

Circuitos acoplados magnéticamente

José Fabio Lozano Ovalle Código: 222982
 Wilson Orlando Macias Fuquen Código: 223101
 David Ricardo Martínez Hernández Código: 261931

Resumen—Se realizara el montaje de un circuito acoplado magnéticamente y se hallaran experimentalmente los valores de L_1 , L_2 y M , adicionalmente se determinara la polaridad relativa de los inductores y la relación de transformación entre primario y secundario. Por ultimo se implementara un circuito para visualizar la curva de histéresis del núcleo de hierro utilizado para acoplar los inductores.

Palabras clave—Autoinductancia, Bobina, Corriente, Flujo Magnético, Histéresis, Inductancia Mutua, Magnetismo, Magnetización, Material Ferromagnético, Permeabilidad.

I. OBJETIVOS

- Visualizar experimentalmente el ciclo de histéresis del núcleo hierro utilizado como acople por medio del osciloscopio.
- Aplicar las ecuaciones de Ampere y Faraday en el planteamiento de las ecuaciones de los circuitos del sistema acoplado magnéticamente.
- Determinar experimentalmente los valores de L_1 , L_2 , M , y la polaridad relativa de los inductores.
- Comparar experimentalmente la relación de transformación entre primario y secundario, por medio del número de espiras, voltajes y corrientes.

II. INTRODUCCIÓN

Siempre que la corriente fluye a través de un conductor, ya sea *AC* o *DC*, se genera un campo alrededor de él. En circuitos, se refiere a menudo al *flujo magnético* a través de un lazo de alambre, que es la componente normal promedio del campo magnético que emana del lazo, multiplicada por el área del mismo. Cuando un campo magnético variable en el tiempo generado por un lazo penetra un segundo lazo, se induce una tensión entre los extremos de este último.¹

III. HIPÓTESIS

Se espera que la relación de transformación sea muy parecida a la razón del número de espiras entre secundario y primario. Se espera una curva de histéresis de área pequeña si el núcleo no se calienta demasiado, de lo contrario se tendría una curva un poco mas ancha.

IV. MATERIALES

- Bobinas
- Condensador de $1 \mu F$
- Multímetro
- Núcleo de un material Ferromagnético
- Osciloscopio
- Resistencias

¹Texto tomado de [3], Página 491

V. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para esta práctica se implementaran 2 circuitos monofásico para analizar en estos el fenómeno de acoplamiento magnético.

A. Circuito con transformador

Para este circuito se tiene una fuente AC que alimenta el primario y en el secundario se tiene un circuito abierto para analizar la tensión en cada uno y obtener la ganancia del transformador.

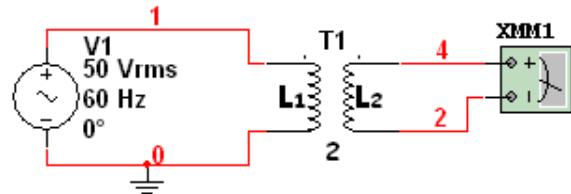


Fig. 1: Circuito monofásico con transformador.

Para la parte práctica se obtuvo los siguientes datos: número de vueltas en el primario $N_1 = 250$, en el secundario $N_2 = 500$. El voltaje de entrada que se obtuvo al realizar el circuito fue de $V_{IN} = 59 V$, el voltaje de salida que se obtuvo fue de $V_{OUT} = 112 V$, la corriente en el primario fue de $I_1 = 4.44 A$, la corriente en el secundario fue de $I_2 = 2.093 A$.



Fig. 2: Circuito monofásico con transformador realizado en el laboratorio

1) Relación de transformación: Para este circuito se hizo una variación en la parte práctica, con lo en análisis teórico arroja los siguientes resultados: una tensión en L_1 de $V_1=60[V]$, y en L_2 un $V_2=120[V]$ aproximadamente, con estos datos se obtiene una relación de transformación debido a la tensión en

el primario con respecto secundario.

$$m = \frac{V_2}{V_1} = \frac{120 [V]}{60 [V]} = 2 \quad (1)$$

Esto se comprueba en la práctica con la relación en el número de espiras en cada embobinado así:

$$m = \frac{N_2}{N_1} \quad (2)$$

Con los datos obtenidos en la parte práctica se obtienen los siguientes resultados.

$$m = \frac{V_2}{V_1} = \frac{112[V]}{59[V]} = 1.8983 \quad (3)$$

$$m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{500}{250} = 2 \quad (4)$$

Finalmente se puede observar que el M obtenido en la ecu. (3) es aproximado a los valores obtenidos en las ecu. (1) y (4).

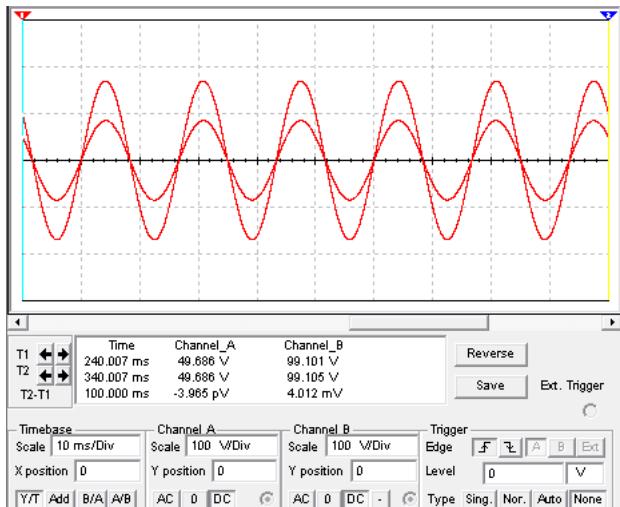


Fig. 3: Señal obtenida en primario y secundario.

2) Procedimiento para calcular inductancias L_1 , L_2 y M : Para obtener los valores de L_1 , L_2 y M se tiene datos como la corriente $i_1(T)$ y sabiendo que:

$$V_1 = j\omega L_1 i_1 \quad (5)$$

Donde se despeja y se obtiene:

$$L_1 = \left| \frac{V_1}{j\omega i_1} \right| \quad (6)$$

De igual manera se puede tener obtener L_2 intercambiando la energización de la fuente AC o usando la ecuación de la malla en el secundario así:

$$L_2 = \left| \frac{V_2 - j\omega M i_1}{j\omega i_2} \right| \quad (7)$$

Además M se obtiene así:

$$M = \left| \frac{V_2}{j\omega i_1} \right| \quad (8)$$

El valor calculado de L_1 y L_2 es $L_1 = 35.25 [mH]$, $L_2 = 200.7 [mH]$, por lo tanto el valor de M es $M = 66.91 [mH]$.

3) Procedimiento para hallar la polaridad relativa de los devanados primario y secundario: Para esta parte se debe hacer un cambio en el circuito original, se debe hacer una conexión entre las tierras de los circuitos acoplados magnéticamente, este circuito queda así:

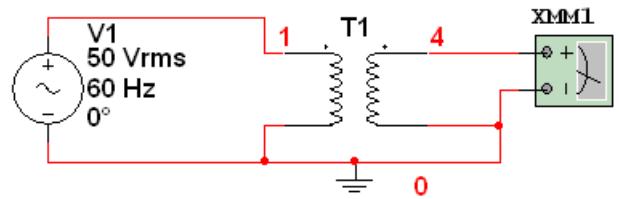


Fig. 4: Circuito para polaridad relativa.

Luego se mide la tensión entre los puntos restantes, en el circuito de la Fig.4 entre los puntos 1 y 4, a esta tensión se le llamará V_M , si se tiene que

$$V_M = V_1 + V_2 \quad (9)$$

La polaridad de los devanados, es decir la convención de punto es tal como está en el circuito de la Fig.1 y que es aditiva, si no, entonces se tiene que

$$V_M = V_1 - V_2 \quad (10)$$

Y la polaridad del circuito es diferente, en el segundo devanado el punto se ubica en el otro extremo, además en este caso es sustractiva.

De acuerdo al procedimiento anterior el voltaje que dio entre las bobinas fue de $V_M = 54 V$, este voltaje se obtuvo midiendo las terminales E_{11} y A_{21} de la Fig. 5



Fig. 5: Circuito para calcular la polaridad relativa realizado en el laboratorio

Para ver que polaridad se hacen las calculan los posibles resultados de V_M :

$$V_M = V_1 - V_2 = 59 - 112 = -53[V] \quad (11)$$

$$V_M = V_1 + V_2 = 59 + 112 = 171[V] \quad (12)$$

De estas dos opciones, se observa que la ecu. (11) es la que más se aproxima al valor medido, dado que estos son valores RMS el signo no tiene relevancia en este cálculo. Finalmente se puede decir que la polaridad del circuito es sustractiva.

B. Circuito para obtener curva de histéresis

Para obtener la curva de histéresis del núcleo en el transformador, en este caso un material ferromagnético, se diseña el siguiente circuito.

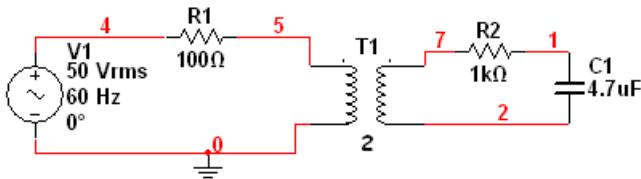


Fig. 6: Circuito para obtener curva de histéresis.

Para obtener la curva se tiene que la tensión en el condensador es

$$V_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(\tau) d\tau \quad (13)$$

Donde $i_c(t)$ es la corriente en R_2 y L_2 , entonces se tiene:

$$i_c(t) = \frac{V_2(t)}{R_2} \quad (14)$$

Donde $V_2(t)$ es la tensión en el secundario, además con la ley de Faraday se puede relacionar esta tensión con el flujo en el núcleo:

$$V_2(t) = N_2 \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (15)$$

Recordando que:

$$\phi(t) = AB(t) \quad (16)$$

Así se obtiene que la tensión en el secundario está dada por:

$$V_2(t) = AN_2 \frac{dB(t)}{dt} = i_c(t)R_2 \quad (17)$$

Reemplazando en la ecu. (13) se obtiene que:

$$V_c(t) = \frac{AN_2}{CR_2} \int_0^t \frac{dB(\tau)}{d\tau} d\tau = \frac{AN_2B(t)}{CR_2} \quad (18)$$

De donde podemos obtener $B(t)$ de forma indirecta:

$$B(t) = \frac{CR_2V_c(t)}{AN_2} \quad (19)$$

Ahora, $H(t)$ se obtiene a partir de la ley de Ampere:

$$\oint_C H(t) dl = H(t)l_m = N_1i_1(t) \quad (20)$$

Despejando $H(t)$ se obtiene

$$H(t) = \frac{N_1i_1(t)}{l_m} \quad (21)$$

Además, se sabe que la corriente i_1 , del primario es:

$$i_1(t) = \frac{V_{R1}}{R_1} \quad (22)$$

Así se obtiene finalmente:

$$H(t) = \frac{N_1V_{R1}}{R_1l_m} \quad (23)$$

Se puede observar en la ecu. (19) y (23) que $B(t)$ y $H(t)$ dependen de $V_c(t)$ y V_{R1} respectivamente, además de un

valor constante dado por las características del circuito, midiendo la tensión de estos elementos con un osciloscopio y programándolo en la forma XY se obtendrá finalmente la curva de histéresis.

La curva que se obtuvo en el laboratorio es la Fig. 7.

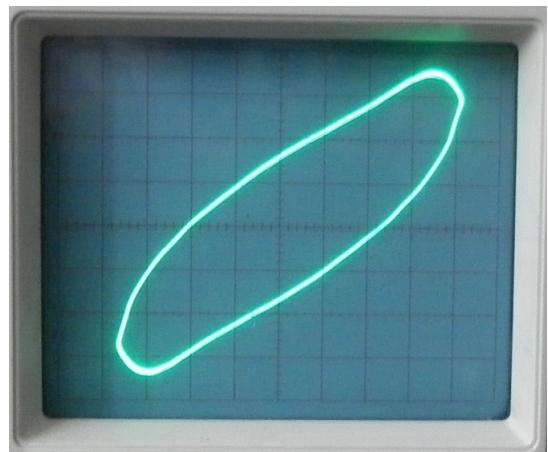


Fig. 7: Curva de histéresis para el montaje, vista desde el Osciloscopio

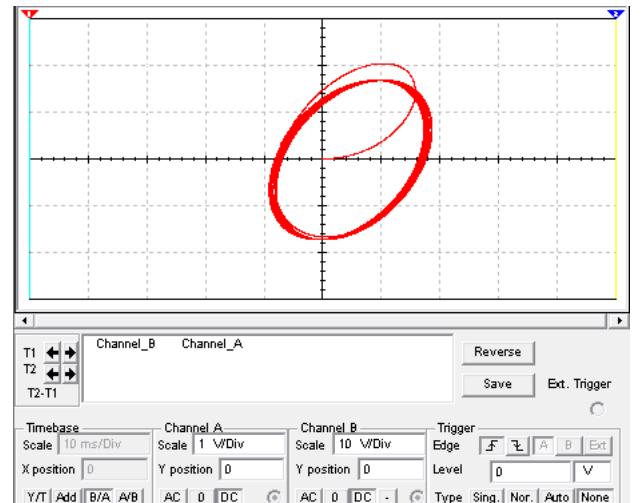


Fig. 8: Simulación de curva de histéresis aproximada.

VI. PREGUNTAS

- 1) ¿Cómo se pueden hallar los valores de L y M en una inductancia a partir de V e I ?
Para calcular los valores de L_1 , L_2 y M en el circuito utilizando las mediciones de corriente y voltaje montamos el siguiente circuito, donde el secundario permanece abierto Fig. 9.

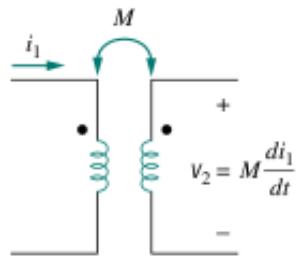


Fig. 9: Convención de puntos

De la malla del circuito dos en el dominio de la frecuencia obtenemos la ecuación:

$$V_2 = j\omega Mi_1 \quad (24)$$

Donde podemos despejar el valor de M ya que conocemos i_1 y V_2 . Ahora realizando la malla del circuito uno en el dominio de la frecuencia obtenemos:

$$V_1 = j\omega L_1 i_1 + j\omega Mi_2 \quad (25)$$

Como la corriente i_2 es cero entonces el valor de L_1 se puede calcular fácilmente de la expresión:

$$V_1 = j\omega L_1 i_1 \quad (26)$$

Por ultimo para encontrar el valor de L_2 cerramos el circuito para obtener la malla:

$$V_2 = j\omega L_2 i_2 + j\omega Mi_1 \quad (27)$$

Donde ya son conocidos todos los valores, entonces podemos despejar L_2

- 2) ¿Cómo se aplica la ley de Ampere y la ley de Faraday a un circuito de acoplamiento magnético?

En un circuito acoplado magnéticamente donde circula una corriente i_1 y el inductor L_1 tiene N espiras, longitud l y área S . Aplicando la ley de Ampere podemos hallar el flujo magnético en la bobina L_1 , multiplicando el campo magnético por el área S :

$$\Phi_1 = SB_1 = \frac{\mu_0 NS i_1}{l} \quad (28)$$

Si las dos bobinas tienen la misma área S el flujo magnético que pasa por la segunda bobina es el mismo que genera la primera.

Podemos hallar el coeficiente M de inducción mutua, que es la relación del flujo que pasa por la segunda bobina y la corriente que pasa por la primera.

$$M = \frac{\Phi_2}{i_1} = \frac{\mu_0 NS}{l} \quad (29)$$

Aplicando la ley de Faraday para cuando la corriente i_1 varía en el tiempo se induce una FEM en el circuito dos, que la podemos hallar derivando el flujo que atraviesa la bobina L_2 , así hallamos V_2 :

$$V_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -M \frac{di_1}{dt} \quad (30)$$

- 3) ¿Qué es la histéresis de un material ferromagnético y como se puede observar?

El ciclo de histéresis de un material ferromagnético se

presenta cuando un campo magnético variable en el tiempo que puede ser generado por una corriente alterna sobre un inductor, atraviesa el material, haciendo que sus dominios magnéticos estén en constante movimiento, ya que tienden a orientarse en la dirección del campo magnético inducido por la bobina. Representando el campo magnético en función de la densidad de campo magnético (que es proporcional a la corriente), obtenemos la curva de histéresis para un material ferromagnético.

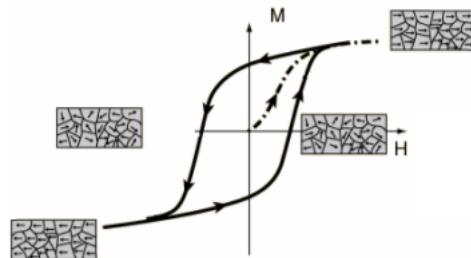


Fig. 10: Curva de Histéresis

Para observar la curva de histéresis podemos utilizar un osciloscopio de dos canales en el modo XY, a continuación se muestra la conexión.

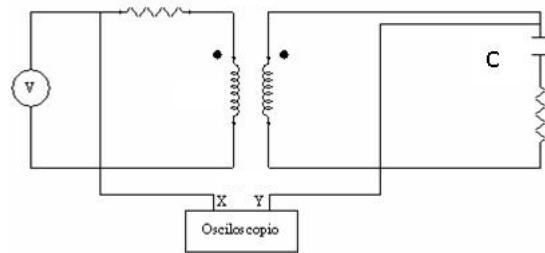


Fig. 11: Conexión con el osciloscopio para visualizar la curva de histéresis

Donde el voltaje medido en X es proporcional a la intensidad de campo magnético y el voltaje medido en Y es proporcional a la densidad de flujo magnético.

VII. CONCLUSIONES

- La intensidad de campo magnético H es proporcional a I en un circuito acoplado y la densidad de flujo B es proporcional a H . Los materiales ferromagnéticos son no lineales, la magnetización máxima se alcanza con un nivel determinado de H , luego de alcanzar dicho valor se satura.
- Para poder medir la relación de transformación es necesario hacerlo en vacío, si se conecta una carga en el secundario esta relación se pierde.
- La relación de transformación experimental no coincidió con el valor teórico debido a que parte del flujo total se perdió por flujos dispersos (Flujos externos) y las perdidas en el núcleo de hierro por corrientes parásitas y calentamiento del núcleo.

- No se tuvo acceso al puente Phillips (se encuentra extraviado) dado que es preciso y exacto, en este caso se comportaría como el valor teórico a comparar.

REFERENCIAS

- [1] Alexander, Charles K. & Sadiku, Matthew N.O. “*Fundamentals of Electric Circuits*”. McGRAW-HILL, ISE Editions, 1999.
- [2] Dorf & Svoboda. “*Circuitos Eléctricos*”. Alfaomega, Sexta Edición, 2006.
- [3] Hayt, William H. Jr., Kemmerly, Jack E. & Durbin, Steven M. “*Análisis de circuitos en ingeniería*”. McGRAW-HILL, Séptima Edición, 2007.
- [4] Nahvi, Mahmood & Edminister, Joseph A. “*Theory and Problems of Electric Circuits*”. McGRAW-HILL, Fourth Edition, 2003.