

Clase 6 – TIM 71

Máquinas eléctricas

Tecnólogo Industrial Mecánico

19 de marzo de 2025

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \hat{H} \psi$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

$$E = mc^2$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$\frac{df}{dt}$$

Plan de clase

1. Análisis de circuitos con trafos. ideales
2. Ejercicio ilustrativo de las ventajas de usar trafos.

Tema 2: Transformadores

- **Objetivo general:**
 - Comprender el funcionamiento, modelado y aplicaciones de los transformadores en sistemas de potencia. Y aplicaciones industriales
- **Temario (ilustrativo)**
 1. Aplicaciones de los transformadores
 2. Propósito del transformador en sistemas de potencia.
 3. Relaciones en un transformador ideal.
 4. Análisis de circuitos con trafos. Ideales (nuevo)
 5. Transformadores reales vs. ideales.
 6. Modelado de pérdidas y efectos no ideales.
 7. Circuito equivalente del transformador.
 8. Pérdidas y eficiencia.
 9. Deducción del circuito equivalente a partir de mediciones.
 10. Sistema de mediciones por unidad.
 11. Regulación de voltaje.
 12. Autotransformadores.
 13. Transformadores trifásicos.
 14. Capacidades nominales.
 15. Principios constructivos de los trafos. de potencia
- *Obs: El temario puede cambiar levemente en función de las necesidades del curso.*

Análisis de Circuitos con Transformadores Ideales

1. Método de Análisis:

- **Reemplazo del circuito:**

- Sustituir la porción del circuito en un lado del transformador por un circuito “equivalente” (eliminando el transformador del circuito)

2. Pasos para el Reemplazo:

1.Referir un lado al otro:

1. Usar la relación de vueltas para escalar voltajes, corrientes e impedancias.

2.Mantener la forma del circuito:

1. El circuito equivalente tiene la misma estructura que el original.

3.Inversión de polaridades:

1. Si los puntos en los devanados están invertidos, las polaridades de las fuentes de voltaje también se invierten.

Fórmulas Clave:

- Voltajes referidos:

$$V_{\text{referido}} = a \cdot V_{\text{original}}$$

- Corrientes referidas:

$$I_{\text{referido}} = \frac{I_{\text{original}}}{a}$$

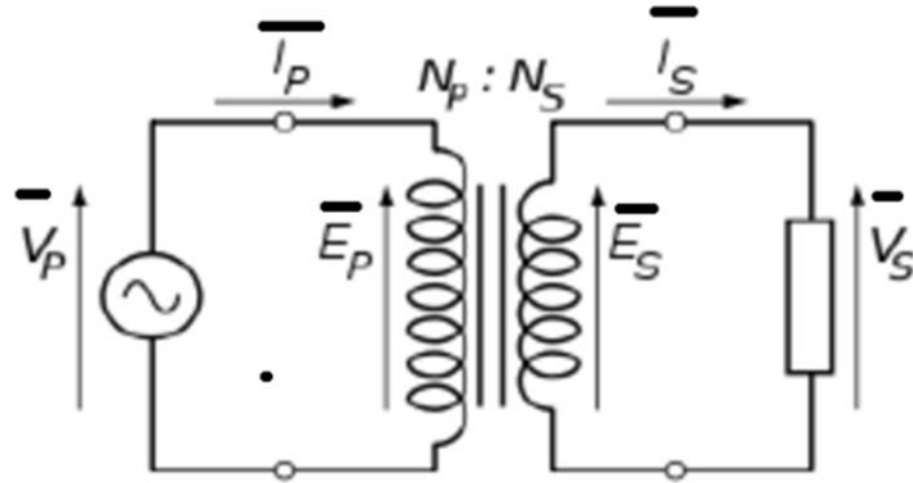
- Impedancias referidas:

$$Z_{\text{referido}} = a^2 \cdot Z_{\text{original}}$$

Pregunta: ¿Cuánto vale “a” si estoy refiriendo al primario del trafo? ¿Y al secundario?

Ejemplo (en clase)

- Transformador con $n = 2$, $\bar{V}_p = 120 \text{ V}$, $\bar{Z}_L = 4 \Omega$.



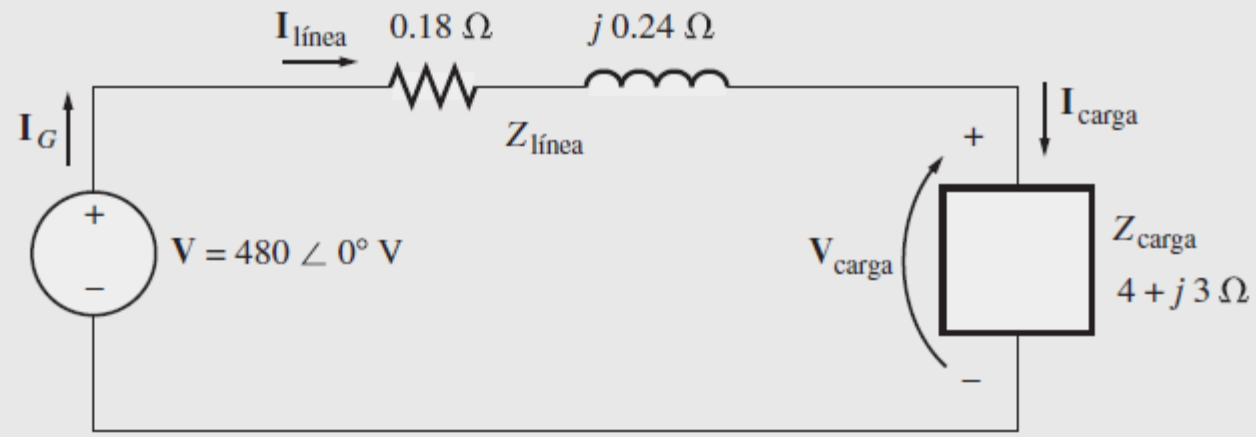
- Se piden todas las corrientes, potencias activas y reactivas.
- Hallar los circuitos referidos al primario y al secundario.

Análisis de circuitos que contienen transformadores ideales

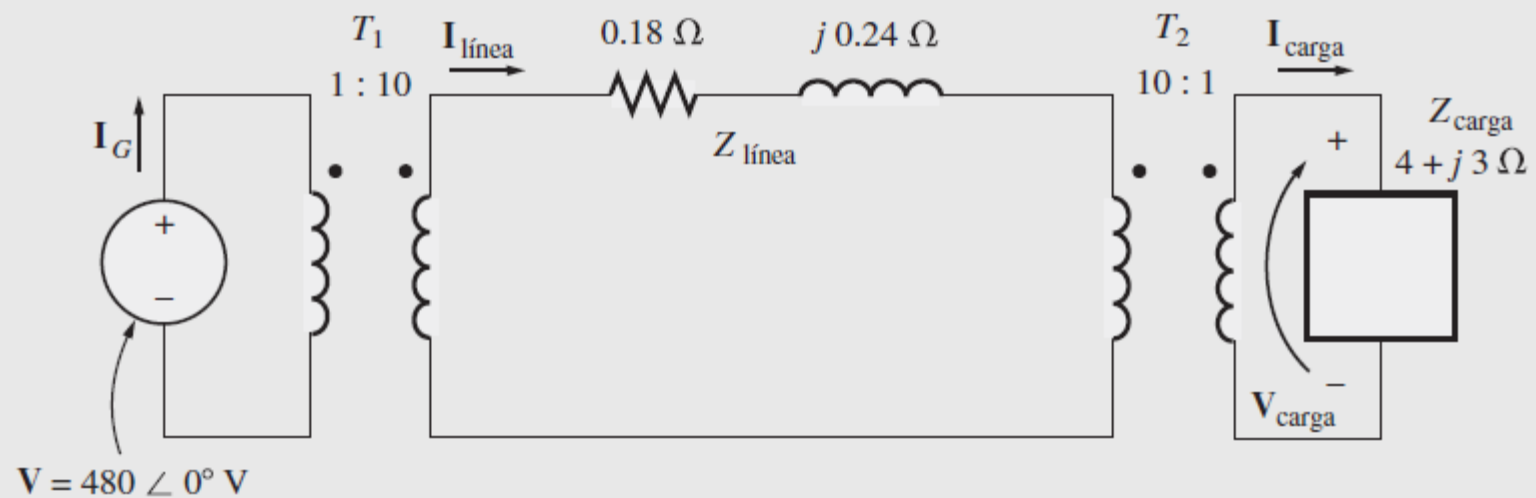
EJEMPLO 2-1

Un sistema de potencia monofásico consta de un generador de 480 V y 60 Hz que suministra potencia a una carga $Z_{\text{carga}} = 4 + j3 \, \Omega$ a través de una línea de transmisión de impedancia $Z_{\text{línea}} = 0.18 + j0.24 \, \Omega$. Conteste las siguientes preguntas sobre el sistema.

- a) Si el sistema de potencia es exactamente como se describe en la figura 2-6a), ¿cuál será el voltaje en la carga? ¿Cuáles serán las pérdidas en la línea de transmisión?
- b) Suponga que un transformador elevador 1:10 se coloca en el extremo del generador de la línea de transmisión y que un transformador reductor 10:1 se coloca en el extremo de carga de la línea de transmisión (figura 2-6b). ¿Cuál será ahora el voltaje de la carga? ¿Cuáles serán las pérdidas en la línea de transmisión?



a)



b)

FIGURA 2-6 El sistema de potencia del ejemplo 2-1 a) sin transformador y b) con un transformador en los extremos de la línea de transmisión.

Solución

- a) La figura 2-6a) muestra un sistema de potencia sin transformadores. Aquí $I_G = I_{\text{línea}} = I_{\text{carga}}$. La corriente de la línea en este sistema está dada por

$$\begin{aligned} I_{\text{línea}} &= \frac{V}{Z_{\text{línea}} + Z_{\text{carga}}} \\ &= \frac{480 \angle 0^\circ \text{ V}}{(0.18 \, \Omega + j0.24 \, \Omega) + (4 \, \Omega + j3 \, \Omega)} \\ &= \frac{480 \angle 0^\circ}{4.18 + j3.24} = \frac{480 \angle 0^\circ}{5.29 \angle 37.8^\circ} \\ &= 90.8 \angle -37.8^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

Por lo tanto, el voltaje en la carga es

$$\begin{aligned} V_{\text{carga}} &= I_{\text{línea}} Z_{\text{carga}} \\ &= (90.8 \angle -37.8^\circ \text{ A})(4 \, \Omega + j3 \, \Omega) \\ &= (90.8 \angle -37.8^\circ \text{ A})(5 \angle 36.9^\circ \, \Omega) \\ &= 454 \angle -0.9^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

y las pérdidas en la línea son

$$\begin{aligned} P_{\text{pérdida}} &= (I_{\text{línea}})^2 R_{\text{línea}} \\ &= (90.8 \text{ A})^2 (0.18 \, \Omega) = 1\,484 \text{ W} \end{aligned}$$

b) La figura 2-6b) muestra un sistema de potencia con los transformadores. Para analizar este sistema se requiere convertirlo a un nivel de voltaje en común. Esto se logra en dos pasos:

1. Eliminar el transformador T_2 refiriendo la carga al nivel de voltaje de la línea de transmisión.
2. Eliminar el transformador T_1 refiriendo los elementos de la línea de transmisión y la carga equivalente al voltaje de la línea de transmisión del lado de la fuente.

El valor de la impedancia de la carga cuando se refleja en el sistema de transmisión del voltaje es

$$\begin{aligned} Z'_{\text{carga}} &= a^2 Z_{\text{carga}} \\ &= \left(\frac{10}{1}\right)^2 (4 \Omega + j3 \Omega) \\ &= 400 \Omega + j300 \Omega \end{aligned}$$

La impedancia total en el nivel de la línea de transmisión ahora es

$$\begin{aligned} Z_{\text{eq}} &= Z_{\text{línea}} + Z'_{\text{carga}} \\ &= 400.18 + j300.24 \Omega = 500.3 \angle 36.88^\circ \Omega \end{aligned}$$

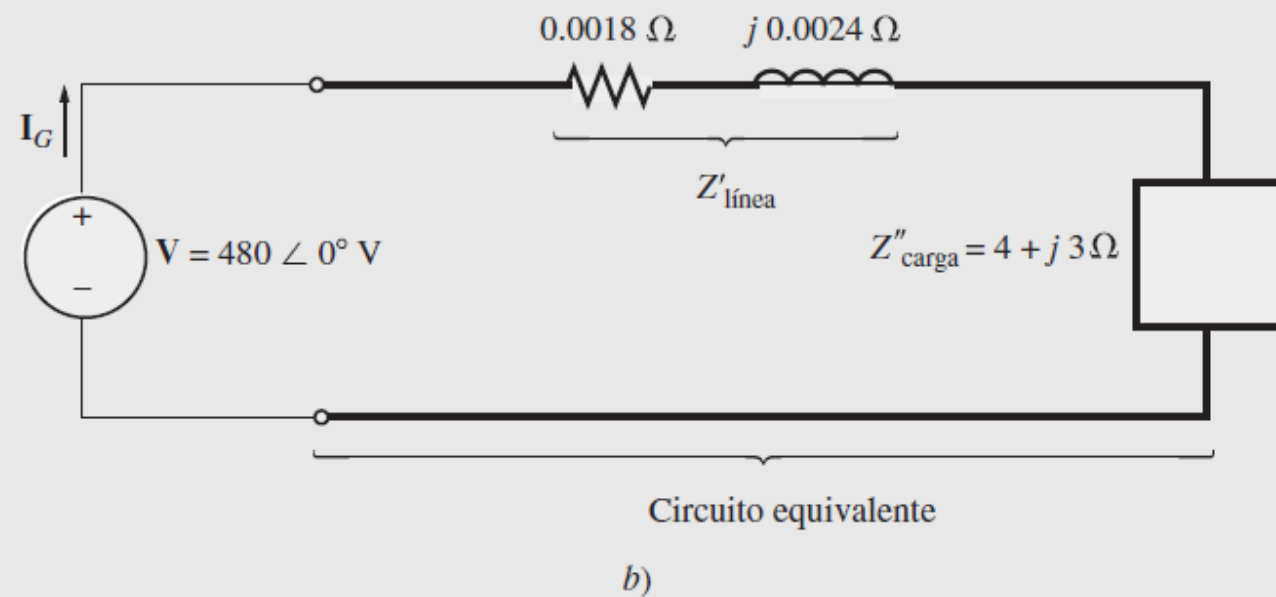
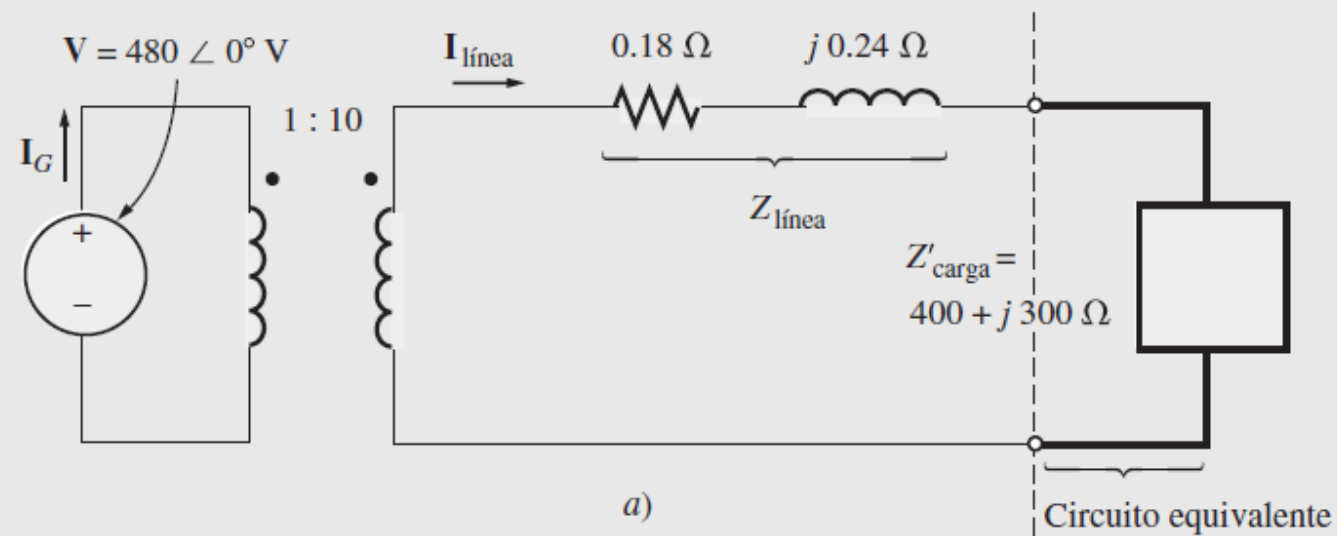


FIGURA 2-7 a) Sistema con la carga referida al nivel de voltaje del sistema de transmisión. b) Sistema con la carga y la línea de transmisión referidas al nivel de voltaje del generador.

$$\begin{aligned}
 Z'_{\text{eq}} &= a^2 Z_{\text{eq}} \\
 &= a^2(Z_{\text{línea}} + Z'_{\text{carga}}) \\
 &= \left(\frac{1}{10}\right)^2 (0.18 \, \Omega + j0.24 \, \Omega + 400 \, \Omega + j300 \, \Omega) \\
 &= (0.0018 \, \Omega + j0.0024 \, \Omega + 4 \, \Omega + j3 \, \Omega) \\
 &= 5.003 \angle 36.88^\circ \, \Omega
 \end{aligned}$$

Observe que $Z''_{\text{carga}} = 4 + j3 \, \Omega$ y $Z'_{\text{línea}} = 0.0018 + j0.0024 \, \Omega$. El circuito equivalente resultante se muestra en la figura 2-7b). La corriente en el generador es

$$I_G = \frac{480 \angle 0^\circ \text{ V}}{5.003 \angle 36.88^\circ \, \Omega} = 95.94 \angle -36.88^\circ \text{ A}$$

Si se conoce la corriente $\mathbf{I}_G$, se puede trabajar hacia atrás y encontrar $\mathbf{I}_{\text{línea}}$ e $\mathbf{I}_{\text{carga}}$. El cálculo a través de T_1 da como resultado

$$N_{P1}\mathbf{I}_G = N_{S1}\mathbf{I}_{\text{línea}}$$

$$\mathbf{I}_{\text{línea}} = \frac{N_{P1}}{N_{S1}} \mathbf{I}_G$$

$$= \frac{1}{10} (95.94 \angle -36.88^\circ \text{ A}) = 9.594 \angle -36.88^\circ \text{ A}$$

El cálculo a través de T_2 da como resultado

$$N_{P2}\mathbf{I}_{\text{línea}} = N_{S2}\mathbf{I}_{\text{carga}}$$

$$\mathbf{I}_{\text{carga}} = \frac{N_{P2}}{N_{S2}} \mathbf{I}_{\text{línea}}$$

$$= \frac{10}{1} (9.594 \angle -36.88^\circ \text{ A}) = 95.94 \angle -36.88^\circ \text{ A}$$

Ahora es posible contestar las preguntas originales. El voltaje de la carga está dada por

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{\text{carga}} &= \mathbf{I}_{\text{carga}} Z_{\text{carga}} \\ &= (95.94 \angle -36.88^\circ \text{ A})(5 \angle 36.87^\circ \Omega) \\ &= 479.7 \angle -0.01^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

y las pérdidas en la línea están dadas por

$$\begin{aligned} P_{\text{pérdida}} &= (I_{\text{línea}})^2 R_{\text{línea}} \\ &= (9.594 \text{ A})^2 (0.18 \Omega) = 16.7 \text{ W} \end{aligned}$$

1. Resultados del Ejercicio Anterior:

Reducción de pérdidas: Casi 90 veces menor.

Menor caída de voltaje: Mejor estabilidad en la carga.

2. Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP):

Generación: Se suele realizar entre 4-30 kV.

Transmisión: Transformadores elevadores aumentan el voltaje (ej: 500 kV).

Distribución: Transformadores reductores ajustan el voltaje para uso final.

3. Ventajas Clave:

Mayor eficiencia: Reducción significativa de pérdidas.

Menor caída de voltaje: Mejor calidad de energía en la carga.

Esenciales: Optimizan la transmisión y distribución de energía.

Los transformadores son fundamentales para mejorar la eficiencia y SEP, reduciendo pérdidas y garantizando un suministro eléctrico confiable.