



เครื่องกราวเดอร์โรเตอร์ทดสอบ
GROWLER ROTOR TESTING



โดย
นายพรพรรณา สรรพทรัพย์
นายชาญ คณานุรักษ์
นายอมร พรหมมานอก

วัน เดือน ปี.....	30 กย 2541
เลขทะเบียน.....	038226
เลขเรียกหนังสือ.....	T39206 พ 217 ๑

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2539

ปีการศึกษา 2539

เครื่องกราวเลอร์โรเตอร์ทดสอบ
GROWLER ROTOR TESTING



อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์พิชิต ล้ายอง

อาจารย์วีระศักดิ์ วงศ์วิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2539

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง เครื่องกราวเลอร์โรเตอร์ทดสอบ

ผู้จัดทำ



นายพรพธมา สรรพทรัพย์

นายชาญ คณาบุรุษ

นายอมร พรหมมานอก

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ พิชิต ล้าของ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ วีระศักดิ์ วงศ์วิวัติ)

เครื่องกราวเลอร์โรเตอร์ทดสอบ

นายพรพรรณา สรรพทรัพย์

นายชาญ คณาบุรุษย์

นายอมร พรหมมานอก

อาจารย์พิชิต ถ้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์วีระศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการทำเครื่องกราวเลอร์ เพื่อใช้ตรวจสอบการชำรุดของแท่งตัวนำในโรเตอร์แบบกระกระรอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ถ้าแท่งตัวนำในโรเตอร์ชำรุดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร โดยทั่วไปโรเตอร์ชนิดนี้ไม่สามารถใช้เครื่องวัดที่มีอยู่ทั่วไปวัดได้ การชำรุดของโรเตอร์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้กำลังของมอเตอร์ตกลงขณะใช้งาน ดังนั้นเครื่องกราวเลอร์นี้จะเป็นเครื่องมือช่วยตรวจสอบว่าโรเตอร์นี้ชำรุดหรือไม่ ได้ง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น โดยการตรวจสอบจะอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กวิ่งผ่านตัวโรเตอร์

GROWLER ROTOR TESTING

Pornpanna Sanpasap

Chanu Kananurak

Amorn Prommanok

Pichit Lumyong Advisor

Verasak Wongviwat Advisor

1997

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to create a testing device for the squirrel cage rotor of induction motors. If the rotor bar breaks, then the magnetic field and current flow will change in the circuit. In general, the rotor cannot be checked by general measurements. In most cases, the rotor breakdown is the result of a reduction in motor power. So, the simplest method to test the rotor is to run the magnetic field through the rotor

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญภาพ	III
สารบัญตาราง	V
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วงจรแม่เหล็ก	2
2.1 กฎของโอห์มสำหรับวงจรแม่เหล็ก	2
2.2 แรงเคลื่อนทางแม่เหล็ก	4
2.3 ความเข้มของสนามแม่เหล็ก	4
2.4 ความซึมซาบสัมบูรณ์	5
2.5 ค่าความซึมซาบของสูญญากาศ	5
2.6 ค่าความซึมซาบสัมพัทธ์	6
2.7 ค่าความต้านแม่เหล็ก	7
2.8 B-H Curve	8
2.9 การทดลองเพื่อหา B-H Curve	11
2.10 Magnetic Hysteresis And Hysteresis Loop	16
2.11 Eddy Current	18
2.12 ช่องว่างอากาศ	21
2.13 เส้นแรงแม่เหล็กรั้วไหล	22
2.14 เส้นแรงแม่เหล็กตรงริมตะเข็บ	23
2.15 ความเหมือนกันระหว่าง 2 วงจร	23
2.16 สรุปรูปหน่วยของค่าต่าง ๆ	24
บทที่ 3 โรเตอร์	25
บทที่ 4 การออกแบบและการสร้างกราวเลอร์	29

สารบัญ

หน้า

บทที่ 5 การพัฒนางจร	39
5.1 ภาคกำเนิดสัญญาณ	44
5.2 ภาคขยายสัญญาณและเร็กติไฟเออร์	45
5.3 ภาคเปรียบเทียบสัญญาณ	46
5.4 ภาคแสดงผล (1)	47
5.5 ภาคเปรียบเทียบสัญญาณแบบพิเศษ	48
5.6 ภาคแสดงผล (2)	49
5.7 หลักการทำงานของวงจร	49
5.8 สรุปผลการทดลอง	51
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ	52
- ข้อมูลแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าของมอเตอร์	52
กิตติกรรมประกาศ	
บรรณานุกรม	

สารบัญภาพ

หน้า

- รูป 2.1 วงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก	2
- รูป 2.2 B-H Curve หรือกราฟความเป็นแม่เหล็กของสาร Ferromagnetic	8
- รูป 2.3 รูปขยายของ Magnetization curve	9
- รูป 2.4 Magnetizing สำหรับการประยุกต์ใช้งาน	10
- รูป 2.5 ตัวอย่างของขดลวดที่พันอยู่บนแกนทอรรอยด์	11
- รูป 2.6 วงจรเพื่อใช้ในการหา B-H	12
- รูป 2.7 Cambridge Fluxmeter	13
- รูป 2.8 B-H Curve หรือ Magnetization Curve	15
- รูป 2.9 วงจรแม่เหล็กพร้อมด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก	16
- รูป 2.10 Hysteresis Loop ของวัสดุแต่ละชนิด	17
- รูป 2.11 กระแสที่เป็นรูปของแกนเหล็ก	19
- รูป 2.12 แผ่นเหล็กบางที่วางไว้นานกับเส้นแรงแม่เหล็ก	20
- รูป 2.13 Stacking Factor	20
- รูป 2.14 แสดงช่องว่างอากาศ	21
- รูป 2.15 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล	22
- รูป 2.16 Flux Fringing	23
- รูป 2.17 แสดงความเหมือนกันระหว่าง 2 วงจร	23
- รูป 2.18 ตารางแสดงการเปรียบเทียบระบบ SI กับระบบต่างๆ	24
- รูป 3.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	26
- รูป 3.2 รูปแบบของโรเตอร์แบบพันขดลวด	27
- รูป 4.1 ลักษณะของโรเตอร์ที่นำมาทดสอบ	29
- รูป 4.2 ลักษณะของกราวเลอร์	30
- รูป 4.3 ลักษณะของการพันขดลวด	30

สารบัญภาพ

หน้า

- รูป 5.1 วงจรเริ่มแรกที่ใช้ทดลองกราวเดอร์	39
- รูป 5.2 วงจรที่ใช้ในการตรวจจับการขาดของโรเตอร์	40
- รูป 5.3 การต่อค่าความต้านทาน	41
- รูป 5.4 วงจรที่ใช้ในการทดลองใช้งานจริง	43
- รูป 5.5 แผนผังการทำงานของวงจร	44
- รูป 5.6 แสดงภาคกำเนิดสัญญาณ	44
- รูป 5.7 ภาคขยายสัญญาณและเร็กติไฟเออร์	45
- รูป 5.8 ภาคการเปรียบเทียบสัญญาณ	46
- รูป 5.9 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ	46
- รูป 5.10 ภาคแสดงผล (1)	47
- รูป 5.11 ภาคเปรียบเทียบสัญญาณแบบพิเศษ	48
- รูป 5.12 ภาคแสดงผล (2)	49

สารบัญตาราง

	หน้า
- ตารางที่ 1 ใช้โรเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 1 HP ที่ไม่มีรอยขาด	33
- ตารางที่ 2 ใช้โรเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 1.5 HP ที่มีรอยขาด	33
- ตารางที่ 3 ใช้โรเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 3/4 HP ที่มีรอยขาด	34



บทที่ 1

บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันมีการนำมอเตอร์ไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้งานในหลาย ๆ ด้านเช่น นำไปขับปั๊มน้ำ นำไปขับสายพานลำเลียง ขับโหลตที่เป็นฟืนเฟืองเกียร์ ระบบลิฟท์ในโรงงาน อุตสาหกรรมต่าง ๆ และอีกหลาย ๆ อย่างนอกเหนือจากที่ยกตัวอย่างมาแล้ว ซึ่งในการนำมอเตอร์มาใช้งานในปริมาณที่มากขนาดนี้ ประกอบกับการบำรุงรักษามอเตอร์อาจจะน้อยเกินไปหรือการบำรุงรักษาที่ไม่ถูกวิธี ทำให้มอเตอร์จำนวนมากเสียหายได้ เสียขั้นใช้การไม่ได้ (Motor Fails To Start) หรืออาจจะยังใช้การได้บ้างแต่ใช้ได้ในเวลาอันสั้น (Motor Runs To Slow) ซึ่งปัญหาเหล่านี้จะพบได้บ่อยครั้ง มีหลายสาเหตุที่ทำให้มอเตอร์ไม่สตาร์ทหรือสตาร์ทไปแล้วหมุนช้าลงแล้วหยุด แต่มีสาเหตุหนึ่งที่เกิดจากความผิดปกติบนโรเตอร์ เช่น การเปิดหรือลัดวงจรของโรเตอร์ (Open or Shorted Rotor) วิธีการแก้ไขก็คือ ตรวจสอบตามรอยบัคกรี รอยเชื่อมค่อต่าง ๆ ว่าอยู่ในสภาพดีหรือไม่ ถ้าเรียบร้อยดีก็ตรวจสอบเช็คการลัดวงจรของโรเตอร์ (Shorted Rotor) ด้วยเครื่องกราวเลอร์อามเจอร์เทสติ้ง (Growler Amature Testing) สำหรับโรเตอร์ที่เป็นแบบพันขดลวด (Wound Rotor) หรือเช็คการเปิดวงจรของโรเตอร์ (Open Circuit or High Resistance) ด้วยเครื่องกราวเลอร์โรเตอร์เทสติ้ง (Growler Rotor Testing) สำหรับโรเตอร์ที่เป็นแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage) ซึ่งตรงกับจุดมุ่งหมายของการทำโครงการนี้ คือ ต้องการสร้างเครื่องเช็คความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์แต่ขอบเขตของโครงการ คือ ตรวจสอบโรเตอร์ที่เป็นแบบกรงกระรอกเท่านั้น คือ สามารถตรวจสอบเช็คได้ว่าแท่งตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์นั้นขาดหรือไม่

บทที่ 2

วงจรแม่เหล็ก

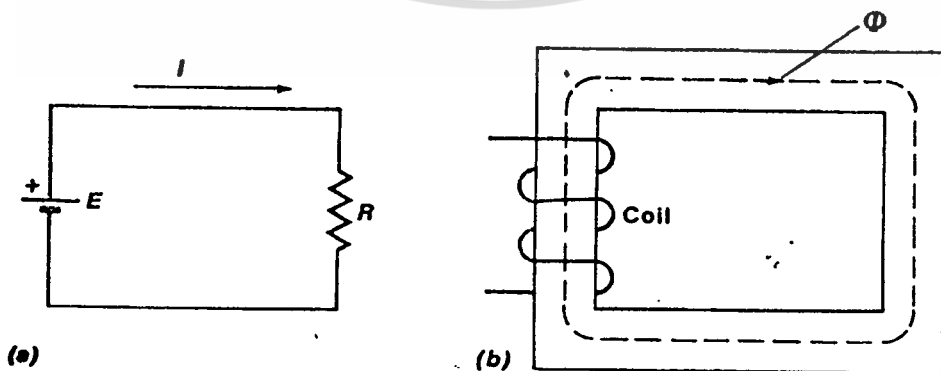
Magnetic Circuit

วงจรแม่เหล็กมีความสำคัญต่อการศึกษาวงจรเครื่องจักรไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีแกนเหล็กเป็นส่วนประกอบ เนื่องจากว่าเครื่องจักรไฟฟ้าโดยทั่วไปทำงานได้โดยอาศัยสนามเหล็กเป็นตัวกลางในการแปลงรูปพลังงานหรือส่งผ่านพลังงาน ยกตัวอย่างเช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ รีเลย์ แม็กเนติกสวิตช์และรวมถึงเครื่องกราวเลอร์โรเตอร์ทดสอบ ที่จัดทำขึ้นเป็นโครงการนี้ด้วย

ดังนั้น การที่จะนำสนามแม่เหล็กมาใช้งานจึงจำเป็นต้องมาศึกษาว่าทำอย่างไรจึงจะได้สนามแม่เหล็กที่มีทิศทางและขนาดของสนามเหล็กที่ต้องการรวมถึงข้อจำกัดต่าง ๆ ในการออกแบบวงจรแม่เหล็กโดยเบื้องต้นจะเริ่มจากค่าความต้านทานของวงจรแม่เหล็ก (\mathcal{R}) เพราะจะมีผลต่อจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อป้อนแรงเคลื่อนทางแม่เหล็กเข้าไปจากนั้นก็จะได้ถึงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity) ค่าความซึมซาบสัมบูรณ์ (Absolute Permeability) ค่าที่ได้จาก B - H Curve และค่าต่าง ๆ อื่นที่จำเป็นต้องรู้ เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณออกแบบทำโครงการ

2.1 กฎของโอห์มสำหรับวงจรแม่เหล็ก (Ohm's Law for Magnetic Circuit)

ในปัจจุบันนี้แนวคิดและวิธีการคำนวณหาต่าง ๆ ในวงจรไฟฟ้านั้นถือว่าถูกต้องแน่นอนและเป็นส่วนที่ยอมรับกันทั่วไป ซึ่งด้วยความที่เป็นวงจรปิดเหมือนกับวงจรไฟฟ้านี้เองจึงนำไปสู่การคำนวณหาต่าง ๆ ในวงจรแม่เหล็กได้โดยใช้หลักการคำนวณที่คล้ายกันดังนี้



รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงความเหมือนกันระหว่างวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้จัดทำหรือเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปที่ 2.1 (a) แบตเตอรี่ (Battery) (คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจร, E) จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า (I) ไหลผ่านความต้านทาน (R) และตามกฎของโอห์ม (Ohm's Law) จะแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$R = E/I \quad (2.1)$$

เมื่อ R = ความต้านทาน มีหน่วยเป็น Ω
 E = แรงเคลื่อนไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V
 I = กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น A

ในขณะที่เดียวกันรูปแบบของวงจรแม่เหล็กก็ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 (b) ซึ่งมีแหล่งจ่าย (Source) ของวงจรอยู่ในรูปของคอยล์ (Coil) สร้าง “แรงเคลื่อนแม่เหล็ก” (Magnetomotive Force, mmf) ทำให้เกิด “เส้นแรงแม่เหล็ก” (Magnetic Flux, ϕ) ไหลในวงจร โดยผ่านความต้านทานแม่เหล็ก (Magnetic Resistance, R_m)

ซึ่งปริมาณทั้ง 3 ตัวนี้จะมีความสัมพันธ์กันคล้ายๆ กับวงจรไฟฟ้าที่ได้แสดงไปแล้ว ตามกฎของโอห์ม (Ohm's Law of Electric Circuits) แต่ในกรณีที่เป็นวงจรแม่เหล็กจะเรียกว่า Ohm's Law of Magnetic Circuit ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$R_m = \text{mmf}/\phi = F_m/\phi \quad (2.2)$$

เมื่อ R_m = ความต้านทานของวงจรแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น $A\text{-T}/\text{Wb}$
 $F_m = \text{mmf}$ = แรงเคลื่อนแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น $A\text{-T}$
 ϕ = เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Wb

เราจะเห็นความเหมือนกันระหว่างสมการที่ 2.1 และ 2.2 ซึ่งเป็นความเหมือนกันของวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก และจากความเหมือนกันนี้เองทำให้การหาค่าต่าง ๆ ในวงจรแม่เหล็กใช้หลักการเดียวกับวงจรไฟฟ้าด้วย

2.2 แรงเคลื่อนทางแม่เหล็ก (Magnetomotive Force, mmf)

จากรูปที่ 2.1(b) จะเห็นแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีทิศทางพุ่งออกมาจากโซลินอยด์ (Coil) ถ้ามีกระแสไฟฟ้า (I) ไหลผ่านเข้าไปในขดลวดของคอยล์ (N) จะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบ ๆ ขดลวดและจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนรอบของขดลวดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสที่ไหลผ่านด้วย ดังนั้นหน่วยของแรงเคลื่อนแม่เหล็กจึงมีหน่วยเป็น แอมแปร์-เทิร์น

$$\text{mmf} = NI \quad (2.3)$$

เมื่อ $\text{mmf} =$ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก A-T ซึ่งระบบ SI อาจจะใช้สัญลักษณ์ F หรือ F_m

I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าไปในขดลวด

N = จำนวนรอบของขดลวด (Coil)

2.3 ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field Intensity)

ตามแนวความคิดแล้ว แรงเคลื่อนแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นมาได้ตามรูปที่ 2.1 (b) เพื่อให้ให้การกระจายของ mmf เป็นไปอย่างมีระเบียบ (Uniformly) ตลอดความยาว l (หน่วยเป็น เมตร) ของวงจรมแม่เหล็กซึ่งเป็นวัสดุเนื้อเดียวกันทั้งหมด และเพื่อให้มีความต้านทานที่เท่ากันตลอดทั้งวงจร พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กควรมีขนาดเท่ากันทุกส่วนด้วย ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อความยาวของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก จึงถูกเรียกว่า “ความเข้มของสนามแม่เหล็ก” (Magnetic Field Intensity) เขียนแทนด้วยตัวอักษร “H”

ความเข้มสนามแม่เหล็ก = แอมแปร์-เทิร์น/ความยาว

$$\text{หรือ } H = NI/l \quad (H = \text{mmf}/l = F_m/l) \quad (2.4)$$

เมื่อ H = ความเข้มสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นแอมแปร์-เทิร์น / เมตร (A-T/m)

I = กระแสที่ไหลเข้าไปในขดลวดของ คอยล์ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

N = จำนวนรอบของขดลวด มีหน่วยเป็น รอบ (Turn)

l = ความยาวเฉลี่ยของวงจรมแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเมตร (Meters)

เนื่องจากทิศทางของ (H) อยู่ในทิศทางเดียวกับระยะทางโดยเฉลี่ยของวงจรแม่เหล็ก ซึ่งสามารถจะเขียนสมการเสียใหม่ได้ดังนี้

$$Hl = NI (=mmf=Fm) \quad (2.5)$$

นั่นคือเราจะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กมีค่าเท่ากับความเข้มสนามแม่เหล็กคูณกับความยาวเฉลี่ยของวงจรแม่เหล็ก

2.4 ค่าความซึมซาบสัมบูรณ์ (Absolute Permeability)

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) มีหน่วยเป็นแอมแปร์-เทิร์นต่อเมตร และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) มีหน่วยเป็น เทสลา (Tesla) ปริมาณทั้งสองนี้ จะมีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$B = \mu H \quad (2.6)$$

เมื่อ B = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Tesla หรือ Wb/m²

μ = ความซึมซาบสัมบูรณ์

H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น A-T/m

(μ คือ ตัวอักษรกรีก มีชื่อเรียกว่า “มู” , พาย) ความซึมซาบสัมบูรณ์ จะประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วนดังนี้คือ $\mu = \mu_0 \mu_r$

เมื่อ μ = ความซึมซาบสัมบูรณ์

μ_0 = ความซึมซาบของอากาศ (Vacuum) มีหน่วยเป็น H/m

ตามระบบ SI กำหนดให้มีค่า = $4\pi \times 10^{-7}$ หรือ = 12.57×10^{-7} H/m, ค่าคงที่

μ_r = ความซึมซาบสัมพัทธ์ของวัสดุ ที่ใช้ทำเป็นวงจรแม่เหล็ก

2.5 ค่าความซึมซาบของสุญญากาศ (Permeability of Free Space)

จากที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.4 ว่าค่าความซึมซาบของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 12.57 \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งรู้จักกันดีในชื่อว่า “ค่าคงที่แม่เหล็กในสุญญากาศ” (magnetic Space Constant) และค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ของสุญญากาศ คือ $\mu_r = 1$ ดังนั้นจากสมการที่ 2.6 เมื่อใช้คำนวณหาค่าทางแม่เหล็กในสุญญากาศ หรืออากาศแล้วจะลดสมการลงเหลือ

$$\begin{aligned} B &= \mu H = \mu_0 \mu_r H \\ &= 12.57 \times 10^{-7} \times 1 \times H \\ &= 12.57 \times 10^{-7} \times H \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.6 ค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ (Relative Permeability)

คุณสมบัติของความเป็นแม่เหล็ก จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุที่ใช้ อย่างเช่น เหล็กกล้า เหล็กหล่อ นิกเกิล และโคบอลต์ ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะแสดงคุณสมบัติของความเป็นแม่เหล็กอย่างถาวรหรือชั่วคราวก็ได้แล้วแต่ชนิด

อาจยกตัวอย่างได้อย่างเช่น นำเหล็กอ่อนมาหนึ่งชิ้นแล้วใส่เข้าไปในพื้นที่ ๆ มีเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ในเวลาไม่นาน เหล็กอ่อนชิ้นนั้นก็เหนียวน่าทำให้เกิดความเป็นแม่เหล็กขึ้นมาได้หลายพันเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับอากาศรอบ ๆ นี่เป็นแนวความคิดในการนำไปใช้ประโยชน์ในเรื่องของ การทำให้เกิดความเป็นแม่เหล็กขึ้นมาได้ เมื่อใส่แกนเหล็กเข้าไปในโซลินอยด์ หรือวงจรแม่เหล็ก

อัตราส่วนของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้รับ ต่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้ภายใต้คอยล์เดียวกันนี้เราจะเรียกว่าค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ (Relative Permeability, μ_r)

เราอาจแบ่งวัสดุออกตามความสามารถในการเป็นแม่เหล็กได้ 3 ชนิด ดังนี้

- วัสดุที่เป็น Diamagnetic Material วัสดุพวกนี้จะมีค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ μ_r น้อยมากๆ น้อยกว่า 1 ($\mu_r < 1$) ยกตัวอย่างเช่น ทองแดงจะมี $\mu_r = 0.99998$ และบิสมัทจะมีค่า $\mu_r = 0.99997$ ซึ่งวัสดุพวกนี้เมื่อถูกนำไปใส่ไว้ในพื้นที่ที่มีสนามแม่เหล็กแล้ว จะแสดงอำนาจแม่เหล็กออกมาได้น้อยมาก

- วัสดุที่เป็น Paramagnetic Materials วัสดุพวกนี้จะมีค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ μ_r มากกว่า 1 เล็กน้อย ($\mu_r > 1$) ยกตัวอย่างเช่น อากาศจะมีค่า $\mu_r = 1.0000004$ และอลูมิเนียมจะมีค่า $\mu_r = 1.0000008$

แต่อย่างไรก็ดีในทางการคำนวณแล้วเรามักจะกำหนดให้ค่า μ_r ของวัสดุทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากับ 1 ($\mu_r = 1$) เพื่อความสะดวกในการคำนวณและเพราะความที่สาร Ferromagnetic จะมีค่า μ_r สูงมาก ๆ นั่นเอง

- วัสดุที่เป็น Ferromagnetic Material วัสดุพวกนี้จะมีค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ μ_r จะมีค่ามากกว่าหนึ่งมาก ๆ ($\mu_r \gg 1$) คือ จะมีค่าตั้งแต่ 100 ขึ้นไปจนอาจจะถึง 100,000 สำหรับ วัสดุชนิดพิเศษ ($\mu_r = 100-100,000$)

ค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ ของสาร Ferromagnetic นี้จะไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetizing Force, H) ที่ได้รับ

2.7 ค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance)

จากการคำนวณทางไฟฟ้า เราจะสามารถหาค่าของความต้านทาน (Resistance) ได้จากสูตร

$$R = \rho \cdot l/A$$

ถ้ากำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความนำไฟฟ้า (Conductivity, μ) ถูกแทนเข้าไปในสูตรแทนค่าของสัมประสิทธิ์ความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity, ρ) แล้ว เราจะเขียนรูปสมการใหม่ได้ว่า

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

ค่าความซึมซาบ (Permeability) ได้ถูกนิยามไว้ว่าเป็นค่าของความจุของวัสดุแต่ละชนิด ที่สามารถนำเส้นแรงแม่เหล็กให้ไหลผ่านได้ดีกว่าอากาศที่เท่าซึ่งจากคำนิยามดังกล่าว จะเห็นว่ามีส่วนคล้ายกับคำนิยามของสภาพการนำทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถแสดงค่าของความต้านทานทางแม่เหล็ก (Reluctance) ในวงจรแม่เหล็กออกมาได้เป็น

$$R_m = l/\mu_0 \mu_r A$$

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าของ R_m ได้จากสูตรเหล่านี้ก็คือ

$$R_m = NI/\Phi = NI/l/(\Phi/l) = H/(B \cdot A/l) = l/(B/H) \cdot A \quad (2.9)$$

เมื่อ R_m = ค่าความต้านทานของวงจรแม่เหล็ก (AT/Wb)

l = ค่าความยาวของทางเดินแม่เหล็ก (Meters)

μ_0 = ค่าความซึมซาบของสุญญากาศ (12.57×10^{-7})

μ_r = ค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ของวัสดุ

A = พื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็ก (m^2)

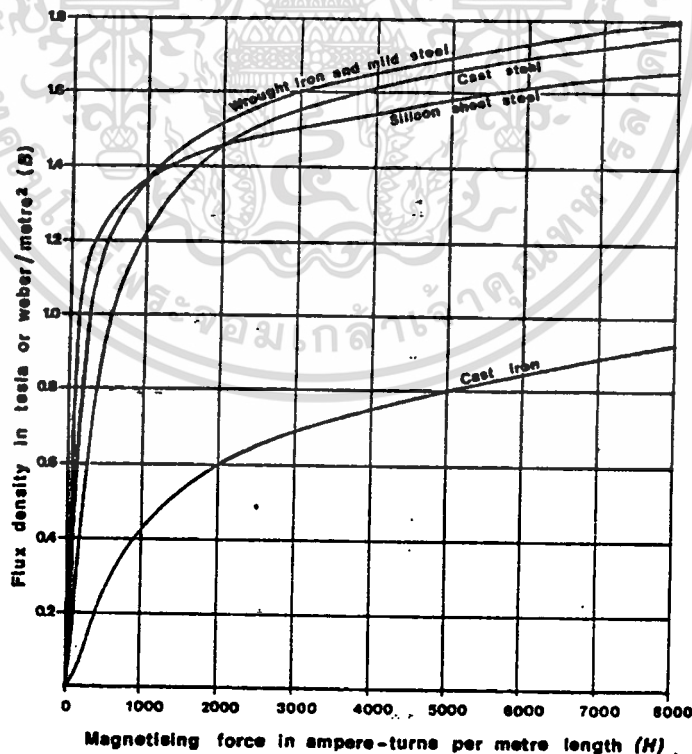
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 B-H Curve

จากหัวข้อที่ 2.6 เราจะได้ทราบแล้วว่า ถ้าความซึมซับของสาร Ferromagnetic จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ที่ป้อนให้ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ดังสมการข้างล่างคือ

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

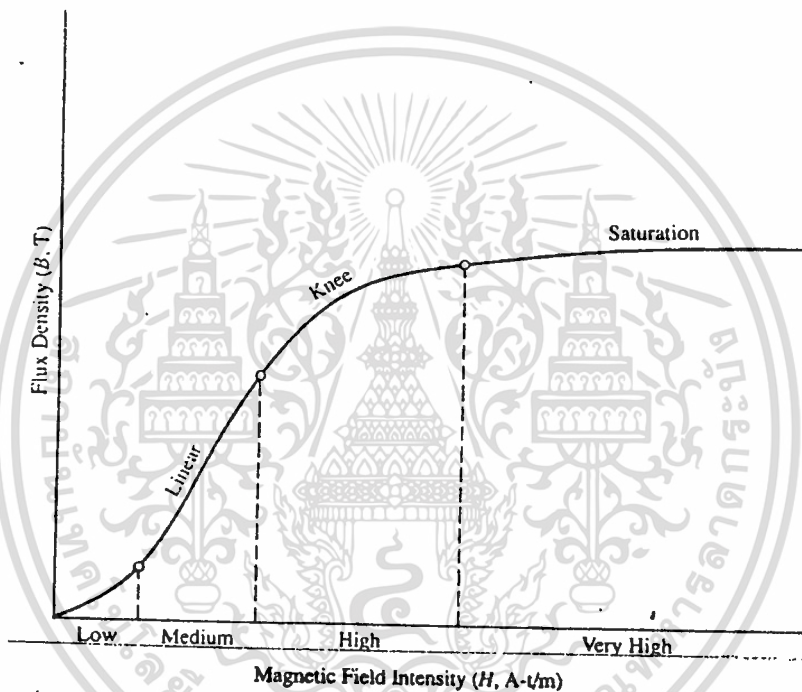
คุณสมบัติของสาร Ferromagnetic สามารถที่จะนำมาแสดงให้ดูได้อีกครั้งหนึ่ง โดยจะแสดงได้ดังรูปของเคิร์ฟ ซึ่งนำค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) มาพล็อตเทียบกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) จะได้ความสัมพันธ์ที่เรียกว่า B-H Curve จาก Curve เราจะเห็นคุณสมบัติของความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแต่ละชนิดอย่างชัดเจน และรู้จักกันในชื่อว่า “เคิร์ฟของความเป็นแม่เหล็ก” (Magnetizing Curve) จำนวนเส้นเคิร์ฟของวัสดุแต่ละชนิด ได้ถูกแสดงไว้แล้วในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นแค่ตัวอย่างของวัสดุบางชนิดเท่านั้นประกอบไปด้วย Cast Iron, Mild Steel, Cast Steel และ Silicon Sheet Steel โดยที่ Silicon Sheet steel นั้นเองที่นิยมนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น หม้อแปลง มอเตอร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.2 B-H Curve หรือ เคิร์ฟของความเป็นแม่เหล็กของสาร Ferromagnetic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่เชิงพาณิชย์ การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาจากเคิร์ฟรูปที่ 2.2 แล้ว จะสังเกตเห็นว่าทุกเส้นมีลักษณะคล้าย ๆ กัน คือ ค่า B จะเริ่มต้นจากศูนย์แล้วเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามค่าของ H ที่เพิ่มขึ้นโดยจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนกัน (Linear) จนถึงจุด ๆ หนึ่งที่เคิร์ฟเริ่มจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นสัดส่วน (Non Linear) ซึ่งในการอธิบายความหมายของเส้นเคิร์ฟ จะต้องอธิบายโดยแบ่งเป็นช่วง ๆ ถ้าจะใช้เคิร์ฟรูปที่ 2.2 ในการอธิบายอาจจะทำให้มองเห็นภาพไม่ชัดเจน ดังนั้นจึงจะใช้รูปที่ 2.3 มาอธิบายโดยในรูปจะเป็นการนำเอาเส้นเคิร์ฟมาขยาย เพื่อจะได้มองเห็น และเข้าใจส่วนต่าง ๆ ได้ดียิ่งขึ้น



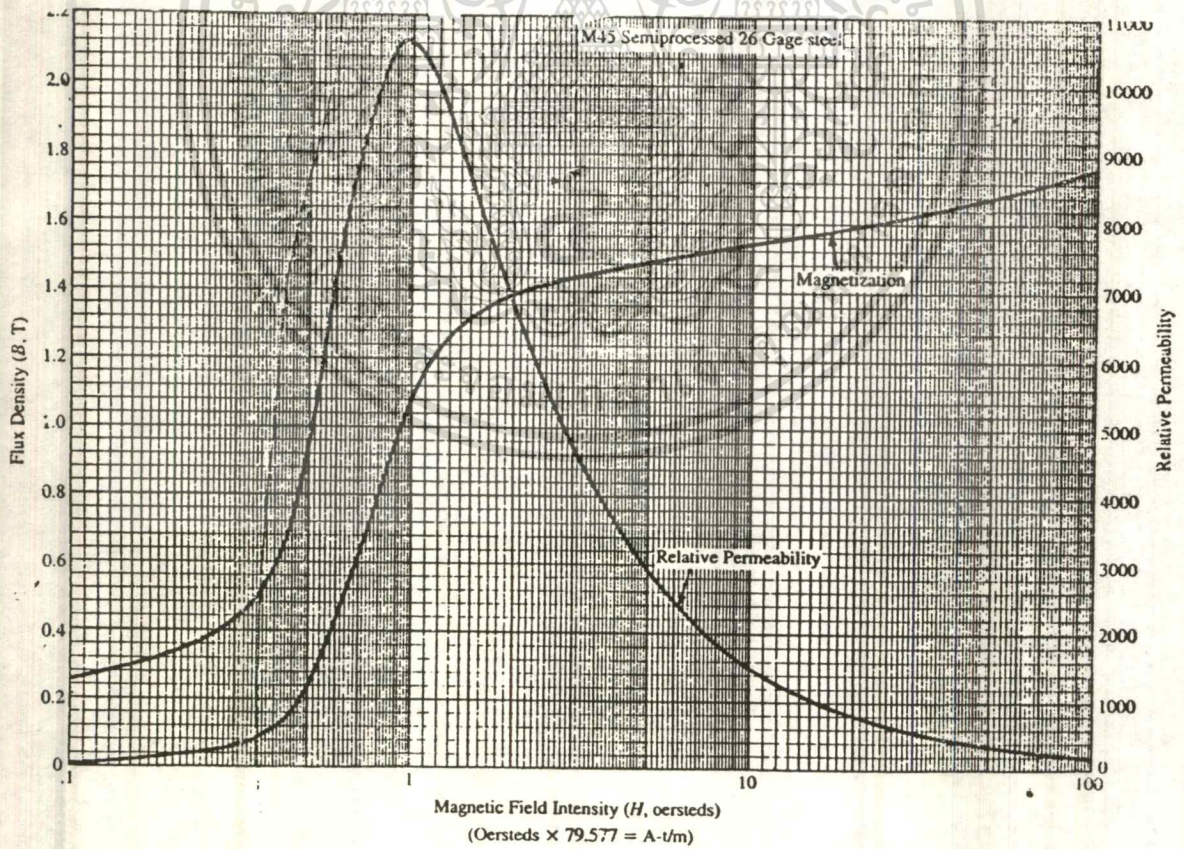
รูปที่ 2.3 รูปขยายของ Magnetization Curve

จากรูปที่ 2.3 จะสามารถอธิบายถึงสัดส่วนประกอบของเคิร์ฟทั้ง 4 ส่วนได้ดังนี้คือ

- ช่วงที่ 1 (Low) จะเห็นว่าค่า B เริ่มต้นจากศูนย์แล้วจะมีลักษณะโค้งหงายขึ้น แสดงว่าในช่วงนี้ได้รับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) เพียงเล็กน้อย
- ช่วงที่ 2 (Medium) จะเห็นว่าค่า B เพิ่มขึ้นในลักษณะที่เป็นสัดส่วน (Linear) กับ H แสดงว่าในช่วงนี้ได้รับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กปานกลาง
- ช่วงที่ 3 (High) ช่วงนี้ B มีลักษณะโค้งคว่ำลง (Knee) ในขณะที่ H มากขึ้น แสดงว่าในช่วงนี้ได้รับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูง
- ช่วงที่ 4 (Very High) จะเห็นว่าค่า B เกือบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย (Saturation) ในขณะที่ H ยิ่งเพิ่มสูงขึ้นแสดงว่าในช่วงนี้ได้รับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงมาก

ส่วนสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงของเคิร์ฟ คือ ตั้งแต่เริ่มช่วง Knee เป็นต้นไป จะสังเกตเห็นว่า เราจะต้องเพิ่มค่าของ H ขึ้นอีกมาก แต่จะได้ค่าของ B เพิ่มขึ้นเล็กน้อยลง จนกระทั่งเข้าสู่ช่วง Saturation จะเห็นว่าค่า B แทบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย แม้ว่าเราจะเพิ่มค่า H ขึ้นไป มากเท่าใดก็ตามจากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้การออกแบบสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ต้องใช้แกน เหล็กเป็นส่วนประกอบจะถูกออกแบบให้มีการทำงานอยู่ในช่วง ที่มีการเพิ่มของค่า B-H อย่างเป็น สัดส่วนนั่นเอง คือ ช่วง Linear นั่นเอง

จากสมการ $B = \mu H$ จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์กันอยู่ ดังนั้น เราอาจจะได้เห็น B-H Curve ในอีกรูปแบบหนึ่งก็ได้ดังตามรูปที่ 2.4 นั้นเป็นเพียงตัวอย่าง หนึ่งซึ่งตามปกติแล้วจะเป็น B-H Curve ที่ทางโรงงานผู้ผลิตแกนเหล็ก จะเป็นผู้ทำการทดสอบ แล้วนำผลมาเสนอให้แก่ลูกค้าทราบ ในรูปของการเปรียบเทียบของ 3 ปริมาณ คือ Flux Density (B) Magnetic Field Intensity (H) และ Relative Permeability อยู่บนสเกลของ Semilog เพื่อนำ ไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าให้มีคุณสมบัติต่างๆ ได้ตามต้องการ



รูปที่ 2.4 Magnetization and Permeability Curve สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

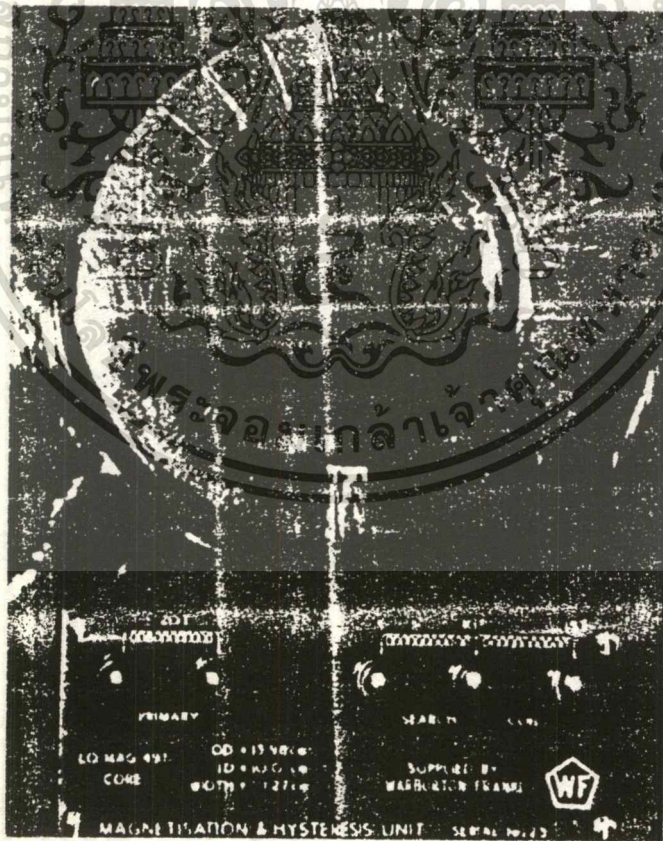
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 เป็นข้อมูลที่ทางบริษัทผู้ผลิตแกนเหล็กให้มา แต่ค่าของความเข้มสนามแม่เหล็ก H จะแสดงอยู่ในหน่วย OERSTEDS, ซึ่งเป็นหน่วยของ CGS ดังนั้นก่อนใช้จะต้องเปลี่ยนให้อยู่ในหน่วย A-t/m เสียก่อน โดยการคูณด้วย 79.577

2.9 การทดลองเพื่อหา B-H Curve

B-H Curve เป็นคุณสมบัติเฉพาะของสาร Ferromagnetic และสามารถหาได้โดยทำการทดลองตามขั้นตอนต่อไปนี้

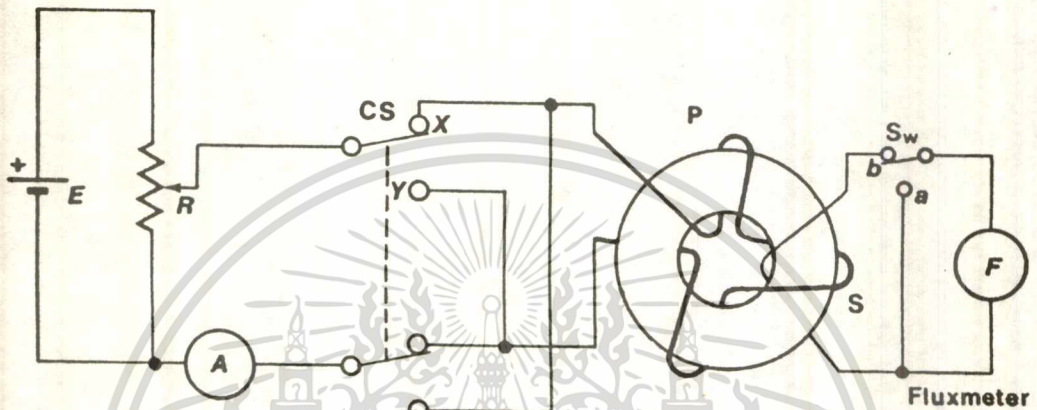
สาร Ferromagnetic ที่นำมาทดลองจะต้องทำเป็นรูปวงแหวน และมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอด (Toroid) การจ่ายกระแสกระตุ้นที่คอยล์ไพรมารี (Primary) จะต้องให้สม่ำเสมอทั่วทั้งแกนเหล็ก (Iron Toroid) เพื่อจัดผลของเส้นแรงแม่เหล็กทั่วไหลส่วนคอยล์เซคันดารี (Secondary) ให้วางไว้ด้านตรงข้ามของขดลวดไพรมารี



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างขดลวดที่พันอยู่บนแกน Toroid พร้อมด้วยขดลวด Primary และ Secondary

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

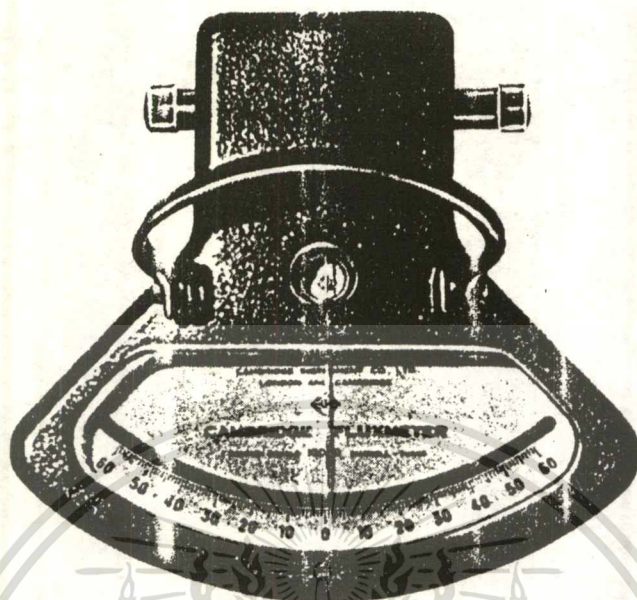
จากรูปที่ 2.5 แสดงขดลวดวงแหวน (Toroid Wound) ตามที่ได้กล่าวถึงในย่อหน้า
 ที่แล้วคอล์ยกระตุ้น ในตัวอย่างได้ถูกต่อเข้ากับแบตเตอรี่ (E) ผ่านไปยังสวิตช์เลือก (S)
 ความต้านทาน (R) ที่แบ่งแรงดันและแอมป์มิเตอร์ทั้งหมดนี้ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงรูปวงจรเพื่อใช้ในการหา B-H Curve

ส่วน คอล์ย ทางด้าน เซกชั่นคาร์รี่ ได้ถูกต่อผ่านไปยังสวิตช์ SW. และผ่านไปยัง
 ฟลักซ์มิเตอร์

ฟลักซ์มิเตอร์ (ที่ได้แสดงให้ดูในรูปที่ 2.7) เป็นเครื่องวัดประเภทขดลวด
 เคลื่อนที่ ๆ มีแม่เหล็กถาวรเป็นส่วนประกอบสำคัญ และมันไม่ถูกยึดแน่นตายตัวแต่ละจะถูกควบคุม
 ด้วยสปริงขดลวดเคลื่อนที่ของฟลักซ์มิเตอร์ได้ถูกต่อเข้ากับจุดตามรูป เครื่องวัดชนิดนี้ในขณะที่
 เริ่มต้นทำการวัดจะต้องไม่ให้เข็มเอนเอียงไปทางด้านใดด้านหนึ่งแต่จะต้องให้เข็มชี้ที่เลขศูนย์
 ซึ่งทำได้โดยการปรับแต่งที่สกรู (Screw) แล้วจากนั้นก็ปล่อยให้เข็มชี้มีโอกาสเคลื่อนที่ได้โดย
 อิสระ เมื่อเริ่มจ่ายไฟให้กับวงจรจะมีการเอนเอียงของเข็มเกิดขึ้น โดยเป็นสัดส่วนกับแรงเคลื่อนที่
 ถูกเหนี่ยวนำขึ้นมาทางด้านเซกชั่นคาร์รี่ในระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กในแกน
 เหล็กวงแหวน ก็จะมีกระแสไหลเข้าไปในฟลักซ์มิเตอร์ด้วย และเท่ากับว่าขณะนี้ได้ทำการวัดเส้น
 แรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องคล่อง ทางด้านเซกชั่นคาร์รี่โดยตรง



รูปที่ 2.7 The Cambridge Fluxmeter

ในตอนเริ่มแรกของการทดลอง ฟลักซ์มิเตอร์จะต้องถูกลัดวงจรโดยสวิตช์ SW. คือ ให้อยู่ในตำแหน่ง a เราสามารถทำให้มีกระแสมากขึ้น ๆ ไหลเข้าไปในขดลวดไพรมารีได้โดยการปรับแต่งที่ตัวแบ่งแรงดัน R สภาพการปรับตัวไปมาของสนามแม่เหล็ก (Cycle Condition) ในแกนเหล็กที่นำมาทดลอง สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนสวิตช์ CS กลับไปกลับมาอย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น แต่ช่วงเวลาในการกลับของสวิตช์จะต้องเท่ากัน เพื่อที่จะให้ได้ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กที่เท่ากันทั้งสองทิศทาง

ในขั้นตอนต่อไป ให้ทำการใส่ฟลักซ์มิเตอร์เข้าไปในวงจรโดยการสับสวิตช์ SW. ให้มาอยู่ในตำแหน่ง b จากนั้นความถี่ในการเปลี่ยนสวิตช์ CS (จากตำแหน่ง $X \leftrightarrow Y$) จะต้องเร็วขึ้นเพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ในตอนนี้เข็มของฟลักซ์มิเตอร์จะมีการโอนเอียงไปจากนั้นทำการบันทึกผลการทดลอง

ทำการทดลองใหม่ โดยขั้นตอนในการทำจะเหมือนกับที่ผ่านมาแล้วทุกอย่างแต่แตกต่างกันที่ตรงที่ จะต้องทำการลดค่าของกระแสทุกครั้งที่ทำการวัดใหม่

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลอง มาแทนในสูตรหาค่า B-H เพื่อที่จะนำไปพล็อตใน B-H Curve ต่อไป

ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) จะหาได้โดย

$$H = IN_p/l \quad (2.10)$$

เมื่อ H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น A.T/m
 I = กระแสที่ไหลเข้าไปในขดลวดไพรมารี มีหน่วยเป็น A
 l = เส้นรอบวงเฉลี่ยของแกนเหล็ก ซึ่งหมายถึงความยาวเฉลี่ยของวงจรมแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเมตร
 N_p = จำนวนรอบของขดลวดไพรมารี

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) สามารถหาได้โดยค่าช่วงขณะเริ่มแรกของจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กในวงแหวนเมื่อทำการกลับทิศของกระแสในขดลวดไพรมารี และจะถูกวัดได้โดยฟลักซ์มิเตอร์

การกลับตัวของเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวดไพรมารีจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กในวงแหวนเปลี่ยนจาก ϕ ไปเป็น $-\phi$ เท่ากับเป็น 2ϕ เวเบอร์ เมื่อจำนวนของขดลวดเซคคันดารีที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่านเป็น N_s มันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์คล้องเกี่ยว

$$\begin{aligned} \text{การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์คล้องเกี่ยว} &= \text{การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์โดยจำนวนรอบของขดลวดเซคคันดารี} \\ &= 2\phi N_s \end{aligned} \quad (2.11)$$

หรืออีกอย่างหนึ่งคือ การเปลี่ยนแปลงของกระแสในขดลวดไพรมารีเป็นเหตุให้ความเข้มของฟลักซ์มิเตอร์ เอนเอียงไปเป็น α เมื่อกำหนดให้ค่าคงที่ของฟลักซ์มิเตอร์เป็น K แสดงว่า

$$\text{การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์คล้องเกี่ยว} = K\alpha \quad (2.12)$$

จากสมการ (2.11) และ (2.12) จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$2\phi N_s = K\alpha \quad (2.13)$$

$$\text{ทำการย้ายข้าง} \quad \phi = \frac{K\alpha}{2 N_s} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำค่า ϕ จาก (2.14) แทนลงในสูตรหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

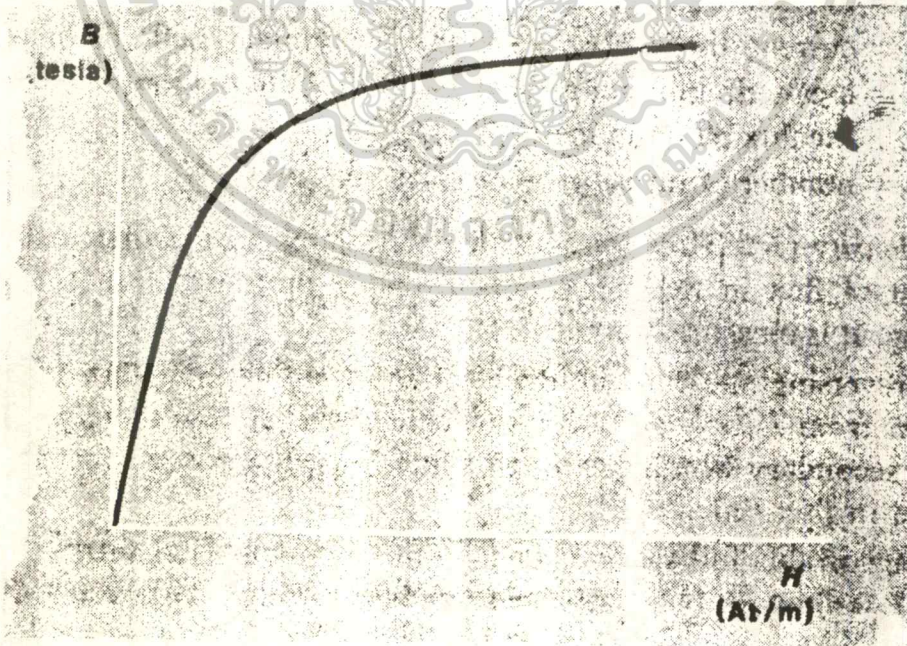
จะได้

$$B = \phi / A \tag{2.15}$$

$$B = K\alpha / 2N_s A \tag{2.16}$$

- เมื่อ
- B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Tesla
 - K = ค่าคงที่ของฟลักซ์มิเตอร์มีค่าเท่ากับ Flux Linkage Per Division มีหน่วยเป็น Wb-Turn/division
 - α = การเอนเอียงของเข็มในฟลักซ์มิเตอร์ (m/division) สำหรับกระแสหลาย ๆ ค่าของขดลวดไพรมารี
 - N_s = จำนวนรอบของขดลวด เซกกันดารี
 - A = พื้นที่หน้าตัดของวงแหวน มีหน่วยเป็น m^2

จากการทำการทดลองหลาย ๆ ครั้ง ด้วยจำนวนครั้งที่เหมาะสม จะทำให้สามารถหา B-H Curve ออกมาได้โดยค่าของ H จะอยู่ในแนวนอนและค่าของ B จะอยู่ในแนวตั้ง



รูปที่ 2.8 B-H Curve หรือ Magnetization Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

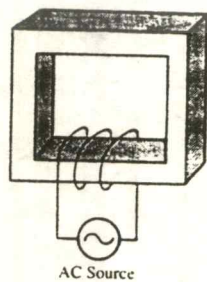
2.10 Magnetic Hysteresis And Hysteresis Loop

ถ้าเราจ่ายความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ให้กับวัสดุที่เป็นสนามแม่เหล็กตามรูปที่ 2.9 (a) และพล็อตค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ที่ได้เทียบกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ที่ป้อนให้กับวงจรแล้วเราจะได้เคิร์ฟที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองมีลักษณะคล้ายใบไม้ และมีทางเดินที่ซ้อนกันไปตามรูปที่ 2.9(b) ซึ่งเรียกว่า Hysteresis และเป็นผลลัพท์ของเคิร์ฟจะถูกเรียกว่า Hysteresis Loop

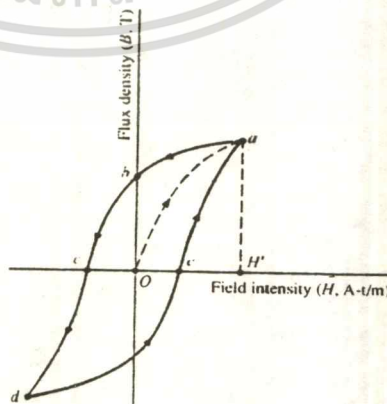
จาก Hysteresis Loop สามารถอธิบายได้โดยเริ่มต้นจากตอนที่ยังไม่จ่ายสนามแม่เหล็กเข้าไปในแกนเหล็ก (จุด 0 ของเคิร์ฟ) ตอนนี้นำค่า $H = 0$ และ $B = 0$ จากนั้นก็ทำการจ่ายกระแสเข้าไปในขดลวด หรือคอยล์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามทิศทางเดียวกับที่พันขดลวด และขณะนี้เราจะได้ความสัมพันธ์คือ

$$H = NI/l$$

เมื่อทำการเพิ่มค่ากระแสถึงค่าสูงสุด จะได้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุดด้วย เมื่อดูจากเคิร์ฟสามารถแสดงได้ด้วยจุด a ส่วนประที่ลากจากจุดเริ่มต้นจากเคิร์ฟไปยังจุด a นั้นเรียกว่า ส่วนบริสุทธิ์ของเคิร์ฟ (Vergin Section) เมื่อเราทำการลดกระแสลงจะได้ทางเดินของเคิร์ฟซึ่งไม่เหมือนเดิม และเมื่อกระแสถูกลดลงจนถึง 0 แล้ว นั้นหมายความว่าค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ถูกลดลงเป็นศูนย์ด้วย แต่ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ในแกนเหล็กจะยังไม่ลดลงเป็นศูนย์ในเวลาเดียวกัน คือ จะล่าหลัง (Lag) ค่า (H) อยู่ช่วงหนึ่งซึ่งเมื่อดูจากเคิร์ฟจะแสดงได้ด้วยจุด b ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ที่จุด b นี้จะถูกเรียกว่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (Residual Magnetics) เส้นแรงแม่เหล็กที่ตกลงล่าหลังค่าของความเข้มสนามแม่เหล็กนี้คือ ผลของ Hysteresis (Hysteresis Effect)



(a)



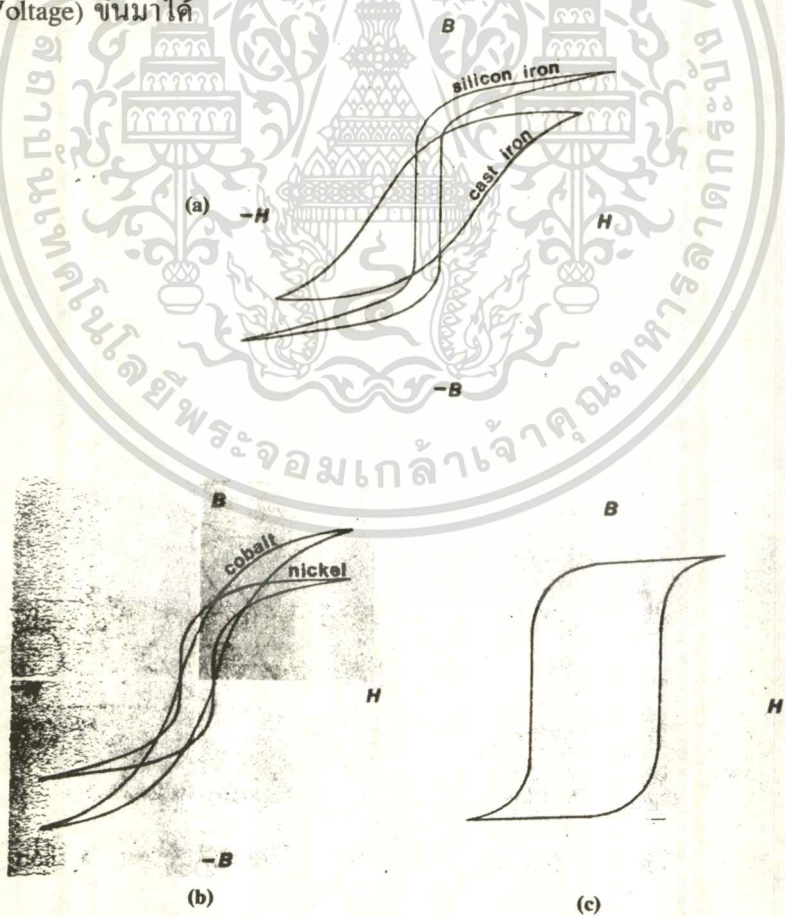
(b)

รูปที่ 2.9 (a) วงจรแม่เหล็ก พร้อมด้วยแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) (b) Hysteresis Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจ่ายไฟที่เป็นกระแสสลับ และกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่เป็นลบ (Negative) ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น ก็จะเพิ่มขึ้นตามทิศทางที่เป็นลบด้วย คือ มีทางตรงข้ามกับตอนแรกนั่นเอง และค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กตกค้างก็จะลดลงเรื่อย ๆ แต่จะมีค่าบวกอยู่จนกระทั่งถึงจุด c ซึ่งจุด c นี้จะมีลักษณะที่แผ่ออกไป (Reached) ตามรูปที่ 2.9 b ในขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างนี้เป็น 0 นั้นจะถูกเรียกว่า “แรงคืนตัว” (Coercive Force) และสามารถแสดงได้ด้วยเส้น OC บนแกน H ดังรูป ถ้าไฟกระแสสลับยังถูกจ่ายให้กับวงจรต่อไปเรื่อย ๆ เราจะได้ทางเดินของเคิร์ฟตามเส้นทาง c-d-e-a-b-c ซ้ำ ๆ กันอย่างนี้บน Hysteresis Loop

Magnetic Hysteresis ที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลตอบสนองของค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ค่าของ Hysteresis หรือค่าเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างนี้บางครั้งก็มีประโยชน์เหมือนกัน ยกตัวอย่างเช่น ในเครื่องใช้ไฟฟ้าเช่นหม้อแปลง จะต้องการคุณสมบัติข้อนี้เพื่อจะสามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลง mmf ได้รวดเร็ว หรือในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self Excited) จะต้องการเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างจำนวนหนึ่งซึ่งเพียงพอที่จะสร้างแรงเคลื่อน (Build up of Voltage) ขึ้นมาได้



รูปที่ 2.10 Hysteresis Loop ของวัสดุแต่ละชนิด (a) Silicon Iron cast Iron (b) cobalt และ

Nickel วาดเปรียบเทียบกันโดยใช้สเกลเดียวกับรูป a (c) Ferite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.10 a, b และ c เป็นการนำ Hysteresis Loop ของวัสดุแต่ละชนิดมาแสดงไว้ให้คิด เพื่อเปรียบเทียบรูปร่างและคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ ซึ่งการนำเอาวัสดุแต่ละชนิดไปใช้งานนั้น จำเป็นต้องรู้ข้อมูลพวกนี้ เพื่อที่จะได้เลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับอุปกรณ์และตรงกับความต้องการเช่น Cast Iron เหมาะที่จะไปใช้งานในการกระตุ้นของดีซีมอเตอร์ Silicon Sheet Steel เหมาะที่จะนำไปทำเป็นโรเตอร์และ Ferite เหมาะที่จะนำไปเป็น หน่วยความจำในคอมพิวเตอร์ หรือ Logic Switching Devices

Magnetic Hysteresis Loss

ถ้าแหล่งจ่ายกระแสสลับถูกต่ออยู่กับคอยล์สร้างสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.9 (a) จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของโมเลกุลในเนื้อวัสดุ ดังรูปที่ 2.9 (b) การกลับไปกลับมา นี้เองทำให้เกิดความร้อนขึ้นและยังเหล็กที่มีขนาดใหญ่ หนามากขึ้นเท่าใด ความร้อนที่เกิดก็จะยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย กำลังที่สูญเสียไปเนื่องจาก Hysteresis นี้จะมีค่าแปรตามตัวแปรเหล่านี้คือ ความถี่ (f) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) และอาจเขียนความสัมพันธ์ เป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้คือ

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B^x \quad (2.17)$$

เมื่อ P_h = Hyteresis Loss มีหน่วยเป็น (Watt/m³ ของวัสดุ)

K_h = ค่าคงที่ของ Hyteresis หรือประสิทธิภาพ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุแต่จะมีค่าตั้งแต่ 100 (สำหรับ Silicon Steel ที่คุณภาพดี ๆ) ไปจนถึง 4,000 (สำหรับ Cast Iron) มีหน่วยเป็น (Junc/Cycle/m³ ของวัสดุ)

f = ความถี่ของคลื่นเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Hz

Bmax = ค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็น Hz

x = ค่าคงที่ซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ 1.4-2.0 แต่นิยมใช้ค่า 1.6

2.11 Eddy Current and Eddy-Current Losses

Eddy Current คือ กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก โดยจะมีค่าแปรตามความถี่, แรงเคลื่อนที่เหนี่ยวนำขึ้นในแกนเหล็ก และปริมาตรของแกนเหล็ก กระแส Eddy นี้เป็นกระแสที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะมันจะทำให้กำลังให้สูญเสียไป โดยออกมาในรูปของความร้อน เมื่อพิจารณาแกนเหล็กจะเปรียบได้เหมือนกับว่าเป็นขดลวดที่ลัดวงจรและวางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา ดังนั้น จึงเกิดมีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในแกนเหล็ก ตามรูปที่ 2.11 (a) และมีขนาดของแรงเคลื่อนเป็นไปตามสมการ

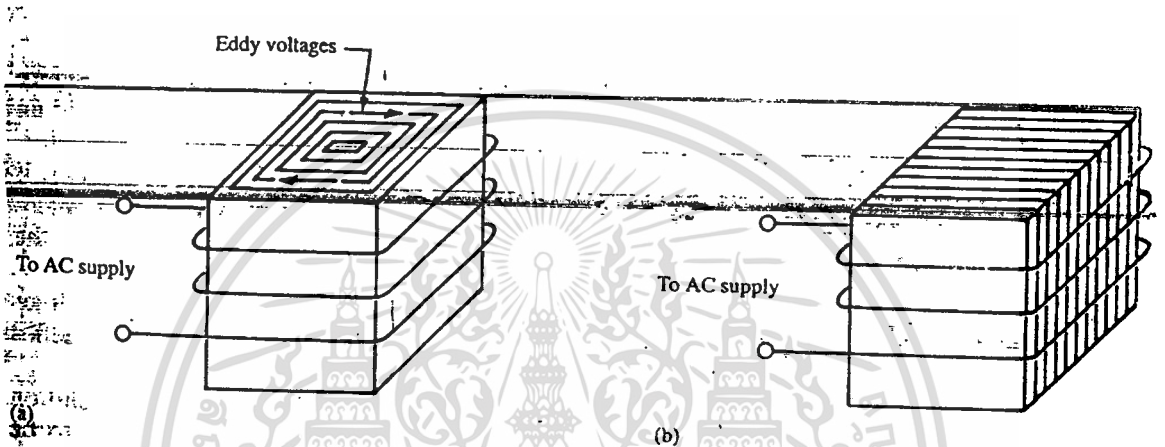
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$e_c \propto d\phi / dt \quad (2.18)$$

จากสมการ(2.18) จะสามารถแสดงให้อยู่ในเทอมของความถี่และเส้นแรงแม่เหล็กได้คือ

$$E_c \propto f \cdot B_{max} \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.11 (a) กระแสที่เป็น Loop ในแกนเหล็ก (b) แกนเหล็กที่ทำเป็นฉันทบางๆ (Laminated Core)

เมื่อมีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในแกนเหล็ก และแกนเหล็กเป็นตัวนำก็จะเกิดกระแสเป็นผลทำให้เกิดความสูญเสียในแกนเหล็ก เรียกว่า Eddy Current Loss

Eddy Current Loss คือ ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในรูปของความร้อนเมื่อคิดที่แผ่นเหล็กแผ่นเดียวจะมีค่าเท่ากับกำลังสองของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในเนื้อเหล็กตามสมการ

$$P_e = E_c^2 \quad (2.20)$$

แทนสมการที่ 2.19 ลงในสมการที่ 2.20 จะได้สมการใหม่ คือ

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{max}^2 \quad (2.21)$$

เมื่อ P_e = Eddy-Current Loss มีหน่วยเป็น (W/Unit mass)

f = ความถี่ของคลื่นแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น (Hz)

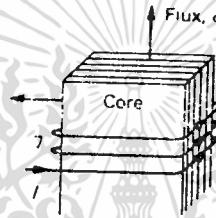
B_{max} = ค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็น (T)

K_e = ค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าคงที่ (K_c) นี้ จะขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ, ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุมวลของวัสดุและหน่วยที่ใช้คำนวณ

วิธีลดความสูญเสียเนื่องมาจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กสามารถทำได้โดยทำให้แกนเหล็กเป็นแผ่นบาง ๆ (Laminate) ตามรูปที่ 2.11 (b) และมีน้ำยาที่เป็นฉนวนเช่น วานิช หรือ ออกไซด์เคลือบแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นไว้ เพื่อลดกระแสไหลวนให้น้อยลง โดยวางแผ่นเหล็กให้ด้านแบนขนานกับเส้นแรงแม่เหล็กตามรูปที่ 2.12 ซึ่งจะมีผลทำให้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กในแต่ละแผ่นน้อยลง เป็นการลดการเหนี่ยวนำศักค่าไฟฟ้า และเพิ่มความต้านทานในแต่ละ Loop ของกระแส



รูปที่ 2.12 แผ่นเหล็กบางที่วางให้ขนานกับเส้นแรงแม่เหล็ก

การทำให้แผ่นเหล็กเป็นแผ่นบางๆ (Laminate) แล้วเคลือบแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นด้วยน้ำยาที่เป็นฉนวนนั้น ทำให้ผลของ Eddy Current ลงไปได้มากแต่ขณะเดียวกันก็จะส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดและปริมาตรของแกนเหล็กที่วัดได้คู่กับค่าคงที่ตัวหนึ่งซึ่งเรียกว่า Stacking Factor จึงจะได้ปริมาตรของแกนเหล็กที่แท้จริงค่าของ Stacking Factor ที่ใช้กับความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นได้รวมไว้ในรูปที่ 2.13 แล้ว

Lamination Thickness, mm	Stacking Factor
0.0127	0.50
0.0254	0.75
0.0508	0.80
0.10 to 0.25	0.90
0.27 to 0.36	0.94

รูปที่ 2.13 Stacking Factor

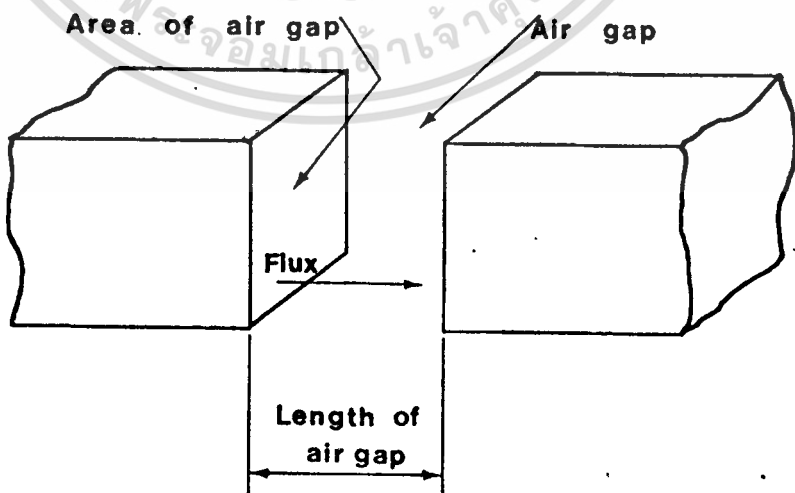
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่าทั้งค่าของ Hysteresis Loss (P_h) จากสมการที่ (2.17) และ Eddy Current Loss (P_e) ในสมการที่ (2.21) ต่างที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็กที่ใช้เป็นแกนเหล็ก ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เป็นไปในลักษณะของไฟกระแสดับ โดยจากสมการจะพบว่าค่าของ P_e และ P_h จะขึ้นอยู่กับค่าของ B_{max} ดังนั้น เราจึงเรียกความสูญเสียที่ประกอบด้วย P_e และ P_h ว่าเป็นความสูญเสียในแกนเหล็กเรียกว่า Core Loss (P_c) ซึ่งเป็นข้อมูลที่บริษัทผู้ผลิตแกนเหล็กเป็นผู้ทดสอบ

2.12 ช่องว่างอากาศ (Air Gap)

ช่องว่างอากาศจะเป็นส่วนสำคัญในการคำนวณเรื่องวงจรแม่เหล็กซึ่งช่องว่างอากาศที่กล่าวถึงนี้คือ ปริมาตรของอากาศที่อยู่ระหว่างผิวหน้าทั้งสองของวัสดุเอง กล่าวคือ ช่องว่างอากาศจะมีความยาว (ระยะทางระหว่างผิวหน้าทั้งสองของวัสดุ) และพื้นที่ (พื้นที่ผิวหน้าของวัสดุชิ้นใดชิ้นหนึ่ง) เส้นแรงแม่เหล็กที่เดินทางข้ามช่องอากาศนั้นเกิดจากความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งจ่ายโดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กตามค่าของแอมแปร์-เทิร์น ที่ต้องการ

ผลที่เกิดขึ้นกับวงจรแม่เหล็กที่มีช่องว่างอากาศนั้นอยู่จะทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) เปลี่ยนแปลงไป การคำนวณหาค่าความต้านทานจะต้องคิดแยกเป็น 2 ส่วน คือ ความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็ก (R_c) และความต้านทานแม่เหล็กของช่องอากาศ (R_g) โดยคิดค่า $\mu_r = 1$ แล้วจึงนำค่าความต้านทานแม่เหล็กทั้งสองมารวมกันเป็นค่า Reluctance ของวงจร รูปของช่องอากาศแสดงได้โดยรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงช่องว่างอากาศ

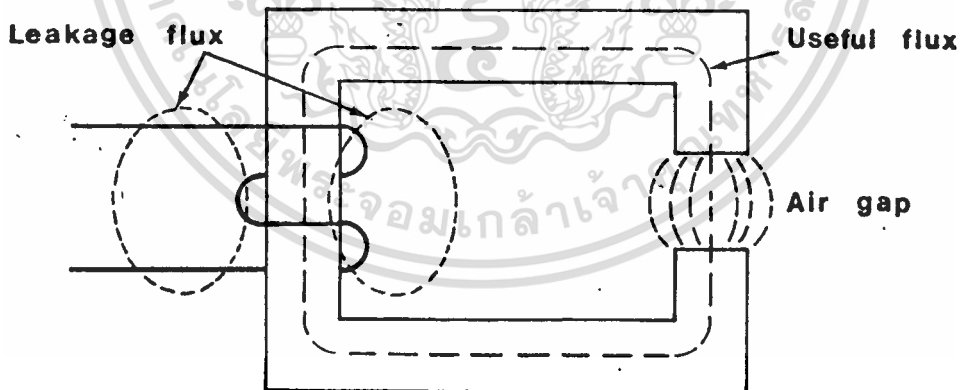
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Magnetic Leakage)

เมื่อมีการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กให้เกิดขึ้นมา เพื่อที่จะนำเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นนี้ไปใช้งาน แต่ในความเป็นจริงเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นมานี้จะไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด เนื่องจากมีบางส่วนที่สูญเสียไป ซึ่งเรียกว่า “เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล” (Leakage Flux)

เส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ กับส่วนที่รั่วไหลไปนี้ได้แสดงให้เห็นดู ดังรูปที่ 2.15 และค่าของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลนี้ได้ถูกแสดงอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ของการรั่วไหล (Leakage Coefficient) ดังนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์ของการรั่วไหล} = \frac{\text{จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้}}{\text{เส้นแรงแม่เหล็กที่ได้ใช้จริง}} \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.15 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Flux)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 เส้นแรงแม่เหล็กตรงริมตะเข็บ (Flux Fringing)

เส้นแรงแม่เหล็กสามารถผ่านช่องว่างของอากาศไปได้ ก็เพราะว่ามีแรงผลึกของเส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ติดกัน แต่จะไม่สามารถผ่านไปตรงๆ ได้ทั้งหมด คือ จะต้องมีส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ริมๆ หรือขอบมีการโค้งตัวโค้งออกตามรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16 ซึ่งส่วนนี้เรียกว่า Flux Fringing และจะมีจำนวนมากขึ้นตามความยาวช่องอากาศ แต่ในการคำนวณแล้วมักจะถือว่ามีส่วนน้อยมากสามารถตัดทิ้งไปได้



รูปที่ 2.16 Flux Fringing

2.15 ความเหมือนกันระหว่าง 2 วงจร

ความเหมือนกันระหว่างวงจรแม่เหล็ก และวงจรไฟฟ้ามีอยู่หลายค่าซึ่งแต่ละค่าก็ยังสามารถคำนวณหาได้ โดยใช้สูตรในการคำนวณหาค่าต่างๆ กันอีกด้วย ดังนั้น จึงได้นำมารวมไว้ในตารางดังรูปที่ 2.17 และในตารางอักษร l และ A ในวงจรแม่เหล็ก หมายถึง ความยาวเฉลี่ยของวงจรแม่เหล็กและพื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็ก

DC resistive Circuit	Magnetic Circuit
Current	Flux, ϕ (in Wb)
Voltage, V	Magnetomotive Force, F (in At)
Conductivity σ	Permeability, μ (in H/m)
Ohm's law, $I = V/R$	$\phi = F / R$
Resistance, $R = l / \sigma A$	Reluctance, $\mathcal{R} = l / \mu A$ (in H^{-1})
Conductance, $G = 1 / R$	Permeance $P = 1 / \mathcal{R}$ (in H)

รูปที่ 2.17 แสดงความเหมือนกันระหว่าง 2 วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16 สรุปหน่วยของค่าต่าง ๆ

ตามปกติแล้วการคำนวณหาค่าต่างๆ ในวงจรแม่เหล็กนี้ มักจะใช้หน่วยในระบบ SI (SI SYSTEM OF UNIT) แต่อาจมีตำราบางเล่มที่ใช้ระบบอื่นที่เหนือไปจากระบบ SI มาใช้ในการคำนวณ ดังนั้น จึงขอสรุปหน่วยที่ใช้ในระบบอื่นๆ ที่อาจจะพบได้มารวมไว้ในตารางในรูปที่ 2.18 เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน ดังนี้

Quantity	SI System	CGS System	British System
Flux (Φ)	weber	10^8 maxwells	10^8 line of flux
Flux density (B)	tesla (or weber/cm/m ²)	10^4 gauss or line/cm ²	64.52×10^3 line/inch ²
Magnetomotive Force (mmf of Fm)	ampere-turn	$4\pi/10 = 1.252$ gilberts	ampere-turn
Magnetizing force (H)	ampere-turn/m	1.257×10^{-2} gilberts/cm or oersted	2.54×10^{-2} ampere-turns/inch

รูปที่ 2.18 ตารางแสดงการเปรียบเทียบระบบ SI กับระบบต่าง ๆ

บทที่ 3

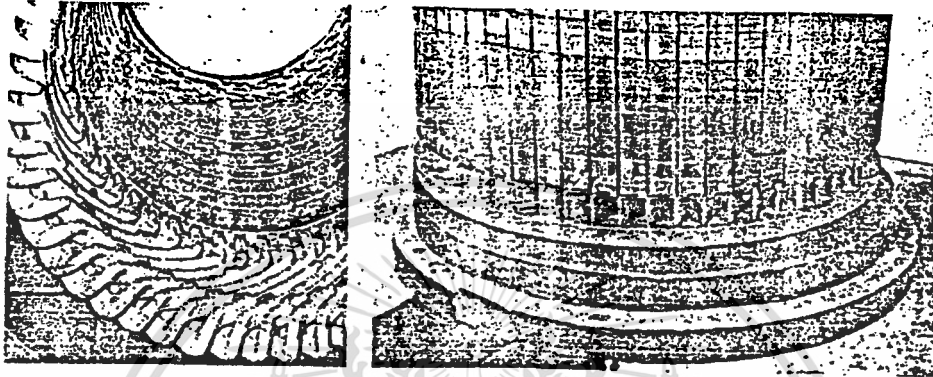
โรเตอร์ (Rotor)

ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอามอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ไปใช้งานในสถานที่ต่าง ๆ มากมาย เช่น โรงงานอุตสาหกรรม องค์การสำนักงาน โรงพยาบาล ฯลฯ ซึ่งตามสถานที่เหล่านี้จะต้องมีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นส่วนประกอบใช้อยู่เป็นจำนวนมากมาย ดังนั้น มอเตอร์เล็กที่ส่งมาซ่อมส่วนใหญ่เป็นมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ อาจเป็นแบบ 1 เฟส หรือ 3 เฟส

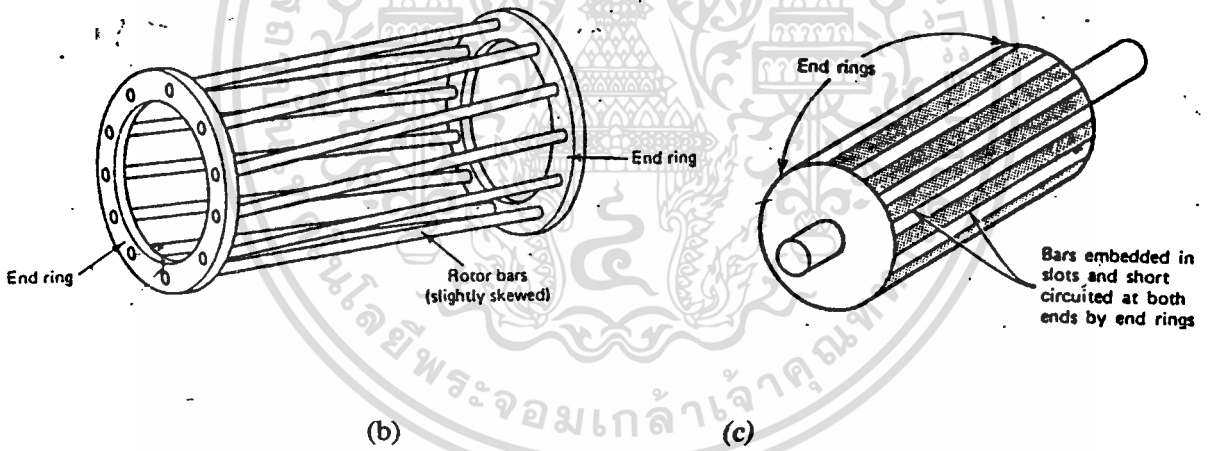
จากการที่เราเป็นผู้ตรวจซ่อมมอเตอร์และต้องสัมผัสกับมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำมากกว่ามอเตอร์ชนิดอื่นนี้เอง จึงจำเป็นที่เราจะต้องทราบถึงโครงสร้างภายนอก ภายใน และหลักการทำงานของมอเตอร์ชนิดนี้ให้ดีเสียก่อนจึงจะสามารถวิเคราะห์ถึงสาเหตุของอาการผิดปกติ และตรวจสอบได้อย่างถูกต้อง

อันที่จริงแล้วการที่มอเตอร์เล็กหรือเกิดอาการผิดปกตินั้น อาจจะได้เกิดได้จากหลายสาเหตุ แต่วัตถุประสงค์ในการทำโครงการนี้ ก็คือ ต้องการตรวจเช็คอาการผิดปกติของมอเตอร์ ที่มีสาเหตุมาจากตัวโรเตอร์เท่านั้น ดังนั้น ในบทที่ 3 นี้ จึงจะขอกล่าวถึงเรื่องของลักษณะรูปร่างของโรเตอร์ หลักการเหนี่ยวนำและมีภาพประกอบเพื่อที่จะให้เข้าใจได้ดียิ่งขึ้น

ในมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำนี้ จะมีโรเตอร์ที่มีลักษณะพิเศษ คือ จะไม่จ่ายไฟให้กับตัวนำบนโรเตอร์ แต่จะอาศัยการเหนี่ยวนำจากสเตเตอร์เพื่อสร้างแรงบิด โดยโรเตอร์ของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แบบพันขดลวด (Wound Rotor) และแบบกรงกระรอก (Squirrel cage) สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอกนี้ บางทีอาจจะเรียกว่า Brushless Machine จะมีรูปร่างลักษณะดังที่แสดงให้ดูในรูปที่ 3.1 จากรูปที่ 3.1 (a) แสดงให้เห็นถึงตัวโครงสร้างของสเตเตอร์ ซึ่งจะทำขึ้นมาจากแกนเหล็กคุณภาพสูง ทำเป็นแผ่นบางๆ (Laminations) แต่ละแผ่นจะถูกเคลือบด้วยน้ำยาเป็นฉนวน แล้วนำมาอัดรวมกัน พร้อมทั้งทำเป็นร่องสลักภายใน (Slotted Inner) ให้มีจำนวนพอดีกับที่พันขดลวดลงไป (อาจเป็นมอเตอร์ 1 เฟส หรือ 3 เฟส) ดังแสดงให้ดูในรูปที่ 3.1 (a) ส่วนในรูปที่ 3.1 (b) นั้น จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างของโรเตอร์ที่เป็นแบบกรงกระรอกซึ่งจะประกอบไปด้วยแท่งทองแดงหรืออลูมิเนียมฝังไว้ภายในร่องสลักของโรเตอร์และแต่ละแท่งตัวนำนี้จะถูกลัดวงจรให้ถึงกัน โดยวงแหวนที่ปลายทั้งสองด้าน ส่วนรูปที่ 3.1 (c) นั้น จะแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างภายในของโรเตอร์เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น



(a)



(b)

(c)

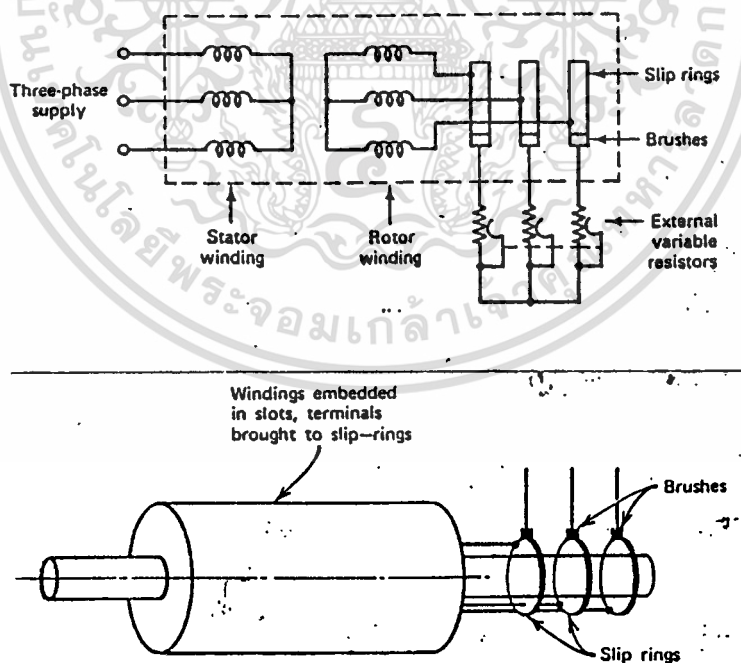
รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (a) สเตเตอร์เหนี่ยวนำ

(b) ภาพสเก็ทของแท่งตัวนำในโรเตอร์ , (c) โรเตอร์แบบกรงกระรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท่งตัวนำในโรเตอร์จะมีการวางตัวแบบเกือบขนานกับแกนแม่เหล็กของมอเตอร์ (Machine Axis) หรือวางเฉียง (Skewed) เพื่อให้ได้แรงบิดที่เรียบ (Uniform Torque) และการลดสัญญาณรบกวนในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นการป้องกันเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นได้จากโรเตอร์ และสเตเตอร์ คือ อาจเกิดการดูดล็อกติดกันระหว่างผิวหน้าที่ตรงกันข้ามได้ ซึ่งเรียกว่า Cogging Action เกิดจาก Reluctance Torque

โรเตอร์แบบกรงกระรอกนั้น จะทำให้มีช่องอากาศ (Air gap) ระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์น้อยมากและมักใช้ Ball Bearing มากกว่า Sleeve Bearing ในการจับยึดให้เข้าที่ที่ต้องทำให้มีช่องว่างอากาศน้อยก็เพื่อว่าต้องการให้แท่งตัวนำในโรเตอร์ มีโอกาสตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กจากสเตเตอร์ได้มากๆ และเพื่อจะเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นมาบนตัวโรเตอร์เหมือนกับหลักการของหม้อแปลง เมื่อมีแรงเคลื่อนเกิดขึ้นก็จะมีกระแสไหลในแท่งตัวนำของโรเตอร์ได้ เนื่องจากที่ปลายทั้งสองด้านได้ถูกลัดวงจร ด้วยวงแหวนไว้แล้วและสิ่งที่ได้ตามมาก็คือแรงบิด ซึ่งแรงบิดที่ได้นี้จะเป็นผลมาจากกระแสที่ไหลในแท่งตัวนำบน โรเตอร์ และสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์



รูปที่ 3.2 แสดงรูปแบบของโรเตอร์แบบพันขดลวด (Wound Rotor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของโรเตอร์อีกชนิดหนึ่ง นอกจากแบบกรงกระรอกแล้วก็คือแบบพันขดลวด (Wound Rotor) ซึ่งทั้งสองแบบต่างก็เป็นมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำเหมือนกัน สำหรับโรเตอร์แบบพันขดลวดนี้ จะต้องมีการพันขดลวดให้มีจำนวนเฟส เท่ากับจำนวนเฟสบนสเตเตอร์เพื่อให้มีจำนวนขั้วที่เท่ากัน โรเตอร์แบบพันขดลวดจะใช้สลีปรिंग (Slip Ring) ซึ่งอยู่บนแกนของโรเตอร์เป็นจุดเชื่อมต่อกับความต้านทานภายนอกโดยผ่านแปรงถ่าน

ในขณะที่มอเตอร์เริ่มสตาร์ททวงจรของโรเตอร์จะถูกต่อเข้ากับความต้านทานภายนอก ซึ่งลัดวงจรไว้ แบบสตาร์ท ตามรูปที่ 3.2 ความต้านทานภายนอกที่ถูกต่อเข้าไปนี้อาจจะทำงานแบบสเต็ปเพื่อควบคุมความเร็วในการสตาร์ทและเพื่อให้ได้แรงบิดที่เหมาะสม



บทที่ 4

การออกแบบเครื่องกราวเลอร์

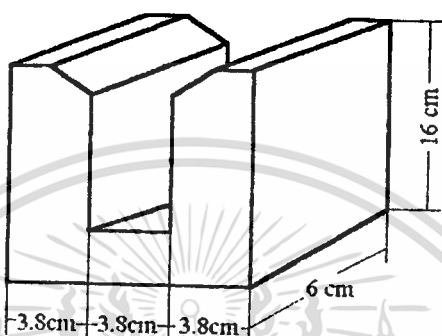
ในการออกแบบเครื่องกราวเลอร์โรเตอร์ทดสอบเพื่อใช้ในการทดสอบโรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage) ว่าแท่งตัวนำในโรเตอร์ขาดหักหรือไม่ขนาดของกราวเลอร์จะมีขนาดความยาวใกล้เคียงกับความยาวของโรเตอร์ เพื่อให้ให้น้ำสัมผัสของทั้งสองสัมผัสกันมากที่สุดเพื่อที่จะให้สนามแม่เหล็กวิ่งตัดผ่านตัวโรเตอร์มากที่สุด โดยที่ความยาวของเครื่องกราวเลอร์ไม่ควรยาวมากกว่าความยาวของโรเตอร์ เพราะจะทำให้สนามแม่เหล็กวิ่งผ่านช่วงที่เราไม่ต้องการ ซึ่งอาจจะทำให้ผลการวัดโรเตอร์คลาดเคลื่อนได้ ในการวัดตัวโรเตอร์ ถ้าตัวโรเตอร์เกิดมีแท่งทองแดงขาดภายใน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กลดลง เนื่องจากมีความต้านทานสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น จะเป็นผลให้กระแสที่ป้อนเข้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กลดลงจากการทดลองของกระแสนี้ เราจะนำกระแสส่วนนี้มาใช้ในการทดสอบสภาพของโรเตอร์ โดยนำค่าความต้านทานมาอนุกรมกับวงจร (รายละเอียดในการทดลอง) เพื่อที่จะให้มีแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานเมื่อกระแสเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ค่าความต้านทานก็จะเปลี่ยนแปลงตาม เนื่องจากค่าความต้านทานมีค่าคงที่และจาก $V = IR$ โดยที่จะนำแรงดันส่วนนี้ไปใช้ลักษณะของโรเตอร์ที่ใช้ในการทดลองซึ่งนำมาสร้างเป็นตัวกราวเลอร์



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของโรเตอร์

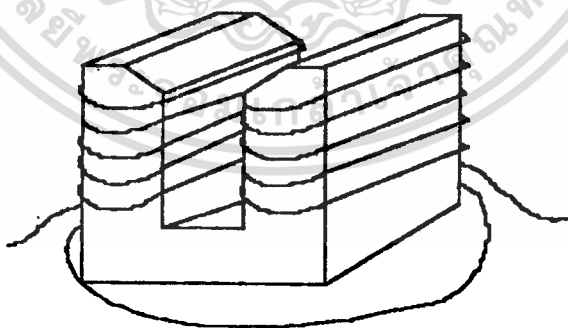
ในการประกอบกราวเลอร์จะใช้เหล็กแผ่นบาง (Laminate) มาเรียงซ้อนกันเป็นรูปตัวยูโดยที่ด้านปีกทั้งสองตัดเอียงเป็นมุม 45° เพื่อที่จะได้วางตัวโรเตอร์แนบสนิทกับตัวกราวเลอร์ ซึ่งเวลาหมุนตัวโรเตอร์หน้าสัมผัสจะสัมผัสกันพอดี

เครื่องกราวเลอร์ที่ประกอบขึ้นมาใช้แผ่นเหล็กมีความกว้าง 3.8 เซนติเมตร ยาว 16 เซนติเมตร หนา 6 เซนติเมตร ระหว่างแกนตั้งทั้งสองเท่ากับความกว้างของแผ่นเหล็ก คือ 3.8 เซนติเมตร นำมาเรียงซ้อนกันมีความกว้าง 6 เซนติเมตร ซึ่งวางโรเตอร์ที่ขนาดไม่เกิน 2.0 HP ได้มีลักษณะดังรูป 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของชุดกราวเลอร์

ในการพันขดลวดจะพันขดลวดบนแกนของเครื่องกราวเลอร์ทั้งสองข้าง ซึ่งทั้งสองข้างจะพันจำนวนรอบเท่า ๆ กัน เพื่อที่จะให้เกิดการกระจายของสนามแม่เหล็กไปทั่วแกนเหล็กมีอำนาจการเหนี่ยวนำผ่านตัวโรเตอร์ได้



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการพันขดลวด

การคำนวณหาจำนวนรอบขดลวดที่จะใช้พันเครื่องกราวเลอร์นั้นเป็นการคำนวณที่ จะต้องใช้หลักการคำนวณการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าสลับมาช่วยในการคำนวณเพื่อหาจำนวนรอบของขดลวดที่จะใช้พัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก $\phi(t)$ เป็นแบบ Sinsoidal

$$\begin{aligned}\phi(t) &= \phi_{\max} \sin \omega t \\ &= A_c B_{\max} \sin \omega t\end{aligned}$$

เมื่อ ϕ_{\max} = ค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็น Wb

B_{\max} = ค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็น Tesla

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

f = เป็นความถี่ของไฟฟ้าสลับมีหน่วย HZ

จาก Faraday's Law หากการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้า เมื่อจำนวนรอบของขดลวดที่พันอยู่เท่ากับ N รอบ โดยให้ในวงจรมแม่เหล็กเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดพันอยู่รอบแกนเหล็กมีค่าเท่ากันทุกรอบ

$$\begin{aligned}e(t) &= N \frac{d\phi(t)}{dt} \\ &= \omega N A_c B_{\max} \cos \omega t \\ &= E_{\max} \cos \omega t \\ \text{เมื่อ } E_{\max} &= 2\pi f N A_c B_{\max} \\ \text{และ } E_{\text{rms}} &= E_{\max} / \sqrt{2} \\ &= 2\pi f N A_c B_{\max} / \sqrt{2} \\ &= 4.44 f N A_c B_{\max}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ในการออกแบบใช้ค่า } B &= 1.2 \text{ Tesla} \\ \text{พื้นที่ของแกนเหล็ก } A_c &= 6 \times 3.8 = 22.8 \text{ Cm} \\ F_s &= 0.9 \\ E &= V = 220 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{จาก } E &= 4.44 f N A_c F_s B_{\max} \\ \therefore N &= 220 / (4.44 \times 50 \times 22.8 \times 10^{-4} \times 0.9 \times 1.2) \\ &\approx 400 \text{ รอบ}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณได้จำนวนรอบประมาณ 400 รอบ แต่เนื่องจากเครื่องกราวเลอร์มี
ขาแกนทั้งสองข้างจึงพันข้างละ 200 รอบ

เมื่อคำนวณจำนวนรอบขดลวดได้ลวดสำหรับพันแล้วพิจารณาขนาดเบอร์ลวดถ้า
ต้องการให้ A-T สูง ๆ จะต้องใช้ลวดที่สามารถรับกระแสได้สูงพอสมควร ฉะนั้นจึงเลือกเบอร์ลวด
AWG #19 สามารถทนกระแสให้ 5A ที่ต้องกระแสสูงเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ชัดเจน

จากการที่ให้มี A-T สูง ๆ เพื่อให้แกนเหล็กเกิดสนามแม่เหล็กมากที่สุด โดยแกน
เหล็กยังไม่อิ่มตัว สามารถเกิดอำนาจแม่เหล็กผ่านโรเตอร์เพื่อที่จะใช้การเปลี่ยนแปลงของสนาม
แม่เหล็กไปใช้ในการตรวจเช็คโรเตอร์ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดลอง

V	I ปกติ (A)	I ยกโรเตอร์ (A)	W		I _φ	
			ปกติ	ยกโรเตอร์	ปกติ	ยกโรเตอร์
17	0.5	0.8	3	1.5	0.1	0.1
28	1.0	1.4	9	5.0	0.2	0.2
39	1.5	1.8	10	9.0	0.38	0.4
50	2.0	2.4	32	14.5	0.6	0.7
60	2.5	2.9	49	21	0.9	1.0
70	3.0	3.4	71	30	1.2	1.35
77	3.5	4.0	96	40	1.6	1.8
85	4.0	4.4	124	50	2.0	2.2
98	4.5	5.0	150	62	2.4	2.5
109	5.0	5.4	180	75	2.9	3.0

ตารางที่ 1 ใช้โรเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 1 HP ที่ไม่มีรอยขาด

V	I ปกติ (A)	I ยกโรเตอร์ (A)	W		I _φ		I เมื่อเจอจุดขาด(A)
			ปกติ	ยกโรเตอร์	ปกติ	ยกโรเตอร์	
19	0.5	0.85	3	2	0.1	0.15	0.45
30	1.0	1.4	10	5	0.2	0.3	0.95
42	1.5	2.0	21	11	0.4	0.5	1.45
50	2.0	2.45	35	16	0.6	0.75	1.95
60	2.5	3.0	55	23	0.9	1.1	2.42
70	3.0	3.5	77	32	1.25	1.4	2.92
80	3.5	4.0	102	40	1.6	1.8	3.44
90	4.0	4.5	135	52	2.0	2.2	3.98
100	4.5	5.0	170	66	2.4	2.6	4.42
110	5.0	5.4	208	81	2.8	3.1	4.92

ตารางที่ 2 ใช้โรเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 1.5 HP ที่มีรอยขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

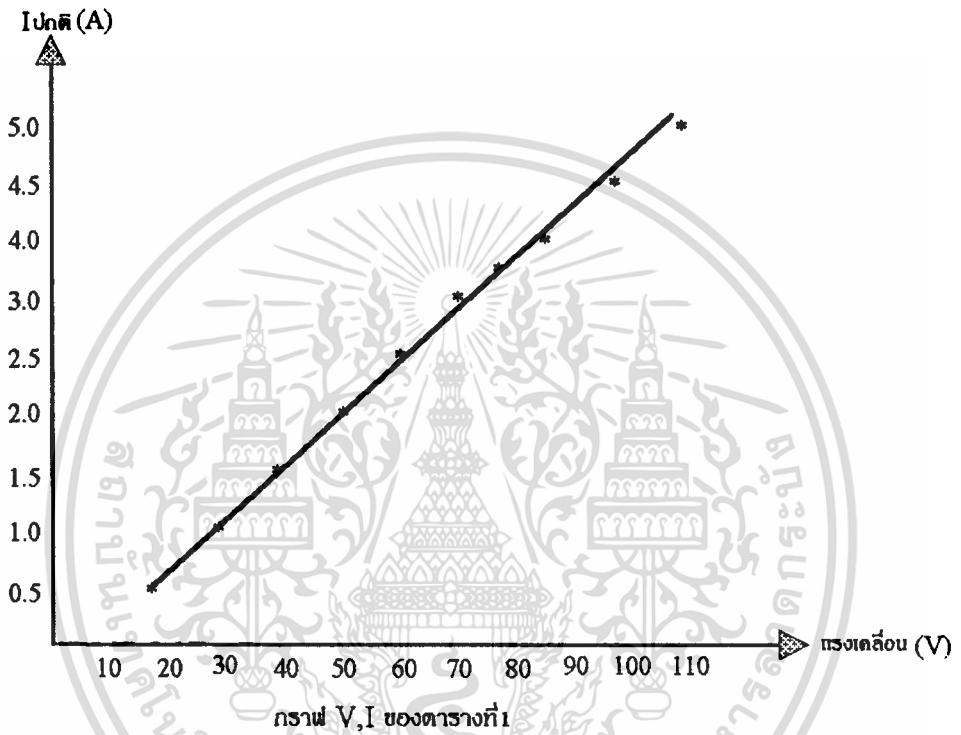
V	I ปกติ (A)	I ยกโรเตอร์ (A)	W		I_{ϕ}		I เมื่อเจอจุดขาด(A)
			ปกติ	ยกโรเตอร์	ปกติ	ยกโรเตอร์	
15	0.5	0.7	2	1	0.15	0.15	0.45
25.5	1.0	1.2	7	4	0.2	0.25	0.95
36	1.5	1.8	17	8	0.38	0.4	1.45
47	2.0	2.25	30	13	0.59	0.63	1.95
55	2.5	2.8	46	20	0.85	0.9	2.45
65	3.0	3.3	67	28	1.18	1.3	2.9
75	3.5	3.8	87	37	1.6	1.7	3.4
85	4.0	4.3	116	46	1.9	2.0	3.85
95	4.5	4.8	146	58	2.3	2.4	4.4
105	5.0	5.3	170	73	2.8	2.9	5.0

ตารางที่ 3 ใช้โรเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 3/4 HP ที่มีรอยขาด

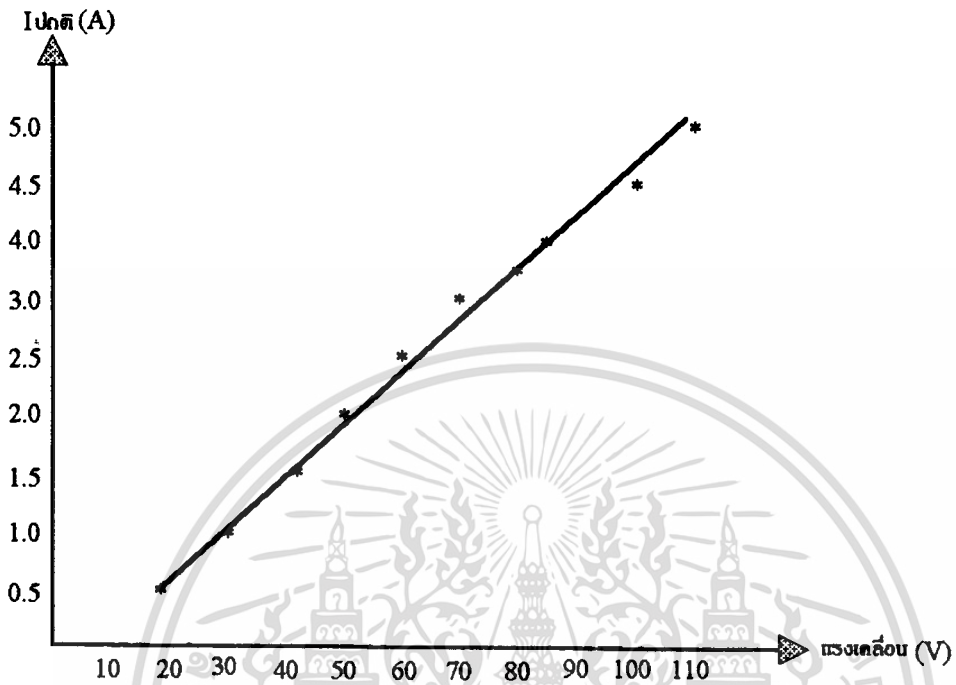
จากค่าต่าง ๆ ในตารางบันทึกผลการทดลองได้มาจากการทดลองจ่ายกระแสเข้าไปในขดลวดของกราวเลอร์ ตั้งแต่ 0.5A ไปจนถึงพิกัดที่ลวดเบอร์ 19 จะทนได้ คือ 5A เพื่อที่จะหาค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นในการคำนวณหาประสิทธิภาพ (η) และเลือกค่าที่เหมาะสมที่จะใช้ในวงจรจริงต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างตารางที่ 1, 2 และ 3 แล้ว สังเกตเห็นว่า เมื่อเพิ่มกระแสที่จ่ายในวงจรขึ้นเรื่อย ๆ จาก 0.5 ถึง 5A แล้ว ค่าแรงเคลื่อน (V) ที่ใช้จะเพิ่มสูงขึ้นตามกระแสโดยโรเตอร์ที่มีแรงม้ามากก็จะมีค่าแรงเคลื่อนที่ใช้เพิ่มมากกว่าโรเตอร์ที่มีแรงม้าน้อย ส่วนกระแสตอนยกโรเตอร์ขึ้นนั้นจะเห็นว่า เพิ่มขึ้นจากปกติเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานแม่เหล็กของโรเตอร์มีค่าน้อย ไม่ค่อยมีผลต่อกระแสที่ไหลในวงจรมากเท่าไร ค่ากำลังงานที่ใช้ในวงจร (W) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามกระแสที่ไหลในวงจร และเมื่อยกโรเตอร์ขึ้น ค่ากำลังงานที่ใช้จะเปลี่ยนไป คือ จะมีค่าลดลงจากตอนปกติ เช่นเดียวกับค่ากำลังงาน ค่ากระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetizing Current, I_{ϕ}) ก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามกระแสที่ไหลในวงจร แต่เมื่อตอนยกโรเตอร์ค่า I_{ϕ} จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าตอนปกติ เนื่องจาก กระแสที่ไหลในวงจรมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อตอนยกโรเตอร์ และจากตารางที่ 2 และ 3 จะมีค่าของกระแสเมื่อเจอจุดขาดด้วย โดยพบว่า จะมีขนาดลดลงไปจากตอนปกติประมาณ 0.05-0.08A ซึ่งค่าที่ลดลงไปนี้เองที่จะนำไปสู่การตรวจจบบรอยขาดที่เกิดขึ้นกับแท่งตัวนำในโรเตอร์

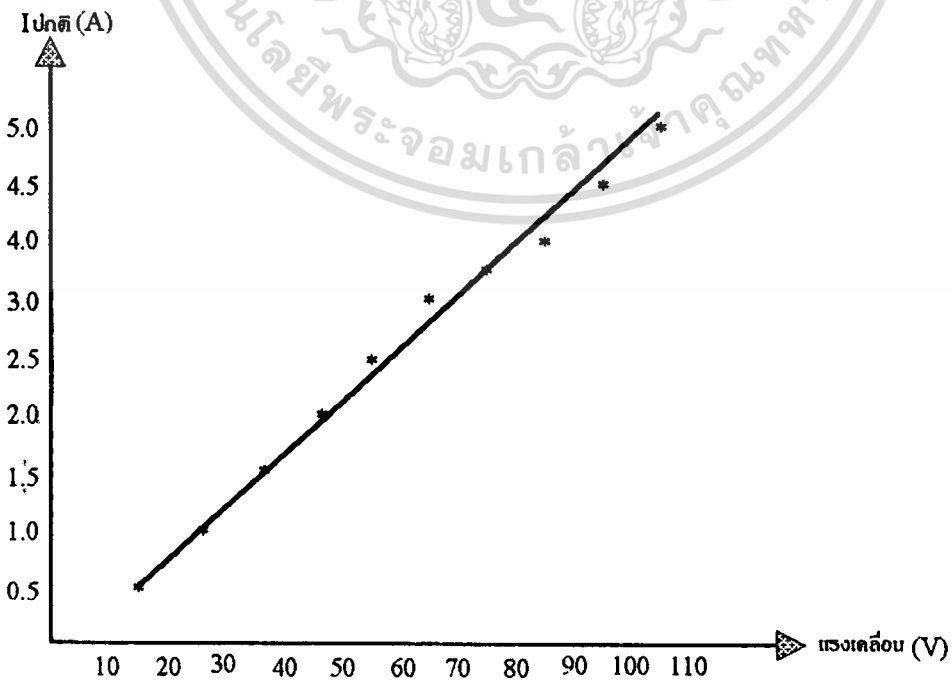
จากค่า V และ I ตอนปกติ ที่ได้จากการทดลองอาจนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟ V,I ของตารางที่2



กราฟ V,I ของตารางที่3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่โหลดต่าง ๆ

จากตารางที่ 1 สุ่มตัวอย่างมาจำนวน 4 ค่า โดยใช้สูตร $P = IV$ คือ

$$\text{ประสิทธิภาพ } (\eta) = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out} \cdot I \text{ โหลดปกติ}}{V_{in} I_{\phi}}$$

$$\text{ที่ } I \text{ ปกติ} = 1 \text{ A } \eta = \frac{28 \times 1}{220 \times 0.2} \times 100 = 63.6\%$$

$$\text{ที่ } I \text{ ปกติ} = 2 \text{ A } \eta = \frac{50 \times 2}{220 \times 0.6} \times 100 = 75.7\%$$

$$\text{ที่ } I \text{ ปกติ} = 2.5 \text{ A } \eta = \frac{60 \times 2.5}{220 \times 0.9} \times 100 = 75.7\%$$

$$\text{ที่ } I \text{ ปกติ} = 4.5 \text{ A } \eta = \frac{98 \times 4.5}{220 \times 2.4} \times 100 = 83.5\%$$

จากตารางที่ 2 สุ่มตัวอย่างมาจำนวน 4 ค่า คือ

$$\text{ที่ } I \text{ ปกติ} = 1 \text{ A } \eta = \frac{30 \times 1}{220 \times 0.2} \times 100 = 68.1\%$$

$$\text{ที่ } I \text{ ปกติ} = 2 \text{ A } \eta = \frac{50 \times 2}{220 \times 0.6} \times 100 = 75.7\%$$

$$\text{ที่ } I \text{ ปกติ} = 2.5 \text{ A } \eta = \frac{60 \times 2.5}{220 \times 0.9} \times 100 = 75.75\%$$

$$\text{ที่ } I \text{ ปกติ} = 4.5 \text{ A } \eta = \frac{100 \times 4.5}{220 \times 2.4} \times 100 = 85.2\%$$

จากตารางที่ 3 คู่ตัวอย่างมากำนวน 4 ค่า คือ

$$\text{ที่ I ปกติ} = 1 \text{ A } \eta = \frac{25.5 \times 1}{220 \times 0.2} \times 100 = 57.95\%$$

$$\text{ที่ I ปกติ} = 2 \text{ A } \eta = \frac{47 \times 2}{220 \times 0.59} \times 100 = 72.4\%$$

$$\text{ที่ I ปกติ} = 2.5 \text{ A } \eta = \frac{55 \times 2.5}{220 \times 0.85} \times 100 = 73.5\%$$

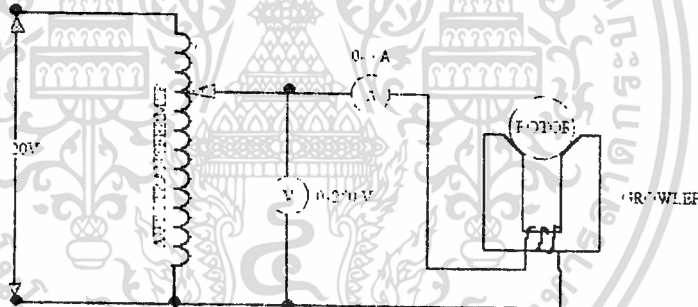
$$\text{ที่ I ปกติ} = 4.5 \text{ A } \eta = \frac{95 \times 4.5}{220 \times 2.3} \times 100 = 84.5\%$$

จากค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณจะสังเกตเห็นว่ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามกระแสที่เพิ่มขึ้น (ระหว่าง 0.5-5 A) ในการใช้งานเราควรจะเลือกใช้ในย่านที่ประสิทธิภาพของหม้อแปลงมีค่าสูงๆ แต่ในการทำโครงการนี้พบว่าถ้าเลือกใช้กระแสที่ไหลในวงจรประมาณ 2-2.5A ก็สมารถที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง จนสามารถตรวจจับได้แล้ว คั้งนั้น เพื่อไม่ให้หม้อแปลงต้องจ่ายกระแสมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น จึงเลือกใช้ค่ากระแสประมาณ 2-2.5 A ในวงจรที่ใช้จริง

บทที่ 5

การพัฒนาของวงจร

จากจุดประสงค์ของการทำโครงการกราวเลอร์โรเตอร์ทดสอบนี้ขึ้นมาขึ้นมานั้นก็เพื่อต้องการนำไปใช้ตรวจจับความผิดปกติของโรเตอร์ชนิดที่เป็นกรงกระรอก (Squirrel Cage) ซึ่งเกิดผิดปกติขึ้นมาจากการที่แท่งตัวนำในโรเตอร์ขาด ดังนั้นจุดเริ่มต้นของการทำโครงการจึงต้องเริ่มจากการนำโรเตอร์ที่มีรอยขาด (ถ้าไม่มีให้นำโรเตอร์ที่ดี มาทำการเจาะให้แท่งตัวนำภายในขาด เพื่อเป็นการจำลองสภาพการขาดของแท่งตัวนำแทน) ทำการทดลองร่วมกับเครื่องกราวเลอร์โรเตอร์ทดสอบ ที่ทำขึ้นนี้เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นว่ามีอะไรเปลี่ยนแปลงบ้างและเปลี่ยนแปลงอย่างไร เพื่อที่จะได้นำผลการเปลี่ยนแปลงอันนั้น ไปใช้ในการแสดงผลให้ทราบต่อไป



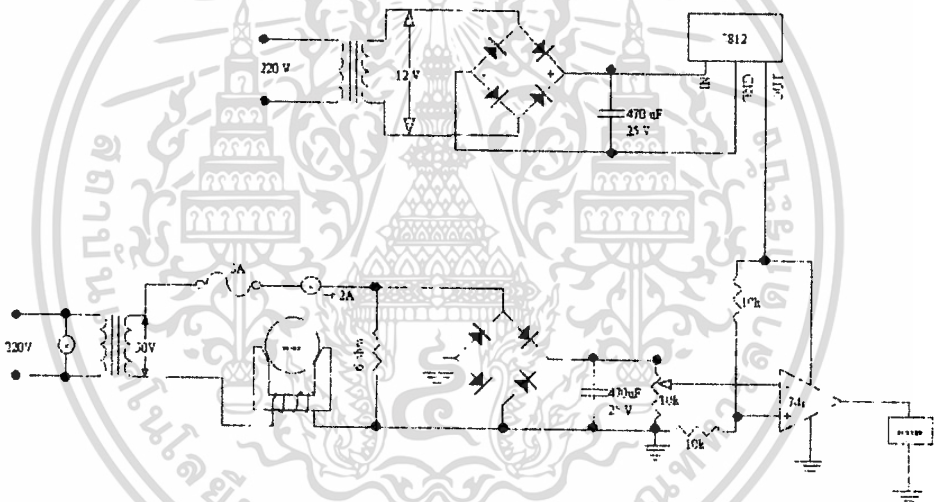
รูปที่ 5.1 วงจรเริ่มแรกที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปเป็นวงจรเริ่มแรกที่ใช้ทดลองหาค่าความเปลี่ยนแปลง เพื่อที่จะนำไปใช้แสดงผลให้ทราบ และจากการทดลองปรากฏผลดังนี้

เมื่อเราต่อวงจรการทดลองตามรูปเสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยที่ตอนแรกนั้นเราจะวางตัวโรเตอร์ไว้บนเครื่องกราวเลอร์ โดยให้ส่วนที่ขาดอยู่ทางด้านบนสุดจากนั้นเราจึงจ่ายไฟให้หม้อแปลง 1 เฟสแบบออโต้ (Single Phase Autotransformer) ด้วยค่า 220 V แล้วทำการปรับค่าเอาต์พุตของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนอ่านค่ากระแสที่แอมป์มิเตอร์ได้เท่ากับค่ากระแสที่เราได้จากค่าคำนวณ 2(A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏว่าต้องใช้เอาต์พุตของหม้อแปลงประมาณ 50 V จากนั้นจึงเริ่มใช้มือหมุนตัวโรเตอร์ ที่วางอยู่บนเครื่องกราวเลอร์ช้า ๆ จนกระทั่งรอยขาดลงไปอยู่ทางด้านล่างสุด (ซึ่งอยู่บนเส้นทางที่ ϕ ไหลมาก) การทดลองทำเช่นนี้ปรากฏว่าเราสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้คือ ค่าของกระแสที่แอมป์มิเตอร์ จะลดลงจากตอนสภาวะเริ่มแรก เท่ากับ 0.05A และเมื่อเราหมุนตัวโรเตอร์ให้รอยขาดกลับขึ้นมาอยู่ทางด้านบนเหมือนเดิม ค่าของกระแสที่แอมป์มิเตอร์ก็จะกลับมามีค่าเท่ากับตอนเริ่มแรกอีก ดังนั้นเราจึงพอสรุปได้ว่า เมื่อเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) วิ่งตัดส่วนที่เป็นรอยขาดของแท่งตัวนำแล้วจะส่งผลให้กระแสที่ไหลในวงจรลดลงไปประมาณ 0.05A ด้วยเหตุนี้เราจึงนำผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์ในการแสดงผลให้ทราบว่า มีแท่งตัวนำบางตัวในโรเตอร์ขาดอยู่นั่นเอง

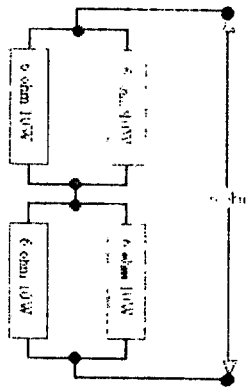


รูปที่ 5.2 วงจรการทดลอง

จากรูปเป็นการแสดงวงจรที่ใช้ตรวจจับการขาดของแท่งตัวนำในโรเตอร์ แล้วแสดงผลให้ทราบด้วย โดยหลักการทำงานของวงจรเป็นดังนี้คือ

เริ่มจากค่าที่ได้จากการทดลองที่แล้วซึ่งต้องการให้กระแสไหล 2A จะต้องใช้แรงเคลื่อน 50 V จึงใช้หม้อแปลง 1 เฟส 220/50 V 3A ธรรมดาจ่ายแทน หม้อแปลงแบบออโต เมื่อจ่ายไฟเข้าวงจรแล้ว ปรากฏว่ากระแสในวงจร 2A ผ่านความต้านทานค่า 6Ω ทำให้มีแรงเคลื่อนตกคร่อมความต้านทานเท่ากับ 12V ซึ่งความต้านทาน 6Ω นี้ได้มาจากการนำความต้านทานค่า 6Ω 4 ตัวมาต่อร่วมกันเพื่อให้ได้ค่าวัดที่ทนได้ตามรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 การต่อค่าความต้านทาน

จากแรงเคลื่อนตกคร่อมความต้านทานที่ได้เท่ากับ 12VAC นำมาผ่านวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ เพื่อแปลงให้เป็นไฟดีซี 12 V โดยนำค่าปาคิเตอร์ค่า 470 μ F 25V มาต่อคร่อมที่เอาต์พุตของเรกติไฟเออร์ เพื่อให้ได้ไฟดีซีที่เรียบขึ้นจากนั้นนำไปต่อคร่อมความต้านทานปรับค่าได้ 10 K Ω เพื่อที่จะให้สามารถเลือกค่าแรงเคลื่อนตกคร่อมความต้านทาน 10K Ω ได้

จากรูปจะเห็นวงจรจ่ายไฟดีซีที่อยู่ทางด้านบนอีกรูปหนึ่งทำขึ้นมาเพื่อใช้เป็นแรงเคลื่อนจ่ายให้กับออปแอมป์ และใช้เป็นแรงดันอ้างอิงของออปแอมป์ ด้วยซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป วงจรจ่ายไฟดีซีจะประกอบไปด้วยหม้อแปลง 220/12 V 1 ตัว นำค่าเอาต์พุต 12 V มาผ่านบริดจ์เรกติไฟเออร์ออกมาเป็นไฟ 12 V ดีซี โดยมีค่าปาคิเตอร์ 470 μ F 25 V ต่อคร่อมอยู่จากนั้นนำค่าเอาต์พุตที่ได้ไปเข้าขาอินพุตของไอซีเรกติเรเตอร์ เบอร์ 7812 เพื่อให้ได้แรงเคลื่อน 12 V ดีซี ที่มีค่าคงที่แน่นอนออกมาที่ขาเอาต์พุตของไอซีจากแรงเคลื่อน 12V ที่ออกจากไอซี จะนำมาจ่ายเป็นไฟเลี้ยงให้กับออปแอมป์เบอร์ 741 และในขณะเดียวกันก็จ่ายให้กับความต้านทานค่า 10K Ω ที่ต่ออนุกรมอยู่เป็นวงจรโวลต์เดจดีไวเซอร์ (Voltage Divider) โดยจะตกคร่อมที่ความต้านทานตัวละ 6 V

วงจรออปแอมป์ที่ใช้ในวงจรจะเป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Comparator) โดยใช้ ออปแอมป์ เบอร์ 741 ต่อตามวงจรซึ่งการทำงานของวงจรจะเป็นดังนี้คือ ในสภาวะเริ่มแรกรอยขาดของแท่งตัวนำบนโรเตอร์จะอยู่ทางด้านบน และเมื่อจ่ายไฟให้กับวงจรก็จะมีกระแสไหลในวงจรเท่ากับ 2A ตามที่ทดสอบ ในขณะเดียวกันก็จะมี แรงดันอ้างอิงไปปรากฏที่ขาอินพุตบวกของออปแอมป์เท่ากับ 6 V ส่วนแรงดันที่ขาอินพุตลบของออปแอมป์ นั้นได้มาจากความต้านทานปรับค่าได้ ซึ่งในขณะนี้ต้องปรับให้ได้เท่ากับ 6 V ด้วย เมื่อสัญญาณอินพุตของขาทั้งสองขาของออปแอมป์มีค่าเท่ากันก็จะทำให้เอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 0V ตามคุณสมบัติของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน จากนั้นทำการหมุนโรเตอร์ไปจนกระทั่งรอยขาดลงมาสู่ด้านล่างสุดซึ่งในสภาวะเช่นนี้จะทำให้กระแสที่ไหลในวงจรลดลงไปเท่ากับ 0.05A ส่งผลให้แรงเคลื่อนตกคร่อมความต้านทาน 6 Ω มีค่าน้อยกว่า 12V AC ดังนั้นเมื่อผ่านวงจรเรกติไฟเออร์ก็จะได้อาต์พุตที่มีค่าน้อยกว่า 12 V ดีซีด้วย และที่

ความต้านทานปรับค่าได้ $10\text{ k}\Omega$ ที่เคยปรับให้มีแรงเคลื่อนตกคร่อมเป็น 6 V ในขณะนี้ก็จะมีแรงเคลื่อนน้อยกว่า 6 V ด้วย สภาวะนี้ออปแอมป์ที่ต่อเป็นวงจรเปรียบเทียบกับแรงดันก็จะมีสัญญาณเข้าที่มีค่าไม่เท่ากัน ส่งผลให้มีเอาต์พุตออกที่ขาเอาต์พุตของออปแอมป์มีค่า $+12\text{ V}$ ตามคุณสมบัติของวงจรเปรียบเทียบกับแรงดัน และจากเอาต์พุตของออปแอมป์นี้ก็จะนำไปต่อเข้ากับบัสเซอร์ (BUZZER) เมื่อบัสเซอร์ได้รับแรงเคลื่อน 12 V ก็จะทำงาน

เมื่อเราหมุนโรเตอร์ต่อไปให้รอยขาดกลับมาอยู่ทางด้านบนอีกครั้ง สภาวะทุกอย่างก็จะกลับมาเหมือนเมื่อตอนเริ่มต้นทดลอง คือมีกระแสไหลเท่ากับ 2 A ทำให้แรงเคลื่อนที่ขาอินพุตลบของออปแอมป์ มีค่าเท่ากับ 6 V ซึ่งเท่ากับขาอินพุตบวก เอาต์พุตของออปแอมป์ จะเป็น 0 V บัสเซอร์ก็จะหยุดทำงาน

จากวงจรและการทำงานของวงจรที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า เราสามารถตรวจับหารอยขาดของแท่งตัวนำในโรเตอร์ได้แล้วโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกับแรงดันเป็นหลักและแสดงผลให้ทราบโดยใช้บัสเซอร์แต่เมื่อพิจารณาวงจรแล้วจะพบว่ามีข้อเสียอยู่ 2 แห่งที่น่าจะแก้ไขให้ดีขึ้นคือ

1. ที่ความต้านทาน $6\ \Omega$ ปรากฏว่ามีความร้อนเกิดขึ้นมากโดยคำนวณได้จากสูตรง่าย ๆ คือ

$$\begin{aligned} \text{ความต้านทานแต่ละตัวมีค่า} &= 6\ \Omega \quad 10\text{ W} \\ \text{มีกระแสไหลผ่านความต้านทานแต่ละตัว} &= 1\text{ A} \\ \text{จากสูตร } P &= I^2 R \\ &= 1^2 \times 6 \\ &= 6\text{ W} \end{aligned}$$

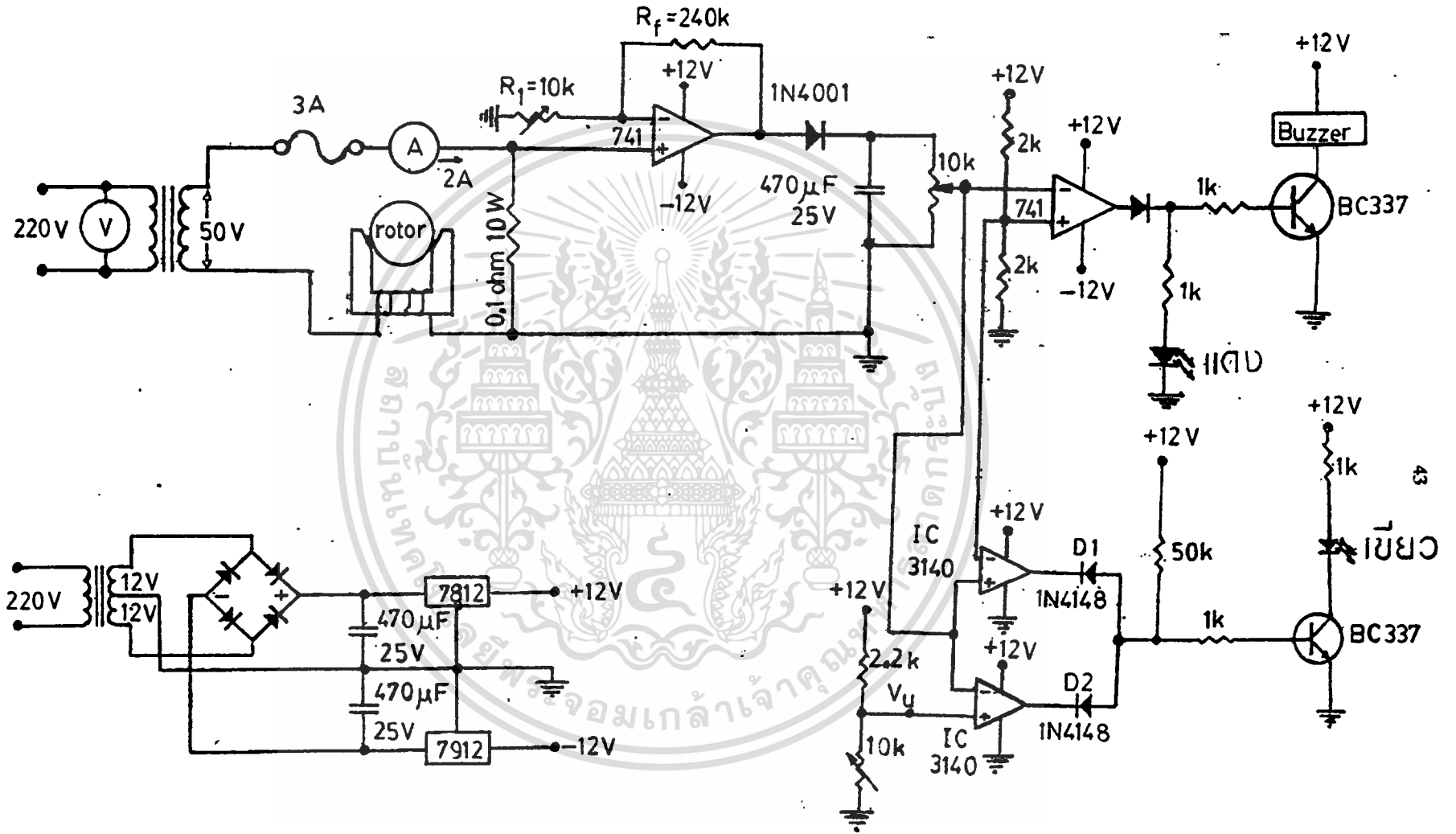
ค่า $P = 6\text{ W}$ ที่เกิดขึ้นนี้จะแปลงเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมด ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานที่สูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ โดยในทางปฏิบัติแล้วควรจะให้เกิดขึ้นให้น้อยที่สุด

2. ที่เอาต์พุตของออปแอมป์ในวงจรจะเห็นว่าใช้เอาต์พุตไปขับบัสเซอร์โดยตรงเลยซึ่งในความเป็นจริงแล้วไม่ควรทำเพราะการทำงานของบัสเซอร์มีการกินกระแสจำนวนหนึ่ง กระแสที่ออปแอมป์จะต้องเป็นตัวจ่ายให้โดยตรงซึ่งอาจจะเป็นเพิ่มภาระของออปแอมป์ มากเกินไปทำให้ออปแอมป์มีอายุการใช้งานสั้นลง

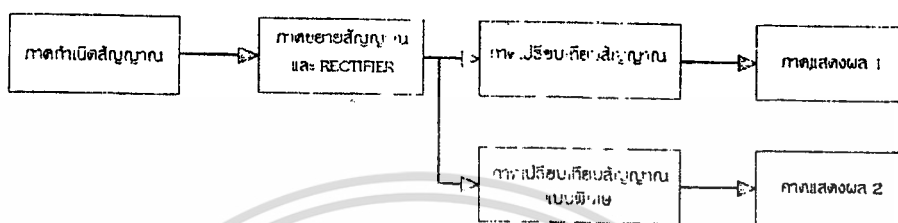
จากข้อเสียที่เกิดขึ้นทั้งสองข้อนี้จึงนำไปสู่การแก้ไขปรับปรุงวงจรให้ดีขึ้นเพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ดังนั้นจึงเกิดวงจรขึ้นมาใหม่ซึ่งใช้แนวความคิดเดิมคือการเปรียบเทียบกับแรงดัน โดยใช้ออปแอมป์ เบอร์ 741 แต่ต้องมีการเพิ่มวงจรอื่นเข้าไปอีก เพื่อให้วงจรทำงานได้เหมาะสม ซึ่งวงจรที่ได้รับการแก้ไขนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.4 เครื่องตรวจจับการหมุน



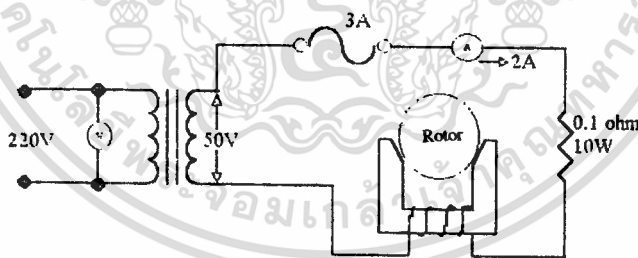
จากรูปเป็นวงจรที่ได้รับการแก้ไขปรับปรุงให้ดีขึ้น และเป็นวงจรที่ใช้ใน
โครงการนี้ด้วย ดังนั้นจึงขออธิบายการทำงานของวงจรอย่างละเอียด โดยแบ่งเป็นภาคการ
ทำงานดังนี้



รูปที่ 5.5 แผนผังการทำงานของวงจร

หลักการการทำงานจะให้แนวความคิดเดิม คือ เปรียบเทียบแรงดันโดยใช้ออปแอมป์
เบอร์ 741 ตามรูปที่ 5.5 แสดงแผนผังการทำงานของวงจรนี้ ซึ่งแบ่งออกเป็นภาคสำคัญ
ได้ 6 ภาคด้วยกันดังรูปต่อไป จะกล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละภาคเสียก่อนคือ

5.1 ภาคกำเนิดสัญญาณ



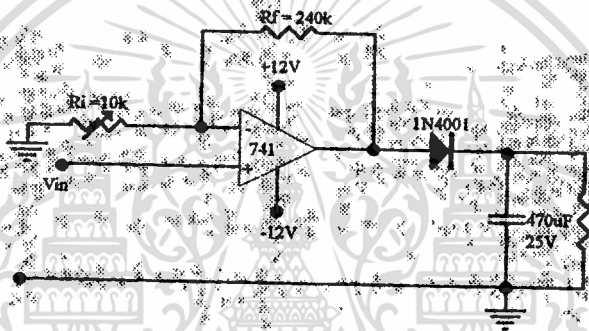
รูปที่ 5.6 แสดงภาคกำเนิดสัญญาณ

ภาคนี้จะมีหลักการคล้ายกับวงจรที่แล้ว คือ จ่ายไฟ 220 V เข้าไปที่หม้อแปลง
220/50 V 3 A แล้วนำทางด้านเอาต์พุตต่อเข้ากับวงจร ซึ่งจะทำให้กระแสไหลผ่านเท่ากับ 2A
แต่มีบางส่วนที่แตกต่างกันก็คือ นำฟิวส์ขนาด 3A มาต่ออนุกรมกับวงจรเพื่อป้องกันไม่ให้ กระแส
ไหลเกิน และมีการเปลี่ยนค่า 6Ω (ที่ได้มาจากความต้านทานค่า 6Ω 10W มาต่อกัน) มาเป็น
ความต้านทานค่า 0.1Ω 10 W ตัวเดียวซึ่งเหตุผลในการเปลี่ยนนี้ก็เพื่อต้องการลดผลของ
ความร้อน (Loss) ที่เกิดขึ้นที่ความต้านทาน ดังที่แสดงให้ทราบตามสมการนี้คือ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 P &= I^2 R \\
 &= 2^2 \times 0.1 \\
 &= 0.4 \text{ W}
 \end{aligned}$$

จากค่า $P = 0.4 \text{ W}$ ที่ได้ใหม่นี้จะเห็นว่ามีความน้อยกว่าค่าเก่ามาก ซึ่งส่งผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลงตามไปด้วย จึงถือว่าเป็นการแก้ไขข้อเสียข้อที่ 1 ไปได้แต่เราจะได้แรงเคลื่อนตกคร่อมความต้านทานนี้เท่ากับ $2 \times 0.1 = 0.2 \text{ V}$ เท่านั้น ดังนั้นถ้าจะมีการนำแรงเคลื่อนตรงนี้ไปใช้จะต้องมีการนำไปขยายให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นเสียก่อน โดยภาคขยายสัญญาณ

5.2 ภาคขยายสัญญาณและเรกติไฟเออร์

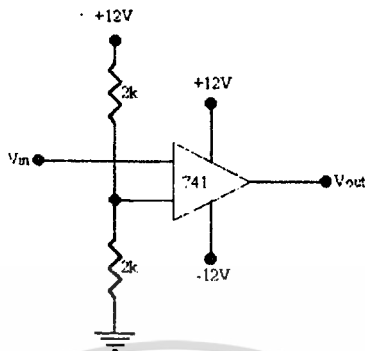


รูป 5.7 ขยายสัญญาณและเรกติไฟเออร์

ภาคนี้จะมีหน้าที่สำคัญคือ ขยายสัญญาณ V_{in} ที่เข้ามาที่ขาอินเวอร์ตติ้ง (NON-INVERTING) ขา 3 ของออปแอมป์ 741 ให้มีขนาดมากขึ้นและทำการเรกติไฟเออร์ให้เป็นไฟลิตซี ซึ่งขนาดสัญญาณเอาต์พุตของออปแอมป์ 741 นี้จะเป็นไปตามสมการ $V_o = AV_{in}$ โดยที่ V_{in} คือ สัญญาณอินพุต V_o คือ สัญญาณเอาต์พุต และ A เป็นอัตราขยายของวงจรที่มีการป้อนกลับซึ่งมีค่าเป็น $A = 1 + R_f/R_i$ จากสมการของอัตราขยายจะสามารถควบคุมได้โดยค่า R_f และ R_i ดังนั้นจึงสามารถเลือกค่าเอาต์พุตของออปแอมป์ 741 ได้ตามต้องการ และเมื่อได้ค่าเอาต์พุตแล้วจึงนำมาผ่านวงจร เรกติไฟเออร์ ซึ่งในขณะนี้นำไดโอดเบอร์ 1N4001 คาปาซิเตอร์ ค่า $470 \mu\text{F}$ 25 V จากวงจรแปลงไฟให้เป็นไฟลิตซีจะเห็นว่าเป็นวงจรฮาล์ฟเวฟเรกติไฟเออร์ (HALF WAVE RECTIFIER) สาเหตุเพราะว่าต้องการประหยัดค่าใช้จ่าย เพราะจากการทดลองเปรียบเทียบกับวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์แล้วปรากฏว่าวงจรสามารถทำงานได้เหมือนกันทุกประการ ดังนั้นจึงเลือกใช้ไดโอดเบอร์ 1N4001 เพียงตัวเดียวเมื่อได้ค่าไฟ ลิตซี นำคาปาซิเตอร์มาต่อคร่อมเพื่อให้ได้ไฟที่เรียบขึ้นแล้วจึงนำไปต่อกับความต้านทานปรับค่าได้ $10 \text{ k}\Omega$ เพื่อทำการปรับเลือกแรงดันให้ได้ V_{out} ต่อไป

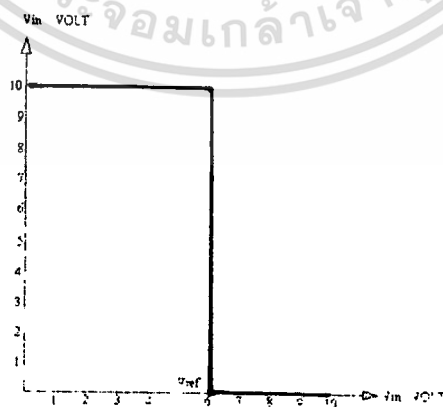
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8: เปรียบเทียบสัญญาณ



รูปที่ 5.8 แสดงภาคเปรียบเทียบสัญญาณ

ภาคนี้จะมีหน้าที่สำคัญ คือ จะต้องทำการเปรียบเทียบแรงดัน โดยในวงจรนี้จะเป็นการตั้งแรงดันอ้างอิงแบบคงที่ซึ่งกำหนดได้จากวงจรแบ่งแรงดัน ($R = 2K$ ทั้ง 2 ตัว) เป็นแรงดันให้กับขาอินพุตอินเวอร์ตติ้ง ขา 3 และจะให้แรงดันอินพุตเข้าที่ขาอินเวอร์ตติ้ง (INVERTING) ขา 2 เมื่อแรงดันอินพุตมีแรงดันต่ำกว่า “แรงดันอ้างอิง” เอาท์พุตของออปแอมป์ก็จะมีแรงดันเพิ่มสูงหรือเป็น “HIGH” (POSITIVE SATURATION) แต่เมื่อแรงดันอินพุตมีค่ามากกว่า แรงดันอ้างอิง เอาท์พุตก็จะมีแรงดันต่ำลงเป็น “LOW” (NEGATIVE SATURATION) ซึ่งลักษณะของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงนี้แสดงเป็นกราฟสัญญาณได้ดังรูป

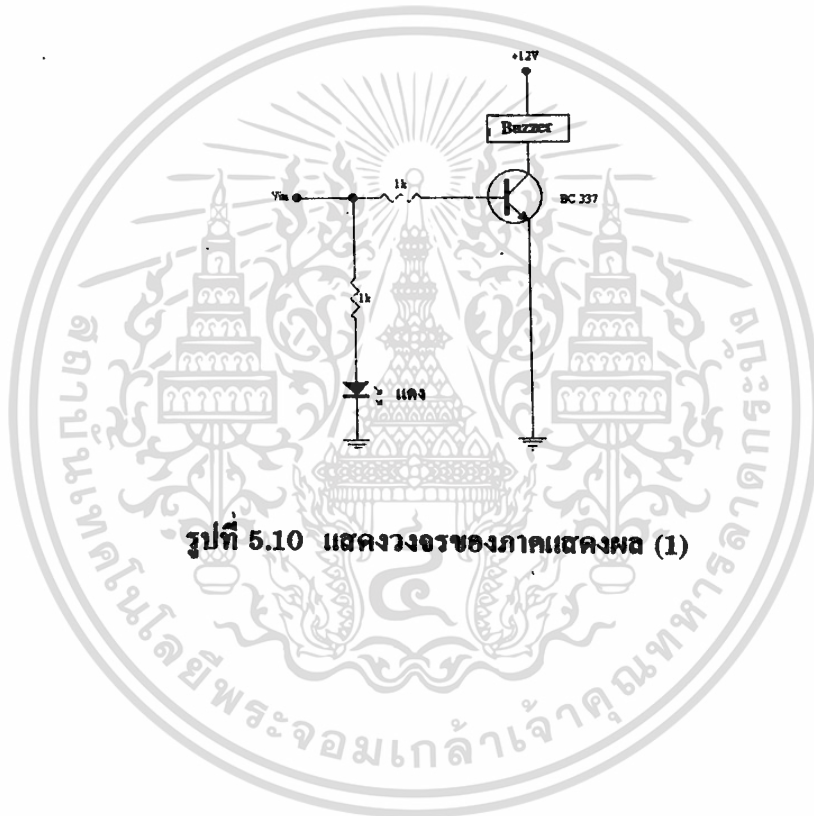


รูปที่ 5.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ภาคแสดงผล (1)

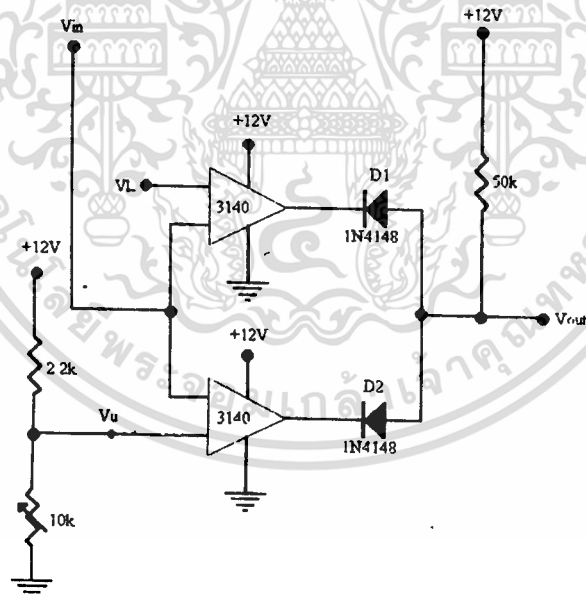
ภาคนี้จะมีหน้าที่แสดงผลให้ทราบโดยตามวงจรนี้จะได้ V_{in} มาจาก V_{out} ของภาคเปรียบเทียบสัญญาณ ผลของ V_{in} จะทำให้เกิดผล 2 อย่างคือ 1. จะทำให้ LED (สีแดง) ติด โดยมี $R = 1K$ เป็นตัวจำกัดกระแสและ 2. จะไปไบอัสที่ขา B ของทรานซิสเตอร์ BC337 โดยมี $R = 1K$ เป็นตัวจำกัดกระแสจากการไบอัสที่ขา B นี้ จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานนำกระแสได้เป็นผลให้ไฟสามารถผ่านบัสเซอร์ผ่านทรานซิสเตอร์ลงกราวด์ทำให้บัสเซอร์ ทำงานซึ่งปกติก็เป็นการแสดงผลให้ผู้ทำการทดสอบทราบ



รูปที่ 5.10 แสดงวงจรของภาคแสดงผล (1)

5.5 ภาคเปรียบเทียบสัญญาณแบบพิเศษ (WINDOWS COMPARATOR)

ภาคนี้มีหน้าที่ตรวจเช็คแรงดันอินพุต (V_{in}) ให้อยู่ในช่วงที่จำกัดคือ V_L และ V_U ในวงจรจะใช้ IC1, IC2 เบอร์ 3140 และใช้ไดโอด D1, D2 เบอร์ 1N4148 การทำงานของวงจรคือ จะต้องกำหนด V_L (6V) และ V_U (6.2 V) การปรับตั้ง V_U ทำได้โดยการปรับความต้านทานปรับค่าได้ 10 k Ω เมื่อแรงดัน V_{in} อยู่ในช่วงที่จำกัดคือ ตั้งแต่ V_L ถึง V_U เอาท์พุทของออปแอมป์แต่ละตัวจะเป็นสูงหรือเรียกว่า “วินโดว์” แต่เมื่อแรงดัน V_{in} อยู่สูงกว่า V_U เอาท์พุทของ IC2 จะเป็นต่ำ ในทำนองเดียวกันเมื่อแรงดัน V_{in} อยู่ต่ำกว่า V_L เอาท์พุทของ IC1 หรือ IC2 ผ่านออกไปในขณะเดียวกันก็จะยอมให้กระแสไหลผ่านตัวมันได้ เมื่อ IC1 หรือ IC2 มีเอาท์พุทเป็นต่ำซึ่งการทำงานของวงจร จะต้องทำงานร่วมกับภาคอื่น ๆ อีก โดยจะขอก้าวในหัวข้อหลักการทำงานของวงจร

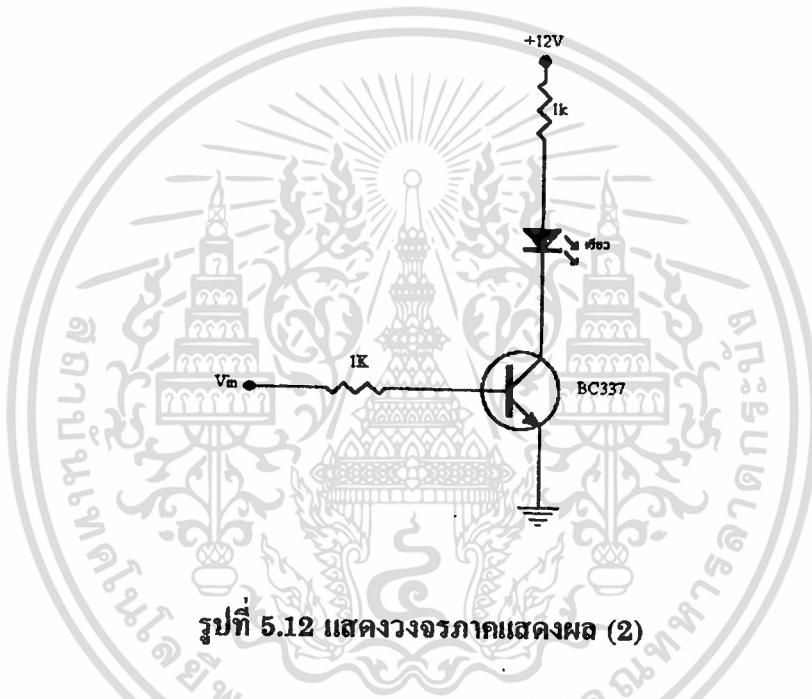


รูปที่ 5.11 แสดงภาคเปรียบเทียบสัญญาณแบบพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 ภาคนำผล (2)

ภาคนำผลนี้มีหน้าที่แสดงผลให้ทราบ ซึ่งในวงจรจะประกอบไปด้วย ทรานซิสเตอร์ BC 337 NPN, LED สีเขียวและความต้านทาน $1\text{ K}\Omega$ โดยจะได้รับ V_m มาจากภาคเปรียบเทียบสัญญาณแบบพิเศษ คือ ถ้า V_m เป็นสูงก็จะทำให้มีแรงเคลื่อนไบอัสที่ขา B โดยมี $R = 1\text{ K}\Omega$ เป็นตัวจำกัดกระแส ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานนำกระแส LED สีเขียวจะติด แต่ถ้า V_m เป็นต่ำก็จะไม่มีไฟไปไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์ หลอด LED จะดับ



รูปที่ 5.12 แสดงวงจรภาคนำผล (2)

5.7 หลักการทำงานของวงจร

เริ่มจากจ่ายไฟ 220V เข้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อน 50V ขึ้นทางด้านทุติยภูมิทำหน้าที่จ่ายกระแส (2A) ให้กับวงจรผ่านความต้านทาน 0.1Ω 10W และเครื่องกราวเดอร์ ในขณะที่จะมีแรงเคลื่อนตกคร่อม R 0.1Ω เท่ากับ 0.2V จากแรงเคลื่อนค่านี้จะนำไปเข้าวงจรขยายสัญญาณ ซึ่งมีการปรับอัตราขยายได้โดยการปรับที่ R_i (10K) จนกว่าจะได้เอาต์พุตของออปแอมป์เท่ากับ 8V AC จากนั้นนำมาผ่านวงจรฮาล์ฟเวฟเรกติไฟเออร์เพื่อให้ได้เอาต์พุต 6V จากเอาต์พุต 6V ที่ได้นี้จะนำมาเข้าที่ขาอินเวอร์ติ่งของออปแอมป์ 741 เพื่อทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณที่เข้าขาอนอินเวอร์ติ่งซึ่งมีค่าเท่ากับ 6V คงที่ตามทฤษฎีเมื่อสัญญาณที่ขาอินพุตทั้งสองที่ค่าเท่ากันก็จะไม่มีเอาต์พุตออกที่ออปแอมป์ ดังนั้น LED สีแดงก็จะดับ, TRI จะไม่นำกระแสบัลเซอร์ก็จะไม่ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหา คือ จะรู้ได้อย่างไรว่าแรงเคลื่อนที่ขาอินเวอร์ติ่งของออปแอมป์จะมีค่า 6V เมื่อไหร่ หนทางแก้ไขก็คือ การนำวงจรวินโดว์มาต่อร่วมด้วย โดยที่สัญญาณเข้านั้นจะเข้าที่ขาอินเวอร์ติ่งของออปแอมป์ 741 มาเข้าที่ขาของ IC1 และ IC2 ด้วย ซึ่งการนำสัญญาณเข้านั้นจะเข้าที่นอนอินเวอร์ติ่งของ IC1 และเข้าที่ขาอินเวอร์ติ่งของ IC2 พร้อมทั้งขาอินเวอร์ติ่ง ของ IC1 จะได้รับสัญญาณมาจากขาอนอินเวอร์ติ่งของออปแอมป์ 741 ซึ่งมีค่า 6V และที่ขาอนอินเวอร์ติ่งของ IC2 จะได้รับสัญญาณมาจากความต้านทานปรับค่าได้ $10K\Omega$ ซึ่งจะปรับให้มีค่า 6.2V อาศัยจากคุณสมบัติของวงจรวินโดว์ คือ เมื่อ V_{in} มีค่าอยู่ระหว่าง V_L (6V) และ V_U (6.2V) แล้วเอาท์พุทจะมีค่าเป็นสูง ดังนั้น กระแสจาก +12 V ผ่านความต้านทาน $50K\Omega$ ก็จะไม่สามารถผ่าน IC1 และ IC2 ลงกราวด์ได้แต่สามารถไปไบอัสให้ TR2 ทำงานได้ หลอด LED สีเขียวจึงติด แต่ถ้า V_{in} มีค่าต่ำกว่า V_L แล้วที่ IC1 จะมีแรงดันที่ขาอินเวอร์ติ่งมากกว่าแรงดันที่ขาอนอินเวอร์ติ่งส่งผลให้เอาท์พุทของ IC1 เป็น 0 กระแสจาก +12V ผ่าน R 50K ก็จะสามารถผ่านไดโอด D1 ผ่าน IC1 ลงกราวด์ได้ TR2 ก็จะหยุดทำงาน LED สีเขียวก็จะดับ ในทำนองเดียวกันเมื่อ V_{in} มีค่ามากกว่า V_U แล้วที่ IC2 จะมีแรงดันที่ขาอินเวอร์ติ่ง มากกว่าแรงดันที่ขาอนอินเวอร์ติ่ง ส่งผลให้เอาท์พุทของ IC2 เป็น 0 กระแสจาก +12V ผ่าน R 50K ก็จะสามารถผ่านไดโอด D2 ผ่าน IC2 ลงกราวด์ได้ TR2 ก็หยุดทำงาน LED สีเขียวก็จะดับเช่นกัน

ดังนั้นจึงเท่ากับเป็นการบังคับไปในตัวว่า V_{in} จะต้องมียุ่ระหว่าง 6-6.2 V ซึ่งถ้าอยู่ภายในค่านี วงจรเปรียบเทียบกับของออปแอมป์ 741 จะสามารถทำงานได้ถูกต้อง หรืออาจจะกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า ถ้าปรับ V_{in} จนกระทั่งหลอด LED สีเขียวติด นั่นคือวงจรจะอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน ซึ่งคล้าย ๆ กับการปรับค่าศูนย์ (Set Zero) ของโอห์มมิเตอร์ก่อนที่จะใช้วัดความต้านทานนั่นเอง

สรุปว่าสถานะเริ่มแรกหลอด LED สีเขียวจะติด แสดงว่าพร้อมใช้งานแล้ว เมื่อเราทำการหมุนโรเตอร์ ไปจนกระทั่งรอยขาดลงมาอยู่ทางด้านล่างสุด ทำให้กระแสที่ไหลในวงจรลดลงไป 0.05A แรงเคลื่อนตกคร่อม R 0.1Ω ก็ตกลงด้วยทำให้ได้แรงดันเอาต์พุทที่วงจรขยายสัญญาณลดต่ำลง ส่งผลไปจนถึงขาอินเวอร์ติ่ง ของออปแอมป์ 741 ทำหน้าที่เปรียบเทียบกับแรงดัน ซึ่งขณะนี้ที่ขาอนอินเวอร์ติ่งมีค่ามากกว่าจึงมีเอาท์พุทออกเป็นสูงไปจ่ายให้หลอด LED สีแดงติด และไปไบอัสให้ TR1 นำกระแสได้ บัสเซอร์ จึงทำงาน

ในขณะเดียวกันที่ขา V_{in} ของวงจรวินโดว์ซึ่งต่ออยู่กับขา อินเวอร์ติ่งของออปแอมป์ 741 ก็จะมีแรงดันลดต่ำลงด้วย ส่งผลให้ขาอินเวอร์ติ่งของ IC1 มีค่าสูงมากกว่าจึงมีเอาต์พุทออกเป็นค่าไฟ +12V จึงผ่าน R 50K ผ่านไดโอด D1 ผ่าน IC1 ลงกราวด์ได้ TR2 หยุดทำงาน

LED สีเขียวจึงดับเป็นที่น่าสังเกตว่า LED สีเขียวและสีแดงจะไม่มีโอกาสติดพร้อมกันได้ ซึ่งถือว่าเป็นการดีเพราะจะได้ช่วยเรื่องการกินพลังงานของวงจรว่าถูกต้องหรือไม่

ในกรณีที่บังเอิญ ตอนแรกเราวางรอยขาดไว้ในจุดที่อยู่ต่ำสุดแล้วปรับให้ V_{in} ที่ขาอินเวอร์ตติ้งของออปแอมป์ 741 อยู่ระหว่าง 6-6.2V แล้ว (โดยดูจากหลอด LED สีเขียวจะติด) จากนั้นทำการหมุนโรเตอร์ไปจนกระทั่งรอยขาดขึ้นมาอยู่ด้านบน ในตอนนี้แรงดัน V_{in} ที่เคยปรับไว้ระหว่าง 6-6.2 V จะกลับมีค่าสูงขึ้นจนเกินกว่า 6.2V ส่งผลให้ที่ขาอินเวอร์ตติ้งของ IC2 มีค่ามากกว่าเอาต์พุตจึงออกค่า ไฟ + 12V จึงผ่าน R 50K ผ่านไดโอด D2 ผ่าน IC2 ลงกราวนด์ได้ TR2 หยุดทำงาน LED สีเขียวดับ แต่สังเกตให้ดูว่าที่ขาอินเวอร์ตติ้งของออปแอมป์ 741 ก็จะมีค่ามากกว่าด้วยเช่นกัน จึงมีเอาต์พุตออกเป็นค่า หลอด LED สีแดงจะไม่ติดและ TR1 จะไม่ทำงานบัสเซอร์ก็ จะไม่ทำงานด้วยในขณะที่หลอด LED สีเขียวดับ จากการทำงานที่ผิดรูปแบบนี้อาจทำให้ผู้ใช้ไม่แน่ใจว่ามีรอยขาดในโรเตอร์หรือไม่ เพราะทั้งหลอด LED สีเขียว, LED สีแดงและบัสเซอร์ ไม่ทำงานทั้งหมดซึ่งที่ถูกต้องจะไม่มีโอกาสเป็นไปได้ดังนั้นทางแก้ไขผู้ใช้ควรวางโรเตอร์ให้อยู่ในตำแหน่งที่ตรงกันข้ามกับการวางในครั้งแรก แล้วเริ่มทำการปรับหลอดไฟเขียวใหม่ก็จะ ได้ผลตามความต้องการ

5.8 ผลการทดลอง

จากการทำโครงงานนั้นจำเป็นต้องใช้โรเตอร์ที่มีรอยขาดของแท่งตัวนำภายในโรเตอร์มาใช้ในการทดลอง แต่ในทางปฏิบัติแล้วโรเตอร์ที่มีรอยขาดอย่างนั้นหาได้ยากมากดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการจำลองสภาพการขาดของแท่งตัวนำ โดยใช้สว่านเจาะลงไปบนตัวโรเตอร์ ในแนวที่มีแท่งตัวนำวางอยู่ จนกระทั่งแท่งตัวนำขาดออกไม่ต่อดึงกันแต่เป็นที่น่าสังเกตว่ารอยขาดที่ถูกเจาะนั้นมีขนาดใหญ่กว่ารอยขาดที่เกิดขึ้นจริง ๆ มากซึ่งรอยขาดที่เกิดขึ้นจริงนั้น มีขนาดเล็กและแคบมากที่เดียวจึงเป็นที่น่าสงสัยว่าถ้านำโรเตอร์ที่มีรอยขาดแคบ ๆ มา ทดลองกับเครื่องนี้จะ สามารถตรวจจับได้จริงหรือไม่

ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงได้ทำการทดลองนำเศษผลตะไบ เศษตะกั่วบักกรีและเศษตัวนำขนาดเล็ก ๆ มาอัดใส่ในรูที่เจาะนั้นเต็มโดยให้เหลือช่องว่างให้น้อยที่สุดแล้วนำกระดาษกาวมาปิดกันเศษผงตะไบหลุดออก ตอนที่หมุนโรเตอร์ไปรอบ ๆ เสร็จแล้วนำเอาโรเตอร์ตัวนี้มาทดสอบกับเครื่องกราวเลอร์ที่สร้างขึ้น ผลปรากฏว่าเครื่องกราวเลอร์ สามารถตรวจจับผลได้เหมือนกับตอนที่รอยขาดกว้าง ๆ เช่นกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องกราวเลอร์โรเตอร์ทดสอบที่จัดทำเป็นโครงงานนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

การเกิดความคิดผิดปกติขึ้นกับมอเตอร์ทั้งที่เป็นแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage) และแบบที่เป็นขดลวด (Wound Rotor) อาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ดังนั้นจากประสบการณ์ และจากหนังสืออ้างอิงหลาย ๆ เล่ม ที่ได้กล่าวถึงสาเหตุของการเกิดตลอดจนการแก้ไขความคิดผิดปกติที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไว้ นั้นทางคณะผู้จัดทำจึงได้ทำการรวบรวมมาไว้ในรายงานฉบับนี้เพื่อใช้ประโยชน์ในการแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น หรือเป็นการแก้ปัญหาเฉพาะหน้า เพื่อให้ประโยชน์ และความรู้แก่ผู้อ่านรายงานฉบับนี้ โดยจะแบ่งเป็นกรณีที่จะเกิดขึ้น สาเหตุที่เกิด ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขดังนี้ คือ

ข้อมูลแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าของมอเตอร์

กรณีที่เกิดขึ้น	การแก้ไข
1. มอเตอร์สตาร์ทไม่ออก - ฟิวส์ขาดหรือ เบรกเกอร์เปิดวงจรแรงดันต่ำ	- เช็ควินช์หรือเบรกเกอร์ ควรต้องมีพิสัยต่ำสุดอย่างน้อย 125% ของ FLC - เช็ครองคั่นด้วย โวลท์มิเตอร์หรือดูจากเครื่องกลตัวอื่นที่อยู่ในไลน์เดียวกันว่ามีอาการเสียเหมือนกันหรือไม่ ถ้าเสียเหมือนกันให้ตรวจเช็คหม้อแปลงหรือแหล่งจ่าย ถ้าพบว่าสายป้อนเล็กเกินไปให้เปลี่ยนสายให้ใหญ่ขึ้นหรือลดขนาดโหลดลง
- แบร์ริงฝืดหรือติด - โหลดเกิน (Mechanical Overload)	- เปลี่ยนแบร์ริงหรือปรับแกนใหม่ - ลดขนาดโหลดของมอเตอร์ลงเช็คช่องอากาศ (Air gap) ดูว่ามีการโก่งตัวของแกน (Shaft) หรือไม่ เช็คตามรอยต่อหรือแบร์ริงว่าหลวมหรือไม่พยายามลดความถี่ให้น้อยที่สุด
- ขดลวดกระตุ้น (Field) ขาดหรือช็อต	- ใช้การทดสอบอย่างง่ายด้วยโอห์มมิเตอร์แล้วทำการแก้ไข ถ้าแก้ไขไม่ได้ให้ส่งเข้าร้านซ่อมที่มีความชำนาญแก้ไขหรือเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่เกิดขึ้น	การแก้ไข
- ขดลวดที่โรเตอร์ขาดหรือช้อด	- ใช้การทดสอบอย่างง่ายด้วยโอห์มมิเตอร์แล้วทำการแก้ไข ถ้าเสียหายมากก็จำเป็นต้องพันขดลวดใหม่หรือเปลี่ยน
- ตัวโอเวอร์โหลดคัท	- รีเซตโอเวอร์โหลดแล้วตรวจสอบหาจุดช้อดหรือลงกราวด์ ตรวจสอบ FLC ของมอเตอร์ และเปรียบเทียบกับค่าของโอเวอร์โหลดที่ตั้งไว้
- ตัวควบคุมผิดปกติ	- ตรวจสอบแรงดันทางด้านเข้าและออกของตัวควบคุม (Controller) ถ้าไม่เป็นตามปกติให้เปลี่ยนหรือซ่อม ทำความสะอาดที่หน้าสัมผัสของรีเลย์ควบคุมเพราะการที่หน้าสัมผัสสกปรกอาจเป็นสาเหตุให้แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ตกลงได้
2. มอเตอร์มีเสียงดังขณะทำงาน	
- แบริ่ง	- ตรวจสอบตำแหน่งที่ใส่แบริ่งและทำการหล่อลื่นเปลี่ยนแบริ่งเมื่อเกิดการหลวมหรือชำรุด
- จุดต่อ (Coupling) การส่งกำลัง	- ตรวจสอบแกนของมอเตอร์หรือของโหลดว่าโค้งงอหรือไม่ ตรวจสอบแนวการวางของจุดต่อทำการวางใหม่ถ้าจำเป็นขันจุดต่อให้แน่น
- ชิ้นส่วนหลวม	- ขันชิ้นส่วนของมอเตอร์หรือของโหลดทุกชิ้นส่วนให้แน่น ตรวจสอบว่าเกลียวของน็อตหลวมหรือไม่ มอเตอร์ที่มีกลไกของสวิทช์หนีศูนย์กลาง (Centrifugal Switch), แปรง, ถ่าน, Slip Ring และคอมมิวเตเตอร์กลไกการทำงานอาจเป็นสาเหตุของการเกิดเสียงดัง ถ้าการประกอบไม่แน่นพอ
- มอเตอร์หรือโหลดไม่สมดุล	- ปรับแต่งให้มอเตอร์หรือโหลดอยู่ในตำแหน่งที่สมดุล
- ช่องว่างอากาศ (Air gap)	- เช็คระยะของ Air gap ให้ได้สัดส่วนกับโรเตอร์ทำการเปลี่ยนแบริ่งถ้าจำเป็นความสกปรกของ Air gap อาจทำให้เกิดเสียงดังได้ทำความสะอาดมอเตอร์
- ระบบการระบายอากาศ	- ตรวจสอบเช็คการไหลเวียนของอากาศ การที่ใบพัดลมที่ระบายอากาศให้มอเตอร์เกิดแตก หรือไม่สมดุลอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดเสียงดังได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่เกิดขึ้น	การแก้ไข
3. มอเตอร์ร้อนเกินปกติ	
- โหลด	- ตรวจสอบกระแสด้วยแอมป์มิเตอร์แล้วอ่านเทียบกับกระแสที่พิกัดมอเตอร์ทำการลดโหลดหรือเปลี่ยนมอเตอร์ให้ใหญ่ขึ้น
- ขวดลวด	- ทดสอบขวดลวดหาจุดช็อต, ขาดหรือลงกราวด์ถ้าไม่สามารถซ่อมได้ให้นำส่งร้านซ่อมเพื่อพันขวดลวดใหม่หรือเปลี่ยนมอเตอร์
- ระบบระบายอากาศ	- นำสิ่งทีปิดกั้นทางผ่านลมออก และทำความสะอาด
- อุณหภูมิรอบตัวของมอเตอร์	- ตรวจสอบจุดอุณหภูมิรอบๆ ตัวมอเตอร์ว่าสูงเกินกว่าที่มอเตอร์จะทำงานได้หรือไม่ทำการปรับปรุงให้อยู่ในอุณหภูมิที่เหมาะสม
- แบริ่งและการจัดวาง	- แบริ่งที่คุณภาพไม่ดีและการจัดวางที่ไม่เหมาะสมของมอเตอร์อาจทำให้เกิดความสั่นมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อน ทำการเปลี่ยนแบริ่งแล้วจัดวางมอเตอร์และโหลดให้ถูกต้องถ้ามีบางส่วนของโรเตอร์ไม่ติดกับหน้าขั้วที่สเตเตอร์จะทำให้มอเตอร์เกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว
- แหล่งจ่ายไฟ	- ถ้าแรงดันสูงหรือต่ำเกินไป, มอเตอร์จะทำงานที่อุณหภูมิสูงแรงดันที่ถูกต้องจะต้องอยู่ภายใน 10% ของพิกัดมอเตอร์
4. เมื่อล้มศักรของมอเตอร์	
- มีอาการกระตุก (Shock)	- ทดสอบดูขวดลวดลงกราวด์หรือไม่ เช็จุดต่อระหว่างตัวโครงกับกราวด์ทำความสะอาดและขันให้แน่น
- ขดลวดที่สเตเตอร์	- ตรวจสอบเช็คจุดกราวด์ของมอเตอร์
- ไฟฟ้าสถิตย์	- ตรวจสอบเช็คจุดกราวด์ของมอเตอร์
5. มอเตอร์ทำงานไปสักพักแล้วหยุด	
- โอเวอร์โหลดรีเลย์	- จำกระแสแล้วเปรียบเทียบกับ FLC ของมอเตอร์ใช้การปรับตั้งโอเวอร์โหลดว่าถูกต้องหรือไม่ ลดขนาดของโหลดลงหรือเปลี่ยนขนาดของมอเตอร์ให้ใหญ่ขึ้น
- แหล่งจ่ายไฟ	- เปลี่ยนฟิวส์หรือรีเซตเบรกเกอร์
- อุณหภูมิรอบตัวมอเตอร์	- ถ้าอุณหภูมิโดยรอบสูงเกินไปให้เพิ่มการระบายอากาศในบริเวณนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่เกิดขึ้น	การแก้ไข
6. ฝาประกบเพลาร้อนเกินพิกัด	
- การหล่อลื่น	- ตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นให้สะอาดและอยู่ในระดับที่กำหนด อยู่เสมอนำสิ่งสกปรกหรือเจือปนออกจากน้ำมัน ปฏิบัติตาม คู่มือการใช้ของน้ำมันชนิดนั้น ๆ ทำความสะอาดฝาประกบ เพลา
- ฝาประกบเพลา	- ตรวจสอบและเปลี่ยนฝาประกบเพลาที่ชำรุดออก
- ระบบการหล่อลื่น	- น้ำมันหล่อลื่นไม่ควรจะไหลลงไปที่แกน ตรวจสอบผ้าซับ น้ำมันหรือการหมุนของวงแหวน ในฝาประกบเพลาชนิด ที่มีวงแหวน
- ระบบการระบายความร้อน	- ตรวจสอบใบพัดลมระบายความร้อน ไม่ควรให้มีส่วนที่ แตกหรือหัก
7. มอเตอร์หมุนช้าลง	
- โหลดเกิน	- ตรวจสอบกลไกในการต่อโหลด แบรีง จุดเชื่อมต่อเพื่อส่ง แรงเพราะถ้ามีปัญหาที่จุดเหล่านี้ จะทำให้เกิดความฝืด เพิ่มขึ้น ควรปรับแต่งให้อยู่ในค่าที่ถูกต้อง
- โรเตอร์	- ตรวจสอบจุดขาดหรือความต้านทานสูงของวงจร โรเตอร์ ทั้งชนิดที่เป็นกรงกระรอกและชนิดที่เป็นขดลวด จุด บัดกรี หรือจุดต่อที่ไม่แน่นอาจทำให้ดูเหมือนกับเกิดการ ขาดในวงจรโรเตอร์ ส่วนชนิดกรงกระรอกจะเกิดใน ลักษณะของแท่งตัวนำขาด
- แหล่งจ่าย	- แหล่งจ่ายไฟที่ต่ำเกินไปเป็นสาเหตุให้มอเตอร์หมุนช้า และเกิดความร้อนเกินทำการปรับแต่งให้ถูกต้องก่อนที่จะใช้งานต่อไป

หมายเหตุ : นำมาจากหนังสือ ELECTRIC MACHINES THEORY, OPERATION, APPLICATION, ADJUSTMENT AND CONTROL, 1991 หน้า 284-286 ของ CHARLE HUBERT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ถูกจัดทำขึ้นจนสามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ คณะผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์พิชิต ถ้ายอง และอาจารย์วีระศักดิ์ วงศ์วิวัติ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาท่านได้กรุณาให้คำชี้แนะและดูแลเอาใจใส่ตลอดมาขอขอบคุณร้านบ้านหม้อการไฟฟ้า ที่ให้ข้อมูลด้านเหล็กที่ใช้ทำโครงงาน ขอขอบคุณที่ ๆ ที่ช่วยให้ความสะดวกในการเบิก-จ่ายเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลองขอขอบคุณเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ขอขอบคุณบุคคลที่เกี่ยวข้องทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บรรณานุกรม

1. C.R. Paul/S.A. Narar/L.E. Unnewehr, Megraw-Hill International Edition. Introduction to Electrical Engineering, 1989
2. George Patrick Shultz, HOWARD W.SAMS & COMPANY, Transformer and Motor, 1989
3. CHARLE I HUBERT, Maxwell Macmillan International Edition, Electric machines Theory, Operation, Application , Adjustment and Control, 1991
4. T. Baith, John Wiley & Sons, Electrical Technologe, Second Edition 1984
5. พิชิต ถ้ายอง, “เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2539
6. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด “รวมโครงการอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม 4” บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2526
7. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน) “แนวการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 1” บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน), 2539