

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุแม่เหล็ก (Magnetic Materials) [2]

วงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีบทบาทที่สำคัญในการประกอบเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์ต่างๆ โดยที่สารแม่เหล็กของหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำขึ้นจากวัสดุแม่เหล็กแบบอ่อน (Soft Magnetic Material) ซึ่งมักใช้งานที่ความถี่ต่ำ 50-60Hz จนกระทั่งความถี่สูงระดับ MHz ในขณะที่วัสดุแม่เหล็กแบบแข็ง (Hard Magnetic Material) มักใช้ทำเป็นแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnetic)

2.1.1 วัสดุแม่เหล็กแบบอ่อน (Soft Magnetic Material)

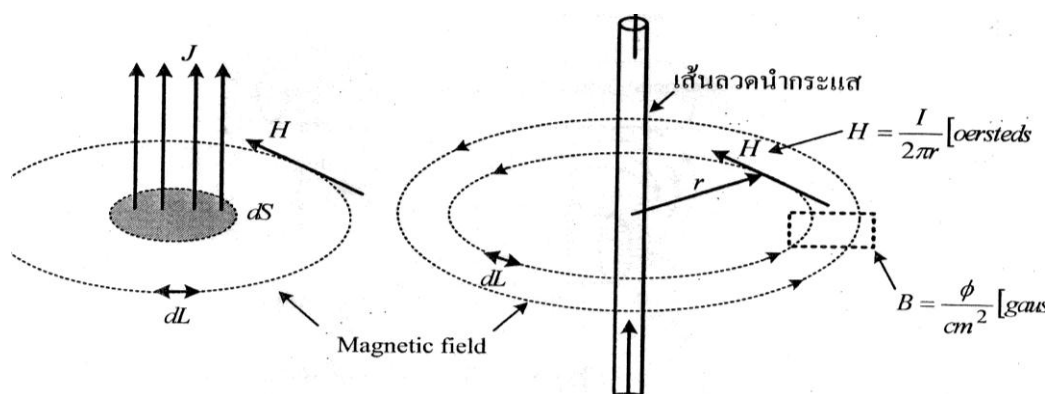
เป็นวัสดุแม่เหล็กที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่นวัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกนั้นมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่ำ (Low Iron-Loss Steel) ในขณะที่ความซึมซาบสัมพัทธ์สูง นิยมใช้ในการทำตัวเหนี่ยวนำและหม้อแปลง โคนแกนแม่เหล็กมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆซ้อนกัน (Core-Lamination) อีกทั้งนิยมใช้ในการทำเครื่องจักรไฟฟ้าแบบหมุนอีกด้วย วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกนี้มักทำจากเหล็ก (Iron) และนิกเกิล (Nickel) ใช้งานที่ความถี่ต่ำ 50-60Hz ในขณะที่วัสดุแกนแม่เหล็กที่ทำจากเฟอร์ไรต์นั้นทำจากเซรามิกออกไซด์ของวัสดุ เช่น Mn, Zn, Ni, Cu, Ba และอื่นๆ ซึ่งถูกผสมกับออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) ใช้งานตั้งแต่ย่านความถี่ต่ำประมาณ 1kHz จนถึงประมาณ 100MHz

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลจำเพาะต่างๆของวัสดุที่ใช้ทำแกนแม่เหล็ก

วัสดุแกนแม่เหล็ก	B_{sat} (T)	μ_r	ρ ($\mu\Omega - cm$)	$Wg_{(max)}$ (j/cm ³)
Ferrite-I (Ni-Zn)	0.2-0.3	150	10^{11}	0.035
Ferrite-II (Nn-Zn)	0.3-0.4	1000-4000	10^8	0.143
Nickel alloys (48%)	1.5	40000	48	0.895
Metallic glass/metglass	1.6	10000	125	1.018
Silicon-steel (2.5%)	2.0	5000	40	1.59
Core หรือarmature-iron	2.1	4500	25	1.755
Low silicon-iron	2.2	2700	10	1.925

2.1.2 หน่วยแม่เหล็ก

วงจรแม่เหล็กสามารถอธิบายได้จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's -Law) ตามภาพที่ 2.1 การอินทิเกรตความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity; H) ในวงปิดใดๆจะมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลในวงปิดนั้น



ภาพที่ 2.1 สนามแม่เหล็ก (Magnetic Filed)

$$\int H \cdot dL = \int J \cdot dS = \sum I = NI = \mathcal{F} \quad (2.1)$$

$$\int J dS = I(\text{close}) \quad (2.2)$$

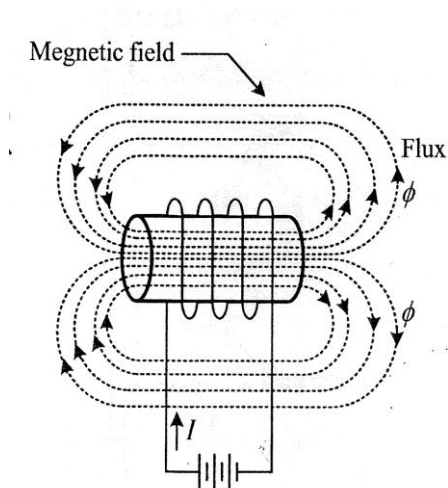
เมื่อ

H = ความเข้มสนามแม่เหล็ก, Magnetic Field Intensity (A-turns/m)

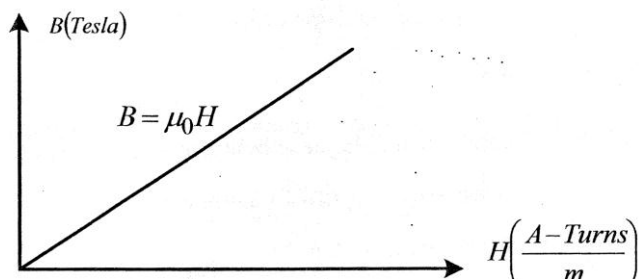
dL = ความยาวช่วงสั้นของสนามแม่เหล็ก, Differential length of magnetic field(m)

J	= ความหนาแน่นของกระแส (A/m^2)
dS	= พื้นที่ที่กระแสไหลผ่าน Differential Surface (m^2)
f	= แรงเคลื่อนแม่เหล็ก, Magneto Motive Force (mmf)
I	= กระแส, Current(A)
ΣI	= ผลรวมของกระแส, Total Current (A)
N	= จำนวนรอบของขดลวด (Turns)
B	= ความหนาแน่นของ (เส้นแรงแม่เหล็ก Tesla)

จากหลักการในภาพที่ 2.1 เมื่อนำขดลวดมาพันหลายๆ รอบในแกนอากาศตามภาพที่ 2.2 และจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดจะเกิดการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux) อยู่รอบๆ ขดลวดและมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น โดยที่ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กนั้นถูกกำหนดจากผลคูณของกระแสและจำนวนรอบของขดลวด (N) หรือเรียกอีกอย่างว่า Magneto Motive Force คือแรงผลคูณของกระแสและจำนวนรอบของขดลวด (f) หรือ mmf เช่นเดียวกับแม่เหล็กถาวรแบบแท่ง ขดลวดแกนอากาศในบริเวณที่มีเส้นแรงแม่เหล็กไหลออกถูกกำหนดให้เป็นขั้วเหนือและในตรงกันข้ามบริเวณขั้วใต้คือปลายขดลวดที่มีเส้นแรงแม่เหล็กไหลเข้า

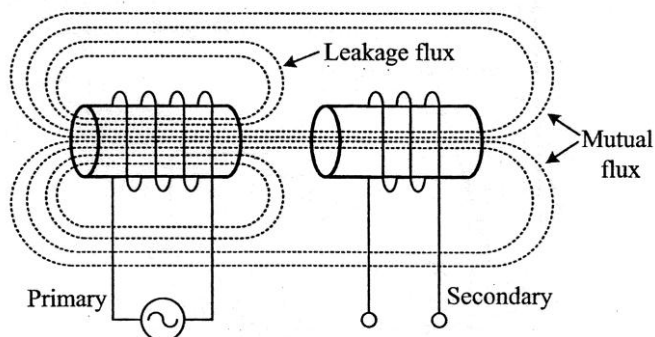


ภาพที่ 2.2 การกระจายของสนามแม่เหล็กในขดลวดแกนอากาศ



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H

จากภาพที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B และความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็ก H อัตราส่วนระหว่าง B ต่อ H นี้เรียกว่า ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability, μ) สำหรับขดลวดแกนอากาศอัตราส่วนของ B ต่อ H มีค่าเป็นหนึ่ง (Unity) เมื่อคำนวณในระบบ cgs หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Gauss Per Oersted (G/Oe) ซึ่งเออร์สเตด (Oersted) (เป็นชื่อของนักวิทยาศาสตร์เกิดที่กรุงโคเปนเฮเกน ค.ศ. 1820 ประมาณ 190 กว่าปีมาแล้ว) โดยกำหนดให้ $1 \text{ Oe} = ((1000/4\pi)) \text{ A/m}$

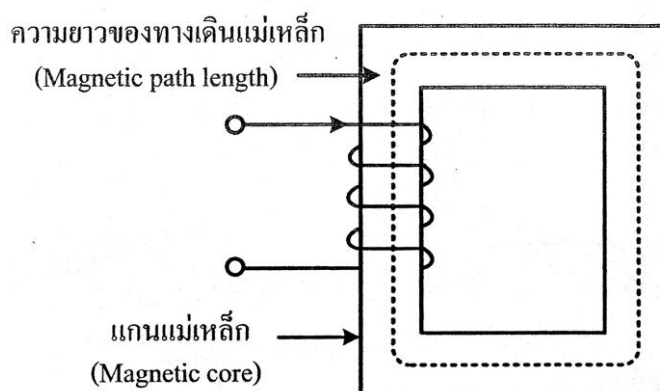


ภาพที่ 2.4 หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างง่าย

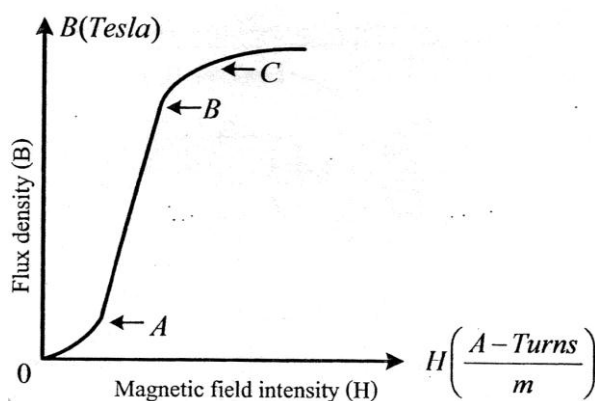
หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างง่ายประกอบไปด้วย 2 ขดลวดคือขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดปฐมภูมิทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก และในขดลวดทุติยภูมิเกิดการเหนี่ยวนำเส้นแรงแร่วมกันเรียกว่า Mutual Flux ซึ่ง Mutual Flux นี้ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง ในขณะที่เดียวกันเส้นแรงแที่ไม่มีการเชื่อมโยงระหว่าง 2 ขดลวดเรียกว่าเส้นแรงแรั่วไหล (Leakage Flux) ดังภาพที่ 2.4

วัสดุส่วนใหญ่เป็นดิวาน้ำที่เย็บสำหรับแม่เหล็กไหลผ่าน ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กต่ำตัวอย่างเช่นในสูญญากาศมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กในระบบ cgs เท่ากับ 1 และวัสดุที่

ไม่ใช่สารแม่เหล็ก (Nonmagnetic Material) เช่น อากาศ กระจก และทองแดง ก็มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กเท่ากับ 1 เช่นกัน แต่ก็ยังมีวัสดุจำนวนน้อยที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง เช่น เหล็ก นิกเกิล โคบอล และ แอลลอย ซึ่งมีค่าความซึมซาบอยู่ระหว่างหลักร้อยจนกระทั่งหลักพัน ดังนั้นเพื่อที่จะปรับปรุงขดลวดแกนอากาศซึ่งมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กต่ำมากๆ จึงจำเป็นที่ต้องใช้แกนแม่เหล็กที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูงๆแทน เนื่องจากมีข้อดีคือ สามารถควบคุมเส้นแรงแม่เหล็กให้ไหลอยู่ในแกนแม่เหล็กได้ดังแสดงในภาพที่ 2.5



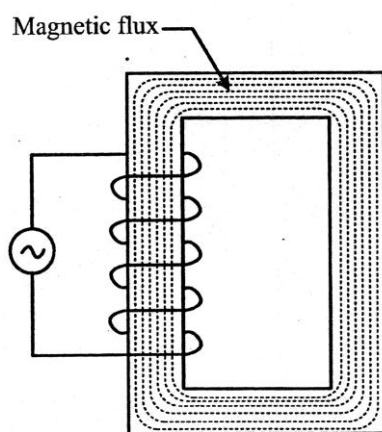
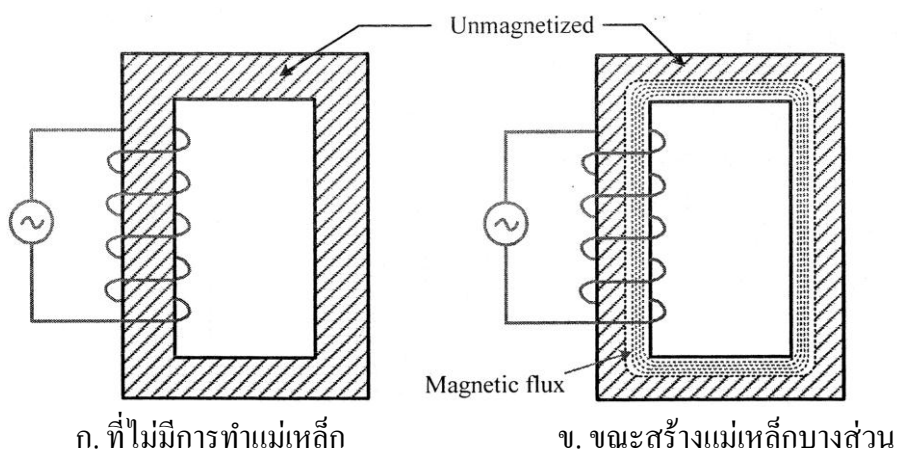
ภาพที่ 2.5 เส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดพันบนแกนแม่เหล็ก



ภาพที่ 2.6 เส้นโค้งการสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetization Curve)

เมื่อมีการจ่ายกระแสเข้าที่ขดลวดโดยที่แกนแม่เหล็กที่ทำจากวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกทำให้เกิดความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) เพิ่มขึ้นจากศูนย์อย่างช้าๆ ดังแสดงตามภาพที่ 2.6 (ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) จะถูกพล็อตตามฟังก์ชันของ H) ซึ่งค่าความหนาแน่นของเส้น

แรงแม่เหล็กนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนถึงจุด A จากนั้นค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุด B และถดถอยจากจุด B ดูเหมือนว่าเกือบจะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของ H เนื่องจากตำแหน่งถดถอยจากจุด B แกนแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัว จุด C เป็นจุดที่แกนแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวโดยเมื่อเกิดการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็กอัตราส่วนของ B/H จะเข้าใกล้หนึ่ง (Unity) ในหน่วยของ cgs เช่นเดียวกับขดลวดแกนอากาศดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ภาพที่ 2.7 แสดงการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนแม่เหล็ก ซึ่งการไหลของเส้นแรงจะเริ่มต้นจากด้านในแกนจนกระทั่งเต็มแกนก่อนที่จะเกิดการอิ่มตัว

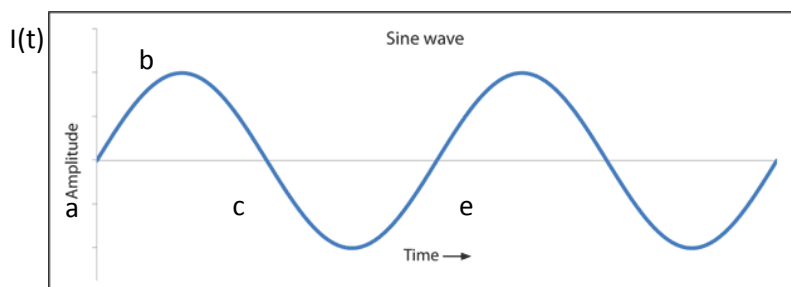


ค. การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กก่อนเกิดการอิ่มตัว

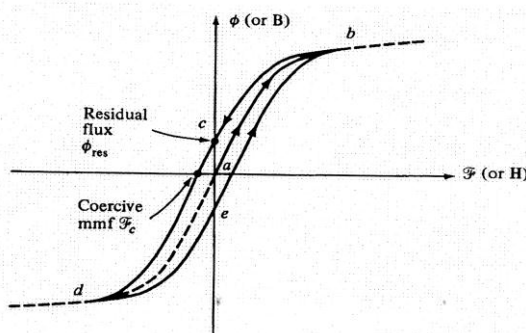
ภาพที่ 2.7 ลักษณะการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนแม่เหล็ก

2.1.3 การเกิดวงฮิสเตอร์ซิซิส (Hysteresis Loop)

เมื่อวัสดุแม่เหล็กได้รับการกระตุ้นจากกระแสสลับตามฟังก์ชันในภาพที่ 2.8ก. พบว่าเมื่อกระแสเริ่มเกิดขึ้นที่จุด a ตามรูป จนกระทั่งถึงค่ากระแสสูงสุดที่จุด B ความสัมพันธ์ ระหว่าง B และ H จะเป็นเส้นที่พุ่งออกจากจุดกำเนิดตามแนว ab (ดังภาพที่ 2.8ข.) หลังจากที่กระแสมีค่าลดลงมายังจุด c ซึ่งเป็นจุดที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์ ($i = 0, H = 0$) พบว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่จุดนี้กลับมีค่าไม่เป็นศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของเส้นแรงที่ตกค้างในแกนเหล็ก (Residue Flux) และเมื่อเวลาผ่านไป กระแสเปลี่ยนค่ามายังจุด d ซึ่งเป็นจุดที่มีค่ากระแสสูงสุดแต่มีทิศตรงข้ามกับจุด b ความสัมพันธ์ ระหว่าง B-H ก็จะมีทิศกลับลงมาทางด้านล่างของแกน H เมื่อกระแสลดลงไปยังจุด e ($i = 0, H = 0$) ก็จะเกิดอิทธิพลของ เส้นแรงตกค้างดังที่กล่าวไว้แล้วดังนั้นเมื่อกระแสเปลี่ยนแปลงไปหลายๆ ไซเคิล ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ของ B-H จะซ้ำเดิมเกิดเป็นลักษณะของลูป (loop) เรียกว่า Hysteresis Loop การเกิดเส้นแรงตกค้างในแกนเหล็กจะทำให้เกิดความสูญเสียขึ้นเรียกว่า Hysteresis Losses โดยที่ความสูญเสียนี้จะมีค่ามากหรือน้อยสามารถพิจารณาได้จากขนาดของ Hysteresis Losses ถ้า ลูปมีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียมากในทางตรงข้าม ถ้าลูปมีขนาดเล็กก็จะมีกำลังสูญเสีย น้อย กำลังสูญเสียเนื่องจาก Hysteresis (P_h) แสดงไว้ในสมการที่ (2.3)



ก. กระแสไฟฟ้าสลับ



ข. การเกิด Hysteresis Loop

ภาพที่ 2.8 การเกิด Hysteresis Loop ของวงจรมแม่เหล็ก

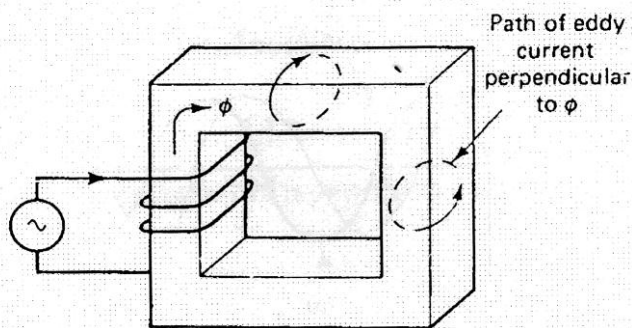
ปรากฏการณ์ Hysteresis จะทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสีย เรียกว่า Hysteresis Loss หาได้จาก

$$P_h = k_h \cdot f \cdot B_{\max}^n \quad (2.3)$$

โดย	P_h	=	Hysteresis Loss (W)
	f	=	ความถี่ของเส้นแรง(Hz)
	B_{\max}	=	ความหนาแน่นฟลักสูงสุด (T)
	k_h	=	ค่าคงที่
	n	=	Steinmetz Coefficient

2.1.4 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss)

การสูญเสียกระแส คือการสูญเสียเนื่องจากมีกระแสไหลวนอยู่ในสารแม่เหล็ก เนื่องจากสารแม่เหล็กมีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในสารแม่เหล็กจะทำให้เกิดกระแสไหลวน(Eddy Current) ขึ้น กระแสนี้จะไหลผ่านความต้านทานไฟฟ้าของสารแม่เหล็ก ก่อให้เกิดความร้อนมีค่าตาม I^2R ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การเกิดกระแสไหลวนในวงจรแม่เหล็ก

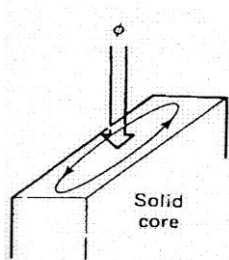
ค่ากระแสไหลวนจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในรูปความร้อนเรียกว่ากำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (P_e) โดยที่ กำลังสูญเสียนี้จะแปรตามกำลังสองของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังสมการกระแสไหลวนได้ดังสมการที่ (2.2)

$$P_e \propto E_e^2 \quad (2.4)$$

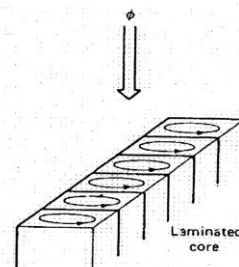
$$P_e = k_e \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \quad (2.5)$$

โดยที่	P_e	=	กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (W)
	k_e	=	ค่าคงที่

ขนาดของกระแสไหลวนขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก (ความถี่) และความต้านทานไฟฟ้าของแกนเหล็ก การลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนทำได้โดยใช้แกนเหล็กเป็นแบบเหล็กแผ่นซ้อนกัน (Laminated Core) ดังภาพที่ 2.10 โดยแต่ละแผ่นจะใช้สารเคลือบผิวที่มีค่าความต้านทานสูง เช่น ฉาบด้วยน้ำมันวานิช



ก. กระแสไหลวนในแกนชิ้นเดียว



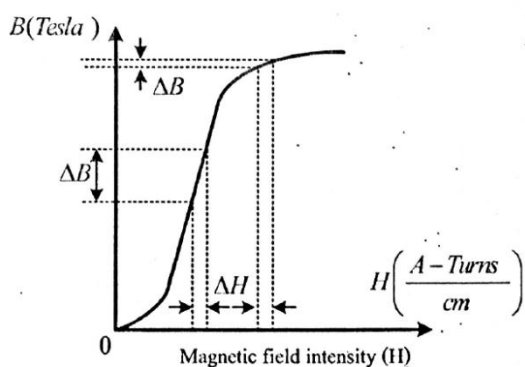
ข. กระแสไหลวนในแกนแบบแผ่นซ้อนกัน

ภาพที่ 2.10 การลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

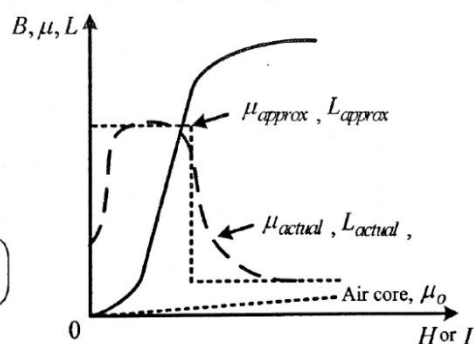
2.1.5 ความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability)

ค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นปริมาณที่บอกถึงการนำหรือการซึมผ่านของเส้นแรงแม่เหล็กในตัวกลางที่ใช้ทำแกนแม่เหล็ก ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดให้ค่าความซึมซาบที่แตกต่างกัน โดยนิยามค่าความซึมซาบได้เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ต่อด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงของความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ตามสมการที่ (2.6)

$$\text{Permeability} = \mu = \frac{\Delta B}{\Delta H} \tag{2.6}$$



ก. เส้นโค้ง B-H



ข. ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

ภาพที่ 2.11 เส้นโค้ง B-H และค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

และค่าความซึมซาบในตัวกลางที่เป็นสุญญากาศมีค่าเท่ากับ

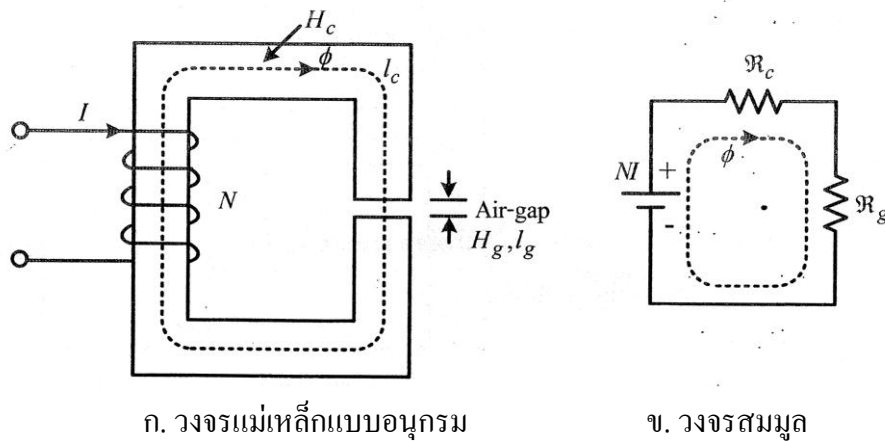
$$\text{หน่วย cgs} \quad \mu_0 = 1 = \frac{\text{gauss}}{\text{Oersted}} = \frac{\text{Tesla}}{\text{Oersted}} \times 10^4 \quad (2.7)$$

โดย Oersted = $\frac{1000}{4\pi}$ หน่วย (A/m)

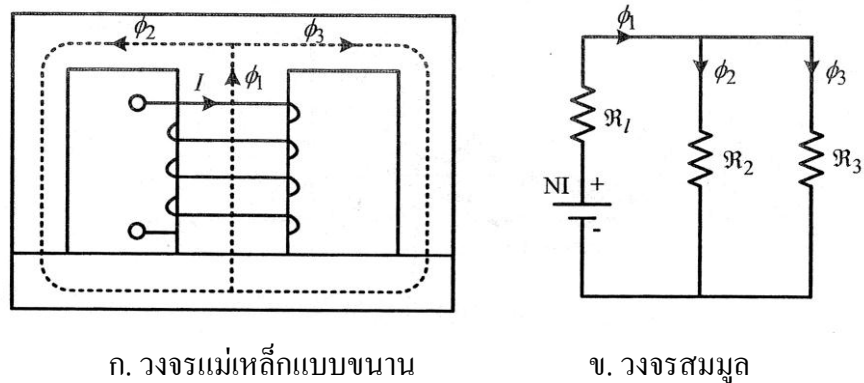
$$\text{หน่วย mks} \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = \frac{\text{Henry}}{\text{meter}} \quad (2.8)$$

จากภาพที่ 2.11 แสดงถึงอัตราส่วนของ ΔB และ ΔH ในช่วงเชิงเส้นมีค่าการเปลี่ยนแปลงของ ΔB มากกว่า ΔH ทำให้ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ) มีค่าเพิ่มสูงและเมื่อถึงช่วงโก่งตัวการเปลี่ยนแปลงของ ΔB น้อยกว่า ΔH ทำให้ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ) มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว

2.2 วงจรแม่เหล็ก



ภาพที่ 2.12 วงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม



ภาพที่ 2.13 วงจรแม่เหล็กแบบขนาน

การคำนวณสำหรับวงจรแม่เหล็กมีหลักการคำนวณคล้ายกับการคำนวณวงจรไฟฟ้า ดังแสดงตามภาพที่ 2.12 และ ภาพที่ 2.13 ซึ่งเป็นตัวอย่างการแปลงวงจรแม่เหล็กไปเป็นวงจรไฟฟ้า สำหรับการคำนวณ โดยพารามิเตอร์ของวงจรแม่เหล็กสามารถเทียบพารามิเตอร์กับวงจรไฟฟ้าได้ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

วงจรไฟฟ้า	วงจรแม่เหล็ก
Ohm's law $I = V/R$	$\Phi = \text{mmf}/R$
ความต้านทาน, $R = l/(\sigma A)$	ความต้านทานแม่เหล็ก $R = l / \mu A$
กระแส I	เส้นแรงแม่เหล็ก, Φ
แรงดัน, V	แรงดันเคลื่อนแม่เหล็ก mmf
Conductivity (ความนำ), σ	ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก, μ

2.2.1 การคำนวณตัวเหนี่ยวนำ

เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดตัวนำจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นรอบๆขดลวดนั้น โดยที่ค่าตัวเหนี่ยวนำจะสัมพันธ์กับเส้นแรงที่ขดลวด (Flux Linkage, λ) เมื่อกำหนดให้ค่าความซึมซาบแม่เหล็กคงที่ดังนั้นสมการของตัวเหนี่ยวนำกำหนดได้โดย

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (2.9)$$

จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) สมมุติว่าไม่คิดผลของเส้นแรงรั่วไหลภายนอกแกนแม่เหล็ก และ เส้นแรงแม่เหล็กไหลอยู่ในแกนอย่างคงที่ไปตามความยาวของแกนแม่เหล็ก (l_c) ดังนี้

$$Hl_c = NI \quad (2.10)$$

จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) สมมุติว่าไม่คิดผลของเส้นแรงรั่วไหลภายนอกแกนแม่เหล็ก และเส้นแรงแม่เหล็กไหลอยู่ในแกนอย่างคงที่ไปตามความยาวของแกนแม่เหล็ก (l_c) มีค่าเท่ากัน เป็นผลให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าคงที่ดังนั้น

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{l_c} \quad (2.11)$$

เส้นแรงในแกนมีค่าเท่ากับ

$$\Phi = BA_c = \frac{\mu_0 \mu_r A_c N I}{l_c} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.6) ตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\Phi}{I} = \frac{\mu_0 \mu_r A_c N^2}{l_c} \quad (2.13)$$

หรือ

$$L = \frac{N^2}{R_c} \quad (2.14)$$

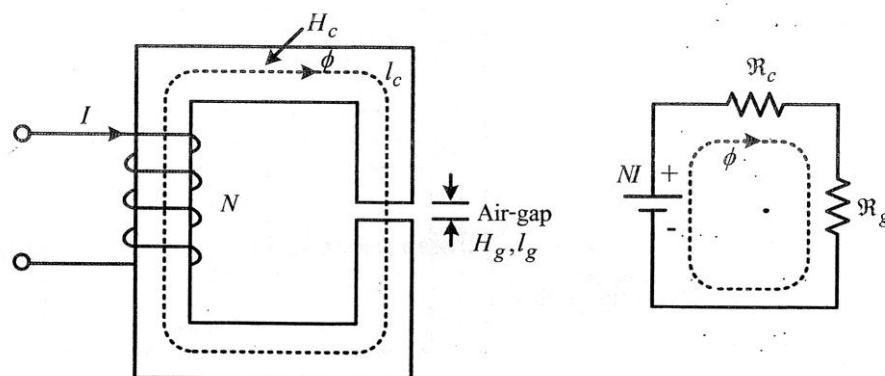
2.2.2 การคำนวณตัวเหนี่ยวนำที่มีช่องว่างอากาศ (Air-Gap)

จากภาพที่ 2.14 ถ้าช่องว่างอากาศมีความยาวเท่ากับ l_g ดังนั้นค่าความต้านทานในแกนแม่เหล็ก (R_c) ในกรณีที่ช่องว่างอากาศมีค่าเท่ากับ

$$R_c = \frac{l_c - l_g}{\mu_0 \mu_r A_c} = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c} \quad (2.15)$$

และค่าต้านทานในช่องว่างอากาศ (R_g) มีค่าเท่ากับ

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_c} \quad (2.16)$$



ก. ตัวเหนี่ยวนำที่มีช่องว่างอากาศ

ข. วงจรสมมูล

ภาพที่ 2.14 ตัวเหนี่ยวนำที่มีช่องว่างอากาศ (Air-Gap)

ผลรวมของค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reactance) คือ $R = R_c + R_g$ เนื่องจาก I_c / μ_r มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ I_g / μ_0 ดังนั้นฟลักซ์ในแกนแม่เหล็กและในช่องว่างอากาศคือ

$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{\text{mmf}}{R} = \frac{NI}{R_c + R_g} = \frac{NI}{\left[\frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c}\right] + \left[\frac{l_g}{\mu_0 A_c}\right]} \\ &= \frac{NI}{\frac{1}{\mu_0 A_c} \left[\frac{l_c}{\mu_r} + l_g\right]} = \frac{NI}{\mu_0 A_c} \\ \Phi &= \frac{NI(\mu_0 A_c)}{l_g}\end{aligned}\quad (2.17)$$

ประมาณขนาดตัวเหนี่ยวนำที่มีช่องอากาศมีค่าเท่ากับ

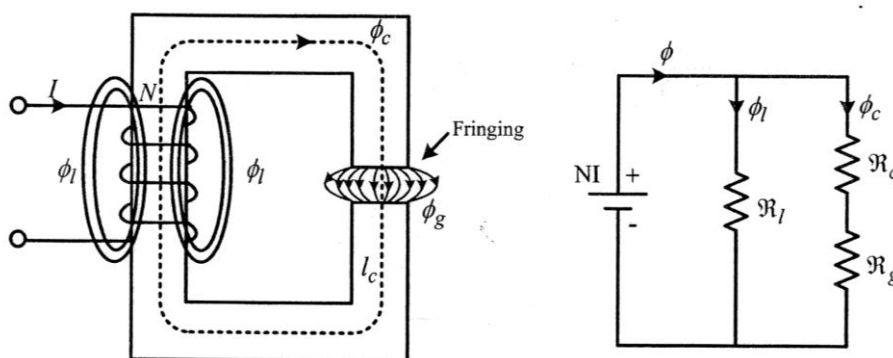
$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\Phi}{I} = \frac{\mu_0 A_c N^2}{l_g} = \frac{N^2}{l_g / (\mu_0 A_c)} = \frac{N^2}{R_g}\quad (2.18)$$

กรณีในตัวเหนี่ยวนำที่ไม่มีช่องว่างอากาศค่าตัวเหนี่ยวนำจะไม่คงที่ถึงแม้ว่าค่าความซึมซาบแม่เหล็ก μ ในแกนแม่เหล็กถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ แต่ในทางปฏิบัติแล้วค่าของ μ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของกระแสที่แสดงในภาพที่ 7.11 และจะมีค่าลดลงเมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเกิดการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็ก ในขณะที่ตัวเหนี่ยวนำที่มีช่องว่างอากาศจะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสเนื่องจาก μ_0 มีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่อย่างไรก็ตามช่องว่างอากาศ จะทำให้ค่าของตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลงตามสมการที่ 2.17

2.2.3 ผลกระทบของเส้นแรงรั่วไหล

จากที่ได้อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กไม่สามารถควบคุมหรือจำกัดไม่ให้เกิดการรั่วไหลหรือควบคุมให้เส้นแรงไหลโดยสมบูรณ์ในแกนอากาศหรือแกนแม่เหล็กอื่นๆ ดังแสดงตามภาพที่ 2.15 และยิ่งไปกว่านั้น ถ้าให้ช่องว่างอากาศมีขนาดเล็กๆ มากๆ เราอาจจะประมาณว่าผลกระทบของเส้นแรงโป่งพอง (Fringing) ละเลยได้โดยไม่นำมาคิดในการคำนวณนั้นหมายความว่าความหนาแน่นของเส้นแรงในแกนแม่เหล็กมีค่าเท่ากับในช่องว่างอากาศ แต่แท้จริงแล้วความหนาแน่นของเส้นแรงในช่องอากาศ (Bg) มีค่าลดลงเนื่องจากเส้นแรงมีการโป่งพองออก

ทำให้พื้นที่การไหลของเส้นแรง Bg เพิ่มมากขึ้น เป็นผลทำให้ค่าความต้านทานในช่องอากาศ (R_g) ลดต่ำลงด้วย ($R \propto 1/A$) จากภาพที่ 2.15 ก. ในการคำนวณผลของเส้นแรงรั่วไหลนั้นถูกแทนด้วยค่าความต้านทานแม่เหล็ก R_l ต่อแบบขนาน ดังแสดงในภาพที่ 2.15 ข.



ก. การเหนี่ยวนำของเส้นแรงแม่เหล็ก

ข. วงจรสมมูล

ภาพที่ 2.15 เส้นแรงรั่วไหลในตัวเหนี่ยวนำที่มีช่องว่างอากาศ (Air-Gap)

ขนาดตัวเหนี่ยวนำคำนวณได้จาก

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\phi}{I} = \frac{N}{I} (\phi_l + \phi_c) = \frac{N}{I} \left[\frac{NI}{R_l} + \frac{NI}{R_c + R_g} \right]$$

$$= N^2 \left[\frac{1}{R_l} + \frac{1}{R_c + R_g} \right] \quad (2.19)$$

หรือ

$$L = L_1 + L_{cg} \quad (2.20)$$

เมื่อ L_1 คือค่าตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล และ L_{cg} คือตัวเหนี่ยวนำของช่องว่างอากาศและในแกนแม่เหล็ก จากสมการที่ (2.16) L_{cg} มีค่าเท่ากับ

$$L_{cg} = N^2 \left[\frac{1}{R_c + R_g} \right] \quad (2.21)$$

เมื่อ $R_c \ll R_g$ ดังนั้น

$$L_{cg} = \frac{N^2}{R_g} \quad (2.22)$$

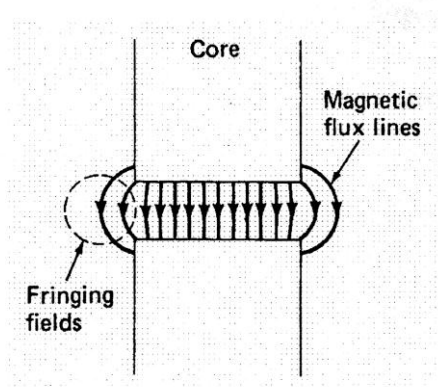
ตัวเหนี่ยวนำในภาพที่ 2.15 มีค่าเท่ากับ $L = L_l + L_g$ ในความเป็นจริง $L_l \ll L_g$ ดังนั้นค่าตัวเหนี่ยวนำมีเพียงในช่องว่างอากาศเท่านั้น

2.2.4 เส้นแรงแม่เหล็ก (Leakage Flux)

ในวงจรแม่เหล็กที่ใช้งานจริงๆ จะมีเส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งรั่วออกมาสู่อากาศเสมอ เส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วออกมานี้เรียกว่า Leakage Flux ซึ่งในการคำนวณเกี่ยวกับวงจรแม่เหล็กส่วนมากจะไม่คิดค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วเพราะถือว่ามีค่าน้อยมาก

2.2.5 ปรากฏการณ์ Fringing

Fringing เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux Line) ที่กระโดดข้ามช่องว่างอากาศทางด้านข้างตามภาพที่ 2.16 เป็นผลทำให้พื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศโตกว่าเดิม



ภาพที่ 2.16 การเกิด Fringing ในวงจรแม่เหล็กที่มีช่องว่างอากาศ

2.2.6 การเก็บสะสมพลังงานในตัวเหนี่ยวนำ

ผลของตัวเหนี่ยวนำที่มีช่องว่างอากาศมีบทบาทสำคัญอย่างมากในการเก็บสะสมพลังงานของตัวเหนี่ยวนำในวงจรแม่เหล็ก โดยการคำนวณพลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำคือ

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} [L_l + L_g] I^2 \quad (2.23)$$

เนื่องจากผลของ LI น้อยมากเมื่อเทียบกับ L_g ดังนั้น

$$\begin{aligned} W_m &\cong \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \frac{N^2}{R_g} I^2 = \frac{1}{2} \frac{**^2}{R_g} = \frac{1}{2} \phi^2 R_g = \frac{1}{2} \frac{\phi^2 l_g}{\mu_0 A_c} \\ &= \frac{1}{2\mu_0} l_g A_c B^2 = \frac{B^2}{2\mu_0} V_g \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$W_m \propto B^2 V_g \quad (2.25)$$

เมื่อ V_g คือปริมาตรของช่องอากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ $l_g A_c$

จากสมการที่ (2.22) แสดงให้เห็นว่าการเก็บสะสมพลังงานของตัวเหนี่ยวนำนั้นขึ้นอยู่กับปริมาตรของช่องอากาศ และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก