



ปีการศึกษา 2533

เครื่องวัดวิเคราะห์ฮิสเตอร์รีซิสของวัสดุแม่เหล็ก
(B-H ANALYZER)

โดย

1. นาย ชูเกียรติ ชัยมาทกุล
2. นาย พรชัย ลิ้มปัสุทธิพงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

- อ. สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์



ปริญญาบัตรปีการศึกษา

2533

เรื่อง เครื่องวัดวิเคราะห์สีสเตรียมิสของวัสดุแม่เหล็ก

ผู้จัดทำ

1. นาย ชูเกียรติ ชัยมาทกุล
2. นาย พรชัย ลิมป์สุทธิพงศ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อ. สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์)

เลขหมู่ T 33089 47
เลขทะเบียน 027982
วัน, เดือน, ปี ๑.๑.๓4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดวีเคราะห์ฮิสเตอร์รีซิสของวัสดุแม่เหล็ก

โดย นาย ชูเกียรติ ชัยมาทกุล
นาย พรชัย ลิมป์สุทธิวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษา อ. สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์
ปีการศึกษา 2533

บทคัดย่อ

ปัจจุบันได้มีการนำสารแม่เหล็ก มาทำเป็นแกนมาใช้งานอย่างกว้างขวางในวงกร้ออิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรม ซึ่งมีการใช้งานที่ความถี่แตกต่างกันอย่างเช่น ในวงจรรออิเล็กทรอนิกส์มีการนำแกน มาทำเป็นหม้อแปลงของ switching power supply หรือ flyback transformer สำหรับ TV ซึ่งมีความถี่ในการใช้งานที่แตกต่างกันไป ซึ่งการใ้ใช้งานของแกนนั้น มีการนำสารต่างๆ มาผสมกัน จากการสร้างเครื่องวีเคราะห์นี้ ทำให้เราทราบว่าที่ความถี่เท่าไรของแกนนั้นๆ เหมาะกับงานประเภทไหน มีการค้ำงของสนามแม่เหล็กในแกนเท่าไร ซึ่งการค้ำงของสนามแม่เหล็กนี้ ถ้าหากไม่ทราบจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานขึ้นในแกนเหล็กที่เรียกว่า eddy current loss ขึ้นทำให้แกนร้อน และวงจรที่ใช้ร่วมอาจจะไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร

เนื้อหาสำคัญของของปริญญานิพนธ์นี้ จะกล่าวถึงเหตุผลการสร้าง การทดสอบกับแกนต่างๆ ที่ความถี่เหมาะสมของแกนนั้นๆ ซึ่งจะเป็ประโยชน์ในการนำไปใช้งานต่อไป

B-H ANALYZER

By. Mr.Chukieat Chaimatikul
Mr.Pornchai Limsuttipong

Project Report Advisor Mr.Singhthong Patanasethanon
Academic Year 1990

Abstract

Presently, Magnetic has been developed for making to magnetic core, widely in the electronic and industrial world and the adjustly magnetic has been used in excellent task with different frequency such as the core has adapt for transformer of swiching power supply or flyback transformer for T.V. by different frequency

Here in, we have mixed material in to core as the result testing by analysis automachine, we founded how much frequency we can take the right of how much frequency in which are suitable in each work also we have acknowledge that how much the remainder of residual magnetism and density magnetic.

Incase there is residual magnetic, it will be occure the lossing and energy in magnetic core "eddi-current" as this result it happend the hot core and incomplete circuit.

So the resuit core of the experiment in suitable frequncy of each will be usefull for going on the work.

สารบัญ

บทคัดย่อ		
สารบัญ		
บทที่ 1	บทนำ	1
บทที่ 2	ความรู้พื้นฐานของ HYSTERESIS LOOP และหม้อแปลง	3
	2.1 วงจรแม่เหล็กและคุณสมบัติของสารแม่เหล็ก	3
	2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า	26
บทที่ 3	หลักการวัดและการสร้าง	34
	3.1 การกำหนดชนิดของอุปกรณ์ทางแม่เหล็กที่ใช้ในย่าน- ความถี่ 10 KHz และความถี่อื่นๆที่สูงกว่า	34
	3.2 หลักการวัดแบบพื้นฐาน	38
	3.3 การวัดที่ความถี่สูง	42
	3.4 รายละเอียดแต่ละส่วนของเครื่อง	43
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง	53
	4.1 การผันขดลวดลงบนแกนที่จะวัด	53
	4.2 การดำเนินการวัดค่า B-H curve	53
	4.3 ผลการทดลอง	54
บทที่ 5	บทวิจารณ์และสรุป	58
ภาคผนวก		
กิตติกรรมประกาศ		
หนังสืออ้างอิง		

บทที่ 1

บทนำ

วัสดุแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในวงจรทางด้านไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำวัสดุแม่เหล็กมาใช้สร้างหม้อแปลง หรือ วัชค ซึ่งเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ใช้ในวงจรทางด้านไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นก่อนนำวัสดุแม่เหล็กไปใช้งานก็ต้องมีการทดสอบหาคุณสมบัติของมันก่อน เช่นหาพฤติกรรมของมันเมื่อใช้งานที่ย่านความถี่ต่างๆ การหาค่าซึมซาบสัมพัทธ์ของแม่เหล็กที่ใช้งานในสภาวะต่างๆ ตลอดจนหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (B_{max}) ในกรณีต่างๆ เป็นต้น

โดยทั่วไปเราอาจแบ่งวัสดุที่ใช้ในวงจรแม่เหล็กได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือวัสดุที่มีความซึมซาบประมาณเท่ากับค่าในสุญญากาศ คือประมาณ μ_0 วัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก ตัวอย่างเช่น อากาศ ทองแดง และไม้ ในกลุ่มนี้คลุมไปถึงวัสดุที่เรียกว่า พาราแมติก เป็นวัสดุที่มีค่ามากกว่า μ_0 เล็กน้อย และไดอะแมกติก ซึ่งมีค่าความซึมซาบน้อยกว่าเล็กน้อย กลุ่มที่สองได้แก่วัสดุที่ความซึมซาบสูงกว่า อันได้แก่พวกเฟอร์โรแมกเนติก และเฟอร์โรแมกเนติก วัสดุพวกเฟอร์โรแมกเนติกยังแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยได้อีก คือเป็นวัสดุแข็งและวัสดุอ่อน อันเป็นคุณลักษณะตามความแข็งแรงทางโครงสร้างของวัสดุ วัสดุพวกเฟอร์โรแมกเนติกแบบอ่อนได้แก่เหล็กและเหล็กอ่อน ส่วนเฟอร์โรแมกเนติกแบบแข็งได้แก่ พวกแม่เหล็กถาวรอันได้แก่ พวกอัลนิโก สมารียม โคบอลต์ พวกเฟอร์โรแมกเนติกก็ถูกแบ่งออกคล้ายๆกับเฟอร์โรแมกเนติก แต่จะมีความต้านทานจำเพาะสูงกว่าพวกเฟอร์โรแมกเนติก จะมีคุณลักษณะสำคัญที่ต้องคำนึง 2 ประการในวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติกอย่างเช่นเหล็ก ในขณะที่ใช้งานในวงจรแม่เหล็ก ประการแรกคือ ค่าความซึมซาบของเหล็กจะมีค่าสูงกว่าในสุญญากาศ เราแสดงว่าความสัมพันธ์ของค่าความซึมซาบอยู่ในรูปของความซึมซาบสัมพัทธ์

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad H/m$$

เมื่อ μ_r คือค่าความซึมซาบของวัสดุ (ในกรณีนี้คือเหล็ก)

และ $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} H/m$ อันเป็นค่าความซึมซาบในสุญญากาศ ประการที่สองความสัมพันธ์ของ B และ H (สำหรับเหล็ก) จะไม่เป็นลักษณะที่เชิงเส้น

โดยทั่วไปแล้วเมื่อนำวัสดุแม่เหล็กมาใช้สร้างแกนหม้อแปลง ซึ่งหม้อแปลงเหล่านี้จะทำงานในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 50 Hz ถึง 400 Hz แต่ในปัจจุบันได้มีการสร้างหม้อแปลงสำหรับใช้ในสวิตชิงเรกูเรเตอร์ซึ่งทำงานในย่านความถี่สูงประมาณ 20 KHz ถึง 500 KHz หรือนำวัสดุแม่เหล็กมาสร้าง Deflection-

Yoke ในโทรทัศน์ หรือหม้อแปลงความถี่สูงต่างๆ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบวัสดุแม่เหล็กที่มาใช้สร้างอุปกรณ์ดังกล่าว เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานโครงงานนี้ จึงกล่าวถึงหลักการวัดค่าพารามิเตอร์หรือคุณสมบัติต่างๆของวัสดุแม่เหล็กโดยสามารถทำการทดสอบที่ความถี่ตั้งแต่ 50 Hz ถึง 200 KHz ซึ่งการวัดที่ได้นี้จะวัดในรูป BH-Curve แสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป แล้วจึงทำการอ่านค่า B_{max} , H_{max} ซึ่งจะทำให้หาค่าซึมซาบแม่เหล็กได้ จุดเด่นและจุดสำคัญของโครงงานนี้ก็คือ สามารถที่จะนำไปใช้งานร่วมกับออสซิลโลสโคปทุกๆไปได้เลย และก็สามารถที่จะอ่านค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้อย่างถูกต้องแม่นยำ จึงทำให้งบประมาณในการสร้างเครื่องวัดนี้ประหยัดกว่าเครื่องที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดถึงประมาณ 100 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานของ HYSTERESIS LOOP และหม้อแปลง

2.1 วงจรแม่เหล็กและคุณสมบัติของสารแม่เหล็ก

2.1.1 mmf และเส้นแรงแม่เหล็ก(flux)

2.1.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H

ทั้ง B และ H เป็นเวกเตอร์ที่จุดใดจุดหนึ่ง ซึ่งความเข้มของสนามแม่เหล็ก H ที่จุดนั้นจะทำให้เกิดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่จุดนั้นด้วย เราอาจเขียนความสัมพันธ์ได้โดยสมการง่ายๆ ดังนี้

$$B = \mu H \quad (2.1)$$

เมื่อ B เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา (T) หรือ (Wb/m^2)

H เป็นความเข้มของสนามแม่เหล็ก ที่จุดนั้นมีหน่วยเป็น แอมแปร์ต่อเมตร หรือแอมแปร์-เทอนต่อเมตร (A/m) หรือ (AT/m)

μ เป็นความซึมซาบได้ของตัวกลาง (permeability) มีหน่วยเป็นเฮนรีต่อเมตร (H/m) หรือเวเบอร์ต่อแอมป์-เทอนเมตร ($Wb/AT-m$)

ความซึมซาบได้ของตัวกลาง μ นี้ ทำให้สามารถจำแนกสารตัวกลางออกได้เป็น 3 ชนิดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารนั้น กล่าวคือ ให้

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

μ_0 เป็นตัวคงที่ของสมการเราเรียกว่า ตัวซึมซาบแม่เหล็กในอากาศ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $4\pi * 10^{-7}$ (H/m) ส่วน μ_r จะเป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบว่าสารนั้นๆ มีคุณสมบัติซึมซาบแม่เหล็กได้เป็นกี่เท่าของ μ_0

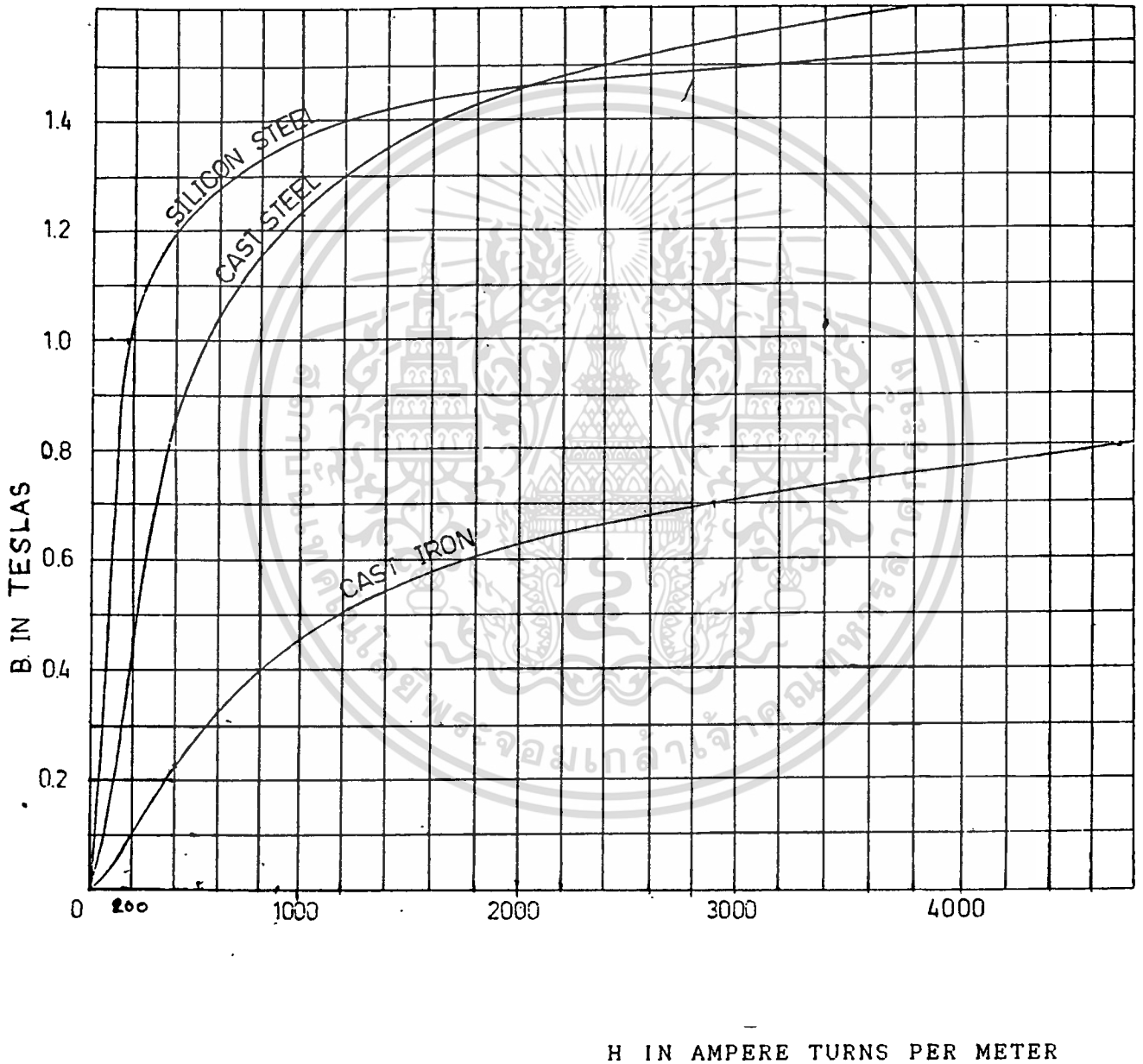
- สารใดมีค่า μ_r มากกว่า 1 เล็กน้อย สารนั้นจัดเป็นชนิด Paramagnetic Material เช่น อากาศ ไม้
- สารใดมีค่า μ_r น้อยกว่า 1 สารนั้นจัดเป็นชนิด Diamagnetic Material เช่น อลูมิเนียม หรือ สารตัวนำสมบูรณ์ ซึ่งมี $\mu_r = 0$
- สารที่มีค่า μ_r สูงมากๆ จัดเป็นพวก Ferromagnetic Material โดยทั่วไปค่า μ_r จะอยู่ระหว่าง 1,000 - 1,000,000 โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่เหล็ก (Ferromagnetic Material) และแม่ในสารชนิดเดียวกันที่
ค่าของความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน ค่าของ μ_r จะไม่เท่ากัน ลักษณะ
ความสัมพันธ์ของสารแม่เหล็กจากรูป 2.1 จะเห็นได้ว่า สมการ (2-1)
เราอาจเขียนใหม่ได้

$$\mu_r = B/\mu_0 H \quad (2.1ก)$$



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H

ค่าความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรงและจะมีระดับหนึ่ง ซึ่งแม้เราจะเพิ่ม
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 4-ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มสนามแม่เหล็กมากขึ้นไปอีก แต่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่เปลี่ยนแปลง จุดที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีกนี้ เราจะเรียกเป็นจุดอิ่มตัวของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของสารนั้น และค่าของ μ_r ที่มีขนาดสูงที่สุดของสารใดๆ จะสามารถหาได้จากการลากเส้นตรงไปสัมผัสกับเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ของสารนั้น และสมการ (2-1ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H นี้เราเรียกว่าเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก ตาราง (2-1) แสดงค่าสูงสุดของ μ_r และจุดอิ่มตัวของสารแม่เหล็กบางชนิด

ตาราง 2.1 แสดงค่า μ_r (max) และจุดอิ่มตัวของสารแม่เหล็กบางชนิด

ชนิดของแม่เหล็ก	ส่วนผสมอื่นจากเหล็ก	μ_r (max)	B_m จุดอิ่มตัว (T)
เหล็ก	5% ของอื่น	6000-9000	2.2
เหล็ก	.05% ของอื่น	20000-300000	2.2
เหล็กกล้าซิลิกอน	4% Si	7000	2.0
เหล็กกล้าซิลิกอน เรียงแนวรีด	3% Si	40000	2.0
48 Permalloy	48% Ni	60000	1.6
Monimax	47% Ni, 3% Mo	35000	1.45
78 Permalloy	78.5% Ni	70000	1.05
Mo Permalloy	4% Mo, 79% Ni	90000	0.87
Supermalloy	5% Mo, 79% Ni	900000	0.79
Sinimax	43% Ni, 3% Si	35000	1.1

Mumetal	5% Cu, 2% Cr 77% Ni	90000	0.65
---------	------------------------	-------	------



-6-
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2 mmf และ กฎของแอมแปร์

แรงเคลื่อนแม่เหล็กระหว่างจุดกำหนดสองจุด a และ b จะมีค่าคำนวณได้จากสูตร

$$F = \int_a^b H \cdot dl \quad (2.3)$$

เมื่อ F เป็นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่หน่วยเป็นแอมแปร์ หรือ แอมป์เทอน (A หรือ AT)

กฎของแอมแปร์ เป็นกฎแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กใช้ในการคำนวณต่างๆดังนี้

$$\int_C J \cdot da = \oint H \cdot dl \quad (2.4)$$

เมื่อ J เป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อตารางเมตร

จะได้ $\int_C J \cdot da$ แสดงถึงปริมาณของกระแสทั้งหมดที่เหนี่ยวนำให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก (ซึ่งอยู่ภายใน closed curve ของวงจรมแม่เหล็กที่เราเลือกไว้) และทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็มีทิศทางตามกฎมือขวา เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรมแม่เหล็กต่างๆได้ เช่น วงจรมแม่เหล็กในรูป 2.2 เป็นวงจรมแม่เหล็กอย่างง่ายๆ เป็นวงแหวนเทอร์รอยซึ่งมีขนาดสม่ำเสมอตลอด มีขดลวด N รอบพันอยู่ภายนอก และมีกระแสไฟฟ้า i ไหลอยู่ในขดลวด เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ทางด้านซ้ายของสมการ (2.4) ก็จะมีค่าเป็น Ni คือจำนวนกระแสทั้งหมดที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก และสมการ (2.4) ก็จะกลายมาเป็น

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

ซึ่งถ้าเกิดเส้นรอบวง R_1 จะได้

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

ถ้าคิดเส้นรอบวงที่ R_2 จะได้

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

ค่าของสนามแม่เหล็กภายในวงแหวนเทอร์รอย โดยเฉลี่ยจะมีค่าหาได้จากสมการ

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

$$H = Ni / 2\pi R$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

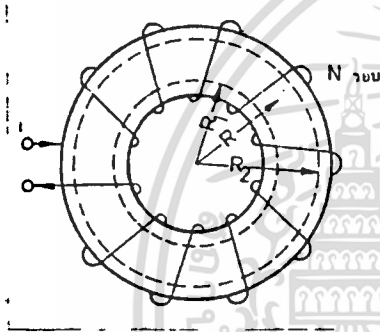
เมื่อ R เป็นรัศมีโดยเฉลี่ยของวงแหวนเทอร์รอย

ความยาว $2\pi R$ เป็นความยาวเฉลี่ยของวงจรมแม่เหล็ก ซึ่งค่าความยาวเฉลี่ยของวงจรมแม่เหล็กนี้จะ เป็นค่าที่เรานำมาใช้คำนวณ และโดยทั่วไปจะคิดว่าสนามแม่เหล็กภายในส่วนตัดขวางของวงจรมแม่เหล็ก ณ จุดใดจุดหนึ่งจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากันตลอด เพราะฉะนั้นวงจรมแม่เหล็กในรูป 2.3 สามารถใช้สมการ(2.4) แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

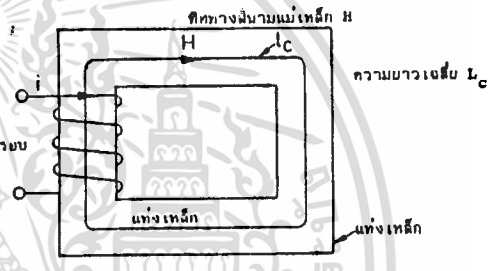
$$Ni = Hl$$

เมื่อ l เป็นความยาวเฉลี่ยของวงจรมแม่เหล็ก ในรูป 2.3 ซึ่งเราสามารถหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กภายในวงจรมแม่เหล็กนี้ได้

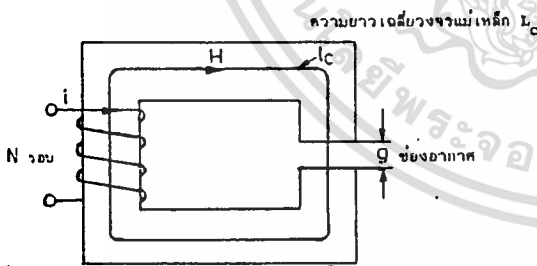
$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r Ni / l$$



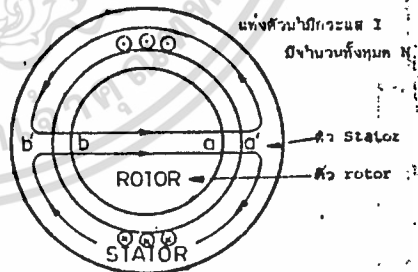
รูป 2.2 วงแหวนเทอร์รอย



รูป 2.3 วงจรมแม่เหล็ก



รูป 2.4 วงจรมแม่เหล็กชนิดมีช่องอากาศ



รูป 2.5 วงจรมแม่เหล็กของเครื่องจักรไฟฟ้า

รูปที่ 2.4 แสดงวงจรมแม่เหล็กอันมีตัวกลางสองชนิด ชนิดหนึ่งเป็นช่องอากาศกรณีนี้จากสมการ 2.5 กลายมาเป็น

$$\begin{aligned} Ni &= \int H \cdot dl_{\text{ของวงเหล็ก}} + \int H \cdot dl_{\text{ของวงจรมแม่เหล็กช่องอากาศ}} \\ &= Hl_{(\text{เหล็ก})} + Hg_{(\text{อากาศ})} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ 8-25 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$= B_l / \mu_0 \mu_r + B_g / \mu_0$$

$$= (B / \mu_0) [(1 / \mu_r) + g]$$

ซึ่งตามธรรมดา ค่า μ_r จะสูงกว่าค่า μ_0 มาก และเมื่อใดที่ค่า $g \gg 1 / \mu_r$ แล้วสามารถใช้ค่าโดยประมาณ ในการคำนวณโดยการตัดค่า mmf ในส่วนของวงจรที่เป็นสารแม่เหล็กออก คงเหลือแต่ส่วนวงจรช่องอากาศ

$$N_i \approx H g_{\text{อากาศ}}$$

$$\approx B \cdot g / \mu_0$$

วงจรแม่เหล็กหลักอีกชิ้นหนึ่งที่เหมาะในการพิจารณา คือ วงจรจากรูป 2.5 อันเป็นวงจรของเครื่องจักรไฟฟ้าชนิดหมุนโดยทั่วไป โดยมีตัวสเตเตอร์อยู่ภายนอกยึดอยู่กับที่ ทำจากสารแม่เหล็ก [Ferromagnetic Material] มีแท่งตัวนำจำนวน N แท่ง ซึ่งแต่ละแท่งมีกระแสไหลผ่านจำนวน i แอมแปร์ อยู่บนตัวสเตเตอร์ ตัวโรเตอร์ ซึ่งหมุนได้ อยู่ในในเป็นสารแม่เหล็กเหมือนกัน กระแสไฟฟ้าจากสเตเตอร์จะเหนี่ยวนำเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นบนวงจรแม่เหล็กอันนี้ ในกรณีนี้เลือกจากจุด a ไป a' ไป b' ไป b กลับมายัง a เป็นวงจรปิด (closed curve) ของสมการ $\oint H \cdot dl$ เพราะฉะนั้นเราจะได้

$$N_i = \oint H \cdot dl$$

$$= \int_a^{a'} H \cdot dl + \int_{a'}^{b'} H \cdot dl + \int_{b'}^b H \cdot dl + \int_b^a H \cdot dl$$

ซึ่ง $\int_a^{a'} H \cdot dl$ และ $\int_{b'}^b H \cdot dl$ จะเป็นค่า mmf ของช่องอากาศระหว่างตัวโรเตอร์กับสเตเตอร์ทั้งสองด้าน ซึ่งมีขนาดเท่ากับ

$$\int_a^{a'} H \cdot dl \quad \text{จะเป็นค่า mmf ของตัวสเตเตอร์ ซึ่งเป็นสารแม่เหล็ก}$$

$$\int_b^a H \cdot dl \quad \text{จะเป็นค่า mmf ของตัวโรเตอร์ ซึ่งเป็นสารแม่เหล็ก}$$

จะได้ $N_i = 2 \int_a^{a'} H \cdot dl + \text{mmf ในสารแม่เหล็ก}$
 จะได้ประมาณ $2 H g$

เมื่อ g เป็นช่องอากาศ ของเครื่องจักรไฟฟ้านั้นๆ

$$\int_a^{a'} H \cdot dl = H g \quad \text{จะได้ประมาณ } (1/2) N_i$$

ซึ่งทั้ง $\int_a^{a'} H \cdot dl$ หรือ $H g$ นี้เราเรียกว่า mmf ที่อยู่ที่จุด a ระหว่างช่องอากาศ g

2.1.1.3 เส้นแรงแม่เหล็ก

เส้นแรงแม่เหล็กเป็นปริมาณสเกลาร์ (scalar) ไม่มีทิศทางเราอาจหาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กได้จากนิยามของเส้นแรงแม่เหล็กเป็น Surface Integral ของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B กับพื้นที่ผิว A ซึ่งตั้งฉากกัน

$$\phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.6)$$

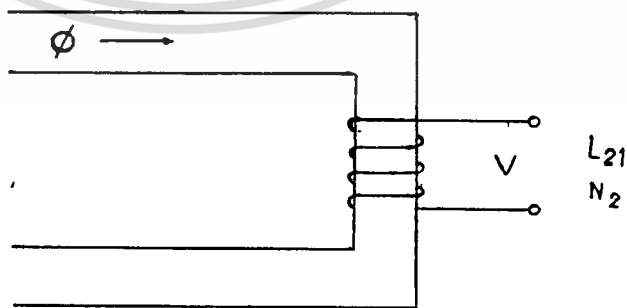
แต่โดยทั่วไปในการศึกษาทฤษฎีเครื่องจักรไฟฟ้าเราจะแสดงค่าของเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ในแนวเดียวกับแกนของค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B ถ้าค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B มีค่าสม่ำเสมอโดยตลอดแล้วเราสามารถหาค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ ได้โดยการคูณพื้นที่หน้าตัด A ที่ตั้งฉากกับค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B ในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดนั้น นั่นคือ

$$\phi = B A \quad (2.7)$$

เมื่อ ϕ เป็นเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเวเบอร์ (Wb)

2.1.1.4 คัดดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแส (Transformer Voltage)

สนามแม่เหล็กโดยทั่วไป เกิดขึ้นจากขดลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก และการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดคัตตาไฟฟ้าในขดลวดตัวนำอื่นต่อไป



รูป 2.6 คัดดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.6 ค่าศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสในขดลวดปฐมภูมิทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กภายในวงจรร ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดศักดาไฟฟ้าในขดลวดทุติยภูมิ

$$\begin{aligned} V &= d\psi / dt \\ &= N_2 d\phi / dt \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.1.2 การสูญเสียพลังงานภายในกรแม่เหล็ก

2.1.2.1 การสะสมพลังงานแม่เหล็ก

หลักการแปรรูปของพลังงานแม่เหล็กในวงจรรต่างๆ เราเริ่มพิจารณาจวงจรรตามรูป 2.7 โดยต้องการหาพลังงานที่สะสมในสนามแม่เหล็กอันเกิดขึ้นจากกระแส i ไหลเข้าสู่ขดลวดในวงจรรจำนวน N รอบ

เพราะฉะนั้นกำลัง (Power) ที่ปลายทั้งสองของขดลวดอันได้จากอัตราการไหลของพลังงานเข้าสู่จรรโดยผ่านขดลวด

$$P = i e \quad (2.9)$$

P มีหน่วยเป็นวัตต์ หรือ จูล/วินาที

e เป็นศักดาที่ให้แก่ขดลวด

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

$$\begin{aligned} W_{in} &= \int_{t_0}^t p dt \\ &= \int_{t_0}^t i e dt \end{aligned} \quad (2.10)$$

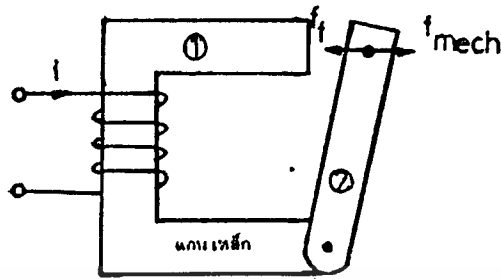
ค่าของศักดาไฟฟ้า e ในสมการ (2.10) สามารถแทนค่าได้จากศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานไฟฟ้าขดลวด และจากการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเส้นแรงที่เกี่ยวข้องอยู่

$$e = R i + d\psi / dt$$

∴ แทนค่า e ลงในสมการ (2.10) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.7 วงจรรีเลย์

$$\begin{aligned}
 W_{in} &= \int_0^t i (R i + d\psi / dt) dt \\
 &= \int_0^t (R i^2 + i d\psi / dt) dt \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

อนึ่งพลังงานความร้อนที่สูญเสียจากค่าความต้านทานของขดลวดเท่ากับ

$$W_r = \int_0^t R i^2 dt$$

เพราะฉะนั้น พลังงานที่ไหลเข้าสู่สนามแม่เหล็กจะมีค่า

$$\begin{aligned}
 W &= W_{in} - W_r \\
 &= \int_0^t (i d\psi / dt) dt \\
 &= \int_{\psi(0)}^{\psi(t)} i d\psi \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าพลังงานที่ไหลเข้าไปสู่สนามแม่เหล็ก จะมีค่าแปรโดยตรงกับค่าศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ e_{in} เมื่อ

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

จากสมการนี้ ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานถึงแม้ว่าจะมีกระแสไหลในขดลวด และมีศักดาไฟฟ้าคร่อมขดลวดนั้น นั่นคือจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานแม่เหล็กที่สะสมอยู่เลย นอกจากจะมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก และถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก พลังงานที่เปลี่ยนไปจะมีค่าแปรตามกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไป

เพราะฉะนั้นพลังงานแม่เหล็กสะสม W_f จะมีค่าจากสมการ (2.12)

เท่ากับ

$$W_f - W_{f(\infty)} = W = \int_{\psi(\infty)}^{\psi(t)} i \, d\psi \quad (2.13)$$

เมื่อ $W_{f(\infty)}$ เป็นพลังงานแม่เหล็กสะสม เมื่อเวลา $t=0$

$\psi(\infty)$ เป็นเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำ เมื่อเวลา $t=0$

ถ้าตอนเริ่มแรกยังไม่มีการสะสมพลังงานเข้าสู่สนามแม่เหล็กเลย (ก่อนเวลา $t=0$) ดังนั้นพลังงานสะสมเบื้องต้น $W_{f(\infty)}$ ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ และไม่มีการเกิดขึ้นเพราะฉะนั้นเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำต้องมีค่าเป็นศูนย์ด้วย กล่าวคือ

$$\psi_{(\infty)} = 0$$

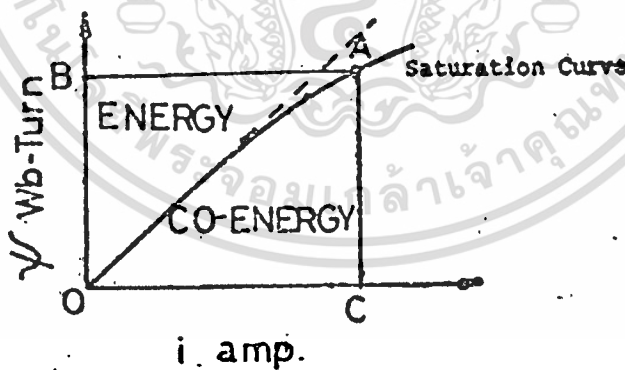
เพราะฉะนั้น พลังงานสะสมทั้งหมดของวงจรมแม่เหล็กที่เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำจะมีค่าเท่ากับ

$$W_f = \int_0^{\psi} i \, d\psi \quad (2.14)$$

การสะสมพลังงานแม่เหล็กในขดลวดซึ่งมีค่าเหนี่ยวนำคงที่ นั่นคือไม่มีการอ้อมตัวในสารแม่เหล็กนั้น จะมีค่าเท่ากับ

$$W_f = (1/2) L i^2$$

จะเห็นได้ว่าพลังงานสะสม มีค่าแปรตามกำลังสองของกระแสในขดลวดนั้น และแปรโดยตรงกับค่าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดนั้นด้วย



รูป 2.8 ENERGY และ CO.ENERGY

พลังงานอันเกิดจากสนามแม่เหล็กจะกระจายอยู่ที่บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กสำหรับกรณีสารแม่เหล็กที่ไม่มีการสูญเสีย และมีค่าซึมซาบของแม่เหล็กคงที่ ความหนาแน่นของพลังงานต่อหน่วยปริมาตรจะมีค่า

$$\begin{aligned}
W_f &= W_f / A_m L_m \\
&= (1/2) i N \phi / A_m L_m \\
&= (1/2) H B \\
&= (1/2) B^2 / \mu
\end{aligned}$$

เมื่อ W_f เป็นความหนาแน่นของพลังงานต่อปริมาตรมีหน่วยเป็นจูลต่อ-
ลบ. เมตร

H เป็นความเข้มสนามแม่เหล็กหน่วยเป็น แอมแปร์-เทอรันต่อเมตร

B เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็น เทสลา

μ เป็นความซึมซาบของสารแม่เหล็กหน่วยเป็น เฮนรี่ต่อเมตร

การหาค่าพลังงานที่สะสมอยู่ในสนามแม่เหล็ก ถ้าคำนึงการอิมิตัวของสารแม่เหล็กด้วยแล้วจะทำให้ยากมากเพราะ ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กค้ำอง ψ และกระแส i ไม่เป็นเส้นตรงการหาค่าพลังงานสะสมจะได้จากสมการ (2.24) จากรูป 2.8 จะเป็นพื้นที่ซึ่งเกิดจากการอินทิเกรต. กระแส i เมื่อเกี่ยวกับเส้นแรงแม่เหล็กค้ำอง ψ จะเป็นพื้นที่ OAB เมื่อ $\psi_{(0)} = 0$ และ $\psi_{(e)} = B$ ถ้าเราไม่คิดการสูญเสียจากฮิสเตอร์รีซิสพลังงานสะสมขณะเพิ่มเส้นแรงแรง สามารถคายกลับคืนได้ทั้งหมดเมื่อลดเส้นแรงแรง ψ ลงสู่สภาพเดิม $\psi_{(0)}$

เราอาจคำนวณหาค่าของแรงแรงทางกลศาสตร์ของวงจรรูป 2.7 ได้โดยอาศัยหลักแห่งการทรงจำนวนของพลังงาน พิจารณารูป 2.7 ถ้าเราเพิ่มพลังงานเข้าไปในวงจรรูปพลังงานไฟฟ้า พลังงานสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น และพลังงานกลศาสตร์ ตามลำดับ เพราะฉะนั้น

$$\left[\begin{array}{l} \text{พลังงานไฟฟ้า} \\ \text{ที่ใส่เพิ่มในวงจรร} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{พลังงานความร้อน} \\ \text{ที่สูญเสียไป} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{พลังงาน} \\ \text{กลศาสตร์} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{พลังงานที่สะสม} \\ \text{ไว้ในสนามแม่เหล็ก} \end{array} \right]$$

จากสมการ (2.12) ถ้าซ้ายมือของสมการนี้มีขนาดเท่ากับ

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

ดิฟเฟอเรนเชียลสมการนี้จะได้

$$dW = i d\psi = f_{m=cn} dX + dW_f \quad (2.15)$$

จากสมการ (2.15) ถ้ากรณีไม่มีส่วนใดเคลื่อนที่ $f_r = f_{m=cn}$, $dX = 0$

$$\therefore \text{จะได้ } dW_f = i d\psi$$

ถ้ากรณีค่าของเส้นแรงแม่เหล็กค้ำองเกี่ยวไม่เปลี่ยนแปลง, $d\psi = 0$ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานสะสมมาจาก พลังงานทางกลศาสตร์

$$dW_f = f_{m=cn} dX$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.15) เราสามารถเขียนได้เป็น

$$dW_f = i d\psi - f_{m=cn} dx \quad (2.16)$$

ซึ่งจากสมการนี้เราจะเห็นได้ว่า พลังงานแม่เหล็กสะสมในสนามแม่เหล็ก จะแปรตามตัวแปร 2 ตัว ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกันคือ ψ และ x : เราอาจเขียนรูปของ $dW_f(\psi, x)$ ในรูปของ partial derivative ได้เป็น

$$dW_f(\psi, x) = (\partial W_f / \partial \psi) \cdot d\psi + (\partial W_f / \partial x) \cdot dx \quad (2.17)$$

เทียบกับสมการ (2.16) เราจะได้

$$i = \partial W_f / \partial \psi (\psi, x) \quad (2.18)$$

และ $f_{m=cn} = - \partial W_f / \partial x (\psi, x) \quad (2.19)$

จากสมการ (2.18) และ (2.19) ทำให้เราสามารถคำนวณหาค่ากระแส และค่าแรงงานที่กระทำภายในวงจรมอเตอร์ได้อีกวิธีหนึ่ง

แรงที่กระทำ $f_{m=cn}$ ที่ได้จะเป็นในรูปฟังก์ชันของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้อยในบางกรณีเราไม่สามารถหาจาก $\partial W_f / \partial x (\psi, x)$ ได้อย่างง่ายๆ จึงจำเป็นต้องหาแรงที่กระทำในรูปของฟังก์ชันอื่น กล่าวคือในรูปของกระแสในวงจรมอเตอร์ ดังนั้นเราจึงกำหนดค่าพลังงานเทียบ (Co-Energy) ในรูปของฟังก์ชันของกระแส โดยจากรูป 2.8 พลังงานเทียบกำหนดโดย

$$W_f = \int_{i(0)}^{i(t)} \psi di \quad (2.20)$$

จากรูป 2.8 และสมการ (2.20) พลังงานเทียบ W_f' อันเป็นพื้นที่อันเกิดจากการอินทิเกรตเส้นแรงแม่เหล็ก ψ เมื่อเทียบกับกระแส i จะเป็นพื้นที่ OCA เมื่อ $i(0) = 0$ และ $i(t) = c$ จากรูป 2.8 เราจะเห็นได้ว่า พลังงานสะสมในสนามแม่เหล็ก รวมกับพลังงานเทียบจะเป็นพื้นที่ OBAC หรือมีค่าเท่ากับผลคูณของ ψ และ i นั่นคือ

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

ดังนั้น

$$W_f'(i, x) = i\psi - W_f(\psi, x) \quad (2.21)$$

ทำการดิฟเฟอเรนเชียลฟังก์ชัน (2.21) จะได้

$$dW_f'(i, x) = i d\psi + \psi di - dW_f(\psi, x) \quad (2.22)$$

แทนค่า $dW_f(\psi, x)$ จากสมการ (2.16) ลงใน (2.22) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dW_f'(i, X) = \psi di + f_{max} dx \quad (2.23)$$

ในทำนองเดียวกันกับสมการ (2.16) และ (2.17) เราจะได้

$$dW_f'(i, X) = (\partial W_f' / \partial i) di + (\partial W_f' / \partial X) dx \quad (2.24)$$

ซึ่งจะได้ค่า

$$= W_f' / i (i, X) \quad (2.25)$$

$$\text{และ} \quad f_{max} = + \partial W_f'(i, X) / \partial X \quad (2.26)$$

จากสมการ (2.16) เราสามารถคำนวณหาแรงทางกลศาสตร์ เมื่อทราบค่าพลังงานเทียบเป็นฟังก์ชันของ i และ X ได้อีกการหนึ่ง

2.1.2.2 การสูญเสียภายในแกนเหล็ก

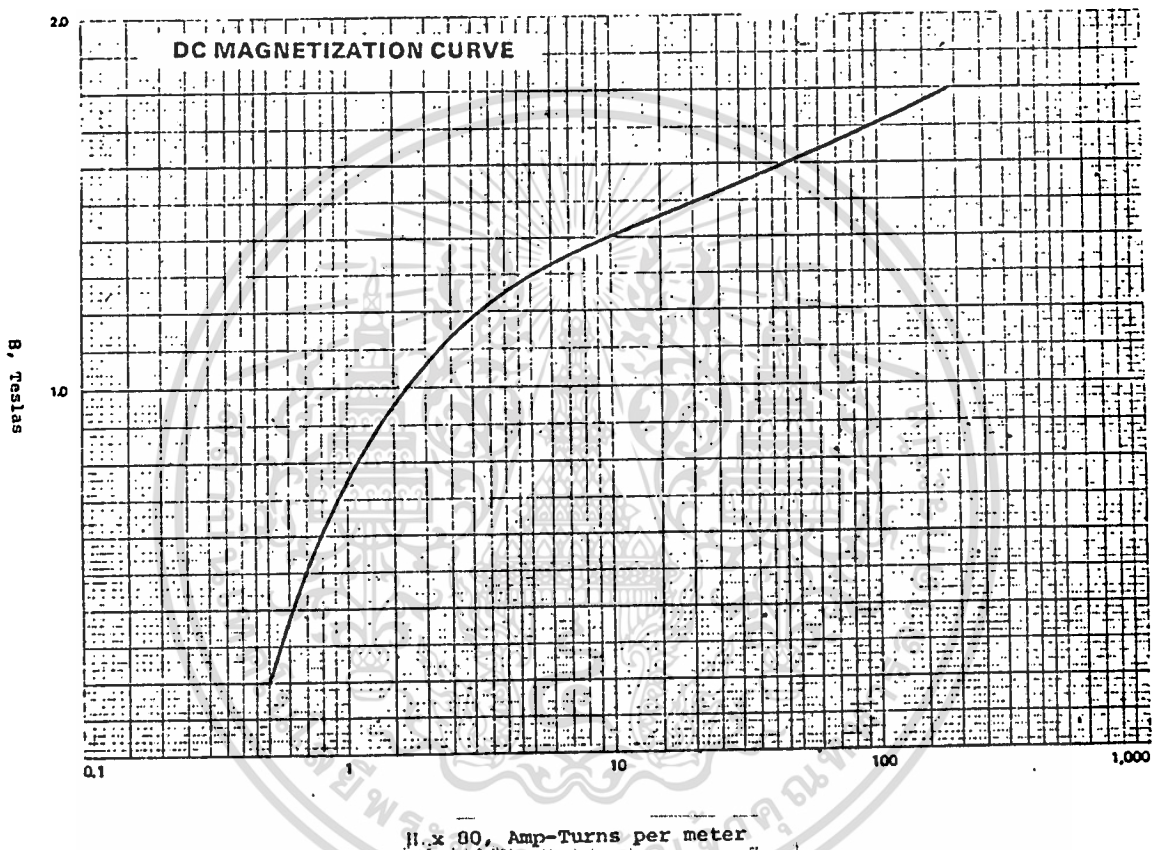
ก. การออกแบบวงจรโดยทั่วไป

การสูญเสียภายในแกนเหล็กของเครื่องจักรไฟฟ้าทุกชนิด พลังงานที่สูญเสียไปจะถูกจ่ายทิ้งออกมาเป็นรูปของพลังงานความร้อน สารแม่เหล็กที่ใช้ทำเครื่องจักรไฟฟ้าจึงพยายามทำให้มีคุณสมบัติในการสูญเสียในแกนให้น้อยที่สุดโดยมีคุณสมบัติในการซึมซาบแม่เหล็ก (μ_r) สูง แต่อย่างไรก็ดีความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ดังแสดงในหัวข้อ 2.1 ไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นค่าของความซึมซาบแม่เหล็กจึงไม่คงที่การที่จะกำหนดคุณสมบัติของสารแม่เหล็กแต่ละชนิดลงไปเพื่อการออกแบบคำนวณ จึงจำเป็นต้องอาศัยเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรค่าต่างๆ เช่น ความหนาของแผ่นแกน ความถี่ ชนิดของสาร และแนวของการรีดแผ่นเหล็ก เป็นต้น ตาราง 2.2 แสดงตัวอย่างค่าการสูญเสียภายในแกนเหล็ก (p) ของเหล็กแผ่นซิลิกอนขนาดความหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร ของบริษัทผู้ผลิตต่างๆกัน ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 1 เทสลา

ในการเลือกใช้สารแม่เหล็กทำเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ การออกแบบคำนวณจึงต้องคำนึงถึงคุณสมบัติต่างๆ ของสารแม่เหล็กที่นำมาใช้ด้วย เพราะค่าการสูญเสียในแกนเหล็กลดลง หมายถึง ถึงการประหยัดเนื้อสารแม่เหล็กที่นำมาใช้ทำเครื่องจักรลง เมื่อขนาดหน้าตัดของวงจรลดลงจะหมายความรวมถึงการประหยัดเนื้อสารตัวนำไฟฟ้า กรอบโครงสร้างลง ลดน้ำหนัก ลดค่าใช้จ่าย ลดปริมาตรต่อหน่วยกำลังที่ได้ของเครื่องจักร ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรให้ดียิ่งขึ้นการวัดคุณสมบัติของแม่เหล็กพื้นฐานอย่างแรกคือ การวัดความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ในรูปของการเหนี่ยวนำด้วยไฟกระแสสลับ หรือวงของฮิสเตอร์รีซิส อันได้จะอธิบายวิธีการต่อไป ในข้อ ข. ที่จุดปลายของฮิสเตอร์รีซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ที่ค่าของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่างๆ กับเมื่อนำมาวาดเป็นกราฟจะได้กราฟที่เรียกว่า เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็กซึ่งค่าของเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็กนี้ได้แสดงไว้ในรูป 2.9 ซึ่งเป็นลักษณะของเหล็กแผ่นซิลิกอนขนาด 0.5 มิลลิเมตร กราฟเหล่านี้จะช่วยในการคำนวณวงจรแม่เหล็กอย่างละเอียด และใช้สำหรับหาค่ากระแสสูงสุด (peak current) ในวงจรกระแสสลับด้วย



รูปที่ 2.9 เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็กของเหล็กแผ่นซิลิกอน L 63, L 68, L 75

การสูญเสียภายในแกนเหล็กของสารแม่เหล็ก เป็นการสูญเสียออกมาระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กภายในเวลาแต่ละรอบ อันแบ่งออกได้เป็นสองรูป คือ การสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส และการสูญเสียจากกระแสไหลวนในตัวสารแม่เหล็กเอง การสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารแม่เหล็กที่ใช้ต่างๆ กล่าวคือ ส่วนผลสมอัตราส่วนของซิลิกอน ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ความหนาของแผ่นเหล็ก กรรมวิธีการผลิต และค่าสูงสุดของอัตราความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ ดังนั้นเมื่อผลิตสารแม่เหล็กออกใช้แล้ว แต่ละอย่างจะมีค่าอันคงที่มีค่าเปลี่ยนแปลงได้ คือค่าของความถี่ที่จะนำไปใช้ และค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก B ที่ใช้

คุณสมบัติของสารแม่เหล็กเมื่อใช้กับไฟกระแสสลับอีกประการหนึ่ง อาจใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารหนึ่งซึ่งมีลิขสิทธิ์หรือสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญา ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า rms volt- Ampere per Kilogram (Pa) ของสารเป็นฟังก์ชันของค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B หรือค่าความสัมพันธ์ระหว่าง rms Amperes - Turn per meter (H_{rms}) ของสารเป็นฟังก์ชันของค่าความหนาแน่นของเส้นแม่เหล็ก B เพื่อช่วยในการคำนวณวงจรแม่เหล็กอย่างละเอียด

โดยทั่วไปในวงจรแม่เหล็กต่างๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า รีแอกเตอร์ ตลอดไปจนถึงวงจรแม่เหล็กของเครื่องจักรไฟฟ้าหมุนชนิดต่างๆ วงจรแม่เหล็กที่ถูกคำนวณออกแบบมีความเข้มสนามแม่เหล็กเท่ากันโดยตลอด ค่าของผลคูณ rms Volt- Amperes สำหรับสารนี้ จะเป็นผลคูณของสาร Pa กับน้ำหนักของสารแม่เหล็กนั้น เราสามารถพิจารณาหาค่า Pa ในสารแม่เหล็กโดยอาศัยวงจรแม่เหล็กเบื้องต้นจากรูป 2.3

กำหนดศักดาไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ f เข้าสู่วงจรมีค่าเท่ากับ v

$$v = \sqrt{2} V \sin 2\pi t \quad (2.37)$$

เมื่อ V เป็น rms ของศักดาไฟฟ้า หน่วยเป็นโวลท์
 f เป็นค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้า หน่วยเป็นเฮิรตซ์
 t เป็นเวลา หน่วยเป็นวินาที

ค่าของเส้นแรงแม่เหล็กภายในวงจรได้จากสูตร

$$v = N d\phi / dt$$

$$\phi = (1/N) \int v dt$$

ค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กได้จาก

$$\begin{aligned} B &= \phi / A \\ &= (1/NA) \int v dt \end{aligned} \quad (2.38)$$

เมื่อ N เป็นจำนวนรอบของขดลวดภายในวงจรแม่เหล็ก

A เป็นพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของวงแม่เหล็ก

แทนค่า v ลงในสมการ (2.38)

$$\begin{aligned} B &= -(\sqrt{2} V / NA 2\pi f) \cos 2\pi ft \\ &= -B_{max} \cos 2\pi ft \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } B_{max} &= \sqrt{2} V / NA 2\pi f \\ &= V / 4.44 N Af \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_{rms} กับ B_{max} เท่ากับ

$$V_{rms} = 4.44 B_{max} ANf \quad (2.40)$$

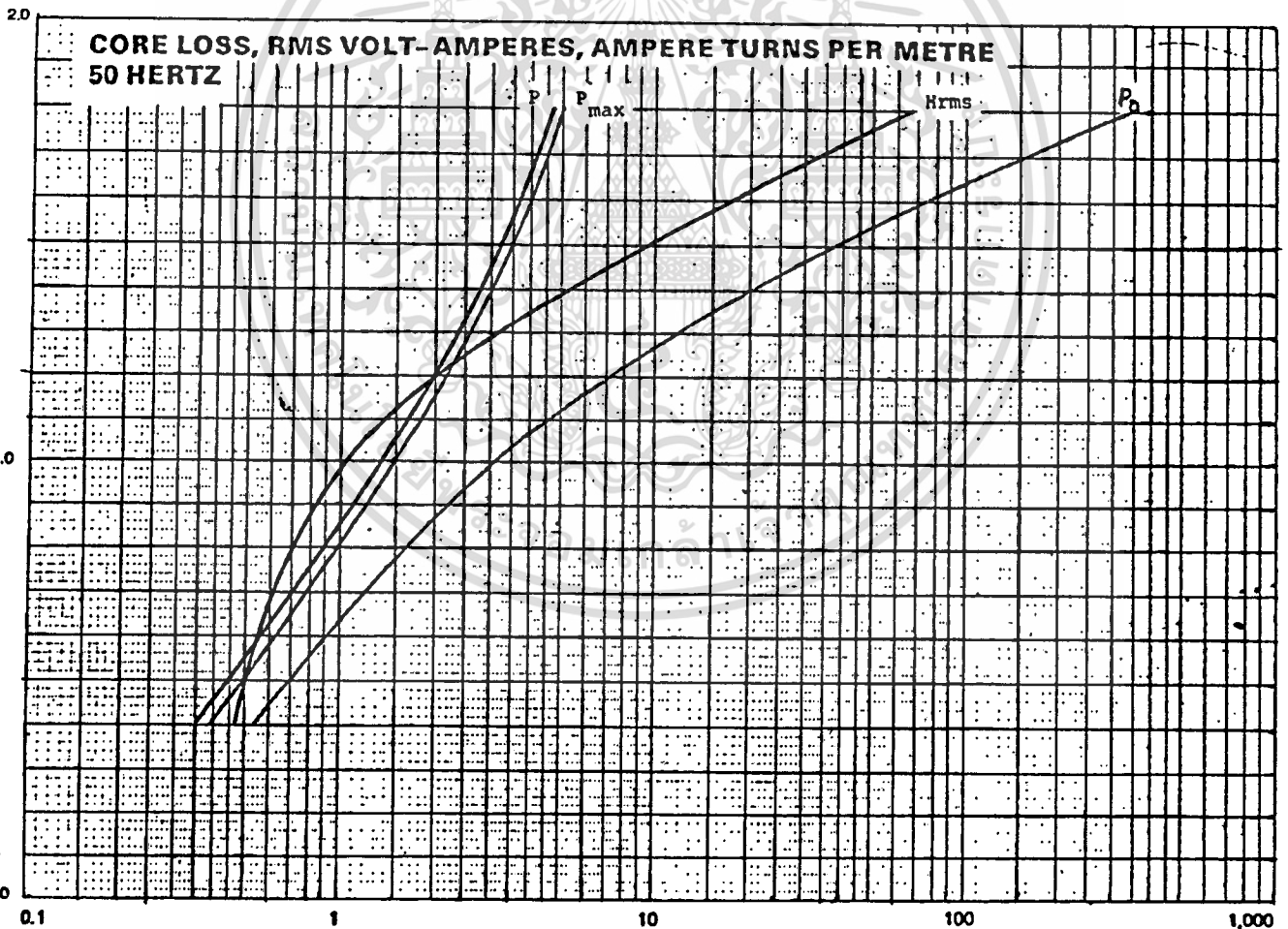
โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นเมื่อ B เป็นฟังก์ชัน Sinusoidal, H จะไม่เป็นฟังก์ชันตาม B นั่นคือ Non-Sinusoidal เรากำหนดค่านิยามค่า H_{rms} จากค่าของกระแส I_{rms} ได้ดังนี้

$$H_{rms} = NI_{rms} / l \quad (2.41)$$

ซึ่งค่า H_{rms} นี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็ก ดังได้แสดงความสัมพันธ์ไว้ในรูป 2.10

จากสมการ 2.41 เราสามารถหาค่า I_{rms} ได้ในรูปของ H_{rms} และตัวแปรอื่นๆ ดังนั้น ค่าผลคูณของ V_{rms} และ I_{rms} ของวงจร 2.3 ซึ่งเห็นยวนำค่าความเข้มจนถึงค่า B_{max} ได้ค่าดังนี้

$$V_{rms} I_{rms} = 4.44 f (B_{max} H_{rms}) Al \quad (2.42)$$



P Core loss, Watts per Kg.; P_{max} Maximum Core loss, Watts per Kg.

$H_{rms} \times 100$, Rms Amp - Turn per meter; P_n Rms Volt - Amp. per Kg.

รูปที่ 2.10 การสูญเสียภายในแกนเหล็กแผ่นซิลิกอน L 63 ที่ความถี่ 50 H_z

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. การสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss)

จากสมการ (2.22) พลังงานที่สะสมอยู่ในสนามแม่เหล็ก มีค่าเท่ากับ

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

ซึ่งสามารถเทียบเป็นตัวแปรของ H และ B ได้ดังนี้

$$i = Hl/N$$

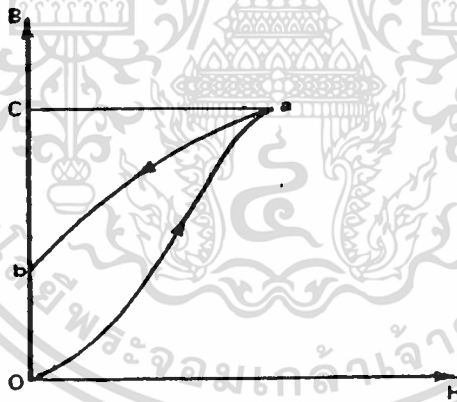
$$\phi = BA$$

$$N \, d\phi = NA \, dB$$

$$W_r = \int_{B_1}^{B_2} A l H \, dB$$

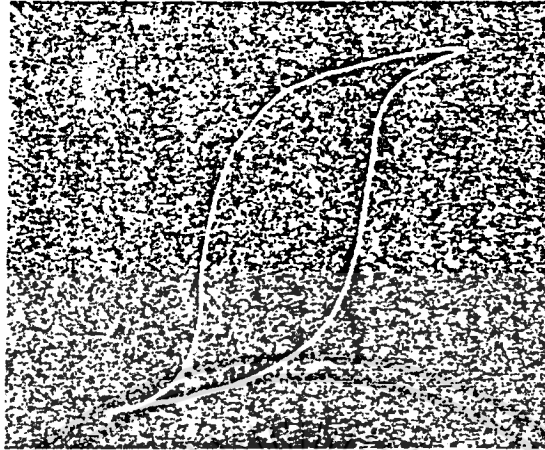
$$W_r = A l \int_{B_1}^{B_2} H \, dB \quad (2.22a)$$

ค่าของ A l เป็นค่าของปริมาตรของวงจรมแม่เหล็ก เพราะฉะนั้นค่า $\int H \, dB$ เป็นค่าของความหนาแน่นของพลังงานที่สะสมต่อหน่วยปริมาตร



รูปที่ 2.11 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ในวงจรมแม่เหล็ก

ถ้าวงจรมแม่เหล็กประกอบขึ้นจากสารแม่เหล็ก โดยทั่วไปความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรงขณะเราเพิ่มสนามแม่เหล็กขึ้น ดังเส้นกราฟ oa ของรูป 2.11 และผลของการอินทิเกรตในสมการ 2.22a จะแสดงถึงพื้นที่ที่เกิดจาก obco อันเป็นพลังงานที่สะสมขณะเพิ่มสนามแม่เหล็กขึ้น ขณะลดสนามแม่เหล็กลงตามเส้น ab จะคายพลังงานออกเท่ากับพื้นที่ที่เกิดจาก abca ซึ่งไม่ทับกับเส้น oa เดิม ทั้งนี้มีพลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปในรูปพลังงานความร้อนเท่ากับพื้นที่ obco เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปี 20-21 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ถ่ายจาก CRO แสดง Hysteresis loop ของเหล็ก Z 10
 ที่ได้จากการทดลองขณะ $B_{max} = 1.2$ เทสลา

เมื่อวงจรแม่เหล็กถูกเพิ่ม และลดสนามแม่เหล็กจาก B ไปเป็น $-B$ แล้วกลับไปกลับมาพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของความร้อนจากฮิสเทอริซิส จะเท่ากับพื้นที่ภายในรูปเหมือนดังแสดงไว้ในรูป 2.12 และค่าของจุดที่ความเข้มสนามแม่เหล็ก H เท่ากับศูนย์จะยังมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเหลืออยู่ เราเรียกค่านี้ว่า B_r หรือ residual induction และเมื่อเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก H ในทางลบจนกระทั่งค่า B เท่ากับศูนย์ ค่า H ที่ได้เราเรียกว่า H_c หรือ coercive force

ในการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำวงจรให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในแต่ละรอบการสูญเสียภายในแกนเหล็กอันเกิดจากฮิสเทอริซิส จะเท่ากับพื้นที่ภายในรูปนั้นซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าของ B และชนิดของสารแม่เหล็ก ดังนั้น ค่าของการสูญเสียจากฮิสเทอริซิสของสารแม่เหล็ก ที่ความถี่ f จะมีค่าเท่ากับ

$$P_h = K_h f (B_{max})^x$$

- เมื่อ
- P_h เป็นการสูญเสียจากฮิสเทอริซิสมีหน่วยเป็นวัตต์
 - K_h เป็นค่าคงตัวของวงจรแม่เหล็กที่ทำการทดลอง
 - f เป็นค่าความถี่ มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์
 - B_{max} เป็นค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด มีหน่วยเป็น เทสลา

x เรียกว่าค่า Steinmetz's Index จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 แล้วแต่ชนิดของสารแม่เหล็ก และค่า x นี้ของสารแม่เหล็กชนิดเดียวกัน จะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆในค่า B ที่ไม่เท่ากัน ตัวอย่างเช่นเหล็กชนิด Z10 ของประเทศญี่ปุ่นได้กำหนดทดลองหาค่า X จะได้ค่าอยู่ระหว่าง 2 ขณะที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กต่ำไปจนถึง 1.1 ขณะที่มีความเข้มถึงจุดอิ่มตัวแม่เหล็กโดยทั่วไปค่า x จะใช้ค่าเท่ากับ 1.6 โดยประมาณ

ค. การสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

การสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กนี้ เกิดขึ้นจากค่าสูญเสีย $i^2 R$ อันเกิดจากกระแสทุติยภูมิภายในสารแม่เหล็กเอง เมื่อถูกเหนี่ยวนำของวงจรวัดไฟฟ้ากระแสสลับจากขดลวดปฐมภูมิ เราพิจารณาวงจรแม่เหล็กในรูป 2.3 วาดรูปภาคตัดขวางของวงจรมัดเป็น รูป 2.13

รูป 2.13 ภาคตัดขวางของวงจรวัด Reactor core ในรูป 2.3



ในรูป 2.13 เมื่อเราป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่วงจรมัดก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้นภายในแกนเหล็กจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กนั้น ซึ่งค่าเส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ตามค่าของความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่วงจรมัดปฐมภูมิ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นในแกนตัวนำ สมมุติรูป (ก) โดยใช้แทนเป็นแท่งเหล็กตันตลอดไม่ซ้อนแผ่นค้ำค้ำไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจรมัดแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับ

$$e = d\phi / dt$$

และค่าความต้านทานของแท่งเหล็กตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 22-ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = 1 / \sigma A$$

∴ ค่าการสูญเสีย $i^2 R$ ในวงจรนี้จะมีค่าเท่ากับ $= e^2 / R$ ถ้าเราพิจารณา โดยรูป (ข) ใช้แผ่นเหล็กเรียงเข้าช่องแผ่นแทนที่จะเป็นแผ่นเหล็กตัน ดังนั้นค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแต่ละแผ่นจะมีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าเดิมนั่นคือ $\phi / 2$ ดังนั้น คัดดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละแผ่นจะมีค่าเท่ากับ

$$d(\phi / 2) / dt = e / 2$$

พื้นที่นำไฟฟ้าเฉลี่ยของแต่ละแผ่นลดลงครึ่งหนึ่งดังนั้นค่าของความต้านทานไฟฟ้าในแต่ละแผ่นจะเพิ่มขึ้นอีกเท่าหนึ่งคือ

$$R' = 1 / (\sigma A / 2) = 2 (1 / \sigma A) = 2 R$$

ดังนั้นค่าการสูญเสีย $i^2 R$ ในแต่ละแผ่นเท่ากับ $= (e/2)^2 / 2 R$

∴ ค่าการสูญเสียรวมทั้ง 2 แผ่นเท่ากับ $= e^2 / 8 R$

พิจารณาถึงรูป (ค) โดยใช้แผ่นเหล็กเรียง 3 แผ่น จะได้ค่าการสูญเสียทั้งหมดจาก $i^2 R$

$$\text{เท่ากับ} = e^2 / 9 R$$

ถ้าใช้ n แผ่นเรียง ค่าการสูญเสีย $i^2 R$ จะมีค่าเท่ากับ

$$= e^2 / n^2 R$$

เมื่อ e^2 / R เป็นค่าการสูญเสียที่ใช้แท่งสารแม่เหล็กตัน โดยไม่เรียงแผ่น

จากการพิจารณานี้จะเห็นได้ว่าการเรียงแผ่นซ้อน ในวงจรแม่เหล็กจะสามารถลดค่าการสูญเสียจากกระแสไหลวนในวงจรได้ ดังนั้นในการทำเหล็กแผ่นสร้างเครื่องจักรจึงนิยมทำเป็นแผ่นบางเรียงซ้อนกัน โดยแต่ละแผ่นจะใช้สารเคลือบผิวที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูง เช่นอาบด้วยวานิช อาจเป็นชั้นเดียวสองชั้น หรือสามชั้น หรืออาบด้วยฉนวนอื่น ซึ่งสามารถทนความร้อนเวลาที่นำมาอบลดความเค้นได้

พิจารณาลักษณะของการสูญเสียชนิดนี้ จะเห็นได้ว่าขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของแผ่นแม่เหล็กและค่าการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ถ้าขดลวดปฐมภูมิมีไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ f เฮิ ก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กมีความถี่ f เกิดขึ้นด้วยให้ค่าเส้นแรงแม่เหล็ก $\phi(t)$ มีขนาดเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ดังนั้น ค่าศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเนื้อเหล็ก จะแปรตามค่า ϕ_{max} และค่า ω นั่นคือ

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

เมื่อ $\omega = 2\pi f$

ดังนั้น ค่าการสูญเสียภายในวงจรอันเกิดจากกระแสไหลวนจะแปรตามกำลังสองของ e ดังนั้น

$$P_w \propto (\phi_{max})^2 f^2$$

เราสามารถเขียนเป็นสูตรได้โดยสมมติค่าคงตัวในสารแต่ละชนิด และในวงจร แต่ขนาดได้ดังนี้

$$P_w = K_e f^2 (B_{max})^2$$

เมื่อ P_w เป็นการสูญเสียในวงจรอันเกิดจากกระแสไหลวนมีหน่วยเป็นวัตต์

จากสมการ (2.44) และ (2.45) ค่าการสูญเสียภายในแกนเหล็กรวม P จะเท่ากับ

$$P = P_h + P_w$$

$$P = K_h f B_{max} + K_e f^2 (B_{max})^2 \quad (2.46)$$

การหาค่าของการสูญเสียภายในแกนเหล็กโดยแยกค่าเป็น จากอิทเทอร์รีซีลกับกระแสไหลวนอาจทำได้โดยการอ่านค่า P และคำนวณค่า P_h จากพื้นที่รูปกราฟ แล้วค้นหาค่า P_w ได้หรือในบางครั้งเราสามารถแยกอัตราส่วนการสูญเสียทั้งสองจากการสูญเสียรวม โดยอาศัยสมการ (2.46) โดยตรง โดยทำการทดสอบสารแม่เหล็กที่ใช้หาค่า P ที่จุด P_{max} เท่ากัน ที่ความถี่ต่างๆ กัน จากสมการ (2.46) จะได้

$$P/f = a + b f \quad (2.46a)$$

เมื่อ $a = K_h (B_{max})^2$ ซึ่งเป็นค่าคงตัว

$b = K_e (B_{max})^2$ ซึ่งเป็นค่าคงตัว

ซึ่งสมการ (2.46a) เมื่อนำมาวาดกราฟของ P/f กับ f จะได้สมการเส้นตรงโดยค่าจุดตัดแกน P/f เท่ากับ a และค่าของสโลปของเส้นเท่ากับ b ซึ่งจะนำมาแยกหาค่าของการสูญเสียทั้งสองได้

ตาราง 2.2: เหล็กแผ่นรีดก่อนมาตรฐานเปรียบเทียบ
 P_{max} ที่ 1 TESLAS, ความถี่ 50 Hz, ความหนา 0.5 mm

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

1. กัลป์ของแกนแผ่นความหนา 0.42 mm และ 0.63 mm

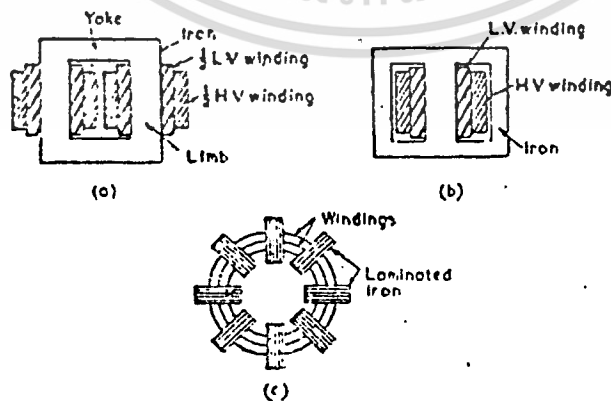
2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

2.2.1 โครงสร้าง

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบธรรมดาที่ใช้กันอยู่ทั่วไปนั้น เป็นแบบที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ (constant-potential transformer) มีขดลวดพันอยู่รอบๆ แกนเหล็กสองชุด โดยแต่ละชุดอาจจะมีจำนวนรอบเท่ากัน หรือไม่เท่ากันก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการนำไปใช้งาน แกนเหล็กนั้นเป็นแผ่นเหล็กบางๆ ที่แต่ละแผ่นถูกเคลือบไว้ด้วยสารบางอย่างที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสีย (loss) ภายในแกนเหล็กอันเนื่องมาจากผลการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า หม้อแปลงที่ใช้ปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีอยู่ทั่วไปมี 2 ชนิด คือ แบบแรกนั้นใช้สำหรับเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำให้กลายเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงเรียกว่า " step-up transformer " ส่วนอีกแบบหนึ่งนั้นใช้เปลี่ยนจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงให้ลดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำเรียกว่า " step-down transformer " ขดลวดที่รับกำลังไฟฟ้าเข้าไปเรียกว่าขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) ขดลวดที่จ่ายกำลังไฟออกมาเรียกว่าขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding)

หม้อแปลงไฟฟ้าแบ่งเป็นชนิดใหญ่ๆ ได้ 3 ชนิด โดยพิจารณาจากลักษณะของการวาง หรือการจัดรูปของแกนเหล็ก แบ่งได้ดังนี้คือ

1. "Core type" เป็นแบบที่มีวงจรมแม่เหล็กวงจรมเดียว
2. "Shell type" เป็นแบบที่มีวงจรมแม่เหล็ก 2 วงจรม
3. "Berry type" เป็นแบบที่มีวงจรมแม่เหล็กกระจาย (distributed) ออกไปโดยรอบ ทั้ง 3 แบบนี้ได้แสดงไว้ดังรูป 2.14 (a, b และ c)



รูปที่ 2.14 การแบ่งชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามลักษณะการวางแกนเหล็ก (core)

a) Core Type b) Shell Type c) Berry Type

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

แบบ core type (รูป 2.14a) นั้นครึ่งหนึ่งของขดลวดทาง primary และ secondary พันไว้รอบขาแต่ละข้างของแกนเหล็ก การพันแบบนี้ทำให้ลดการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก (flux leakage) ที่เกิดจากขดลวดทั้งสองลงไป ซึ่งทำให้ได้เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อง (linkage flux or mutual-flux) ขดลวดทั้งสองมากยิ่งขึ้น แต่ถ้าพันขด primary และ secondary แยกกันไว้บนขาของแกนเหล็กแต่ละข้างแล้วจะทำให้เกิดการรั่วไหลของ flux มากยิ่งขึ้น (รูป 2.17) ซึ่งมีผลต่อการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างจริงจัง (seriously) ปกติแล้วแบบ core type นี้มักใช้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่

แบบ Shell type (รูป 2.14b) นี้มีขดลวดทั้ง primary และ secondary พันไว้ที่แกนกลางของเหล็ก ส่วนที่เหลือของแกนเหล็กอีก 2 ขานั้นก็ทำหน้าที่เป็น low-reluctance flux path นั้นเอง

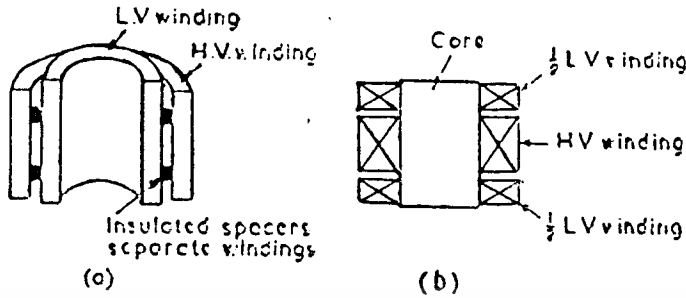
สำหรับแบบ Berry type (รูป 2.14c) นั้นมีแกนเหล็กวางอยู่เป็นวงรอบขดลวด แกนเหล็กนี้จำเป็นที่จะต้องมีการสร้างเป็นแบบ shell โดยที่แกนเหล็กกระจายออกไปรอบๆขดลวดเหล่านั้น แบบนี้เป็นแบบที่ไม่นิยม เพราะมีการสร้างยุ่งยาก

2.2.2 การพันขดลวด

การพันขดลวดของหม้อแปลงแบ่งได้ 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1. แบบ concentric ที่เป็นรูปทรงกระบอก (concentric-cylinder) รูป 2.15 (a) แบบนี้มีขดลวดแรงต่ำอยู่ภายใน ทั้งนี้เนื่องจากการทำฉนวนหุ้มเส้นลวดที่ใช้ทำขดลวดนั่นเอง ลวดที่ใช้ในการทำ coil นั้นเป็นทองแดงที่หุ้มฉนวน ฉนวนนี้อาจมีรอยขีดข่วนอันเนื่องมาจากการใส่ winding เข้าไปใน core ฉะนั้นเมื่อให้ด้านแรงต่ำ (L.V. side = Low voltage-side) อยู่ข้างในจึงปลอดภัยกว่าและยังระบายความร้อนได้ดีกว่าอีกด้วย

2. แบบประกบซ้อนกัน (sandwich) แบบนี้ (รูป 2.15b) ช่วยในการลดเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหล (leakage flux) ให้ลดลงไป ขดลวดแรงต่ำแบ่งเป็น 2 ส่วนแต่ละครึ่งของขดแรงต่ำนั้นประกบหัวท้ายของขดลวดแรงสูง (รูป 2.15b) ขดลวดที่ใช้ทั้งแรงสูง และแรงต่ำนั้นส่วนใหญ่เป็นขดลวดทองแดงที่อาบน้ำยาวานิช (varnish) ซึ่งเป็นฉนวนและมีเส้นด้าย (cotton) พันรอบๆทองแดงอีกทีหนึ่ง



รูปที่ 2.15 แบบของการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

- a). แบบ Concentric
- b). แบบ Sandwich

2.3 ทฤษฎีและหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า

(Transformer Theory and Principle)

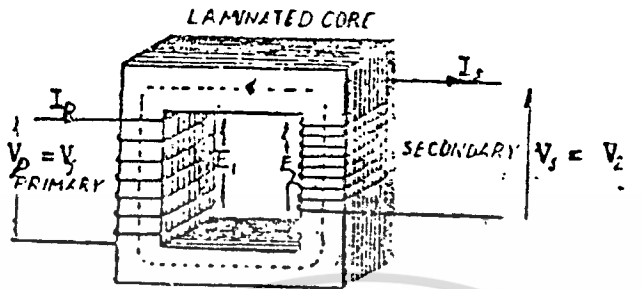
2.3.1 หลักการของหม้อแปลง (Transformer's Principle)

หม้อแปลงประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดที่พันอยู่บนแกนเหล็ก (รูป 2.16) ชุดที่ต่อไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเรียกว่าชุดปฐมภูมิ (primary winding) โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมอยู่ V_p (V_1) volts อีกชุดหนึ่งที่ต่อไปยังภาระทางไฟฟ้า (load) เรียกว่าชุดทุติยภูมิ (secondary winding) โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่ load เป็น V_s (V_2) volts จำนวนของขดลวดทาง primary และ secondary มีจำนวนรอบเป็น N_p (N_1) และ N_s (N_2) ตามลำดับ ด้านที่รับกำลังไฟฟ้าอาจจะเป็นด้านแรงต่ำหรือแรงสูงก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_p volts เข้าไปที่ขด primary (pri.) จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_s ทางด้าน secondary (sec.) (รูป 2.16) ขึ้นถึงแม้ว่าจะไม่มี load มาต่อก็ตาม ในกรณีเช่นนี้

$$V_p = E_1 = V_1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
-28-
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 หลักการเบื้องต้นของหม้อแปลง

2.3.2 อัตราส่วนของแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า

(Voltage and Current Ratio)

จากรูป (2.16) เมื่อมี load มาต่อทางด้าน sec. ทำให้เกิดกระแส I_s ไหลอยู่ทาง sec. และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคล่อม load $= V_s$ ($V_s \neq E_2$) ส่วนทางด้าน pri. นั้นก็มีกระแส I_p และแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_p ออกมาจาก source เมื่อทำการสังเกตต่อไปก็พบว่าอัตราส่วน V_p/V_s นั้นมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนของ N_p/N_s และมีค่าใกล้เคียงกับส่วนกลับของอัตราส่วน I_p/I_s นั่นก็คือ $V_p I_p$ มีค่าใกล้เคียงกับ $V_s I_s$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของ I_s เกิดขึ้นทาง sec. นั้นมีผลทำให้ I_p เปลี่ยนแปรด้วย นั่นคือ

$$V_p I_p = V_s I_s$$

เส้นแรงส่วนใหญ่ (ϕ) นี้เคลื่อน (link) ขดลวดของ pri. และ sec. ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นทั้ง 2 ขด (E_1 และ E_2) ซึ่งค่าของแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้เป็นสัดส่วนกับจำนวนรอบของขดลวดแต่ละขด ซึ่งได้จากความสัมพันธ์ตามกฎของการเหนี่ยวนำดังสมการ (2.47)

$$e = N d\phi / dt \quad (2.47)$$

เมื่อ e = แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นในขณะใดขณะหนึ่ง

N = จำนวนรอบของขดลวดที่ได้รับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยเวลา

$d\phi / dt$ = อัตราเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยเวลา

นั่นคือ $E_1/E_2 = N_p/N_s = a$ = อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของ-

หม้อแปลง (Transformation Ratio) (2.48)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ E_1 และ E_2 คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวด pri. และ sec. ตามลำดับ N_p กับ N_s ก็คือจำนวนรอบของขดลวดทาง pri. และ sec. เช่นกัน สำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วของ pri. และ sec. ทั้ง 2 ข้างนั้นแตกต่างจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ฉะนั้นจึงไม่ทำให้ vector ของ V_p และ V_s มีมุมแตกต่างไปจาก vector ของ E_1 และ E_2 มากนัก ดังนั้น ถ้าหากจะพิจารณาว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว (terminal voltage) นั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนขดลวดของแต่ละด้านโดยประมาณแล้ว ก็จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (2.49)

$$V_p / V_s = N_p / N_s = \text{Transformation ratio} \quad (2.49)$$

ถ้าหากว่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากภายในหม้อแปลงนั้นมีเป็นจำนวนเล็กน้อย ก็ตัดค่าที่เสียนั้นทิ้งไป นั่นก็คืออาจพิจารณาได้ว่ากำลังที่ได้รับ (power-output) กับกำลังที่ใส่เข้าไป (power input) มีค่าเท่ากัน นั่นก็คือ

$$V_p I_p \cos \phi_p = V_s I_s \cos \phi_s \quad (2.50)$$

ค่า $\cos \phi$ นั้นหาได้จากชนิดของ load แต่เนื่องจากว่า power factor ของทาง pri. และ sec. มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า

$$V_p I_p = V_s I_s \quad (2.51)$$

$$\text{หรือ } V_p / V_s = I_s / I_p = N_p / N_s \quad (2.52)$$

จาก (2.51) ได้

$$I_p N_p = I_s N_s \quad (2.53)$$

หม้อแปลงนี้จะทำหน้าที่ต่อเมื่อไฟที่ใส่เข้าไปทางด้าน pri. นั้นเป็นไฟสลับหรือไฟที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นจังหวะๆ (pulse) ถ้าเป็นไฟตรงก็เป็นแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงการกระเพื่อมขึ้นลง (fluctuating) หรือมีฉะนั้นก็มีการเปิดปิดไฟตรงด้วยอัตราเร็วอัตราใดอัตราหนึ่งหรือหลายอัตราก็ได้ จึงจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นทาง sec. อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรง (flux change) นั้น ฉะนั้นถ้าไฟตรงที่ใส่เข้าไปทาง pri. มีค่าคงที่ตลอดเวลาจะทำให้ไม่มีไฟเกิดขึ้นทาง sec. ดังนั้นจึงทำให้หม้อแปลงมีลักษณะเด่นในการเปลี่ยนค่าของแรงเคลื่อนและกระแสไฟในวงจรกระแสไฟสลับเท่านั้น

2.4.3 การแยกส่วนที่สูญเสียในแกนเหล็ก

ส่วนที่สูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) ของหม้อแปลงนั้นขึ้นอยู่กับความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึของไฟที่จ่ายให้กับหม้อแปลง และยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงที่
เกิดขึ้นในแกนเหล็กนั้นๆ ในเมื่อปริมาตรและความหนาของแกนเหล็กแต่ละแผ่น
ได้กำหนดไว้แล้วอย่างไรก็ดี ส่วนที่สูญเสียในแกนเหล็กนี้มีอยู่สองอย่างคือ

ก) เสียไปเนื่องจาก hysteresis $W_h = PB_{max}^{1.6} f$

ข) เสียไปเนื่องจากกระแส eddy $W_e = QB_{max}^2 f^2$

เมื่อ P และ Q เป็นค่าคงที่ของข้อ(ก)และ(ข) ตามลำดับ

B_{max} เป็นความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงในแกนเหล็ก

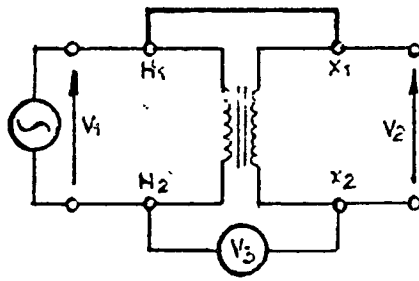
f เป็นความถี่ของการแปรเปลี่ยนของเส้นแรงแม่เหล็กอันเนื่อง
มาจากไฟที่หม้อแปลงได้รับ

นั่นคือส่วนที่สูญเสียทั้งหมดในแกนเหล็ก $W_g = W_h + W_e$
 $= PB_{max}^{1.6} f + QB_{max}^2 f^2$

ดังนั้นเมื่อต้องการหาค่าคงที่ของ P และ Q ก็หาได้โดยการใส่
ไฟที่มีความถี่ต่างกันสองความถี่ เข้าไปที่หม้อแปลง โดยให้ความหนาแน่นของเส้น
แรงแม่เหล็กมีค่าคงที่ แล้ววัดค่าส่วนที่สูญเสียทั้งสองครั้งได้จากวัตต์มิเตอร์ ก็ทำ
ให้คำนวณหาค่า P และ Q ได้ดังนั้นก็ทำให้คำนวณหาค่าสูญเสียของแต่ละอย่างได้

2.4.4 การให้เครื่องหมายที่ขั้วของหม้อแปลง (Polarity Marking)

การให้เครื่องหมายที่ปลายสายที่ออกมาจากหม้อแปลงทั้งทางด้านรับไฟ
และด้านจ่ายไฟนั้นเป็นสิ่งสำคัญ มาตรฐานที่ใช้ตามโรงงานในทางปฏิบัติของ
อเมริกาหรืออังกฤษนั้น ให้เครื่องหมายของปลายสายทางด้านแรงสูงเป็น H_1
และ H_2 ตามลำดับ ส่วนทางด้านแรงต่ำเป็น X_1 และ X_2 การให้เครื่องหมาย
นี้ขึ้นอยู่กับ การพันขดลวดที่อยู่บนแกนเหล็กนั้นๆ โดยที่ H_1 และ X_1 มีขั้ว
สอดคล้องกัน นั่นก็คือว่า ถ้า H_1 เป็น + หรือต้น coil แล้ว X_1 ก็มี
ขั้วเป็น + หรือต้น coil เช่นเดียวกัน และในทำนองเดียวกัน H_2 และ
 X_2 ก็สอดคล้องซึ่งกันและกันด้วย นั่นคือเป็น - หรือปลาย coil ฉะนั้นจาก
หลักการที่กำหนดให้นี้จึงทำให้ เมื่อนำขั้ว H_1 กับ X_1 มาต่อเข้าด้วยกัน
แล้วจ่ายไฟเข้าไปที่ H_1, H_2 แล้ววัด Voltage ที่ $H_2 X_2$ จะได้ค่า
Voltage ที่มีค่าต่ำกว่า Voltage ที่ $H_1 H_2$ ดังรูป 2.17 นั่นคือ



รูป 2.17 แสดงการให้เครื่องหมายขั้วของหม้อแปลงเมื่อนำขั้วเหมือนกัน
กันมาต่อเข้าด้วยกัน

$$V_3 = V_1 - V_2 \quad (V_1 > V_2) \quad (2.54)$$

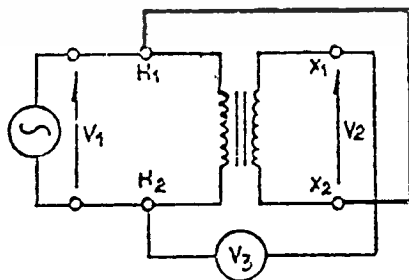
$$\therefore V_3 < V_1 \text{ หรือ } V_3 < V_{H.V.}$$

แต่ถ้านำ H_1 ต่อกับ X_2 แล้ววัด Voltage ที่ H_2 กับ X_1 จะได้ค่าสูงกว่า voltage ที่ H_1, H_2 ดังรูป 2.18 นั่นคือ

$$V_3 = V_1 + V_2 \quad (V_1 > V_2) \quad (2.55)$$

$$\therefore V_3 > V_1 \text{ หรือ } V_3 > V_{H.V.}$$

เมื่อทำการตรวจสอบทั้งสองวิธีแล้ว (รูป 2.18) และได้ผลลัพธ์ตามสมการ 2.54 และ 2.55 นั่นก็หมายความว่า การให้เครื่องหมายขั้ว หรือปลายสายของหม้อแปลงนั้นถูกต้องแล้ว ตามสมการ 2.54 นั้นได้ V_3 น้อยกว่า V_1 เพราะขาขดลวดทั้งสองขดนั้นมีทิศทางของแรงเคลื่อนไฟเหนี่ยวนำสวนกันเมื่อต่อ H_1 เข้ากับ X_1 แต่เมื่อต่อ H_1 เข้ากับ X_2 ทำให้ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟเหนี่ยวนำเสริมกัน ดังนั้นจึงทำให้ V_3 มากกว่า V_1



รูป 2.18 แสดงการให้เครื่องหมายขั้วของหม้อแปลงที่นำขั้วต่างกันมาต่อกัน

ในทางปฏิบัตินั้น การให้เครื่องหมายชี้ของหม้อแปลงนั้นหาได้โดยกำหนด H_1 และ H_2 ขึ้นตามใจชอบก่อน หลังจากนั้นจึงทำการต่อดังรูป 2.17 หรือรูป 2.18 ก็ได้ เพื่อให้ได้คุณลมบัติตามสมการ 2.54 หรือ 2.55 ก็จะทำให้รู้ว่า ปลายสายใดทางด้าน L.V. เป็น X_1, X_2



บทที่ 3

หลักการวัด และการสร้าง

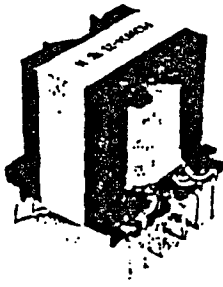
หลักการพื้นฐานของการวัดหาคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในย่านความถี่ต่างๆ ซึ่งความหมายของพารามิเตอร์ต่างๆ และวิธีการวัดจะได้อธิบายในปริศนา-ญาณ์พนธ์เล่มนี้ การคำนวณหาคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สำหรับวัสดุแม่เหล็กสำหรับการบันทึก (magnetic recording) และสำหรับการสร้างแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง ซึ่งในปัจจุบันวิศวกรผู้ออกแบบสิ่งดังกล่าวกำลังสับสนเป็นอย่างมากที่ไม่สามารถจะแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้ เช่น ความไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) ของวัสดุแม่เหล็ก , การสูญเสียของสัญญาณที่จะเกิดขึ้นตามขนาดของแอมพลิจูดที่ใหญ่ๆ และค่าพารามิเตอร์อื่นๆอีกมากมายที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณออกแบบ

3.1 การกำหนดชนิดของอุปกรณ์ทางแม่เหล็กที่ใช้ในย่านความถี่ 10 KH_z และความถี่อื่นๆที่สูงกว่า

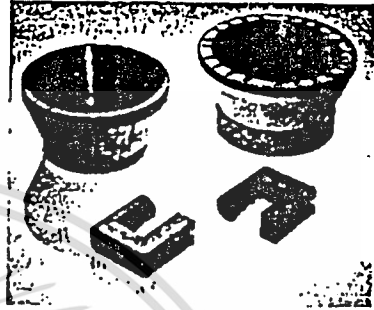
ในรูปที่ 3.1 แสดงถึงตัวอย่างของอุปกรณ์ที่เป็นวัสดุทางแม่เหล็ก ที่ใช้ในย่านความถี่สูง และตารางที่ 3.1 แสดงถึงค่าความถี่ที่ใช้กับวัสดุทางแม่เหล็กแบบต่างๆ ที่ใช้ในย่านความถี่ตั้งแต่ 10 KH_z เป็นต้นไป ในรูปที่ 3.2 แสดงถึงย่านความถี่ ที่ใช้ในวัสดุแม่เหล็กแต่ละแบบสำหรับวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ทำขดลวดหักเหในโทรทัศน์ (TV deflection Yokes) จะใช้ในย่านความถี่ตั้งแต่ 16-KH_z ถึง 64 KH_z, flyback transformer จะใช้ในย่านความถี่ตั้งแต่ 16-KH_z ถึง 64 KH_z, อินเวอร์เตอร์ที่ใช้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ในความถี่ตั้งแต่ 40 KH_z เป็นต้นไป ดังนั้นจะเห็นว่าการวัดจะมีความต้องการในลักษณะที่เหมือนกันคือต้องการความถี่สำหรับทดสอบที่ 10 KH_z เป็นต้นไป

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สำหรับการออกแบบแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง จะเป็นการดีถ้าหาวัสดุแม่เหล็กที่ใช้มีค่าการสูญเสียที่ต่ำ ซึ่งจะเป็นสิ่งจำเป็น เพราะต้องการให้อุปกรณ์มีขนาดที่เล็กกะทัดรัด เพื่อที่จะให้การวัดค่าการสูญเสียที่มีค่าต่ำๆเกิดความถูกต้อง ดังนั้นความแม่นยำของการวัดจะต้องดีมาก

(a)



(b)



(c)



(d)



รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ทำขึ้นจากวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในย่านความถี่สูง

(a) เป็นหม้อแปลงสำหรับแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

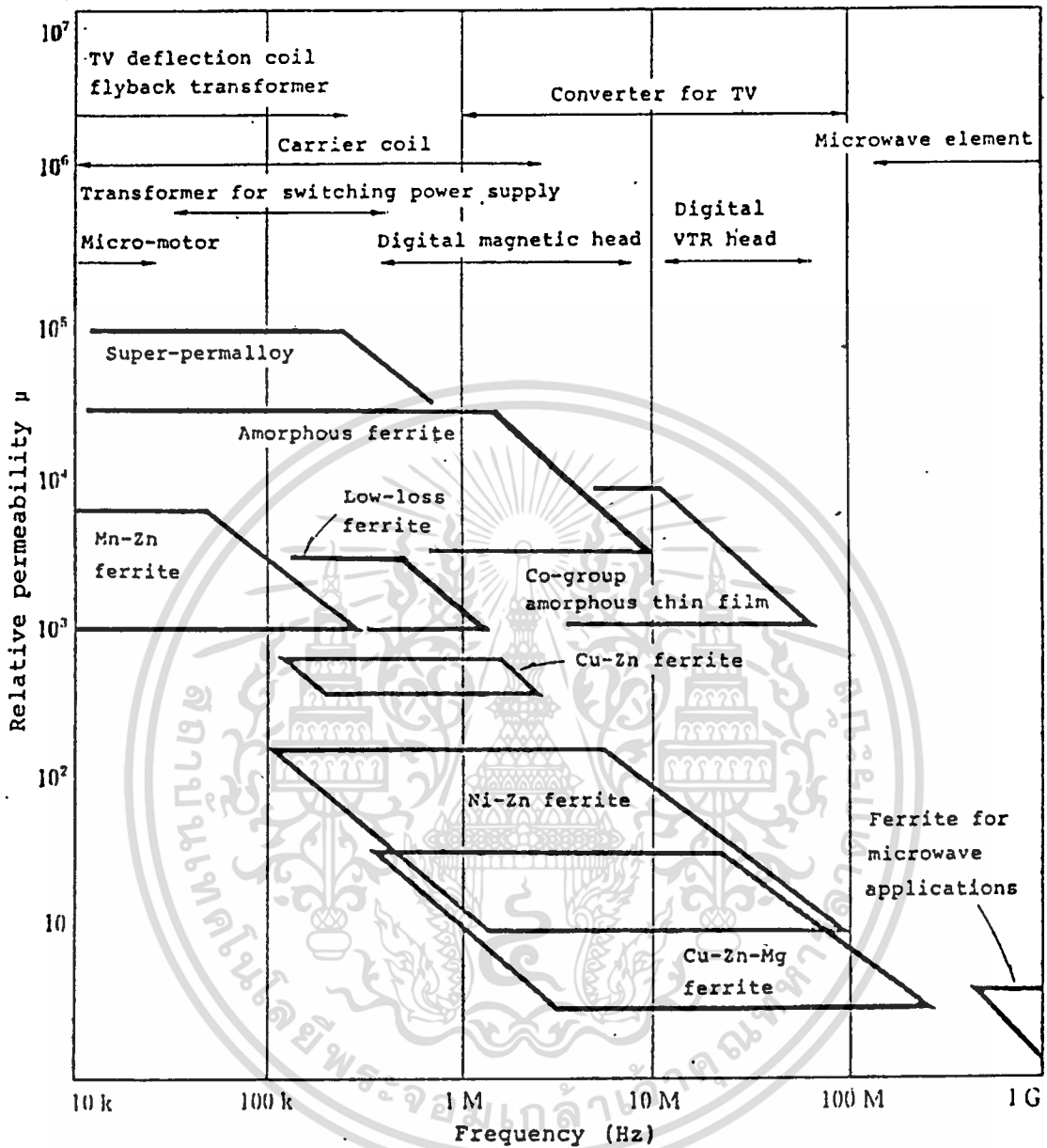
(b) ขดลวดหักเหสำหรับใช้ในโทรทัศน์ (Deflection Yoke For T.V.)

(c) หัวแม่เหล็กบันทึกสำหรับ HDD (d) หัวแม่เหล็กบันทึกสำหรับ VTR

Classification	Use	Frequency bandwidth	Major materials	Characteristics
Transformer	Transformer for switching power supply	20 kHz - 500 kHz	Mn-Zn ferrite	High magnetic flux density, low loss
	Flyback transformer for TV	16 kHz - 64 kHz	Mn-Zn ferrite	High magnetic flux density, low loss
Deflection yoke	Deflection yoke for TV	16 kHz - 64 kHz	Mn-Zn ferrite Mn-Cu ferrite	High magnetic flux density, low loss, cost
Circuit element	Inductance transformer	Several ten kHz - 100 MHz	Ni-Zn ferrite Cu-Zn ferrite Dust core	High frequency magnetic permeability, High-Q, small amplitude operation
Magnetic recording	Magnetic head	100 kHz - 10 MHz	Ferrite Sendust Amorphous alloy	High magnetic flux density, high magnetic permeability, thin-film form, hardness
	Recording media	100 kHz - 10 MHz	γ-ferrite Ba-ferrite	High magnetic flux density, high coercive force
Mechanism	Yoke for micro-motor	Several ten Hz - 10 kHz	SiFe	High magnetic flux density, high magnetic permeability, low loss

ตารางที่ 3.1 แสดงวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในความถี่สูงที่สำคัญ
และนิยมนำมาใช้งานกันมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

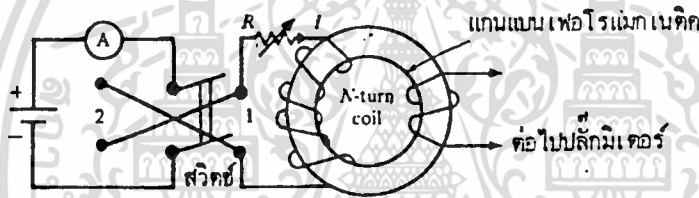


รูปที่ 3.2 แสดงชนิดของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในย่านความถี่ที่ 10 KHz และความถี่ที่สูงกว่า ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า ซิมชาบสัมพัทธ์ (relative permeability)

รูปแผนภูมิข้างบนนี้ วาดอ้างอิงจาก Electric Engineering Handbook เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 -37-
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

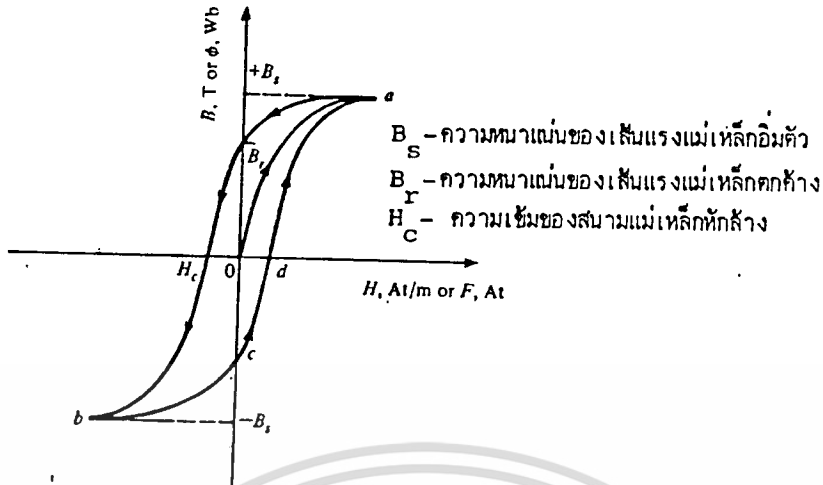
3.2 หลักการวัดแบบพื้นฐาน

ในรูปที่ 3.3 จะแสดงวงจรแม่เหล็กที่ใช้วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกบนแกนมีขดลวด 2 ชุดและต่อตามรูป สมมติว่าวัสดุแม่เหล็กนี้ยังไม่เคยผ่านสนามแม่เหล็กมาเลย จุดประสงค์ของการทดลองนี้คือหากราฟคุณลักษณะของ BH ของวัสดุ ขณะที่สวิตช์ยังเปิดอยู่นั้นกระแสมีค่าเป็นศูนย์ เส้นแรงแม่เหล็กก็มีค่าเป็นศูนย์ด้วย เราจะเริ่มต้นกันที่จุดศูนย์ในรูปที่ 3.4 เมื่อเราให้สวิตช์ปิดไปตำแหน่ง 1 แล้วเพิ่มกระแสขึ้นโดยการปรับค่าความต้านทาน R ทุกๆค่าของกระแสบันทึกค่าของเส้นแรงแม่เหล็กไว้เราจะได้กราฟช่วง oa ที่จุด a แกนเหล็กถึงจุดอิ่มตัวจากที่จุดนี้เราเริ่มลดกระแส ในขณะนั้นยังคง วัดเส้นแรงแม่เหล็ก ทุกๆค่าของกระแสแล้วเราลากกราฟ aBr วิจารณ์จากรูปที่ 3.4 เส้นลากกลับของกราฟเมื่อลด



รูปที่ 3.3 รูปการทดลองหากราฟคุณลักษณะ BH

ค่ากระแสจะไม่กลับไปตาม ϵ_0 ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B_r เป็นค่าที่ค้างอยู่ในแกนเป็นตัวบอกระดับของการกระตุ้นให้เป็นแม่เหล็กของวัสดุที่ใช้ทำแกนจากรูปที่ 3.4 ขณะที่ความหนาแน่นมีค่า B_r ค่าของ H มีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นทิศทางกระแสไฟโดยเลื่อนสวิตช์ไปตำแหน่งที่ 2 หลังเพิ่มกระแสไปในทางลบ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลงจนกระทั่งถึงศูนย์ที่ค่ากระแส $-I$ หรือมีค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก H_0 จึงจะเรียกว่าความเข้มสนามแม่เหล็กหักล้างหรือถ้าพิจารณาในรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็กก็คือแรงเคลื่อนแม่เหล็กหักล้าง หมายความว่า เราต้องการค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ให้เท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหักล้าง ในการที่จะล้างอำนาจแม่เหล็กหรือลดเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างให้เป็นศูนย์

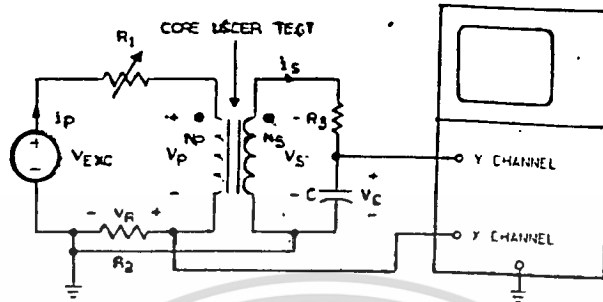


รูปที่ 3.4 ฮิสเตอร์ิซิสลูป และค่าต่างๆ

จากนั้นเพิ่มกระแสในทางลบ แล้วลากเส้นกราฟ $H_c b$ จนถึงจุดอิ่มตัวของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กทางลบ คือ $-B_s$ เครื่องหมายลบแสดงให้รู้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กกลับทิศจาก $+B_s$ จุดสุดท้ายเราลดกระแสแล้วลากกลับเส้น b ถึงจุดที่กระแสเป็นศูนย์ จากนั้นโยกสวิตช์กลับไปตำแหน่งที่ 1 เพิ่มกระแสทางบวก (ขณะนี้ยังคงวัดเส้นแรงแม่เหล็กอยู่) หลังจากทีส่วนโครงสร้าง bcd ลูปของ bcd เรียกว่าฮิสเตอร์ิซิสลูป (Hysteresis Loop) สภาพของฮิสเตอร์ิซิสคือ คุณลักษณะของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในงานทางไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์

จากรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นว่าฮิสเตอร์ิซิสลูป จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กตามเวลา ตัวอย่างที่เห็นได้ง่ายๆ ของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาก็คือแรงเคลื่อนแม่เหล็กรูปคลื่นซายน์ ในไฟสลับ (ac) โดยที่ให้กระแสไหลผ่านขดลวดเป็น ac แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวัสดุแม่เหล็กก็จะเป็น ac และสร้างลูปที่เหมือนกัน รูปที่ 3.4 พื้นที่ภายในรูปจะแปรผันตามค่าพลังงานสูญเสีย (ในรูปความร้อน) ในวัสดุในช่วงคลื่น พลังงานสูญเสียนี้เรียกว่าค่าสูญเสียฮิสเตอร์ิซิส ดังนั้นในการหาค่าสูญเสียในอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะต้องคำนึงถึง ค่าสูญเสียฮิสเตอร์ิซิสด้วย

สำหรับการวัดฮิสเตอร์ิซิส เมื่อใช้แรงดันกระตุ้น เป็นแรงดันไฟกระแสสลับ (ac) ซึ่งจะสามารถ แสดงรูปฮิสเตอร์ิซิสลูป บนจอออสซิลโคปได้ โดยมีวงจรดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงการวัด BH-Loop โดยการใช้อุปกรณ์กระตุ้นแบบ AC

วิธีการที่นิยมใช้ในการแสดงคุณสมบัติทางไดนามิกของ BH-Loop จะใช้ X-Y recorder หรือใช้ออสซิลโลสโคปที่ทำงานในโหมด x-y เป็นตัวแสดงในรูปที่ 3.5 แสดงถึงวงจรที่ใช้วัด BH-Loop แหล่งจ่ายไฟเพื่อกระตุ้น (excitation source) อาจจะใช้แรงดันไฟฟ้าบ้าน (ที่ 50 Hz หรือ 60 Hz) หรือแรงดันไฟสลับอื่นๆ ถ้าต้องการที่จะกระตุ้น โดยสามารถปรับความถี่ ของแรงดันไฟรูปไซน์ แรงดันรูปสามเหลี่ยม หรือแรงดันไฟรูปสี่เหลี่ยมคางหมูจะใช้ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ ที่ถูกขับโดยวงจรขยายอิเลกทรอนิกส์กำลังสูง เป็นแหล่งจ่ายในการกระตุ้น

ขดลวดสำหรับคัปปลิงสองขดจะถูกพันอยู่บนแกนที่จะทดสอบ ด้วยจำนวนรอบของขดปฐมภูมิ N_p และโดยทั่วไปจะพันให้มีจำนวนรอบเท่ากับขดทางทุติยภูมิ N_s การพันขดลวดทั้งสองบนแกนอาจจะพันแบบไบฟิลาไร (Bifilar) คือการพันขดลวดไปพร้อมๆ กันลงในบ็อบบิ้นอันเดียวกัน ขด N_p จะใช้เป็นขดกระตุ้น ในขณะที่ขด N_s จะใช้เป็นขดตรวจจับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นตามอัตราการเปลี่ยนแปลง ของเส้นแรงแม่เหล็กคัลล์อง ในขดทางทุติยภูมิ

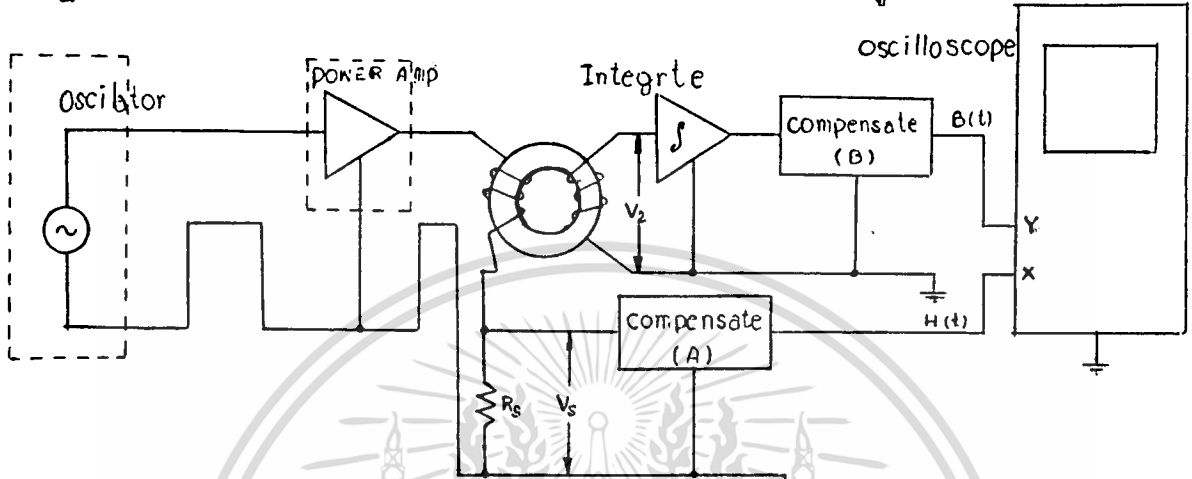
$$V_s = d\lambda_s/dt = N_s d\phi/dt = N_s A_m dB(t)/dt$$

ข้อดีของการใช้วิธีแยกการตรวจจับโดยขดลวด ซึ่งแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทาน iR ของขดลวดทางปฐมภูมิโดยมันจะไม่มีผลต่อการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักแม่เหล็ก แรงดันไฟที่ตกคร่อมความต้านทานของขดทุติยภูมิสามารถที่จะตัดทิ้งได้ เพราะว่าความต้านทาน R_s จะสูงมากกว่ามาก ดังนั้นกระแสทางขดทุติยภูมิที่ย้ายมาทางขดปฐมภูมิคือ $(N_s/N_p)i_s$ จะมีค่าเล็กน้อยและตัดทิ้งได้โดยเราจะสนใจเฉพาะกระแสกระตุ้นสำหรับแกนที่จะทดสอบรูปคลื่น $V_s(t)$ จะถูกอินทิเกรตเพื่อที่จะได้รูปคลื่นของเส้นแรงแม่เหล็กคัลล์องอยู่กับขดลวดทางขดทุติยภูมิ $(\lambda_s(t))$

ในแกนเหล็กโดยการหารค่าของเส้นแรงแม่เหล็กคัลล์องด้วยพื้นที่หน้าตัดของแกน A_m ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
-40-
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวัดที่ความถี่สูง

ดังที่ทราบมาแล้วว่าจุดประสงค์ของโครงการนี้ก็คือสามารถวัด BH-Loop ของวัสดุแม่เหล็กที่ความถี่สูง โดยมีหลักการวัดที่แตกต่างไปจากหลักการวัดแบบพื้นฐานดังกล่าวแล้วข้างต้น บล็อกไดอะแกรมแสดงการวัดดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการวัด BH-Loop ที่ความถี่สูง

จากรูปที่ 3.6 มีการทำงานดังนี้คือวงจร Oscillator จะเป็นตัวกำหนดความถี่ทดสอบ และแรงดันกระตุ้น โดยสามารถให้ความถี่ทดสอบได้สูงถึง 200-KHz ซึ่งแรงดันกระตุ้นจะเป็นแบบรูปซายน์ สัญญาณเอาท์พุทจากออสซิลเลเตอร์จะถูกขับโดย Power Amp. ซึ่งสามารถจ่ายกำลังได้สูงถึง 100 W. จึงได้แรงดันไฟกระตุ้นสำหรับการทดสอบแกนออกทางเอาท์พุทของ Power Amp. ป้อนเข้าสู่ขดปฐมภูมิของแกนที่จะทดสอบ จากนั้นก็ทำการวัดค่าของ $H(t)$ ในรูปของแรงดันไฟตกคร่อม R_s นั่นคือ $H(t) = N_p V_s / l_m R_s$ ดังนั้น เพื่อให้ได้ค่า $H(t)$ ที่ถูกต้องก่อนป้อนเข้าแกนแนล X ของ ออสซิลโลสโคปจะต้องนำสัญญาณ $N_p V_s / l_m R_s$ นี้ผ่านวงจร Compensate (A) เพื่อทำการคูณด้วย $l_m R_s$ และหารด้วย N_p เสียก่อน และในการวัดค่า $B(t)$ ก็เช่นกันก็ทำการวัดแรงดันที่ขดทุติยภูมิแล้วผ่านวงจรอินทิเกรตเนื่องจาก

$$B(t) = (1 / A_m N_s) \int v_2 dt$$

แล้วนำสัญญาณนี้ผ่านวงจร Compensate (B) ก่อนป้อนเข้าสู่แกนแนล Y ของออสซิลโลสโคปโดยที่หลักการทางาน และคุณสมบัติของแต่ละบล็อกในรูปที่ 3.6 จะอธิบายต่อไป R_s จะใช้ความต้านทานแบบ metal film ซึ่งเป็นความต้านทานที่มีค่าความเหนียวแน่นและความจุต่ำจึงทำให้ไม่เกิดการเพี้ยนของรูป BH-Loop ที่ได้โดย R_s จะมีค่าเท่ากับ 1 ohm ทนกำลังได้ไม่ต่ำกว่า 25 W. (สำหรับกระแสกระตุ้นสูงสุด ± 5 A) ออสซิลโลสโคปที่ใช้วัดจะตั้งทำงานอยู่ในโหมด X-Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

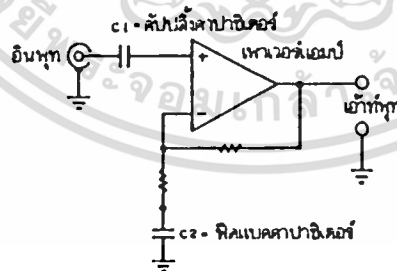
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 รายละเอียดแต่ละส่วนของเครื่อง

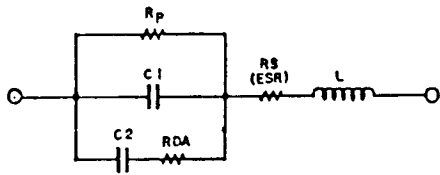
3.4.1 Power amplifier

คุณสมบัติที่สำคัญของ Power Amp. ที่จะนำมาใช้ในโครงงานนี้ก็คือจะต้องสามารถตอบสนองความถี่ได้ในย่านที่กว้างมากๆ และตอบสนองความถี่ได้สูงๆ ตั้งแต่ 50Hz - 200KHz โดยที่กำลังของ Power Amp. จะต้องไม่ตกลง ฉะนั้นในโครงงานนี้จึงเลือกใช้ Power Amp. แบบ DC Servo Power Amp. ซึ่งเป็น Power Amp. ที่เป็นแบบ Direct Coupling จึงสามารถที่จะตอบสนองความถี่ได้ตั้งแต่ 0 Hz ขึ้นไปจนถึงความถี่สูงประมาณ 200 KHz

Power Amp. นี้จะเป็นแบบ Direct Coupling แยกจากอินพุตถึงเอาต์พุต และการ Feedback ก็ปราศจาก Coupling Capacitor โดยสิ้นเชิงทำให้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ออกมาไม่มีความเพี้ยนจากผลของ Capacitor เลย ซึ่งจะให้ผลที่ดีกว่า Coupling Capacitor ถึงแม้จะใช้ Capacitor คุณภาพดีขนาดไหนก็ตามมันก็ต้องมีความเพี้ยนส่วนตัวของมันเองเป็นคุณสมบัติส่วนตัวอยู่อันเป็นผลมาจาก Purity ของสารที่ใช้ทำแผ่น Dielectric, ESR, Dielectric Absorption ทางที่ดีที่สุดคือพยายามตัด Capacitor เหล่านี้ออกจากวงจรไปให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้จากรูปที่ 3.7 คือ Power Amp. โดยทั่วไป ซึ่งเราจะเห็นว่าจะใช้ Coupling Capacitor



รูปที่ 3.7



R_p = ความต้านทานรั่วไหล

C_1 = ความจุของคาปาซิเตอร์

C_2 และ R_{da} = วงจรแทน Dielectric

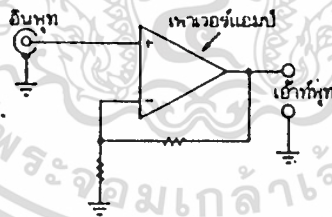
Absorption ของวงจร

R_s = ความต้านทานอนุกรมสมมูลย์

L = ความเหนี่ยวนำ

รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลย์ของตัวเก็บประจุ

C_1 จะมีค่าประมาณ 1-10 μ F ซึ่งค่าต่ำขนาดนี้เราสามารถหา C ชนิด Film ซึ่งมีคุณภาพดีได้แต่ราคาก็แพงมาก และที่สำคัญก็ยังมี Capacitor-Distortion อยู่นั่นเอง ส่วน C_2 ซึ่งเป็น Feedback Capacitor นั้นมีค่า 10 μ F-1000 μ F ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นชนิด electrolytic ซึ่งคุณสมบัติของมันจะแย่มากอยู่แล้วเราจึงสามารถตัด capacitor เหล่านี้ออก ซึ่งเราก็จะได้ power Amp. ดังรูปที่ 3.9

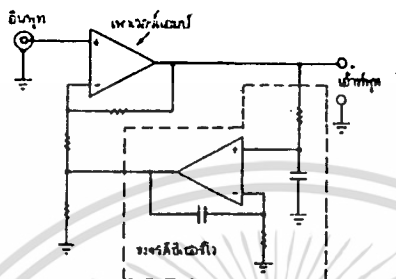


รูปที่ 3.9

ในทางทฤษฎี power Amp. ดังรูปที่ 3.9 จะเป็น power Amp. ที่ให้การตอบสนองสัญญาณที่ดีกว่า รูปที่ 5 แน่นอน แต่มีผลข้างเคียงที่ตามมา คือจะมีเอาต์พุท offset voltage ออกมาจากเอาต์พุท ทำให้สัญญาณออกทางเอาต์พุทมีแรงดัน DC ออกมาด้วย offset voltage นี้เกิดจากคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ ที่นำมาเป็น Differential Amp. ในภาคอินพุทของ power Amp. ซึ่งย่อไม่เหมือนกันทุกตัว นอกจากนั้นการที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงก็ทำให้เอาต์พุท offset voltage เปลี่ยนไปด้วย ซึ่งทำให้เราจำเป็นต้องปรับ แรงดัน DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 44-25 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าที่พุดให้เป็น 0V อยู่เสมอ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดทอนเราจึงนำ DC servo มาคอยช่วยปรับเข้าที่พุด offset voltage ให้เป็น 0 V อยู่ตลอดเวลาดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 DC servo circuit

ซึ่งการทำงานของวงจร DC servo นี้ก็คือ การคอยเช็คว่ามีแรงดัน DC ออกมาจากเข้าที่พุด power Amp. เท่าใดจากนั้นวงจร DC servo ก็จะคอยส่งสัญญาณไปปรับแรงดัน DC นี้ลดลงเป็น 0 V ทางภาค Diff. Amp. ผลที่ตามมาก็คือ เราจะได้ Direct coupling power Amp. ที่ปราศจากความเพี้ยนใดๆและสามารถตอบสนองความถี่ได้สูง

การทำงานของวงจร

วงจรนี้เป็นวงจร All complementary symetry ตลอดตั้งแต่อินพุท จนถึงเข้าที่พุด และ Direct coupling ตลอดตั้งแต่อินพุทจนถึงเข้าที่พุด เช่นกัน โดยสัญญาณอินพุทจะถูกส่งเข้ามายัง R6 และ C2 ซึ่งทำงานร่วมกันทำหน้าที่ปัดอั้งกันไม่ให้ความถี่สูงเกินไป ถูกนำไปขยาย Q7, Q8 และ Q9, Q10 ทำหน้าที่เป็น Differential Amp. ทางซิกบวกลบตามลำดับ โดยทำงานแบบ cascode ร่วม Q11, Q12 และ Q5, Q6 ซึ่งวงจร cascode นี้เป็นวงจรที่ทำให้ภาค Differential Amp. ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพตลอดย่านคงที่ สำหรับ Q1, Q2 และ Q3, Q4 ทำหน้าที่เป็น constant current source ให้กับภาค Differential Amp. ซิกบวกลบและซิกลบตามลำดับ Q13, Q15 และ Q14, Q16 ทำหน้าที่เป็น Voltage Driver โดยมี Q18, Q19 เป็น Current Driver Q17 เป็นตัวกำหนด Bias ของวงจรเข้าที่พุด และ Q20-Q23

เป็นเข้าที่พุกทรานซิสเตอร์ D5-D8 จะคอยช่วยป้องกันไม่ให้แรงดันที่ขา Gate ของเข้าที่พุกทรานซิสเตอร์เกิน 10 V เมื่อเทียบกับขา Source ซึ่งเป็นอันตรายอย่างมากกับตัว POWER MOSFET สำหรับ IC1 นั้นทำหน้าที่เป็นตัว DC-servo คอยปรับแรงดัน offset ที่เข้าที่พุก R36, C21, R37, L1, R38, C22 ทำหน้าที่เป็นโซเบลเนทเวอร์คคอยชดเชย เข้าที่พุกอิมพีแดนซ์ ที่ความถี่สูง

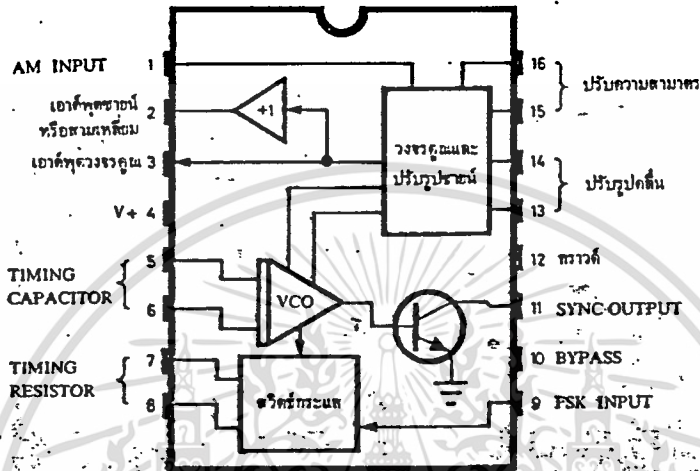
3.4.2 ออสซิลเลเตอร์

ไอซีโมโนคลิสิกฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์เบอร์ XR-2206 มีความสามารถกำเนิดรูปคลื่นไซน์ (sine) รูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangle) รูปคลื่นแรมป์ (ramp) และรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (square) ได้ทั้งยังสามารถนำสัญญาณภายนอกมาควบคุมขนาด และความถี่ของรูปคลื่นที่ผลิตขึ้นได้ ซึ่งเรียกว่า การมอดูเลททางขนาด (Amplitude Modulation) และการมอดูเลททางความถี่ (Frequency Modulation) ตามลำดับ การกำเนิดรูปคลื่นแต่ละแบบนี้สามารถเลือกความถี่ได้จากคาปาซิเตอร์ และรีซิสเตอร์จัดเวลา (capacitor and resistor timing) โดยมีพิสัยตั้งแต่ 0.01 Hz ถึงมากกว่า 1 MHz ลักษณะเด่นของ XR-2206 คือมีการผิดเพี้ยนของสัญญาณไซน์ต่ำ คือประมาณ 5% มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดี คือความถี่จะไม่เปลี่ยนตามอุณหภูมิ และยังสามารถกวาดความถี่ได้พิสัยกว้าง (wide sweep range) การมอดูเลชันทางขนาดสามารถทำได้ อย่างเป็นเชิงเส้น คือขนาดของคลื่นพาหะ (carrier) จะเปลี่ยนตามขนาดรูปคลื่นภายนอกที่นำมามอดูเลท (modulating signal) อย่างเป็นเชิงเส้นสามารถทำเป็น sinusoidal FSK generator ได้ คือทำการมอดูเลทสัญญาณดิจิตอลโดยอาศัยสัญญาณดิจิตอลเป็น input ที่ขา 9 มาทำให้ความถี่เลื่อนไปสองค่า คือ ต่ำกับสูงตามระดับสัญญาณดิจิตอล (ซึ่งจะไม่กล่าวถึงรายละเอียดเนื่องจากว่า ไม่ได้นำมาประยุกต์ใช้ในปริยญาณิพนธ์นี้) และลักษณะเด่นที่สำคัญ คือมีพิสัยการเลือกใช้แหล่งจ่ายได้กว้าง (wide supply range) คือตั้งแต่ 10v ถึง 26v ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง

แผนผังและรูปร่างของโมโนคลิสิก XR-2206

แผนผังของโมโนคลิสิกฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ XR-2206 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 จะเห็นว่าประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนคือ บัฟเฟอร์มีเกนที่เป็น 1 ตัวคูณ และตัวเปลี่ยนรูปคลื่นสามเหลี่ยมเป็นรูปคลื่นไซน์ (Multiplier and

sineshaper) โวลท์เตจควบคุมการกำเนิดคลื่น (VCO) และส่วนของ current switches ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงแผนผังและรูปร่างของโมโนลิทิก XR-2206

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าคาปาซิเตอร์จัดเวลา (timing capacitor) และรีซิสเตอร์จัดเวลา (timing resistor) เข้าที่ขา 5, 6 และขา 7, 8 ตามลำดับเพื่อเป็นตัวจัดเวลาในการกำเนิดรูปคลื่นในหนึ่งคาบหรือเป็นตัวกำหนดความถี่ของ VCO นั้นเองโดยส่วนของ VCO จะกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณสี่เหลี่ยมขึ้นมา จากนั้นจะนำสัญญาณสามเหลี่ยมไปยังภาคเปลี่ยนสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์ (sine shaper) โดยรูปคลื่นไซน์ที่ได้จะถูกเลือกให้ไปปรากฏที่ output ขา 2 ได้ โดยการควบคุมที่ขา 15 และ 16 (Symmetry ADT) ส่วนสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้จาก VCO จะนำมาออกที่ขา 11 (Sync output) ส่วนภาค Multiplier จะทำหน้าที่นำสัญญาณที่จะมอดูเลตจากขา 1 (AM Input) มาคูณกับสัญญาณความถี่ที่ผลิตขึ้นมาเสมือนเป็นความถี่พาหะ (carrier) แล้วผลคูณที่ได้จะออกมาที่ขา 2 เช่นกัน และสุดท้ายก็คือส่วนของ current switch จะทำหน้าที่นำสัญญาณดิจิตอลจากขา 9 (FSK Input) ที่ต้องการมอดูเลตแบบ FSK มาปิดเปิดตัวจ่ายกระแสของ VCO ทำให้การกำเนิดความถี่ของ VCO เปลี่ยนไปตามระดับการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณ ดิจิตอลทำให้ได้ output เป็นการมอดูเลตสัญญาณดิจิตอลแบบ FSK ที่ขา 2 เช่นกัน และที่ขา 3 จะเป็นการควบคุมระดับ dc ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

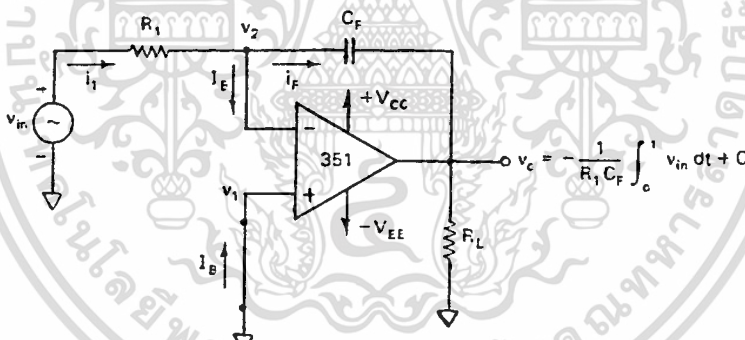
output โดยระดับ dc ที่ output ขา 2 จะประมาณเหมือนกับ dc ไบอัสที่ ขา 3 โดยถูกไบอัสระหว่าง v+ และกราวด์ และต้องให้ระดับ dc output ประมาณ v+/2 ฉะนั้นในการใช้งานที่ขา 1 จะต้องให้มีโวลต์เตจประมาณครึ่งหนึ่งของแหล่งจ่ายการกำหนดความถี่ของรูปคลื่น โดย R และ C จัดเวลา ดังกล่าวข้างต้นเขียนได้เป็น

$$f_o = 1/RC \quad \text{Hz}$$

และสามารถเปลี่ยนความถี่ได้โดยการปรับค่า R และ C โดยแนะนำให้ใช้ R ในช่วง $4K < R < 200K$ และแนะนำให้ใช้ค่า C ในช่วง $1000 \text{ pF} < C < 100 \text{ uF}$

3.4.3 วงจร Integrate

วงจรพื้นฐานแสดงดังรูปข้างล่างซึ่งมีค่า R_F ต่อไว้คร่อม C_F เพื่อสำหรับค่าผิดแบบ แต่ในกรณีที่มีค่าความถี่มากๆ จะทำให้ค่า X_C มีค่าเป็น 0 ได้ เปรียบเสมือนลัดวงจร จึงต้องมีการต่อค่า R_F ไว้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.11 วงจรอินทิเกรเตอร์พื้นฐาน

v_o ที่ออกมาสามารถพิสูจน์ได้ด้วยกฎของเคอร์ชอฟฟ์ สมมติให้เป็นโหนด v_1 และ v_2

$$i_1 = i_F + i_B \quad (3.1)$$

i_B มีค่าน้อยมากซึ่งความต้านทานทางอินพุตมีค่าสูงมาก

$$\therefore i_1 = i_F \quad (3.2)$$

กระแสที่ไหลผ่าน C_F

$$I_{CF} = C_F d V_c/dt$$

จากสมการ (3.2)

$$(V_{in} - V_2) / R_1 = C_F [d(v_2 - v_o)] / dt$$

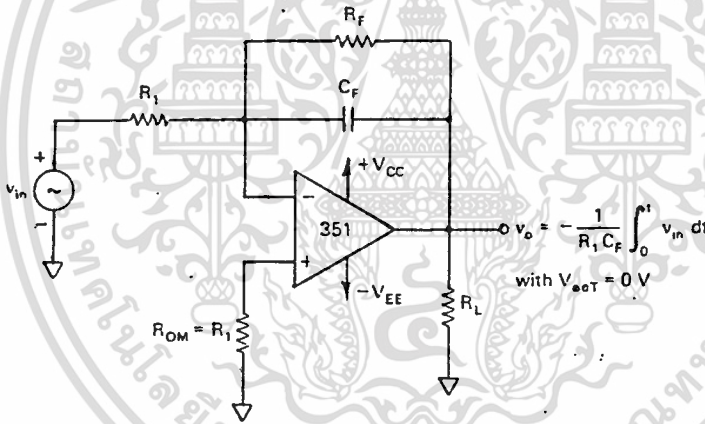
กำหนดให้ $V_1 = V_2 = 0$ เพราะว่าเป็น Z_1 สูงมาก

$$V_1 / R_1 = C_F d(-V_o) / dt$$

$$(V_{in} / R_1) dt = C_F d(-V_o) / dt$$

$$V_o = -1 / (R_1 C_F) \int V_{in} dt \quad (3.4)$$

เมื่อ $V_{in} = 0$ ในวงจรอินทิเกรเตอร์จากรูปที่ 3.11 เป็นการ open-loop Amplifier ค่า C_F เมื่อไม่มีความถี่ป้อนจะมีค่า ($X_{CF} = \infty$) จึงต้องมีการต่อ R_F เพื่อให้กลายเป็น close-loop Amplifier เมื่อไม่มีความถี่ย้อนเข้าไปและ R_F ยังช่วยลดค่าผิดพลาดทางเข้าที่พหุคูณด้วย จึงสามารถสร้างวงจรใหม่ได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรอินทิเกรเตอร์ใช้งานจริง

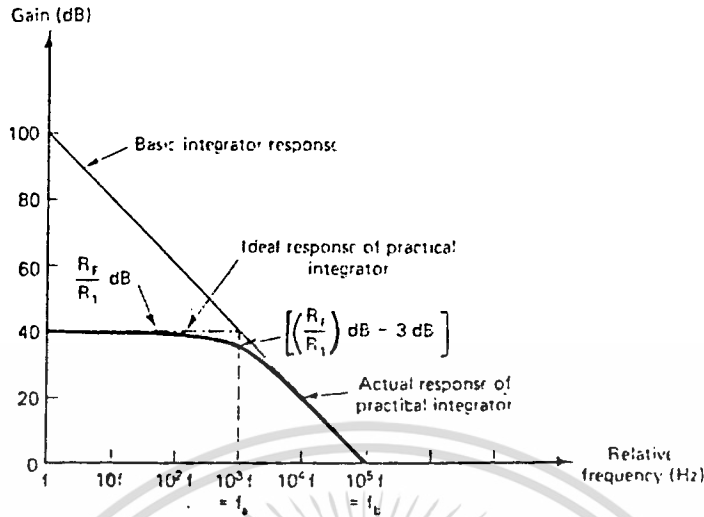
ความถี่ตอบสนองพื้นฐานในวงจรอินทิเกรเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.14 ความถี่ f_b มีค่าเกินเป็น 0dB โดยสามารถหาได้ดังนี้

$$f_b = 1/2 R_1 C_F \quad (3.5)$$

ในรูปที่ 3.14 ความถี่จาก f_b ถึง f_a มีเกินเป็นค่า R_F / R_1 หลังจากค่าความถี่ f_a แล้ว เกินจะลดลงด้วยอัตรา 20dB/decade

$$f_a = 1/2 R_F C_F$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 49-รศศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองของความถี่ในวงจรอินทิเกรเตอร์

การหาค่าอุปกรณ์ในวงจร

ค่า f_a และ $R_1 C_F$ และ $R_F C_F$ ควรจะเลือกให้ $f_a < f_b$ สำหรับ

ตัวอย่าง ถ้า $f_a = f_b / 10$ นอกจากนั้น $R_F = 10 R_1$

$$\text{เมื่อ } T \geq R_F C_F = \frac{1}{(2\pi f_a)}$$

3.4.4 วงจร Compensate

เนื่องจากว่า $H(s) = (N_p / L_m) v_1 / R_m$

และ $B(s) = 1 / (A_m N_m) v_2 dt$

ก. ก่อนอื่นจะขอกล่าวถึงการชดเชยค่าของ $B(s)$

จาก $B(s) = 1 / (A_m N_m) v_2 dt$

เมื่อ $A_m =$ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (m^2)

$N_m =$ จำนวนขดทางทุติยภูมิ (รอบ)

$v_2 =$ แรงดันไฟที่ได้จากขดทุติยภูมิ ซึ่ง $v_2 = v_{max} \sin 2\pi f t$

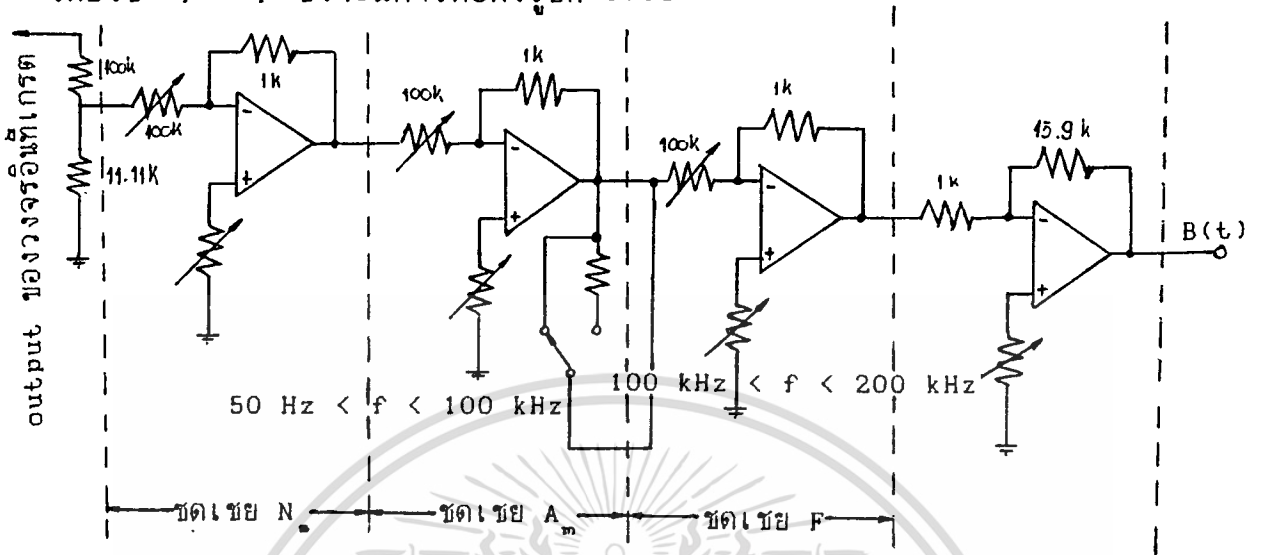
ดังนั้น $B(s) = 1 / (A_m N_m) v_{max} \sin 2\pi f t$

$$= (1.59 / A_m N_m f) v_{max} \cos 2\pi f t$$

จะเห็นว่า $B(s)$ ที่แท้จริงก็คือค่า v_2 ที่ถูกอินทิเกรตออกมาแล้วคูณด้วย 1.59 หากด้วยค่าของ A_m, N_m และ f ซึ่งจะได้ $B(s)$ มีหน่วยเป็น (Wb/m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 50-ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวงจรชดเชย หรือวงจรคูณ และหารค่าต่างๆ จะใช้การคำนวณแบบอนาล็อก โดยใช้ Op Amp ซึ่งจะมีการต่อดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15

โดยที่ N_p สามารถปรับชดเชยได้ตั้งแต่ 1-100 รอบ
 A_m สามารถปรับชดเชยได้ตั้งแต่ 1-100 cm^2
 f สามารถปรับชดเชยได้ตั้งแต่ 1-200 KHz (ในกรณีต่ำกว่า 1 KHz สามารถทำได้ แต่อาจเกิดความผิดพลาดในการวัด)

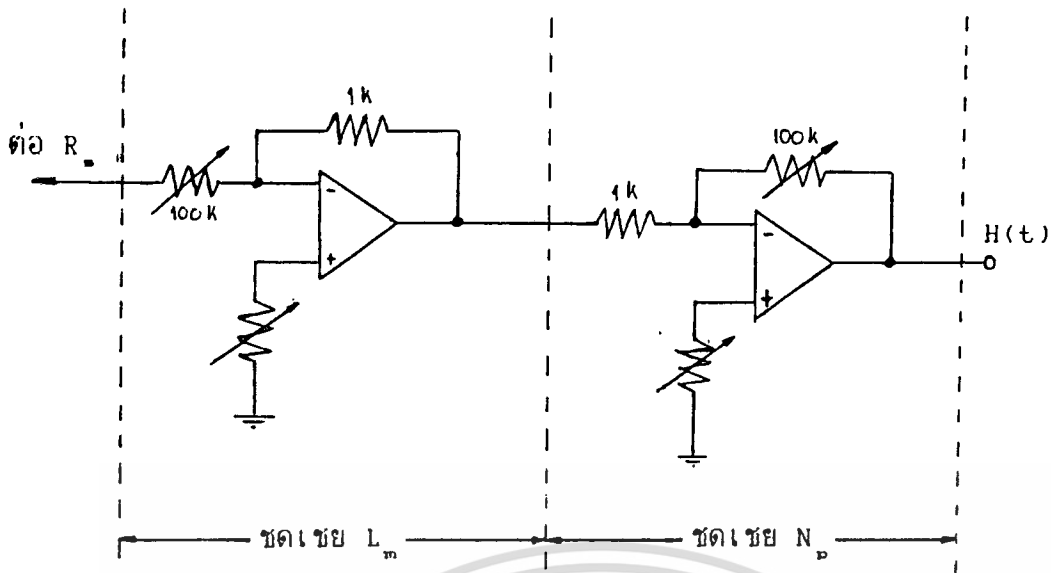
ดังนั้นจะได้ค่า $B(t)$ เป็น Wb/m^2

ข. การชดเชยค่าของ $H(t)$

$$\text{จาก } H(t) = N_p I_m / L_m = N_p V_m / L_m R_m$$

$$\text{เมื่อ } R_m = 1 \text{ Ohm} \text{ จะได้ } H(t) = N_p V_m / L_m$$

จะเห็นว่าค่า $H(t)$ ที่แท้จริง คือ ค่า V_m คูณด้วย N_p แล้วหารด้วย L_m
 ในวงจรชดเชยจะใช้การชดเชยแบบการคำนวณทางอนาล็อก โดยใช้ Op Amp มีวงจรดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16

โดยที่ N_p สามารถปรับขดเชยได้ตั้งแต่ 1-100 รอบ

L_m สามารถปรับขดเชยได้ตั้งแต่ 1-100 cm.

ฉะนั้นจะได้ค่าของ $H(t)$ เป็น $At/cm.$

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ จะขอแบ่งขั้นตอนของการทดลองออกเป็น 3 หัวข้อใหญ่ๆได้ดังนี้

4.1 การพันขดลวดลงบนแกนที่ฉะวัด

แกนแม่เหล็กที่เหมาะสมสำหรับการวัดนี้ควรจะเป็นแบบเทอร์รอยด์ (Toroids) มากกว่าแกนแบบ EI เพราะในแกนเทอร์รอยด์จะมีทางเดินของเส้นแม่เหล็กทางเดียวจึงทำให้สนามแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage flux) มีค่าน้อย และวัดได้ถูกต้องแม่นยำมากกว่า ในการพันขดลวดลงบนแกนควรคำนึงถึงสิ่งสำคัญดังนี้

4.1.1 เมื่อวัดที่ความถี่ต่ำควรจะพันขดลวดให้จำนวนรอบมากๆ (สำหรับเครื่องนี้พันได้ไม่เกิน 100 รอบ) เนื่องจากที่ความถี่ต่ำค่า Impedance ของหม้อแปลง ซึ่งเป็นโหลดของ Power Amp มีค่าต่ำ ($X_L = 2\pi fL$) ซึ่งจะเป็นการทำให้เกิดการไหลกลับ Power Amp มากเกินไป

4.1.2 การพันขดลวดลงบนแกนควรทำการพันในลักษณะสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถ้าลวดถูกพันบนแกนแบบไม่สมมาตร (uniform) จะเกิดสนามแม่เหล็กรั่วไหล และจะทำให้การกระตุ้นไม่เพียงพอ โดยทั่วไปลวดที่นำมาพันบนแกนจะใช้สายไฟแบบฉนวนธรรมดา หรือสายไฟที่เคลือบด้วย Low dielectric constant

4.2 การดำเนินการวัดค่า B-H curve

4.2.1 เมื่อทำการพันขดลวดบนแกน (core) ที่ฉะวัดค่า B-H curve แล้วให้หาขั้ว (dot) ของขดทาง primary และ secondary ตามหลักการหา ซึ่งอธิบายในหัวข้อ 2.4.4 จากนั้นเอาขดทาง primary และ secondary ต่อเข้ากับขั้วต่อบนกล่องวางแกนเหล็ก

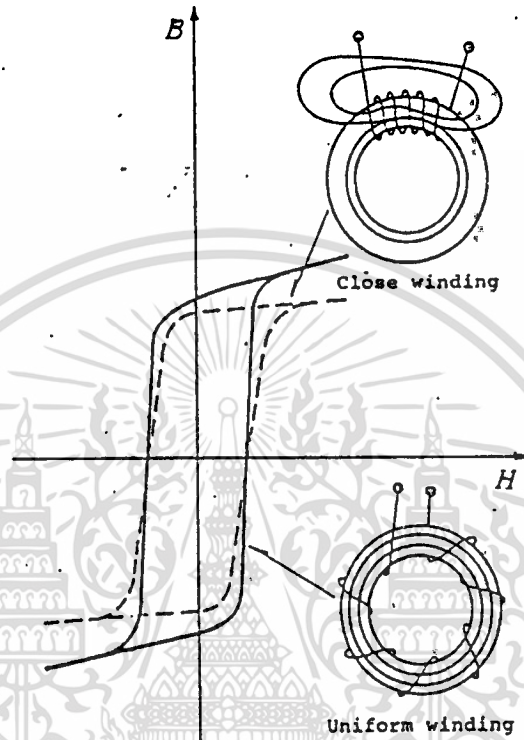
4.2.2 กำหนดความถี่ที่จะทดสอบด้วยการตั้งความถี่บนภาคออสซิลเลเตอร์ แล้วตั้งค่าต่างๆได้แก่ค่า A คือค่าของพื้นที่หน้าตัดแกนเป็น cm^2 , ค่า N_2 คือจำนวนรอบของขด secondary, ค่า F คือค่าความถี่ที่จะทดสอบ, ค่า L คือความยาวของแกนที่วัดเป็น cm และค่า N_1 คือจำนวนรอบของขด Primary

4.2.3 กำหนดให้ B หรือ H ให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ในการทดลองในโครงการนี้จะกำหนดให้ H เป็นค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ $300 \text{ A}\cdot\text{T}/\text{m}$

4.2.4 ปรับปุม Amplitude ของ oscillator ให้แรงดันไฟ-
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
-53-
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

excitation เพิ่มขึ้นจนกระทั่งได้ค่าเท่ากับ H ที่กำหนด (ในขณะนี้ oscilloscope ทำงานในโหมด X-Y)

4.2.4 อ่านค่า B_{max} และ H_{max} ตาม scale บน oscilloscope



รูปที่ 4.1 แสดงการผันขดลวดที่ถูกต้องบนแกน

4.2.5 ให้ทดลองเปลี่ยนความถี่หลายๆความถี่ สังเกตค่า B_{max} และ H_{max} ที่อ่านได้ (เมื่อเปลี่ยนความถี่ไป ต้องปรับให้ H มีค่าเท่าตามที่กำหนด)

4.3 ผลการทดลอง

จากการทดลองเมื่อนำแกนเฟอร์ไรต์ชนิด 2E6 (ตามมาตรฐานของ JIS) ขนาด $2.8 * 1.6 * 2$ cm มาทำการทดสอบที่ความถี่ 1 KH_z จะได้รูป B-H curve ดังรูปที่ 4.2

เมื่อเปลี่ยนความถี่ทดสอบเป็น 2 KH_z จะได้รูป B-H curve ดังรูปที่ 4.3

เมื่อนำแกนขนาด $2.2 * 1.4 * 0.8$ cm มาทำการทดสอบที่ความถี่ต่างๆ ได้

ผลการทดลองดังนี้

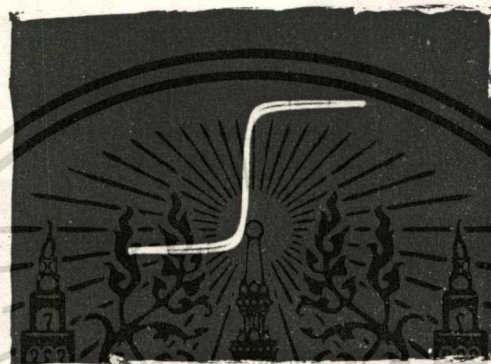
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ทดสอบ = 10 KHz ได้ผลดังรูปที่ 4.4

ที่ความถี่ทดสอบ = 20 KHz ได้ผลดังรูปที่ 4.5

ที่ความถี่ทดสอบ = 30 KHz ได้ผลดังรูปที่ 4.6

เมื่อทำการเปลี่ยนความถี่หลายๆ ความถี่ จะได้ค่าของ μ_r ของแกน โดยการวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า μ_r และความถี่ที่เปลี่ยนไปได้ดังรูปที่ 4.7

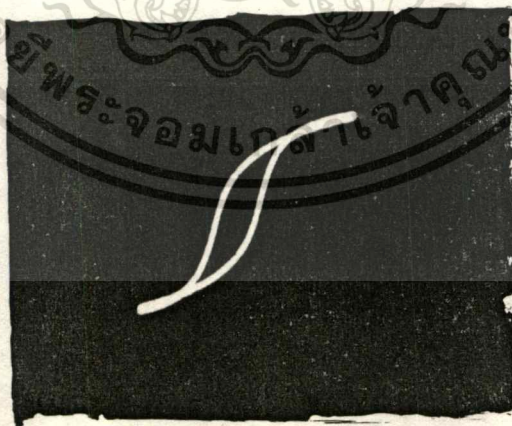


รูปที่ 4.2 แสดง B-H curve ของแกน

- ที่ความถี่ทดสอบ 1 KHz

- ได้ค่า $B_{max} = 0.30$ Wb/m²

$H_{max} = 300$ A.T/m



รูปที่ 4.3 แสดง B-H curve ของแกน

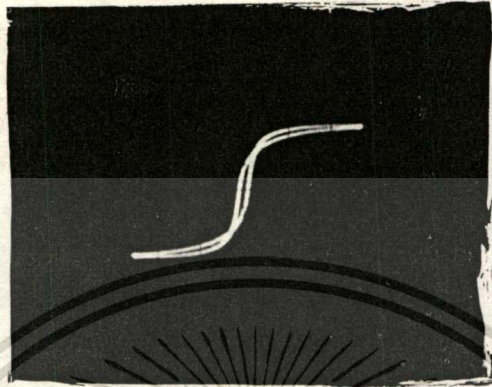
- ที่ความถี่ทดสอบ 2 KHz

- ได้ค่า $B_{max} = 0.16$ Wb/m²

$H_{max} = 300$ A.T/m

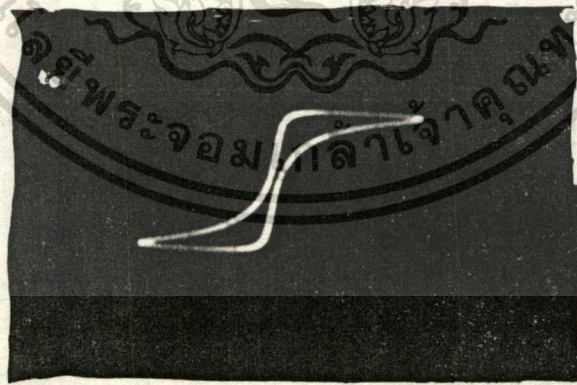
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



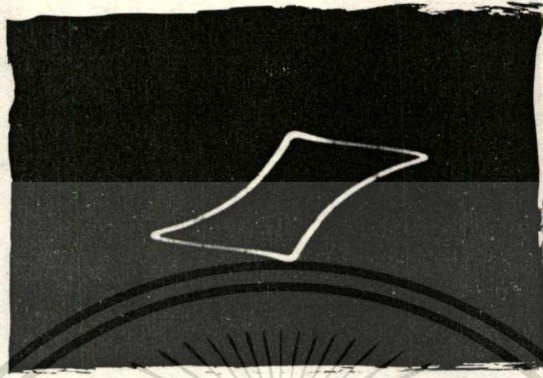
รูปที่ 4.4 แสดง B-H curve ของแกน

- ที่ความถี่ทดสอบ 10 KHz
- ได้ค่า $B_{max} = 0.30 \text{ Wb/m}^2$
- $H_{max} = 300 \text{ A.T/m}$



รูปที่ 4.5 แสดง B-H curve ของแกน

- ที่ความถี่ทดสอบ 20 KHz
- ได้ค่า $B_{max} = 0.18 \text{ Wb/m}^2$
- $H_{max} = 300 \text{ A.T/m}$

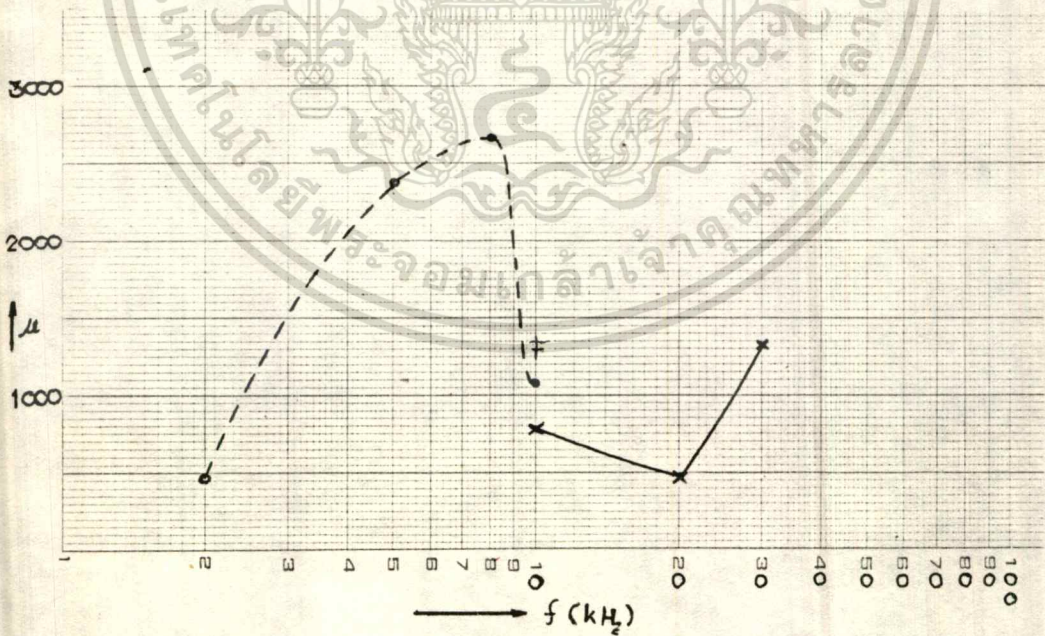


รูปที่ 4.6 แสดง B-H curve ของแกน

- ที่ความถี่ทดสอบ 30 KHz

- ได้ค่า $B_{max} = 0.5 \text{ Wb/m}^2$

$H_{max} = 300 \text{ A.T/m}$



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง μ และความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป

การพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีของประเทศไทย ปัจจุบันได้มีการพัฒนาทางภาคเกษตรกรรมไปเป็นอุตสาหกรรม หรือที่เรียกว่านิคส์ (NICS) แต่ในความเป็นจริงแล้วประเทศไทยยังขาดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย และสร้าง จึงทำให้การพัฒนาเป็นไปอย่างช้า และล่าช้า การพัฒนาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการผสมสารแม่เหล็ก และสร้างแกนเหล็กก็เช่นเดียวกันก็ยังขาดอุปกรณ์ในการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็ก ที่สร้างขึ้นมาว่าเหมาะสมกับงานหรือไม่ ซึ่งแต่ละงานก็จะใช้ความถี่ที่แตกต่างกันไป และแต่ละความถี่ ในแกนแต่ละแกนจะให้ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสูงสุด (B_{max}) ที่แตกต่างกัน และให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด (H_{max}) ที่แตกต่างกัน

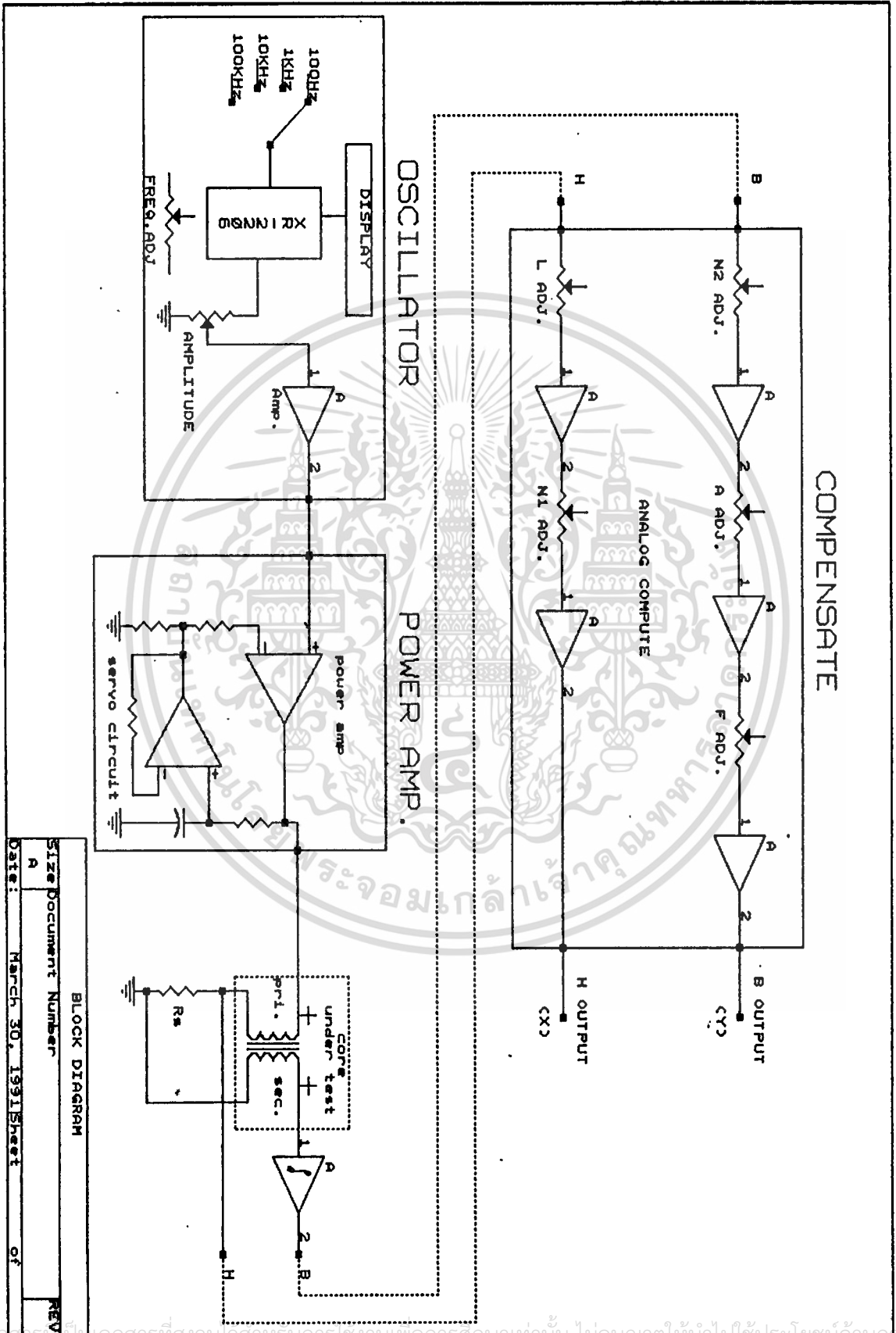
ปัจจุบันการสร้างเครื่องวัดแกนเหล็กได้แบ่งเป็น การวัดค่า B-H curve และวัดค่าของ n ที่เปลี่ยนไปตามความถี่ ซึ่งจากการสำรวจตามท้องตลาดปรากฏว่ามีการจำหน่ายเครื่องวัด B-H curve อยู่ในราคาที่แพงมาก ดังนั้นจึงได้มีการสร้างเครื่องวัด B-H curve นี้ขึ้นมา การใช้งานของเครื่องในโครงการนี้ได้มีหลักการวัด การใช้งานเหมือนกับเครื่องต่างประเทศ โดยใช้หลักการทดสอบที่ความถี่ต่างๆ แล้วอ่านค่า B_{max} , H_{max} และการใช้ความต้านทานแบบปรับละเอียด และตัวนับรอบ เป็นตัวคำนวณชุดเลขค่าต่างๆ จึงทำให้ต้นทุนในการสร้างถูกกว่าการคำนวณโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์มาก สิ่งที่ต้องปรับปรุงในโครงการนี้ก็คือความสามารถที่จะวัดได้ที่ความถี่สูงๆ ซึ่งจะต้องปรับปรุงใช้ power amp. ที่สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงๆ

อนึ่งในการสร้างเครื่องวัดวิเคราะห์ B-H curve ในโครงการนี้ประสบปัญหาการหาเครื่องมาตรฐานในการทดสอบความถูกต้อง ซึ่งไม่สามารถหาได้ในประเทศ ดังนั้นมาตรฐานความถูกต้องของเครื่องวัดในโครงการนี้อาจจะไม่ถูกต้องเท่าที่ควร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. แสดง BLOCK DIAGRAM ทั้งหมดของเครื่อง



BLOCK DIAGRAM

Size Document Number

A

REV

Date: March 30, 1991 Sheet of

ข. การใช้งานของเครื่อง

1-ข คำอธิบายหน้าที่ของขั้วต่อ และปุ่มปรับต่างๆบนเครื่อง

1. สวิตช์เลือกย่านความถี่

100 H _z	สำหรับการผลิตความถี่	10 H _z	ถึง	200 H _z
1 KH _z	สำหรับการผลิตความถี่	200 H _z	ถึง	2 KH _z
10 KH _z	สำหรับการผลิตความถี่	2 KH _z	ถึง	20 KH _z
100 KH _z	สำหรับการผลิตความถี่	20 KH _z	ถึง	200 KH _z

2. สวิตช์เลือกการคูณสำหรับการแสดงผล

- *1 เมื่อตั้งสวิตช์เลือกย่านความถี่ที่ 100 H_z และ 1 KH_z
- *10 เมื่อตั้งสวิตช์เลือกย่านความถี่ที่ 10 KH_z
- *100 เมื่อตั้งสวิตช์เลือกย่านความถี่ที่ 100KH_z

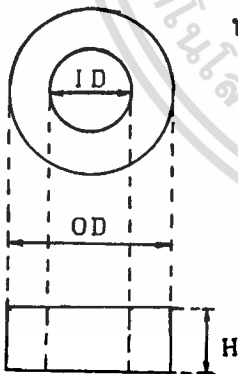
3. FREQUENCY ADJ. : เป็นตัวปรับความถี่ที่ต้องการทดสอบ

4. AMPLITUDE : เป็นตัวปรับแรงดันไฟ EXCITATION

5. OSC. OUT : เป็นขั้วต่อสายเพื่อส่งสัญญาณจาก OSCILATOR ไปที่ POWER AMP.

6. N₂ ADJ. : เป็นปุ่มปรับจำนวนรอบของขดลวด Secondary ที่พันบนแกนที่จะทดสอบปรับจำนวนรอบได้ตั้งแต่ 1-100 รอบ

7. A ADJ. : เป็นปุ่มปรับค่าพื้นที่หน้าตัดของแกนที่จะทดสอบ โดยการคำนวณหาค่าของ A จากสูตรข้างล่าง



OD = Outside Diameter [cm]

ID = Inside Diameter [cm]

H = Height [cm]

$$r_1 = ID/2, r_2 = OD/2$$

$$A = H * [\ln r_2/r_1]^2 / [1/r_1 - 1/r_2] \quad [cm^2]$$

โดย A สามารถปรับได้ตั้งแต่ 0.2 cm² - 100 cm²

8. F ADJ : เป็นปุ่มปรับความถี่ให้ตรงกับความถี่ที่จะทดสอบ เช่นจะทดสอบที่ความถี่ 1 KH_z ก็ปรับ F ADJ. ที่ 010 โดยต้องตั้งสวิตช์ด้านล่างของปุ่มปรับให้สอดคล้องกันด้วย

9. L ADJ. : เป็นปุ่มปรับความยาวแกนให้ตรงกับความยาวแกนที่จะทดสอบ โดยการคำนวณหาค่า L ของแกนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$L = [2 \ln(r_2/r_1)] / [1/r_1 - 1/r_2] \quad [cm]$$

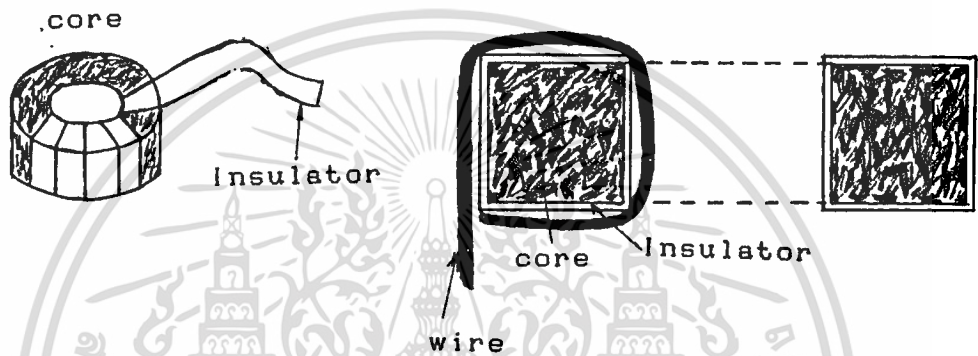
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคำนวณได้ค่า L เท่าไรก็ปรับให้ได้เท่ากับที่คำนวณได้
 ปุ่มปรับ L สามารถปรับได้ตั้งแต่ 0.2 cm - 100 cm

10. N_1 ADJ. : เป็นปุ่มปรับจำนวนรอบของขดลวด Primary ที่พันบนแกน
 ที่จะทดสอบ ซึ่งสามารถปรับจำนวนรอบได้ตั้งแต่ 1 - 100
 รอบ

2-ข ขั้นตอนการใช้งาน

1. ให้พันลวดบนแกนที่จะทดสอบตามรูปข้างล่างโดยใช้ฉนวนพันบนแกนก่อน
 ดังรูป

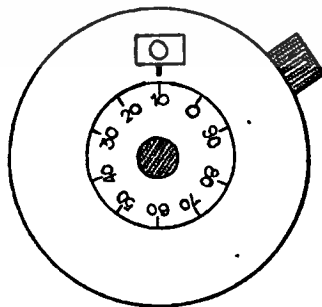


การพันลวดบนแกนโดยทั่วไปจะพันให้จำนวนรอบทางด้าน Primary เท่า
 กับทางด้าน Secondary โดยพันแบบ Uniform

2. ให้นำแกนที่จะทดสอบ วางลงบนกล่องวางแกน แล้วต่อขั้วให้ถูกต้อง
 หมายเหตุ

วิธีการทดสอบหาขั้วที่ถูกต้องอธิบายในหัวข้อ 2.4.4

3. ปรับค่าต่างๆ เช่น N_2 , A , F , L และ N_1 ให้ถูกต้อง ตามคำ
 อธิบายในหัวข้อ 1-ข อนึ่งการอ่านค่าบนตัวนับ สามารถอ่านได้ดังนี้ เช่นทำการ
 ทดสอบที่ความถี่ 1 KH_z ให้หมุน F ADJ. ให้ตัวเลขที่แสดงบนช่องเป็น \square
 และหมุนตัวปรับให้เลข 10 อยู่ตรงเครื่องหมายขีดตั้งแสดงในรูป



ดังนั้น ถ้าปรับจำนวนรอบเท่ากับ 35 รอบ ให้หมุน N ADJ. ให้ตัวเลขที่
 แสดงบนช่องเป็น \square และหมุนตัวปรับให้เลข 50 อยู่ตรงเครื่องหมายขีด

4. เปิดสวิตช์ Power ของเครื่อง ปรับความถี่ที่จะทดสอบ และปรับ F
 ADJ. ให้สอดคล้องกัน

5. กำหนดค่าของ B หรือ H ที่จะทดสอบไว้คงที่ค่าหนึ่ง ในโครงการนี้ จะกำหนดให้ H คงที่ ที่ค่าหนึ่ง เป็น A t/m เช่น กำหนด H = 300 A t/m

6. ปรับปุ่ม AMPLITUDE ให้แรงดันไฟ EXCITATION เพิ่มมากขึ้น เรื่อย ๆ (ในขณะนี้ให้ปรับ OSCILLOSCOPE ทำงานอยู่ในโหมด X-Y) จนกระทั่งได้รูป B-H curve ที่อ่านค่า H ได้ค่าเท่ากับที่กำหนดไว้ในข้อ 5 ควรปรับสเกลทางด้าน X และ Y ให้เหมาะสมกับการอ่านค่า อ่านค่าของ B_{max} ออกมา การเปลี่ยนความถี่ไปค่าต่างๆ จะต้องตั้งสวิตซ์การคูณ ในภาค OSCILLATOR และปุ่มปรับ F ADJ. ให้สอดคล้องกันด้วย ไม่เช่นนั้นจะได้ค่าที่ผิดๆ

ค. การแสดงการคำนวณเพื่อทดสอบความถูกต้องของการวัด

-การคำนวณหาค่า B

จาก $V(t) = -N \frac{d\phi}{dt}$
 $\phi = -\frac{1}{N} \int V(t) dt \quad (1-ค)$

แต่ $\phi = B A$

$B(t) = \phi / A$

จาก (1-ค) จะได้ $B(t) = -\frac{1}{N_2 A} \int V(t) dt$

แต่ $V(t) = V_{max} \sin \omega t$
 $B(t) = -\frac{V_{max}}{N_2 A} \int \sin \omega t dt$
 $= \left(\frac{V_{max}}{\omega N_2 A} \right) \cos \omega t ; \omega = 2\pi f$

$B(t) = \left(\frac{V_{max}}{2\pi f N A} \right) \cos \omega t \quad (2-ค)$

โดยที่ f มีหน่วยเป็น KH_z

N_2 เป็นจำนวนรอบของขดทาง Secondary

A เป็น พ.ท. หน้าตัดแกนตามการคำนวณในหัวข้อ ข.

$B(t) = \left(\frac{V_{max}}{2\pi f * 10^3 * N * A * 10^{-4}} \right) \cos \omega t$
 $= (1.59 \frac{V_{max}}{f N A}) \cos \omega t \quad (3-ค)$

โดย $V_{max} = V_p = V_{p-p} / 2$

จะได้ B(t) เป็น Wb/m²

-การคำนวณหาค่า H

จาก $\int H \cdot dl = N I$

โดยประมาณจะได้ $H = N I / L$

หรือ $H(t) = N i(t) / L$

$i(t) = V / R$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 V = แรงดันไฟที่ตกคร่อม R ที่ขด Primary
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(t) = N_1 V_m / L R_m$$

$$\text{และ } R_m = 1 \text{ ohm}$$

$$\text{ดังนั้น } H(t) = (N_1 / L) V_m \quad (4-ค)$$

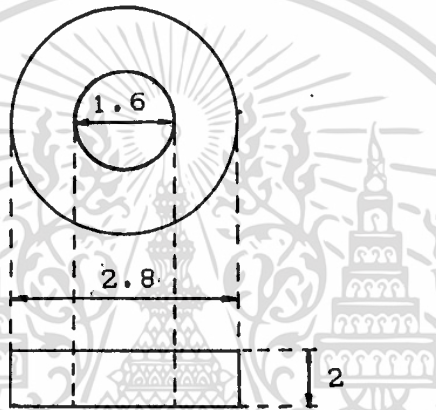
โดยที่ N_1 เป็นจำนวนรอบของขดทาง Primary

L เป็นความยาวของแกนที่จะทดสอบ ตามการคำนวณในหัวข้อ ข.

จะได้ $H(t)$ เป็น $A \text{ t/cm}$

$$= 100 * A \text{ t/cm} = A \text{ t/m}$$

ในการคำนวณทดสอบความถูกต้องของการวัด ในที่นี้ใช้แกนที่มีขนาดดังรูป เป็นแกนชนิด 2E6 (ตามมาตรฐาน JIS)



$$ID = 1.6 \text{ cm} \quad H = 2 \text{ cm}$$

$$OD = 2.8 \text{ cm}$$

$$r_1 = 0.8 \text{ cm} \quad r_2 = 1.4 \text{ cm}$$

$$A = H [\ln r_2 / r_1]^2 / [1/r_1 - 1/r_2]$$

$$= 2 [\ln 1.4 / 0.8]^2 / [1/0.8 - 1/1.4]$$

$$= 1.17 \text{ cm}^2$$

$$L = 2 \ln (r_2 / r_1) / [1/r_1 - 1/r_2]$$

$$= 2 \ln (1.4 / 0.8) / [1/0.8 - 1/1.4]$$

$$= 6.56 \text{ cm}$$

ในการทดสอบใช้ความถี่ที่ 1 KH_z และ $N_1 = N_2 = 25$ รอบ และดำเนินการวัดตามขั้นตอนที่กล่าวในหัวข้อ 2-ข

โดยกำหนดให้ H มีค่าคงที่ เท่ากับ 300 A t/m

จะวัดแรงดันไฟที่ขด Secondary หรือ $V(t) = 14.5 V_{p-p}$

$$V_{max} = 7.25 \text{ V}$$

และวัด $V_{R_m} = 1.45 V_{p-p} = 0.725 V_p$

-พิจารณา ค่า B_{max}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จากสมการ (3-ค) แทนค่าต่างๆลงไป ในสมการ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } B(t) &= [(1.59)(7.25)/(1)(25)(1.17)] \cos t \\ &= .39 \cos t \end{aligned}$$

∴ จะได้ B_{max} จากการคำนวณ = 0.39 Wb/m²

และ B_{max} จากการวัดโดยใช้เครื่อง = .30 Wb/m²

$$\text{ความผิดพลาด} = [1 - (.30/.39)] * 100 = 23 \%$$

-พิจารณาค่า H_{max}

จากสมการ (4-ค) แทนค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้

$$\text{จะได้ } H = (.725)(25)/6.56$$

$$= 2.76 \text{ A t/cm}$$

$$= 276 \text{ A t/m}$$

$$\text{ความผิดพลาด} = [1 - (276/300)] * 100 = 8 \%$$

ง. สิ่งที่ต้องปรับปรุง และจุดอ่อนของเครื่อง

1. ภาคกำเนิดความถี่ (OSCILLATOR)

ควรปรับปรุงเครื่องของสัญญาณรบกวน เมื่อใช้ในความถี่สูงๆจะมีสัญญาณรบกวนมาก เนื่องจากคุณภาพของภาค OSCILLATOR ไม่ดีพอ และโครงการนี้ จะยังไม่มีการทดสอบด้วยสัญญาณ SQUARE WAVE เนื่องจากการคำนวณการชดเชยต่างๆทำเตรียมไว้สำหรับสัญญาณแบบ SINE WAVE เท่านั้น

ถ้าหากจะใช้การทดสอบที่ความถี่สูง ควรจะใช้เครื่องกำเนิดความถี่จากภายนอกที่คุณภาพดีป้อนเข้าแทน จะทำให้สัญญาณรบกวนต่างๆ ลดน้อยลง

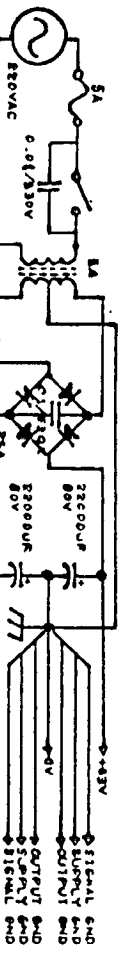
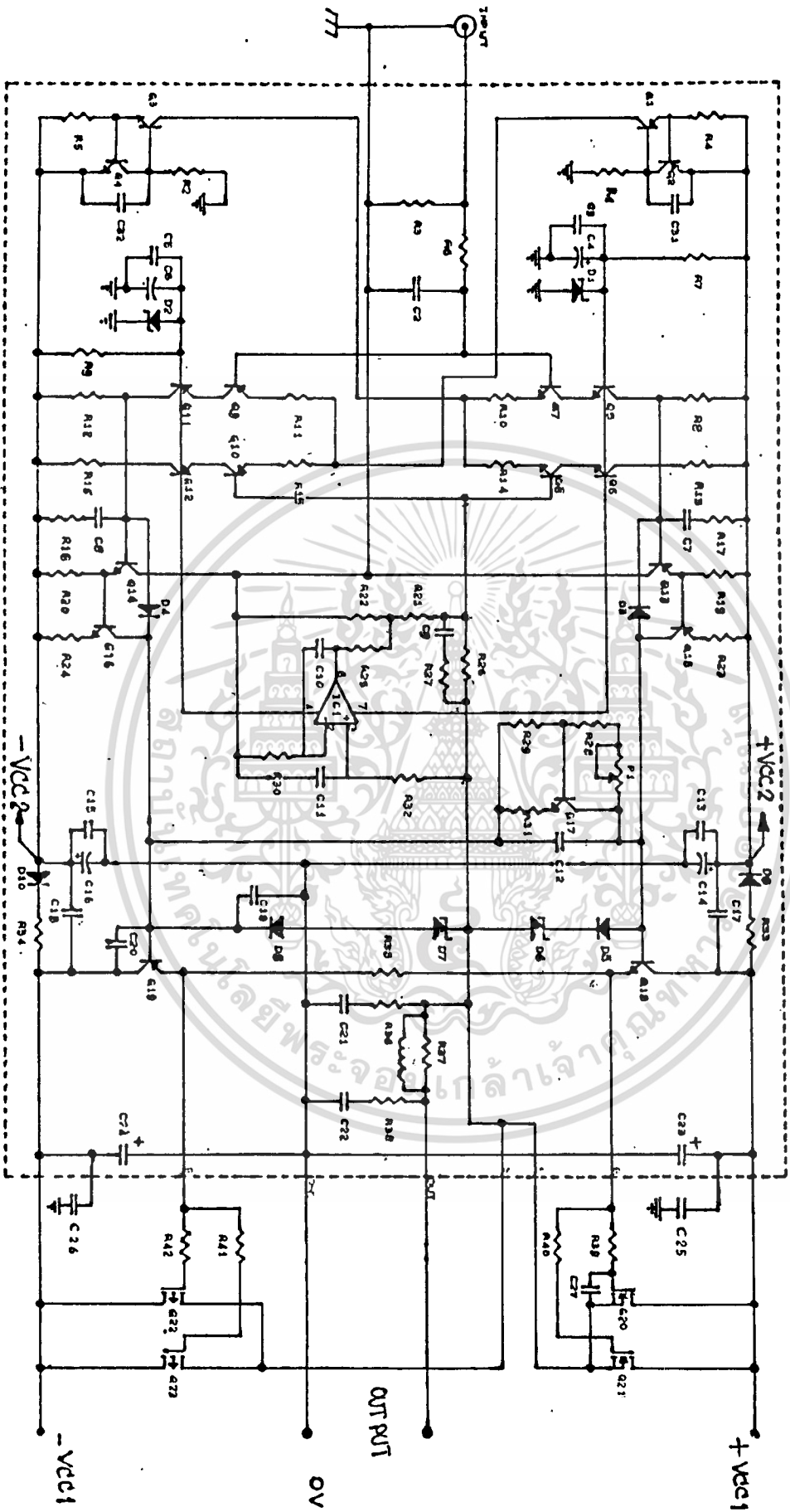
2. ภาค POWER AMP.

ควรปรับปรุง POWER AMP ให้สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงๆ ขึ้น โดยกำลังทาง OUT PUT ไม่ตกลงที่ความถี่สูงๆขึ้น

3. ภาค INTEGRATOR

ควรปรับปรุงการตอบสนองทางความถี่ของวงจร ให้สามารถตอบสนองความถี่ได้ในย่านที่กว้างมากขึ้น

TULA 115 WATT SERVO



MILBEMEP "SERVO"
 TULA CO., LTD. 1351 W. U.S. ROAD, PANDAN
 DISTRICT, SINGAPORE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Monolithic Function Generator

GENERAL DESCRIPTION

The XR-2206 is a monolithic function generator integrated circuit capable of producing high quality sine, square, triangle, ramp, and pulse waveforms of high stability and accuracy. The output waveforms can be both amplitude and frequency modulated by an external voltage. Frequency of operation can be selected externally over a range of 0.01 Hz to more than 1 MHz.

The circuit is ideally suited for communications, instrumentation, and function generator applications requiring sinusoidal tone, AM, FM, or FSK generation. It has a typical drift specification of 20 ppm/°C. The oscillator frequency can be linearly swept over a 2000:1 frequency range, with an external control voltage, having a very small affect on distortion.

FEATURES

- Low-Sine Wave Distortion
- Excellent Temperature Stability
- Wide Sweep Range
- Low-Supply Sensitivity
- Linear Amplitude Modulation
- TTL Compatible FSK Controls
- Wide Supply Range
- Adjustable Duty Cycle

0.5% Typical
20 ppm/°C, Typical
2000:1, Typical
0.01% V, Typical

10V to 26V
1% to 99%

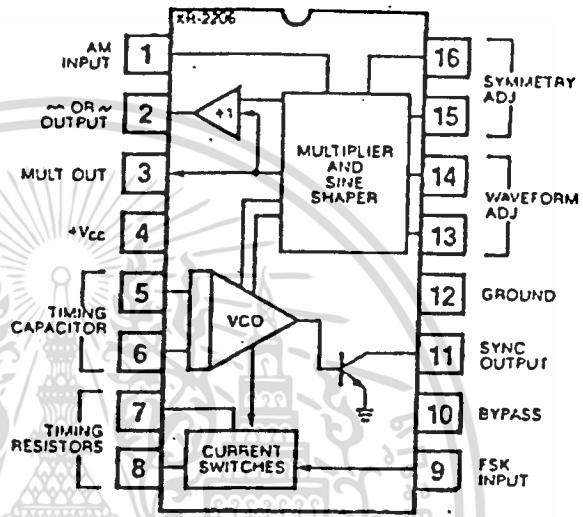
APPLICATIONS

- Waveform Generation
- Sweep Generation
- AM/FM Generation
- V/F Conversion
- FSK Generation
- Phase-Locked Loops (VCO)

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Power Supply	26V
Power Dissipation	750 mW
Derate Above 25°C	6 mW/°C
Total Timing Current	6 mA
Storage Temperature	-65°C to +150°C

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



ORDERING INFORMATION

Part Number	Package	Operating Temperature
XR-2206M	Ceramic	-55°C to +125°C
XR-2206N	Ceramic	0°C to +70°C
XR-2206P	Plastic	0°C to +70°C
XR-2206CN	Ceramic	0°C to +70°C
XR-2206CP	Plastic	0°C to +70°C

SYSTEM DESCRIPTION

The XR-2206 is comprised of four functional blocks; a voltage-controlled oscillator (VCO), an analog multiplier and sine-shaper; a unity gain buffer amplifier; and a set of current switches.

The VCO actually produces an output frequency proportional to an input current, which is produced by a resistor from the timing terminals to ground. The current switches route one of the timing pins current to the VCO controlled by an FSK input pin, to produce an output frequency. With two timing pins, two discrete output frequencies can be independently produced for FSK Generation Applications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2206

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Test Conditions: Test Circuit of Figure 1, $V^+ = 12V$, $T_A = 25^\circ C$, $C = 0.01 \mu F$, $R_1 = 100 k\Omega$, $R_2 = 10 k\Omega$, $R_3 = 25 k\Omega$ unless otherwise specified S_1 open for triangle, closed for sine wave.

PARAMETERS	XR-2206M			XR-2206C			UNITS	CONDITIONS
	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
GENERAL CHARACTERISTICS								
Single Supply Voltage	10		26	10		26	V	$R_1 \geq 10 k\Omega$
Split-Supply Voltage	± 5		± 13	± 5		± 13	V	
Supply Current		12	17		14	20	mA	
OSCILLATOR SECTION								
Max. Operating Frequency	0.5	1		0.5	1		MHz	$C = 1000 pF$, $R_1 = 1 k\Omega$ $C = 50 \mu F$, $R_1 = 2 M\Omega$ $f_0 = 1/R_1 C$ $0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$, $R_1 = R_2 = 20 k\Omega$ $V_{LOW} = 10V$, $V_{HIGH} = 20V$, $R_1 = R_2 = 20 k\Omega$ $f_H @ R_1 = 1 k\Omega$ $f_L @ R_1 = 2 M\Omega$
Lowest Practical Frequency		0.01			0.01		Hz	
Frequency Accuracy		± 1	± 4		± 2		% of f_0	
Temperature Stability		± 10	± 50		± 20		ppm/ $^\circ C$	
Supply Sensitivity		0.01	0.1		0.01		%/V	
Sweep Range	1000:1	2000:1			2000:1		$f_H = f_L$	
Sweep Linearity							%	
10:1 Sweep		2			2		%	
1000:1 Sweep		8			8		%	
FM Distortion		0.1			0.1		%	
Recommended Timing Components								See Figure 4.
Timing Capacitor: C	0.001		100	0.001		100	μF	
Timing Resistors: R_1 & R_2	1		2000	1		2000	k Ω	
Triangle Sine Wave Output								See Note 1, Figure 2.
Triangle Amplitude		160			160		mV/k Ω	
Sine Wave Amplitude	40	60	80		60		mV/k Ω	Figure 1, S_1 Open Figure 1, S_1 Closed
Max. Output Swing		6			6		V p-p	
Output Impedance		600			600		Ω	
Triangle Linearity		1			1		%	
Amplitude Stability		0.5			0.5		dB	For 1000:1 Sweep See Note 2.
Sine Wave Amplitude Stability		4800			4800		ppm/ $^\circ C$	
Sine Wave Distortion								$R_1 = 30 k\Omega$ See Figures 6 and 7.
Without Adjustment		2.5			2.5		%	
With Adjustment		0.4	1.0		0.5	1.5	%	
Amplitude Modulation								For 95% modulation
Input Impedance	50	100		50	100		k Ω	
Modulation Range		100			100		%	
Carrier Suppression		55			55		dB	
Linearity		2			2		%	
Square-Wave Output								Measured at Pin 11. $C_L = 10 pF$ $C_L = 10 pF$ $I_L = 2 mA$ $V_{11} = 26V$ See section on circuit controls Measured at Pin 10.
Amplitude		12			12		V p-p	
Rise Time		250			250		nsec	
Fall Time		50			50		nsec	
Saturation Voltage		0.2	0.4		0.2	0.6	V	
Leakage Current		0.1	20		0.1	100	μA	
FSK Keying Level (Pin 9)	0.8	1.4	2.4	0.8	1.4	2.4	V	
Reference Bypass Voltage	2.9	3.1	3.3	2.5	3	3.5	V	

Note 1: Output amplitude is directly proportional to the resistance, R_3 , on Pin 3. See Figure 2.

Note 2: For maximum amplitude stability, R_3 should be a positive temperature coefficient resistor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2206

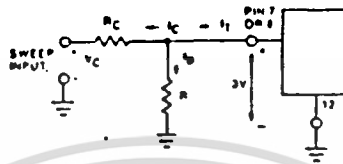


Figure 9. Circuit Connection for Frequency Sweep.

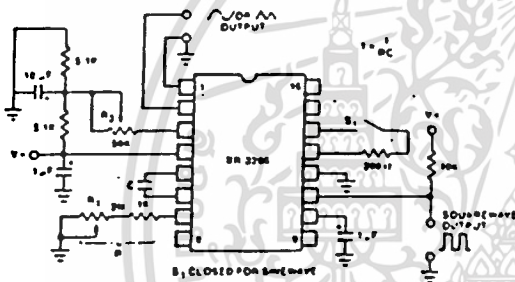


Figure 10. Circuit for Sine Wave Generation without External Adjustment. (See Figure 2 for Choice of R_3 .)

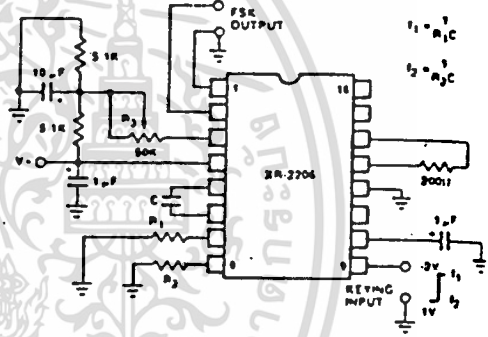


Figure 12. Sinusoidal FSK Generator.

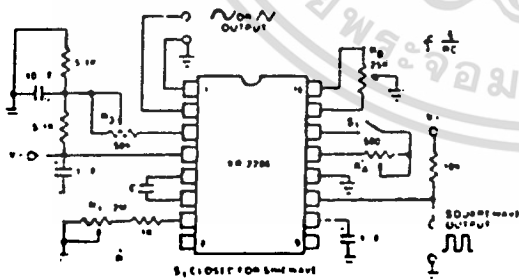


Figure 11. Circuit for Sine Wave Generation with Minimum Harmonic Distortion. (R_3 Determines Output Swing—See Figure 2.)

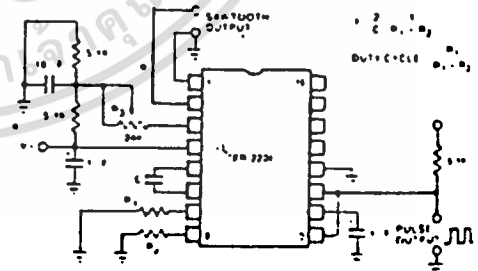


Figure 13. Circuit for Pulse and Ramp Generation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2206

Frequency-Shift Keying:

The XR-2206 can be operated with two separate timing resistors, R_1 and R_2 , connected to the timing Pin 7 and 8, respectively, as shown in Figure 12. Depending on the polarity of the logic signal at Pin 9, either one or the other of these timing resistors is activated. If Pin 9 is open-circuited or connected to a bias voltage $\geq 2V$, only R_1 is activated. Similarly, if the voltage level at Pin 9 is $\leq 1V$, only R_2 is activated. Thus, the output frequency can be keyed between two levels, f_1 and f_2 , as:

$$f_1 = 1/R_1C \text{ and } f_2 = 1/R_2C$$

For split-supply operation, the keying voltage at Pin 9 is referenced to V^- .

Output DC Level Control:

The dc level at the output (Pin 2) is approximately the same as the dc bias at Pin 3. In Figures 10, 11 and 12, Pin 3 is biased midway between V^+ and ground, to give an output dc level of $\approx V^+/2$.

APPLICATIONS INFORMATION

Sine Wave Generation

Without External Adjustment:

Figure 10 shows the circuit connection for generating a sinusoidal output from the XR-2206. The potentiometer, R_1 at Pin 7, provides the desired frequency tuning. The maximum output swing is greater than $V^+/2$, and the typical distortion (THD) is $< 2.5\%$. If lower sine wave distortion is desired, additional adjustments can be provided as described in the following section.

The circuit of Figure 10 can be converted to split-supply operation, simply by replacing all ground connections with V^- . For split-supply operation, R_3 can be directly connected to ground.

With External Adjustment:

The harmonic content of sinusoidal output can be reduced to $\approx 0.5\%$ by additional adjustments as shown in Figure 11. The potentiometer, R_A , adjusts the sine-shaping resistor, and R_B provides the line adjustment for the waveform symmetry. The adjustment procedure is as follows:

1. Set R_B at midpoint, and adjust R_A for minimum distortion.
2. With R_A set as above, adjust R_B to further reduce distortion.

Triangle Wave Generation

The circuits of Figures 10 and 11 can be converted to triangle wave generation, by simply open-circuiting Pin 13 and 14 (i.e., S_1 open). Amplitude of the triangle is approximately twice the sine wave output.

FSK Generation

Figure 12 shows the circuit connection for sinusoidal FSK signal operation. Mark and space frequencies can be independently adjusted, by the choice of timing resistors, R_1 and R_2 ; the output is phase-continuous during transitions. The keying signal is applied to Pin 9. The circuit can be converted to split-supply operation by simply replacing ground with V^- .

Pulse and Ramp Generation

Figure 13 shows the circuit for pulse and ramp waveform generation. In this mode of operation, the FSK keying terminal (Pin 9) is shorted to the square-wave output (Pin 11), and the circuit automatically frequency-shifts itself between two separate frequencies during the positive-going and negative-going output waveforms. The pulse width and duty cycle can be adjusted from 1% to 99%, by the choice of R_1 and R_2 . The values of R_1 and R_2 should be in the range of 1 k Ω to 2 M Ω .

PRINCIPLES OF OPERATION

Description of Controls

Frequency of Operation:

The frequency of oscillation, f_o , is determined by the external timing capacitor, C , across Pin 5 and 6, and by the timing resistor, R , connected to either Pin 7 or 8. The frequency is given as:

$$f_o = \frac{1}{RC} \text{ Hz}$$

and can be adjusted by varying either R or C . The recommended values of R , for a given frequency range, as shown in Figure 4. Temperature stability is optimum for $4 \text{ k}\Omega < R < 200 \text{ k}\Omega$. Recommended values of C are from 1000 pF to 100 μF .

Frequency Sweep and Modulation:

Frequency of oscillation is proportional to the total timing current, I_T , drawn from Pin 7 or 8:

$$f = \frac{320 I_T \text{ (mA)}}{C \text{ (\mu F)}} \text{ Hz}$$

Timing terminals (Pin 7 or 8) are low-impedance points, and are internally biased at $+3V$, with respect to Pin 12. Frequency varies linearly with I_T over a wide range of current values, from 1 μA to 3 mA. The frequency can be controlled by applying a control voltage, V_C , to the activated timing pin as shown in Figure 9. The frequency of oscillation is related to V_C as:

$$f = \frac{1}{RC} \left(1 + \frac{R}{RC} \left(1 - \frac{V_C}{3} \right) \right) \text{ Hz}$$

XR-2206

where V_C is in volts. The voltage-to-frequency conversion gain, K , is given as:

$$K = \frac{\partial f}{\partial V_C} = - \frac{0.32}{R_C C} \text{ Hz/V}$$

CAUTION: For safety operation of the circuit, I_T should be limited to ≤ 3 mA.

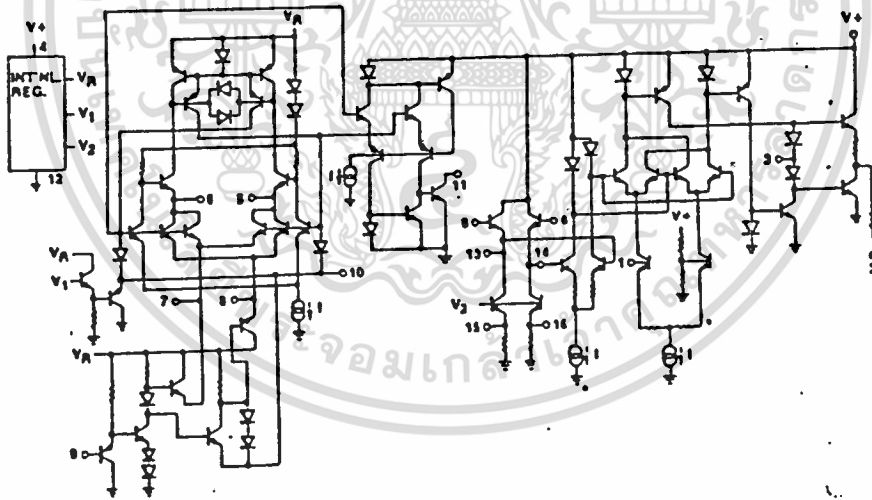
Output Amplitude:

Maximum output amplitude is inversely proportional to the external resistor, R_3 , connected to Pin 3 (see Figure 2). For sine wave output, amplitude is approximately 60 mV peak per k Ω of R_3 ; for triangle, the peak amplitude is approximately 160 mV peak per k Ω of R_3 . Thus, for example, $R_3 = 50$ k Ω would produce approximately ± 3 V sinusoidal output amplitude.

Amplitude Modulation:

Output amplitude can be modulated by applying a dc bias and a modulating signal to Pin 1. The internal impedance at Pin 1 is approximately 100 k Ω . Output amplitude varies linearly with the applied voltage at Pin 1, for values of dc bias at this pin, within ± 4 volts of $V^+ / 2$ as shown in Figure 5. As this bias level approaches $V^+ / 2$ the phase of the output signal is reversed, and the amplitude goes through zero. This property is suitable for phase-shift keying and suppressed-carrier AM generation. Total dynamic range of amplitude modulation is approximately 55 dB.

CAUTION: AM control must be used in conjunction with a well-regulated supply, since the output amplitude now becomes a function of V^+ .



EQUIVALENT SCHEMATIC DIAGRAM

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำ ชี้แนะ และสนับสนุนด้านอุปกรณ์จาก อ.สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของโครงการนี้

ขอขอบคุณ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชานิสกลส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับ วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ หลักการทดสอบรวมถึงเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับโครงการชิ้นนี้ รวมไปถึงการแนะนำด้านวิชาการ ตลอดจนได้รับการช่วยเหลือจาก คุณ สุรศักดิ์ มนูญพานิชย์ ด้านเอกสารหลักการวัดของโครงการนี้ คุณ ชีรวัฒน์ อุตมดี ที่ให้คำปรึกษาด้านวงจร และ คุณ กอบกุล นาคสิทธิ์ ที่ให้คำปรึกษาด้านเอกสารในการเขียนปริญญาโทฉบับนี้

และในการจัดพิมพ์ปริญญาโทฉบับนี้ ยังได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลดังต่อไปนี้

1. คุณ มะลิวัลย์ สุนประชา
2. คุณ ศิริพร ชัยศิลป์เจริญ
3. คุณ ศิริพร ปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. V. JOSEPH THOTTUVELIL, THOMAS G. WILSON, AND HARRY A. OWEN, JR., "High-Frequency Measurement techniques for magnetic cores", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONIC VOL.5.NO.1, JANURY 1990
2. Nikkei Electronic's editorial staff, THE MEASUREMENT OF THE HIGH FREQUENCY CHARACTERISTICS OF MAGNETIC MATERIALS, Masayuki Kido, Test & Measuring Instruments Division, IWATSU ELECTRIC CO., LTD
3. RAMAKANT A. GAYAKWAD " OP-AMP AND LINEAR INTEGRATED CIRCUIT", Englewood cliffs, (New Jersey), PP. 256-259, 498-500, 1988
4. รศ.ดร. นีระศักดิ์ วรสุนทรโรสถ "เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1", หน้า 29-120, โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าวิทยาเขตพระนครเหนือ 2523
5. รศ. สัมพันธ์ หาญขเล "เครื่องกลไฟฟ้า 1", หน้า 2-1, 2-46, 2523
6. ไพसान ปราณีตพลกรัง "ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ บอกความถี่เป็นตัวเลข", เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 91 หน้า 188-195