6	0.295	7.54 × 10 ⁻³	0.321 3	0.066 0	-0.017 5	0.336 6	0.085 2	-0.002 29	
30	0.012 4	0.315	9.84 × 10 ⁻³	0.344 2	0.071 5	-0.018 0	0.360 7	0.092 3	-0.001 52	
29	0.013 6	0.345	1.42 × 10 ⁻²	0.377 2	0.078 0	-0.020 1	0.393 7	0.098 8	-0.003 56	
28	0.014 8	0.376	2.00 × 10 ⁻²	0.407 7	0.081 4	-0.024 6	0.424 2	0.102	-0.008 13	
27	0.016 4	0.417	3.01 × 10 ⁻²	0.450 9	0.089 0	-0.028 2	0.468 6	0.111	-0.010 4	
26	0.018 0	0.457	4.37 × 10 ⁻²	0.492 8	0.095 1	-0.033 0	0.511 8	0.119	-0.014 0	
25	0.020	0.508	6.66 × 10 ⁻²	0.546 1	0.104	-0.038 1	0.565 2	0.128	-0.019 1	
24	0.022	0.559	9.75 × 10 ⁻²	0.596 9	0.109	-0.045 7	0.617 2	0.135	-0.025 4	
23	0.024	0.610	1.38 × 10 ⁻¹	0.649 0	0.117	-0.052 1	0.670 6	0.144	-0.030 5	
22	0.028	0.711	2.56 × 10 ⁻¹	0.753 1	0.131	-0.064 8	0.774 7	0.158	-0.043 2	
21	0.032	0.813	4.36 × 10 ⁻¹	0.857 3	0.145	-0.077 5	0.878 8	0.173	-0.055 9	
20	0.036	0.914	6.99 × 10 ⁻¹	0.960 1	0.158	-0.091 4	0.984	0.189	-0.067 3	
19	0.040	1.02	1.07	1.064	0.173	-0.104	1.088	0.203	-0.080 0	
18	0.048	1.22	2.21	1.270	0.198	-0.132	1.294	0.229	-0.108	
17	0.056	1.42	4.09	1.476	0.224	-0.160	1.501	0.256	-0.135	
16	0.064	1.63	6.98	1.680	0.248	-0.189	1.707	0.281	-0.163	
15	0.072	1.83	11.2	1.885	0.272	-0.218	1.913	0.307	-0.191	
14	0.080	2.03	17.0	2.090	0.297	-0.246	2.118	0.333	-0.218	
13	0.092	2.34	29.8	2.398	0.334	-0.290	2.427	0.371	-0.260	
12	0.104	2.64	48.7	2.705	0.371	-0.333	2.734	0.407	-0.304	
11	0.116	2.95	75.4	3.012	0.407	-0.376	3.042	0.444	-0.347	
10	0.128	3.25	112	3.320	0.444	-0.419	3.349	0.481	-0.390	

*First three rows refer to oleo enamel wire to BS 156:1951 - normal covering, as these gauges are not included in BS 1844: 1952

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2. แสดงชื่อและหน่วยของปริมาณทางไฟฟ้าและแม่เหล็กในระบบ SI

Names and units of the electric and magnetic quantities in the International System (in the order they appear in the text)

Symbol	Name	Unit	Abbreviation
v	Velocity	meter/second	m/s
F	Force	newton	N
Q	Charge	coulomb	C
r, R	Distance	meter	m
ϵ_0, ϵ	Permittivity	farad/meter	F/m
E	Electric field intensity	volt/meter	V/m
ρ_v	Volume charge density	coulomb/meter ³	C/m ³
v	Volume	meter ³	m ³
ρ_L	Linear charge density	coulomb/meter	C/m
ρ_S	Surface charge density	coulomb/meter ²	C/m ²
Ψ	Electric flux	coulomb	C
D	Electric flux density	coulomb/meter ²	C/m ²
S	Area	meter ²	m ²
W	Work, energy	joule	J
L	Length	meter	m
V	Potential	volt	V
p	Dipole moment	coulomb-meter	C·m
I	Current	ampere	A
J	Current density	ampere/meter ²	A/m ²
μ_v, μ_h	Mobility	meter ² /volt-second	m ² /V·s
e	Electronic charge	coulomb	C
σ	Conductivity	mho/meter	Ω/m
R	Resistance	ohm	Ω
P	Polarization	coulomb/meter ²	C/m ²
$\chi_{e,m}$	Susceptibility		
C	Capacitance	farad	F
R_s	Sheet resistance	ohm per square	Ω
H	Magnetic field intensity	ampere/meter	A/m
K	Surface current density	ampere/meter	A/m
B	Magnetic flux density	tesla (or weber/meter ²)	T (or Wb/m ²)
μ_0, μ	Permeability	henry-meter	H/m
Φ	Magnetic flux	weber	Wb
V_m	Magnetic scalar potential	ampere	A
A	Vector magnetic potential	weber meter	Wb/m
T	Torque	newton-meter	N·m
m	Magnetic moment	ampere-meter ²	A·m ²
M	Magnetization	ampere/meter	A/m
\mathcal{R}	Reluctance	ampere-turn/weber	A-t/Wb
L	Inductance	henry	H
M	Mutual inductance	henry	H
ω	Radian frequency	radian/second	rad/s
c	Velocity of light	meter/second	m/s
λ	Wavelength	meter	m
η	Intrinsic impedance	ohm	Ω
γ	Propagation constant	complex neper/meter	m ⁻¹
α	Attenuation constant	neper meter	Np/m
β	Phase constant	radian/meter	rad/m
f	Frequency	hertz	Hz
\mathcal{S}	Poynting vector	watt meter ²	W/m ²
P	Power	watt	W
δ	Skin depth	meter	m
Γ	Reflection coefficient		
s	Standing-wave ratio		
G	Conductance	mho	Ω
Z	Impedance	ohm	Ω
Y	Admittance	mho	Ω
Q	Quality factor		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3. แสดงค่าความซึมซาบของสารต่าง ๆ

Material	μ_R
Bismuth	0.999 998 6
Paraffin	0.999 999 42
Wood	0.999 999 5
Silver	0.999 999 81
Aluminum	1.000 000 65
Beryllium	1.000 000 79
Nickel chloride	1.000 04
Manganese sulfate	1.000 1
Nickel	50
Cast iron	60
Cobalt	60
Powdered iron	100
Machine steel	300
Ferrite (typical)	1000
Permalloy 45	2500
Transformer iron	3000
Silicon iron	3500
Iron (pure)	4000
Mumetal	20 000
Sendust	30 000
Supermalloy	100 000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้