



Escuela de Educación Técnica N°460 “Guillermo Lehmann”

Operación, mantenimiento y ensayos de equipos electromecánicos

Escuela de Educación Técnica N°460 “Guillermo Lehmann”

Modulo:

*Operación, mantenimiento y ensayos de equipos
electromecánicos*

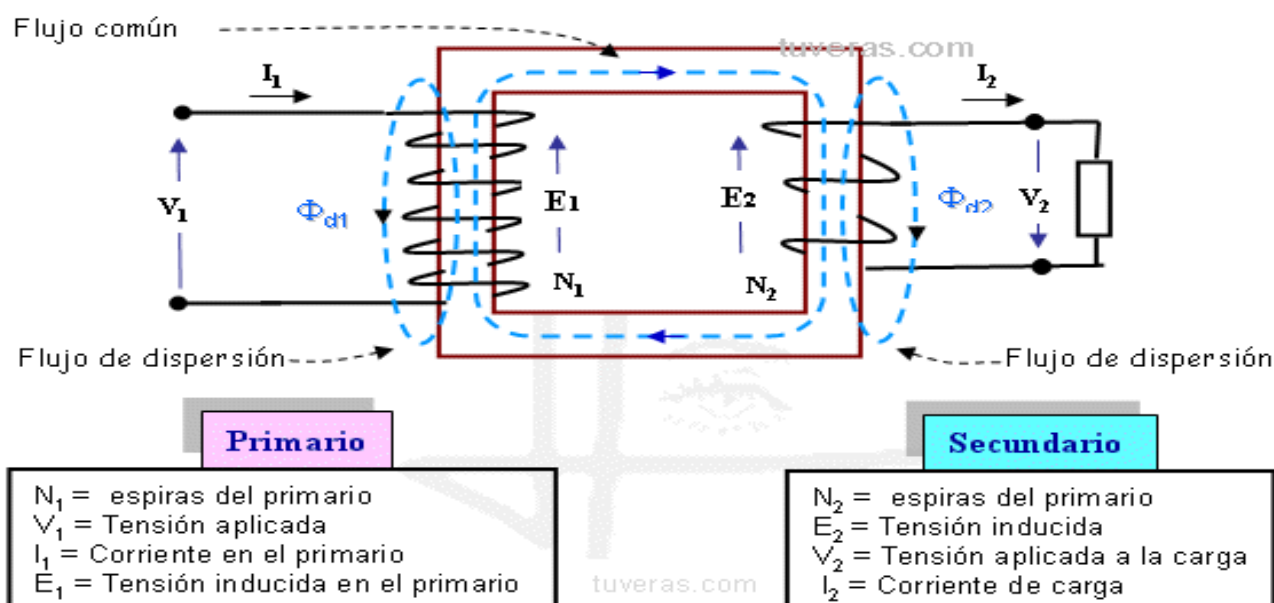
Tema:

El Transformador monofásico y trifásico

Electromecánica



El Transformador real monofásico



Impedancia del Transformador

X_1, X_2 = Reactancias de dispersión del primario y secundario
 R_1, R_2 = Resistencia de los conductores primario y secundario

Ecuaciones del transformador

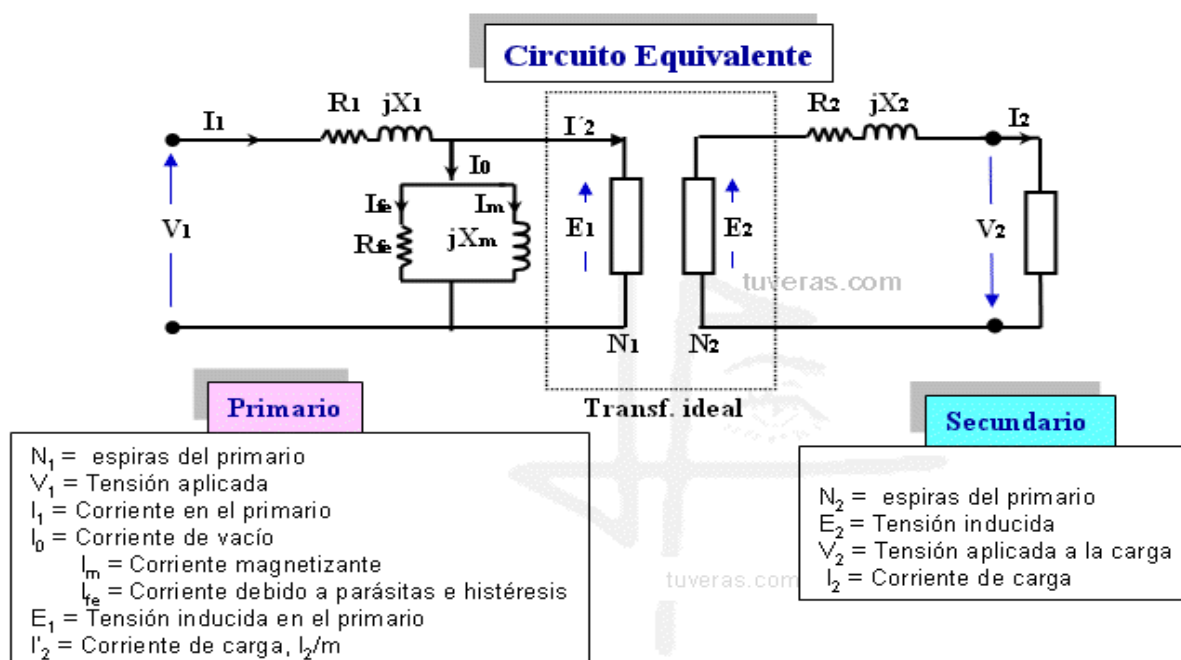
$$\underline{V}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{R}_1 \underline{I}_1 + j\underline{X}_1 \underline{I}_1$$

$$\underline{V}_2 = \underline{E}_2 - \underline{R}_2 \underline{I}_2 + j\underline{X}_2 \underline{I}_2$$

$$\underline{N}_1 \underline{I}_0 = \underline{N}_1 \underline{I}_1 + \underline{N}_2 \underline{I}_2$$



El Transformador real. Circuito equivalente



Impedancia del Transformador

X_1, X_2 - Reactancias de dispersión del primario y secundario
 R_1, R_2 - Resistencia de los conductores primario y secundario

Ecuaciones del transformador

$$\underline{V}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{R}_1 \underline{I}_1 + j\underline{X}_1 \underline{I}_1$$

$$\underline{V}_2 = \underline{E}_2 - \underline{R}_2 \underline{I}_2 + j\underline{X}_2 \underline{I}_2$$

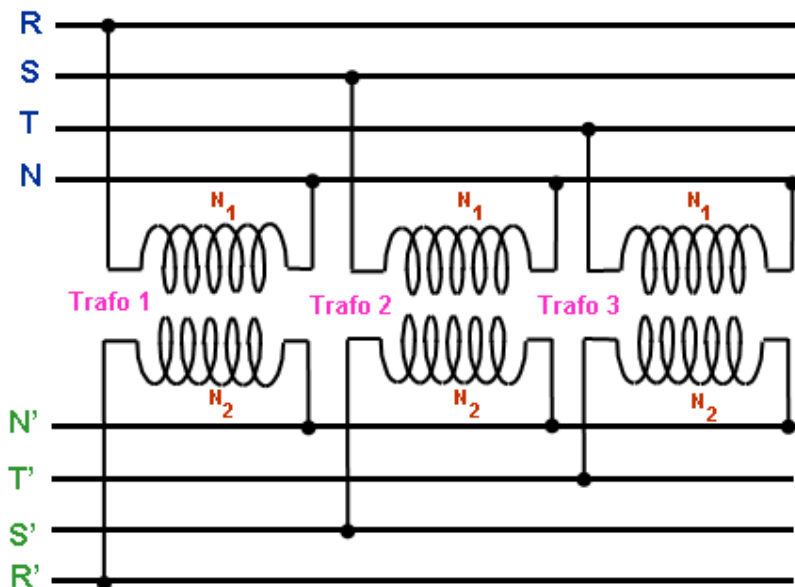
$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}_2' = \underline{I}_0 - \underline{I}_2/m$$

$$\frac{V_{10}}{V_{20}} = m = \frac{I_2}{I_1}$$



Lo visto para el transformador monofásico es aplicable a cada fase del trifásico

Transformación mediante tres transformadores monofásicos

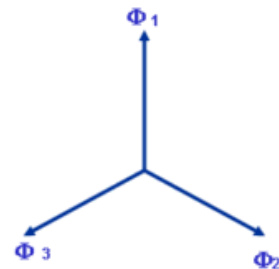
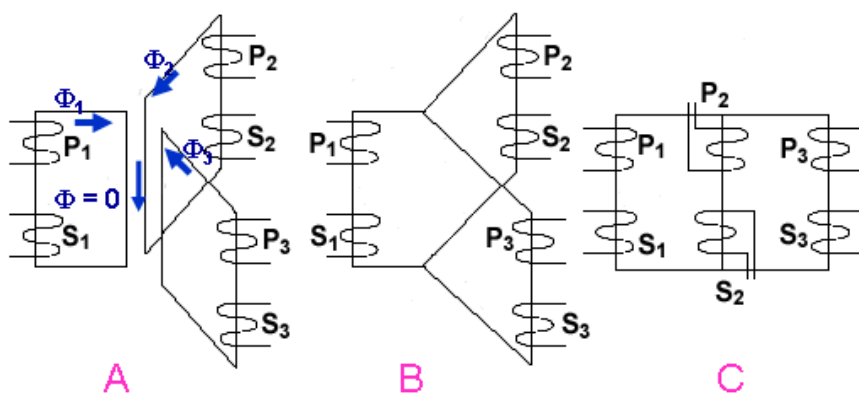


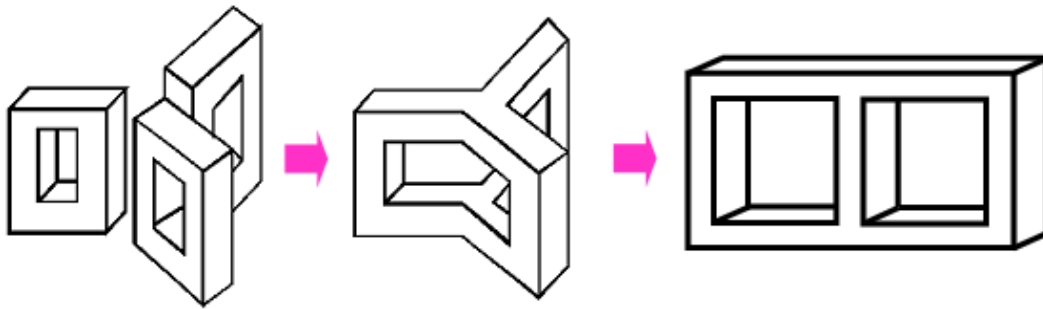
Un sistema trifásico se puede transformar empleando 3 transformadores monofásicos. Los circuitos magnéticos son completamente independientes, sin que se produzca reacción o interferencia alguna entre los flujos respectivos.

Otra posibilidad es la de utilizar un solo transformador trifásico compuesto de un único núcleo magnético en el que se han dispuesto tres columnas sobre las que sitúan los arrollamientos primario y secundario de cada una de las fases, constituyendo esto un transformador trifásico como vemos a continuación.

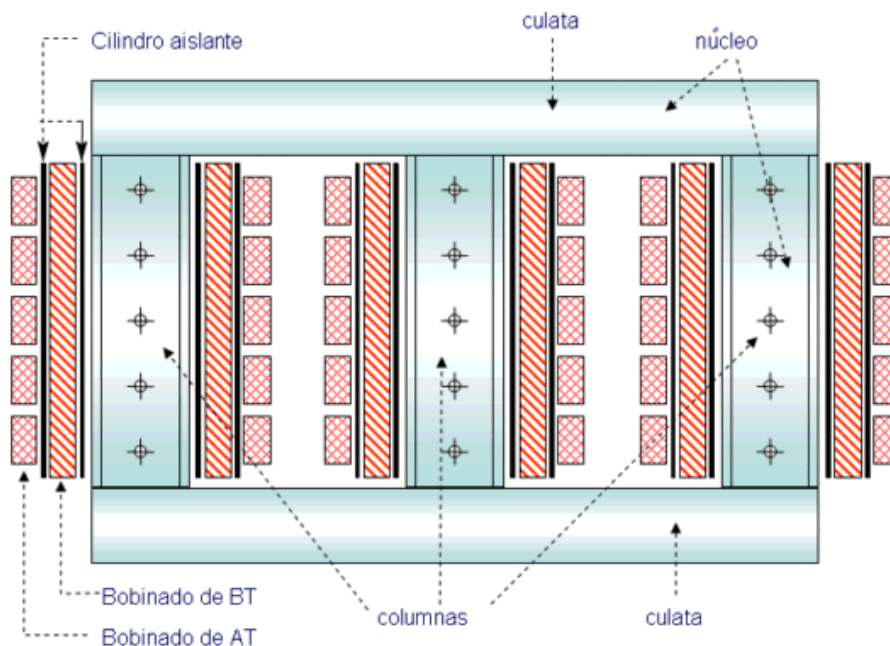
Transformador trifásico

Si la transformación se hace mediante un transformador trifásico, con un núcleo común, podemos ver que la columna central (fig. A) está recorrida por un flujo Φ que, en cada instante, es la suma de tres flujos sinusoidales, iguales y desfasados 120° . El flujo Φ será pues siempre nulo. En consecuencia, se puede suprimir la columna central (fig. B). Como esta disposición (fig. B) hace difícil su construcción, los transformadores se construyen con las tres columnas en un mismo plano (fig. C). Esta disposición crea cierta asimetría en los flujos y por lo tanto en las corrientes en vacío. En carga la desigualdad de la corriente es insignificante, y además se hace más pequeña aumentando la sección de las culatas con relación al núcleo central.



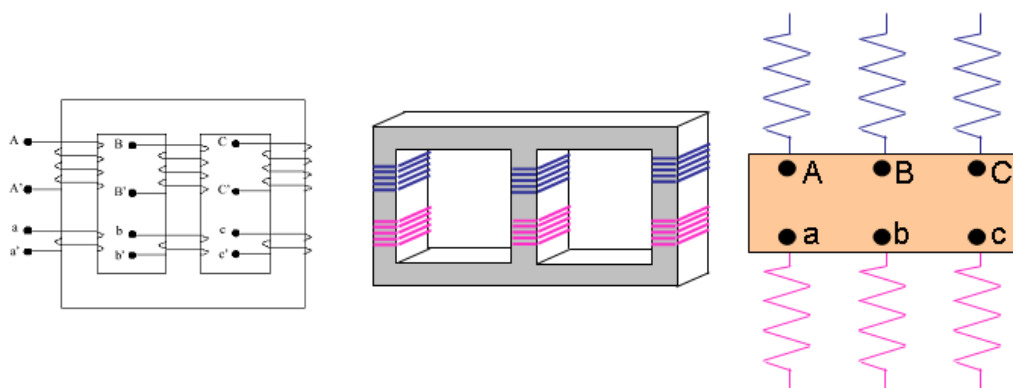


En un transformador trifásico cada columna está formada por un transformador monofásico, entonces [toda la teoría explicada en la sección de los transformadores monofásicos es válida para los trifásicos](#), teniendo en cuenta que las magnitudes que allí aparecen hace referencia ahora a los [valores por fase](#).



Conexiones

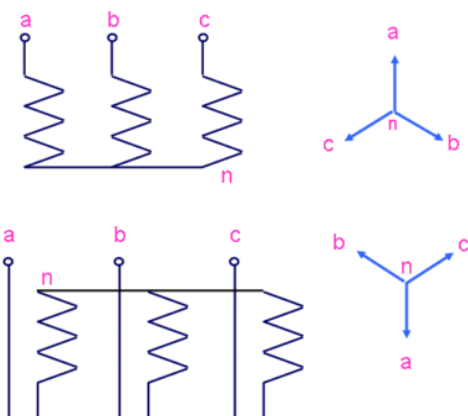
Para relacionar las tensiones y las corrientes primarias con las secundarias, no basta en los sistemas trifásicos con la relación de transformación, sino que se debe indicar los desfases relativos entre las tensiones de una misma fase entre el lado de Alta Tensión y el de Baja Tensión. Una manera de establecer estos desfases consiste en construir los diagramas fasoriales de tensiones y corrientes, conociendo: la conexión en baja y alta tensión (estrella, triángulo o zig-zag), las polaridades de los enrollados en un mismo circuito magnético o fase, y las designaciones de los bornes.



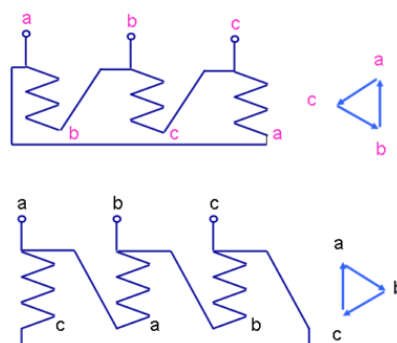
Los tres arrollamientos, **tanto del primario como del secundario**, se pueden conectar de diversas formas, siendo las siguientes algunas de las más frecuentes:

Formas de Conexión

Conexiones en Estrella (Y)



Conexiones en Triángulo (D)



Conexiones en Zig-zag (Z)

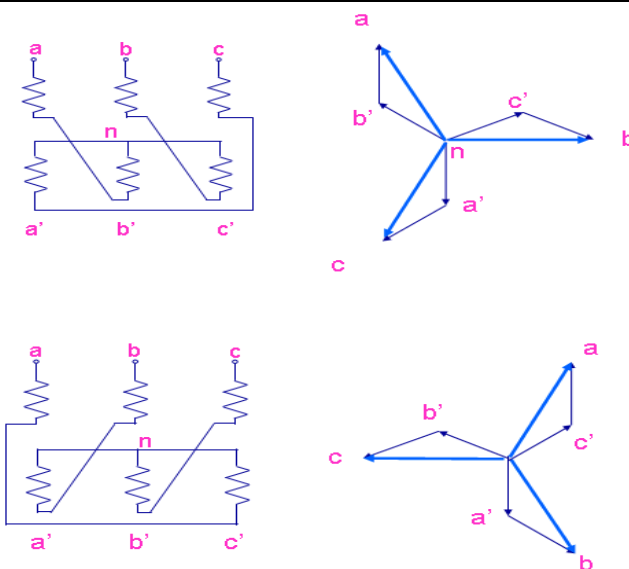




Tabla de índices horarios

1	2	3	4	5	6	7	8
Identificación		Diagrama		Esquema		Relación de tensiones compuestas (*) $\frac{U_{AT}}{U_{BT}}$	Antigua denominación V.D.E.
Desfase (Áng. de B.T. en retraso)	Denominación C.E.I.	A.T.	B.T.	A.T.	B.T.		
0°	Dd0					$\frac{N_A}{N_B}$	A ₁
	Yy0					$\frac{N_A}{N_B}$	A ₂
	Dz0					$\frac{2N_A}{3N_B}$	A ₃
150°	Dy5					$\frac{N_A}{\sqrt{3}N_B}$	C ₁
	Yd5					$\frac{\sqrt{3}N_A}{N_B}$	C ₂
	Yz5					$\frac{2N_A}{\sqrt{3}N_B}$	C ₃
180°	Dd6					$\frac{N_A}{N_B}$	B ₁
	Yya					$\frac{N_A}{N_B}$	B ₂
	Dz6					$\frac{2N_A}{3N_A}$	B ₃
-30°	Dy11					$\frac{N_A}{\sqrt{3}N_B}$	D ₁
	Yd11					$\frac{\sqrt{3}N_A}{N_B}$	D ₂
	Yz11					$\frac{2N_A}{\sqrt{3}N_B}$	D ₃



Escuela de Educación Técnica N°460 “Guillermo Lehmann”

Operación, mantenimiento y ensayos de equipos electromecánicos

Trabajos

Prácticos



Transformadores monofásicos

OBJETIVO DE LA UNIDAD

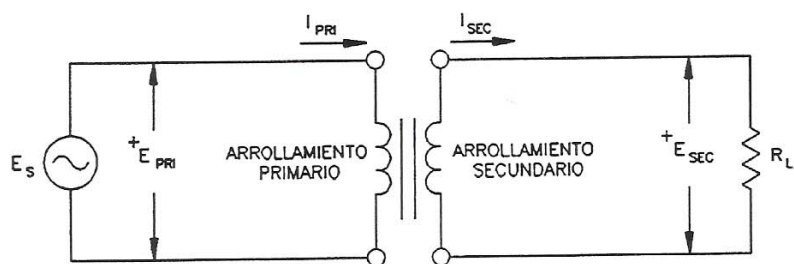
Después de completar esta unidad, usted será capaz de explicar y demostrar las importantes características de funcionamiento de los transformadores monofásicos. Usted será capaz de conectar los arrollamientos del transformador con las configuraciones **serie aditiva** y **serie subtractiva** y demostrará el efecto que tiene la carga en el voltaje del secundario. Las mediciones de voltaje y corriente, junto con las curvas de carga del transformador, se utilizarán para estudiar las características y el funcionamiento del mismo.

FUNDAMENTOS

Los transformadores son dispositivos que funcionan magnéticamente y, en los circuitos c.a., pueden cambiar los valores de voltaje, corriente e impedancia. En su forma más simple, un transformador consiste en dos bobinas de alambre arrolladas en un núcleo común de material ferromagnético, como por ejemplo el hierro. Una de las bobinas se llama arrollamiento primario y la otra arrollamiento secundario. Probablemente, los transformadores son las piezas más comunes dentro de la industria eléctrica. Su tamaño puede ir de unidades miniatura para las radios de transistores, hasta unidades inmensas de varias toneladas para las estaciones de distribución de energía. Sin embargo, todos los transformadores tienen el mismo principio básico de funcionamiento e iguales características. Todos los transformadores tienen un **arrollamiento primario**, para la potencia de entrada y un **arrollamiento secundario**, para la carga. Algunos transformadores tienen más de un arrollamiento secundario. La relación entre el número de espiras del alambre del arrollamiento primario (N_1 o N_p) y el número de espiras del arrollamiento secundario (N_2 o N_s), se llama **relación de espiras**. Esta última establece la relación entre los valores de entrada y de salida de un transformador. La Figura 7-1 muestra un transformador monofásico conectado con una carga resistiva y con una relación de espiras N_1 / N_2 igual a 1:1. El primer ejercicio de la unidad mostrará cómo E_{PR} , I_{PR} , E_{SEC} e I_{SEC} están vinculados a través de la relación de espiras.



Transformadores monofásicos



RELACIÓN DE ESPIRAS $N_p/N_s = N_1/N_2 = 1/1$ (NORMALMENTE SE ESCRIBE 1:1)

Figura 7-1. Transformador monofásico conectado a una carga resistiva.

Cuando existe **inductancia mutua** entre las dos bobinas o arrollamientos, un cambio en una de las bobinas induce un voltaje en la otra. Cuando el arrollamiento primario de un transformador se conecta a una fuente de alimentación, dicho arrollamiento recibe energía de la fuente y acopla esa energía al arrollamiento secundario mediante un **flujo magnético** variable. Esta energía se presenta como una fuerza electromotriz (un voltaje) a través del arrollamiento secundario y cuando se conecta una carga al secundario esa energía se transfiere a la carga. Este **acoplamiento magnético** permite transferir energía eléctrica de un circuito a otro, sin ninguna conexión física entre ambos. Además proporciona una aislación eléctrica entre los circuitos. Los transformadores resultan indispensables en los sistema de distribución de potencia c.a., dado que pueden convertir una potencia de un determinado nivel de voltaje y corriente en otra potencia equivalente de otro nivel de voltaje y corriente.

Cuando una corriente alterna fluye por un arrollamiento del transformador se crea un campo magnético alterno en el núcleo de hierro. El transformador se calienta porque disipa cierta potencia activa debida a la **pérdida en el cobre** y a la **pérdida en el hierro**. La resistencia del alambre del arrollamiento causa la pérdida en el cobre mientras que la pérdida en el hierro se debe a las **corrientes de Foucault** y a la histéresis. Esta última es la propiedad de los materiales magnéticos que causan una resistencia a los cambios en el proceso de magnetización.

A pesar de las pérdidas en el cobre y en el hierro, los transformadores son unos de los dispositivos eléctricos más eficaces que existen y, frecuentemente, la potencia aparente en el primario se considera igual que la del secundario. Por lo general, el voltaje secundario varía con los cambios de la carga, partiendo de un valor dado para el transformador en vacío, hasta el menor valor de voltaje con el secundario cargado a pleno. La variación del voltaje secundario con la carga variable aplicada en el mismo se llama **regulación del transformador**. Esta regulación depende del tipo de carga (resistiva, inductiva o capacitiva) aplicada en el secundario. Como se verá en esta unidad, el voltaje secundario puede, en ciertos casos, aumentar por encima de su valor nominal en lugar de disminuir.



Relaciones de voltajes y corrientes

OBJETIVO DEL EJERCICIO

Después de completar este ejercicio, usted estará familiarizado con las características de voltaje y corriente de un transformador monofásico y será capaz de emplear la relación de espiras para predecir el voltaje y la corriente en el arrollamiento secundario.

PRESENTACIÓN

Como se muestra en la Figura 7-1, los devanados de un transformador monofásico estándar se llaman arrollamiento primario y arrollamiento secundario, o simplemente, primario y secundario. El primero es el arrollamiento de entrada de potencia y se conecta a la fuente de alimentación. El arrollamiento secundario se conecta a la carga y está física y eléctricamente aislado del primario. El voltaje del secundario y la corriente que fluye por el mismo, se encuentran relacionados con el voltaje y la corriente del primario a través de la relación de espiras del transformador, es decir, N_1 / N_2 (o N_p / N_s). La razón entre los voltajes primario y secundario es igual a N_1 / N_2 , mientras que el cociente entre las corrientes primaria y secundaria es igual a la inversa de la relación de espiras, o sea, N_2 / N_1 . Lo anterior resulta:

$$\frac{E_{PRI}}{E_{SEC}} = \frac{N_1}{N_2}$$

que da: $E_{SEC} = \frac{E_{PRI} \times N_2}{N_1}$

e

$$\frac{I_{PRI}}{I_{SEC}} = \frac{N_2}{N_1}$$

que da: $I_{SEC} = \frac{I_{PRI} \times N_1}{N_2}$

A los transformadores se los designa con las relaciones fijas entre los voltajes primario y secundario y se los utiliza ampliamente para aumentar (como elevador) o bajar (como reductor) los voltajes y corrientes en la carga. Al igual que la mayoría de los transformadores, el módulo Transformador monofásico, que se utiliza en este ejercicio, tiene sus características nominales indicadas en el panel frontal. Muchos transformadores tienen tomas intermedias, o terminales de conexión, del lado secundario para obtener diferentes relaciones de voltaje empleando un solo transformador.



Relaciones de voltajes y corrientes

La determinación de la relación de voltaje de los transformadores resulta una cuestión relativamente simple. Con el transformador sin carga conectada en el secundario, sólo fluye en el arrollamiento primario la pequeña **corriente de excitación** necesaria para crear el flujo magnético en el interior del transformador. Las pérdidas en el transformador son mínimas y la razón entre los voltajes primario y secundario es igual a la relación de espiras. Para encontrar la relación de espiras, se puede aplicar el voltaje nominal al primario y medir el voltaje del secundario descargado. La relación de corriente se puede calcular aplicando un pequeño voltaje c.a. al primario y medir la corriente en el secundario en cortocircuito. Para que la corriente nominal en el primario no resulte excesiva, el voltaje que se aplica al primario deberá ser suficientemente bajo, de lo contrario, los arrollamientos podrán recalentarse y dañarse.

La corriente de excitación, que está directamente relacionada con el flujo magnético alterno, crece en proporción directa con el voltaje aplicado hasta que el núcleo comienza a saturarse. Esto ocurre cuando el voltaje aplicado excede el valor nominal del primario y, en ese momento, deja de ser lineal la relación entre el voltaje primario y la corriente de excitación. Como lo muestra la Figura 7-2, cuando la curva del voltaje primario en función de la corriente de excitación se aplana, pequeños incrementos del voltaje primario, provocan grandes aumentos de la corriente de excitación. En el módulo Transformador monofásico EMS, la corriente de excitación es de unos pocos miliamperios y, generalmente, su valor es un pequeño porcentaje de la corriente nominal del transformador.



Figura 7-2. Curva de saturación de un transformador.

EQUIPO REQUERIDO

A fin de obtener la lista de aparatos que se necesitan para este ejercicio, consulte la Tabla de utilización de los equipos del Apéndice C.

PROCEDIMIENTO

¡ATENCIÓN!

Durante esta experiencia de laboratorio, usted estará en presencia de voltajes elevados. No realice ni modifique ninguna conexión con las fichas tipo banana en los circuitos bajo tensión, salvo indicación contraria.



Relaciones de voltajes y corrientes

- ☐ 1. Dentro del puesto de trabajo EMS, instale los siguientes módulos: la Fuente de alimentación, la Interfaz para la adquisición de datos y el Transformador monofásico.
- ☐ 2. Asegúrese de que el interruptor principal de la Fuente de alimentación se encuentra en la posición O (apagado) y que la perilla de control del voltaje de salida ha sido girada completamente a la izquierda. Ajuste el selector del voltímetro en la posición 4-N y asegúrese de que la Fuente de alimentación está enchufada a una toma mural trifásica.
- ☐ 3. Asegúrese de que la entrada ALIMENTACIÓN BAJA POTENCIA de la DAI se encuentra conectada a la Fuente de alimentación principal y coloque el interruptor 24 V - CA en la posición I (encendido). Luego, asegúrese de que el cable chato de la computadora está conectado a la DAI.
- ☐ 4. Muestre la ventana *Aparatos de Medición* y seleccione el archivo de configuración existente *ES17-1.cfg*.
- ☐ 5. Monte el circuito del transformador de la Figura 7-3. Conecte E1 e I1 como se muestra y utilice E2 para medir los diferentes voltajes secundarios.

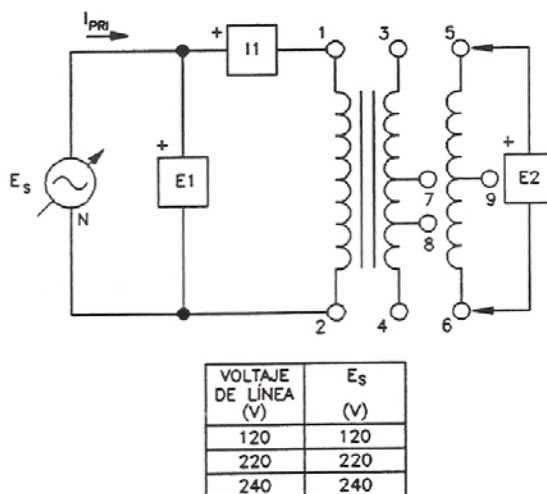


Figura 7-3. Mediciones en un transformador monofásico.



Relaciones de voltajes y corrientes

- ☐ 6. Encienda la Fuente de alimentación y ajuste el control de voltaje para obtener el valor E_s que muestra la Figura 7-3. Mida la corriente primaria del transformador y los voltajes en los diferentes terminales. Después, anote las mediciones, gire la perilla de control de voltaje completamente a la izquierda y apague la fuente.

Nota: Cuando se miden voltajes diferentes, apague la Fuente de alimentación antes de modificar las conexiones entre la DAI y el circuito.

$$\begin{array}{lll} I_{PRI} = \text{_____ A} & E_{1-2} = \text{_____ V} & E_{3-4} = \text{_____ V} \\ E_{5-6} = \text{_____ V} & E_{3-7} = \text{_____ V} & E_{7-8} = \text{_____ V} \\ E_{8-4} = \text{_____ V} & E_{5-9} = \text{_____ V} & E_{9-6} = \text{_____ V} \end{array}$$

- ☐ 7. Los voltajes secundarios, ¿resultan comparables con los valores nominales indicados en el panel frontal?

☐ Sí ☐ No

- ☐ 8. Los arrollamientos del transformador entre los terminales 1 y 2 y entre los terminales 5 y 6, tienen 500 espiras de alambre cada uno. El arrollamiento entre los terminales 3 y 4 es de 865 espiras. Calcule para cada caso, las relaciones de espiras entre los arrollamientos primario y secundario.

$$\frac{N_{1-2}}{N_{5-6}} = \text{_____} \qquad \frac{N_{1-2}}{N_{3-4}} = \text{_____}$$

- ☐ 9. Utilice los valores medidos en la etapa 6 para comparar estas relaciones de espiras del transformador con las correspondientes relaciones de voltaje. ¿Son aproximadamente iguales?

☐ Sí ☐ No

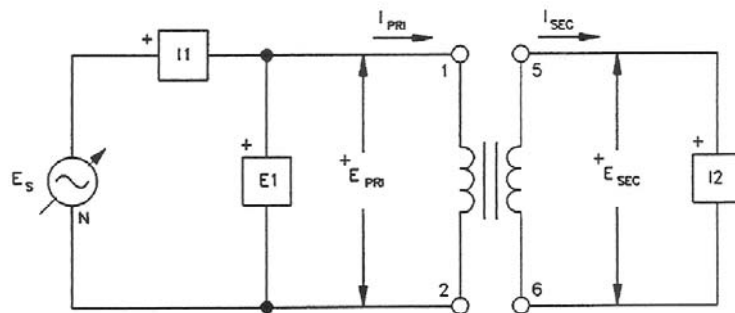
- ☐ 10. Conecte I2 como lo muestra la Figura 7-4 y observe que I2 cortocircuita el arrollamiento 5-6 del secundario. Seleccione el archivo de configuración existente *ES17-2.cfg*. Encienda la fuente y ajuste lentamente el control de voltaje para obtener el valor de corriente I_s que muestra la Figura 7-4.

- ☐ 11. Anote los valores de voltaje y corriente primarios y el valor de la corriente secundaria de cortocircuito del arrollamiento 5-6.

$$E_{PRI} = \text{_____ V} \qquad I_{PRI} = \text{_____ A} \qquad I_{SEC} = \text{_____ A}$$



Relaciones de voltajes y corrientes



VOLTAJE DE LÍNEA (V)	I_s (A)
120	0.40
220	0.20
240	0.20

Figura 7-4. Determinación de la relación entre la corriente primaria y la corriente secundaria.

- ☐ 12. Coloque nuevamente el control de voltaje en cero y apague la fuente. Calcule la relación entre la corriente primaria y la corriente secundaria.

$$\frac{I_{PRI}}{I_{SEC}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- ☐ 13. ¿Resulta la relación aproximadamente igual a N_2 / N_1 ?

☐ Sí ☐ No

- ☐ 14. Conecte I2 para que ahora cortocircuite los terminales 3-4 del secundario. Encienda la Fuente de alimentación y ajuste lentamente la perilla de control de voltaje para obtener el mismo valor de corriente de la etapa 10. Anote nuevamente el voltaje y la corriente del primario y la corriente del secundario.

$$E_{PRI} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V} \quad I_{PRI} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A} \quad I_{SEC} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$$

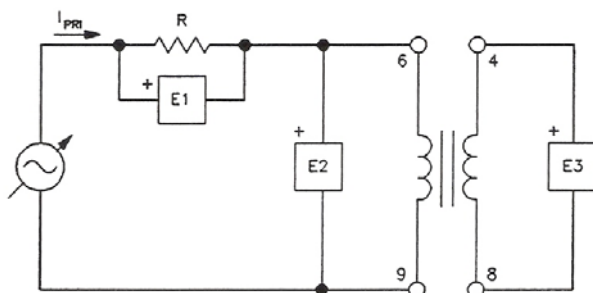
- ☐ 15. Coloque nuevamente el control de voltaje en cero y apague la fuente. Calcule otra vez la relación entre la corriente primaria y la corriente secundaria. ¿Resulta igual a N_2 / N_1 ?

☐ Sí ☐ No



Relaciones de voltajes y corrientes

- ☐ 16. Monte el circuito del transformador de la Figura 7-5. Dicho circuito se utilizará para mostrar cómo resulta afectada la corriente de excitación, cuando el núcleo del transformador se satura. Dado que la corriente de excitación es muy pequeña, para mostrar su variación se utiliza el voltaje a través de un resistor de medición R. Conecte los terminales primarios del transformador a los terminales 4 y 5 de la Fuente de alimentación a través del resistor de medición R. Conecte E1, E2 y E3 para medir los voltajes del transformador.
- ☐ 17. Seleccione el archivo de configuración existente *ES17-3.cfg*. Encienda la Fuente de alimentación y utilice el control de voltaje de salida para obtener valores de E2 a intervalos iguales y cercanos al 15 % del rango de la perilla de control. Para cada ajuste de voltaje, haga clic sobre el botón Registro de datos para ingresar las mediciones en la *Tabla de Datos*.
- ☐ 18. Una vez ingresados todos los datos, gire el control de voltaje completamente a la izquierda y apague la Fuente de alimentación.



VOLTAJE DE LÍNEA (V)	R (Ω)
120	100
220	367
240	400

Figura 7-5. Efecto de la saturación del núcleo en la corriente de excitación.

- ☐ 19. Muestre la ventana *Gráfico* y seleccione E1 como parámetro del eje X y E2 como parámetro del eje Y. Haga clic sobre el botón *Gráfico* continuo para observar la curva del voltaje primario representado por E1, en función de la corriente de excitación. ¿Encuentra usted que después de superar el voltaje nominal, la corriente de excitación se incrementa más rápidamente?

☐ Sí ☐ No



Relaciones de voltajes y corrientes

☐ 20. ¿Encuentra usted que la curva muestra que el núcleo se ha saturado?

☐ Sí ☐ No

☐ 21. Revise los valores medidos para determinar cómo se afectó la relación entre los voltajes primario y secundario, cuando el núcleo del transformador se saturó.

☐ 22. Asegúrese de que la Fuente de alimentación ha sido apagada, que la perilla de control de voltaje se encuentra girada completamente a la izquierda y que todos los cables han sido desconectados.

CONCLUSIÓN

Usted ha medido los voltajes primario y secundario de un transformador monofásico y ha confirmado que la relación entre dichos voltajes es igual a la relación de espiras N_1 / N_2 . Las mediciones de las corrientes primaria y secundaria han demostrado que la relación de corrientes es igual a la inversa de la relación de espiras. Además, usted ha observado el fenómeno de saturación del núcleo y ha visto que dicha saturación no afecta la relación de voltajes.

PREGUNTAS DE REVISIÓN

1. Para un transformador con 225 espiras en el arrollamiento primario y 675 espiras en el secundario, la relación de espiras es
 - a. 1 : 3.
 - b. 3 : 1.
 - c. N_1 / N_2 .
 - d. N_2 / N_1 .
2. En un transformador, la corriente del secundario en cortocircuito es 5 A. Si la relación de espiras del transformador es 1 : 4, ¿cuál es la corriente primaria?
 - a. 20 A.
 - b. 1,25 A.
 - c. 2,0 A.
 - d. 0,8 A.



Relaciones de voltajes y corrientes

3. La saturación del transformador se produce cuando
 - a. la corriente primaria es mayor que el valor nominal.
 - b. el arrollamiento secundario está cortocircuitado.
 - c. el voltaje secundario es mayor que valor nominal.
 - d. el voltaje primario es mayor que el valor nominal.

4. Se aplican 200 V al arrollamiento primario de un transformador elevador que duplica su voltaje primario. ¿Qué corriente circulará en una carga resistiva de 100 Ω , conectada en el arrollamiento secundario?
 - a. 1 A.
 - b. 2 A.
 - c. 3 A.
 - d. 4 A.

5. Cuando se calcula la relación de corriente de un transformador, ¿por qué es necesario aplicar un voltaje reducido al arrollamiento primario, en lugar del voltaje nominal?
 - a. Para asegurar la circulación de la corriente nominal secundaria.
 - b. Para asegurar que no se excede la corriente de régimen del primario.
 - c. Para asegurar que se respeta el voltaje de régimen del secundario.
 - d. Para asegurar que la corriente de excitación sea máxima.