

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสืบสวนหาความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
Investigating Losses in the Stator Core of Induction Motor



ฉพ.
ม 999 ก
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **81803**
วันเดือนปี..... **24 ส.ย. 2551**

b. **119 3b3a3**
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

การสืบสวนหาความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
Investigating Losses in the Stator Core of Induction Motor



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิเชิต ล้ายอง
อ.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสืบสวนหาความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ผู้จัดทำ



1. นาย ฉนพล สินประเสริฐ
2. นาย ดนัย เมธาวิสรเสริญ
3. นาย ทศพร ทองศรี
4. นาย นิธิศ อุทัยไพศาลวงศ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. พิชิต ล้ายอง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสืบสวนหาความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

นาย วัฒนพล สิ้นประเสริฐ

นาย ดนัย เมธาวิสรเสริญ

นาย ทศพร ทองศรี

นาย นิธิศ อุทัยไพศาลวงศ์

รศ.พิชิต ล้ำยอง อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

การทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นการทดสอบความผิดปกติของแกนเหล็กซึ่งเกิดขึ้นได้ทั่วไปในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถทำได้โดยการป้อนกระแสกระตุ้นให้แกนเหล็กแล้ววัดค่ากำลังที่จ่ายเข้าไปในแกนเหล็ก สำหรับในปริณิษานี้จะเสนอการทดสอบด้วยการกระตุ้นด้วยกระแสสูงโดยใช้การพันขดลวดกระตุ้นเพียงรอบเดียว ทำให้เราสามารถทดสอบแกนเหล็กที่ผิดปกติการทำงานได้ แล้วนำไปวิเคราะห์ว่าแกนเหล็กนั้นเสียหรือไม่ หรือยังสามารถใช้งานต่อไปได้หรือไม่ และนอกจากนี้ยังได้สร้างอุปกรณ์ที่จะใช้ตรวจหาจุดที่ผิดปกติภายในแกนเหล็กเพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในอากาศภายในแกนเหล็ก จะทำให้เราสามารถทราบได้ว่าจุดไหนเป็นจุดที่ผิดปกติของแกนเหล็ก ซึ่งได้ทำการสร้างและทดสอบการใช้งานกับแกนเหล็กที่ผิดปกติจริง ทำให้สามารถตรวจหาจุดที่ผิดปกติในแกนเหล็กได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVESTIGATING LOSSES IN THE STATOR CORE OF INDUCTION MOTOR

Chanapol Sinprasert

Danai Mathaweensansurn

Thodsaphon Thongsi

Nithis Uthaipaisalwong

Assoc. Prof. Pichit Lumyong Supervisor

Piampoom Sarikprueck Supervisor

2007

ABSTRACT

The test finding the loss in stator core of induction motor is the test of malfunctional stator core - which can generally occur in induction motor. We can test by exciting the core and measuring the power that got through the stator core. This project will provide the information of the test – which use the one-turn exciting coil with high current. So we can test the stator core at the rated function and analyze whether the stator core is malfunctional. Moreover we invented the machine to find the malfunctional spot - which occurred inside the stator core, and to measure the induced voltage – which is in the air inside the stator core. This machine would help recognizing the malfunctional spot of the stator core. Finally, we test our invented machine with the real malfunctional stator core. And it could really find the malfunctional spot inside the stator core.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ทางกลุ่มโครงการต้องขอขอบพระคุณ ผู้ที่มีส่วนช่วยเหลือให้โครงการชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ปริณญาณิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สามารรถสำเร็จได้ ถ้าไม่ได้รับความอนุเคราะห์จากรศ.พิชิต ล้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการนี้ที่คอยชี้แนะแนวทางทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ อ.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ ที่คอยแนะนำและช่วยเหลือเวลาที่มีอุปสรรคต่าง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้มาตั้งแต่วัยเยาว์จนถึงวันที่สำเร็จการศึกษา

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดที่ทำให้พวกเรามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักรยิ่ง ที่ได้เลี้ยงดูพวกเราเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ให้กำลังใจ และเอาใจใส่เสมอมา

ทางกลุ่มของเราต้องขอขอบพระคุณทุกท่านอีกครั้งไว้ ณ ที่นี้ รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้ประกาศนามที่มีส่วนช่วยเหลือพวกเรา พวกเรามีความซาบซึ้งใจเป็นอย่างยิ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ชื่อโครงการ.....	1
1.2 ส่วนนำ.....	1
1.2.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง.....	1
1.2.2 โครงการที่นำเสนอ.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.4 ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.6 วิธีการที่ใช้ในโครงการ.....	3
1.7 แผนการดำเนินโครงการ.....	3
1.8 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญญาพันธ.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
2.1 สนามแม่เหล็ก.....	9
2.2 สนามแม่เหล็กกรอบขดลวดตัวนำ.....	13
2.3 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล.....	13
2.4 การเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า.....	15
2.5 ความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	16
2.6 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	16
2.7 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก.....	16
2.8 ความซึมซาบได้.....	17
2.9 ความซึมซาบได้สัมพัทธ์.....	17
2.10 วัสดุแม่เหล็ก.....	18
2.10.1 ไดอะแมกเนติก.....	18
2.10.2 พาราแมกเนติก.....	18
2.10.3 เฟอร์โรแมกเนติก.....	18
2.11 ความต้านทานแม่เหล็ก.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12	เส้นโค้งแสดงความเป็นแม่เหล็ก.....	20
2.13	ฮีสเตอร์ซิส.....	23
2.14	การสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์ซิส.....	24
2.15	การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน.....	25
2.16	การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า.....	26
2.17	กระแสกระตุ้นไฟฟ้ากระแสสลับ.....	28
บทที่ 3	วงจรแม่เหล็ก.....	29
3.1	วงจรแม่เหล็ก.....	29
3.2	ค่าความเหนี่ยวนำคักตาไฟฟ้า.....	32
3.3	ค่าความเหนี่ยวนำ.....	33
3.4	Self-Inductance and Mutual Inductance.....	34
3.5	พลังงานสะสมในสนามแม่เหล็ก.....	35
3.6	การเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นสารเคลือบผิวในแกนเหล็ก.....	36
3.6.1	ความหลวมของแกนสเตเตอร์.....	36
3.6.2	แกนเหล็กเกิดการเสียหายขณะที่พันขดลวดที่แกนสเตเตอร์.....	37
3.6.3	ฉนวนเคลือบแกนเหล็กเกิดการหลุดล่อนออกเมื่อทำการทดสอบ.....	37
3.6.4	ความเสียหายของแกนสเตเตอร์เนื่องจากไฟไหม้.....	37
3.6.5	ความเสียหายเชิงกลโดยเกิดจากการกระแทก.....	37
3.6.6	สาเหตุอื่นๆ.....	38
บทที่ 4	การออกแบบการทดลอง.....	39
4.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	39
4.2	ขั้นตอนการทดลอง.....	39
4.2.1	การทดสอบ Core Loss ของแกนเหล็ก.....	39
4.2.2	การสืบหาจุดผิดปกติของแกนเหล็ก.....	41
บทที่ 5	ผลการทดลอง.....	44
บทที่ 6	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	84
	เอกสารอ้างอิง.....	86

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงการทดลองของเอเอสเตด.....	9
2.2 แสดงการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ.....	10
2.3 แสดงกฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	10
2.4 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ.....	11
2.5 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด.....	11
2.6 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามในตัวนำที่วางขนานกัน...	12
2.7 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันในตัวนำที่วางขนานกัน.....	12
2.8 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวด.....	13
2.9 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กรั้วไหล.....	14
2.10 แสดงลักษณะของทอรอยด์.....	20
2.11 แสดงเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ($B-H$ Curve) เมื่อ $H < 400$ แอมแปร์ต่อเมตร.....	22
2.12 แสดงเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ($B-H$ Curve) เมื่อ $H > 400$ แอมแปร์ต่อเมตร.....	22
2.13 แสดงเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบได้กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ($\mu-H$ Curve).....	23
2.14 แสดงวงของฮีสเตอร์ซิสและเส้นโค้งการเกิดสนามแม่เหล็ก.....	24
2.15 แสดงการเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก.....	26
3.1 แสดงความสัมพันธ์ของค่า $B-H$ ของ Ferromagnetic material ชนิดต่างๆ.....	29
3.2 แสดงวงจรแม่เหล็กประกอบด้วยขดลวดพันรอบแกนเหล็ก.....	30
3.3 แสดงวงจรแม่เหล็กประกอบด้วยขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบทอรอยด์.....	30
3.4 แสดงวงจรแม่เหล็กที่มีช่องอากาศ.....	31
3.5 แสดงปรากฏการณ์ Fringing.....	31
3.6 แสดงวงจรแม่เหล็กที่ขดลวด 2 ชุด.....	34
3.8 การเกิดกระแสไหลวนเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวน.....	36
3.9 โครงสร้างของแกนสเตเตอร์ที่เกิดการเสียหายจาก Wedge และกระแสไฟไหลวนที่เกิดขึ้น.....	37
3.10 ความเสียหายของแกนสเตเตอร์เนื่องจากไฟไหม้.....	38
4.1 แสดงการทดสอบหา Core Loss ของแกนเหล็ก.....	40
4.2 แสดงการ Simulate แกนเหล็ก.....	40
4.3 แสดง Search Coil ที่ได้.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4	แสดงการวัดด้วย Search Coil.....	43
5.1	ตัวอย่างรูปภาพระหว่างแรงดันและกระแสขณะกระตุ้นแกนเหล็กปกติ ที่ B=1.8 Tesla.....	47
5.2	แสดงตัวอย่างรูปภาพระหว่างแรงดันและกระแสขณะกระตุ้นแกนเหล็ก ที่ซัดภายใน 50% ของความยาวแกนที่ B=1.8 Tesla.....	47
5.3	แสดงตัวอย่างรูปภาพระหว่างแรงดันและกระแสขณะกระตุ้นแกนเหล็ก ที่ทำการ Simulate ซัด 100% ที่ B=1.8 Tesla.....	48
5.4	แสดงผลระหว่าง B กับ I (กระแสกระตุ้น) ของแกนเหล็กปกติกับแกนเหล็ก ที่ทำการ Simulation ซัด 100%.....	49
5.5	แสดงผลเปรียบเทียบระหว่าง ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (W/kg) กับ B ของแกนเหล็กทั้ง 3 ชนิดที่ทำการทดลอง.....	49
5.6	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนปกติ ที่มุม 90° โดยใช้ Search Coil 3 × 10 × 3 mm.....	54
5.7	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนปกติ ที่มุม 180° โดยใช้ Search Coil 3 × 10 × 3 mm.....	54
5.8	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนปกติ ที่มุม 270° โดยใช้ Search Coil 3 × 10 × 3 mm.....	55
5.9	แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติตามองศาต่างๆ ที่วัดได้จาก Search Coil 3 × 10 × 3 mm.....	55
5.10	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนถูกซัด 50% ที่มุม 90° โดยใช้ Search Coil 3 × 10 × 3 mm.....	58
5.11	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนถูกซัด 50% ที่มุม 190° (จุดที่โดนซัด) โดยใช้ Search Coil 3 × 10 × 3 mm.....	58
5.12	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนถูกซัด 50% ที่มุม 270° โดยใช้ Search Coil 3 × 10 × 3 mm.....	59
5.13	แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กซัด 50% ตามองศาต่างๆ ที่วัดได้จาก Search Coil 3 × 10 × 3 mm.....	59
5.14	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulation ซัด 100% ที่มุม 90° โดยใช้ Search Coil 3 × 10 × 3 mm.....	62
5.15	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulation ซัด 100% ที่มุม 180° (จุดที่ซัด) โดยใช้ Search Coil 3 × 10 × 3 mm.....	62
5.16	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulation ซัด 100% ที่มุม 270° โดยใช้ Search Coil 3 × 10 × 3 mm.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.17	แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน simulate ชี้อัด 100% ตามองศาต่างๆ ที่วัดได้จาก Search Coil $3 \times 10 \times 3$ mm.....	63
5.18	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนปกติที่มุม 90° โดยใช้ Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.....	66
5.19	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนปกติที่มุม 180° โดยใช้ Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.....	66
5.20	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนปกติที่มุม 270° โดยใช้ Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.....	67
5.21	แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนปกติตามองศาต่างๆ ที่วัดได้จาก Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.....	67
5.22	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนชี้อัด 50% ที่มุม 90° โดยใช้ Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.....	70
5.23	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนชี้อัด 50% ที่มุม 190° (จุดที่ชี้อัด) โดยใช้ Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.....	70
5.24	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนชี้อัด 50% ที่มุม 270° โดยใช้ Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.....	71
5.25	แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนชี้อัด 50% ตามองศาต่างๆ ที่วัดได้จาก Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.....	71
5.26	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulate ชี้อัด 100% ที่มุม 90° โดยใช้ Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.....	74
5.27	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulate ชี้อัด 100% ที่มุม 180° โดยใช้ Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.....	74
5.28	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulate ชี้อัด 100% ที่มุม 270° โดยใช้ Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.....	75
5.29	แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulate ชี้อัด 100% ตามองศาต่างๆ ที่วัดได้จาก Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.....	75
5.30	แสดงกราฟของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติ โดยการยกสายกระตุ้นจาก Search Coil ขนาด $4 \times 10 \times 2$ mm.....	78
5.31	แสดงกราฟของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กหมุนแกน 30° จาก Search Coil ขนาด $4 \times 10 \times 2$ mm.....	80
5.32	แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulate ชี้อัด 100% ระหว่างจุด 30 องศา และ จุด Short ที่ 180 องศา.....	83

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.7.1	ผังเวลาการดำเนินโครงการเทอม 1.....	5
1.7.2	ผังเวลาการดำเนินโครงการเทอม 2.....	6
2.1	ตารางแสดงค่าเชื่อมขาบได้ของสารต่างๆ.....	18
5.1	การทดสอบ Core Loss ของแกนเหล็กที่ปกติ.....	44
5.2	การทดสอบ Core Loss ของแกนเหล็กที่ทำการเชื่อมภายใน 50%.....	45
5.3	การทดสอบ Core Loss ของแกนเหล็ก Simulation ช็อต 100%.....	46
5.4	แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติ เมื่อใช้ Search Coil ขนาด 3 × 10 × 3 mm.....	52
5.5	แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กที่ถูกช็อต 50% เมื่อใช้ Search Coil ขนาด 3 × 10 × 3 mm.....	56
5.6	แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็ก Simulation ช็อต 100% เมื่อใช้ Search Coil ขนาด 3 × 10 × 3 mm.....	60
5.7	แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติ เมื่อใช้ Search Coil ขนาด 4 × 10 × 2 mm.....	64
5.8	แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กช็อต 50% เมื่อใช้ Search Coil ขนาด 4 × 10 × 2 mm.....	68
5.9	แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulate ช็อต 100% เมื่อใช้ Search Coil ขนาด 4 × 10 × 2 mm.....	72
5.10	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติ โดยการยกสายกระตุ้นจาก Search Coil ขนาด 4 × 10 × 2 mm.....	77
5.11	แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติหมุนแกน 30° จาก Search Coil ขนาด 4 × 10 × 2 mm.....	79

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

1.1 ชื่อโครงการ (Project Title)

การสืบสวนหาความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
(Investigating Losses in the Stator Core of Induction Motor)

1.2 ส่วนนำ

1.2.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง (Background)

จากการพัฒนาในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เครื่องจักรกลไฟฟ้า (Electrical Machines) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม และเพื่อการตอบสนองของมนุษย์ ดังนั้น เครื่องจักรกลไฟฟ้าจึงถือเป็นสิ่งสำคัญในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่สำคัญได้แก่ หม้อแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ โดยในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหล่านี้มีส่วนประกอบที่สำคัญ เช่น แกนเหล็ก ขดลวด โครงสร้าง ซึ่งแกนเหล็กที่เป็นส่วนประกอบหนึ่งในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้น เป็นปัจจัยสำคัญของการกำหนดประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ดังนั้นถ้าหากเกิดความไม่สมบูรณ์ หรือเกิดความผิดปกติขึ้นในแกนเหล็ก หรือเกิดการเสื่อมสภาพของแกนเหล็กย่อมทำให้การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นเกิดค่าความสูญเสีย ทำให้ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ การทราบค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งความเข้มข้นแม่เหล็กต่างๆ นั้นเป็นเรื่องสำคัญต่อการพัฒนา และออกแบบสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ความไม่สมบูรณ์ของแกนเหล็กเป็นสิ่งที่สามารถเกิดได้โดยทั่วไปในเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยส่วนมากที่พบคือค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่มากขึ้นเนื่องจากจนวนเสื่อมสภาพ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กจะแบ่งเป็นความสูญเสียเนื่องจาก ฮีสเตอร์ซิส และความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน โดยเมื่อเราสามารถหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก เราก็จะสามารถนำมาวิเคราะห์ว่าแกนเหล็กเป็นแกนเหล็กที่มีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหน

โครงการนี้เป็นการศึกษาค่าความไม่สมบูรณ์ในแกนเหล็ก เพื่อที่จะตรวจสอบว่าแกนเหล็กนั้นสมบูรณ์อยู่หรือไม่ และหาจุดที่ผิดปกติ โดยใช้ทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการทดสอบแกนเหล็กแบบต่างๆ เช่น แกนเหล็กปกติจากโรงงาน แกนเหล็กที่เสียหายจากการช็อต ซึ่งจากการทดลองดังกล่าว จะทำให้เราสามารถหารูปเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก หรือ B-H Curve และสามารถหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กแต่ละแกนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2 โครงการที่นำเสนอ (Proposed Project)

โครงการนี้เป็นการนำเอาปัญหาที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้าในอุตสาหกรรมมาวิเคราะห์และหาวิธีการตรวจหาความผิดปกติ โดยการนำแกนเหล็กมาทดสอบหาค่าความสูญเสียตามปกติของแกนเหล็ก และค่าความสูญเสียที่แกนเหล็กที่ผิดปกติว่าแตกต่างกันอย่างไร แล้วนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียเท่าไรจึงจะบอกให้เราทราบว่าแกนเหล็กนั้นไม่ปกติ และเราทราบได้อย่างไรว่าแกนเหล็กนั้นเกิดความผิดปกติขึ้นที่ใด จึงต้องหาอุปกรณ์ที่จะช่วยตรวจหาจุดที่ผิดปกติ

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ (Project Objectives)

1. ศึกษาแกนเหล็กและการทดสอบแกนเหล็ก
2. ศึกษาหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กที่ให้เป็นแกน stator ตามปกติ
3. ศึกษาหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กเมื่อแกนเหล็กมีความผิดปกติ
4. ศึกษาและเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กระหว่างแกนเหล็กที่ปกติและแกนที่ผิดปกติเพื่อที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาว่าแกนเหล็กเสียหรือไม่
5. คิดค้นหาอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจหาจุดที่ผิดปกติภายในแกนเหล็ก

1.4 ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ (Project Outcomes)

1. เกณฑ์ที่จะบ่งบอกได้ว่าแกนเหล็กชนิดนั้นๆ จะมีค่าความสูญเสียภายในอยู่เท่าไร และถ้าความสูญเสียภายในมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเท่าไรจึงบ่งบอกให้เราทราบว่าแกนเหล็กนั้นผิดปกติ คือมีการช็อตถึงกันภายใน หมายถึงความสูญเสียภายในของแกนเหล็กแต่ละประเภทนั้น มีค่าแค่ไหนจึงจะพอรับได้ และค่ามากแค่ไหนจึงมากเกินไปจนคิดได้ว่าแกนเหล็กนั้นผิดปกติไปแล้ว

2. อุปกรณ์ที่จะช่วยเราค้นหาจุดที่ผิดปกติภายในแกนเหล็กนั้น ซึ่งเมื่อเราพิจารณาแล้วว่าแกนเหล็กนั้นผิดปกติแล้ว เราจะทราบได้อย่างไรว่ามันผิดปกติตรงไหน บริเวณไหนที่มีการช็อตถึงกันของแกนเหล็ก ซึ่งอุปกรณ์นั้นต้องมีขนาดเล็กพอที่จะตรวจได้อย่างละเอียดและแม่นยำ

1.5 ขอบเขตของโครงการ (Scope of the Project)

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กและวงจรแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทดสอบหาค่าความสูญเสียภายในแกนเหล็กปกติที่มาจากโรงงานผลิต ซึ่งมีอยู่ทั่วไปในห้องLAB

3. ทดสอบหาค่าความสูญเสียภายในแกนเหล็กที่ผิดปกติที่มีการช้อตภายในถึงกันโดยการจำลองขึ้นมาตามทฤษฎี และการเชื่อมแกนเหล็กจริง ๆ ซึ่งมีอยู่แล้วในห้อง LAB จากการทำการทดลองรุ่นก่อนๆ

4. นำค่าความสูญเสียมาวิเคราะห์ดูแนวโน้มว่าแกนเหล็กควรมีค่าความสูญเสียอยู่ในช่วงเท่าไรจึงจะพอรับได้ และเท่าไรจึงมากเกินไปถือว่าเป็นแกนเหล็กที่ผิดปกติ

5.ทดลองสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจหาจุดที่ผิดปกติของแกนเหล็ก ซึ่งมีแนวทางมาจากการทดลองในรุ่นที่ผ่านมาโดยใช้ทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้า

1.6 วิธีการที่ใช้ในโครงการ (Research Methodology)

โครงการนี้จะเริ่มด้วยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กและทฤษฎีเกี่ยวกับวงจรแม่เหล็ก โดยจะศึกษาทฤษฎีควบคู่ไปกับวิธีการทดสอบ จากนั้นก็จะนำความรู้ที่ได้ศึกษามาออกแบบการทดสอบ

วิธีการที่ใช้ในโครงการนี้เริ่มด้วยการทดสอบแกนเหล็กที่ปกติก่อน ด้วยการพันด้วยขดลวดทองแดงแล้วจ่ายกระแสกระตุ้นเข้าไปเพื่อทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ปกติ จากนั้นจึงทำการทดสอบแกนเหล็กที่ผิดปกติซึ่งถูกช้อตระหว่างแผ่นถึงกัน โดยทำการทดสอบแบบเดียวกันแล้วจึงนำค่ามาวิเคราะห์หาช่วงของค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่จะบ่งบอกได้ว่าแกนเหล็กนั้นเสียหรือไม่ หรืออยู่ในช่วงเท่าไรจึงพอรับได้ ถ้าแกนเหล็กนั้นเสียเราจึงต้องหาเครื่องมือที่สามารถนำมาตรวจหาจุดที่ผิดปกติของแกนเหล็กนั้น โดยใช้ทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้ามาช่วย

1.7 แผนการดำเนินโครงการ (Project Plan)

เดือนมิถุนายน

-ศึกษาทฤษฎี คำนิยาม และความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และวงจรแม่เหล็ก

เดือนกรกฎาคม

-ศึกษาทฤษฎี คำนิยาม และความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดือนสิงหาคม

-ศึกษาและฝึกการทดลองการกระตุ้นแกนเหล็กโดยการจ่ายกระแสผ่านสายไฟที่พันรอบแกนเหล็ก

-ทำการบันทึกค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองและลองนำไปคำนวณหาค่าต่าง ๆ ของแกนเหล็ก

-ศึกษาและวิเคราะห์กราฟแรงดันและกระแสที่จ่ายเพื่อกระตุ้นแกนเหล็ก

เดือนกันยายน

-ทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ปกติ เก็บค่าต่าง ๆ ที่ทดลองได้

-ทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ผิดปกติ คือถูกช็อตถึงกัน แล้วเก็บค่าที่ได้ไปวิเคราะห์

-นำค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กทั้งที่ปกติและไม่ปกติมาวิเคราะห์เปรียบเทียบและสรุปผล

เดือนตุลาคม

-ศึกษาการหาจุดผิดปกติของแกนเหล็ก ว่าจุดที่มีการช็อตถึงกันของแกนเหล็กจะมีคุณสมบัติอย่างไรบ้าง

-ศึกษาอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับหาจุดที่แกนเหล็กถูกช็อตถึงกันได้

เดือนพฤศจิกายน

-ออกแบบวิธีการทดสอบ

-ออกแบบอุปกรณ์ที่จะใช้ตรวจจับหาจุดผิดปกติของแกนเหล็ก

เดือนธันวาคม

-สร้างอุปกรณ์ขึ้นมาตามที่ได้ออกแบบไว้

-นำอุปกรณ์มาทดสอบกับแกนเหล็กที่ผิดปกติเพื่อหาจุดที่ช็อตถึงกัน

-วิเคราะห์ผลการทดสอบว่าสามารถหาจุดผิดปกติได้ดีหรือไม่ ควรจะปรับปรุงอุปกรณ์อย่างไร

เดือนมกราคม

-ทดลองเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ที่ใช้ว่าสามารถวัดได้ดีขึ้นหรือไม่

-วิเคราะห์ว่าการกระตุ้นแกนเหล็กแบบใดที่อุปกรณ์สามารถตรวจจับได้อย่าง

ชัดเจนที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดือนกุมภาพันธ์

- นำผลการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบเพื่อหาอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ตรวจหาจุดผิดปกติของแกนเหล็กในแต่ละชนิด
- สรุปและวิเคราะห์ผลของโครงการ เกี่ยวกับการเสียของแกนเหล็ก
- จัดทำรายงานเป็นรูปเล่ม

ตารางที่ 1.7.1 ผังเวลาการดำเนินโครงการเทอม 1 (Gantt Chart)

เวลา	ม.ย.				ก.ค.				ส.ค.				ก.ย.				ต.ค.			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก																				
ศึกษาทฤษฎีและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า																				
ศึกษาและฝึกการทดลองการกระตุ้นแกนเหล็กและลองนำค่าต่างๆของแกนเหล็ก																				
ศึกษาและวิเคราะห์กราฟแรงดันและกระแสที่จ่ายเพื่อกระตุ้นแกนเหล็ก																				
ทดสอบหาค่าความสูญเสียใน																				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์ (Thesis Structure)

การทำโครงงานนี้เริ่มด้วยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 แนวทางในการทดลองจะอยู่ในบทที่ 3 และ 4 ส่วนรายละเอียดของการทำการทดลองรวมทั้งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองจะอยู่ในบทที่ 5 ส่วนบทที่ 6 จะเป็นการสรุปผลการทำโครงงานนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

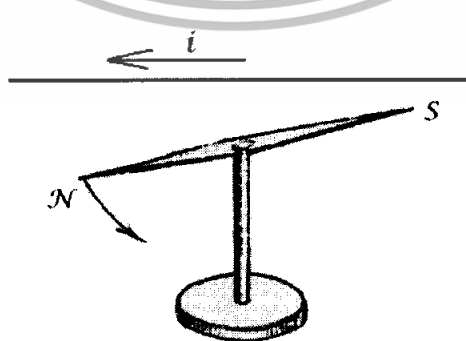
ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1 สนามแม่เหล็ก

ในปี ค.ศ. 1819 แฮนส์ คริสเตียน เออสเตด (Hans Christian Oersted) นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์กได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้า และพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเสมอ

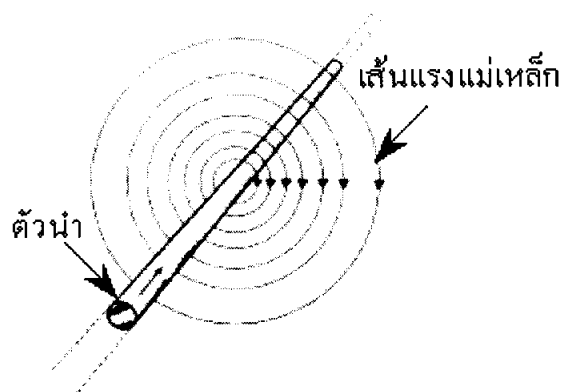
การทดลองของเออสเตดนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 โดยการนำเอาลวดตัวนำไฟฟ้า AB ต่อเข้ากับเซลล์ไฟฟ้า และให้ตัวนำนั้นวางขนานกับเข็มทิศที่วางอยู่ใต้ตัวนำนั้นเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำจะทำให้เข็มทิศเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวขนานเดิม โดยเข็มทิศจะตั้งฉากกับตัวนำ AB แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับทาง เข็มทิศจะเกิดการเบี่ยงเบนกลับทางไปอีกทางหนึ่ง ซึ่งทำมุมกับตำแหน่งเดิม 180 องศา และยังพบอีกว่าถ้าให้ลวดตัวนำทำมุม 90 องศากับเข็มทิศแล้ว เข็มทิศจะไม่เบี่ยงเบนไปในทิศทางใดๆเลย

เออสเตดยังได้ค้นพบอีกว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้านั้นประกอบไปด้วยเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งจัดเรียงเป็นวงรอบๆ ตัวนำที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านนั้น โดยตัวนำจะเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมเหล่านั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆตัวนำนี้ถ้ายังอยู่ห่างตัวนำมากอำนาจแม่เหล็กก็ยิ่งน้อย การเกิดสนามแม่เหล็กนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ในแนวตั้งทะลุผ่านกระดาษแข็งแล้วนำเข็มทิศวางไว้บนกระดาษแข็งตามตำแหน่งต่างๆ จะสังเกตเห็นว่าทิศทางการหันเหเรียงตามกันไปเป็นวงกลมรอบตัวนำ โดยให้สีตำแหน่งด้วยขั้วเหนือ และสีขาวแทนด้วยขั้วใต้หรืออาจใช้ผงเหล็กโรย โดยจะสังเกตเห็นว่าผงเหล็กเรียงตัวเป็นวงกลม



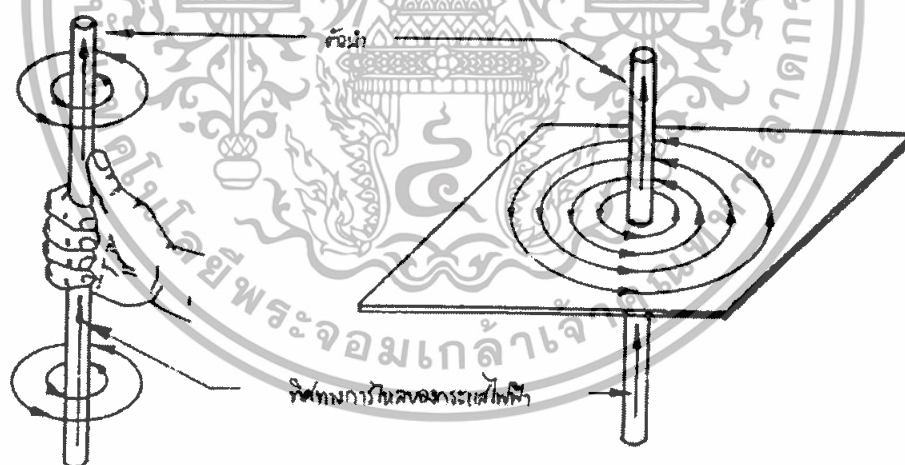
ภาพที่ 2.1 แสดงการทดลองของเออสเตด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 แสดงการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำไฟฟ้ากับทิศทางของการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำ สามารถหาได้โดยการใช้กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก คือให้ใช้มือขวากำรอบตัวนำไฟฟ้า โดยให้หัวแม่มือชี้ไปตามความยาวของตัวนำแทนทิศทางของการไหลของกระแสไฟฟ้า และให้นิ้วทั้งสี่ที่เหลือกำรอบตัวนำ โดยนิ้วทั้งสี่นั้นจะแทนทิศทางของการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.3

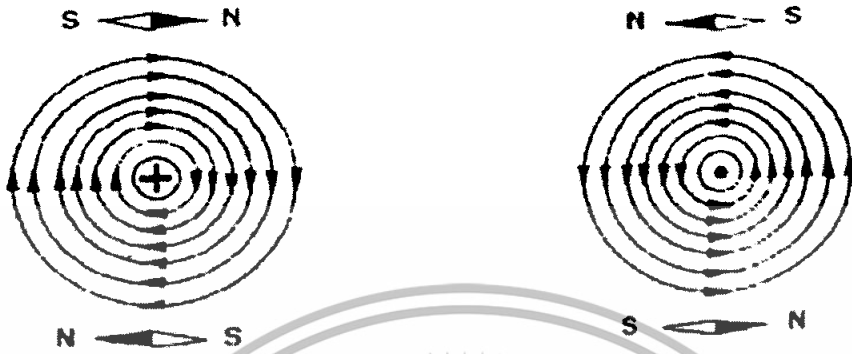


ภาพที่ 2.3 แสดงกฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก

ลูกศรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าจะใช้แสดงทิศทางของการไหลของกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวของตัวนำไฟฟ้า โดยจะกำหนดให้ที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าซึ่งเห็นกับลูกศรนั้นแทนด้วยเครื่องหมายกากบาท (+) ส่วนด้านที่กระแสไฟฟ้าไหลออกซึ่งเห็นเป็นหัวลูกศรแทนด้วยเครื่องหมายจุด (\cdot) และเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำแสดงในรูปที่ 2.4 และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดแสดงได้ดังรูป 2.5



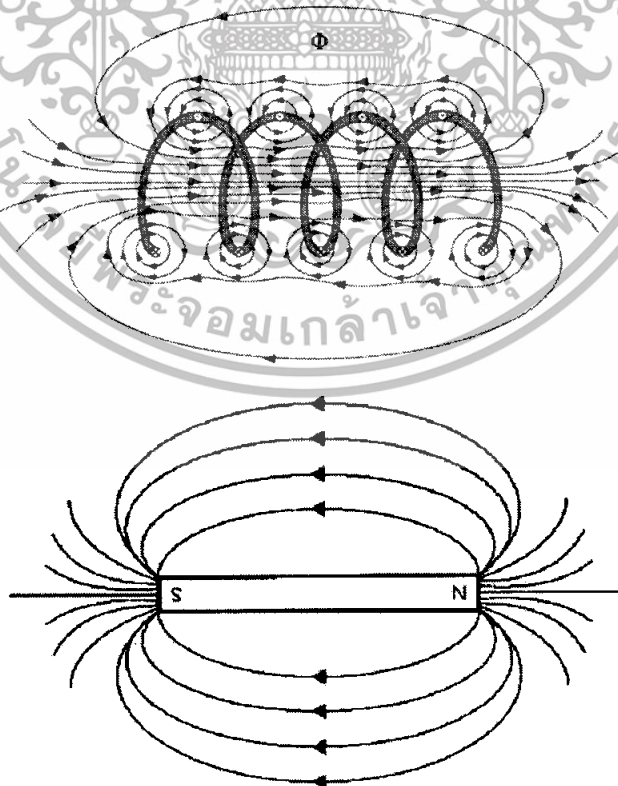
เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา

เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทวนเข็มนาฬิกา

กระแสไหลเข้า

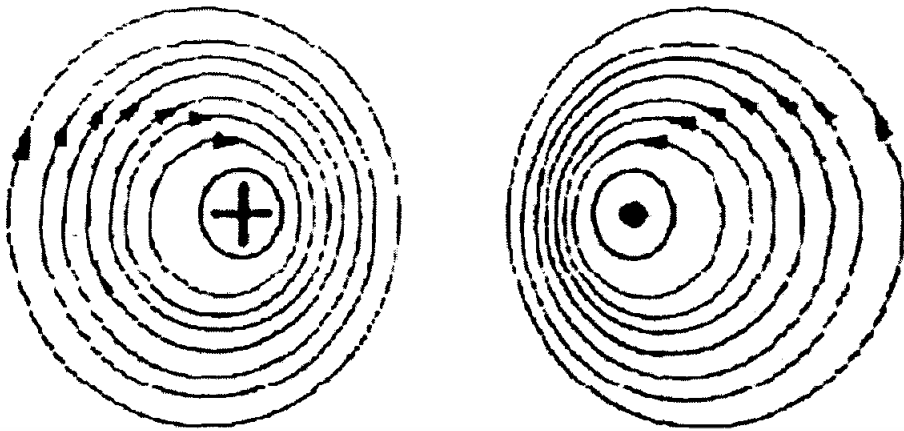
กระแสไหลออก

ภาพที่ 2.4 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก
รอบตัวนำ

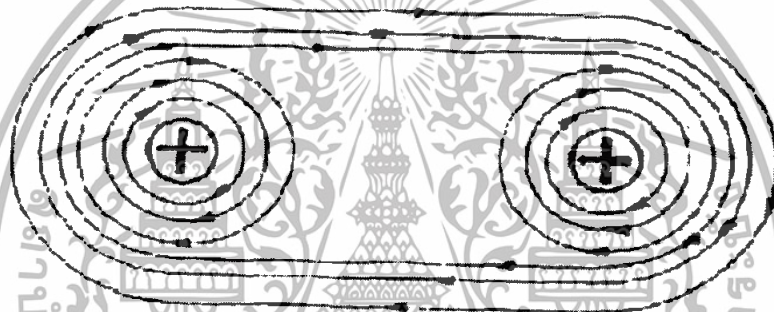


ภาพที่ 2.5 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.6 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามในตัวนำที่วางขนานกัน



ภาพที่ 2.7 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันในตัวนำที่วางขนาน

เมื่อนำตัวนำ 2 ตัวมาวางขนานกัน และมีกระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน แสดงในรูปที่ 2.6 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำทั้งสองสามารถหาได้จากกฎมือขวา โดยกระแสไฟฟ้าไหลออกแสดงด้วยจุด คือตัวนำด้านซ้ายมือ และตัวนำด้านขวาให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าแสดงด้วยเครื่องหมายกากบาท ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำด้านซ้ายมือ จะมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ส่วนตัวนำทางด้านขวาที่กระแสไหลเข้าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังนั้นจะเห็นจะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำทั้งสองนั้นมีทิศทางไปในทางเดียวกันทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเหมือนกัน จึงเกิดแรงผลักรันขึ้นระหว่างตัวนำทั้งสองที่วางขนานกันนั้น

แต่ถ้าตัวนำทั้งสองที่วางขนานกันมีกระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางเดียวกันแสดงในรูป 2.7 โดยสมมติให้กระแสไหลเข้ามีทิศทางตามเข็มนาฬิกาและเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำทางด้านขวาก็จะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาเช่นเดียวกันทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กต่างกัน เป็นเหตุให้เกิดแรงดูดกันขึ้น ตัวนำทั้งสองถูกดึงเข้ามาใกล้กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สนามแม่เหล็กรอบขดลวดตัวนำ (Magnetic field around a coil)

ถ้าเราพันขดลวดรอบแกนเหล็กดังรูป 2.6 และต่อปลายขดลวดเข้ากับขั้วแบตเตอรี่ แกนเหล็กจะกลายเป็นแม่เหล็กและคุณสมบัติคล้ายกับแม่เหล็กถาวร ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแทนด้วยหัวลูกศร



ภาพที่ 2.8 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวด

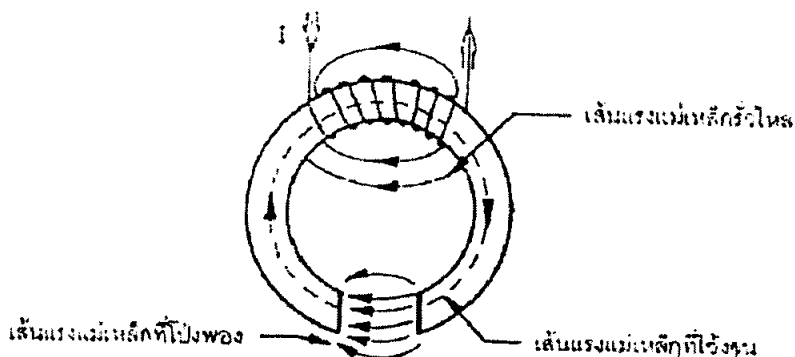
โดยปลายของแกนเหล็กด้านซ้ายจะเป็น ขั้วเหนือและปลายด้านขวาจะเป็นขั้วใต้ ถ้ากลับทิศทางกระแสในขดลวดหรือกลับขั้วแบตเตอรี่ จะทำให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปหรือขั้วแม่เหล็กด้านซ้ายจะเปลี่ยนเป็นขั้วใต้ และด้านขวาจะเปลี่ยนเป็นขั้วเหนือนั่นเอง

เมื่อทิศทางกระแสไหลในขดลวด เราสามารถหาขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้โดยใช้กฎมือขวาของขดลวด (Right hand rule for coil) ซึ่งกล่าวว่า ให้กำขดลวดด้วยมือขวาโดยให้นิ้วทั้งสี่กำขดลวดซึ่งทิศทางกระแสในขดลวด นิ้วหัวแม่มือซึ่งยื่นออกไปขนานกับแกนของขดจะชี้ไปทางขั้วเหนือ (ทิศทางแม่เหล็กภายในขดลวด)

2.3 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Magnetic Leakage or Leakage Flux)

เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลเป็นเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งที่ไม่ไหลไปตามความต้องการดังแสดงในรูป เส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการและใช้ประโยชน์จริงๆ ได้ก็คือเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านช่องอากาศเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

ส่วนเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่ไม่ไหลผ่านช่องว่างตามต้องการเรียกเส้นแรงแม่เหล็กนี้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล ถ้าต้องการให้เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลน้อยที่สุดนั้นต้องให้ขดลวดขดที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ใกล้ช่องว่างหรือจุดที่ต้องการให้เส้นแรงแม่เหล็กนั้นๆ ซึ่งเราจะสามารถทราบได้ว่าการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก ได้จากการเอาเข็มทิศไปวางไว้ในบริเวณที่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล และก็จะเป็นการยากมากที่จะไม่ให้มีการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก เครื่องใช้ไฟฟ้าที่อาศัยอำนาจแม่เหล็ก เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์อย่างดีจะมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลประมาณ 15-20% ถ้ากำหนดให้

ϕ_t = เส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้น หรือเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งหมด

ϕ = เส้นแรงแม่เหล็กที่สามารถใช้งานได้จริงๆ

จากการทดลองของฮอปคินสัน (Hopkinson) พบว่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลจะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมา ต่อ เส้นแรงแม่เหล็กที่สามารถใช้งานได้จริงๆ โดยสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วนี้ จะใช้สัญลักษณ์ λ และสามารถหาได้จากสมการดังนี้

สัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล = จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทั้งหมด / จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้งานได้

$$\text{Leakage coefficient } (\lambda) = \text{Total flux} / \text{Useful flux}$$

$$\text{Leakage coefficient } (\lambda) = \frac{\phi}{\phi_t} \quad (2.1)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลนี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของฮอปคินสัน ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลมาก นั้นแสดงว่าการออกแบบเครื่องใช้ไฟฟ้านั้นไม่ดี แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลต่ำ แสดงว่าการออกแบบเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบไฟฟ้านั้นดี โดยเครื่องใช้ไฟฟ้าในปัจจุบันจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็ก รั้วไหลประมาณ 1.1 ถึง 1.25

นอกจากจะมีเส้นแรงแม่เหล็กรั้วไหลแล้ว จากรูปจะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็ก บางส่วนกระจายออกนอกช่องอากาศ เส้นแรงแม่เหล็กนี้เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการ โป่งออก (Fringing flux) เส้นแรงแม่เหล็กส่วนนี้ไม่เกิดประโยชน์เช่นเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็ก รั้วไหล เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กได้แพร่กระจายออกไปบนพื้นที่ที่เกี่ยวข้องที่โตกว่า ดังนั้นจึงมี ผลทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศมีค่าลดลง

2.4 การเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction)

ในปี ค.ศ. 1831 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ คือ ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ได้ค้นพบหลักฐานสำคัญเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า คือ ถ้ามีขดลวด C ปลายของขดลวดต่ออยู่กับกัลวานอมิเตอร์ G (แอมมิเตอร์ที่มีความไวสูง) แล้วนำแม่เหล็กถาวร เคลื่อนที่เข้าไปในขดลวด เข็มของกัลวานอมิเตอร์ จะบ่ายเบนไปทิศทางหนึ่งแสดงว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้านำเกิดขึ้นในขดลวด C หลังจากการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กถาวรหยุดลง เข็มของ กัลวานอมิเตอร์ จะกลับมายังที่ ศูนย์ตามเดิมผลการทดลองพิสูจน์ได้ว่ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้า เหนี่ยวนำเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ เมื่อเทียบกับขดลวด C

ถ้าเราจับขั้วแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ ออกจากขดลวด C เข็มของกัลวานอ มิเตอร์จะบ่ายเบนไปทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรกแสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นใน ขดลวด C มีทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรกเช่นกัน ถ้าเราจับแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ต่างกัน จะพบว่ายิ่งมีความเร็วมากเข็มของกัลวานอมิเตอร์ก็ยิ่งบ่ายเบนมาก ดังนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด ก็ต้องมากขึ้นด้วย

ผลที่ได้รับจากการทดลองเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า สรุปได้ดังนี้

- ก. เมื่อลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก หรือ เส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัด ลวดตัวนำจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด
- ข. ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และขึ้นอยู่กับทิศทางของลวดตัวนำที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก
- ค. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราความเร็วที่ ลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัด หรือถูกตัดโดยเส้นแรงแม่เหล็ก

2.5 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity) ใช้สัญลักษณ์ H

คือแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวของวงจรมแม่เหล็ก วงจรมแม่เหล็กที่มีเส้นแรงแม่เหล็กสม่ำเสมอจะมีค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวคงที่ตลอด แนวของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น นั้นหมายความว่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าคงที่ตลอดแนวความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นด้วย หน่วยของความเข้มสนามแม่เหล็ก คือแอมแปร์/เมตร (A/m) ความเข้มสนามแม่เหล็กเราสามารถวัดได้หรือหาได้จากการนำเอาขั้วเหนือเดี่ยว (N) ที่มีแรงแม่เหล็ก 1 หน่วยขั้วไปวางไว้ ณ จุดใดจุดหนึ่งในสนามแม่เหล็ก ค่าของแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของขั้วเหนือเดี่ยวกับสนามแม่เหล็กก็จะเป็นค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นๆ

ความเข้มสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการคือ

$$H = \frac{\mathcal{F}}{l} = \frac{Ni}{l} \quad (\text{A/m}) \quad (2.2)$$

โดย H = ความเข้มสนามแม่เหล็ก

l = ความยาวของวงจรมแม่เหล็ก

2.6 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density) ใช้สัญลักษณ์ B

เพื่อให้ทราบปริมาณที่แน่นอนของเส้นแรงแม่เหล็ก จึงต้องกำหนดพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลผ่านต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เรียกว่า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density) ดังนั้นหน่วยความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก คือ เวเบอร์/ตารางเมตร (wb/m^2) หรือเทสลา (Tesla)

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กหาได้จากสมการ

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (\text{Wb/m}^2) \quad (2.3)$$

โดย B = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

ϕ = เส้นแรงแม่เหล็ก

A = พื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก

2.7 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force) ใช้สัญลักษณ์ \mathcal{F}

หมายถึง ความสามารถในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็ก เป็นแหล่งที่ทำหน้าที่ส่งเส้นแรงแม่เหล็ก ให้เคลื่อนที่ผ่านไปในวงจรมแม่เหล็กซึ่งคล้ายกับแรงดันไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ส่งกำลังให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปในโหลด หรือส่วนต่างๆ ของวงจรมแม่เหล็ก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแรงดันแม่เหล็ก นั้นเป็นงาน (work done) ที่มีหน่วยวัดเป็นจูล (Joules) ซึ่งได้จากการนำเอาชั่วเนื้อเต็ยวส่งผ่านเข้าไปในสนามแม่เหล็ก หน่วยของงานคิดเป็น จูล แต่หน่วยของแรงดันแม่เหล็ก ใช้ แอมแปร์เทิร์น (A-T) ซึ่งได้จากการเอากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดคูณกับจำนวนรอบขดลวดที่พันไว้เพื่อให้เกิดสนามเส้นแรงแม่เหล็ก แรงดันแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการคือ

$$\mathcal{F} = m.m.f. \quad (A-T)$$

$$\mathcal{F} = Ni \quad (A-T) \quad (2.4)$$

โดย \mathcal{F} = แรงดันแม่เหล็ก (A-T)

i = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด (A)

N = จำนวนรอบขดลวด (T)

2.8 ความซึมซาบได้ (Permeability) ใช้สัญลักษณ์ μ

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ที่แท้จริงมันจะขึ้นอยู่กับโมเลกุล ของแกนเหล็กว่าจะสามารถวางตัวในแนวเดียวกันได้ง่ายเพียงใด เรียกว่าความซึมซาบได้ ความซึมซาบได้นี้เป็นอัตราส่วนของ ความหนาแน่นแห่งเส้นแรงแม่เหล็กต่อความเข้มสนามแม่เหล็กดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu = \frac{B}{H} = \mu_0 \mu_r \quad ; \quad (\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}) \quad (2.5)$$

ความซึมซาบได้ คือ ความยินยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน โดยความซึมซาบของสุญญากาศเป็น 1 ซึ่งปกติทั่วไปแล้ว จะกล่าวถึงเฉพาะความซึมซาบได้สัมพัทธ์ ซึ่งหมายถึงตัวกลาง เช่น เหล็ก ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้เป็นกี่เท่าของอากาศ เมื่อมีความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากัน

2.9 ความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (Relative permeability) ใช้สัญลักษณ์ μ_r

คืออัตราส่วนของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้ในวัสดุสารแม่เหล็กต่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้ในสุญญากาศ (หรือในแกนที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก) โดยใช้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กค่าเดียวกัน เช่น ในอากาศ $\mu_r = 1$ แต่ในโลหะผสม เช่น นิเกิล – เหล็ก (nickel – iron alloys) มี μ_r สูงถึง 100000

2.10 วัสดุแม่เหล็ก

2.10.1 ไดอะแมกเนติก หมายถึง การที่สารแม่เหล็กมีการต่อต้านกับสนามแม่เหล็กจากภายนอก สารแม่เหล็กแบบนี้เราเรียกว่า สารแม่เหล็กไดอะแมกเนติก (Diamagnetic substances) โดยผู้ที่ค้นพบคือ ไมเคิลฟาราเดย์ เมื่อปี ค.ศ. 1846

2.10.2 พาราแมกเนติก หมายถึง การที่สนามแม่เหล็กจากภายนอกทำให้อะตอมเกิดแรงคู่ควบจัดเรียงคู่ให้หันไปในทิศทางที่เรียงตัวกันตามสนามแม่เหล็กจากภายนอกนั้น คุณสมบัติที่สำคัญของความเป็นแม่เหล็กแบบนี้คือ ค่าความเป็นแม่เหล็กเป็นสัดส่วนโดยตรง กับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งสารนั้นวางอยู่ และเป็นสัดส่วนกลับกันกับอุณหภูมิ ผู้ที่ค้นพบคือ ปีแอร์คูรี (Pierre Curie) เมื่อปี ค.ศ. 1895

2.10.3 เฟอร์โรแมกเนติก อะตอมของสารแม่เหล็กเฟอร์โร จะมีการจัดโมเลกุลชั่วคราวเหนี่ยวนำซึ่งกันและกันให้มีทิศทางเดียวกันภายใต้แรงกระทำซึ่งกันและกันคุณสมบัติที่สำคัญของสารแม่เหล็กเฟอร์โรคือ ค่าความเป็นแม่เหล็กของสารไม่เป็นปฏิภาคโดยตรง กับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และสารอาจแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็ก สารแม่เหล็กเฟอร์โรมีอยู่ 5 ธาตุ ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล กาโดลิเนียม และดีสโพรเซียม โดยสารทั้ง 5 นี้จะยังคงสภาพเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โร ตามที่อุณหภูมิยังไม่เกินค่าอุณหภูมิของคูรี (Curie temperature) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้จะเปลี่ยนเป็นสารแม่เหล็กพาราแมกเนติกทันที โดยเหล็กนั้นมีอุณหภูมิของคูรี 1043 K คุณสมบัตินี้จะเกิดได้แม้ว่าจะอ้อมของธาตุทั้ง 5 นี้จะอยู่ในโครงสร้างของผลึก ซึ่งไม่ใช่มีแต่ธาตุทั้ง 5 นี้อย่างเดียว

ตาราง 2.1 ตารางแสดงค่าซึมซาบได้ของสารต่างๆ

สาร	$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$
บิสมัท	0.99983
เงิน	0.99998
ทองแดง	0.99999
น้ำ	0.99999
อากาศ	1.0000004
อะลูมิเนียม	1.00002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โคบอลต์	250
นิกเกิล	600
เหล็กหล่อ	2000
เหล็กเส้น	5000
แกนเหล็กหม้อแปลง	7000
ซูเปอร์อัลลอย	1,000,000
48 เปอร์อัลลอย	6000
78 เปอร์อัลลอย	7000
โมเปอร์อัลลอย	9000
สินิแมก	3500
โมนิแมก	3500
มิวเมทอล	9000

2.11 ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) ใช้สัญลักษณ์ \mathcal{R}

ความต้านทานแม่เหล็ก คือความต้านทาน ที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็กซึ่งอาจจะ เป็นอากาศ หรือ วัสดุอะไรก็ได้ที่อยู่บริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กส่งอำนาจไปถึงซึ่งจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ ความต้านทานนี้จะต้านทานการส่งเส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจาก แหล่งกำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กให้มีค่าลดลง ความต้านทานแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ความยาวของแกนเหล็กหรือวัตถุคือ l ที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน ไปเพื่อให้ครบวงจรของตัวมันเอง เป็นสัดส่วนกลับกันกับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก คือ A ความต้านทานแม่เหล็กเป็นการแสดง คุณสมบัติของวัตถุที่มีการต้านต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า ความต้านทาน โดย ความต้านทานแม่เหล็ก มีหน่วยวัดเป็น $(A-t/Wb)$

ถ้าพิจารณาแกนแม่เหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัด A ตารางเมตร และมีความยาวของ เส้นรอบแกนโดยเฉลี่ย l เมตร พันด้วยขดลวดจำนวน N รอบ มีกระแสไหลผ่าน I แอมแปร์ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\phi = BA$: เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด

$\mathfrak{I} = HI$: แรงเคลื่อนแม่เหล็ก

$$\frac{\phi}{\mathfrak{I}} = \frac{BA}{HI} = \mu_r \mu_0 \frac{A}{l} \quad (2.6)$$

$$\phi = \frac{\mathfrak{I} \mu_r \mu_0 A}{l} \quad (2.7)$$

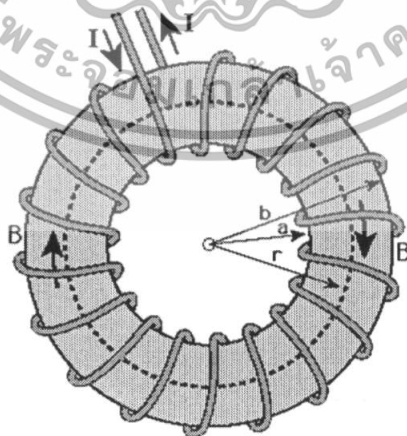
$$\phi = \frac{\mathfrak{I}}{(l / \mu_r \mu_0 A)} \quad (2.8)$$

$\frac{l}{\mu_r \mu_0 A}$ คือ ค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) มีหน่วยเป็น (A/wb)

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.9)$$

2.12 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์แม่เหล็ก ($B \sim H$ Curve)

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับ ความซึมซาบได้ ดียิ่งขึ้น จึงขอยกตัวอย่างของ สนามแม่เหล็กที่เกิดกับขดลวดที่เป็นวงกลมเรียกว่า ทอรอยด์ (toroid)



ภาพที่ 2.10 แสดงลักษณะของทอรอยด์

การที่ขดลวดโซลินอยด์ให้เป็นวงกลมนั้นมีความยาวเฉลี่ย 1 หน่วยความยาว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำค่าเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สนามแม่เหล็กภายในไม่เปลี่ยนค่า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก แต่ถ้านำเอาแกนเหล็ก ไม่ว่าจะกลมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

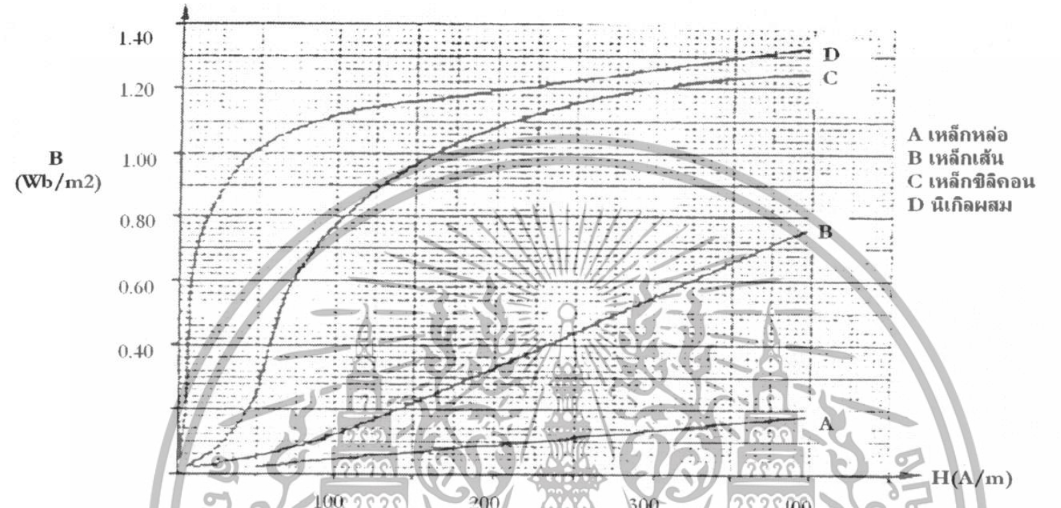
มาใส่ภายในขดลวดโซลีนอยด์จะทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เปลี่ยนไปและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะมีค่าเพิ่มเป็นหลายร้อยเท่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเดิม ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะมีค่าเท่ากับ μ_r ซึ่งหมายความว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าของ μ_r หรือ $\frac{\mu}{\mu_0}$ ของสารนั้นๆ

เส้นโค้งแสดงความเป็นแม่เหล็ก เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) จากรูปที่ 2.10 ขดลวดทอโรอยด์นั้น ถ้าเพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้ค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เพิ่มขึ้นตามถ้าเราเริ่มต้นจากกระแสเป็นศูนย์ และมีเครื่องมือวัดค่า เส้นแรงแม่เหล็กในแกนทอโรอยด์ เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) จากรูปที่ 2.10 ถ้าเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแกนเหล็ก เช่น ทอโรอยด์ เราจะได้เส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 2.11 และรูปที่ 2.12 แต่ความชันชันได้ จะไม่คงที่เมื่อมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ค่า μ จะเพิ่มจนถึงค่าสูงสุดเมื่อค่า μ เพิ่มจนถึงค่าสูงสุดแล้ว การเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็ก ก็จะไม่ทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นมากนัก จนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว จะทำให้ค่า μ ลดลงเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอีกดังแสดงในรูปที่ 2.13 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) บางครั้งเรียกว่า ($B-H$ Curve) หรือเส้นโค้งการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก หรือเส้นโค้งก่าเน็ดแม่เหล็ก

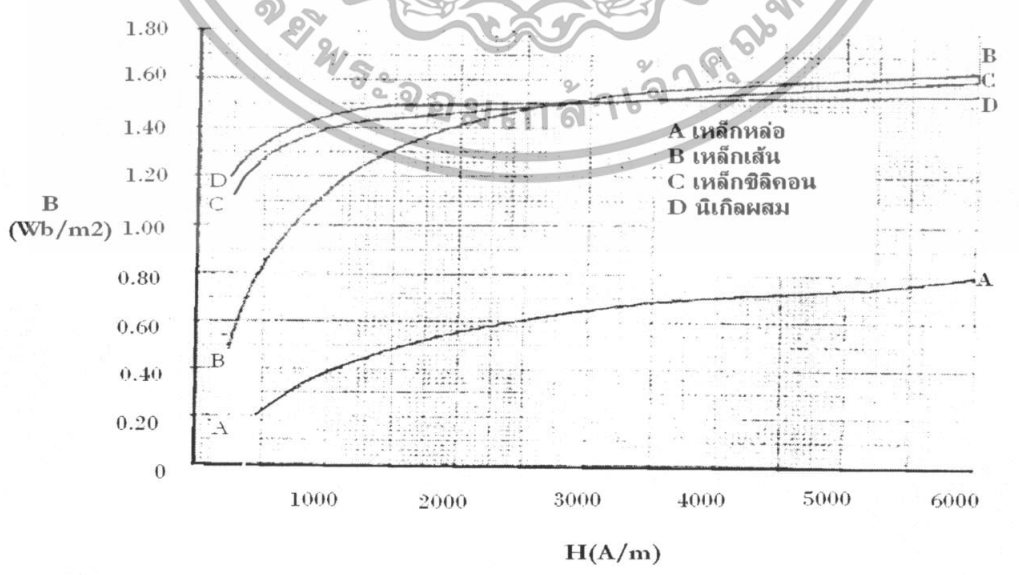
- สารใดมีค่า μ_r มากกว่า 1 เล็กน้อยสารนั้นจัดเป็นชนิดพาราแมกเนติก (Paramagnetic) เช่น อากาศ ไม้
- สารใดมีค่า μ_r น้อยกว่า 1 สารนั้นจัดเป็นชนิด ไดอาแมกเนติก (Diamagnetic) เช่น พวาก อะลูมิเนียม หรือสารตัวนำสมบรูณ์ ซึ่งมี $\mu_r = 0$
- สารใดที่ค่า μ_r สูงมากๆ จัดเป็นพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) โดยทั่วไปค่า μ_r จะอยู่ระหว่าง 1,000 - 1,000,000 โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารแม่เหล็ก และแม้แต่ในสารชนิดเดียวกันที่ค่าของความเข้มสนามแม่เหล็กต่างกัน ค่าของ μ_r จะไม่เท่ากัน

ค่าความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรงและจะมีระดับหนึ่ง ถึงแม้ว่าเราจะเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กให้มากขึ้นไปอีกแต่ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะไม่เปลี่ยนแปลงจุดที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปนี้ เราเรียกว่า จุดอิ่มตัวของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของสารนั้นและค่าของ μ_r ที่มีขนาดสูงที่สุดของสารใดๆ จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาจากการลากเส้นตรงไปสัมผัสกับเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H นี้ เราเรียกว่าเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก หรือเส้นโค้งการอ้อมตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก ณ จุดสัมผัสระหว่างเส้นตรงที่ลากจากจุดเริ่มต้นของเส้นโค้งและเส้นสัมผัสกับเส้นโค้งทำให้อ่านค่า B กับ H ได้ และนำค่า B และ H ที่อ่านได้ในแต่ละจุดนั้นไปแทนค่าในสมการ



ภาพที่ 2.11 แสดงเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ($B-H$ Curve) เมื่อ $H < 400$ แอมแปร์ต่อเมตร

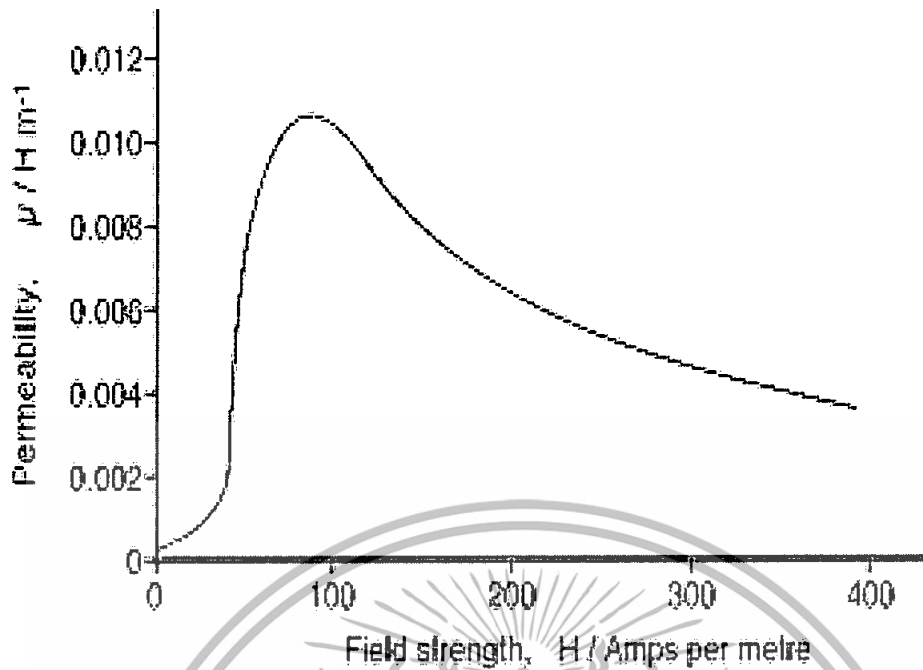


ภาพที่ 2.12 แสดงเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ($B-H$ Curve) เมื่อ $H > 400$ แอมแปร์ต่อเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไปสำหรับกรณีการใช้งานที่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.13 แสดงเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มขั้วกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ($\mu - H$ Curve)

2.13 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

ถ้าทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กของวงแหวนทอรอยด์เปลี่ยนแปลง โดยวัดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองแทนด้วยเส้นโค้ง OAC ถ้าลดความเข้มสนามแม่เหล็กลงเป็นศูนย์จะยังมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเหลืออยู่คือ OD มีชื่อเรียกว่า อำนาจแม่เหล็กตกค้าง (Residual magnetic) หรือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กคงเหลือ (Remanent flux density)

ถ้าต้องการให้อำนาจแม่เหล็กตกค้างเป็นศูนย์ จะต้องเพิ่มค่าของความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้าม ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลง จนกระทั่งถึงค่า OE เส้นแรงแม่เหล็กจะลดลงเป็นศูนย์ ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก OE ที่ทำให้อำนาจแม่เหล็กตกค้างเป็นศูนย์มีชื่อเรียกว่า Coercive force

การเพิ่มขึ้นต่อไปของความเข้มสนามแม่เหล็กจะเป็นเหตุให้เกิดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม ดังแทนด้วยเส้นโค้ง EF จะสังเกตเห็นว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กมากที่สุดในทิศทางบวกคือ OK จะมีค่าเท่ากับ OL ในทิศทางลบ และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมากที่สุดในทิศทางบวกคือ KC จะมีค่าเท่ากับ LF ในทิศทางลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงค่าจาก OL ไปเป็น OK ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงตามเส้นโค้ง FGC คล้ายกับเส้นโค้ง และรูปปิดของ CDEFGC มีชื่อเรียกว่า วงของฮีสเทอรีซิส (Hysteresis loop)

การหาของฮีสเทอรีซิสของวงแหวนเหล็กอันหนึ่ง จะสังเกตเห็นว่าค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็กแต่ละค่าจะอยู่บนเส้นโค้งการเกิดสนามแม่เหล็กเส้นเดียวกัน จุดยอดของฮีสเทอรีซิสแต่ละวงคือ A C D และ E โดยจะวางอยู่บนเส้นโค้ง B-H Curve ที่หาได้โดยการเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะพบว่าอำนาจแม่เหล็กตกค้างขึ้นอยู่กับค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นในวง A อำนาจแม่เหล็กตกค้างคือ OX ส่วนวง E ค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็กเข้าใกล้จุดอิ่มตัว (saturation) อำนาจแม่เหล็กตกค้างคือ OY

อำนาจแม่เหล็กตกค้างที่ได้รับเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุด ถึง จุดอิ่มตัวของวัสดุ มีชื่อเรียกว่า รีมาเนนซ์ (Remanence) ของวัสดุนั้น



ภาพที่ 2.14 แสดงวงของฮีสเทอรีซิสและเส้นโค้งการเกิดสนามแม่เหล็ก

2.14 การสูญเสียเนื่องจากฮีสเทอรีซิส

การใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำวงจรขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก ให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในแต่ละรอบ (Cycle) การสูญเสียภายในแกนเหล็ก อันเกิดจากฮีสเทอรีซิสเท่ากับพื้นที่ภายในวงฮีสเทอรีซิสนั้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กและชนิดของสารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกน ดังนั้นค่าโดยประมาณของการสูญเสียจากฮีสเทอรีซิสของสารแม่เหล็กที่ความถี่ f หาได้จาก

$$P_h = K_h f B_m^n \quad (2.10)$$

P_h = การสูญเสียจากฮีสเตอร์ซิส มีหน่วยเป็น W

K_h = ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็กที่ทำการทดลอง

f = ค่าความถี่ไฟฟ้าแหล่งจ่าย มีหน่วยเป็น Hz

n = สไตน์เมทซ์เอกซ์โพเนนซ์ (Steinmetz exponent)

จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 - 2.0 แต่โดยทั่วไปใช้ $n=1.6$

2.15 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss)

กระแสไหลวนจะทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นเนื่องกระแสไหลวนอยู่ในสารแม่เหล็ก โดยถ้าทำให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในตัวนำนั้น แต่ถ้าเราใส่แกนแม่เหล็กเข้าไปในขดลวดที่มีกระแสสลับไหลอยู่ ก็จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะของคลื่นรูปไซน์ด้วย การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในแกนเหล็ก และแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในแกนเหล็กนี้จะเป็นตัวทำให้เกิดมีกระแสไหลวนภายในแกนเหล็กนั้น ซึ่งเรียกว่ากระแสไฟฟ้านี้ว่ากระแสไหลวน

กระแสไหลวนจะเกิดขึ้นในแกนเหล็กทุก ๆ ชนิดของสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า กระแสนี้จะไหลผ่านความต้านทานไฟฟ้าของสารแม่เหล็กซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ความร้อนเกิดขึ้นนี้เกิดจากกำลังสูญเสียซึ่งมีค่า I^2R และเนื่องจากความต้านทานของเหล็กมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสารชนิดอื่นๆ ดังนั้นกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กจึงมีค่าค่อนข้างสูง และขนาดของกระแสไหลวนจะขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงของแกนเหล็ก การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงของแกนเหล็ก การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนเมื่อแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงแบบรูปคลื่นรูปไซน์สามารถหาได้จากสมการข้างล่างดังนี้

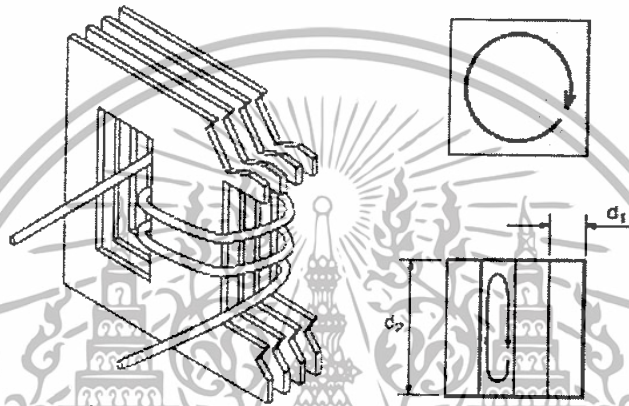
$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \quad (2.11)$$

P_e = การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

K_e = ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็ก

ขนาดของกระแสไหลวนขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงของเส้นแม่เหล็กความถี่ และค่าความต้านทานไฟฟ้าของแกนเหล็ก การลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนทำได้โดยการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้แกนที่เป็นแผ่นเหล็กบางๆ (Laminated sheet steel) อัดซ้อนเข้าด้วยกัน โดยในแต่ละแผ่น จะใช้สารเคลือบผิวที่มีค่าความต้านทานสูง เช่น ฉาบด้วยน้ำมันวานิชซึ่งจะทำให้กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก ที่ใช้แผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกันมีค่าลดลงอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้การเกิดกำลังการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนมีค่าลดลงหรือมีค่าน้อยลงตามไปด้วยกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กที่มีเนื้อเดียวกันตลอด ดังนั้นเราจึงไม่นำเอาแกนเหล็กที่มีเนื้อเดียวกันตลอด หรือแกนเหล็กตันมาใช้กับ แรงดันแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับ และในแกนเหล็กที่ใช้แผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกันแสดงดังรูป 2.15



ภาพที่ 2.15 แสดงการเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส และกระแสไหลวน รวมกันเรียกว่า การสูญเสียในแกนเหล็ก(Core loss) การสูญเสียในแกนเหล็กของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำงานโดยมีแรงดันและความถี่หรือความเร็วคงที่ เช่น หม้อแปลง, มอเตอร์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีค่าโดยประมาณคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามโหลด

2.16 การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า (AC Excitation)

ในวงจรแม่เหล็กเมื่อเราจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับเข้าไปในขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็กที่ไม่มีช่องอากาศ โดยความยาวของวงจรแม่เหล็ก (l_c) และพื้นที่ตัดของวงจรแม่เหล็กเป็น (A_c) จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามแรงเคลื่อนที่สนามแม่เหล็ก (m.m.f.) ที่ป้อนให้กับวงจรแม่เหล็ก

ในระบบการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ลักษณะของรูปสัญญาณ (Wave form) ของศักดาไฟฟ้าจะมีรูปสัญญาณตามแบบของ Sinusoidal function ที่แปรเปลี่ยนกับเวลา t ซึ่งจะมีผลให้เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) มีการเปลี่ยนแปลงตาม Sinusoidal function ด้วย ดังนั้นเราจะ

เอกสารสามารถแสดงลักษณะของ Exciting current และแสดงถึงความสูญเสียในสนามแม่เหล็กมาใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นวงจรแม่เหล็ก เมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวของไฟฟ้ากระแสสลับ(Steady state AC operation) กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก ϕ เป็นแบบ Sinusoidal

$$\phi(t) = \phi_{\max} \sin \omega t \quad (2.12)$$

$$= A_c B_{\max} \sin \omega t \quad (2.13)$$

เมื่อกำหนดให้

ϕ_{\max} : เป็นค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Wb

B_{\max} : เป็นค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น T

$\omega = 2\pi f$: เป็นความเร็วเชิงมุม (Angular velocity) มีหน่วยเป็น rad/sec

F : เป็นความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับมีหน่วยเป็น

จาก Faraday's Law สามารถหาการเหนี่ยวนำตักตาไฟฟ้า (Induced voltage) เมื่อจำนวนรอบขดลวดที่พันอยู่เท่ากับ N รอบ โดยการกำหนดให้ว่า ในวงจรแม่เหล็กเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องกับขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็ก มีค่าเท่ากันทุกรอบ

$$e(t) = \frac{Nd\phi(t)}{dt} \quad (2.14)$$

$$= \omega N A_c B_{\max} \cos \omega t \quad (2.15)$$

$$= E_{\max} \cos \omega t \quad (2.16)$$

$$E_{\max} = 2\pi f N A_c B_{\max} \quad (2.17)$$

ในทางปฏิบัตินิยมใช้ค่า rms เมื่อระบบทำงานอยู่ในสภาวะคงตัว

$$E_{rms} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (2.18)$$

$$= \frac{2\pi f N A_c B_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (2.19)$$

$$E_{rms} = 4.44 f N A_c B_{\max} \quad (2.20)$$

ในการทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก จะต้องมีการใส่ไฟฟ้าป้อนให้กับขดลวด เราเรียกกระแสนี้ว่า กระแสกระตุ้น (Exciting current, i_ϕ) สำหรับสารแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติเป็นแบบ non-linear เพื่อเส้นแรงแม่เหล็กใน จะมีผลทำให้กระแสกระตุ้นมีรูปร่างแตกต่างไปจากรูปสัญญาณของเส้นแรงแม่เหล็กตามสภาพความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17 กระแสกระตุ้นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC exciting current)

เมื่อป้อนศักดาไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็ก ที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ในลักษณะของ Hysteresis loop ผลที่ออกมาเมื่อเราป้อนศักดาไฟฟ้าเป็น Sinusoidal wave form ผลจะทำให้ ϕ หรือ B ในแกนเหล็กจะมีรูปของสัญญาณเป็นแบบ Sinusoidal กระแสที่จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเป็นแบบ Sinusoidal จะมีรูปร่างความสัมพันธ์ตาม Hysteresis loop คือไม่เป็น Sinusoidal

จากการป้อนกระแสสลับที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ในแกนเหล็กเปลี่ยนแปลงตาม Sinusoidal function จะได้ค่า E_{rms} และค่า I_{ϕ} ซึ่งเป็น rms exciting current จาก

$$E_{rms} = 4.44 f N A_c B_{max} \quad (2.21)$$

$$I_{\phi, rms} = \frac{I_c H_{rms}}{N} \quad (2.22)$$

ดังนั้นสามารถหาค่า rms voltage (VA) ที่ต้องการสำหรับกระตุ้นแกนให้ได้เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) ตามที่ต้องการ

$$E_{rms} I_{rms} = 4.44 f N A_c B_{max} \frac{I_c H_{rms}}{N} \quad (2.23)$$

$$= 4.44 f B_{max} H_{rms} (A_c I_c) \quad (2.24)$$

สำหรับสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น ρ_c kg/m³

เหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็กจะหนักเท่ากับ $\rho_c A_c l_c$ kg

ซึ่งสามารถหาค่า VA/kg ที่ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุด B_{max} แต่ละค่าหาได้จาก

$$P_a = \frac{E_{rms} I_{rms}}{\rho_c l_c A_c} = \frac{4.44}{\rho_c} f B_{max} H_{rms} \quad (2.25)$$

เมื่อ P_a เป็นค่า rms volt ampere per kilogram มีหน่วยเป็น VA/kg

บทที่ 3

วงจรแม่เหล็ก

3.1 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuits)

คือ เส้นทางหรือแนวที่เส้นแรงแม่เหล็กส่วนใหญ่ไหลผ่าน ซึ่งได้แก่ส่วนที่เป็นสารแม่เหล็ก และส่วนที่เป็นอากาศ เส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่ไม่ได้ไหลตามทิศทางที่กำหนดไว้ เรียกว่า "ลีสกเกฟลักซ์" (leakage flux)

วัสดุแม่เหล็ก

$$\mu = \mu_r \mu_o$$

(3.1)

μ : Permeability (H/m)

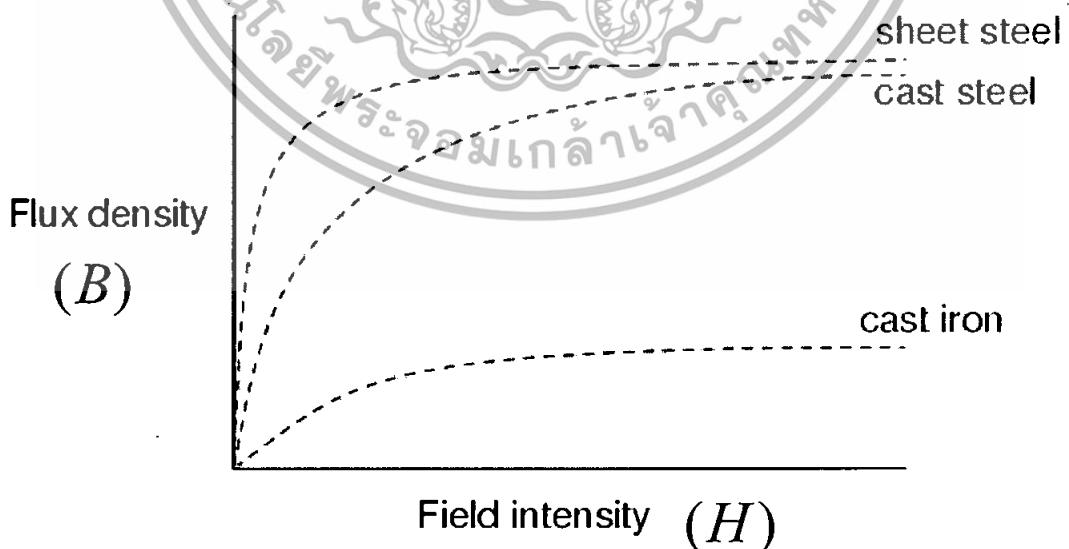
μ_o : Free-space Permeability $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

μ_r : Relative Permeability

1) พาราแมกเนติก ($\mu_r = 1.0$)

2) ไดอามแมกเนติก ($\mu_r < 1.0$)

3) เฟอร์โรแมกเนติก ($\mu_r \gg 1.0$)



ภาพที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของค่า $B-H$ ของ Ferromagnetic material ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

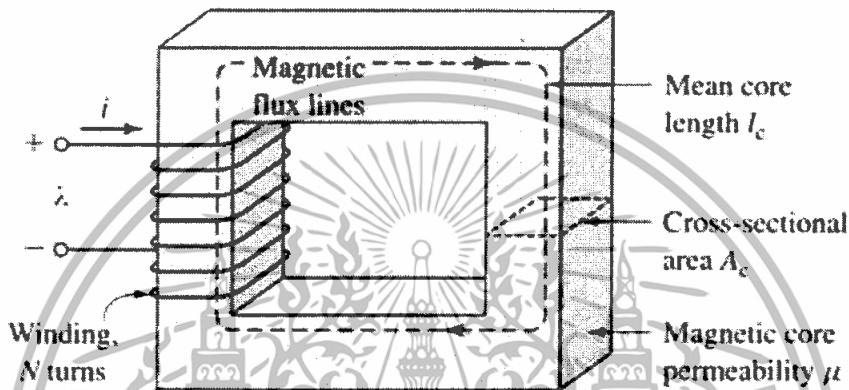
$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \quad (3.2)$$

B : Magnetic flux density (Tesla , Wb / m^2)

H : Magnetic field intensity(A-t/m , A/m)

$$\mathfrak{F} = Ni = \oint H \cdot dl \quad (3.3)$$

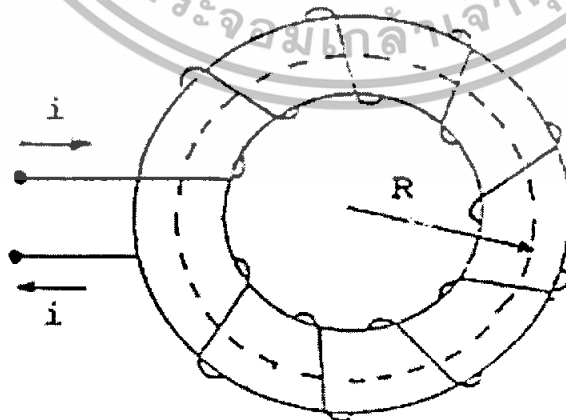
\mathfrak{F} : Magnetomotive force , mmf (A-t)



ภาพที่ 3.2 แสดงวงจรแม่เหล็กประกอบด้วยขดลวดพันรอบแกนเหล็ก

จากรูปจะเห็นว่า

$$\mathfrak{F} = Ni = \oint H \cdot dl = H \cdot l_c \quad (3.4)$$

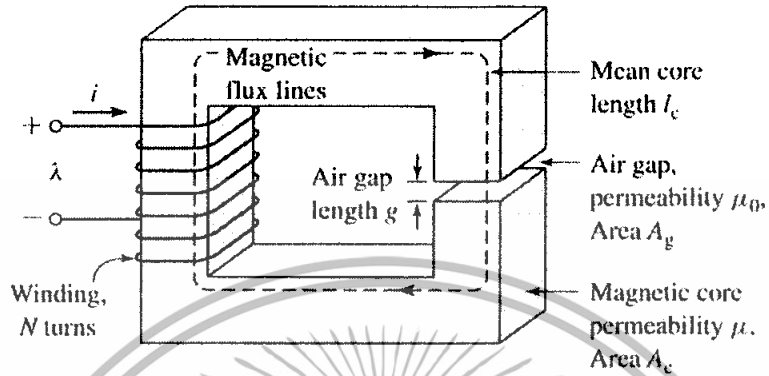


ภาพที่ 3.3 แสดงวงจรแม่เหล็กประกอบด้วยขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบทอรอยด์

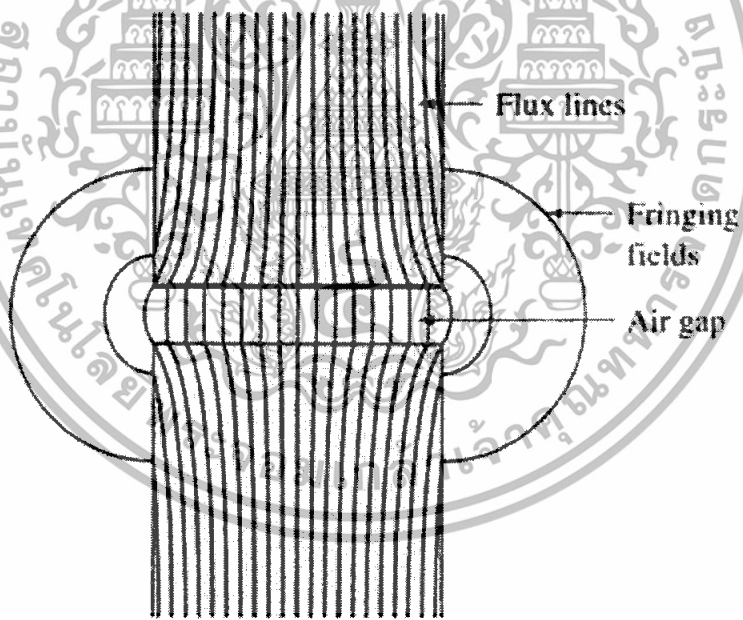
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นว่า

$$\mathfrak{F} = Ni = \oint H \cdot dl = H(2\pi r) \quad (3.5)$$



ภาพที่ 3.4 แสดงวงจรแม่เหล็กที่มีช่องอากาศ



ภาพที่ 3.5 แสดงปรากฏการณ์ Fringing

จากรูปจะเห็นว่า

$$\mathfrak{F} = Ni = \oint H \cdot dl = H_c l_c + H_g g \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ Magnetic flux ϕ (Wb)

$$\phi = \int B \cdot dA \quad (3.7)$$

$$\phi_c = B_c A_c \quad (3.8)$$

$$B_c = \frac{\phi}{A_c} \quad : \text{Core} \quad (3.9)$$

$$B_g = \frac{\phi}{A_g} \quad : \text{Air gap} \quad (3.10)$$

ไม่คิดปรากฏการณ์ Fringing

$$B_g = B_c = \frac{\phi}{A_c} \quad (3.11)$$

$$\mathfrak{I} = Ni = \frac{B_c l_c}{\mu} + \frac{B_g g}{\mu_0} \quad (3.12)$$

$$\mathfrak{I} = Ni = \phi \frac{l_c}{\mu A_c} + \phi \frac{g}{\mu_0 A_g} \quad (3.13)$$

กำหนดให้ Reluctance : \mathfrak{R} (A-t/Wb)

$$\mathfrak{R}_c = \frac{l_c}{\mu A_c} \quad (3.14)$$

$$\mathfrak{R}_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} \quad (3.15)$$

$$\mathfrak{I} = Ni = \phi (\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_g) \quad (3.16)$$

ถ้า $\mu \gg \mu_0$ แล้ว $\mathfrak{R}_c \ll \mathfrak{R}_g$

$$\phi \approx \frac{Ni}{\mathfrak{R}_g} = Ni \frac{\mu_0 A_g}{g} \quad (3.17)$$

3.2 ค่าความเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้า

เมื่อกำหนดให้

ϕ_{\max} : เป็นค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Wb

B_{\max} : เป็นค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก หน่วยเป็น T

$\omega = 2\pi f$: เป็นค่าความเร็วเชิงมุม มีหน่วยเป็น rad/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f : เป็นความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ มีหน่วยเป็น Hz

จาก faraday's law สามารถหาการเหนี่ยวนำตัดค่าไฟฟ้า (induced voltage)

$$e(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (3.18)$$

$$= \omega N A_c B_{\max} \cos \omega t \quad (3.19)$$

$$= E_{\max} \cos \omega t \quad (3.20)$$

เมื่อ $E_{\max} = 2\pi f N A_c B_{\max}$

หาค่า rms induced voltage (E_{rms})

$$E_{rms} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (3.21)$$

$$= \frac{2\pi f N A_c B_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (3.22)$$

$$E_{rms} = 4.44 f N A_c B_{\max} \quad (3.23)$$

3.3 ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance)

λ : Flux linkage (Wb-t)

$$\lambda = N\phi \quad (3.24)$$

จากกฎของ Faraday

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.25)$$

$$e = L \frac{di}{dt} \quad (3.26)$$

$$L \frac{di}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.27)$$

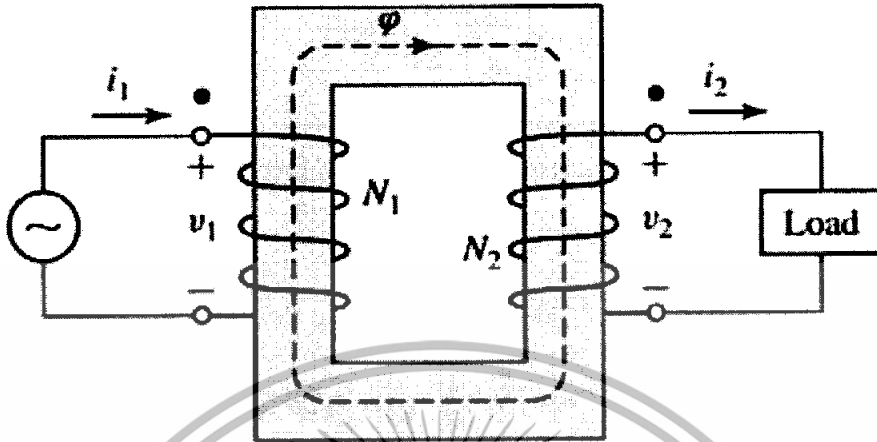
$$L = N \frac{d\phi}{di} = \frac{d\lambda}{di} \quad (3.28)$$

ในช่วง Linear

$$L = \frac{N\phi}{i} = \frac{\lambda}{i} \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 Self – Inductance and Mutual inductance



ภาพที่ 3.6 แสดงวงจรแม่เหล็กที่ขดลวด 2 ชุด

$$\mathcal{F} = Ni = N_1 i_1 + N_2 i_2 \tag{3.30}$$

$$\phi = (N_1 i_1 + N_2 i_2) \frac{\mu_0 A_c}{g} \tag{3.31}$$

ϕ : Resultant flux

Flux linkage with coil 1

$$\lambda_1 = N_1 \phi = N_1^2 \frac{\mu_0 A_c}{g} i_1 + N_1 N_2 \frac{\mu_0 A_c}{g} i_2 \tag{3.32}$$

Flux linkage with coil 2

$$\lambda_2 = N_2 \phi = N_1 N_2 \frac{\mu_0 A_c}{g} i_1 + N_2^2 \frac{\mu_0 A_c}{g} i_2 \tag{3.33}$$

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2 \tag{3.34}$$

$$\lambda_2 = L_{21} i_1 + L_{22} i_2 \tag{3.35}$$

Self – inductance with coil 1

$$L_{11} = N_1^2 \frac{\mu_0 A_c}{g} \tag{3.36}$$

Self – inductance with coil 2

$$L_{22} = N_2^2 \frac{\mu_0 A_c}{g} \tag{3.37}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mutual inductance of coil 1 and coil 2

$$L_{12} = N_1 N_2 \frac{\mu_0 A_c}{g} = L_{21} \quad (3.38)$$

3.5 พลังงานสะสมในสนามแม่เหล็ก (Energy storage in magnetic field)

$$p = ie = i \frac{d\lambda}{dt} \quad \text{joules / sec (W)} \quad (3.39)$$

$$W = \int_0^\lambda \left(\frac{d\lambda}{dt}\right) i dt = \int_0^\lambda \left(N \frac{d\phi}{dt}\right) i dt = \int_0^\phi (Ni) d\phi \quad \text{joules} \quad (3.40)$$

ถ้าความสัมพันธ์เป็นแบบ Linear จะได้ energy storage

$$W = \int_0^\lambda \left(\frac{\lambda}{L}\right) d\lambda = \frac{1}{2L} \lambda^2 = \frac{1}{2} Li^2 \quad (3.41)$$

$$W = \int_0^\lambda \left(\frac{d\lambda}{dt}\right) i dt = \int_0^\lambda \left(N \frac{d\phi}{dt}\right) i dt = \int_0^\phi (Ni) d\phi \quad (3.42)$$

จาก $\mathcal{N} = Ni = HI$ และ $d\phi = AdB$

ดังนั้น

$$Nid\phi = (HI)(AdB) = (lA)(HdB) \quad (3.43)$$

โดยที่ lA เป็นปริมาตรของแกนเหล็ก ฉะนั้นพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตรจะเท่ากับ

$$\text{Energy density } W_v = \frac{W}{lA} = \int_0^B (H) dB \quad \text{joules / m}^3 \quad (3.44)$$

ถ้าความสัมพันธ์เป็นแบบ Linear จะได้

$$W_v = \int_0^B (H) dB = \int_0^B \frac{B}{\mu} dB = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} \quad (3.45)$$

$$W_v = \int_0^B (H) dB = \int_0^B (\mu H) dH = \frac{1}{2} \mu H^2 \quad (3.46)$$

$$W_v = \frac{1}{2} BH = \frac{1}{2\mu} B^2 \quad (3.47)$$

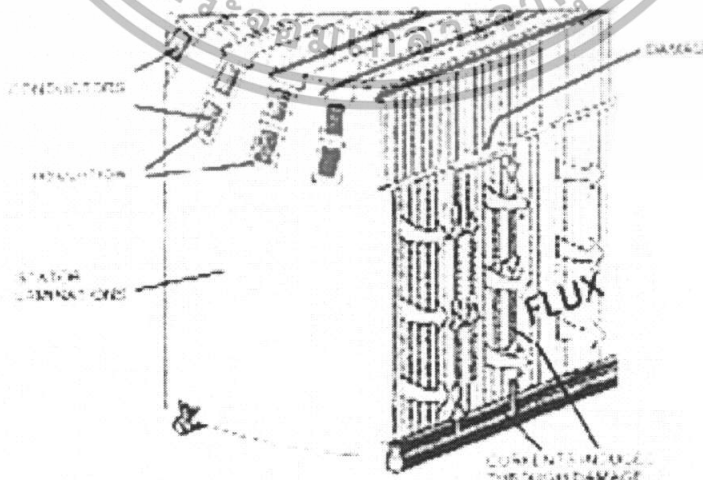
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นสารเคลือบผิวในแกนเหล็ก

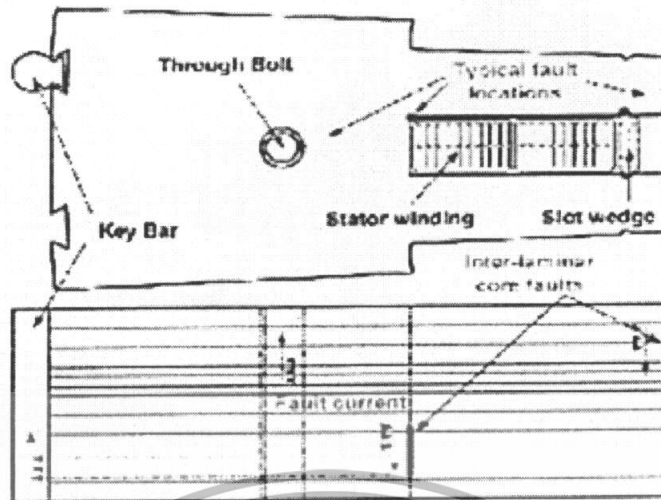
การลดค่าความสูญเสียเนื่องมาจากกระแสไหลวนในวงจรแม่เหล็ก นั้น จำเป็นต้องใช้แผ่นเหล็กบางๆ มาเรียงซ้อนกัน ดังนั้นแกนสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้า กระแสสลับนั้นจึงทำขึ้นจากแผ่นเหล็กบางๆหลายแผ่นมาเรียงซ้อนกัน โดยแต่ละแผ่นจะใช้สารเคลือบผิวเป็นฉนวน ซึ่งสารนี้มีคุณสมบัติในการต้านทานไฟฟ้าสูง เพื่อป้องกันกระแสไหลถึงกันระหว่างแผ่น ถ้าหากฉนวนถูกทำลาย หรือเกิดเสื่อมสภาพไป ฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลในแกนสเตเตอร์นั้นสามารถทำให้เกิดกระแสไหลวนระหว่างแผ่นเหล็กที่เสียหายนั้นได้ กระแสไหลวนนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในแกนสเตเตอร์และอาจทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ สาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของในแกนเหล็กเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นสารเคลือบผิวในแกนเหล็ก

3.6.1 ความหลวมของแกนสเตเตอร์

แกนสเตเตอร์ต้องถูกยึดอย่างแน่นหนาและปลอดภัยเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงภายใต้แรงแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของฟลักซ์ในแกนเหล็กเพราะการยึดแกนเหล็กนั้นไม่ใช่เรื่องง่าย เนื่องจากแกนเหล็กและเฟรมนั้นมีโครงสร้างที่ซับซ้อน แม้ว่าในกระบวนการผลิตเริ่มต้นนั้นมีระดับของความแน่นหนายึดติดกันตามความต้องการแล้ว แต่ในหลายๆแกนก็มีปัญหาการหย่อนสมรรถภาพลงในเมื่ออยู่ในสภาวะการทำงาน เมื่อเกิดการหย่อนสมรรถภาพแผ่นเหล็กที่เรียงซ้อนกันนี้จะได้รับผลจากการสั่นสะเทือนและทำให้ฉนวนหลุดออกจากแผ่นเหล็กได้ หรืออาจเกิดจากตัวจับยึดของซีแกนสเตเตอร์นั้นไปทำให้แผ่นเหล็กที่ติดกันนั้นเกิดการตัดขาด จากสาเหตุอย่างใดอย่างหนึ่งนั้นจะทำให้มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดการ Shot กันระหว่างแผ่นเหล็กที่อยู่ติดกันและทำให้เกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3.8 การเกิดกระแสไหลวนเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวน โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.9 โครงสร้างของแกนสเตเตอร์ที่เกิดการเสียหายจาก Wedge และกระแสไฟไหลวนที่เกิดขึ้น

3.6.2 แกนเหล็กเกิดการเสียหายขณะที่พันขดลวดที่แกนสเตเตอร์

เนื่องจากต้องการรั้งขดลวดในร่องสเตเตอร์ให้แน่นหนาจึงต้องมีลิ้ม (wedge) ดันขดลวดไว้ในร่องสลิต ที่ผิวบริเวณใกล้เคียงปากกร่อง การใส่ลิ้มนี้ต้องใช้ทักษะและประสบการณ์อย่างสูง อย่างไรก็ตามแกนเหล็กเคลือบฉนวนนี้ก็สามารถเกิดการเสียหายจากลิ้มได้ซึ่งอาจทำให้เกิดกระแสไหลวนระหว่างแผ่นเหล็กที่ติดกันได้ ตามรูปที่ 2.24

3.6.3 ฉนวนเคลือบแกนเหล็กเกิดการหลุดลอกเมื่อทำการทดสอบขดลวดสเตเตอร์

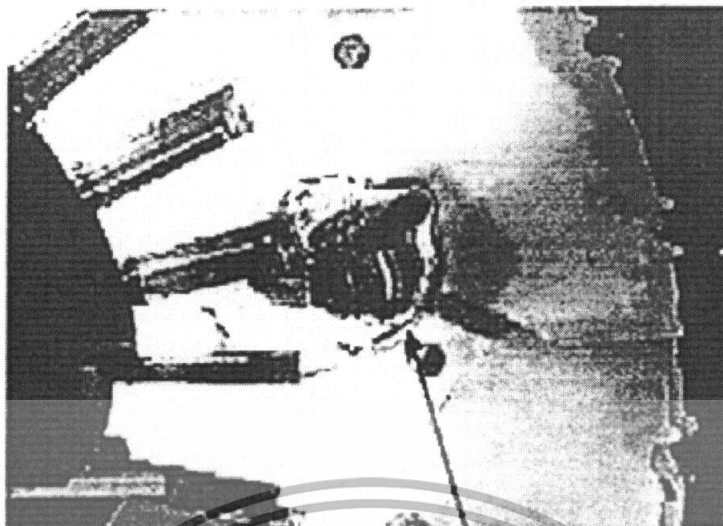
ขดลวดที่พันบนแกนสเตเตอร์ในเครื่องกลไฟฟ้าบางชนิดต้องการการทดสอบที่ใช้แรงดันสูง ซึ่งการทดสอบอาจทำให้เกิดความเค้นทางไฟฟ้าที่ทำต่อฉนวนมากเกินไป อาจทำให้เกิดฉนวนเกิดหลุดออก

3.6.4 ความเสียหายของแกนสเตเตอร์เนื่องจากไฟไหม้

ในสภาวะที่ขดลวดนั้นพันผิดไป อาจทำให้เกิดไฟไหม้ในร่องสลิต ซึ่งไฟไหม้นั้นเกิดที่ด้านข้างของแผ่นเหล็กย้อมจะทำให้ฉนวนเกิดหลุดออกจากตัวแผ่นเหล็กได้

3.6.5 ความเสียหายเชิงกลโดยเกิดจากการกระแทก

บางครั้งอาจเกิดความเสียหายที่บริเวณผิวของซี่แกนเหล็ก ซึ่งอาจเกิดเนื่องมาจากจากการชนส่ง ชนย้าย ทำให้ส่วนประกอบบางอย่างที่หลวมอยู่แล้วเกิดหล่นหายไป หรืออย่างเช่น เมื่อมีการปลดโรเตอร์ อาจทำให้แกนโรเตอร์ไปกระทบบริเวณที่ติดกับสเตเตอร์ ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งนั้น ผิวของสเตเตอร์ย่อมได้รับแรงกระแทก และทำให้เกิดอันตรายต่อแกนเหล็กได้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.10 ความเสียหายของแกนสแตเตอร์เนื่องจากไฟไหม้

3.6.6 สาเหตุอื่นๆ

สาเหตุอื่นๆ ที่สามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อแกนเหล็กเคลือบฉนวนได้นั้น ยังมีอีกหลายสาเหตุ เช่น ฉนวนที่ป้อนของแกนเหล็กเกิดความเสียหาย ความเสียหายของฉนวนจากท่อหล่อเย็น(water cooling tubes) ที่ติดตั้งบนแกนสแตเตอร์ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดความผิดปกติ แต่สาเหตุเหล่านี้โดยทั่วไปนั้นเกิดได้ค่อนข้างยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบการทดลอง

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แกนเหล็กปกติขนาดพื้นที่หน้าตัด $0.085 \times 0.009 \text{ m}^2$
2. แกนเหล็กที่ทำการเชื่อมภายใน 50% ของความยาวแกนขนาด $0.1 \times 0.009 \text{ m}^2$
3. Digital Oscilloscope (Yogokawa DL 1640)
4. Circuit Breaker
5. Variac 1 Phase 0-270 V
6. หม้อแปลงขนาด 300/2
7. True RMS Multimeter
8. Amp Meter
9. สายไฟขนาดต่างๆ
10. Search Coil ขนาด กว้าง 3 mm. ยาว 10 mm. สูง 3 mm.
11. Search Coil ขนาด กว้าง 2 mm. ยาว 10 mm. สูง 4 mm.

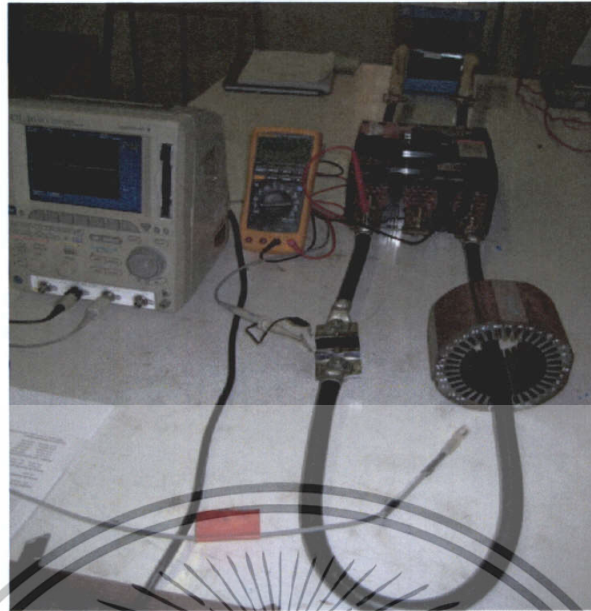
4.2 ขั้นตอนการทดลอง

4.2.1 การทดสอบ Core Loss ของแกนเหล็ก

1. ทำการทดลองหา Core Loss ของแกนเหล็กที่ปกติพื้นที่หน้าตัด $0.085 \times 0.009 \text{ m}^2$ ที่เราใช้กันโดยทั่วไป โดยการกระตุ้นด้วยกระแสสูง โดยการพันสายไฟเพียงรอบเดียว เพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กภายในแกนเหล็ก ซึ่งเราจะกำหนดค่าจากค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) มีค่าตั้งแต่ 0.5-2 เทสลา ตามสมการที่ 4.1 แล้วทำการวัดค่าและเก็บค่าต่างๆ ด้วย Digital Oscilloscope แล้วนำไปคำนวณหาค่า Core Loss

$$E_{rms} = 4.44 f N A_c B_{max} \quad (4.1)$$

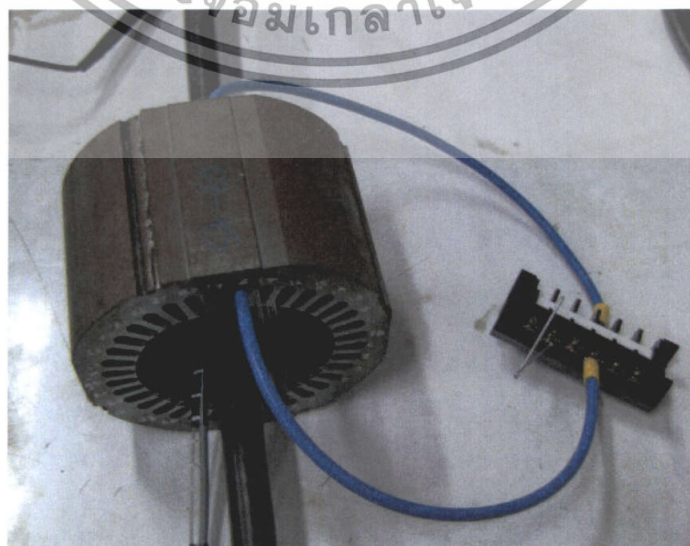
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.1 แสดงการทดสอบหา Core Loss ของแกนเหล็ก

2. ทำการทดสอบหาค่า Core Loss ของแกนเหล็กที่ถูกช็อต 50% โดยการเชื่อมภายในของแกนด้วยวิธีเดียวกันกับแกนปกติแบบแรก แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า Core Loss ของแกนเหล็ก

3. ทำการ Simulate แกนเหล็กว่าเป็นแกนเหล็กที่ถูกช็อต 100% ของความยาวแกน โดยการนำสายไฟมาร้อยผ่านร่องสลอตของแกนเหล็กแล้วเชื่อมปลายของสายไฟเข้าด้วยกัน เปรียบเสมือนแกนเหล็กถูกช็อตอย่างสมบูรณ์ แล้วทำการทดลองเหมือนกับข้อ 1 และข้อ 2 แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา Core Loss



ภาพที่ 4.2 แสดงการ Simulate แกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำค่า Core Loss ที่ได้จากการทดลองในข้อ 1-3 มาทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงว่าเป็นไปอย่างไร แล้วลองนำไปคำนวณหาว่าเราจะตัดสินได้อย่างไรว่าแกนเหล็กนั้นจะยังใช้งานต่อไปได้หรือไม่โดยการนำไปคำนวณค่าไฟที่เราต้องจ่ายเพิ่มขึ้นถ้านำไปใช้งานจริง

4.2.2 การสืบหาจุดที่ผิดปกติของแกนเหล็ก

1.การออกแบบและสร้าง Search Coil นั้นอาศัย Ampere's Law คือที่จุดที่ผิดปกติบนแกนเหล็กนั้นจะเกิดการเชื่อมถึงกันของแผ่นเหล็กและเกิดกระแสไหลวนขึ้น ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่รอบตำแหน่งที่ผิดปกติ เพราะฉะนั้นถ้าตัดผ่านขดลวดก็จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น โดยเราจะออกแบบได้ดังนี้

ทำการ Simulate แกนเหล็กตามข้อ 3 ข้างต้นแล้วกำหนดว่าเราจะทำการทดลองที่ $B = 1.8 \text{ Tesla}$

ดังนั้นเราจึงคำนวณค่าแรงดันกระตุ้นได้

$$E_{rms} = 4.44 f N A_c B_{max}$$

จะได้

$$E_{rms} = 306 \text{ mV}$$

จากสมการ

$$m.m.f. = Ni = Hl$$

จากการทดลองป้อนแรงดันที่ประมาณ 306 mV เราต้องการทราบค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในอากาศ ณ ตำแหน่งที่ผิดปกติโดยวัดจาก m.m.f. พบว่ากระแสที่ไหลในสายที่ร้อยผ่านร่องสลิตวัดได้ที่ 59.2 A จะได้

$$H = \frac{Ni}{l}$$

$$= 59.2/0.0075$$

$$= 7893.333$$

$$B = \mu_0 H$$

$$= (4 \pi \times 10^{-7}) \times 7893.333$$

$$= 0.00992$$

$$B_{max} = \sqrt{2} B$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.014 \text{ Tesla}$$

คำนวณขนาดของ Search Coil สามารถคำนวณได้จากสูตร

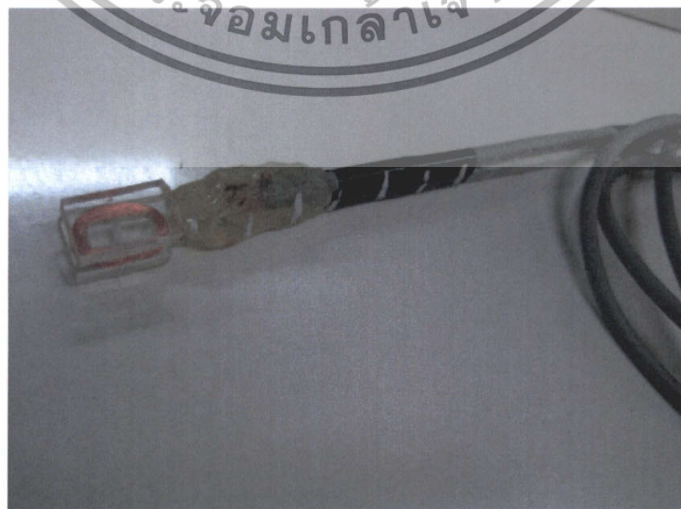
$$E_{rms} = 4.44 f N A_c B_{max}$$

ซึ่งเราจะเหลือตัวแปร N และ A ที่เราต้องการโดยหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งพื้นที่หน้าตัดควรจะเล็กที่สุดเพราะว่าจะสามารถวัดได้ทั่วถึง แต่ต้องให้สามารถพันขดลวดได้จริงด้วย จากการทดลองแล้วนั้นจำนวนรอบที่เหมาะสมคือ 400 รอบ และพื้นที่หน้าตัดเราได้แบ่งออกเป็น 2 ขนาดเพื่อเปรียบเทียบได้คือ

$$\begin{aligned} \text{ขนาด } 4 \times 10 \times 2 : E &= 4.44 \times 50 \times 400 \times 0.014 \times 0.005 \times 0.011 \\ &= 68.376 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ขนาด } 3 \times 10 \times 3 : E &= 4.44 \times 50 \times 400 \times 0.014 \times 0.0035 \times 0.0105 \\ &= 45.688 \text{ mV} \end{aligned}$$

จากการคำนวณจะเห็นว่าได้แทนค่า A มากกว่าของจริงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อเราพันขดลวดไปแล้วนั้น พื้นที่หน้าตัดจะเพิ่มขึ้นจากความหนาของขดลวดด้วย เราจึงต้องเอาค่าเฉลี่ยมาคำนวณ ค่าที่ได้จะเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยทฤษฎีที่เราจะวัดได้ ณ จุดที่ผิดปกติ ของ Search Coil แต่ละอัน



ภาพที่ 4.3 แสดง Search Coil ที่ได้

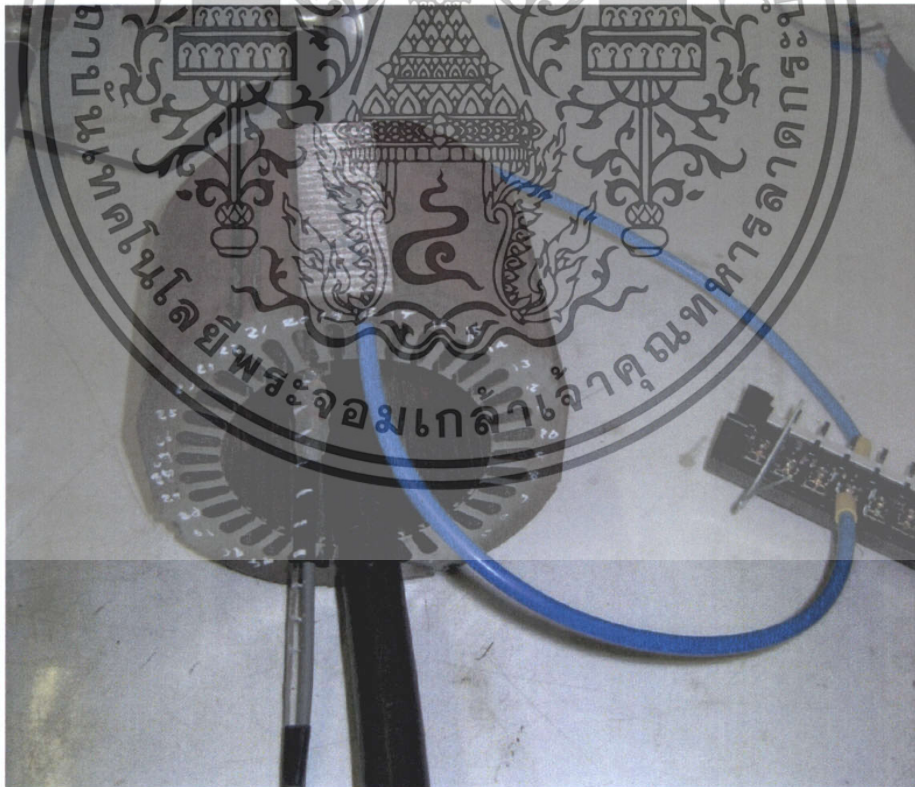
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำ Search Coil ที่ได้ไปทำการวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติ โดยทำการทดลองที่ $B=1.8$ เซนกัน แล้วใช้ Search Coil วัดระหว่างซี่ของแกนเหล็กรอบแกนเหล็กเพื่อให้เราทราบว่าแกนเหล็กที่ปกตินั้นจะมีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นอย่างไร แล้วนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์

3. นำ Search Coil ไปวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กที่ถูกทำการช๊อต 50% ของความยาวแกน โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 2 แล้วนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ว่าสามารถหาจุดที่ผิดปกติได้หรือไม่ มีความเปลี่ยนแปลง ณ จุดที่ผิดปกติอย่างไร

4. นำ Search Coil ไปวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนเหล็กที่ทำการ Simulate ว่าถูกช๊อต 100% โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 2 นำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง ณ จุดที่ผิดปกติ

5. ทำการวิเคราะห์ผลของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จาก Search Coil ของแกนเหล็กทั้ง 3 ประเภทว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร และระหว่าง Search Coil ทั้งสองอันจะให้ผลเหมือนกันหรือแตกต่างกันอย่างไร แบบไหนดีกว่ากัน



ภาพที่ 4.4 แสดงการวัดด้วย Search Coil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

จากการทดลองซึ่งเราได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการทดสอบหาค่า Core Loss ของแกนเหล็ก 3 ประเภท ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบหาจุดที่ผิดปกติของแกนเหล็กด้วยการใช้ Search Coil ที่ได้สร้างขึ้นมา ซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

ตารางที่ 5.1 การทดสอบ Core Loss ของแกนเหล็กที่ปกติ

B (T)	E_b (V)	V_m (mV)	I_m (A)	P_m (W)	P_{cu} (W)	P_s (W)	P_0 (W/kg)
0.5	470.67	108.65	36.21	2.81	0.54	2.27	0.53
0.6	566.34	130.23	39.55	3.73	0.64	3.09	0.73
0.7	659.60	149.53	42.59	4.71	0.74	3.97	0.93
0.8	751.60	169.67	46.73	5.88	0.90	4.98	1.17
0.9	849.65	190.22	49.85	7.03	1.02	6.01	1.41
1.0	943.75	211.46	54.66	8.41	1.22	7.19	1.69
1.1	1034.20	229.47	57.72	9.41	1.37	8.04	1.89
1.2	1132.78	253.97	63.80	11.21	1.67	9.54	2.24
1.3	1223.00	274.07	70.05	12.78	2.01	10.77	2.53
1.4	1328.07	296.73	79.10	15.03	2.57	12.46	2.93
1.5	1414.03	316.23	88.26	16.54	3.19	13.35	3.14
1.6	1509.66	338.69	101.25	18.91	4.20	14.71	3.82
1.7	1604.37	360.53	116.70	21.81	5.58	16.23	3.82
1.8	1695.20	384.11	136.62	24.98	7.65	17.33	4.08
1.9	1794.62	410.74	161.63	29.29	10.71	18.58	4.37
2.0	1886.20	433.38	188.00	34.09	14.49	19.60	4.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 การทดสอบ Core Loss ของแกนเหล็กที่ทำการเชื่อมภายใน 50%

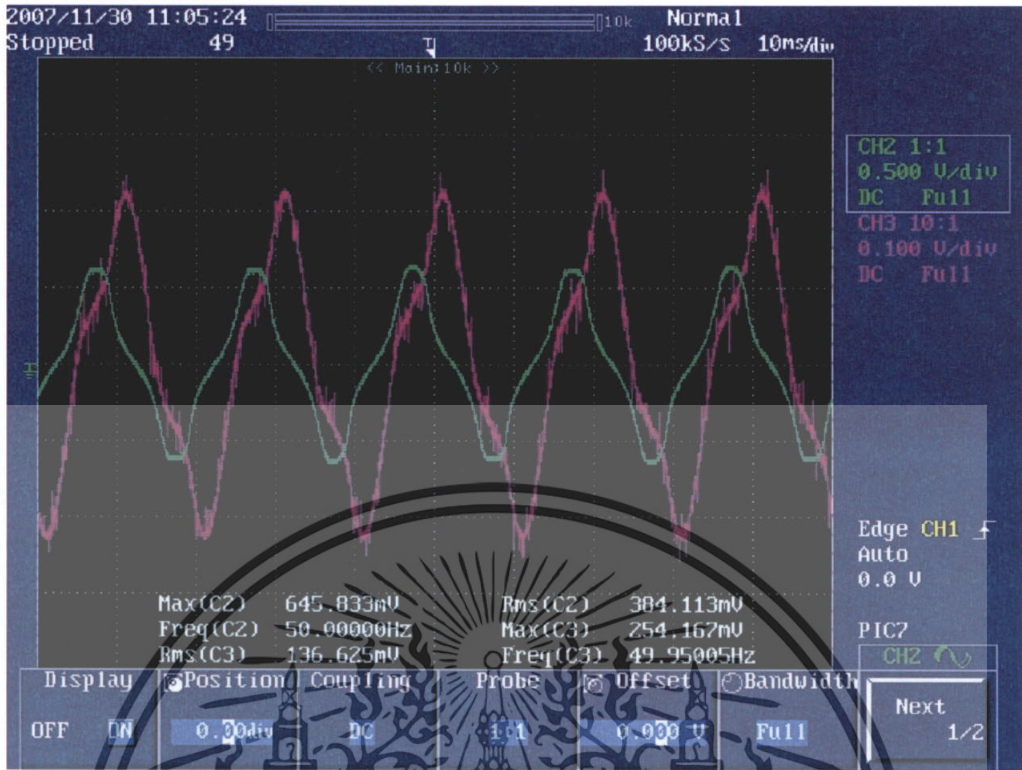
B (T)	E_b (V)	V_{in} (mV)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	P_{cu} (W)	P_s (W)	P_s (W/kg)	dP_s (W/kg)
0.5	498.70	113.70	37.47	2.99	0.56	2.43	0.57	0.04
0.6	602.63	139.22	41.40	4.27	0.69	3.58	0.84	0.11
0.7	695.44	155.90	44.51	5.20	0.79	4.41	1.04	0.11
0.8	797.42	175.96	48.09	6.38	0.93	5.45	1.28	0.11
0.9	899.21	201.39	53.44	8.01	1.14	6.87	1.62	0.21
1.0	1005.73	223.90	58.42	9.68	1.37	8.31	1.96	0.27
1.1	1097.34	244.33	63.57	11.46	1.62	9.84	2.32	0.43
1.2	1199.78	266.55	69.95	13.50	1.96	11.6	2.73	0.49
1.3	1297.66	289.92	76.88	15.87	2.36	13.51	3.18	0.65
1.4	1397.50	313.04	85.00	18.49	2.89	15.60	3.67	0.74
1.5	1497.42	336.23	94.59	21.36	3.58	17.78	4.18	1.04
1.6	1598.35	363.62	107.48	24.74	4.62	20.12	4.73	0.91
1.7	1699.88	386.43	120.95	28.29	5.85	22.44	5.28	1.46
1.8	1797.12	410.41	137.40	32.29	7.55	24.74	5.82	1.74
1.9	1897.76	435.73	158.68	36.87	10.07	26.80	6.31	1.94
2.0	1997.34	460.43	183.02	42.41	13.40	29.01	6.83	2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

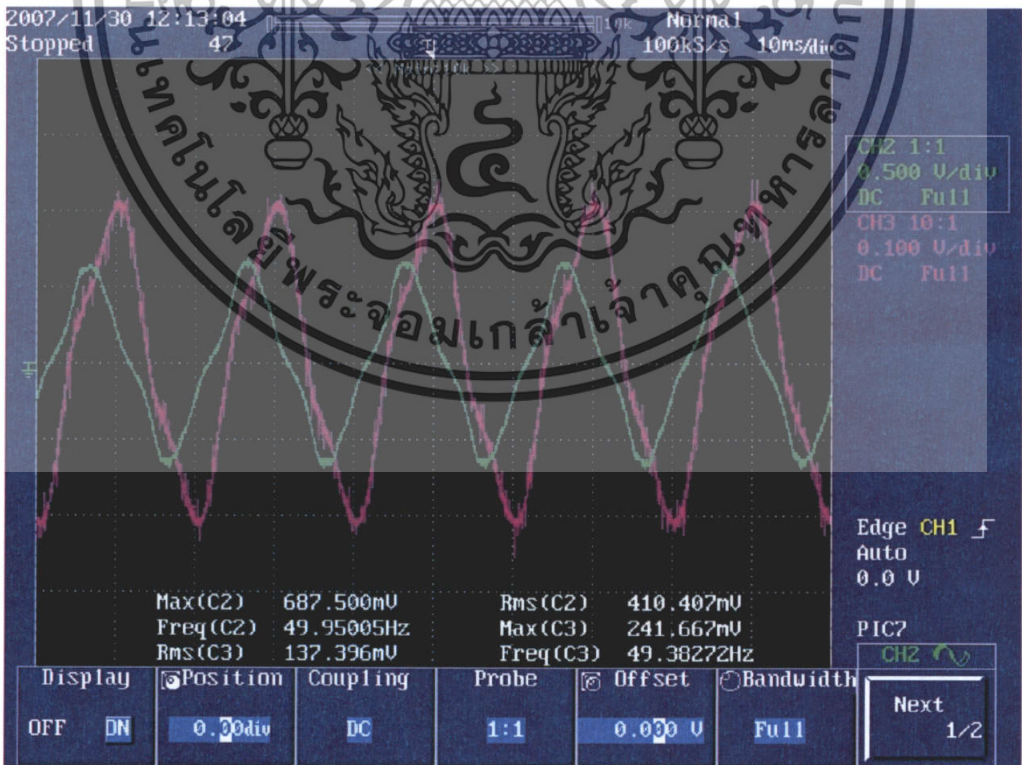
ตารางที่ 5.3 การทดสอบ Core Loss ของแกนเหล็ก Simulation ซัด 100%

B (T)	E_b (V)	V_{in} (mV)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	P_{cu} (W)	P_s (W)	P_s (W/kg)	dP_s (W)
0.5	470.67	115.11	58.94	6.00	1.39	4.61	1.08	2.34
0.6	566.34	137.39	67.27	8.32	1.81	6.51	1.53	3.42
0.7	659.60	158.81	75.29	10.84	2.27	8.52	2.00	4.55
0.8	751.60	180.63	83.89	13.78	2.82	10.96	2.58	5.98
0.9	849.65	202.75	89.16	17.08	3.40	13.68	3.22	7.67
1.0	943.75	233.46	100.04	20.31	4.00	16.31	3.84	9.12
1.1	1034.20	247.76	106.68	23.76	4.55	19.21	4.52	11.17
1.2	1132.78	269.55	116.40	27.97	5.42	22.55	5.31	13.01
1.3	1223.00	291.93	125.43	32.26	6.29	25.97	6.11	15.20
1.4	1328.07	315.73	136.87	37.40	7.49	29.91	7.04	17.45
1.5	1414.03	336.21	148.15	41.91	8.78	33.13	7.80	19.78
1.6	1509.66	359.63	163.76	47.81	10.73	37.08	8.72	22.37
1.7	1604.37	384.29	182.96	54.01	13.39	40.62	9.56	24.39
1.8	1695.20	407.78	205.23	60.92	16.85	44.07	10.37	26.74
1.9	1794.60	435.51	235.96	69.68	22.27	47.41	11.16	28.83
2.0	1886.20	461.69	270.68	80.18	29.31	50.87	11.97	31.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



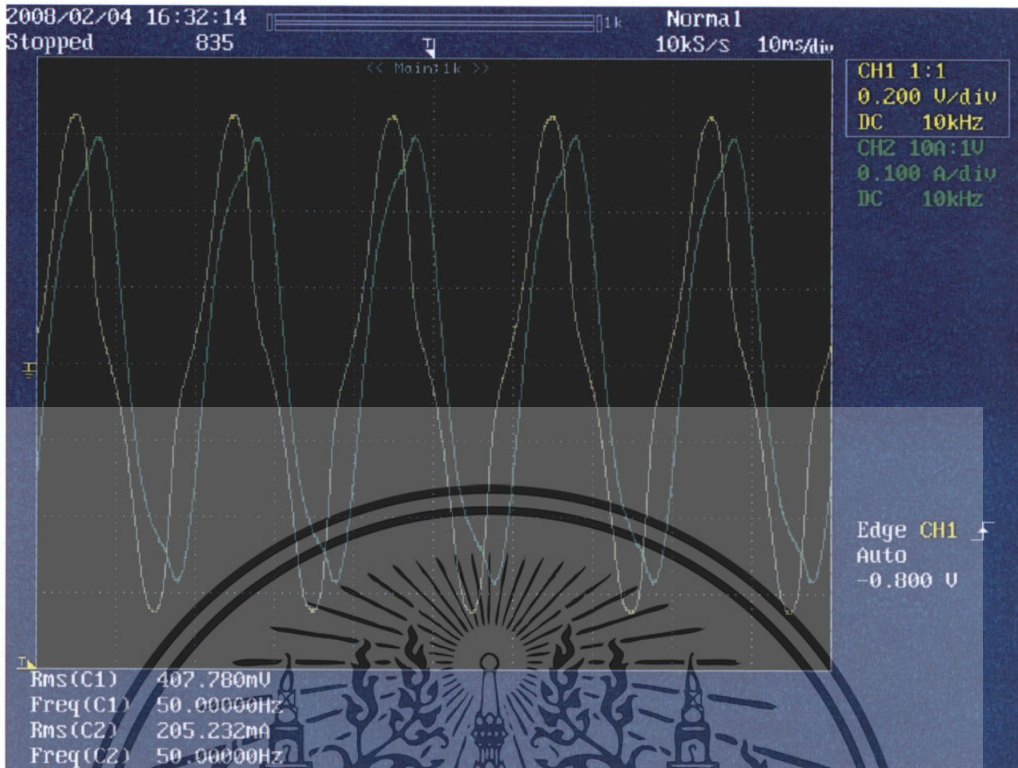
ภาพที่ 5.1 ตัวอย่างกราฟระหว่างแรงดันและกระแสขณะกระตุ้นแกนเหล็กปกติที่ $B = 1.8$ Tesla



ภาพที่ 5.2 แสดงตัวอย่างรูปกราฟระหว่างแรงดันและกระแสขณะกระตุ้นแกนเหล็กที่ข้อต่อ

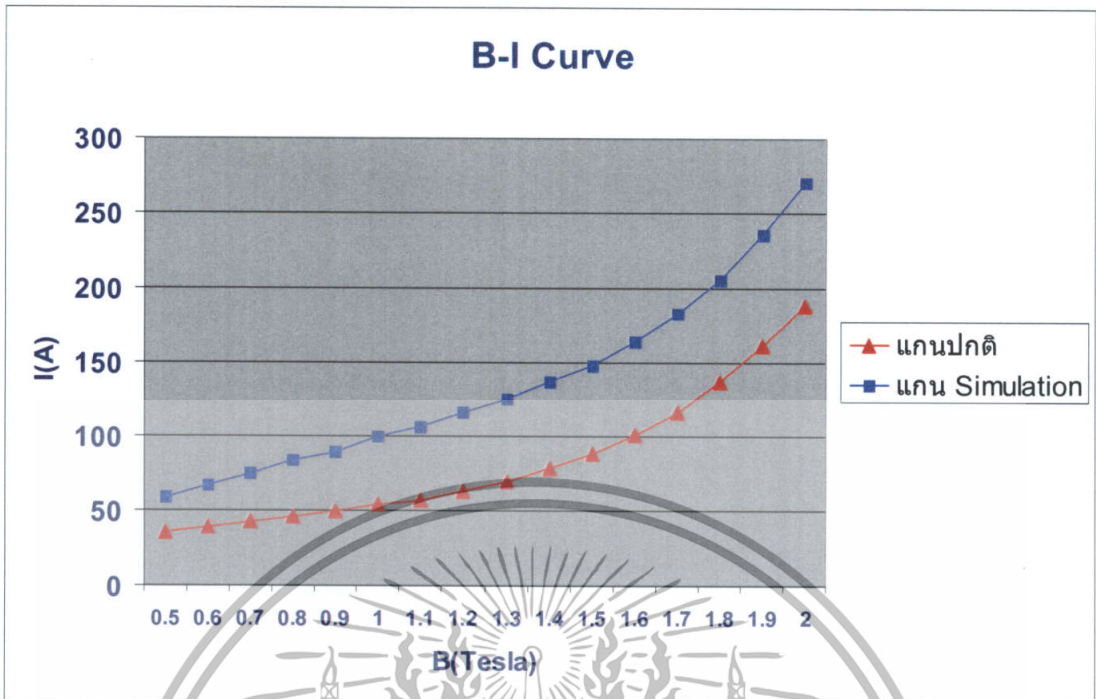
ภายใน 50% ของความยาวแกนที่ $B = 1.8$ Tesla

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

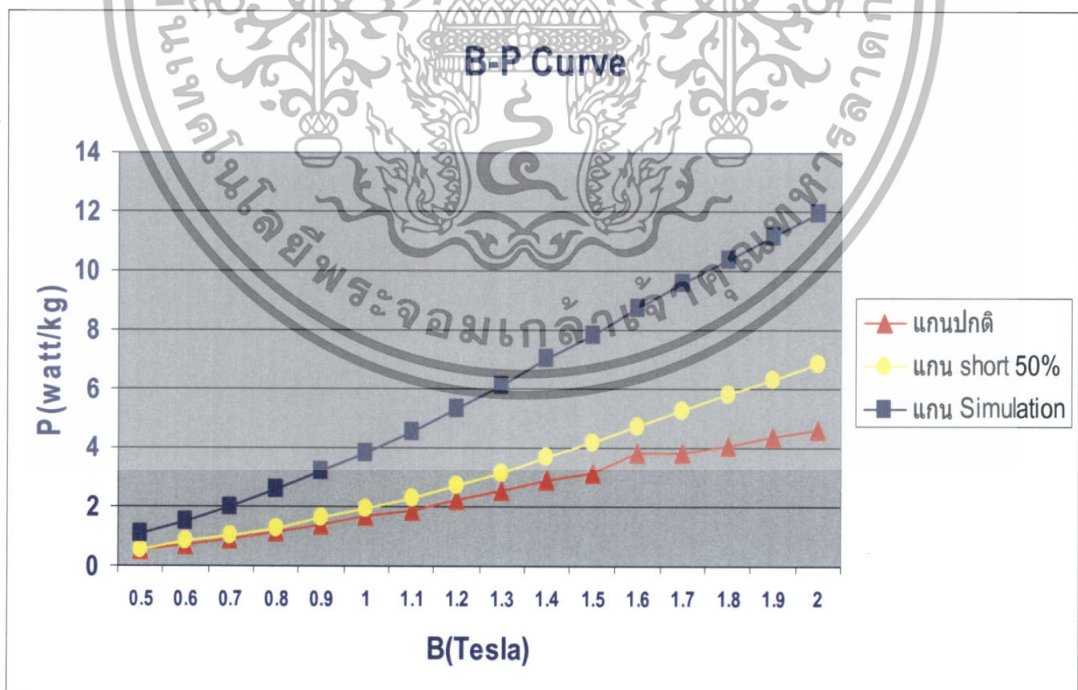


ภาพที่ 5.3 แสดงตัวอย่างรูปกราฟระหว่างแรงดันและกระแสขณะกระตุ้นแกนเหล็กที่ทำการ Simulate ช้อด 100% ที่ $B=1.8$ Tesla

จากการทดลอง เมื่อเราได้ค่า Core Loss ของแกนเหล็กทั้ง 3 ประเภทแล้ว เราจึงนำไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบกระแสที่เราใช้กระตุ้นแกนเหล็กปกติกับแกนเหล็กที่เราทำการ Simulate ว่าแตกต่างกันอย่างไร เนื่องจากเป็นแกนชนิดเดียวกัน ขนาดเท่ากัน แต่แกนชนิดที่ทำการช้อด 50% นั้นมีขนาดยาวกว่า เราจึงต้องเปรียบเทียบโดยใช้ค่ากำลังสูญเสียที่เป็นหน่วย W/kg แล้วเท่านั้น ซึ่งได้ผลดังกราฟรูปที่ 5.4 และ 5.5



ภาพที่ 5.4 แสดงผลระหว่าง B กับ I (กระแสกระตุ้น) ของแกนเหล็กปกติกับแกนเหล็กที่ทำการ Simulation ซัด 100%



ภาพที่ 5.5 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่าง ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (W/kg) กับ B ของแกนเหล็กทั้ง 3 ชนิดที่ทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลที่เราได้จากการทดลอง และการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองนั้นจะเห็นค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งแกนเหล็กที่ปกติจากโรงงานนั้นก็จะมีค่าความสูญเสียอยู่ค่าหนึ่งซึ่งไม่มากมายนัก แต่แกนเหล็กที่ผิดปกติทั้ง 2 แกนที่เราได้ทดลองนั้นจะมีความสูญเสียในแกนเหล็กที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเราสามารถจะนำกำลังสูญเสียเหล่านั้นไปคำนวณค่าไฟฟ้าที่จะต้องเสียไปในแต่ละเดือนดังนี้

ถ้าเรากำหนดให้มอเตอร์ทั่วๆ ไปทำงานที่ $B = 1.5$ Tesla

- แกนเหล็กข้อดี 50% นั้นมีขนาดต่างกับกับแกนเหล็กปกติ ดังนั้นเราจึงใช้ค่า

W/kg มาคำนวณ

ที่ $B = 1.5$ Tesla แกนเหล็กปกติมีค่าความสูญเสีย 3.14 W/kg

ที่ $B = 1.5$ Tesla แกนเหล็กข้อดี 50% มีค่าความสูญเสีย 4.18 W/kg

ค่าที่เพิ่มขึ้น = $4.18 - 3.14$

= 1.04 W/kg

คิดเป็น $(1.04/3.14) \times 100 = 33.12\%$

ถ้าแกนมีน้ำหนักเท่ากันจะมีกำลังสูญเสียที่เพิ่มขึ้นเป็น

$33.12/100 \times 13.35 = 4.42$ W

ถ้ามอเตอร์ทำงาน 12 ชั่วโมงต่อวัน ทุกวันจะได้ว่า

$12 \times 30 = 360$ ชั่วโมง/เดือน

ถ้าคิดว่าอัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ยที่ 2.2 บาท ต่อหน่วย

ค่าไฟที่ต้องเสีย = $4.42/1000 \times 360 \times 2.2$

= 3.5 บาท/ตัว/เดือน

= 42 บาท/ตัว/ปี

ถ้ามอเตอร์ทำงาน ตลอดเวลาทุกวันจะได้ = 720 ชั่วโมง/เดือน

ค่าไฟที่ต้องเสีย = $4.42/1000 \times 720 \times 2.2$

= 7 บาท/ตัว/เดือน

= 84 บาท/ตัว/ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แกนเหล็ก Simulation ซ้อด 100% เป็นแกนเหล็กขนาดเดียวกันกับแกนเหล็กปกติดังนั้นเราจึงนำค่าความสูญเสียมาคิดได้เลย

ที่ $B = 1.5$ Tesla แกนเหล็กปกติมีค่าความสูญเสีย 13.35 W

ที่ $B = 1.5$ Tesla แกนเหล็ก Simulation มีค่าความสูญเสีย 33.13 W

$$\begin{aligned} \text{ค่าที่เพิ่มขึ้น} &= 33.13 - 13.35 \\ &= 19.78 \text{ W} \end{aligned}$$

ถ้ามอเตอร์ทำงาน 12 ชั่วโมง/วัน ทุกวันจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้าที่ต้องเสีย} &= 19.78/1000 \times 360 \times 2.2 \\ &= 15.67 \text{ บาท/ตัว/เดือน} \\ &= 188.04 \text{ บาท/ตัว/ปี} \end{aligned}$$

ถ้ามอเตอร์ทำงาน 24 ชั่วโมง ทุกวันจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้าที่ต้องเสีย} &= 19.78/1000 \times 720 \times 2.2 \\ &= 31.33 \text{ บาท/ตัว/เดือน} \\ &= 375.96 \text{ บาท/ตัว/ปี} \end{aligned}$$

ผลการทดลองการนำ Search Coil มาวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในอากาศภายในแกนเหล็กเพื่อทดสอบการหาจุดที่ผิดปกติ ในแกนเหล็กนั้นจะเห็นว่าผลจะมีค่าตั้งแต่ $30^\circ - 320^\circ$ เนื่องจากบริเวณที่เป็นสายไฟกระตุ้นไม่สามารถวัดได้ ซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

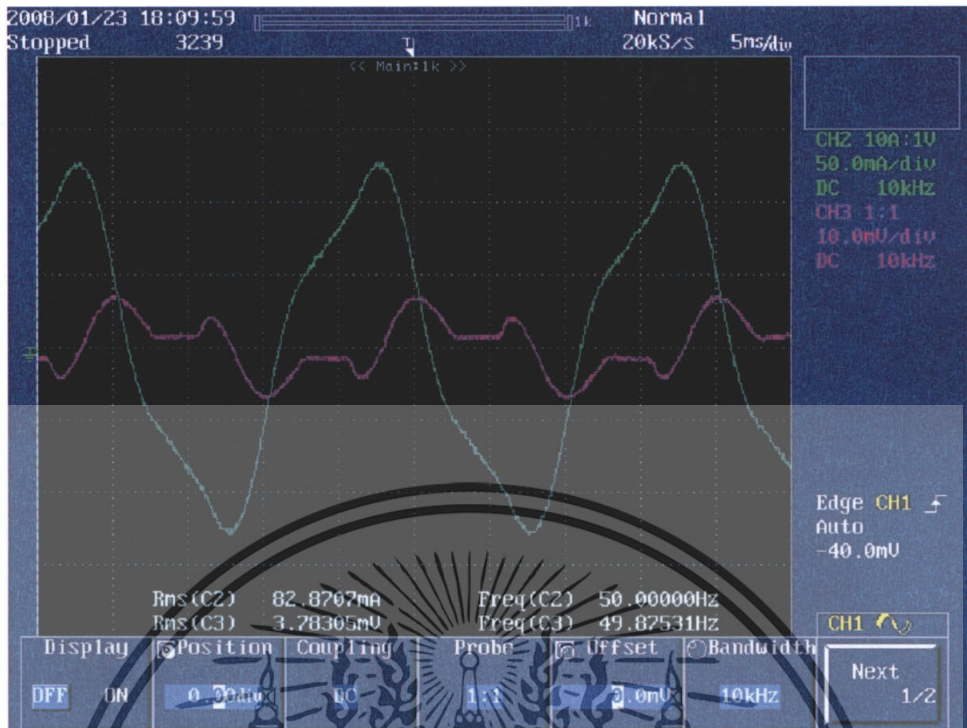
- ใช้ Search Coil ขนาด $3 \times 10 \times 3$ mm.

ตารางที่ 5.4 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติ เมื่อใช้ Search Coil ขนาด $3 \times 10 \times 3$ mm.

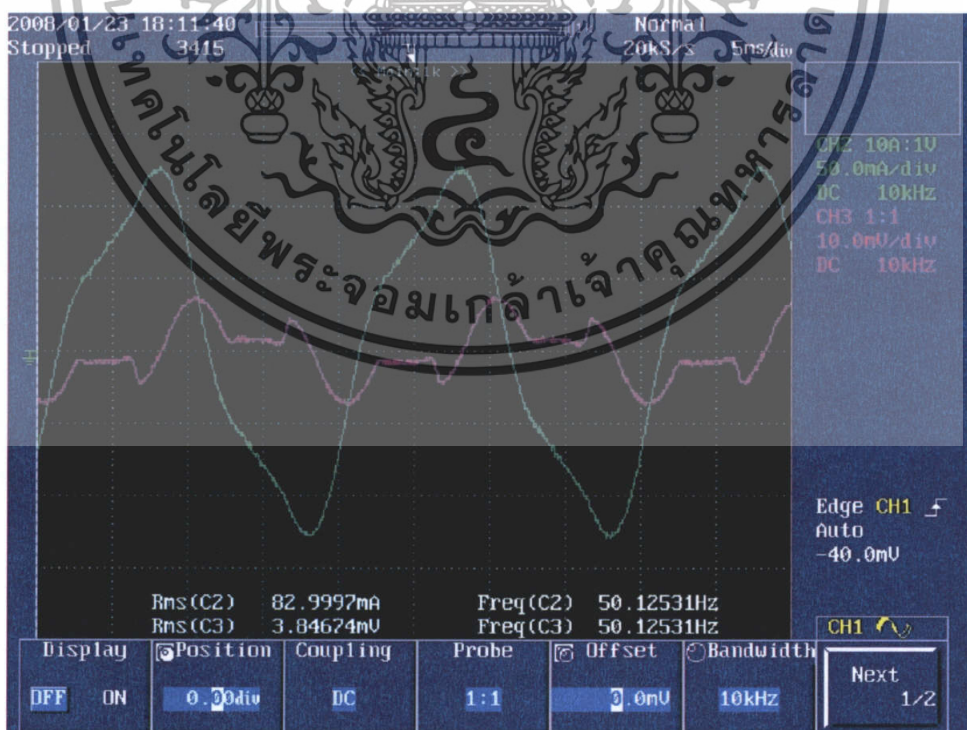
θ	V_{induce} (mV)														
	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°
L(cm.)															
0	2.22	1.89	1.75	1.94	2.16	2.60	3.03	3.12	3.04	3.38	2.61	2.28	2.18	2.23	2.61
1	2.65	1.96	1.68	2.03	2.22	2.69	3.37	3.42	3.22	3.91	2.82	2.32	2.21	2.20	2.70
2	2.73	2.01	1.75	1.98	2.18	2.71	3.43	3.50	3.41	3.98	2.90	2.38	2.20	2.21	2.66
3	2.84	1.99	1.72	1.90	2.15	2.64	3.45	3.50	3.36	4.01	2.95	2.39	2.20	2.20	2.65
4	2.83	2.00	1.74	1.90	2.20	2.68	3.44	3.53	3.34	4.02	3.02	2.39	2.21	2.21	2.66
5	2.72	1.96	1.75	1.91	2.16	2.64	3.43	3.54	3.38	3.98	2.88	2.38	2.18	2.21	2.67
6	2.66	1.94	1.72	1.88	2.16	2.63	3.43	3.52	3.34	3.91	2.90	2.38	2.19	2.20	2.67
7	2.83	2.04	1.77	1.92	2.17	2.62	3.38	3.49	3.31	3.97	2.89	2.36	2.12	2.18	2.49
8	2.81	1.97	1.76	1.85	2.15	2.55	3.15	3.30	3.22	3.88	2.85	2.24	2.14	2.16	2.53

ตารางที่ 5.4 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติ เมื่อใช้ Search Coil ขนาด $3 \times 10 \times 3$ mm. (ต่อ)

θ	V_{induce} (mV)														
	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°
L(cm.)															
0	3.11	3.13	2.96	3.07	2.65	2.20	2.49	2.28	2.67	3.18	3.04	2.77	3.18	2.10	1.43
1	3.39	3.47	3.22	3.60	2.64	2.22	2.45	2.35	2.52	3.33	3.42	3.06	3.58	2.02	1.46
2	3.33	3.52	3.30	3.71	2.57	2.26	2.42	2.31	2.58	3.25	3.49	3.16	3.81	2.07	1.51
3	3.19	3.54	3.31	3.87	2.59	2.26	2.42	2.30	2.56	3.33	3.49	3.20	3.82	2.33	1.53
4	3.39	3.54	3.33	3.90	2.65	2.28	2.41	2.29	2.55	3.32	3.46	3.28	3.90	2.36	1.51
5	3.40	3.55	3.40	3.92	2.64	2.27	2.44	2.29	2.61	3.33	3.44	3.28	3.91	2.34	1.54
6	3.32	3.51	3.37	3.90	2.63	2.28	3.42	2.28	2.62	3.34	3.49	3.27	3.72	2.37	1.34
7	3.33	3.49	3.21	3.93	2.64	2.25	3.41	2.28	2.60	3.38	3.45	3.25	3.71	2.32	1.53
8	3.20	3.39	3.35	3.90	2.63	2.21	3.39	2.24	2.54	3.34	3.44	3.29	3.31	2.12	1.56



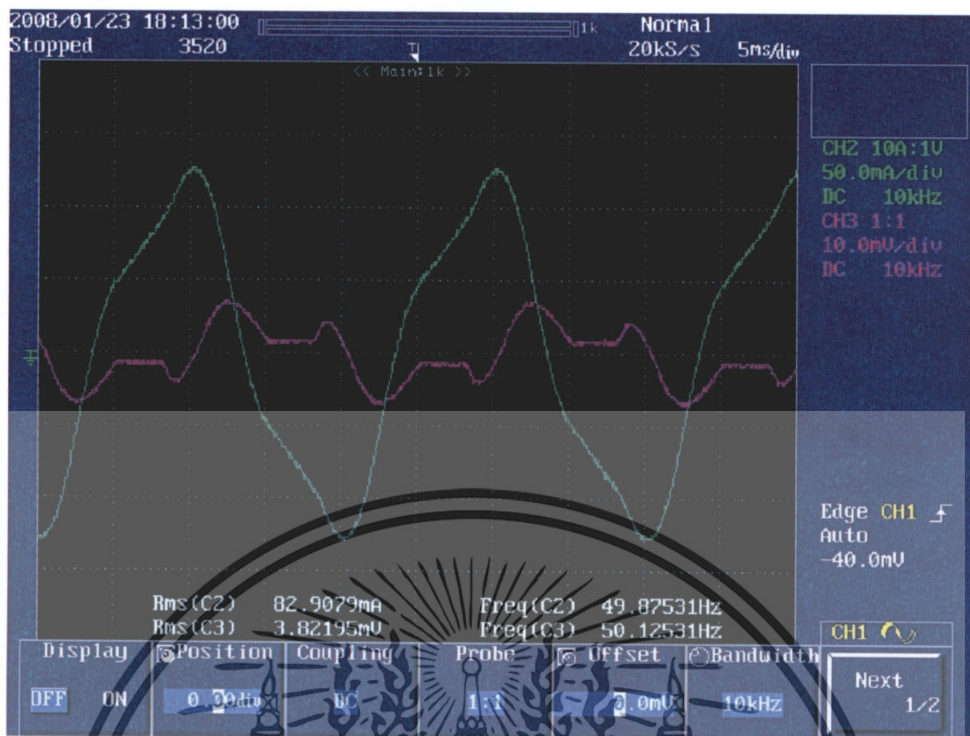
ภาพที่ 5.6 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนปกติที่มุม 90° โดยใช้ Search Coil $3 \times 10 \times 3$ mm.



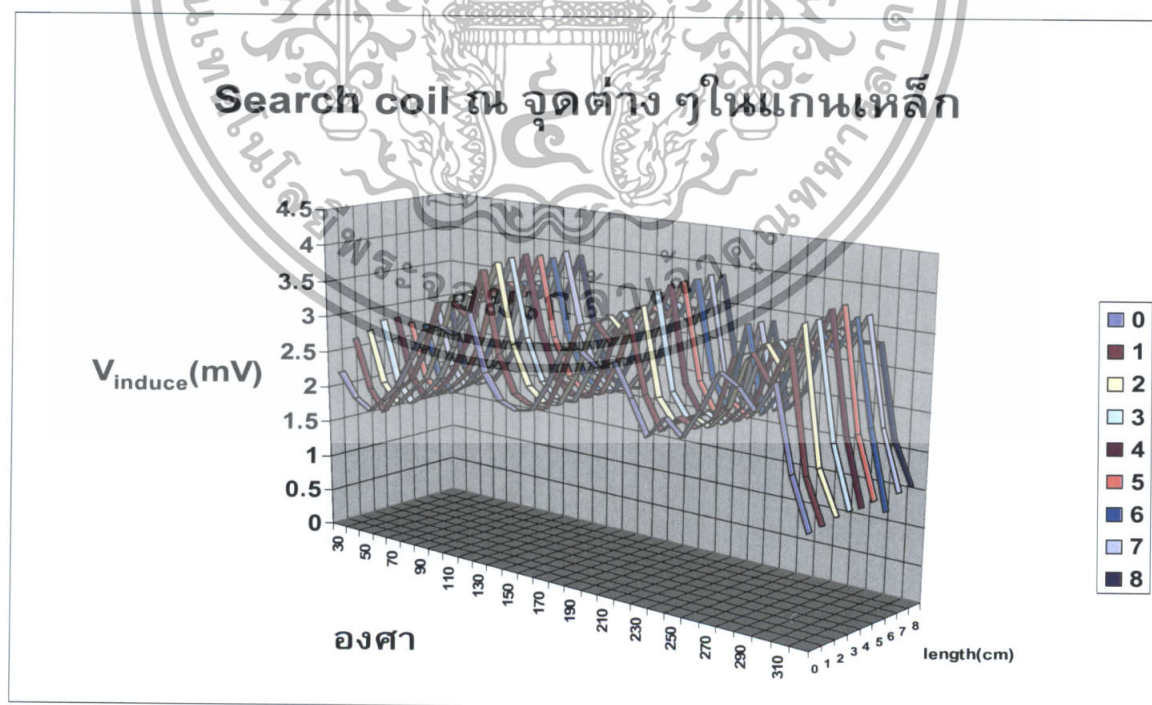
ภาพที่ 5.7 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนปกติที่มุม 180° โดยใช้

Search Coil $3 \times 10 \times 3$ mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.8 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนปกติที่มุม 270° โดยใช้ Search Coil 3 × 10 × 3 mm.



ภาพที่ 5.9 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติตามองศาต่างๆ ที่วัดได้จาก

Search Coil 3 × 10 × 3 mm.

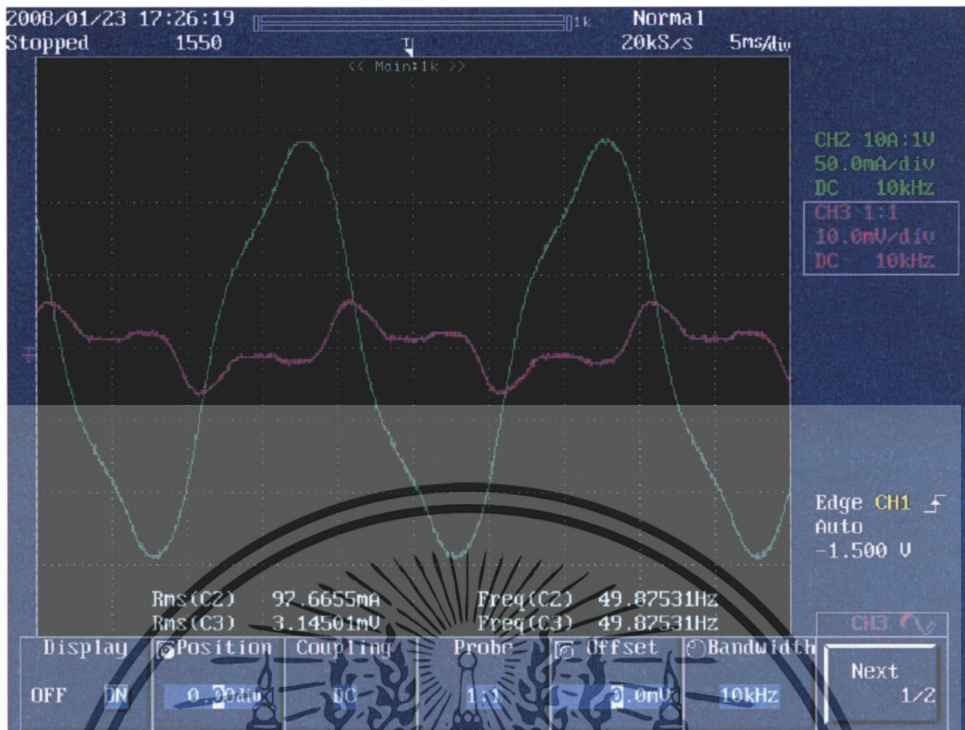
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กที่ถูกช้อด 50% เมื่อใช้ Search Coil ขนาด $3 \times 10 \times 3$ mm.

θ	V_{induce} (mV)														
	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°
L(cm.)															
0	2.05	1.31	1.28	1.61	1.83	2.19	2.81	2.81	2.92	2.88	2.31	2.15	2.25	2.87	3.88
1	2.72	1.37	1.29	1.72	1.81	2.42	2.88	2.92	3.09	3.01	2.22	1.95	2.07	2.56	3.69
2	2.31	1.52	1.41	1.71	1.87	2.48	2.91	2.98	3.07	2.95	2.19	1.98	1.98	2.42	3.63
3	2.30	1.45	1.47	1.71	2.02	2.60	2.99	2.96	3.07	2.92	2.17	2.01	1.60	2.40	3.61
4	2.30	1.56	1.50	1.76	2.07	2.65	3.20	3.13	3.25	3.10	2.25	2.10	2.12	2.38	3.59
5	2.49	1.68	1.79	1.82	2.16	2.78	3.40	3.43	3.66	3.32	2.48	2.18	2.18	2.55	3.97
6	2.59	1.70	1.83	1.95	2.25	2.93	3.49	3.56	3.86	3.65	2.59	2.21	2.22	2.64	3.85
7	2.57	1.65	1.72	2.05	2.32	3.22	3.67	3.72	3.99	3.75	2.60	2.28	2.15	2.50	3.67
8	2.65	1.74	1.72	2.10	2.38	3.17	3.61	3.72	4.23	3.77	2.55	2.19	2.11	2.49	3.1
9	2.49	1.68	1.69	1.87	2.39	3.35	3.77	3.61	4.19	3.73	2.52	2.15	2.10	2.45	3.13
10	2.32	1.92	1.90	1.92	2.37	2.91	3.21	3.54	3.92	3.63	2.54	2.20	2.15	2.36	2.89

ตารางที่ 5.5 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กที่ถูกขีด 50% เมื่อใช้ Search Coil ขนาด $3 \times 10 \times 3$ mm. (ต่อ)

θ	V_{induce} (mV)														
	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°
L(cm.)															
0	7.50	11.10	6.28	3.97	3.07	1.97	2.03	2.40	3.32	3.32	3.12	3.34	2.95	2.25	2.9
1	7.90	19.20	7.58	3.92	2.74	2.09	2.01	2.13	2.55	3.27	2.68	3.25	2.28	1.97	1.54
2	8.9	23.15	7.76	3.42	2.56	1.74	1.99	1.92	2.38	2.65	2.41	3.15	1.87	1.38	1.52
3	9.3	22.78	7.44	3.06	2.25	1.54	1.63	1.99	2.34	2.44	2.50	2.62	2.18	1.45	1.36
4	8.2	16.70	5.91	3.01	2.16	1.41	1.64	2.15	2.39	2.49	2.32	3.20	2.24	1.67	1.28
5	7.1	13.15	5.75	3.46	2.47	1.65	1.80	2.23	2.57	2.59	2.55	3.35	2.37	1.98	1.49
6	5.6	5.92	5.30	3.55	2.01	1.92	1.98	2.47	2.61	2.47	2.77	2.20	2.47	1.84	1.70
7	4.48	4.26	4.39	3.25	2.07	1.98	1.97	2.56	2.94	2.75	2.87	2.60	2.05	1.7	1.89
8	3.87	3.63	4.01	3.47	1.98	2.04	1.98	2.49	3.18	3.28	2.76	2.95	2.11	1.50	1.98
9	3.63	3.53	3.94	3.50	2.01	2.01	1.93	2.44	3.23	3.59	2.81	2.95	2.68	1.98	2.10
10	3.33	3.28	3.83	3.54	2.05	2.05	1.99	2.46	3.15	3.67	2.88	3.71	3.20	2.20	1.97

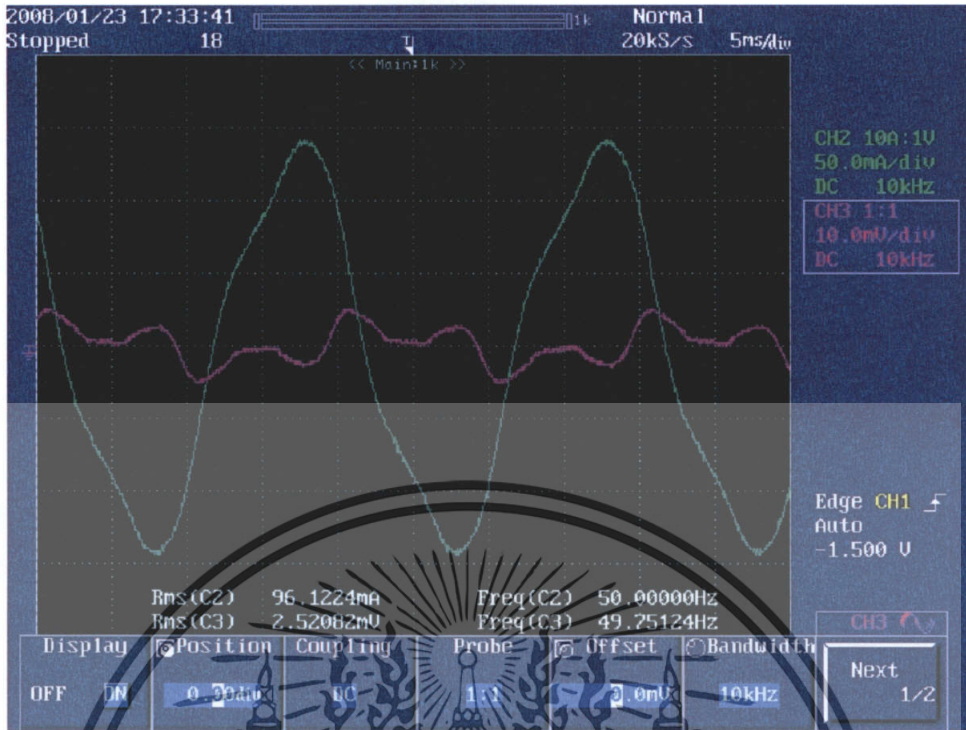


ภาพที่ 5.10 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนถูกช็อต 50% ที่มุม 90° โดยใช้ Search Coil $3 \times 10 \times 3$ mm.

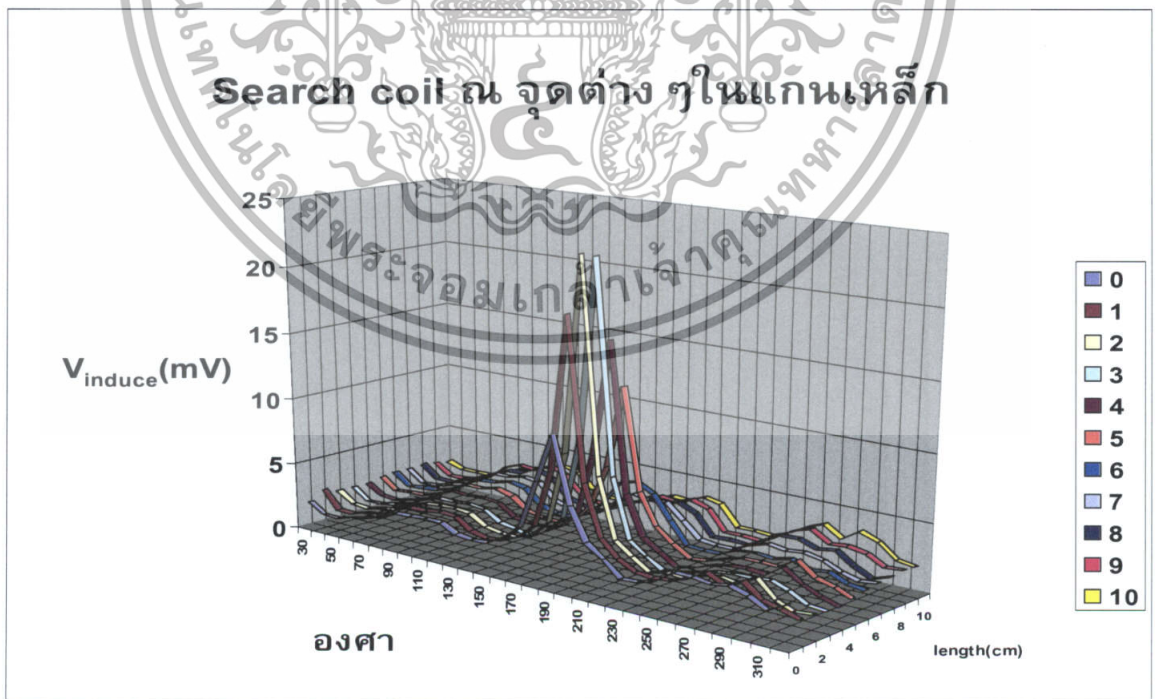


ภาพที่ 5.11 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนถูกช็อต 50% ที่มุม 190°

(จุดที่โดนช็อต) โดยใช้ Search Coil $3 \times 10 \times 3$ mm.
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.12 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนถูกช็อต 50% ที่มุม 270° โดยใช้ Search Coil 3 × 10 × 3 mm.



ภาพที่ 5.13 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กช็อต 50% ตามองศาต่างๆ ที่วัดได้จาก Search Coil 3 × 10 × 3 mm.

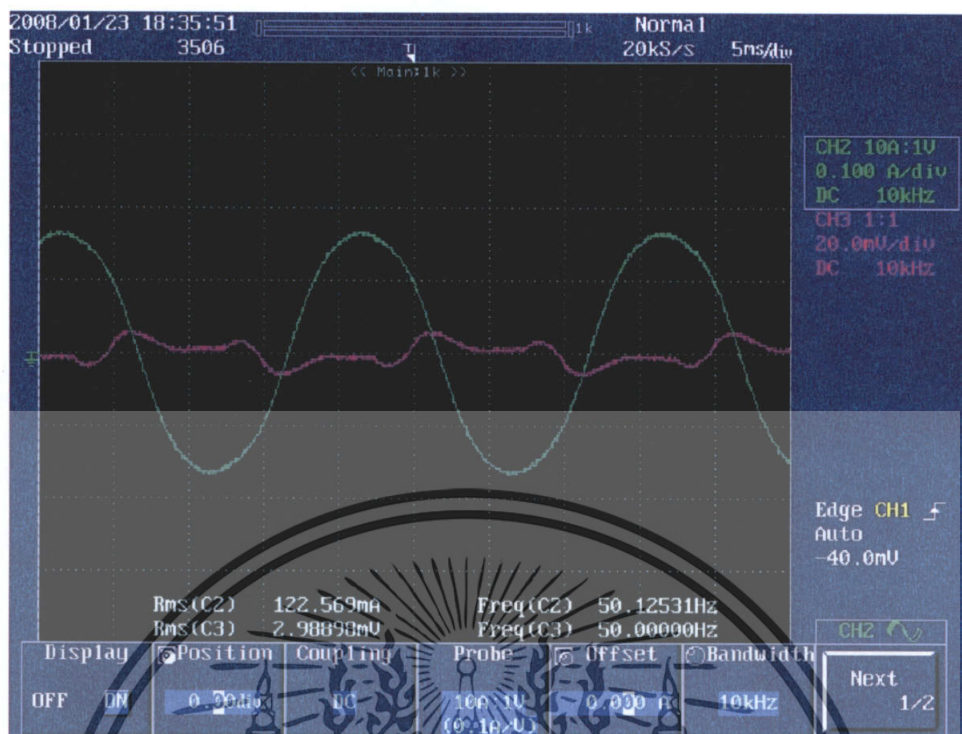
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็ก Simulation ซัด 100% เมื่อใช้ Search Coil ขนาด $3 \times 10 \times 3$ mm.

θ	V_{induce} (mV)														
	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°
L(cm.)															
0	2.14	1.66	1.36	1.60	1.96	2.57	2.89	2.68	2.83	3.13	2.75	2.90	3.51	5.29	11.99
1	2.27	1.69	1.31	1.62	1.92	2.47	3.05	2.97	3.16	3.47	3.15	2.84	3.61	4.87	12.75
2	2.55	1.59	1.38	1.65	1.84	2.52	3.02	3.08	3.17	3.62	3.20	2.95	3.70	4.83	13.69
3	2.33	1.59	1.41	1.66	1.94	2.47	3.04	3.10	3.15	3.65	3.15	2.92	3.81	5.35	14.25
4	2.20	1.50	1.43	1.66	1.94	2.45	2.97	3.10	3.12	3.75	3.32	2.46	3.50	3.72	12.49
5	2.42	1.57	1.45	1.63	2.04	2.41	3.06	3.10	3.10	3.74	3.31	2.66	3.41	5.35	13.62
6	2.38	1.61	1.36	1.61	2.04	2.47	2.94	3.10	2.94	3.73	3.41	2.84	2.81	5.62	13.85
7	2.21	1.63	1.45	1.64	1.95	2.40	2.91	3.05	3.09	3.69	3.19	2.55	2.66	5.54	12.75
8	2.32	1.71	1.47	1.61	1.86	2.30	2.84	2.85	2.91	3.58	3.68	2.35	2.99	5.10	14.47

ตารางที่ 5.6 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็ก Simulation ซัด 100% เมื่อใช้ Search Coil ขนาด 3 × 10 × 3 mm.(ต่อ)

θ	V_{induce} (mV)														
	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°
L(cm.)															
0	28.90	12.36	5.93	4.26	3.29	2.71	2.59	2.49	2.55	2.71	2.73	2.81	2.86	1.89	1.45
1	36.65	11.75	5.74	4.17	3.20	2.67	2.52	2.45	2.57	2.92	2.84	2.84	3.30	2.01	1.20
2	37.64	12.96	5.82	4.16	3.19	2.60	2.32	2.42	2.59	2.90	2.98	2.85	3.33	2.03	1.30
3	37.61	11.50	5.83	4.31	3.07	2.55	2.36	2.41	2.59	2.99	3.00	2.95	3.45	2.05	1.33
4	37.43	13.21	5.79	4.41	3.09	2.53	2.40	2.38	2.52	3.01	3.02	2.96	3.50	2.10	1.38
5	37.35	13.03	5.73	4.31	3.07	2.56	2.36	2.40	2.55	2.98	3.00	3.01	3.52	2.08	1.32
6	36.10	14.33	5.63	4.34	2.98	2.58	2.37	2.41	2.61	2.99	3.03	3.02	3.34	2.12	1.33
7	34.20	15.85	5.51	4.30	3.15	2.67	2.46	2.42	2.57	3.02	3.01	2.99	3.44	2.10	1.39
8	31.35	13.63	5.93	4.42	3.23	2.74	2.49	2.42	2.59	3.04	2.99	2.95	3.37	2.01	1.50

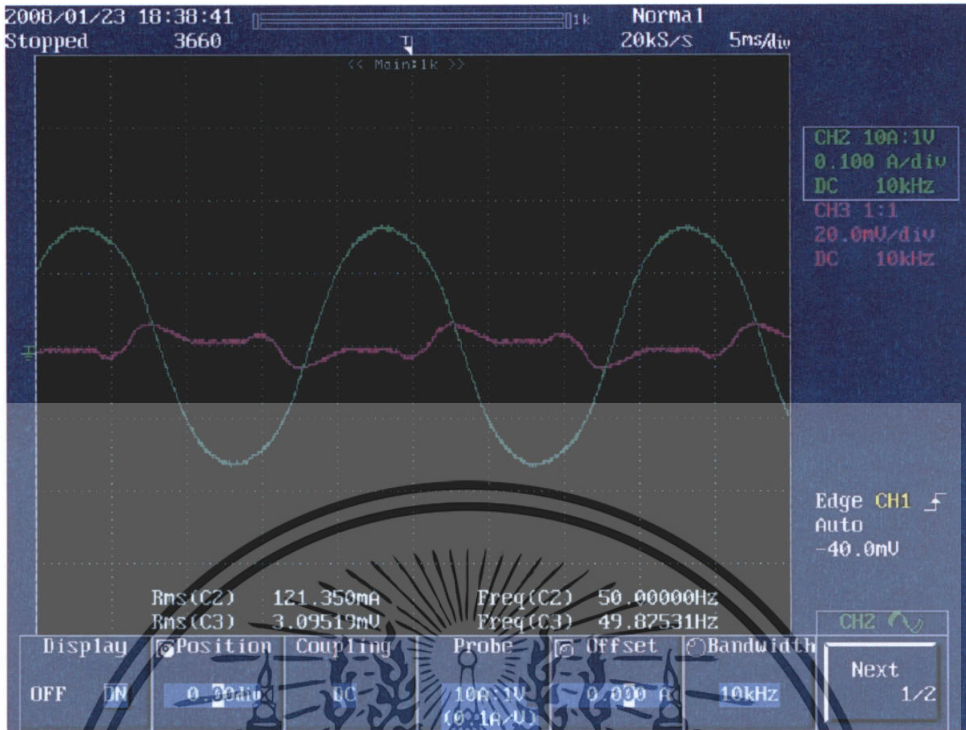


ภาพที่ 5.14 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulation ซ็อต 100% ที่มุม 90° โดยใช้ Search Coil $3 \times 10 \times 3$ mm.

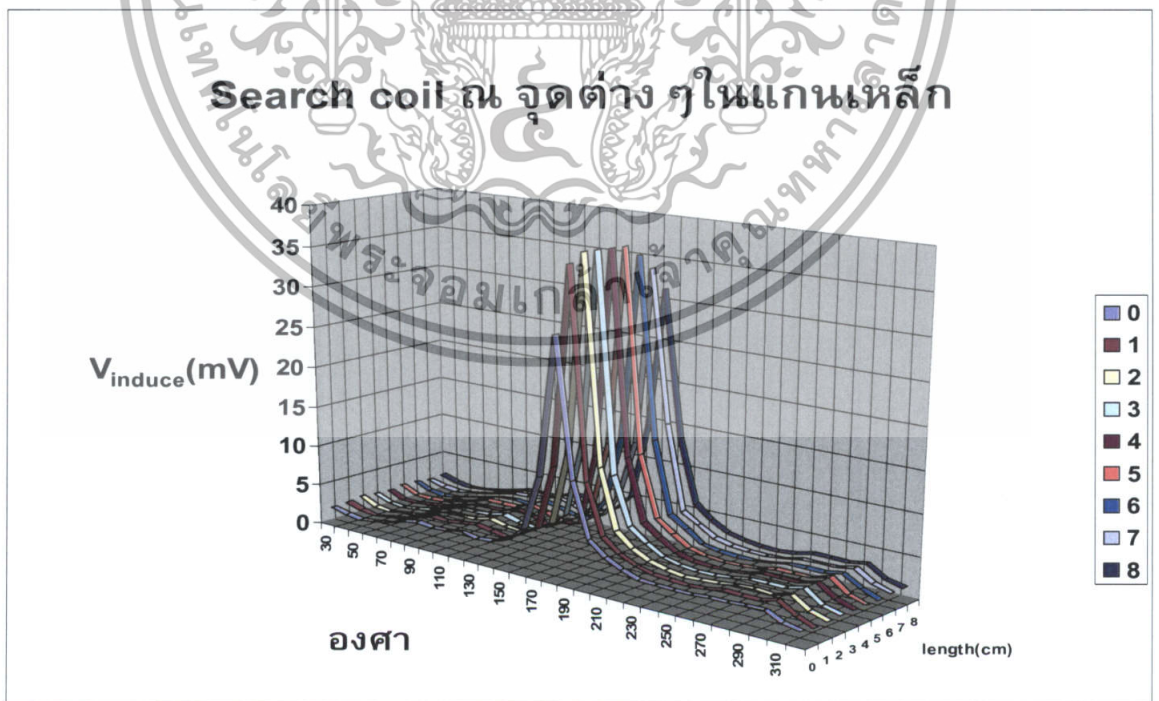


ภาพที่ 5.15 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulation ซ็อต 100% ที่มุม 180° (จุดที่ซ็อต) โดยใช้ Search Coil $3 \times 10 \times 3$ mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.16 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulation ซัด 100% ที่มุม 270° โดยใช้ Search Coil $3 \times 10 \times 3$ mm.



ภาพที่ 5.17 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน simulate ซัด 100% ตามองศาต่างๆ ที่

วัดได้จาก Search Coil $3 \times 10 \times 3$ mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

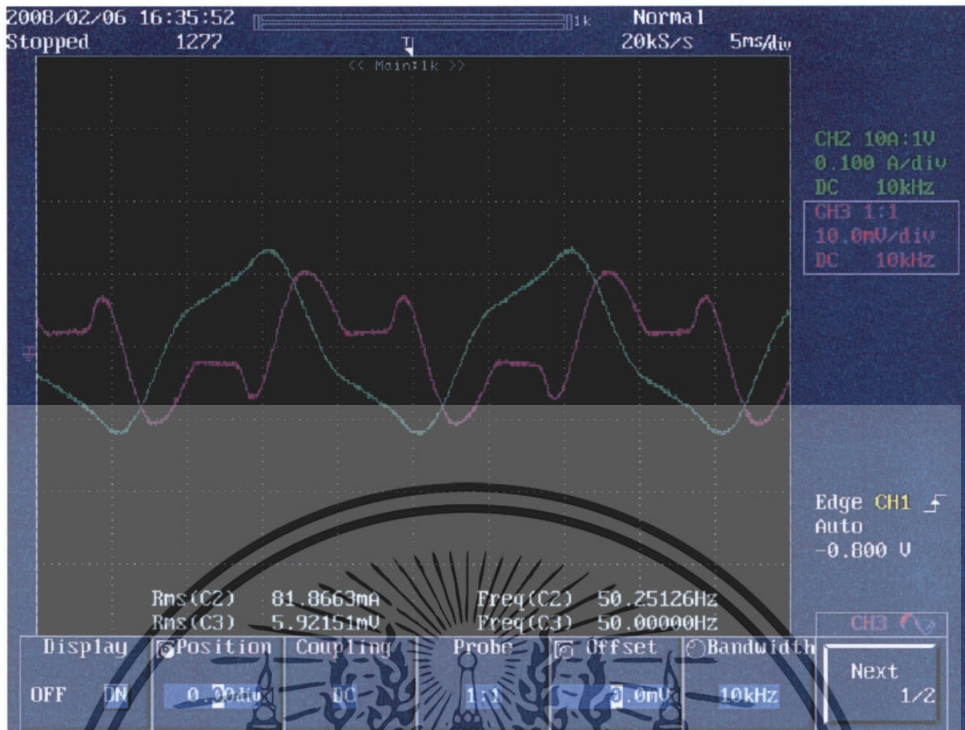
- ใช้ Search Coil ขนาด $4 \times 10 \times 2$ mm.

ตารางที่ 5.7 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติเมื่อใช้ Search Coil ขนาด $4 \times 10 \times 2$ mm.

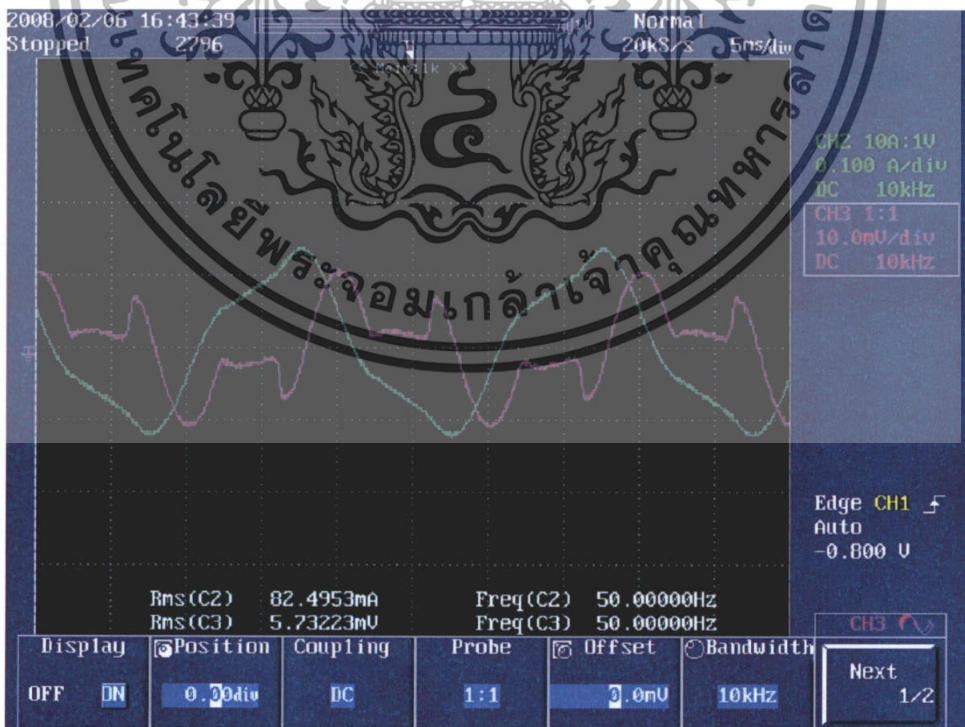
θ	V_{induce} (mV)														
	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°
L(cm.)															
0	4.31	3.14	3.19	3.01	3.72	4.54	5.37	5.10	4.96	5.34	4.05	3.55	3.35	3.47	4.21
1	5.07	2.90	3.01	3.10	3.65	4.53	5.85	5.85	5.31	6.66	4.34	3.67	3.42	3.54	4.32
2	5.18	3.16	2.98	3.12	3.54	4.51	5.90	5.73	5.37	6.67	4.43	3.69	3.44	3.51	4.37
3	5.20	3.23	2.89	3.09	3.58	4.53	5.95	6.03	5.40	6.88	4.52	3.65	3.43	3.56	4.34
4	5.35	3.15	2.87	3.07	3.59	4.54	5.92	5.80	5.46	6.96	4.57	3.66	3.45	3.59	4.35
5	5.25	3.08	2.99	3.06	3.54	4.51	5.91	5.92	5.42	6.98	4.51	3.67	3.43	3.67	4.37
6	5.19	3.24	2.97	3.13	3.63	4.47	5.92	5.93	5.39	6.81	4.25	3.65	3.44	3.59	4.38
7	5.40	3.37	3.05	3.17	3.59	4.47	5.91	5.97	5.37	6.41	4.37	3.68	3.45	3.55	4.32
8	5.53	3.54	3.11	3.15	3.50	4.22	5.76	5.74	5.22	6.20	4.26	3.61	3.37	3.54	4.25

ตารางที่ 5.7 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติเมื่อใช้ Search Coil ขนาด $4 \times 10 \times 2$ mm. (ต่อ)

θ	V_{induce} (mV)															
	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°	
L(cm.)																
0	4.91	5.10	4.61	4.95	3.83	3.51	3.63	3.83	4.05	4.65	4.67	4.20	5.18	3.33	2.44	
1	5.60	5.70	5.02	5.87	3.99	3.53	3.51	3.77	4.22	5.28	5.59	4.77	5.92	3.42	2.14	
2	5.69	5.67	5.17	6.29	4.02	3.56	3.50	3.64	4.20	5.37	5.61	4.69	6.12	3.45	2.06	
3	5.69	5.83	5.27	6.37	4.09	3.55	3.49	3.56	4.20	5.40	5.62	4.81	6.28	3.39	1.96	
4	5.73	5.88	5.32	6.61	4.10	3.53	3.48	3.55	4.08	5.29	5.57	4.88	6.35	3.27	2.00	
5	5.70	5.90	5.33	6.57	4.12	3.50	3.47	3.57	4.10	5.30	5.37	4.87	6.12	3.30	1.98	
6	5.73	5.87	5.32	6.68	4.11	3.52	3.45	3.47	4.10	5.25	5.54	4.91	6.27	3.21	1.92	
7	5.72	5.87	5.30	6.61	4.12	3.51	3.42	3.59	4.12	5.44	5.63	4.82	6.27	3.25	1.89	
8	5.60	5.72	5.10	6.51	4.12	3.49	3.42	3.60	4.13	5.39	5.48	4.48	5.98	3.10	1.93	



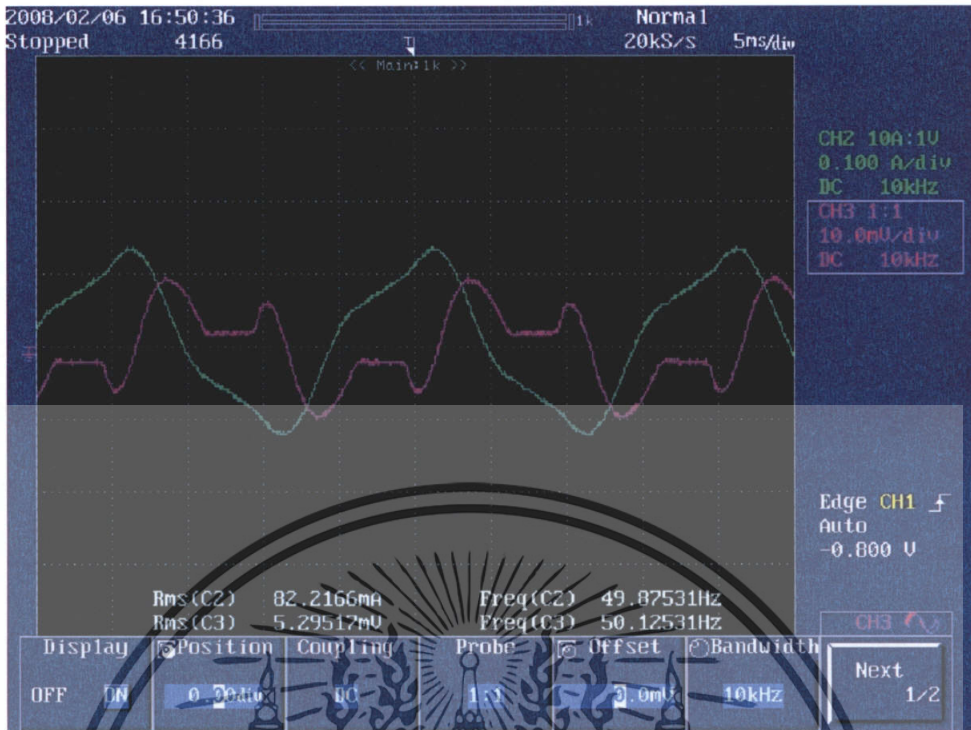
ภาพที่ 5.18 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนปกติที่มุม 90° โดยใช้ Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.



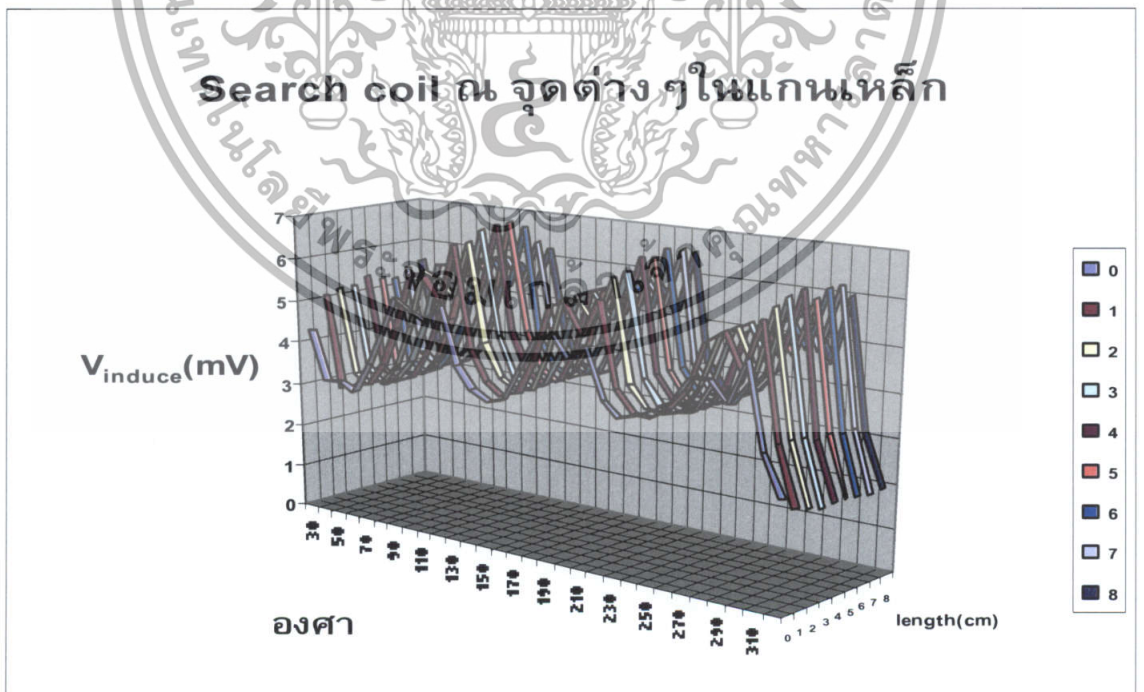
ภาพที่ 5.19 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนปกติที่มุม 180° โดยใช้

Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.20 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนปกติที่มุม 270° โดยใช้ Search Coil 4 × 10 × 2 mm.



ภาพที่ 5.2 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนปกติตามองศาต่างๆ ที่วัดได้จาก Search Coil 4 × 10 × 2 mm.

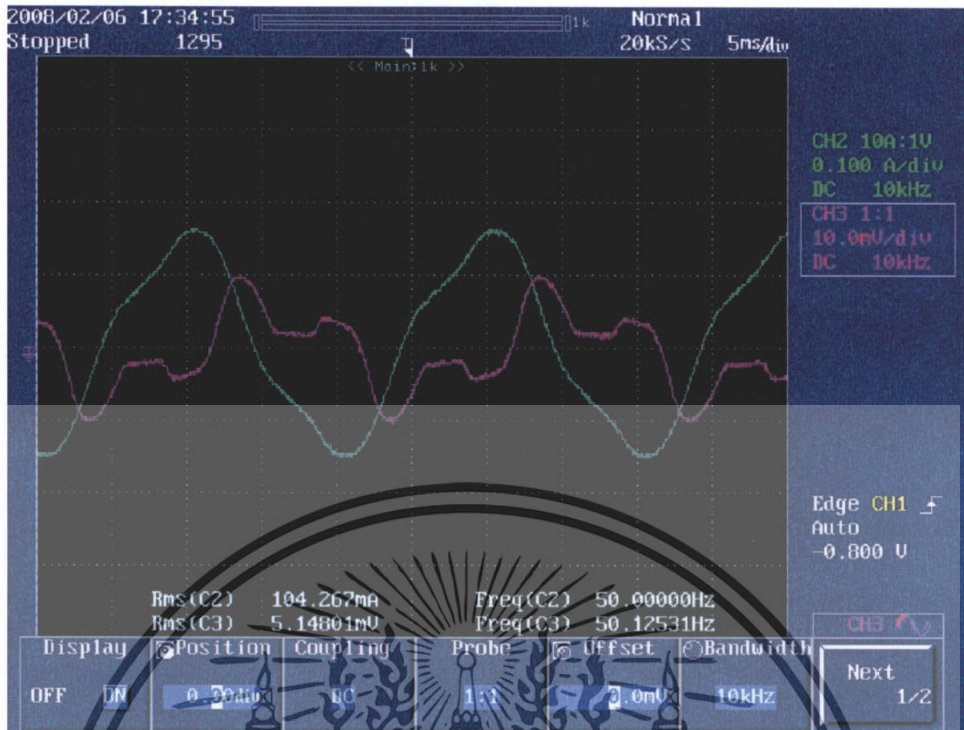
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กช็อต 50% เมื่อใช้ Search Coil ขนาด $4 \times 10 \times 2$ mm.

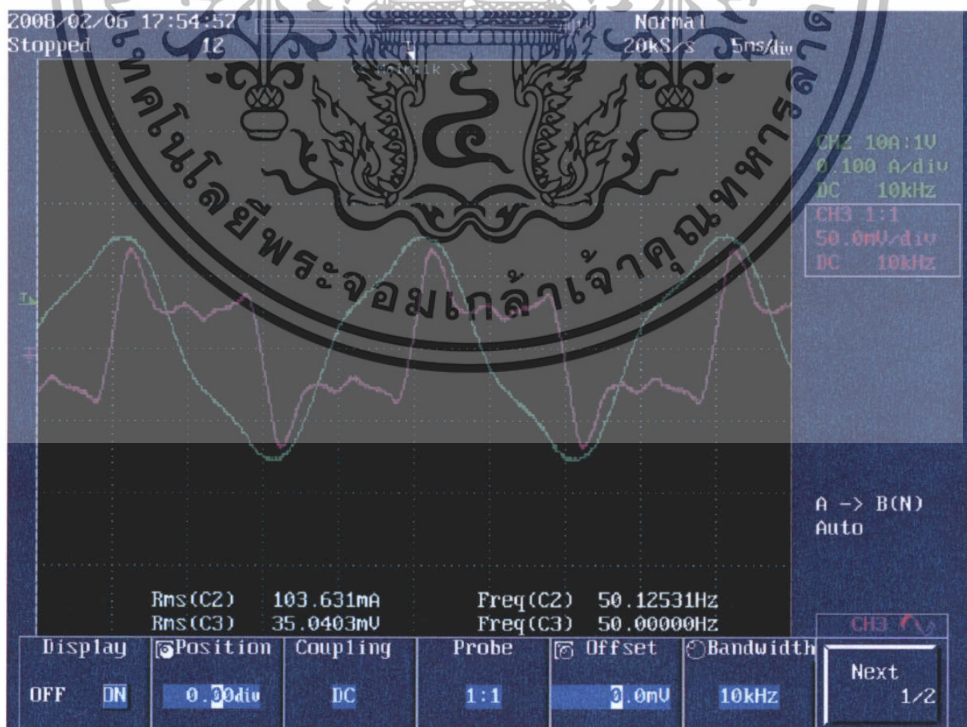
θ	V_{induce} (mV)														
	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°
L(cm.)															
0	3.81	2.35	2.34	2.44	2.74	3.94	4.25	4.51	4.61	4.62	3.62	3.91	3.72	4.79	5.97
1	4.56	2.60	2.39	2.73	2.90	3.83	4.57	4.82	4.89	4.56	3.44	3.73	3.51	4.49	5.81
2	4.41	3.01	2.33	2.69	3.06	3.95	4.79	4.76	4.75	4.47	3.37	3.49	3.13	4.87	5.95
3	4.25	2.62	2.59	2.84	3.16	3.90	4.67	4.80	4.78	4.73	3.32	3.30	3.12	4.76	5.50
4	4.37	2.64	2.55	2.93	3.18	3.99	4.88	4.79	5.43	4.70	3.31	3.37	3.41	4.71	5.82
5	4.54	2.70	2.94	2.95	3.32	4.12	5.14	5.06	5.59	5.05	3.48	3.24	3.49	4.42	6.20
6	4.79	2.99	2.92	3.10	3.52	4.37	5.46	5.37	5.97	5.40	3.61	3.39	3.51	4.53	6.01
7	4.75	3.20	2.99	3.17	3.60	4.55	5.76	5.55	6.18	5.51	3.89	3.40	3.53	3.98	6.03
8	5.30	3.24	2.97	3.23	3.66	4.65	5.50	5.63	6.02	5.57	3.89	3.35	3.47	3.95	5.39
9	5.73	3.40	2.92	3.22	3.61	4.67	5.69	5.61	6.01	5.56	3.74	3.31	3.27	3.98	4.97
10	5.62	3.74	2.99	3.21	3.55	4.73	5.40	4.52	5.99	5.46	3.65	3.73	3.29	3.91	4.65

ตารางที่ 5.8 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กช็อด 50% เมื่อใช้ Search Coil ขนาด $4 \times 10 \times 2$ mm. (ต่อ)

θ	V_{induce} (mV)														
	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°
L(cm.)															
0	10.73	19.72	10.74	6.54	4.88	3.75	3.08	3.36	3.93	4.95	4.47	4.75	4.27	3.03	2.30
1	11.61	28.10	12.70	6.87	4.20	3.98	2.88	3.18	4.91	5.03	4.42	4.98	4.66	2.50	1.82
2	12.47	35.04	12.67	5.78	4.24	3.44	2.31	3.22	4.62	4.91	4.17	5.05	3.89	2.25	1.69
3	14.71	34.76	12.90	4.91	4.54	3.47	2.76	3.15	4.09	4.69	4.18	4.85	3.87	2.67	1.77
4	13.25	25.37	11.38	5.81	4.18	3.58	3.10	3.27	4.27	4.96	4.27	5.07	4.47	2.73	2.31
5	10.89	17.45	10.09	6.83	4.32	4.08	3.17	3.58	4.64	5.54	4.67	5.32	4.81	2.80	2.43
6	8.07	10.59	8.84	8.02	4.56	3.84	3.53	3.86	4.93	5.29	5.21	5.71	4.86	3.18	2.62
7	6.95	7.24	7.38	6.14	4.31	3.41	3.80	3.81	5.21	5.69	5.52	5.69	5.19	3.39	2.49
8	6.05	6.27	6.75	5.99	4.38	3.32	3.26	3.98	5.32	6.66	5.72	5.74	5.03	3.32	2.71
9	5.47	5.82	6.31	5.71	4.36	3.36	3.86	3.95	5.46	7.05	5.84	5.96	5.96	3.36	2.73
10	5.22	5.61	6.03	5.86	4.75	4.04	3.40	4.15	5.19	5.99	6.17	5.82	5.44	3.27	3.19

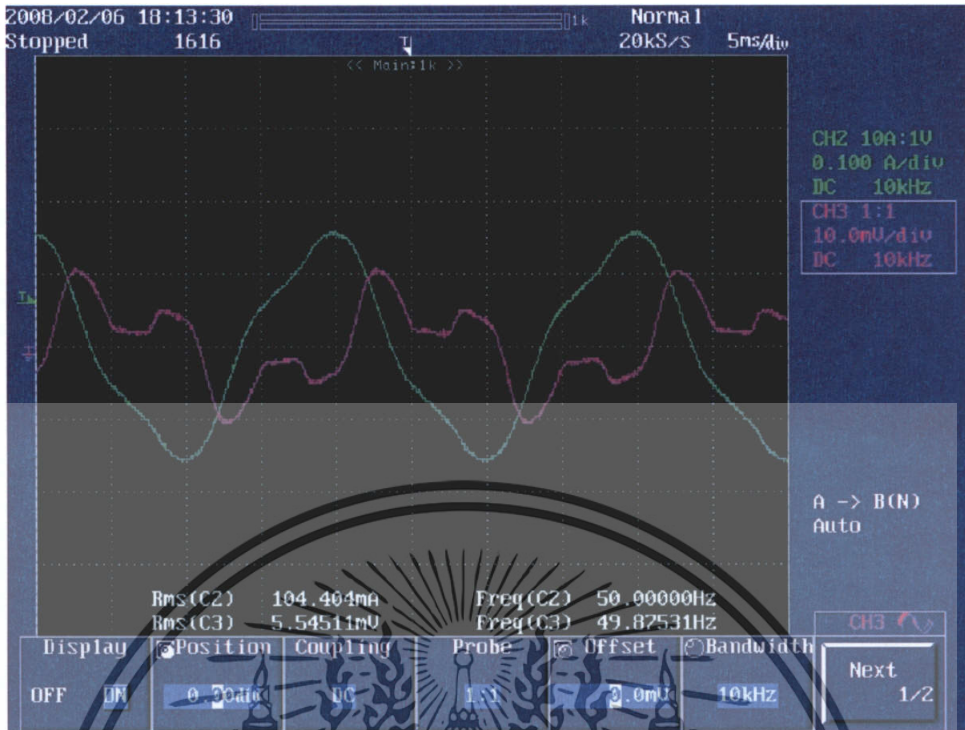


ภาพที่ 5.22 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนช็อต 50% ที่มุม 90° โดยใช้ Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.

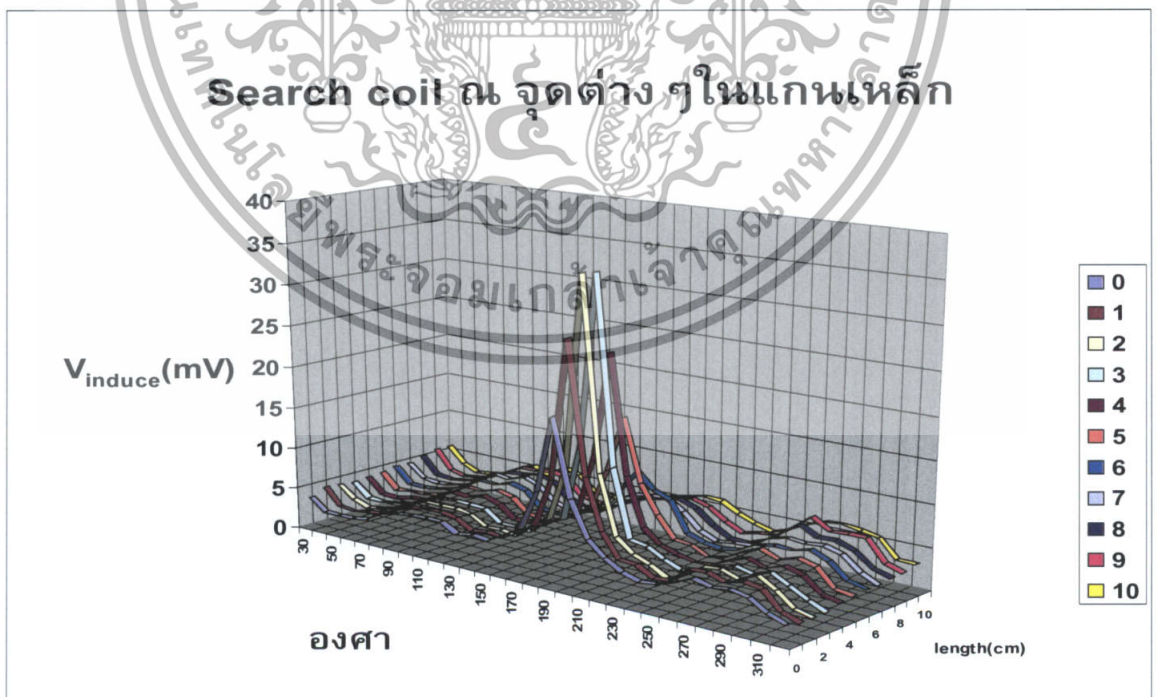


ภาพที่ 5.23 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนช็อต 50% ที่มุม 190° (จุดที่ช็อต) โดยใช้ Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.24 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนช็อด 50% ที่มุม 270° โดยใช้ Search Coil 4 × 10 × 2 mm.



ภาพที่ 5.25 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนช็อด 50% ตามองศาต่างๆ ที่วัดได้จาก

Search Coil 4 × 10 × 2 mm.

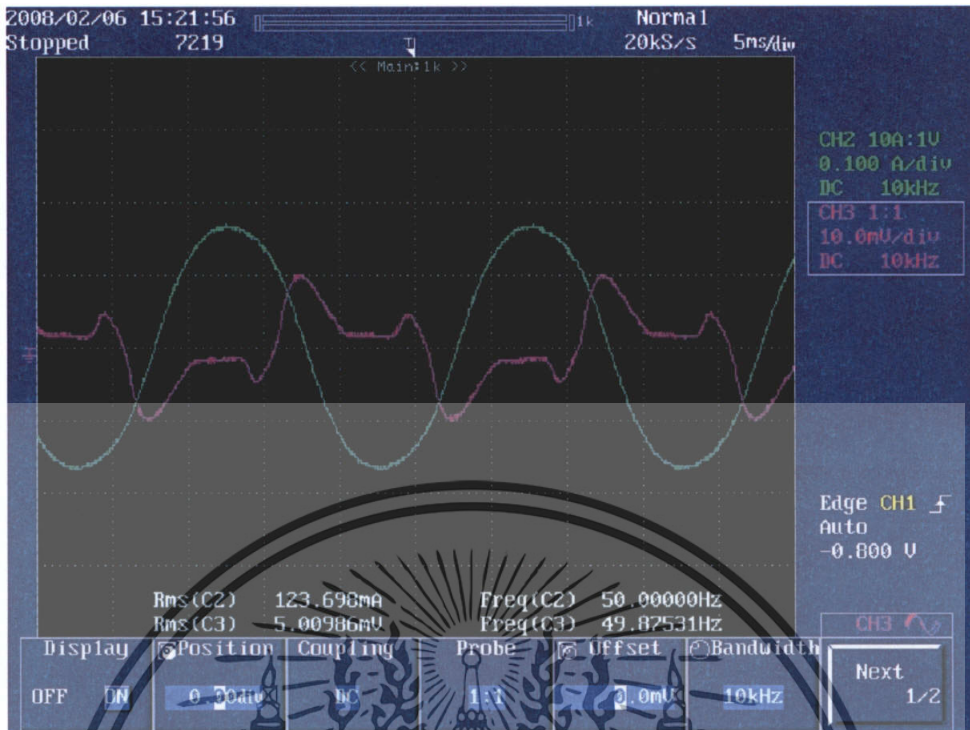
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulate ซัด 100% เมื่อใช้ Search Coil ขนาด $4 \times 10 \times 2$ mm.

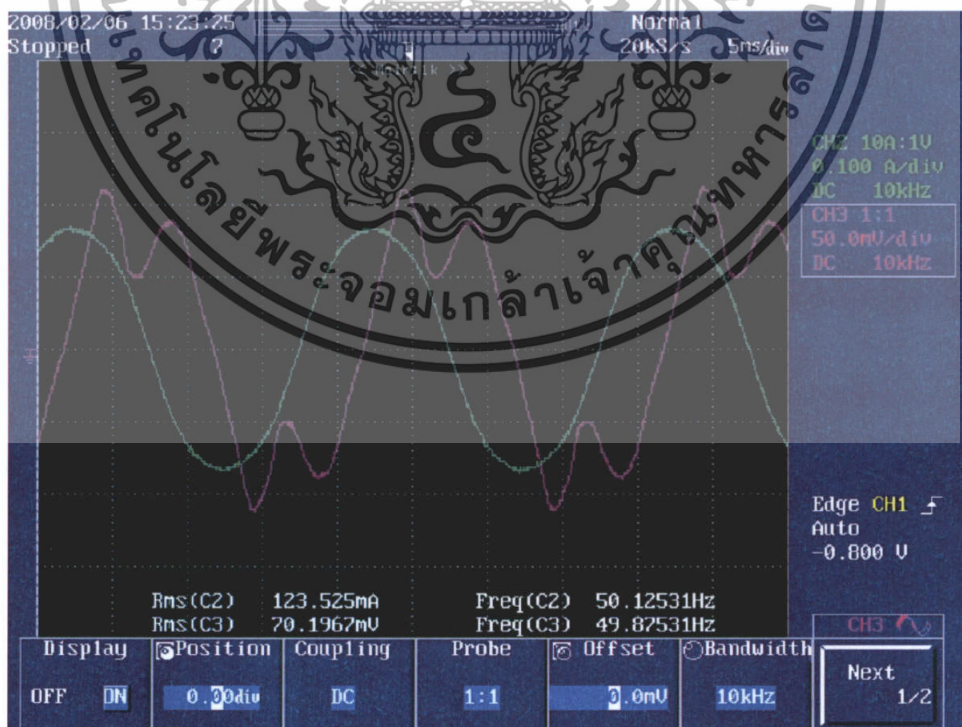
θ	V_{induce} (mV)														
	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°
L(cm.)															
0	3.77	3.09	2.65	2.58	3.47	3.60	4.53	4.48	4.59	4.82	4.37	4.76	5.87	9.13	19.48
1	4.61	2.98	2.75	2.71	3.34	3.91	5.01	4.99	5.02	6.01	4.58	4.48	5.46	8.27	19.97
2	4.68	2.99	2.71	2.82	3.27	3.97	5.04	5.05	5.06	6.28	4.57	4.51	5.35	8.34	19.99
3	4.86	3.01	2.79	2.81	3.32	3.99	4.99	5.16	5.09	6.35	4.66	4.48	5.39	8.20	21.29
4	4.67	3.02	2.82	2.93	3.28	4.02	5.10	5.16	5.16	6.43	4.65	4.49	5.35	8.23	21.46
5	4.82	3.03	3.05	2.87	3.31	4.10	5.19	5.20	5.13	6.50	4.68	4.55	5.49	8.31	20.57
6	4.75	3.10	3.03	2.91	3.44	4.15	5.10	5.25	5.11	6.36	4.72	4.60	5.64	8.40	20.45
7	4.83	3.08	2.99	3.12	3.51	4.14	5.14	5.19	5.05	6.26	4.58	4.64	5.59	8.39	21.01
8	5.01	3.35	2.95	3.03	3.41	4.07	5.07	5.15	5.03	6.27	4.66	4.68	5.77	8.40	19.89

ตารางที่ 5.9 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulate ซัด 100% เมื่อใช้ Search Coil ขนาด 4 × 10 × 2 mm.(ต่อ)

θ	V_{induce} (mV)														
	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°
L(cm.)															
0	62.66	18.54	8.93	6.78	3.08	3.91	3.80	3.80	3.82	4.20	3.99	3.75	4.15	2.61	1.68
1	70.58	18.57	8.69	6.93	3.22	3.65	3.81	3.65	3.75	4.55	4.66	4.22	5.15	2.71	1.53
2	69.35	18.39	8.71	7.20	3.07	3.69	3.72	3.46	3.70	4.49	4.78	4.16	5.17	2.73	1.56
3	70.17	18.81	8.92	7.25	2.77	3.72	3.74	3.45	3.64	4.42	4.63	4.15	5.38	2.72	1.54
4	70.52	19.06	8.85	7.43	2.80	3.69	3.40	3.31	3.70	4.33	4.65	4.15	5.34	2.77	1.61
5	70.51	19.17	8.78	7.25	2.85	3.67	3.45	3.38	3.66	4.48	4.41	4.05	5.35	2.81	1.77
6	70.19	18.86	8.11	7.24	2.80	3.65	2.94	3.31	3.73	4.36	4.57	4.15	5.20	2.62	1.48
7	70.04	18.42	8.56	7.28	2.94	3.63	3.40	3.26	3.72	4.49	4.39	4.12	5.26	2.63	1.49
8	69.00	18.67	8.69	7.54	2.94	3.70	2.57	3.21	3.68	4.31	4.44	3.92	4.85	2.39	1.41

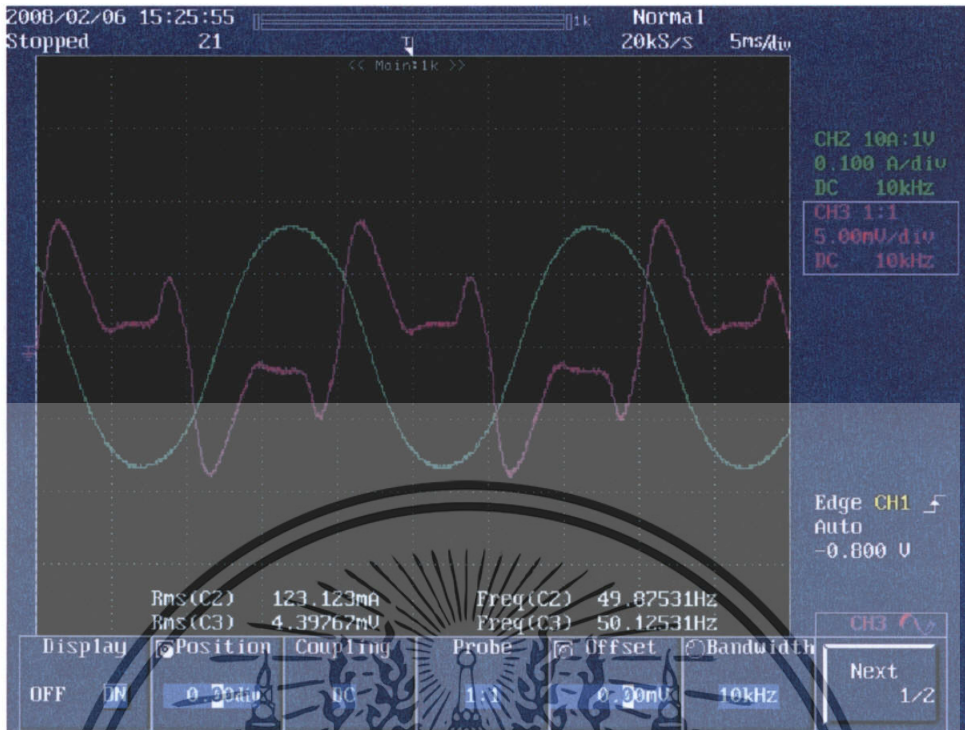


ภาพที่ 5.26 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulate ข้อัด 100% ที่มุม 90° โดยใช้ Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.

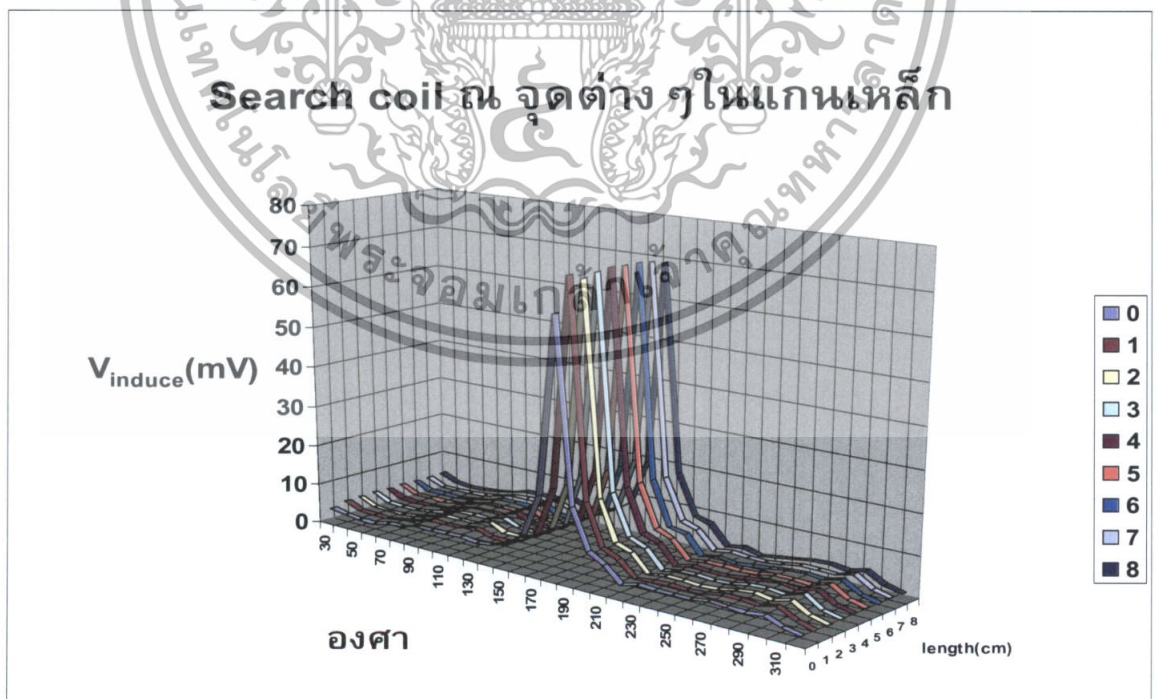


ภาพที่ 5.27 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulate ข้อัด 100% ที่มุม 180° โดยใช้ Search Coil $4 \times 10 \times 2$ mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.28 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulate ข้อัด 100% ที่มุม 270° โดยใช้ Search Coil 4 × 10 × 2 mm.



ภาพที่ 5.29 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulate ข้อัด 100% ตามองศาต่างๆ ที่

วัดได้จาก Search Coil 4 × 10 × 2 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองใช้ Search Coil กับแกนที่ปกติแล้วนำค่าแรงดันไฟฟ้า เหนี่ยวนำไปเขียนกราฟดังรูปที่ 5.9 และ 5.21 นั้นจะเห็นว่ากราฟมีลักษณะเป็นรูป sin จึงได้ทดลองต่อเพื่อหาสาเหตุที่มาดังกล่าว โดยทดลองโดยการยกสายไฟกระตุ้นแกนเหล็กให้ลอยอยู่ตรงกลางแกนเหล็กเพื่อไม่ให้มีผลของ Search Coil กับ สายกระตุ้น และทดลองเปลี่ยนมุมของแกนเหล็กที่เราจะกระตุ้นไป 30° ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

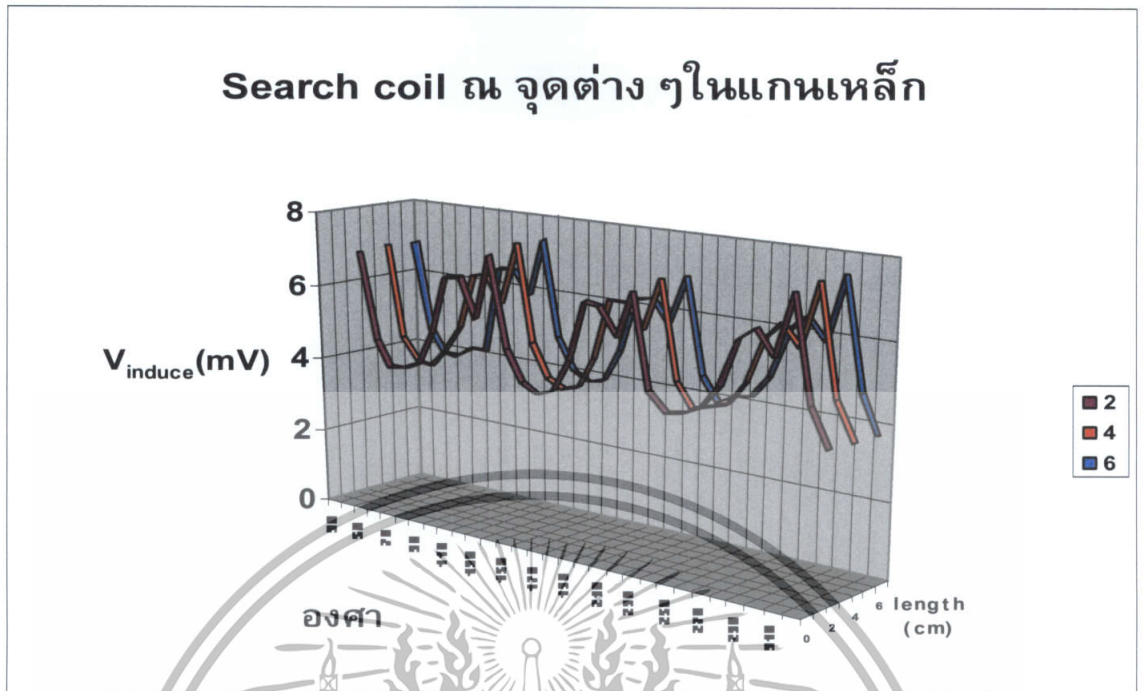


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติโดยการยกสายกระตุ้นจาก Search Coil ขนาด $4 \times 10 \times 2$ mm.

θ	V_{induce} (mV)															
	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	
L(cm.)																
2	6.83	4.44	3.78	3.82	4.01	4.90	6.47	6.52	5.51	7.21	4.81	4.01	3.78	3.93	4.80	
4	6.87	4.37	3.77	3.71	4.19	4.91	6.38	6.49	5.76	7.41	4.82	3.98	3.76	3.87	4.71	
6	6.85	4.43	3.84	3.80	4.11	4.11	6.43	6.47	5.83	7.36	4.82	3.99	3.78	3.89	4.74	

θ	V_{induce} (mV)															
	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°	
L(cm.)																
2	6.38	6.33	5.61	6.82	4.41	3.92	4.03	4.19	4.82	6.07	6.39	5.75	7.36	4.74	3.77	
4	6.26	6.28	5.63	7.01	4.47	3.87	4.01	4.12	4.76	5.89	6.36	5.82	7.47	4.71	3.75	
6	6.14	6.25	5.66	6.93	4.45	3.85	4.05	4.13	4.71	5.97	6.37	5.79	7.49	4.68	3.72	



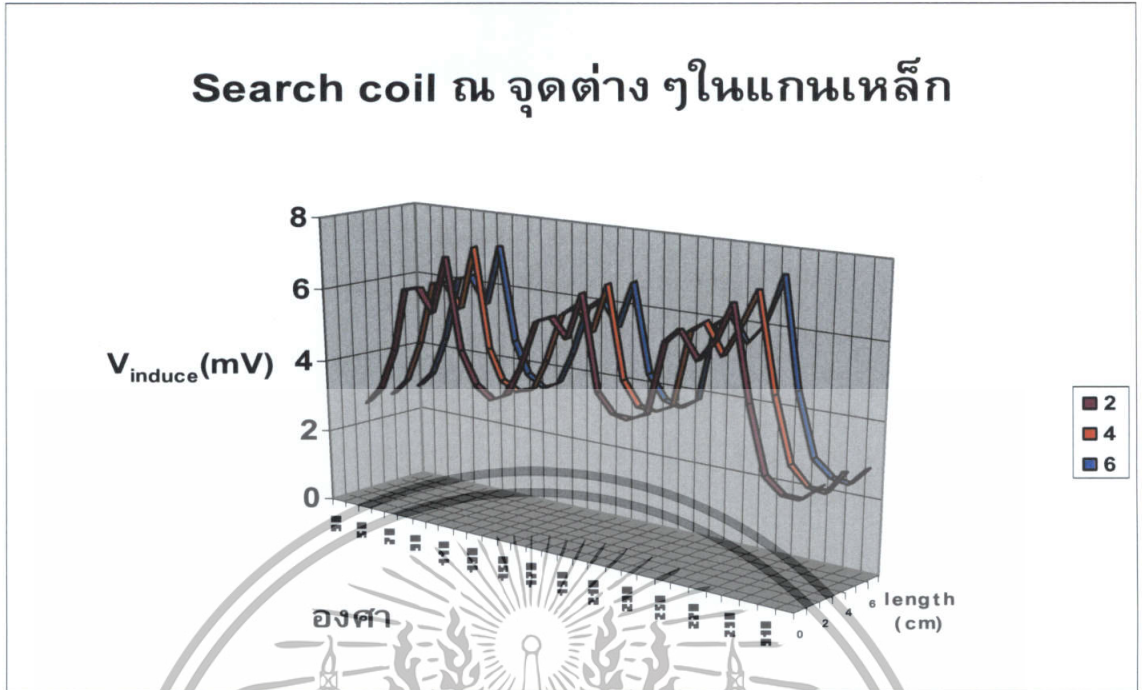
ภาพที่ 5.30 แสดงกราฟของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติโดยการยกสายกระตุ้นจาก Search Coil ขนาด $4 \times 10 \times 2$ mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 แสดงแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กปกติหมุนแกน 30° จาก Search Coil ขนาด 4 × 10 × 2 mm.

θ	V_{induce} (mV)														
	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°
L(cm.)															
2	2.62	3.12	4.27	6.05	6.14	5.52	7.09	4.61	3.73	3.41	3.58	4.46	5.73	5.91	5.40
4	2.70	3.17	4.30	6.08	6.18	5.49	7.23	4.51	3.70	3.46	3.59	4.45	5.75	6.07	5.43
6	2.78	3.21	4.26	6.06	6.21	5.47	7.15	4.54	3.69	3.36	3.60	4.47	5.76	6.12	5.41

θ	V_{induce} (mV)														
	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°
L(cm.)															
2	6.65	4.14	3.65	3.58	3.82	5.73	6.13	5.42	5.98	6.96	4.54	2.83	2.44	2.43	2.84
4	6.75	4.28	3.66	3.59	3.81	5.84	6.16	5.34	6.17	7.13	4.59	2.89	2.40	2.35	2.97
6	6.67	4.27	3.66	3.53	3.82	5.87	6.19	5.50	6.09	7.37	4.49	2.84	2.44	2.34	2.84



ภาพที่ 5.31 แสดงกราฟของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กมุมแกน 30° จาก Search Coil ขนาด $4 \times 10 \times 2 \text{ mm}$.

จากการทดลองวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในอากาศภายในแกนเหล็กชนิดต่างๆ ด้วย Search Coil ทั้ง 2 ขนาดนั้นเราสามารถนำผลมาวิเคราะห์ได้ดังนี้

- Search Coil ขนาด $3 \times 10 \times 3 \text{ mm}$.

จากการทดสอบแกน Simulation ข้อดี 100% จุดที่มีการช็อตและวัดแล้วได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมากที่สุดมีค่า 37.64 mV ซึ่งเราสามารถนำค่านี้นำมาคิดย้อนกลับไปเพื่อหา m.m.f. และค่ากระแสไหลวนได้ดังนี้

$$\text{จาก} \quad E_{\text{rms}} = 4.44 f N A B_{\text{max}}$$

$$B_{\text{max}} = \frac{E}{4.44 f N A}$$

$$B_{\text{max}} = 37.64 \times 10^{-3} / 4.44 \times 50 \times 400 \times 0.0035 \times 0.0105$$

$$= 0.011534 \quad \text{Tesla}$$

$$B_{\text{max}} = 0.008156 \quad \text{Tesla}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ทางนิตยสารการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H = 0.008156/4\pi \times 10^{-7}$$

$$H = 6490.34 \text{ A/m}$$

จาก $m.m.f. = Ni = HI$

$$m.m.f. = 6490.34 \times 0.0075$$

$$= 48.678 \text{ A-t}$$

จากค่ากระแสที่วัดได้ตอนทำการ Simulate คือ 59.2 A จะเห็นว่าค่าแตกต่างกันพอสมควร

- Search Coil ขนาด $4 \times 10 \times 2 \text{ mm}$.

เช่นเดียวกับ Search Coil ขนาด $3 \times 10 \times 3 \text{ mm}$. ที่ได้ทำการทดสอบแกน Simulate ซัด 100% จุดที่มีการซัดและวัดแล้วมีค่าแรงดันเหนี่ยวนำมากที่สุดมีค่า 70.58 mV ซึ่งเรานำมาคิดย้อนกลับได้ดังนี้

จาก

$$E_{rms} = 4.44 fNA B_{max}$$

$$B_{max} = \frac{E}{4.44 fNA}$$

$$B_{max} = 70.58 \times 10^{-3} / 4.44 \times 50 \times 400 \times 0.005 \times 0.011$$

$$= 0.01445 \text{ Tesla}$$

$$B_{max} = 0.010218 \text{ Tesla}$$

จาก $B = \mu_0 H$

$$H = 0.010218 / 4\pi \times 10^{-7}$$

$$H = 8131.226 \text{ A/m}$$

จาก $m.m.f. = Ni = HI$

$$m.m.f. = 8131.226 \times 0.0075$$

$$= 60.9842 \text{ A-t}$$

จากค่ากระแสที่วัดได้ตอนทำการ Simulate คือ 59.2 A ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมากเพราะฉะนั้น Search Coil ขนาด $4 \times 10 \times 2 \text{ mm}$. จึงสามารถวัดค่าได้ใกล้เคียงมากกว่า ดังนั้นเราจึงนำไปคำนวณต่อเพื่อหา m.m.f. ของแกนที่ซัด 50% ซึ่งเป็นการเชื่อมภายในแกนจริงๆ ไม่สามารถวัดกระแสที่ไหลได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แกนช็อด 50% เราวัดด้วย Search Coil ขนาด $4 \times 10 \times 2$ mm. นั้นได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมากที่สุดคือ 35.04 mV ซึ่งเราก็นำมาคำนวณกลับเพื่อหา m.m.f. ของจุดช็อด หรือค่ากระแสไหลวนได้ดังนี้

จาก
$$E_{rms} = 4.44 fNA B_{max}$$

$$B_{max} = \frac{E}{4.44 fNA}$$

$$B_{max} = 35.04 \times 10^{-3} / 4.44 \times 50 \times 400 \times 0.005 \times 0.011$$

$$= 0.00717445 \text{ Tesla}$$

$$B_{max} = 0.005073 \text{ Tesla}$$

จาก

$$B = \mu_0 H$$

$$H = 0.005073 / 4\pi \times 10^{-7}$$

$$H = 4036.965 \text{ A/m}$$

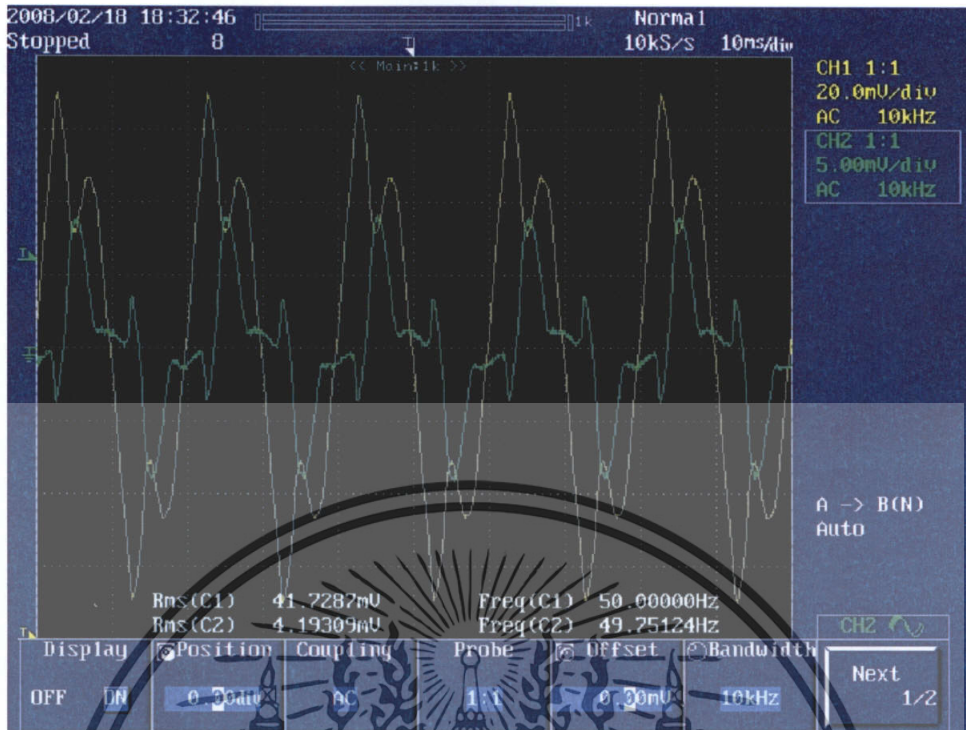
จาก

$$\text{m.m.f.} = Ni = HI$$

$$\text{m.m.f.} = 4036.965 \times 0.0075$$

$$= 30.277 \text{ A-t}$$

จากค่า m.m.f. ที่ได้ก็คือค่าประมาณของกระแสไหลวนถ้าหากเราคิดว่าจุดที่ช็อดคือการพันขดลวดเพียง 1 รอบ ค่ากระแสไหลวนก็คือค่า m.m.f. นั้นเอง



ภาพที่ 5.32 แสดงกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกน Simulate ข้อัด 100% ระหว่างจุด 30 องศา และ จุด Short ที่ 180 องศา

จากภาพที่ 5.32 เป็นการทดลองเปรียบเทียบมูฟเฟสของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแกนเหล็กที่ทำการ Simulation ข้อัด 100% โดยใช้ Search Coil ทั้งสองอัน ที่มูม 30 องศา และที่จุดที่ทำการข้อัดที่มูม 180 องศา จะเห็นว่ามูฟเฟสของ Search Coil ทั้งสองตรงกัน เนื่องจากได้กำหนดให้ Search Coil หนึ่งด้านเดียวเข้าแกนเหล็กตลอด ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านหน้าตัดของ Search Coil ทางด้านเดียวกันตลอดเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ความผิดปกติของแกนเหล็กภายในมอเตอร์นั้น สาเหตุส่วนใหญ่มาจากการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เคลือบแผ่นเหล็ก จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าถ้าแกนเหล็กมีการช็อคภายในมากค่าความสูญเสียก็จะมากตามไปด้วย ดังเช่นค่าความสูญเสียของแกนเหล็กที่ ช็อคเชื่อมภายใน 50% กับแกนเหล็กที่เราทำการ Simulate ช็อค 100% ที่แกนเหล็ก Simulate ช็อค 100% จะมีค่าความสูญเสียมากกว่า แต่การมีการช็อคภายในแกนเหล็กของมอเตอร์นั้น มอเตอร์ก็ยังทำงานได้ตามปกติ ซึ่งเราไม่สามารถรู้ได้เลย แต่จากการทดลองนั้นจะทำให้ทราบค่าความสูญเสียภายในแกนเหล็ก (W/kg) และสามารถนำไปคำนวณค่าไฟฟ้าที่เราจะต้องเสียไปเปล่าจากค่าความสูญเสียภายในแกนเหล็กนั้นเปรียบเทียบให้เห็นอย่างชัดเจน ที่แกนเหล็กที่มีการช็อคน้อยจะมีค่าไฟฟ้าที่ต้องเสียเปล่าไม่มาก คิดเป็นอัตราค่าไฟฟ้าแต่ละเดือนต่อมอเตอร์แต่ละตัวแล้วก็ไม่มากมาย แต่ถ้าแกนเหล็กที่มีการช็อคมากขึ้น อัตราค่าไฟฟ้าที่ต้องเสียเปลาก็จะยิ่งมากขึ้น ถ้าคิดเป็นอัตราค่าไฟฟ้าต่อเดือนต่อมอเตอร์แต่ละตัว แล้วหาจุดคุ้มทุนเปรียบเทียบกับการซื้อมอเตอร์ตัวใหม่ ก็จะมีผลดีต่อระบบธุรกิจ ซึ่งตรงนี้ก็ขึ้นอยู่กับตัวผู้ใช้มอเตอร์นั้นเองว่าจะรับได้กับค่าไฟฟ้าที่จะต้องเสียไปเปล่าแต่ละเดือนหรือไม่ ซึ่งจะเป็นคนตัดสินใจว่ามอเตอร์ตัวนั้นควรที่จะใช้งานต่อไปหรือถึงเวลาที่จะเปลี่ยนหรือซ่อมแซม นอกจากนี้ปัญหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กทำให้ต้องเสียค่าไฟฟ้าเสียเปล่าในแต่ละเดือนแล้วนั้น การช็อคภายในของแกนเหล็กยังทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในซึ่งเกิดจากกระแสไหลวน อาจเป็นผลให้มอเตอร์เสียหายเพิ่มขึ้นในอนาคตอีกด้วย จะทำให้อายุการใช้งานของมอเตอร์สั้นลงจึงไม่ควรมองข้าม

เมื่อเราทราบแล้วว่ามอเตอร์นั้นมีการช็อคภายในแกนเหล็ก ก็จะต้องรู้ว่าแกนเหล็กนั้นเสียตรงจุดไหน จากการทดลองสร้าง Search Coil ขึ้นมาแล้วนำไปทดสอบกับแกนเหล็กแบบต่างๆ นั้น ทำให้เห็นว่า Search Coil นั้นสามารถตรวจสอบหาจุดที่มีความผิดปกติภายในแกนเหล็กได้ โดยจุดที่ผิดปกติจะวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้สูงขึ้นมา ซึ่งแตกต่างจากจุดที่ปกติมาก โดยค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่วัดได้นั้นจะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดและจำนวนรอบของ Search Coil ถ้าพื้นที่หน้าตัดของ Search Coil มากก็จะวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้มาก แต่ถ้าพื้นที่หน้าตัดน้อยก็จะวัดได้น้อย เช่นเดียวกับจำนวนรอบของ Search Coil ถ้าจำนวนรอบของ Search Coil มากก็จะวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้มาก แต่ถ้าน้อยก็จะวัดได้น้อย นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับความหนาของ Search Coil ด้วย เพราะว่าถ้า Search Coil ยิ่งหนาเส้นแรงแม่เหล็กจะคล่องชดลวดได้น้อย แต่ถ้า Search Coil บางเส้นแรงแม่เหล็กจะคล่องได้มากขึ้น

การตรวจหาจุดที่ผิดปกติบนแกนเหล็กด้วย Search Coil นี้ยังสามารถประมาณค่า m.m.f. และค่ากระแสไหลวน (Eddy Current) ณ จุดที่ผิดปกติได้ด้วย จากการคำนวณย้อนกลับด้วยสมการ $E_{rms} = 4.44 fNA B_{max}$

จากการทดลองในช่วงท้ายจะเห็นได้ว่า การตรวจหาจุดที่ผิดปกติด้วย Search Coil นั้น ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้ในแต่ละจุดของแกนเหล็กขึ้นอยู่กับความหนาของแกนเหล็กด้วย คือถ้าช่วงที่แกนเหล็กบางฟลักซ์แม่เหล็กจะรั่วไหลออกมามากกว่าจุดที่แกนเหล็กหนากว่า ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่วงที่แกนเหล็กบางมีค่ามากกว่าจุดที่แกนเหล็กหนา แต่ผลจากความหนาของแกนเหล็กนี้จะมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ณ จุดที่แกนเหล็กผิดปกติจริงๆ

สำหรับข้อเสนอนี้คือจากการทำการทดลองการวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วย Search Coil จะพบว่า Search Coil นั้นจะได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ง่าย อาจจะทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความผิดพลาดไปได้ เพราะฉะนั้นจึงควรทำ Search Coil ให้มีความมั่นคง และถ้าเป็นไปได้ไม่ควรใช้มือจับขณะทดสอบ จึงจะได้ค่าที่มีความเที่ยงตรงและน่าเชื่อถือสูงขึ้น



เอกสารอ้างอิง (Reference)

- [1] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, **Electric Machinery**, 6th Ed., McGRAW-HILL, 2003
- [2] William H. Hayt, Jr., John A. Buck, **Engineering Electromagnetics**, 7th Ed., McGRAW- HILL International Edition, 2006
- [3] รศ.พิชิต ล้ายอง, **Electromechanical Energy Conversion and Electrical Machines**, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] อานันท์วัฒน์ คุณากร, **เครื่องจักรกลไฟฟ้า, การขับเคลื่อนและระบบ**, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [5] มนัส สังวรศิลป์ และ วรรณ ภัทรอมรกุล, **คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์**, กรุงเทพฯ, สนพ. อินโฟเพรส, 2543.
- [6] ดร.ปัญญา ยอดโอวาท, **เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ AC Electrical Machinery**, ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ
- [7] คมวัฒน์ วัฒนาภักดีดำรง, จิรศักดิ์ เหล่าวาณิชวัฒนา, ลภชนก ทิมสถิตย์, “การศึกษาความไม่สมบูรณ์ของแกนเหล็ก (The Study of Electromagnetic Core Imperfection)”, **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2548**
- [8] วีรยุทธ แซ่แผ่, สาธิต จงจิตมันคง, หม่อม ราชวงศ์, “เทคนิคการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (Evaluation Technique of Loss in Magnetic Core)”, **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2549**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



นาย วัฒนพล สินประเสริฐ ชื่อเล่น อัม

วันเกิด 22 กรกฎาคม 2528

การศึกษา

มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสตรีสมุทรปราการ

มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีสมุทรปราการ

ปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

e-mail : um_electric@hotmail.com โทร. 089-449-4315



นาย ดนัย เมธาวิสรเสริญ ชื่อเล่น โย

วันเกิด 11 กรกฎาคม 2528

การศึกษา

มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเซนต์หลุยส์

มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎิ์

ปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

e-mail : joker_ai@hotmail.com โทร. 081-343-1230



นาย ทศพร ทองศิริ ชื่อเล่น ทศ

วันเกิด 30 ธันวาคม 2527

การศึกษา

มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสุราษฎร์ธานี

มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสุราษฎร์ธานี

ปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

e-mail : toss_27@hotmail.com โทร. 086-687-0387



นาย นิธิศ อุทัยไพศาลวงศ์ ชื่อเล่น บอย

วันเกิด 28 มิถุนายน 2528

การศึกษา

มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสตรีสมุทรปราการ

มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีสมุทรปราการ

ปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

e-mail : penus4u@hotmail.com โทร. 089-156-6352

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้