บทที่2

พื้นฐานการวัดค่าอิมพิแดนซ์และค่าความเหนี่ยวนำ

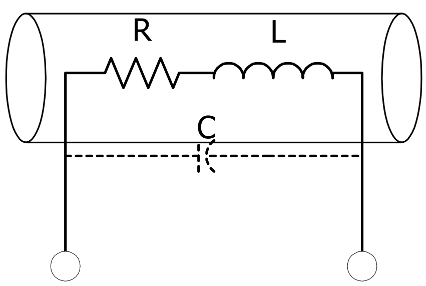
อิมพีแดนซ์เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่แสดงคุณสมบัติของวงจรไฟฟ้าส่วนประกอบของวงจรต่างๆ อิมพีแดนซ์ (Z) โดยทั่วไปแล้วจะหมายถึง ความต้านทานทั้งหมดที่อุปกรณ์หรือวงจรยอมให้กระแสไฟฟ้าสลับไหลผ่าน (AC) ณ ความถี่ที่กำหนดไว้และเป็นปริมาณเชิงซ้อนซึ่งสามารถเขียนเป็นเลขเชิงซ้อนที่เรียกว่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) แล้วใช้พีชคณิตเชิงซ้อนเข้ามาช่วยในการหาคำตอบ

2.1 การวัดค่าอิมพิแดนซ์

ในการหาค่าอิมพีแดนซ์จำเป็นต้องวัดค่าอย่างน้อย 2 ค่า เนื่องจากอิมพีแดนซ์เป็นจำนวนเชิงซ้อน การวัดในแต่ละครั้งจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบวงจรหรืออุปกรณ์ที่ไม่ทราบค่าที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์เครื่องวัด จึงทำให้เกิดค่าที่ไม่คาดคิด (สูงเกินไปหรือต่ำเกินไป) และวิธีการวัดที่เหมาะสมรวมทั้งพฤติกรรมตามธรรมชาติของอุปกรณ์ที่ไม่ทราบค่านั้นๆ

2.2 ค่าแฝงในอุปกรณ์ R L C

ไม่มีอุปกรณ์ส่วนใดๆของวงจรที่เป็นอุปกรณ์ที่มีค่าเดียวที่บริสุทธิ์ แต่จะเป็นผลรวมขององค์ประกอบอิมพีแดนซ์ ผลคืออุปกรณ์ในโลกล้วนเป็นค่าแฝง เพราะอุปกรณ์ที่ต่างชนิดกันกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันไป จึงทำให้ ค่าแฝงมีค่าที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายอุปกรณ์ที่ซับซ้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



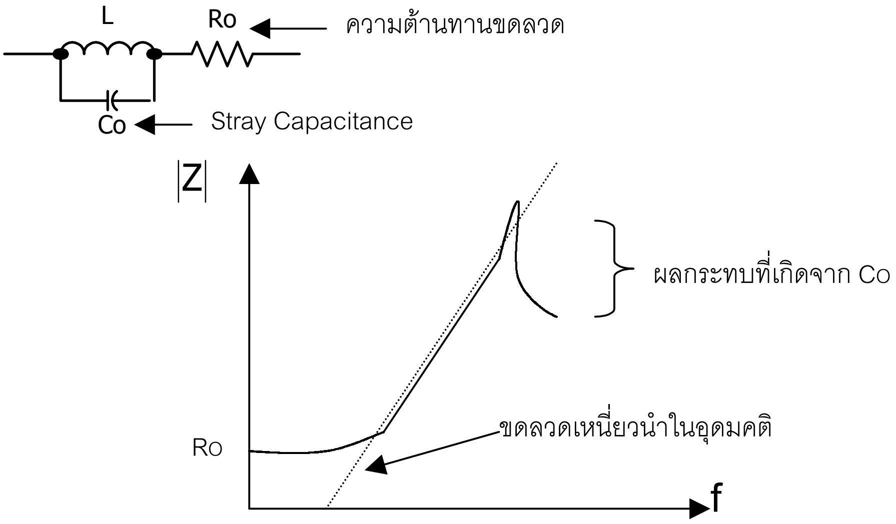
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบที่แฝงแสดงอยู่ในรูปวงจร

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบอุปกรณ์

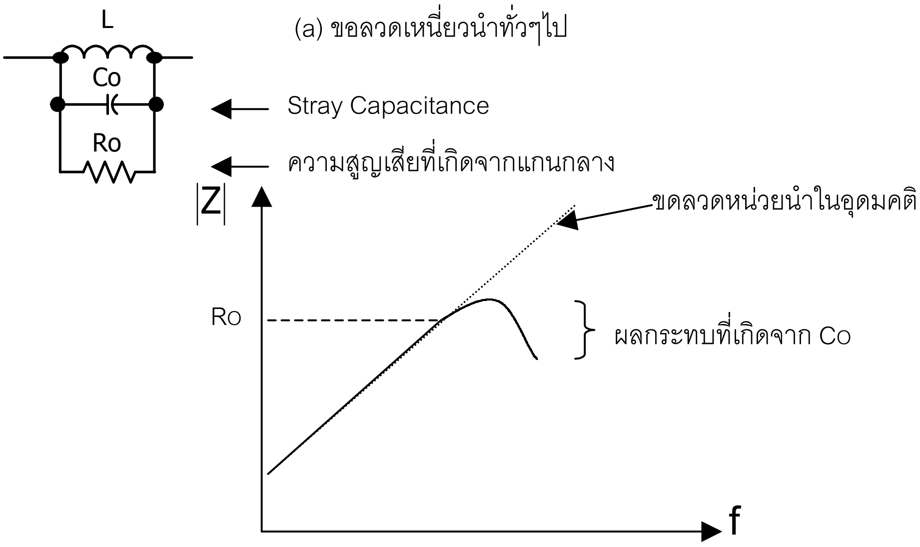
ค่าที่วัดได้ของอุปกรณ์ชิ้นหนึ่งจะมีเงื่อนไขหลายอย่างของการวัดเป็นเงื่อนไขอยู่อาทิ เช่น ความถี่ ระดับของสัญญาณทดสอบ และอื่นๆ ผลและปัจจัยที่มีต่ออุปกรณ์ที่แตกต่างกันไปแต่ละชนิดมีดังต่อไปนี้

2.3.1 ความถี่ (Frequency)

การที่ความถี่มีผลต่อค่าที่แฝงนั้น เกิดมาจากอุปกรณ์ที่จะทำการวัด มีลักษณะของวงจรแฝงผสมอยู่ในตัวของมันด้วย โดยลักษณะของวงจรแฝงนี้จะขึ้นอยู่กับรูปแบบที่แตกต่างกันออกไปตามค่าหลักที่เราต้องการวัด ดังแสดงในรูปข้างล้างนี้



(a) ขอลวดเหนี่ยวนำทั่วๆไป

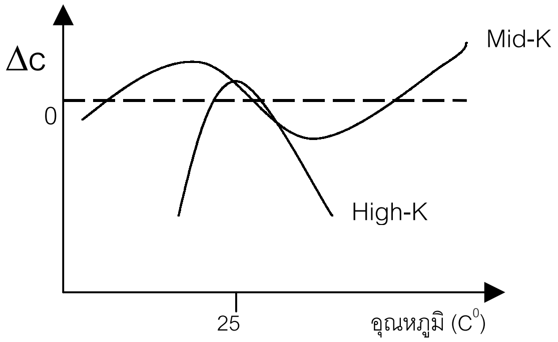


(b) ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีการสุญเสียในแกนกลางสูง

รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความถี่ที่มีผลต่อลวดตัวนำ

2.3.2 ปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่ออุปกรณ์

สภาพแวดล้อมทางกายภาพและทางไฟฟ้าอื่นๆเช่นความชื้น,สนามแม่เหล็ก,แสง, บรรยากาศ,ความสั่นสะเทือน,และเวลาหรืออายุของตัวอุปกรณ์ทดสอบ อาจจะเปลี่ยนเปลงค่าอิมพิแดนซ์ได้ ตัวอย่างเช่น ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) แบบเซรามิกที่มีไดอิเล็กตริกชนิด High-K จะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิ



รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวเก็บประจุแบบเซรามิค

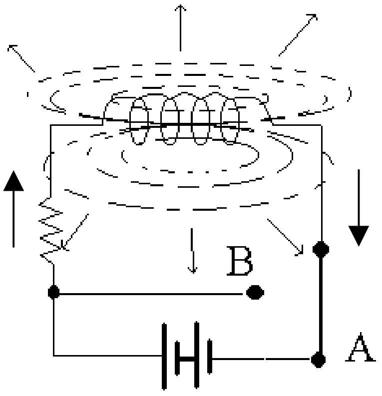
2.4 ค่าความเหนี่ยวนำและปัจจัยต่าง ๆ

2.4.1 ทฤษฎีความเหนี่ยวนำ

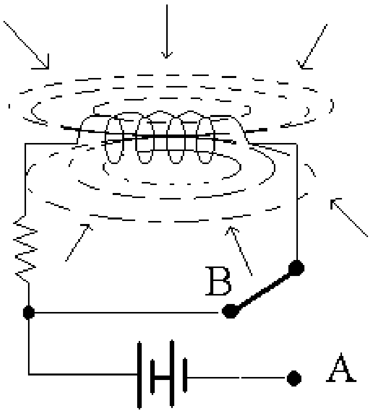
การจ่ายแรงดันไฟฟ้าคร่อมเข้ากับขดลวด เป็นผลทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และความเข้มของสนามแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์ไปจนถึงค่าสูงสุดในช่วงเวลาสั้นๆ โดยการขยายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะเริ่มจากส่วนกลางของลวดตัวนำ ซึ่งการขยายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเป็นการเคลื่อนที่ตัดกับตัวนำที่อยู่กับที่ ดังนั้น จึงส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น (การเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า) การที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำแล้วทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในนี้ เรียกว่า การเหนี่ยวนำภายใน (Self Inductance)

เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดจะทำให้สนามแม่เหล็กซึ่งจะมีปริมาณมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้า ก็จะถึงค่าสูงสุดด้วย และทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าไม่เกิดการขยายตัวอีกต่อไปโดยจะรักษาระดับให้คงที่ไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้าคงที่แล้วการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจึงไม่เกิดขึ้น ดังนั้น การเคลื่อนที่ตัดกันระหว่างตัวเหนี่ยวนำและสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงไม่เกิดขึ้น และสุดท้ายกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จะไปต้านการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรก็จะไม่เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) ขดลวดจะรับพลังงาน

ไฟฟ้า และเก็บไว้ในรูปของพลังงานสนามแม่เหล็ก เช่นเดียวกับกรณีที่ตัวเก็บประจุที่เก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปของสนามไฟฟ้านั่นเอง ถ้าปรับสวิตซ์ไปที่ตำแหน่ง B ดังแสดงในรูป (ข) กระแสไฟฟ้าที่ไหลมาจากแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากับศูนย์ และทำให้สนามแม่เหล็กยุบตัวลงมา ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในวงจรจึงไม่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กอีกต่อไป และถึงแม้นเส้นแรงแม่เหล็กจะยุบตัวลงมา แต่ก็ยังเป็นการเคลื่อนที่ตัดกับขดลวดตัวนำอยู่ (เป็นเหตุให้มีการเคลื่อนที่ตัดกันระหว่างตัวเหนี่ยวนำ และสนามแม่เหล็ก) ส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด ซึ่งผลที่ตามมาก็คือเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จะไหลไปในทิศทางเดียวกันกับกระแสไฟฟ้าของวงจรซึ่งไหลอยู่ก่อนหน้านี้แล้ว (ก่อนหน้าที่สวิตซ์จะเปิดวงจร) ขดลวดในขณะนี้จะเปลี่ยนพลังงานสนามแม่เหล็กไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และคืนพลังงานที่เก็บสะสมไว้ในตอนแรกออกมา หลังจากเวลาผ่านไปสนามแม่เหล็กก็จะยุบตัวหมด แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็จะกลายเป็นศูนย์ และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในวงจรก็จะไม่เกิดขึ้นอีก



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 ภาพสนามแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำ

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดนี้เรียกว่า Counter Electromotive Force (Counter EMF หรือ Back EMF) ซึ่งจะทำหน้าที่ต้านทานแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากแบตเตอรี่ และความสามารถของขดลวดหรือตัวเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิด Counter EMF ขึ้นภายในซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเรียกว่า Self-induce EMF หรือที่นิยมเรียก คือ ความเหนี่ยวนำ (Inductance, L) และมีหน่วยเป็น เฮนรี่ (H)

2.4.2 สูตรคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ

การเกิด Self Induce EMF จะเกิดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสซึ่งเรียกว่า Self Inductance สัญลักษณ์ L มีหน่วยเป็น H (Henry)

ดังนั้น $V = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}$ (V) (2-1)

เมื่อให้ V = EMF induce voltage (V)

L = Inductance (H)

Δi = อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแส (A)

Δt = ช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลง (s)

$\frac{\Delta i}{\Delta t}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส (A/s)

"แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดบางครั้ง เรียกว่า Counter EMF "

จากสมการที่ 2-1 จะได้ $L = -\frac{V}{(\Delta i/\Delta t)}$ (H)

ดังนั้น 1 Henry เท่ากับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส 1 (A/s) ที่ไหลผ่านขดลวดทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 V

จากที่ Self induced voltage ในขดลวดเกิดจาก $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ ซึ่งทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงต่อหน่วยเวลา $\frac{\Delta \phi}{\Delta t}$ และแปรผันโดยตรงกับจำนวนรอบ N

ดังนั้นจะได้ $V = -N\frac{\Delta \phi}{\Delta t}$ (2-2)

แรงดันแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กเปรียบเทียบได้กับแรงดันไฟฟ้า (Electromotive Force; EMF; F_m) ซึ่งจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ จำนวนรอบ (N) และค่ากระแสที่ไหลผ่าน (I)

ดังนั้น $\phi = \frac{F_m}{R_m} = \frac{IN}{R_m}$

ความต้านทาน ฟลักซ์แม่เหล็ก $R_m = \frac{\ell}{\mu A}$

ดังนั้น $V = N\frac{\Delta\left(\frac{NA\mu i}{\ell}\right)}{\Delta t}$

เมื่อ $\frac{N\mu A}{\ell}$ เป็นค่าคงที่ $V=-\frac{N^2\mu A}{\ell}\frac{\Delta i}{\Delta t}$

แต่ $$V = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}$$

จะได้ $$L = \frac{N^2\mu A}{\ell} \quad (H) \qquad (2\text{-}3)$$

เมื่อให้ L = ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น เฮนรี่ (H)

N = จำนวนรอบของขดลวด

A = พื้นที่แกนกลางขดลวด มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

μ = ค่าความซึมซาบจำเพาะ (Permeability)

ℓ = ความยาวของวัสดุที่นำมาทำแกนมีหน่วยเป็น เมตร (m)

วัสดุที่นำมาทำแกนภายในขดลวดมีผลทำให้เกิดค่าความซึมซาบจำเพาะ (Permeability, μ) ซึ่งโดยส่วนมากตัวเหนี่ยวนำจะมีแกนที่ทำจากวัสดุจำพวกนิกเกิล โคบอลต์ เหล็ก เฟอร์ไรต์ หรืออัลลอย ซึ่งแกนเหล่านี้มีคุณสมบัติที่จะช่วยรวมหรือเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังนั้น ค่าความซึมซาบจำเพาะ (Permeability) จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ โดยถ้าค่าความซึมซาบจำเพาะของวัสดุที่ใช้ทำแกนมีค่ามาก ก็จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากตามไปด้วย ดังแสดงในตารางแสดงตัวอย่างของวัสดุหลายชนิดที่นำมาใช้ทำแกน

ตารางที่ 2.1 ค่าความซึมซาบจำเพาะของวัสดุ

วัสดุ	**ค่าความซึมซาบจำเพาะ**
อากาศหรือสูญญากาศ	1.26×10^{-6}
นิกเกิล	6.28×10^{-6}
เหล็กแท่ง	7.56×10^{-6}
แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า	6.9×10^{-4}
เหล็กซิลิกอน	8.8×10^{-3}