

6 | Transformadores

Introducción a las operaciones del sistema

Esquema del curso

1. Introducción al WECC
2. Fundamentos de la Electricidad
3. Descripción general del sistema de energía
4. Principios de Generación
5. Descripción general de la subestación
6. Transformadores
7. Transmisión de potencia
8. Protección del sistema
9. Principios de funcionamiento del sistema

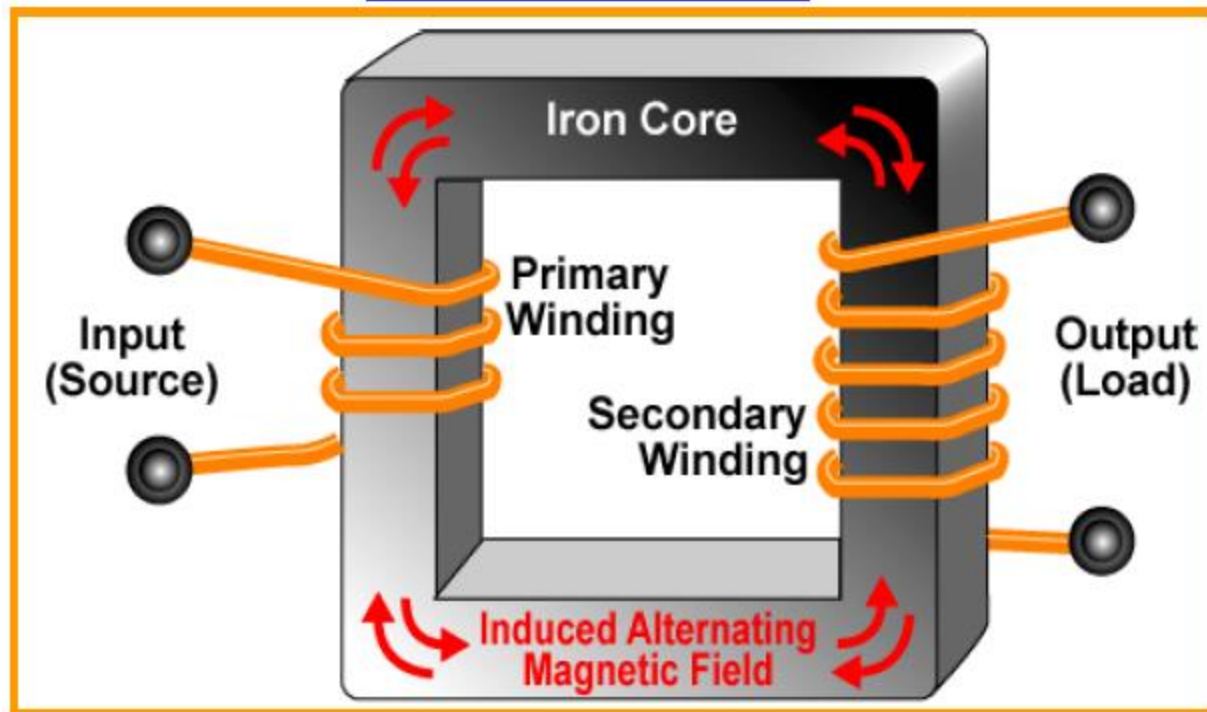
Descripción general del módulo

- Este módulo presenta los siguientes temas:
- Principio de funcionamiento
- Tipos de Transformadores
- Consideraciones y limitaciones operativas

Principio de funcionamiento

- A **transformador** cambia el voltaje hacia arriba o hacia abajo y la corriente hacia abajo o hacia arriba.
- Un transformador tiene dos o más devanados alrededor de un solo núcleo de acero.
- Los conductores de los devanados, suelen ser de cobre o aluminio.

Transformador de dos devanados



El devanado primario está conectado a la fuente de alimentación. El devanado secundario está conectado al lado de salida o de carga. No hay conexión eléctrica entre los devanados primario y secundario.

Devanado terciario

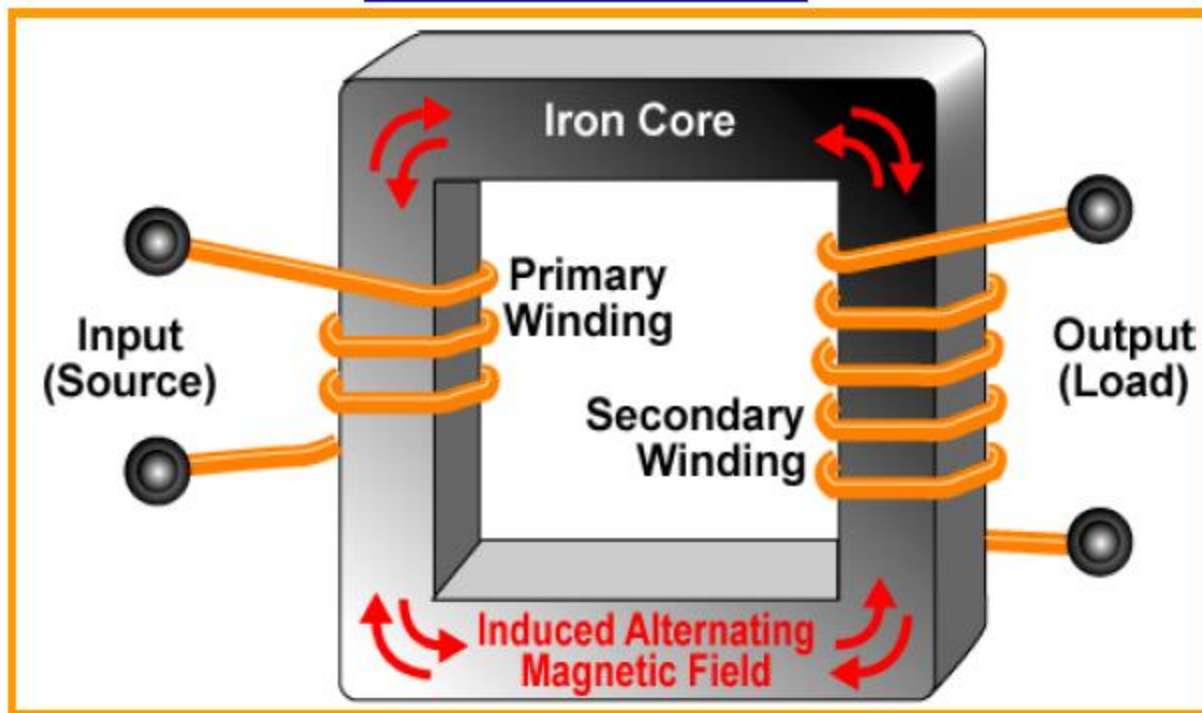
- A **devanado terciario**, a veces está presente. Proporciona energía a un circuito auxiliar o un reactor.
- El núcleo y los devanados están montados en un tanque de acero lleno de aceite mineral.
- Aislado **casquillos**, montado en la parte superior del tanque, conecta los devanados a otros equipos del sistema de energía.

¿Cómo funcionan los transformadores?

- Una corriente alterna en los devanados provoca un flujo magnético alterno en el núcleo.
- El flujo magnético en el núcleo pasa a través de otra bobina (el devanado secundario), induciendo un voltaje alterno en esta bobina.
- La cantidad de voltaje inducido depende de cuatro factores:
 - 1) composición y forma del núcleo
 - 2) número de vueltas en bobina primaria o devanado
 - 3) número de vueltas en la bobina o devanado secundario
 - 4) voltaje primario

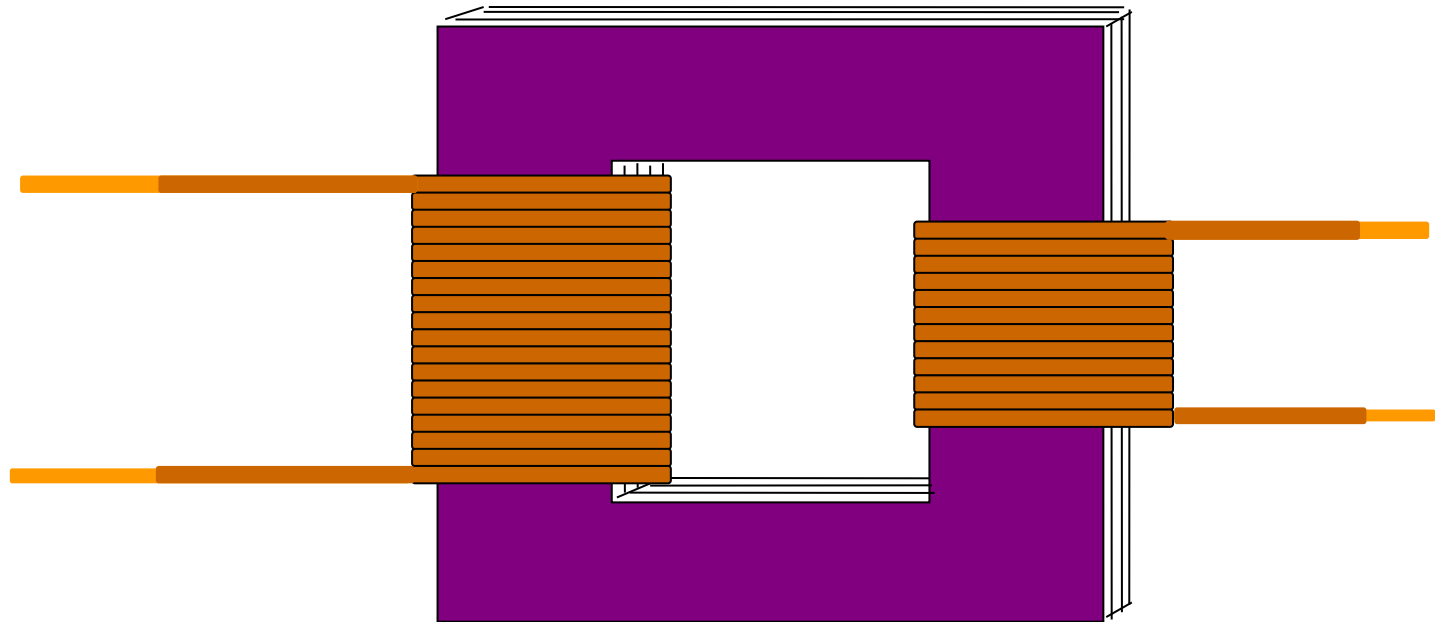
¿Cómo funcionan los transformadores?

En un transformador hay dos o más bobinas unidas entre sí por un núcleo común que conduce el flujo magnético. El flujo de una bobina (el devanado primario) pasa a través de la otra bobina (el devanado secundario), induciendo un voltaje en el devanado secundario. La inducción mutua une los dos devanados.



Transformador básico

Núcleo de acero laminado



Fuente
Lado = Primario
Devanado

Secundario
Devanado

=Carga
Lado

¿Cómo funcionan los transformadores?

- El núcleo de un transformador está hecho de piezas de chapa de acero cuidadosamente apiladas.
- El flujo magnético viaja (penetra) el acero cientos de veces más fácilmente que a través del aire.
- El núcleo está formado para permitir el paso máximo de acero para que fluya el fundente, con espacios de aire mínimos.
- Las láminas individuales de acero reducen las corrientes de Foucault entre las láminas.

Núcleo de transformador de acero apilado



- Los devanados se pueden ensamblar en un tubo hueco antes de colocarlos sobre una pata del núcleo.
- Los hilos individuales se transponen cuidadosamente para equilibrar la corriente inducida desigual.
- Cuando los devanados están en su lugar, el núcleo de acero se intercala para completar el núcleo.
- El montaje final está reforzado en previsión de fuertes fuerzas electromagnéticas durante el funcionamiento.

¿Cómo funcionan los transformadores?



Relación de vueltas

- Los cambios de tensión en el transformador están determinados por la **relación de vueltas** relación de devanados.
- El flujo magnético une las vueltas de los devanados primario y secundario.
- El Flux induce el mismo voltaje en cada vuelta.
- El voltaje total del devanado es la suma de los voltajes inducidos en cada una de sus vueltas.

Relación de vueltas

- El voltaje total en cada devanado es proporcional al número de vueltas en ese devanado:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad V_1 = \frac{n_1}{n_2} V_2$$

Donde:

- V_1 y V_2 son los voltajes en los devanados primario y secundario, respectivamente.
- n_1 y n_2 son el número de vueltas en los devanados primario y secundario, respectivamente.

Relación de vueltas

- Los cambios de corriente en el transformador también están determinados por la ***relación de vueltas***
- El mismo flujo magnético une las vueltas de los devanados primario y secundario.
- El flujo es proporcional al total de Amp-Turns.
- El devanado con menos vueltas requiere más amperios.

Relación de vueltas

- La corriente total en cada devanado es inversamente proporcional al número de vueltas en ese devanado:

$$\frac{y_{10}}{y_{20}} = \frac{n_{20}}{n_{10}} \quad y_{10} = \frac{n_{20}}{n_{10}} * y_{20}$$

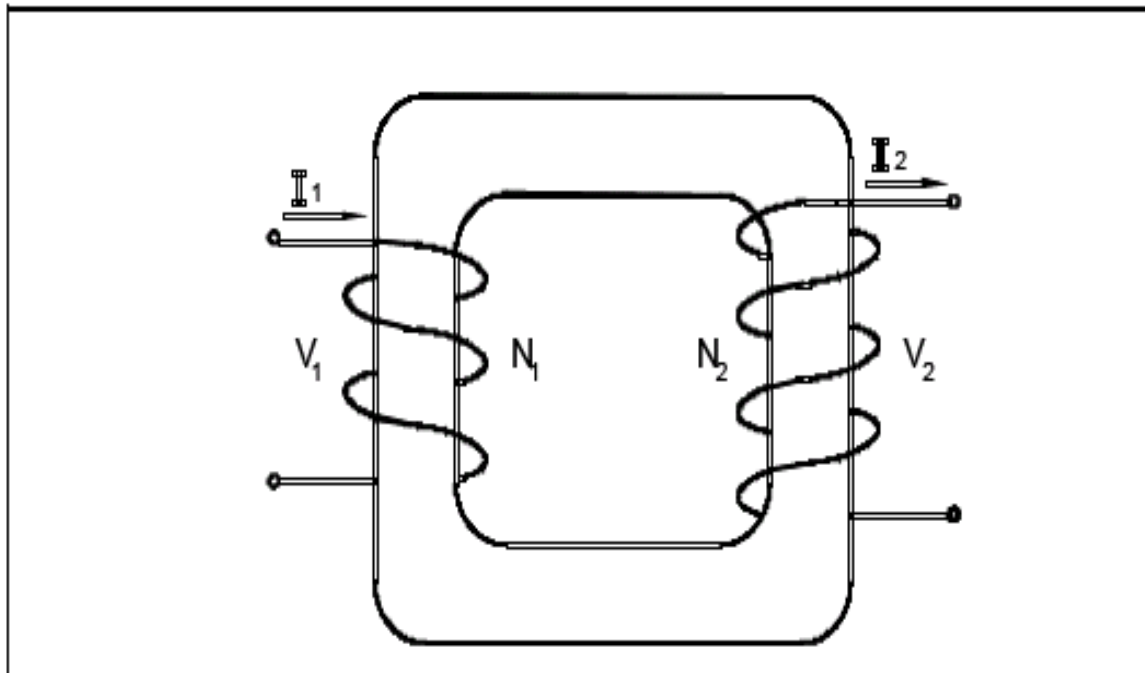
Donde:

- y_{10} y y_{20} son las corrientes en los devanados primario y secundario.
- n_{10} y n_{20} son el número de vueltas en los devanados primario y secundario, respectivamente.

Relación de vueltas

- Los devanados tienen una inductancia que se opone a los cambios de corriente.
- A medida que aumenta la corriente, aumenta el flujo magnético en el núcleo.
- El flujo magnético cambiante se opone al cambio en la corriente.
- Esto provoca un retraso de tiempo o un cambio de ángulo de fase de hasta 90° (si el transformador no está cargado)

Relación de vueltas



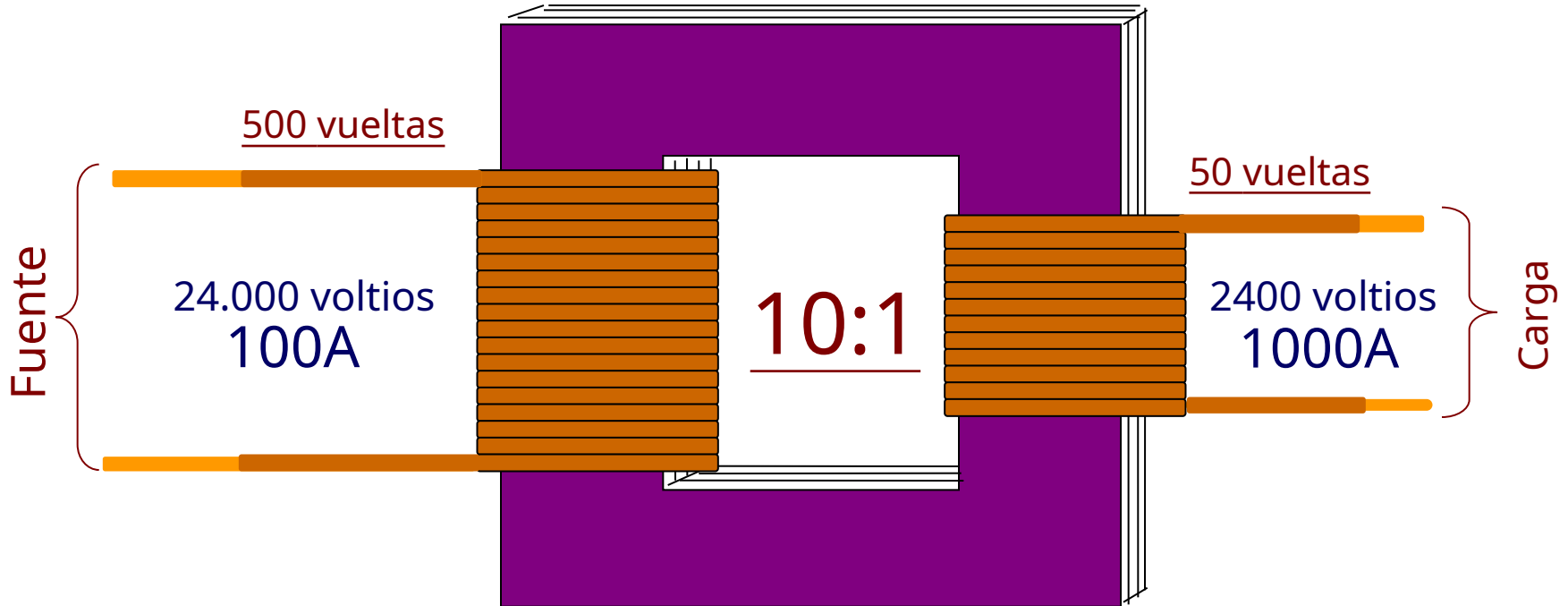
$$\frac{1}{2} = 1 \quad \frac{1}{2} = 2 \quad \frac{1}{2} \quad \frac{1}{1}$$

Relación de vueltas

- En un transformador ideal, Power-In es igual a Power-Out. $P_{AG1} = P_2$
- Haciendo las matemáticas....
- $$P_1 = V_1 * I_1 = V_2 * \frac{I_1}{2} \quad \frac{I_1}{2} * y_{O2} = V_2 * y_{O2} = P_{AG2}$$
- En otras palabras... el voltaje sube, la corriente baja, la potencia permanece igual.

ma rn r atío

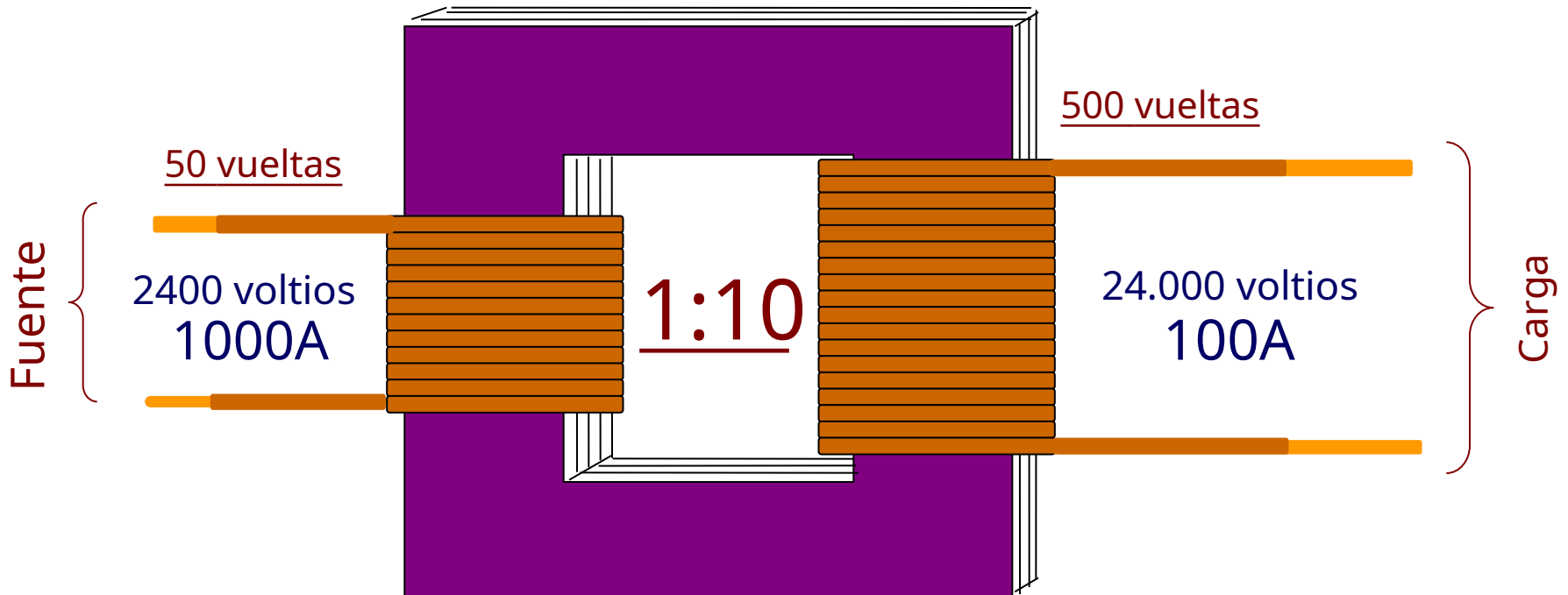
Transformador reductor



$$\frac{\text{norte}_{\text{PAG}}}{\text{nortes}} = \frac{500}{50} = \frac{10}{1} \quad \frac{10}{1} = \frac{V_{\text{PAG}}}{V_S} \quad \frac{10}{1} = \frac{y_o}{y_{\text{OPAG}}}$$

ma rn r atío

Transformador elevador



$$\frac{\text{norte}_{\text{PAG}}}{\text{nortes}} = \frac{50}{500} = \frac{1}{10} \quad \frac{1}{10} = \frac{V_{\text{PAG}}}{V_S} \quad \frac{1}{10} = \frac{y_{\text{SO}}}{y_{\text{OPAG}}}$$

Comprueba tu conocimiento:

Determinación del poder: relación de vueltas

Un transformador tiene 300 vueltas en su devanado primario y 600 vueltas en su devanado secundario. El voltaje de entrada es de 120 voltios.

Las cantidades dadas son:

- $V_1 = 120$ voltios
- $n_{1e} = 300$ vueltas
- $n_{2e} = 600$ vueltas

1. ¿Cuál es el voltaje de salida?

Comprueba tu conocimiento:

Determinación del poder: relación de vueltas

Un transformador tiene 300 vueltas en su devanado primario y 600 vueltas en su devanado secundario. El voltaje de entrada es de 120 voltios.

Las cantidades dadas son:

- $V_1 = 120$ voltios
- $n_{1e} = 300$ vueltas
- $n_{2e} = 600$ vueltas

1. ¿Cuál es el voltaje de salida?

Respuesta: $V_2 = 120V \times \frac{600}{300} = 240V$

Comprueba tu conocimiento:

Determinación del poder: relación de vueltas

2. Dado $I_1 = 800$ Amperios cual es la corriente secundaria, I_2 ?

Comprueba tu conocimiento:

Determinación del poder: relación de vueltas

2. Dado $I_1 = 800$ Amperios cual es la corriente secundaria, I_2 ?

Respuesta: $I_2 = 800 \text{ amperios} \times \frac{300}{600} = 400 \text{ amperios}$

Comprueba tu conocimiento:

Determinación del poder: relación de vueltas

Verifique que la potencia sea la misma en ambos lados del transformador.

$$P_{AG1} = V_1 \times I_1 = 120V \times 800A = 96,000 W$$

$$P_2 = 240V \times 400A = 96.000 W \quad \checkmark \text{ ¡Compruebe!}$$

Poder determinante

- Ejemplo (continuación):
- Verifique que la potencia sea la misma en ambos lados del transformador.
- $PAG_1 = V_1 \times I_1 = 120 \text{ V} \times 800 \text{ A} = 96\,000 \text{ W}$
- $PAG_2 = 240 \text{ V} \times 400 \text{ A} = 96\,000 \text{ W}$
- ✓ ¡Compruebe!

Transformador elevador/reductor

- La energía puede fluir en cualquier dirección a través de un transformador
- ...aumentar o reducir el voltaje
- ...dependiendo de cómo se mire.

Transformador elevador/reductor

- Pase lo que pase con el voltaje a través del transformador, sucede lo contrario con la corriente.
 - Si se reduce el voltaje, la corriente aumenta en la misma proporción.
 - Del mismo modo, cuando se aumenta el voltaje, la corriente se reduce en la misma proporción.
- Los transformadores no producen electricidad. Solo lo transforman de un nivel a otro; es decir, subir o bajar el voltaje o la corriente.

Transformador elevador/reductor

Para un nivel dado de potencia, cuanto mayor sea el voltaje, menor será la corriente. El uso de una corriente más baja reduce las pérdidas.

- Esta es la razón por la que los sistemas de transmisión utilizan alta tensión.
- Una unidad de transformador elevador de generador (GSU) eleva el voltaje de salida del generador.



Pérdidas

- Mientras el transformador está funcionando, parte de la energía eléctrica se convierte en calor.
- Cualquier calor que produzca el transformador es una pérdida de energía y representa ineficiencia.

Eficiencia del transformador

- La eficiencia de un transformador es la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada.

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Output Power}}{\text{Input Power}} \times 100$$

- En un transformador ideal, la entrada de energía es igual a la salida de energía.
- En realidad, el transformador consume parte de la energía.
- La mayoría de los transformadores tienen una eficiencia de 97% a 99%.

Pérdidas

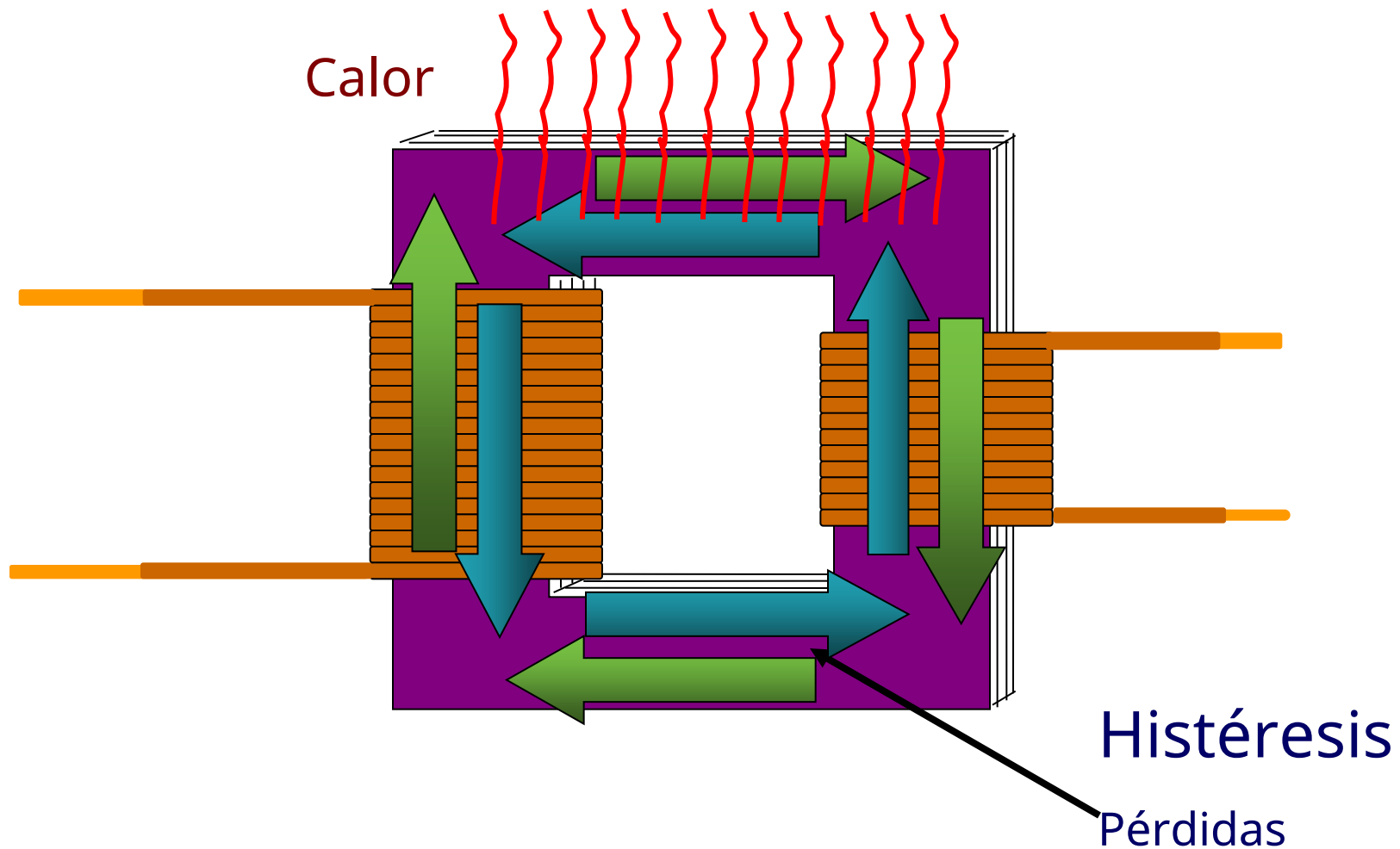
- La potencia consumida se llama *pérdida de potencia*. Es causado por lo siguiente:
 - pérdidas por histéresis
 - pérdidas por corrientes de Foucault
 - cobre (I^2R) pérdidas
- Las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault ocurren en el núcleo del transformador.
- Las pérdidas de cobre ocurren en los devanados.
- Los tres tipos de pérdidas convierten la energía eléctrica en calor.
- Estas pérdidas pueden sobrecalentar el transformador durante períodos de sobrecarga.

Magnetismo Residual

- La pérdida de histéresis se debe a ***magnetismo residual***, que permanece en un material después de que se elimina la fuerza de magnetización.
- El núcleo del transformador invierte la polaridad magnética cada vez que la corriente primaria invierte la dirección.
- El magnetismo residual de la polaridad anterior tiene que ser superado.
- Esto produce calor.

transformar metroer L osss

(Pérdidas de núcleo)

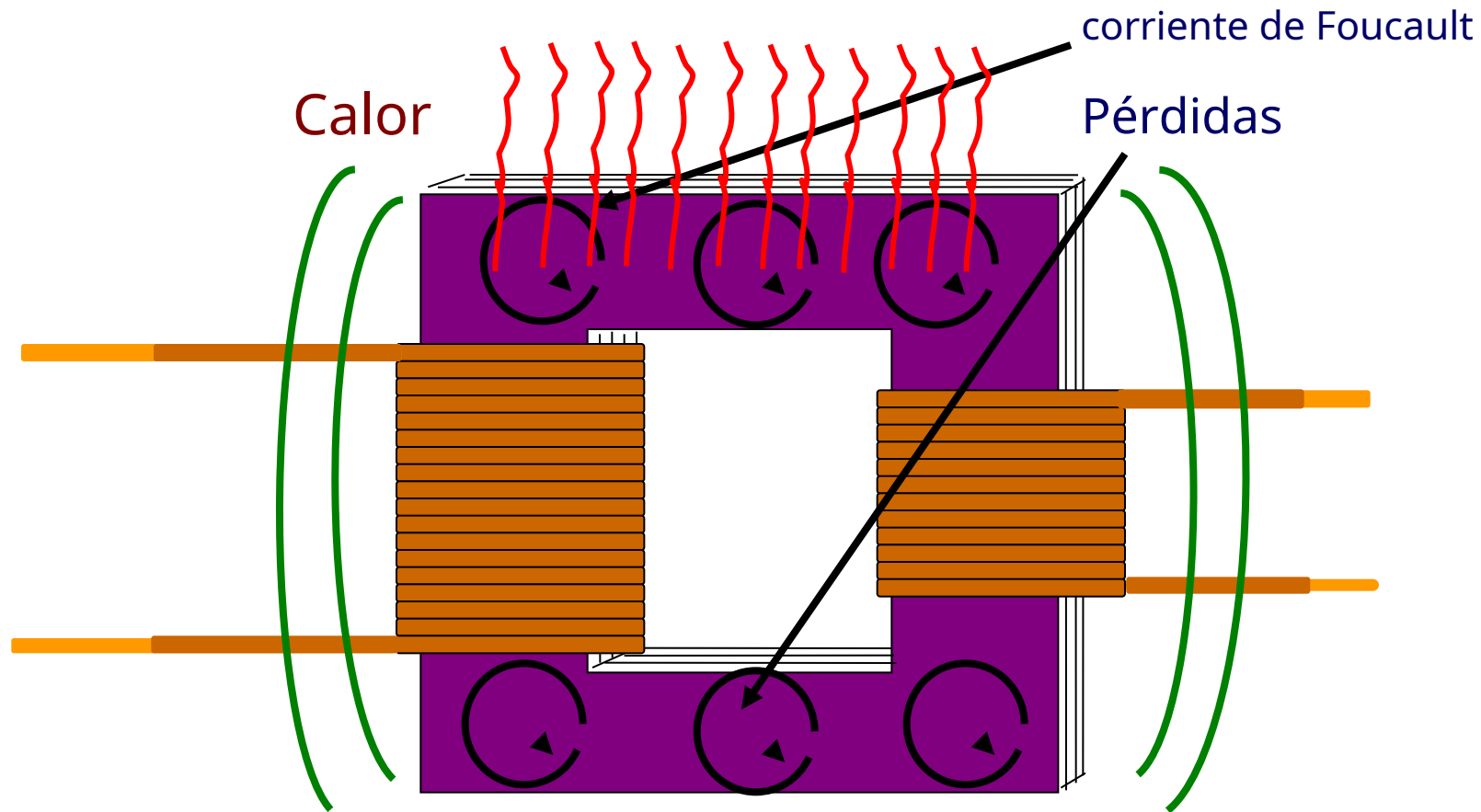


corrientes de Foucault

- ***corrientes de Foucault*** son el resultado del voltaje inducido en el núcleo por el flujo magnético cambiante.
- La bobina primaria crea un flujo magnético cambiante que induce un voltaje en la bobina secundaria.
- El flujo también induce voltajes y corrientes en el núcleo de acero, que es en sí mismo un conductor.
- La corriente que fluye a través de la resistencia del acero se convierte en calor.
- La corriente de Foucault se puede reducir laminando el núcleo del transformador, utilizando acero al silicio de mayor resistencia y grabando con láser la superficie del acero.

transformar metroer L osss

(Pérdidas de núcleo)

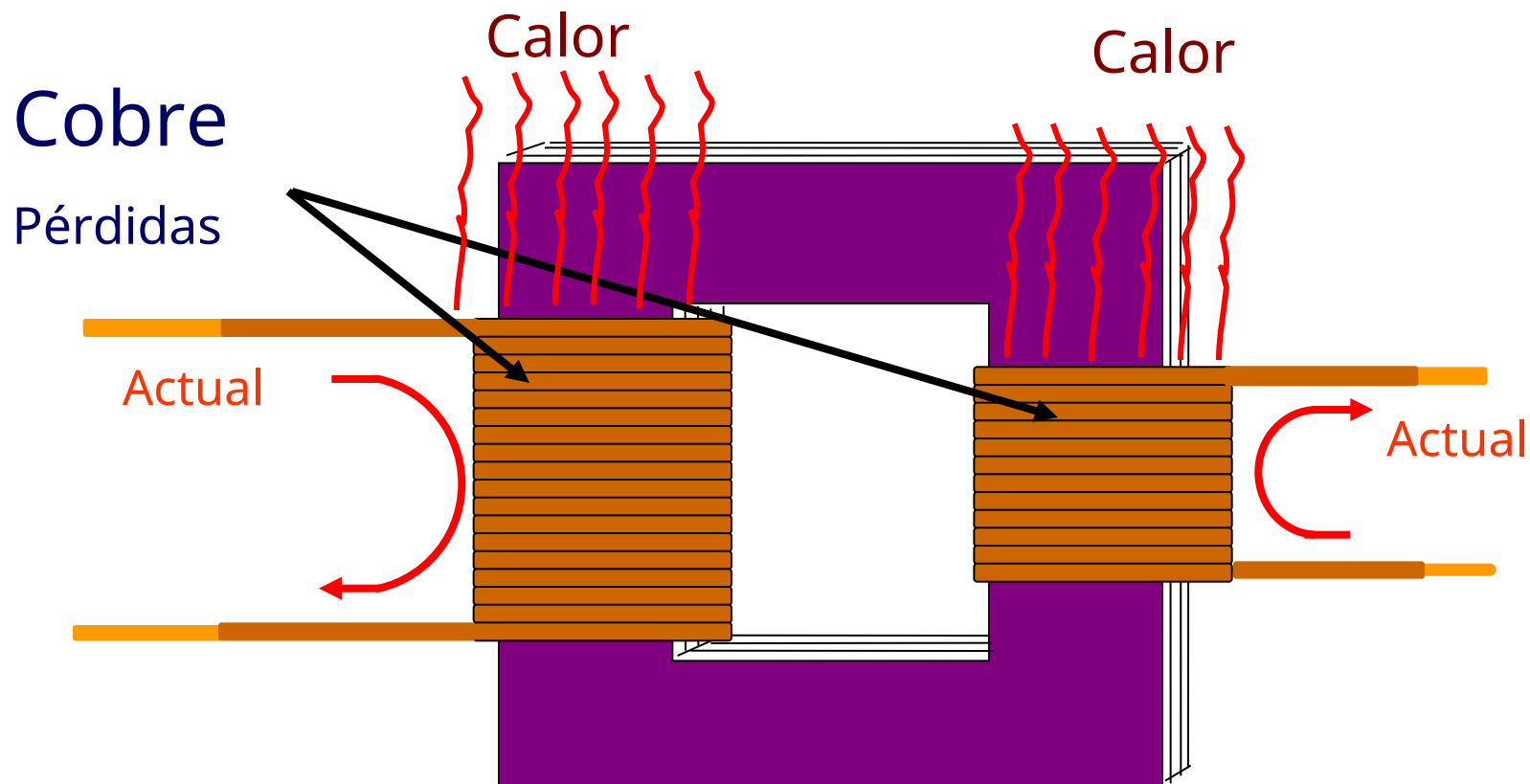


Pérdida de cobre (I^2R pérdidas)

- ***Pérdida de cobre (o I^2R pérdida)*** es energía convertida en calor debido a la corriente que fluye a través de la resistencia de los devanados.
- El uso de conductores más grandes para los devanados del transformador reduce la pérdida de cobre.

transformar metroer L osss

(YO₂Pérdidas R)



Pérdidas del transformador

- Los usuarios de Grandes Transformadores cuantifican el costo de las pérdidas e informan el costo a los fabricantes.
- Los fabricantes diseñan un transformador que minimizará sus costos de acero, cobre y aluminio -
- Mientras se minimiza el costo total de propiedad del comprador, incluidas las pérdidas.

Pérdidas del transformador

- Las pérdidas se caracterizan por:
 - Pérdidas de carga: proporcional al cuadrado de la carga (principalmente pérdidas de cobre)
 - Pérdidas sin carga: que se consumen cada vez que se energiza el transformador (principalmente pérdidas en el núcleo)
- Los usuarios calculan un factor de costo para cada tipo de Pérdida
 - El costo por vatio para pérdidas de carga es K_1
 - El costo por pérdida de vatio para pérdidas sin carga es K_2

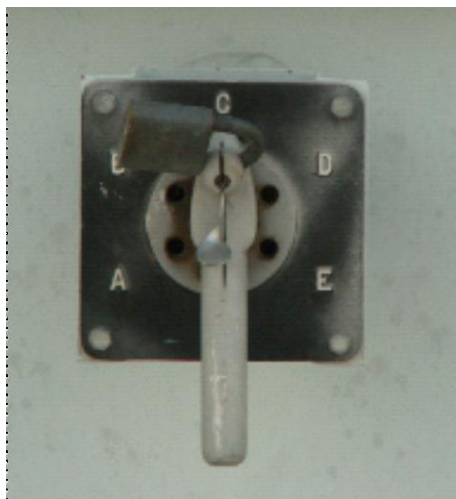
Pérdidas del transformador

- Los usuarios pueden evaluar las ofertas calculando un costo total de propiedad (TOC) para diferentes transformadores.
- $TOC = \text{Precio de compra} + \text{Sin pérdida de carga} * K1 + \text{Pérdida de carga} * K2$

Control de voltaje

- La mayoría de los transformadores de alto voltaje contienen muchos grifos.
- **Agrifo** es una conexión en algún punto del devanado de un transformador que permite cambiar la relación de vueltas.
- Cambiar la relación de vueltas altera el voltaje y la corriente secundarios.
- Para ajustes poco frecuentes (p. ej., por crecimiento de la carga o variaciones estacionales), las empresas de servicios públicos utilizan **cambiadores de tomas desenergizados sin carga**.

Cambiadores de tomas



Cambiador de tomas de carga

- Donde sea necesario hacer ajustes frecuentes de voltaje, o donde el transformador no se pueda desenergizar, las empresas de servicios públicos usan ***Cambio de tomas de carga (LTC)*** transformadores
- Los transformadores LTC, a veces se denominan ***cambio de tomas bajo carga (TCUL)*** transformadores.
- ***LTC*** Los transformadores se pueden operar automáticamente, por control local o remoto.

Cambiador de tomas de carga

- El cambiador de tomas es operado por un motor que responde a la configuración del relé para mantener el voltaje en un nivel predeterminado.
- Los circuitos especiales permiten cambiar el grifo sin interrumpir la corriente.
- El equipo LTC generalmente se aloja en un compartimiento separado en el costado del transformador.

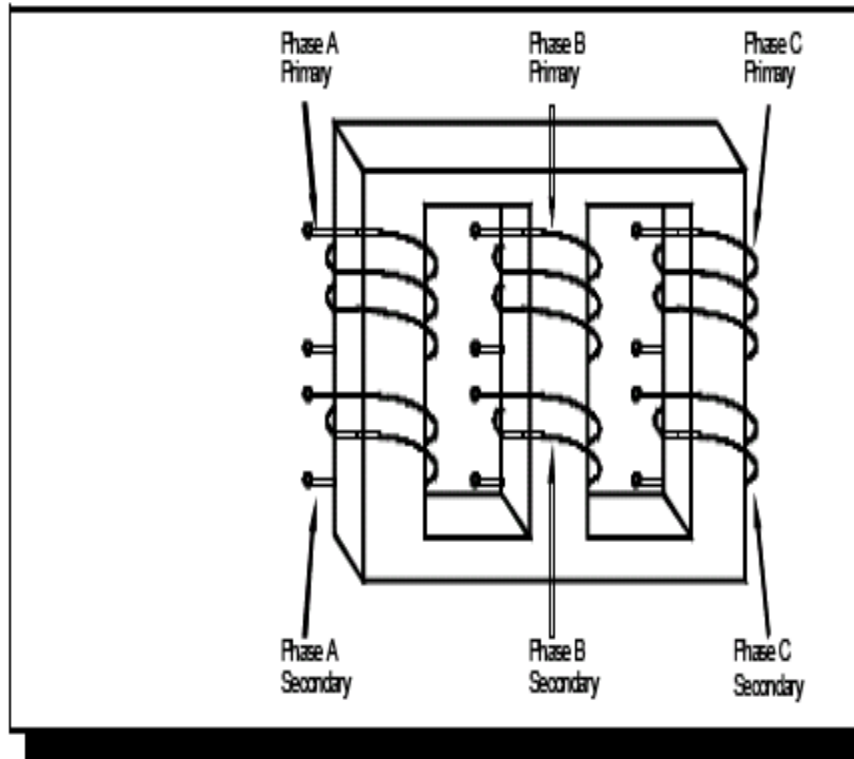
Cambiador de tomas de carga



Transformador trifásico

- En los transformadores trifásicos hay tres devanados primarios y tres devanados secundarios.
- Algunos transformadores trifásicos incluyen devanados para las tres fases en un tanque.
- Un transformador trifásico puede tener un solo núcleo con 3 o 5 patas.
- Otros transformadores trifásicos tienen tres transformadores monofásicos conectados entre sí.

Transformador trifásico



Transformador trifásico



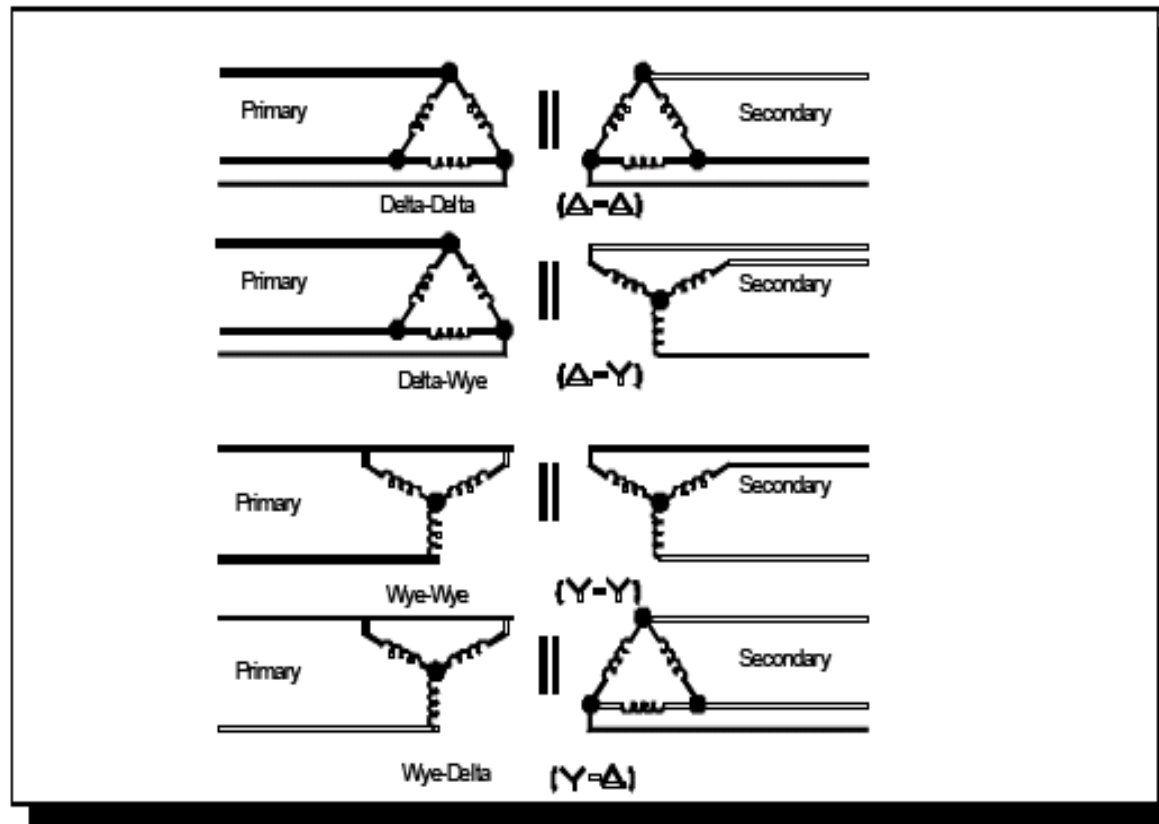
Banco de transformadores

- ***A*banco de transformadores** es dos o más transformadores monofásicos conectados como una unidad.
- **Él**mayoría Los métodos comunes para conectar los devanados son:
 - **Y**o conexión Y (a veces llamada estrella)
 - **Delta**conexión
- Algunas conexiones dan como resultado una ***cambio de fase***
- Los devanados primario y secundario no necesitan tener la misma conexión.

Banco de transformadores



Conexiones del transformador



En algunos transformadores, el punto neutro en la conexión Y está conectado a tierra.

Conexiones del transformador

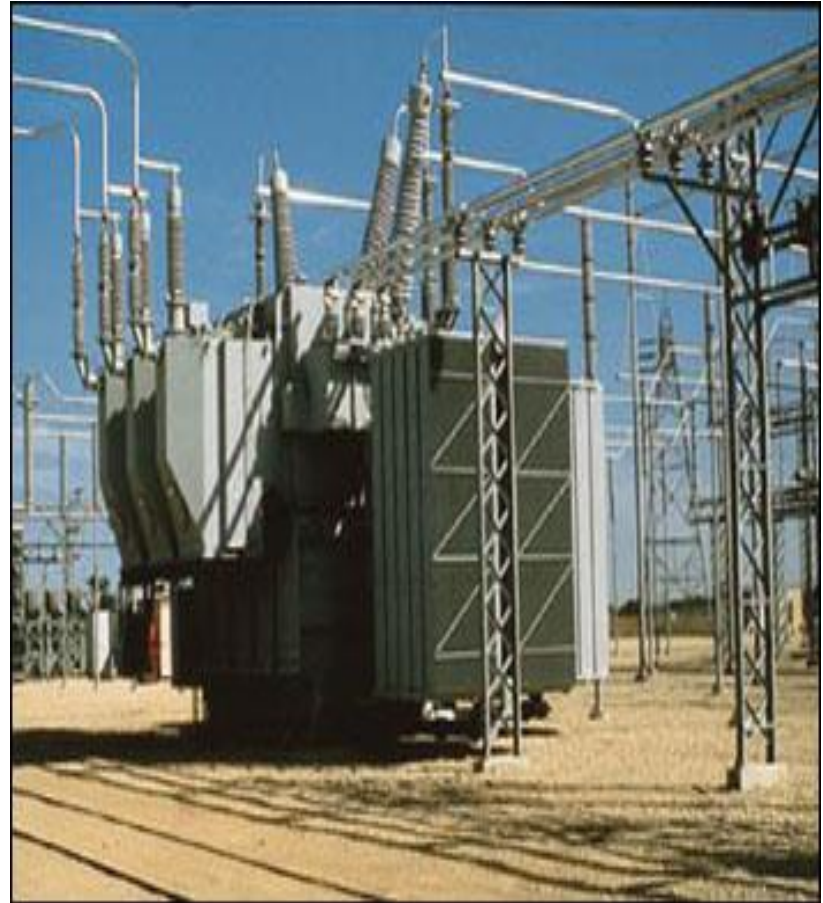
- Considere los cambios de fase antes de unir los circuitos si se alimentan a través de diferentes tipos de transformadores.
- Por ejemplo: conectar un circuito alimentado por un banco Wye-Delta a un circuito alimentado por un banco Wye-Wye da como resultado un flujo de corriente excesivo debido a la diferencia de fase de 30° .

Tipos de Transformadores

- Transformadores de poder
- Autotransformadores
- Transformadores de cambio de fase
- Transformadores de instrumentos
- Transformadores de Distribución

Transformadores de poder

- A ***Transformador*** es para tensiones superiores a 69 kV.
- La mayor parte del poder los transformadores son **tres fases**.
- Transformadores de poder puede incluir grifo cambio de equipo.

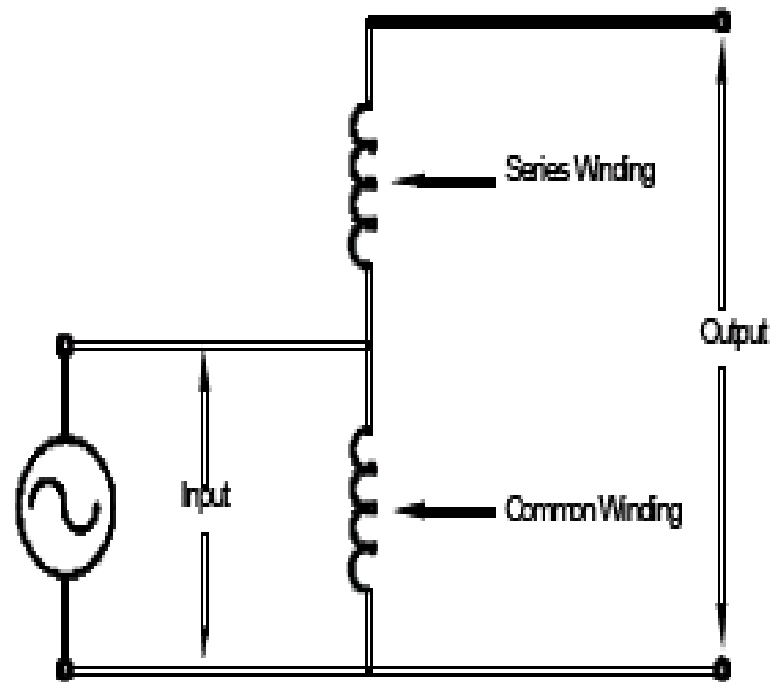


Autotransformadores

- Un **autotransformadores** un transformador de devanado simple con terminal que divide el devanado en dos secciones.
- Los autotransformadores son útiles porque son simplemente contruidos y cuestan relativamente poco en comparación con los transformadores de devanados múltiples.
- Los autotransformadores se diseñan de diversas formas para aumentar o disminuir el voltaje en
- Rangos de $\pm 5 \%$, $\pm 7,5 \%$ o $\pm 10 \%$.

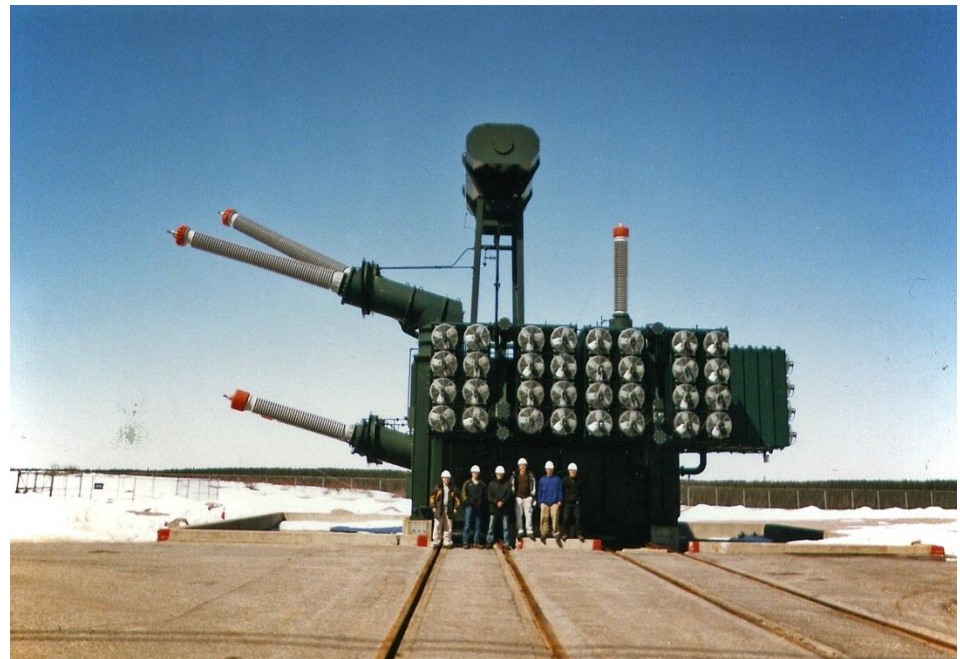


Autotransformadores

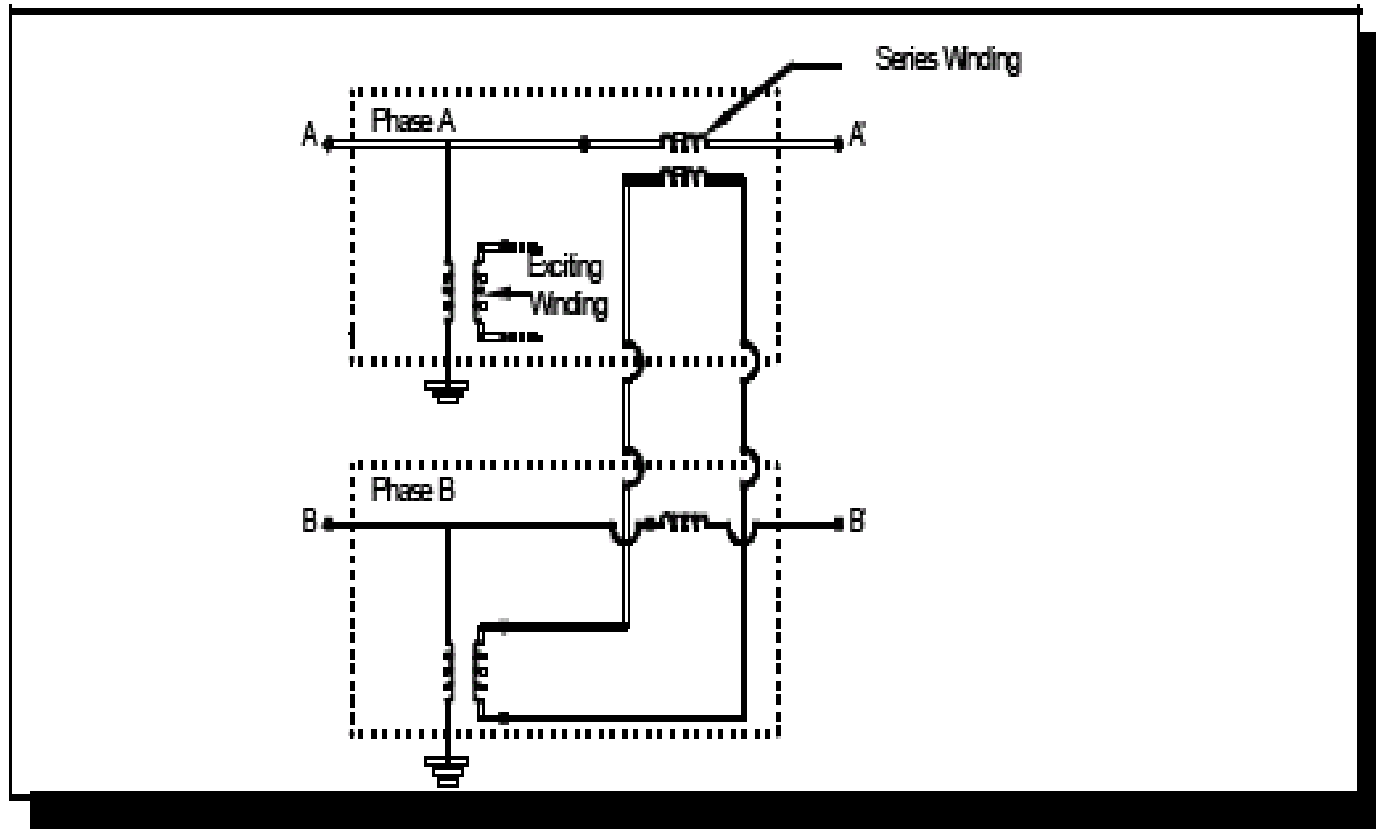


Transformadores de cambio de fase

- ***Transformadores de cambio de fase***, o reguladores de ángulo de fase (PARS), controlan el flujo de energía sobre líneas paralelas ajustando el ángulo de fase de voltaje en un extremo de la línea.
- Los transformadores de cambio de fase aumentan o disminuyen las diferencias de ángulo de fase entre los buses.
- El flujo de potencia en una línea es una función del ángulo de fase.

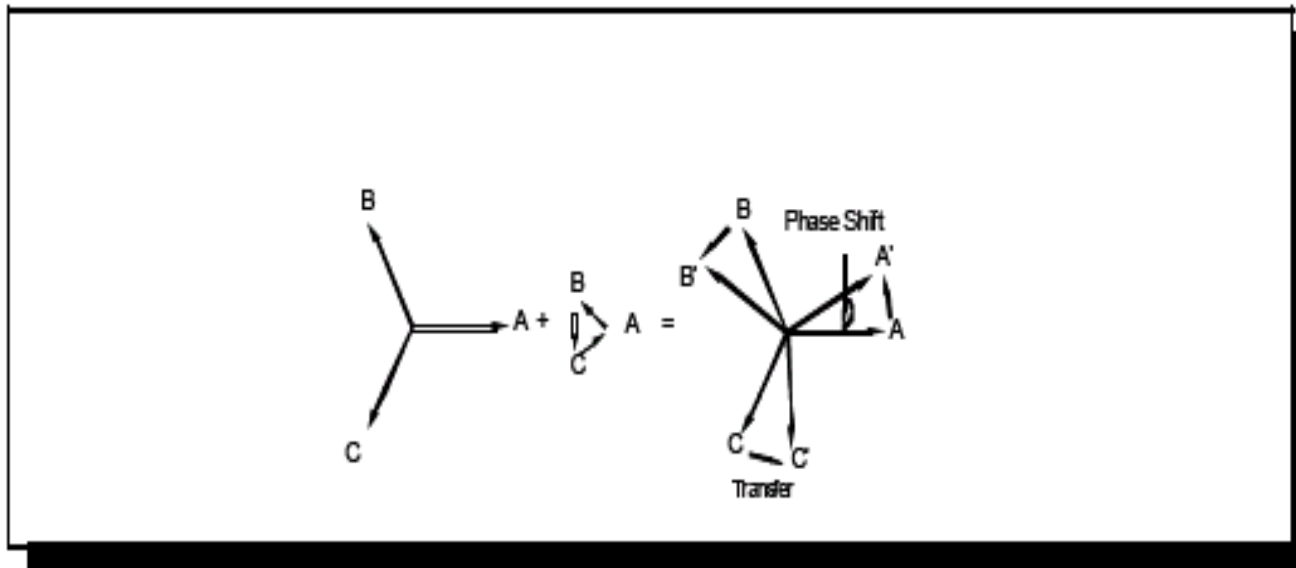


Transformadores de cambio de fase



Transformadores de cambio de fase

- El secundario del devanado en serie de la Fase A está conectado al devanado de excitación de la Fase B.
- El voltaje de la fase B tiene un retraso de 120° con respecto al voltaje de la fase A (o 60° de adelanto si la polaridad está invertida).
- El devanado de excitación de la fase B induce un voltaje en el devanado secundario de la serie de la fase A. Este pequeño voltaje desfasado hace avanzar el voltaje de suministro



Transformadores de instrumentos

- En sistemas de alto voltaje, la medición directa de voltaje o corriente no es práctica.
- **Transformadores de medida** reducir los valores para uso de medidores y relés.
- Los transformadores de medida incluyen transformadores de corriente (**Connecticut**s) y transformadores de potencial (**PTs**) (a veces llamados transformadores de tensión [**Vermonts**]).



Transformadores de Distribución

- A **transformador de distribución** reduce el voltaje a un nivel que es utilizable por los clientes. Los transformadores de distribución se montan en postes, en plataformas de hormigón o en bóvedas subterráneas.



Sistemas de refrigeración de transformadores

- El calentamiento excesivo en un transformador hace que el aislamiento se deteriore; por lo tanto, es importante evitar el sobrecalentamiento.
- El aceite aislante aleja el calor del núcleo del transformador hacia las paredes exteriores y las aletas del radiador para disipar el calor.
- Los transformadores están equipados con sistemas de enfriamiento que evitan que el aumento de temperatura exceda las especificaciones.

Sistemas de refrigeración de transformadores

- Los sistemas de refrigeración para grandes transformadores de potencia suelen incluir:
 - radiadores en los que el aire exterior enfría el aceite del transformador
 - bombas para aumentar la circulación de aceite cuando se necesita refrigeración adicional
 - ventiladores que soplan aire en los radiadores para mayor enfriamiento

Sistemas de refrigeración de transformadores



Clasificaciones de transformadores

- El calor generado dentro del tanque del transformador hace que el aislamiento del transformador se deteriore gradualmente.
- El calentamiento excesivo puede provocar un rápido deterioro del aislamiento del transformador.
- El **calificación del transformador** es la potencia máxima que puede transportar sin exceder un límite de temperatura.
- Los transformadores suelen tener más de una clasificación según la parte del sistema de enfriamiento que esté funcionando.

Clasificaciones de transformadores

- Él ***aceite-aire (OA)*** La clasificación se aplica cuando ni los ventiladores ni las bombas de aceite están funcionando. Esto es aproximadamente el 60% de la calificación máxima.
- Él ***aire forzado (FA)*** se aplica cuando los ventiladores están funcionando pero las bombas de aceite no están funcionando (el aceite fluye por circulación natural). Esto es aproximadamente el 80% de la calificación máxima.
- Él ***aceite forzado y aire (FOA)*** El valor nominal es el valor nominal máximo que se aplica cuando las bombas de aceite y los ventiladores de refrigeración están en funcionamiento (100 % del valor nominal).

Clasificaciones de transformadores

- Él ***aceite-aire (OA)*** La nueva nomenclatura es **EN UNA** (significado: Aceite – Circulación Natural, Aire – Circulación Natural)
- Él ***aire forzado (FA)*** La nueva nomenclatura es **ONAF** (significado: Aceite – Circulación Natural, Aire – Circulación Forzada)
- Él ***aceite forzado y aire (FOA)*** La nueva nomenclatura es **OFAF** (significado: Aceite – Circulación Forzada, Aire – Circulación Forzada)

Clasificaciones de transformadores

- Es importante detectar fallas en los devanados del transformador antes de que ocurran daños.
- Los problemas mayores suelen comenzar como pequeños cortocircuitos entre vueltas.
- Estos cortocircuitos generalmente se convierten en un arco, que produce grandes volúmenes de gas al evaporarse y descomponerse químicamente el aceite aislante.

Clasificaciones de transformadores

- Los relés que detectan el aumento de la presión interna del gas en el tanque pueden detectar dichas fallas mientras aún son relativamente menores.
- Sin embargo, estos relés no pueden ser demasiado sensibles, o funcionan innecesariamente para picos de presión causados por cambios repentinos en el flujo de corriente, como los causados por fallas externas.

Clasificaciones de transformadores

- Es importante poder determinar:
 - si un relé del transformador operó incorrectamente, en cuyo caso el operador debe restaurar el transformador a servicio.
 - si existe una falla interna menor que deba repararse antes de volver a energizar el transformador para evitar daños mayores.
- Después de la operación de un relé de transformador, el personal de la subestación generalmente realiza inspecciones para determinar si hay un cortocircuito interno.

Clasificaciones de transformadores

Que puede:

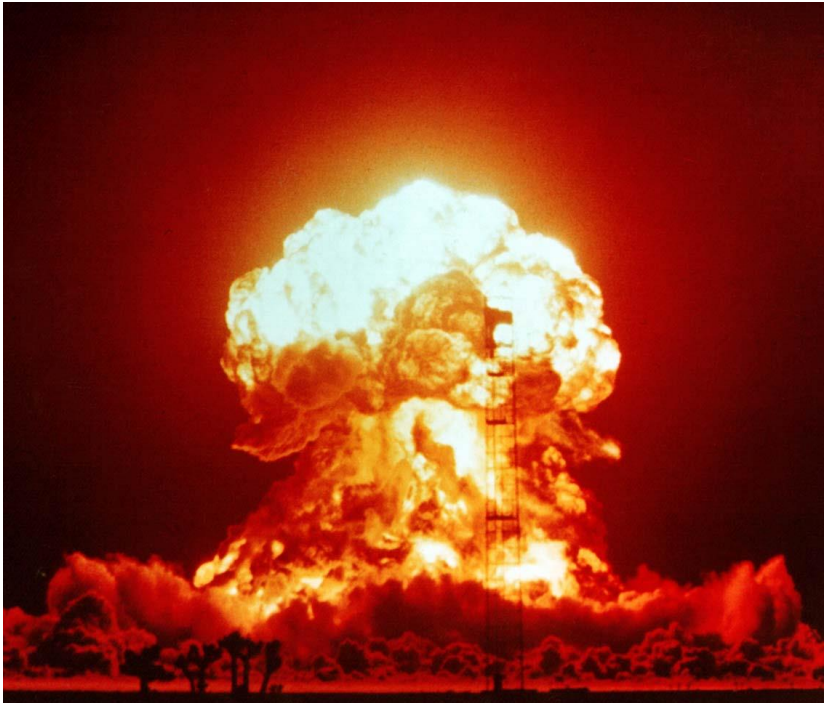
- Realice una verificación de resistencia para determinar si las piezas normalmente energizadas han entrado en contacto con piezas normalmente no energizadas.
- Extraiga muestras de gas y aceite del tanque y analice las muestras para determinar si se ha producido una descomposición excesiva debido a la formación de arcos.
- Mida la relación de vueltas (TTR) para determinar si se ha producido un cortocircuito entre vueltas.

Clasificaciones de transformadores

- Si los resultados de la prueba indican que no existe una falla interna, se puede volver a energizar el transformador.
- Como medida preventiva, las empresas de servicios públicos inspeccionan periódicamente los transformadores para identificar posibles problemas.
- La mayoría de los transformadores incluyen indicadores para leer la carga del transformador, los niveles y temperaturas del aceite, y las presiones y temperaturas del gas para ayudar a realizar estas inspecciones.

Clasificaciones de transformadores

Entonces, ¿qué sucede cuando excede las clasificaciones de los transformadores?



¡No, no es tan malo!









W ESTERN

mi ELECTRICIDAD

CCOORDINANDO

CCONSEJO



¡Vaya! Tipo incorrecto de transformadores





Comprueba tu conocimiento:

