

Contenido

Contenido	3
1 Capítulo Introductorio.	5
1.1 Justificación del transformador	6
1.1.1 Antecedentes históricos	6
1.2 Nociones físicas del funcionamiento del transformador	10
1.2.1 Generación de Campos Magnéticos. El experimento de Oersted	11
1.2.2 Generación de Fuerza Electromotriz a partir de Campos variables en el tiempo. El experimento de Faraday	14
Bibliografía	19

1

Capítulo Introdutorio.



Contenido

Justificación del Transformador

Nociones físicas de funcionamiento

¿Qué es un transformador?

1.1 Justificación del transformador

1.1.1 Antecedentes históricos

La revolución industrial hecha por artesanos, relojeros, herreros entre otros, en Inglaterra y sus zonas de influencia, marcó el inicio del ascenso exponencial en el consumo de energía para la transformación de materia prima en productos de consumo. En ese entonces la invención de la máquina de vapor, además del resto de máquinas que aprovechaban la energía del agua o del viento, fueron determinantes en el desarrollo de los sistemas económicos [1, 2].

El crecimiento industrial y productivo se hizo tan grande que a finales del siglo XVIII era necesaria otra fuente de energía. Tal necesidad llegó a ser cubierta por la energía eléctrica con valores agregados que hasta ese entonces sólo ofrecía la conversión electromecánica; alta eficiencia y procesos productivos limpios. Por otro lado, esta nueva forma de obtención de energía ofrecía la posibilidad de consumirla en lugares distantes a los usados para la generación. Esta última dificultad era característica de las máquinas hijas de la revolución industrial como por ejemplo la máquina de vapor [3].

Es así como el desarrollo de la generación eléctrica tomó importancia, dentro de los procesos industriales, junto con las máquinas que transformaban la energía eléctrica en energía mecánica impulsando de ésta forma el consumo eléctrico. Por otro lado la aparición de la lámpara eléctrica (invención de Thomas Alva Edison) y la subsecuente demanda energética en forma de iluminación así como la calefacción y el transporte desembocaron en el aumento de la demanda doméstica y comercial [4].

Los hechos anteriores permiten la creación y fortalecimiento de un mercado eléctrico que es necesario atender. Para ello dos posibilidades

se dieron [2]:

- 1. Alimentación con señal continua de voltaje** Su principal promotor y defensor era Thomas Alva Edison (Edison construyó el primer sistema eléctrico de señal continua en el año 1882).
- 2. Alimentación con señal alterna de voltaje** Desarrollada por Nikola Tesla y promovida por el empresario George Westinghouse (Westinghouse construyó el primer sistema eléctrico de señal alterna en el año 1895).

Las dos opciones anteriores entregaban energía para la creciente demanda, pero la generación se realizaba a niveles de tensión limitados y del orden de los $2kV$. En este panorama el transporte de grandes paquetes de energía exigía valores altos de corriente en los conductores, lo que a su vez traía consecuencias; pérdidas grandes de energía en el sistema de transmisión y caídas de tensión, afectando la eficiencia de los sistemas y la calidad del servicio.

Ilustración del problema eléctrico

Las situaciones mencionadas se ilustran matemáticamente a partir del esquema de la figura 1.1 que presenta el diagrama simplificado del problema.

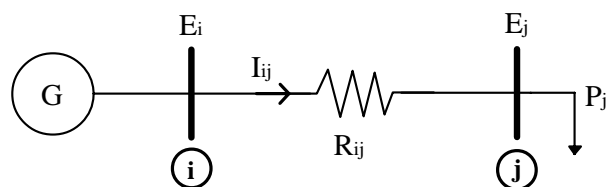


Figura 1.1: Diagrama simplificado generación y demanda.

G_i = Generador en el nodo i.

E_i = Tensión en el nodo i.

E_j = Tensión en el nodo j.

P_j = Potencia Consumida en el nodo j.

R = Resistencia del conductor.

I_{ij} = Corriente por el conductor desde el nodo i hasta el nodo j.

Para el sistema simplificado de la figura 1.1 es posible expresar las pérdidas en la línea como

$$P_L = (I_{ij})^2 \cdot R_{ij} \quad (1.1)$$

y dado que para el sistema simplificado es posible expresar la corriente como

$$I_{ij} = \frac{P_j}{E_j} \quad (1.2)$$

Entonces la ecuación definitiva para las pérdidas queda

$$P_L = \left(\frac{P_j}{E_j} \right)^2 \cdot R \quad (1.3)$$

Manteniendo fijos los valores de resistencia en el conductor y suponiendo que el sistema sostiene el voltaje en la carga, es posible notar que el aumento en P ocasiona aumentos en la pérdidas de manera cuadrática.

Por otro lado se analiza una situación problemática. Una expresión simplificada se obtiene para la caída de tensión.

$$\Delta V = E_i - E_j = I_{ij} \cdot R_{ij} \quad (1.4)$$

Ahora, usando la ecuación (1.2) se obtiene (1.5) y aquí es posible ver cómo el aumento de P_j implica un aumento en la caída de tensión que a su vez provoca disminución en los niveles de tensión en la carga.

$$\Delta V = \frac{P_j}{E_j} \cdot R_{ij} \quad (1.5)$$

Para aliviar tales problemas se plantea aumentar el nivel de tensión al que trabajan los sistemas eléctricos. Lo anterior es poco factible debido fundamentalmente a 2 restricciones.

1. Los voltajes en los generadores tienen límites operativos.
2. El consumo de energía no se efectúa a altos niveles de tensión.

Otra posibilidad es disminuir R_{ij} con lo que aumenta el calibre del conductor y por tanto en sistemas grandes los costos del conductor se hacen exagerados.

Conclusión:

- Se debe generar a baja tensión.
- Para disminuir corrientes se debe "transmitir" a voltajes elevados.
- Se deben cambiar los valores de tensión a niveles adecuados para el consumo.

Las anteriores conclusiones obligan a que se tenga un sistema que cumpla con lo mostrado en la figura 1.2:

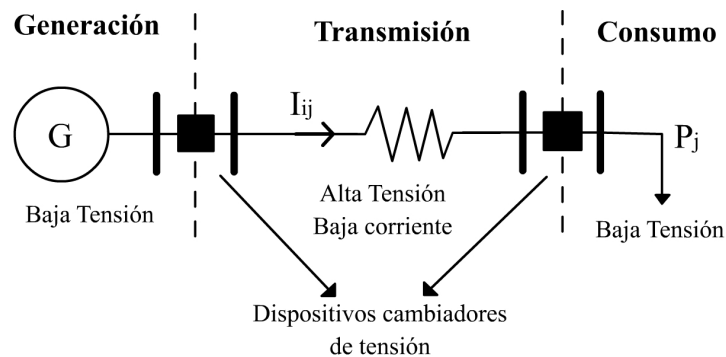


Figura 1.2: Necesidad de dispositivos cambiadores de Tensión.

¿Qué principio electromagnético se ha de usar para efectuar tales cambios en los niveles de tensión?

- Ley de inducción de Faraday.

Tal principio menciona que es posible crear una fuerza electromotriz mediante el uso de un campo magnético variable.

¿Quién puede producir campo magnético variable?

¿Señal Continua?(X) ¿Señal Alterna?(ok)

Es así la corriente continua se deja de usar para los procesos de generación y transmisión. La corriente alterna se impone y para las condiciones de la época es preferible este tipo de señal.

Hoy día algunos sistemas a nivel mundial, efectúan transmisión a altos niveles de tensión con señales de corriente continua. Actualmente estudios en el Sistema Eléctrico Colombiano se han efectuado para conectar a Colombia con Centroamérica a través de una línea de alta tensión DC (HVDC por sus siglas en inglés High Voltaje Direct Current).

1.2 Nociones físicas del funcionamiento del transformador

Para comprender el funcionamiento del transformador es necesario retomar algunos de los experimentos que revelaron la interacción entre las cargas circulantes en algunos materiales y señales electromagnéticas. Una de tales experimentaciones fué ejecutada por Christian Oersted y daba cuenta del fenómeno que surge cuando a través de un conductor circula una corriente. Esta corriente genera un campo en su vecindad tal como se ilustra en la figura 1.3.

Por otro lado el flujo magnético variable se considera originador de fuerzas electromotrices, hecho que se usará para obtener voltajes inducidos a partir de la generación de campos magnéticos variables. En las subsecciones a continuación se detallaran estos dos fenómenos.

1.2.1 Generación de Campos Magnéticos. El experimento de Oersted

Una manera de encontrar el valor de inducción magnética \mathbf{B} es a través del empleo de la ley de Biot-Savart. Esta ley obtenida experimentalmente manifiesta que cuando circula un valor de corriente por una trayectoria, se genera un campo magnético que está relacionado proporcionalmente al valor de la permitividad e inversamente proporcional al radio. Tal campo es perpendicular al plano formado por el elemento por el cual está circulando la corriente y perpendicular al radiovector que une al elemento de corriente y al punto afectado. El fenómeno se explica mediante la expresión 1.6.

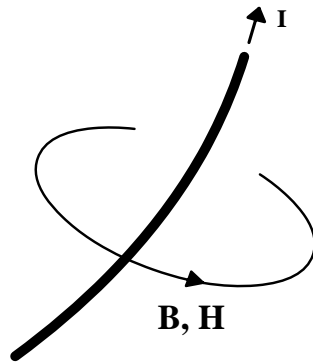


Figura 1.3: Ilustración del fenómeno encontrado por Oersted.

$$d\vec{B} = \frac{\mu i}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{R}}{R^3} \quad (1.6)$$

En la expresión 1.6 se encuentran relacionados los valores de inducción magnética y las características físicas del problema que se muestran en la figura 1.4.

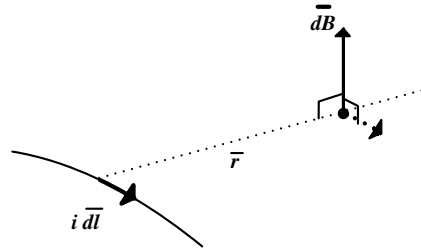


Figura 1.4: Ilustración de la ley de Biot-Savart

Una expresión que relaciona de manera directa el valor de campo magnético en una trayectoria cerrada con el valor de corriente encerrada por tal trayectoria es la ley de Ampère. Esta se ilustra en la figura 1.5 y se modela, para el caso particular de corriente de desplazamiento nula, en la ecuación 1.9.

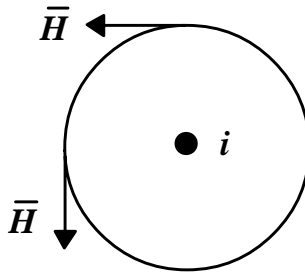


Figura 1.5: Ilustración de la Ley de Ampère

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = i_{encerrada} \quad (1.7)$$

Se conoce que en un material isotrópico y lineal el valor de inducción magnética se puede relacionar con el valor de Campo Magnético a través de la expresión

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.8)$$

Ahora, considerando la expresión 1.8 y reemplazando en la ecuación 1.7 es posible obtener la ecuación 1.9.

1.2. NOCIONES FÍSICAS DEL FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR13

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu i_{encerrada} = \mu Ni \quad (1.9)$$

Maxwell encontró una relación más general que relacionaba la existencia del campo magnético con todas sus posibles fuentes. Esta expresión se muestra en 1.10 y en ella es posible cómo un flujo eléctrico variable es capaz de generar un campo magnético. En la ecuación 1.10 el segundo término es denominado corriente de desplazamiento.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = i + \epsilon \cdot \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (1.10)$$

La expresión 1.9 se usará en capítulos posteriores para obtener el valor de reluctancia del material que compone el núcleo de los transformadores.

Finalmente, las anteriores experiencias permitieron la generación controlada de campo magnético mediante el uso de espiras enrolladas sobre algún material, inclusive el aire, consiguiendo una figura solenoidal. Tales construcciones ofrecen la posibilidad de controlar la dirección de propagación del campo magnético tal como se ilustra en las figuras 1.6 y 1.7, además de aumentar el valor de campo magnético en un número de veces equivalente al número de espiras que conformen en solenoide (Ver ecuación 1.9).

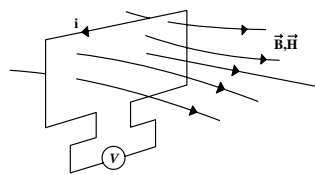


Figura 1.6: Espira generando campo magnético

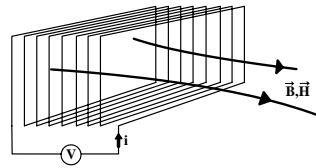


Figura 1.7: Arreglo de espiras generando campo magnético conocido como solenoide

1.2.2 Generación de Fuerza Electromotriz a partir de Campos variables en el tiempo. El experimento de Faraday

Faraday, quien tomara gran pasión por la física y la química a través de las lecturas que efectuaba en su lugar de trabajo como bibliotecario, descubrió la manera de desviar la aguja de un galvanómetro conectada a una espira, tal como se ilustra en la figura 1.8. Tal efecto se consiguió, inicialmente, acercando y alejando un imán a tal espira. Este físico Británico determinó que los campos no uniformes son capaces de generar tensiones inducidas en un conductor. La ecuación 1.11 muestra matemáticamente la interacción entre los campos magnéticos variables, que generan flujos variables y la existencia de fuerzas electromotrices. Cuando en el camino de las líneas de campo magnético se encuentra un número N de espiras, la expresión 1.11 toma la forma presentada en 1.12.

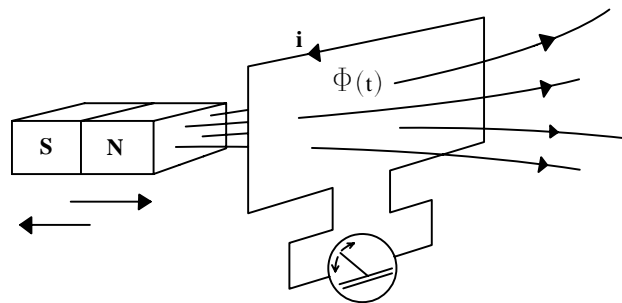


Figura 1.8: Experimento de Faraday

1.2. NOCIONES FÍSICAS DEL FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR¹⁵

$$\epsilon = -\frac{\partial\Phi_B}{\partial t} \quad (1.11)$$

$$\epsilon = -N \cdot \frac{\partial\Phi_B}{\partial t} \quad (1.12)$$

Si el campo que afecta el arreglo de espiras en la figura 1.8 es producido por otro arreglo de espiras, un solenoide por ejemplo, y si tal arreglo tiene una disposición física de manera que se consiga un acople inductivo bueno, es posible obtener una transmisión de energía mediante campo magnético según lo ilustrado en la figura 1.9.

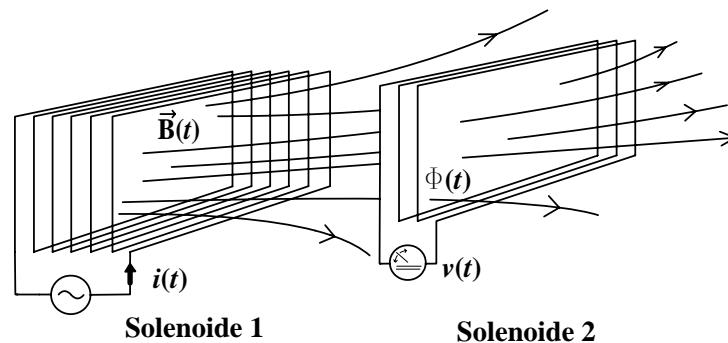


Figura 1.9: Transmisión de energía mediante campo magnético

En resumen, según 1.10, la fuente alterna que alimenta el primer solenoide provoca una corriente variable que genera un campo magnético variable en la vecindad de la misma. Algunas de las líneas de campo magnético variable generado en el solenoide primario atraviesan el solenoide 2, generando un flujo variable que a su vez produce una fuerza electromotriz en terminales. En el mismo gráfico 1.9 se muestra el fenómeno de dispersión de líneas de campo magnético con líneas que salen del primer solenoide y no atraviesan el segundo.

Los solenoides son acoplados mediante un núcleo metálico de alta

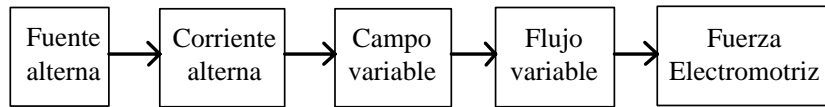


Figura 1.10: ón de transformación de energía

permeabilidad para aprovechar al máximo la energía transmitida magnéticamente. Lo anterior se ilustra en la figura 1.11. Estos núcleos generalmente son de acero y algunas aleaciones que incluyen silicio. La ferrita, aunque supera en el valor de permeabilidad al acero, es poco usada dado su alto valor económico. Otros materiales de estructura amorfa son usados para la conducción de las líneas de campo magnéticos entre bobinas.

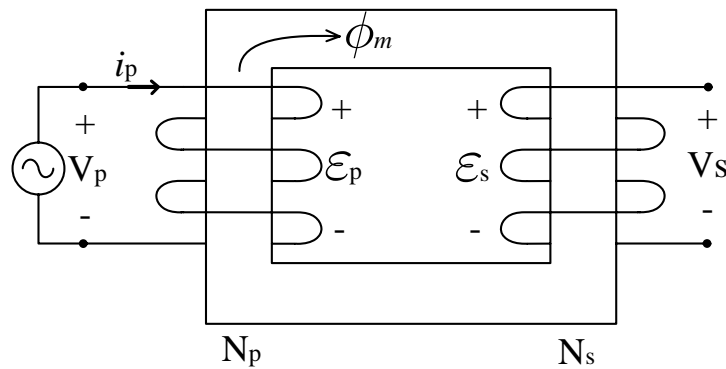


Figura 1.11: Bobinas acopladas mediante un material ferromagnético de alta permeabilidad.

Con todo lo anterior mencionado es posible afirmar categóricamente que un transformador es; Una máquina eléctrica estática que cambia niveles de tensión usando el principio de inducción de Faraday y los resultados encontrados por las experiencias de Oersted. Estas bobinas están aisladas eléctricamente y acopladas magnéticamente mediante un material de permeabilidad alta llamado núcleo. Sus usos principales son; cambio en los niveles de tensión y acople de impedancias [5] [6].

Bibliografía

- [1] Thomas Ashton. *La revolución industrial*. Fondo de cultura económica, México, segunda edición, 1981.
- [2] Tom McNichol. *The Savage Tale of the First Standards War*. H.B. Printing, USA, first edition, 2006.
- [3] Instituto de tecnologías educativas. Historia del siglo xx [online]. 2001. Disponible en: <http://isftic.mepsyd.es> [última consulta 21 de Septiembre 2009].
- [4] Vicente López. Historia de la electricidad 1600-1900 [online]. 1998. Disponible en: <http://vicentelopez0.tripod.com/Electric.html> [última consulta 01 de Octubre de 2009].
- [5] Michel Goossens, Frank Mittlebach, and Alexander Samarin. *The Latex Companion*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1993.
- [6] George D. Greenwade. The Comprehensive Tex Archive Network (CTAN). *TUGBoat*, 14(3):342–351, 1993.