Clases 9 y 10 – TIM 71 Máquinas eléctricas

Tecnólogo Industrial Mecánico

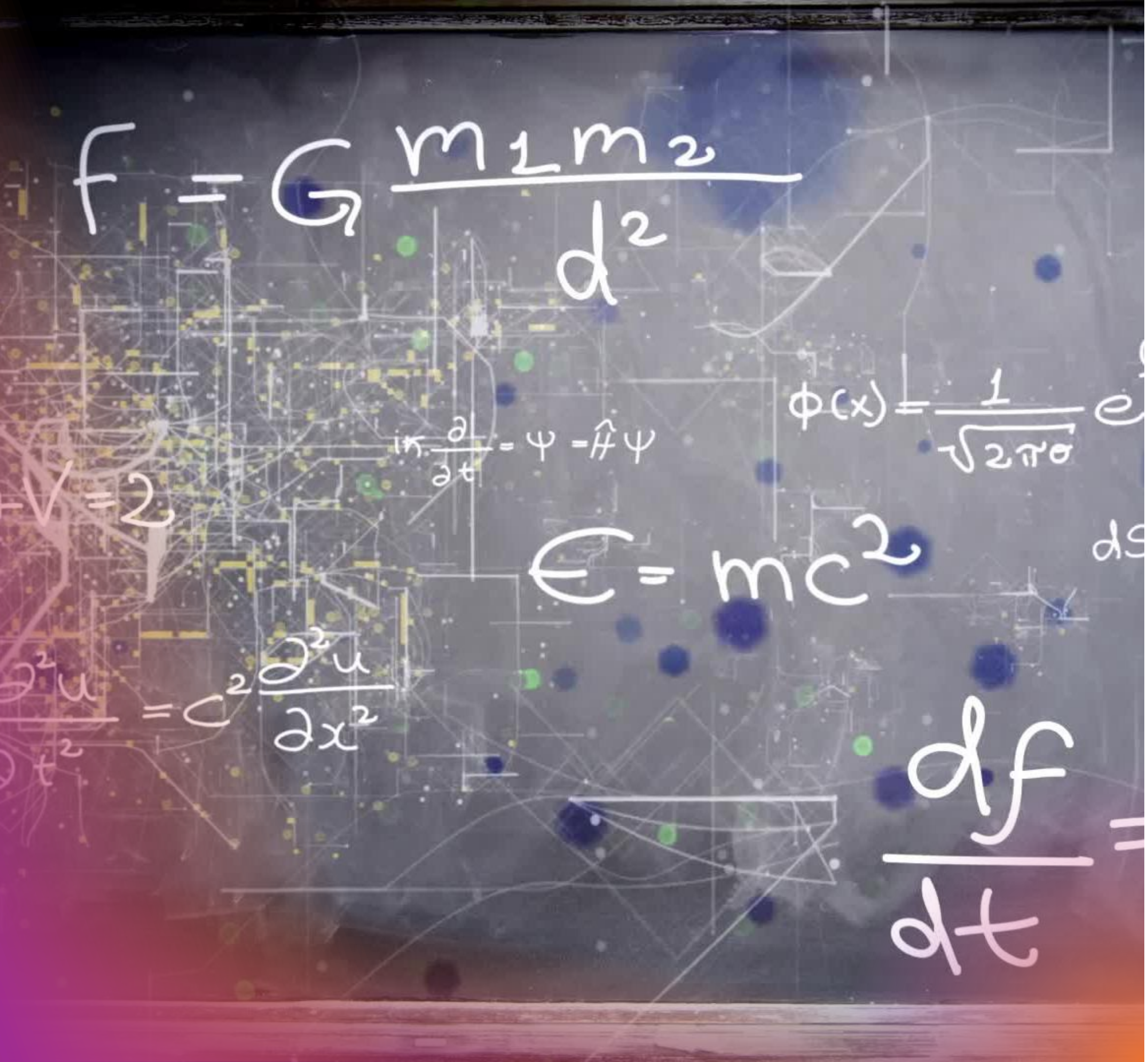
31 de marzo y 2 de abril de 2025

Tema 2: Transformadores

- **Objetivo general:**
  - Comprender el funcionamiento, modelado y aplicaciones de los transformadores en sistemas de potencia. Y aplicaciones industriales

- **Temario:**
  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. Deducción del circuito equivalente a partir de mediciones.
  9. Valores nominales de un trafo
  10. Sistema de mediciones por unidad.
  11. **Capacidades nominales.**
  12. **Caída (regulación) de voltaje.**
  13. **Pérdidas y eficiencia.**
  14. ~~Autotransformadores~~. (se quita del teórico 2025)
  15. Transformadores trifásicos.
  16. Índice horario y trafos. en paralelo
  17. Principios constructivos de los trafos. de potencia

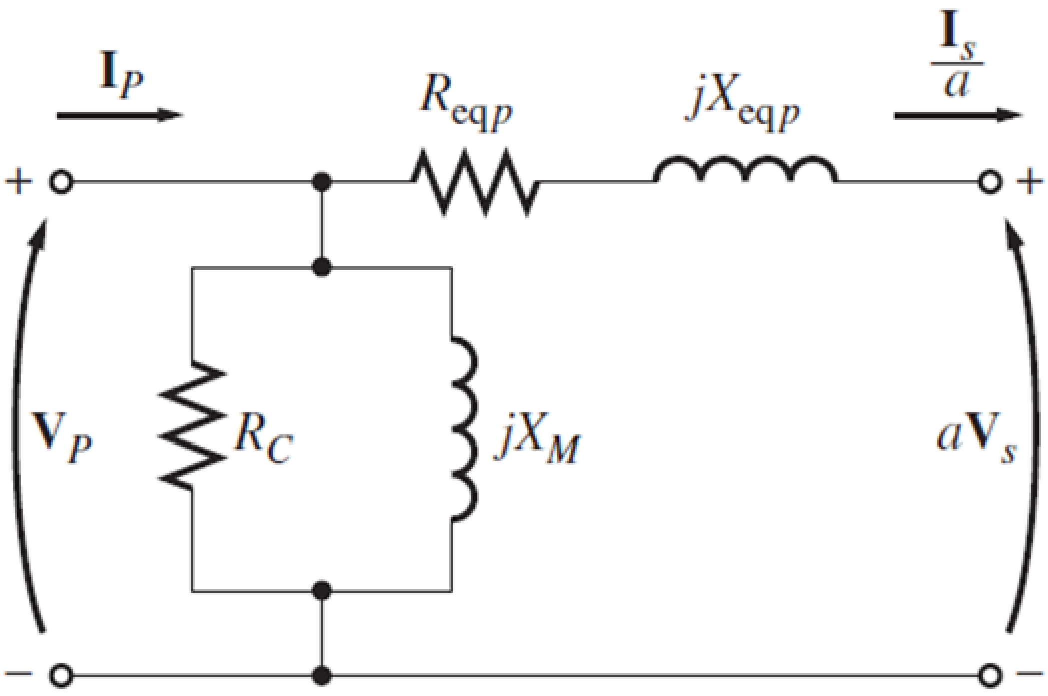
Obs: Ajustes leves en el temario



Clase 9

1. Repaso
2. Mas sobre valores nominales de un trafo
3. Diagrama fasorial del trafo.

Repaso: equivalente aproximado del trafo real monofásico



$$R_{\text{eq}P} = R_p + a^2 R_s$$

$$X_{\text{eq}P} = X_p + a^2 X_s$$

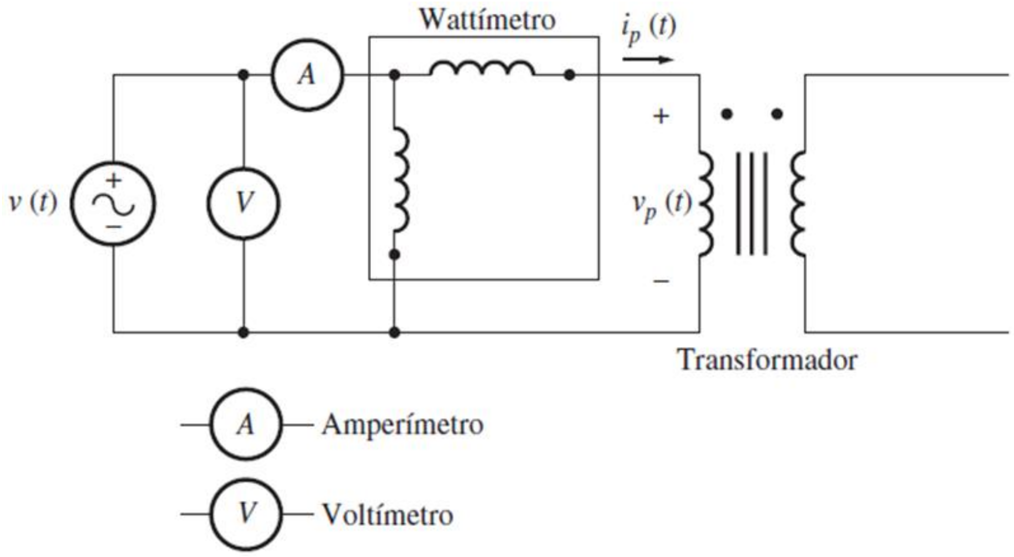
- XP: reactancia de fugas (pri.)
- RP: pérdida (pri.) en el cobre
- RC: son las pérdidas en el núcleo

(Foucault e histéresis)

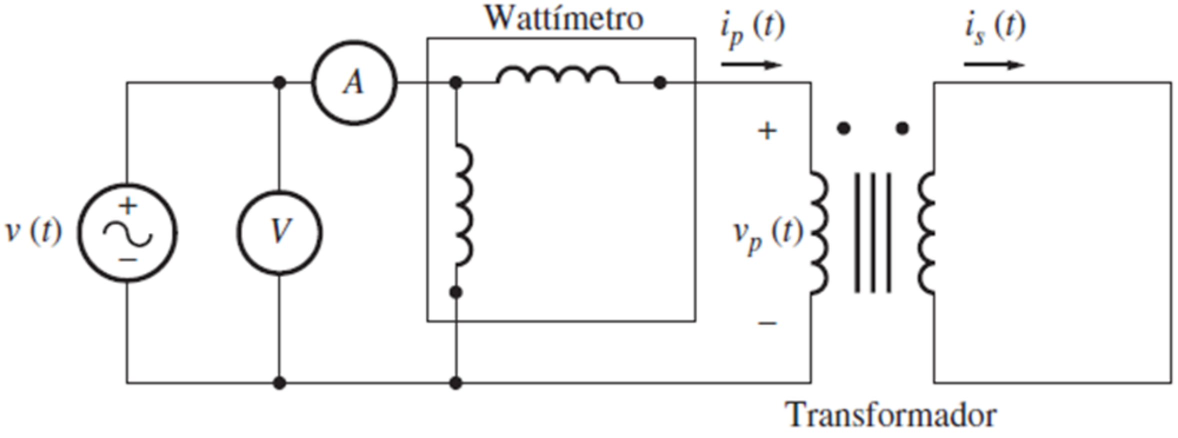
- LM: inductancia de magnetización
- XS: reactancia de fugas (sec.)
- RS: pérdida (sec.) en el cobre
- a: relación de vueltas (Np/Ns)

Determinación de los valores de los componentes en el modelo de transformador

Pueden relevarse experimentalmente las impedancias del modelo del trafo mediante dos ensayos (circuito abierto y cortocircuito).



Conexión para la prueba de circuito abierto del transformador.



Conexión para la prueba de cortocircuito del transformador.

Sistema de Medidas por Unidad (p.u.)

1. Conceptos Clave

Definición:

- Las cantidades eléctricas (V, I, Z, etc.) se expresan como **fracciones de valores base**.
- **Fórmula**:

$$\text{p.u.} = \frac{\text{Valor real}}{\text{Valor base}}$$

Ventajas:

✓ Normaliza sistemas con múltiples tensiones.

✓ Permite comparar equipos de distintos tamaños.

✓ Valores típicos en p.u. son consistentes (ej: impedancias de transformadores).

EJEMPLO 2-4

Dibuje el circuito equivalente por unidad aproximado del transformador del ejemplo 2-2. Utilice los valores nominales del transformador como base del sistema.

- Recordar que es un transformador de 20 kVA, 8 000/240 V, 60 Hz y su circuito equivalente es:

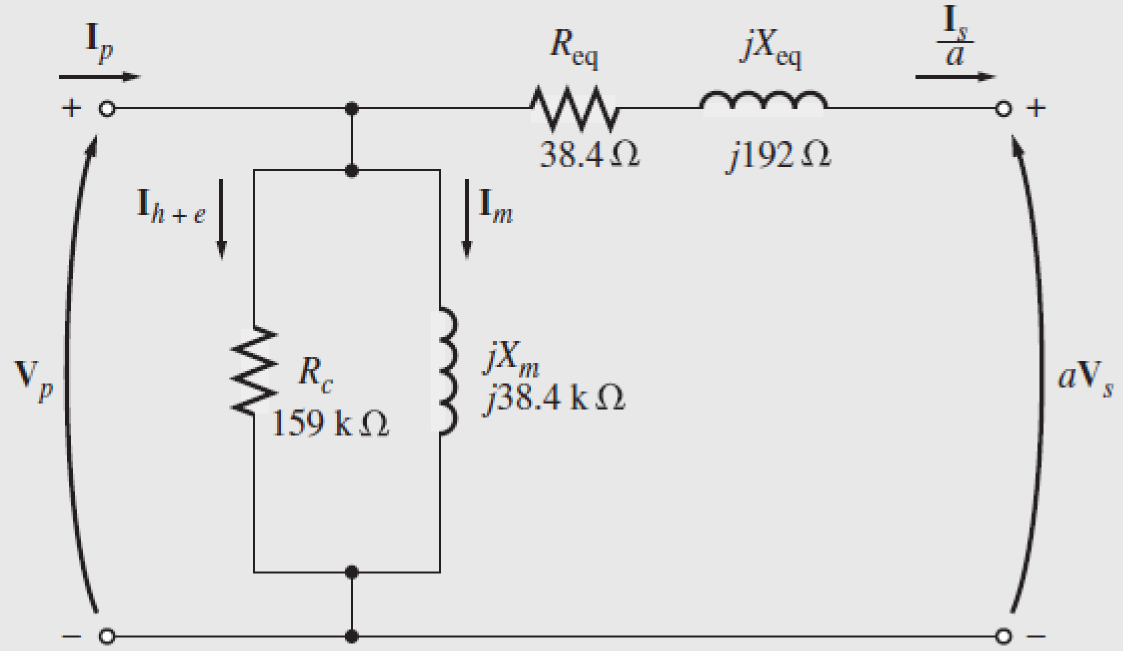


FIGURA 2-21 Circuito equivalente del ejemplo 2-2.

Solución

Los valores del transformador del ejemplo 2-2 son 20 kVA, 8 000/240 V. El circuito equivalente aproximado (figura 2-21) desarrollado en el ejemplo se refirió al lado de alto voltaje del transformador; para convertirlo a por unidad se debe encontrar la impedancia base del circuito primario. En éste,

$$V_{\text{base 1}} = 8\,000 \text{ V}$$

$$S_{\text{base 1}} = 20\,000 \text{ VA}$$

$$Z_{\text{base 1}} = \frac{(V_{\text{base 1}})^2}{S_{\text{base 1}}} = \frac{(8\,000 \text{ V})^2}{20\,000 \text{ VA}} = 3\,200\ \Omega$$

Por lo tanto,

$$Z_{\text{SE,pu}} = \frac{38.4 + j192\ \Omega}{3\,200\ \Omega} = 0.012 + j0.06 \text{ pu}$$

$$R_{N,\text{pu}} = \frac{159 \text{ k}\Omega}{3\,200\ \Omega} = 49.7 \text{ pu}$$

$$Z_{M,\text{pu}} = \frac{38.4 \text{ k}\Omega}{3\,200\ \Omega} = 12 \text{ pu}$$

El circuito equivalente aproximado por unidad, expresado en la propia base del transformador, se muestra en la figura 2-25.

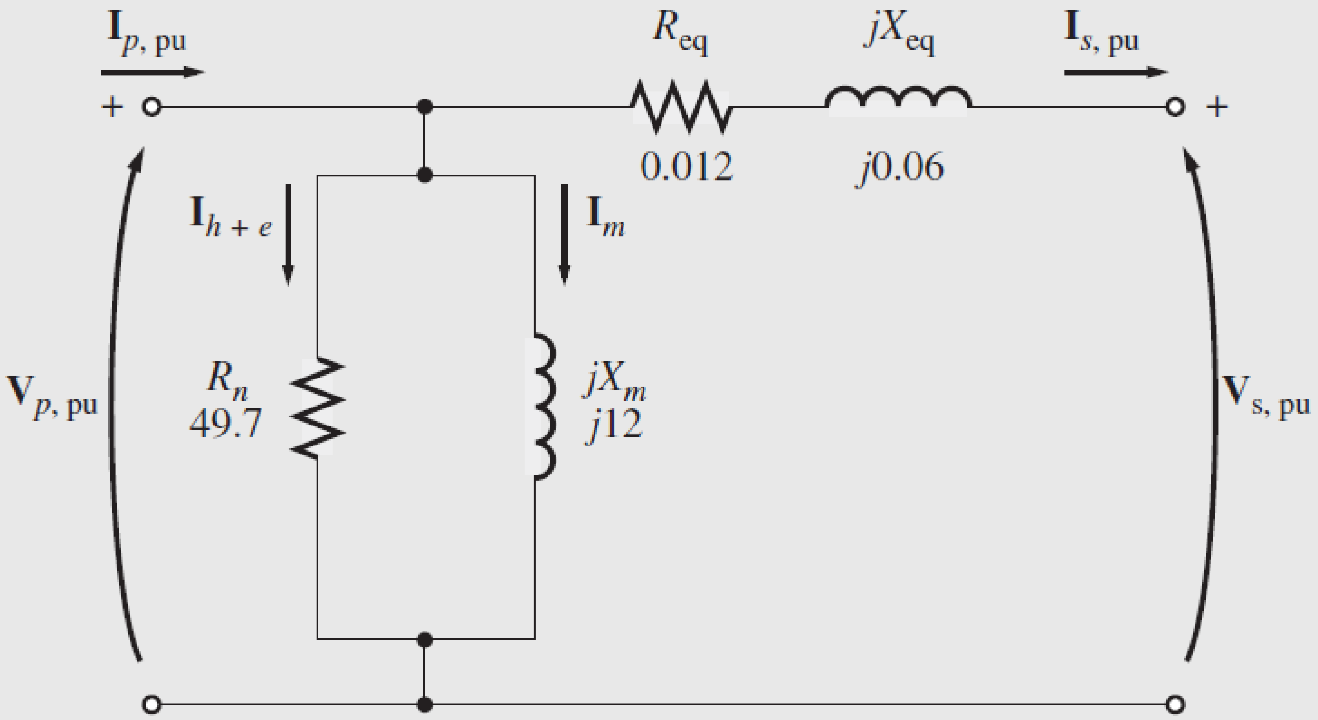


FIGURA 2-25 El circuito equivalente por unidad del ejemplo 2-4.

Valores Típicos en p.u. (Transformadores)

Parámetro	**Rango típico (p.u.)**	**Ejemplo**
Resistencia serie (R_{eq})	~0.01	0.008 p.u.
Reactancia serie (X_{eq})	0.02 – 0.10	0.05 p.u.
Reactancia magnetización (X_m)	10 – 40	20 p.u.
Resistencia núcleo (R_c)	50 – 200	100 p.u.

Nota:

- Transformadores más grandes → Impedancias serie **más pequeñas** (p.u.).
- Valores en placas suelen darse en **%** (1 p.u. = 100%).

Obs: En la practica los trafos de potencia *muy grandes* (Sn>1MVA) se fabrican con impedancias en p.u mayores para amortiguar corrientes en caso de cortocircuito (se discutirá en clase siguiente)

Valores Nominales de un Transformador

---

1. ¿Qué son los "Datos de Chapa"?

Información clave proporcionada por el fabricante para garantizar el **uso seguro y eficiente** del transformador.

(Basado en especificaciones de fabricantes y normas técnicas)

¿Por qué son Importantes?

- **Seguridad**: Evitar sobretensiones o sobrecorrientes.
- **Eficiencia**: Operar dentro de los límites de diseño maximiza la vida útil.
- **Interoperabilidad**: Conexión correcta con otros equipos en la red.

2. Valores Nominales Básicos

Parámetro	Símbolo	Descripción	**Ejemplo** (6.3/0.23 kV, 100 kVA)
Tensión nominal (primario/secundario)	V_{1n}/V_{2n}	Tensión de operación para cada devanado. Define la relación de transformación ($a = V_{1n}/V_{2n}$).	6.3 kV / 230 V
Potencia nominal	S_n	Potencia aparente máxima en VA/kVA. Determina las corrientes nominales.	100 kVA
Corriente nominal	I_{1n}, I_{2n}	Corriente en cada devanado a plena carga: $I_n = S_n/V_n$.	$I_{1n} = 15.87\ \mathrm{A}$, $I_{2n} = 434.78\ \mathrm{A}$
Frecuencia nominal	f	Frecuencia de diseño (ej: 50 Hz o 60 Hz).	50 Hz

3. Relación de Transformación (a)

- **Definición**:

$$a = \frac{V_{1n}}{V_{2n}}$$

- **Interpretación**:
  - Si se aplica V_{1n} al primario en **vacío**, el secundario entrega V_{2n}.
  - Ejemplo: Para $6.3 \text{ kV}/230 \text{ V}$, $a = 27.39$.

---

4. Corrientes Nominales

- **Fórmula**:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{V_{1n}}, \quad I_{2n} = \frac{S_n}{V_{2n}}$$

- **Importancia**:
  - Diseño de protecciones (fusibles, interruptores).
  - Selección de conductores y equipos asociados.

5. Información Adicional en Grandes Transformadores

Parámetro	Utilidad
Impedancia de cortocircuito (Z_{cc})	Cálculo de corrientes de falla y coordinación de protecciones.
Clase de aislamiento	Define la tensión máxima soportada (ej: Clase 7.2 kV).
Método de enfriamiento	Tipo de refrigeración (ONAN, OFAF, etc.).
Peso y dimensiones	Logística e instalación.

Conforme avance el curso veremos que significan la clase de aislamiento, el método de enfriamiento y otros datos que proporciona el fabricante en su placa de características

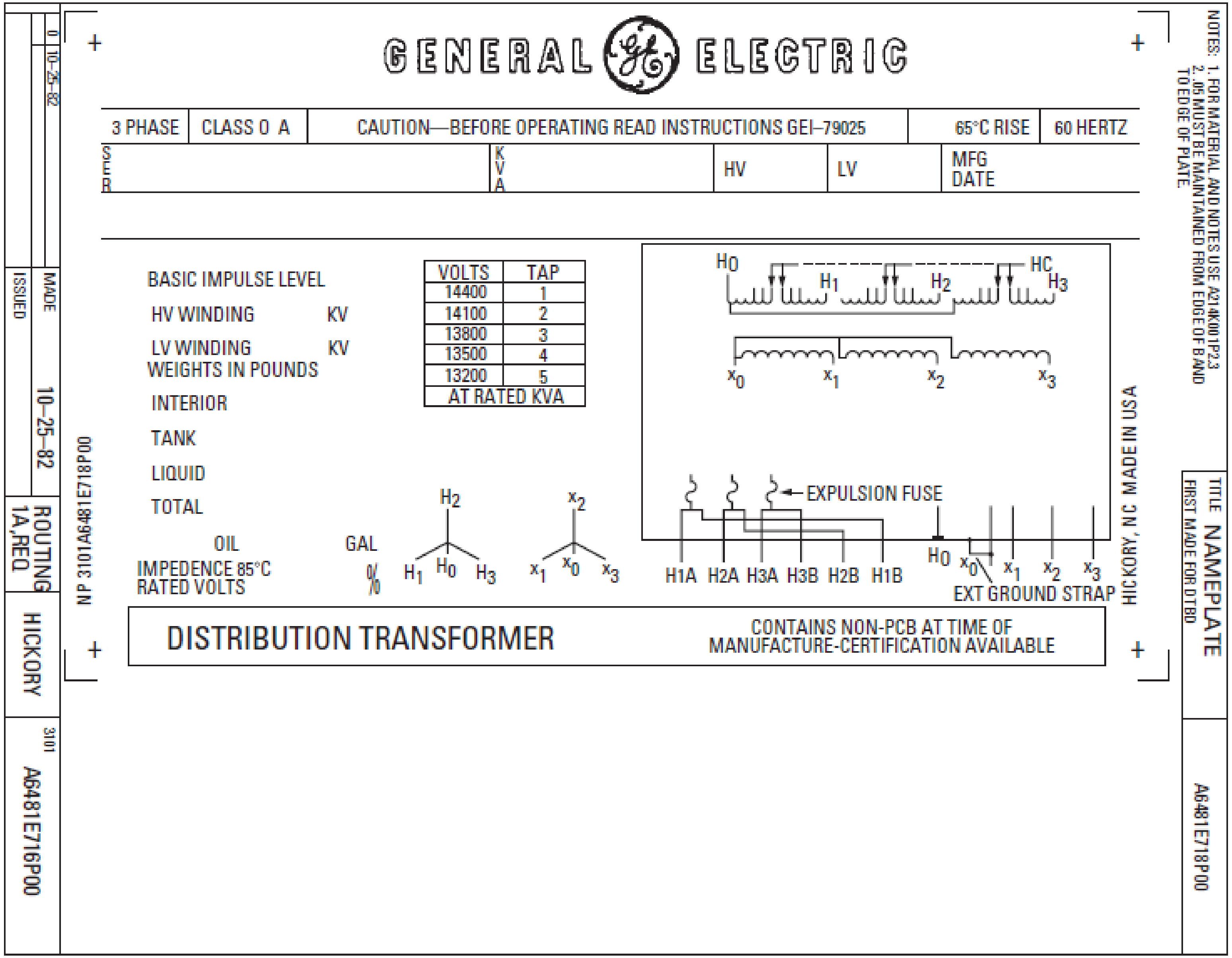


FIGURA 2-48 Ejemplo de las características de una placa de un transformador de distribución. Nótense los valores nominales que se muestran: voltaje, frecuencia, potencia aparente y tomas de derivación. (*Cortesía de General Electric Company*.)

Diagrama Fasorial del Transformador

1. Objetivo del Diagrama Fasorial

Visualizar cómo las **impedancias serie** ($R_{eq} + jX_{eq}$) y el **ángulo de fase de la corriente** afectan la caída de voltaje

---

2. Circuito Equivalente Simplificado

(Ignorando la rama de excitación.)

$$\frac{V_P}{a} = V_S + I_S(R_{eq} + jX_{eq})$$

Donde:

- V_S: Voltaje secundario (referencia a 0°).
- I_S: Corriente de carga (ángulo θ depende del factor de potencia).

Fuente: Chapman

Obs: Notar que se trabaja con el equivalente visto *desde el secundario*

3. Diagrama Fasorial para Diferentes Factores de Potencia

Obs: Al dibujar los diagramas fasoriales (ver próximas diapos) es práctica usual exagerar fuertemente las caídas de tensión en Rcc y Xcc a efectos de visualizar mejor.

a) Carga con FP en Atraso (Inductiva)

- **Características**:
  - I_S se atrasa respecto a V_S.
  - Caída de voltaje significativa en $jX_{eq}I_S$ (reactivo dominante).

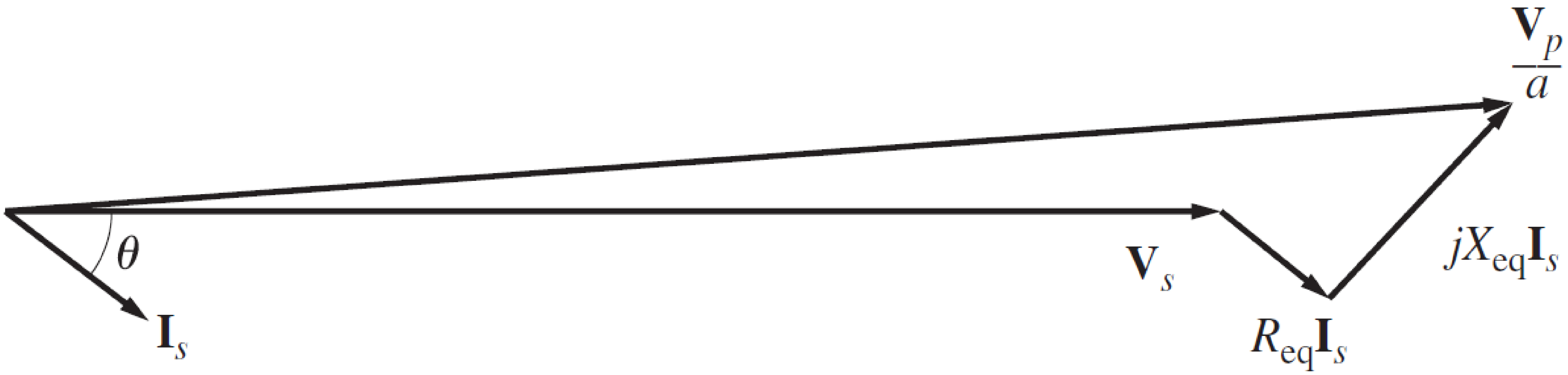
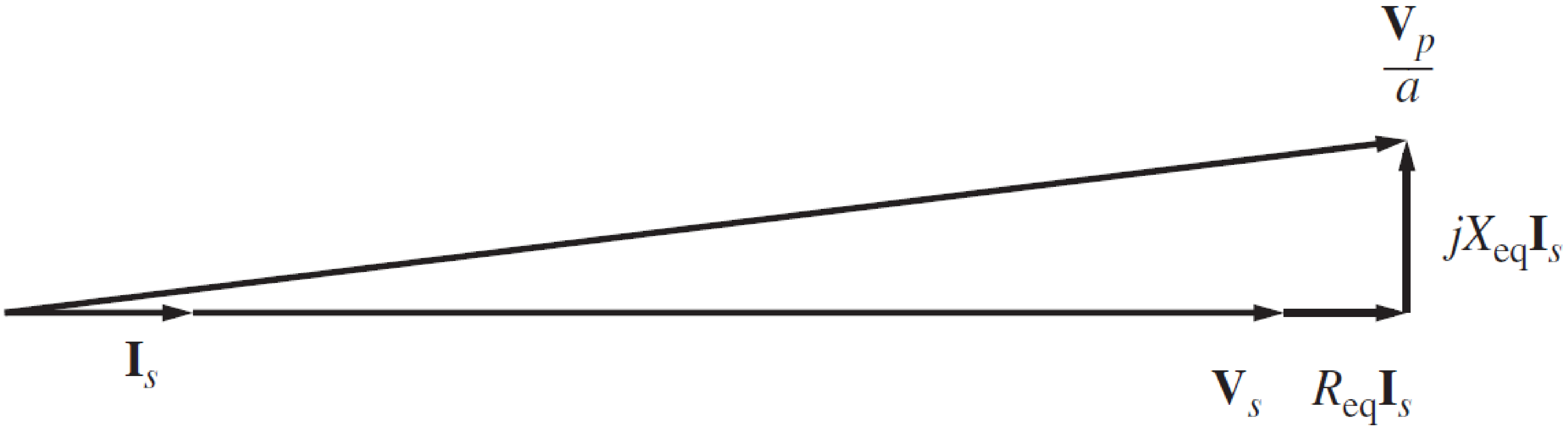


Diagrama fasorial de un transformador que opera con un factor de potencia en retraso.

b) Carga con FP Unitario (Resistiva)

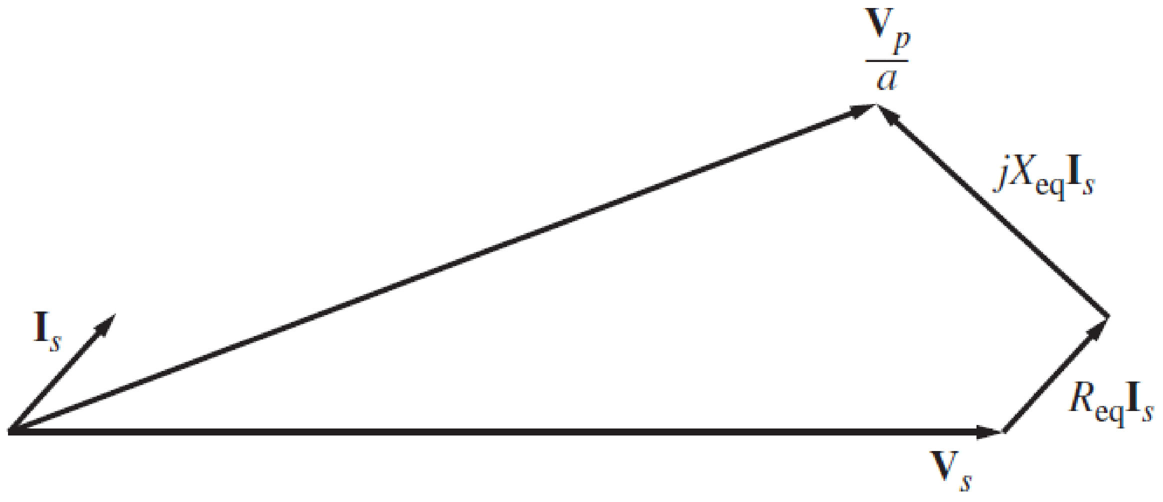
- **Características**:
  - I_S en fase con V_S.

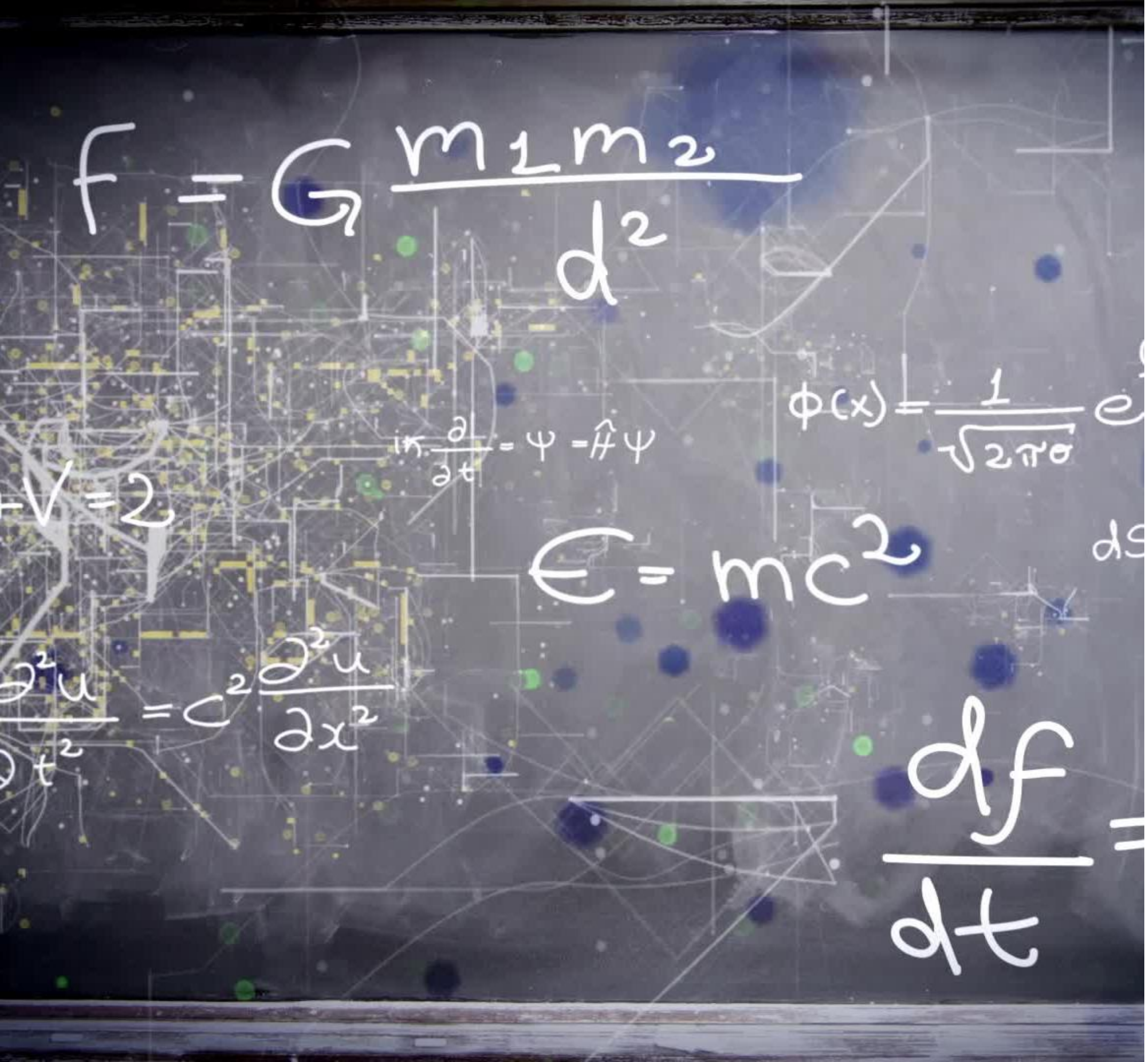


En clase se halla Vs suponiendo conocida el resto de las magnitudes (pique: aplicar Pitágoras)

c) Carga con FP en Adelanto (Capacitiva)

- **Características**:
  - I_S adelanta a V_S.
  - $jX_{eq}I_S$ puede elevar V_S sobre V_P/a.



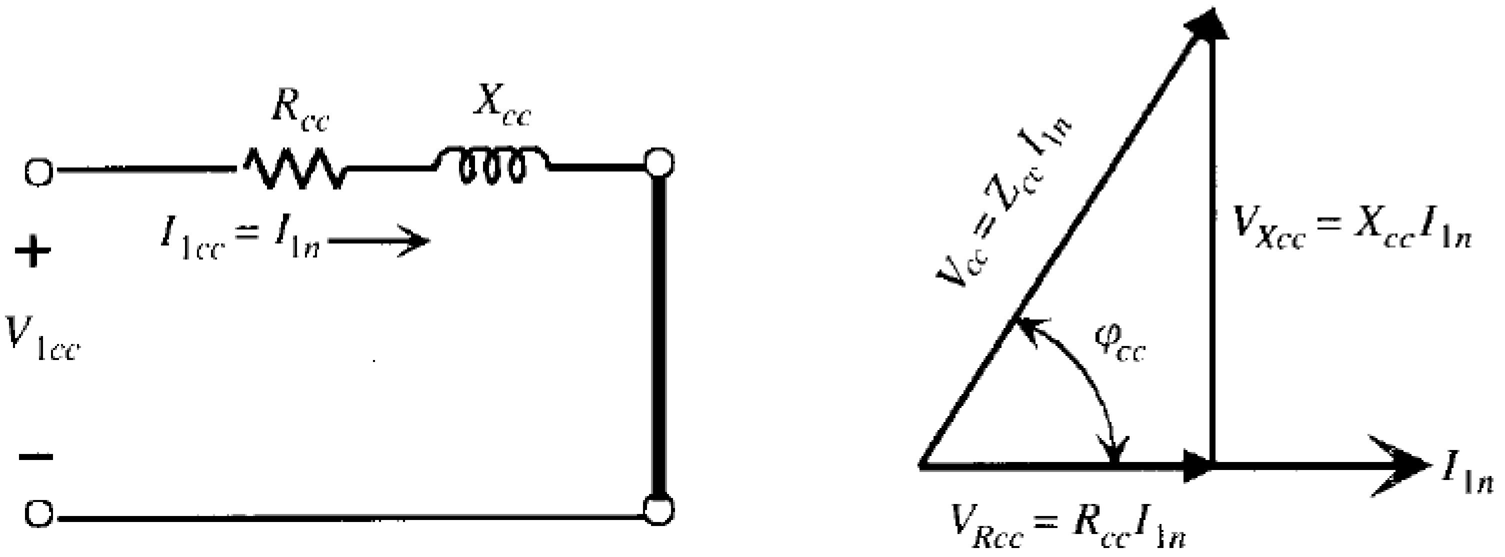


Clase 10

1. Diagrama fasorial del trafo (repaso y ejemplos en el pizarrón)
2. Mas sobre el ensayo de CC
3. Caída de tensión
4. Eficiencia del trafo

Obs: Los puntos 2 y 3 se basan en Fraile Mora, no en Chapman

Caídas de voltaje en el ensayo de CC



Circuito equivalente de cortocircuito y esquema fasorial de tensiones.

$$\varepsilon_{cc} = \frac{V_{1cc}}{V_{1n}} \cdot 100 \quad ; \quad \varepsilon_{R_{cc}} = \frac{V_{R_{cc}}}{V_{1n}} \cdot 100 \quad ; \quad \varepsilon_{X_{cc}} = \frac{V_{X_{cc}}}{V_{1n}} \cdot 100$$

Importante: $E_{cc}(\%)=Z_{cc}(\%)$ // $E_{R_{cc}}(\%)=R_{cc}(\%)$ // $E_{X_{cc}}(\%)=X_{cc}(\%)$

Ensayo de CC vs falla de CC.

El ensayo de cortocircuito debe distinguirse de la **falta o fallo de cortocircuito** que puede suceder en un *transformador alimentado por su tensión asignada primaria cuando por accidente se unen entre sí los bornes del devanado secundario*. El circuito equivalente en esta situación es también el indicado en la Figura 3.23 (ensayo de cortocircuito); sin embargo, ahora el transformador está alimentado por una tensión V_{1n} (en vez de V_{1cc}), apareciendo una fuerte corriente de circulación I_{1falta} (o I_{2falta} en el secundario), muy peligrosa para la vida de la máquina debido a los fuertes efectos térmicos y electrodinámicos que produce. Desde el punto de vista de circuito equivalente, el valor de I_{1falta} vendrá expresado por:

$$I_{1falta} = \frac{V_{1n}}{Z_{cc}} \tag{3.60}$$

Fuente: Fraile Mora

$$I_{1falta} = \frac{100}{\varepsilon_{cc}} I_{1n} \tag{3.63}$$

lo que indica que là corriente de cortocircuito de falta está en relación inversa con ε_{cc}. Cuanto mayor sea el valor *de* ε_{cc} tanto menor será el valor de la corriente de cortocircuito. Como quiera que un alto valor de ε_{cc} implica, como se demostrará en el epígrafe 3.7, una fuerte caída de tensión en el transformador, deberá adoptarse una solución de compromiso entre ambos aspectos contradictorios. En la práctica, los transformadores industriales menores de 1.000 kVA, tienen un valor de ε_{cc} comprendido entre el 1 y 6 por 100 (transformadores de distribución); sin embargo, para potencias mayores se aumenta hasta un margen del 6 al 13 por 100. Como se demostrará más adelante, el valor de ε_{cc} tiene también gran importancia en el acoplamiento en paralelo de transformadores. Generalmente la componente $\varepsilon_{X_{cc}}$ es superior a $\varepsilon_{R_{cc}}$.

Obs: Comparar el comentario sobre Ecc(%) con la observación en diapo "Valores tiipicos en PU (Transformadores)" de la clase pasada – recordar que Ecc(%)=Zcc(%) –

Fuente: Fraile Mora

EJEMPLO DE APLICACIÓN 3.4

Un transformador monofásico de 250 kVA, 15.000/250 V, 50 Hz, ha dado los siguientes resultados en unos ensayos: Vacío: 250 V, 80 A, 4.000 W (datos medidos en el lado de B.T.). Cortocircuito: 600 V, corriente asignada, 5.000 W (datos medidos en el lado de A.T.). Calcular: a) Parámetros del circuito equivalente del transformador reducido al primario. b) Corriente de cortocircuito de falta.

Obs:

- En clase se muestra discute la solución de la parte b), suponiendo conocida la Ecc(%) del 4% calculada en la parte a) – ver ecuación de diapo anterior –
- Se recomienda seguir la resolución completa del ejercicio (pagina 193 de Fraile Mora)

SOLUCIÓN

a) Antes de comenzar el problema se ha de observar que los ensayos no han sido determinados en el primario (véase que la prueba de vacío se ha realizado en el lado de B.T., que en este caso es el lado de 250 V, es decir, el secundario). Es preciso **reducir todas las medidas** al lado donde se desea obtener el circuito equivalente (primario); para ello se empleará la técnica expuesta en el epígrafe 3.5. Teniendo en cuenta que la relación de transformación es:

$$m = \frac{15.000}{250} = 60$$

el ensayo de vacío reducido al primario corresponderá a los valores:

$$V_1 = 250 \cdot 60 = 15.000 \text{ V} \quad ; \quad I_0 = 80/60 = 1{,}33 \text{ A} \quad ; \quad 4.000 \text{ W}$$

es decir, la tensión se multiplica por la relación de transformación, mientras que la corriente debe dividirse por esa cantidad, permaneciendo inalterada la potencia.

El f.d.p. en vacío será entonces:

$$\cos \varphi_0 = \frac{4.000}{15.000 \cdot 1{,}33} = 0{,}2$$

que corresponde a un sen $\varphi_0 = 0{,}98$. En consecuencia, y de acuerdo con (3.48), se obtiene:

$$R_{Fe} = \frac{15.000}{1{,}33 \cdot 0{,}2} = 56{,}4 \text{ k}\Omega \quad ; \quad X_\mu = \frac{15.000}{1{,}33 \cdot 0{,}98} = 11{,}5 \text{ k}\Omega$$

Se observa que esta rama paralelo es de gran impedancia, lo que está de acuerdo con la realidad, ya que la corriente de vacío suele estar comprendida en los transformadores industriales entre el 1 y el 8 por 100. En nuestro caso, teniendo en cuenta que la corriente asignada del primario vale:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{V_{1n}} = \frac{250.000}{15.000} = 16{,}67 \text{ A}$$

la corriente de vacío $I_0 = 1{,}33$ A representa un valor relativo:

$$\frac{I_0}{I_{1n}} = \frac{1{,}33}{16{,}67} = 8\ \%$$

del ensayo se deduce también que las pérdidas en el hierro son de 4.000 W.

Para calcular la rama serie del circuito equivalente se ha de emplear el ensayo de cortocircuito, cuyos datos están ya medidos en el lado primario (A.T.); por tanto, estas medidas son de utilización directa.

El f.d.p. de cortocircuito vale:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{1cc} I_{1n}} = \frac{5.000}{600 \cdot 16,67} = 0,5$$

que corresponde a sen $\varphi_{cc} = 0,866$. De acuerdo con las expresiones (3.51) y (3.59) se obtiene:

$$R_{cc} = \frac{600}{16,67} \cdot 0,5 = 18\ \Omega \quad ; \quad X_{cc} = \frac{600}{16,67} \cdot 0,866 = 31,17\ \Omega$$

que son de pequeño valor en comparación con la rama paralelo. El valor relativo de la tensión de cortocircuito, de acuerdo con (3.59), es:

$$\varepsilon_{cc} = \frac{V_{1cc}}{V_{1n}} \cdot 100 = \frac{600}{15.000} \cdot 100 = 4\ \%$$

b) Al ocurrir una falta de cortocircuito en el transformador, la corriente correspondiente, que aparece en el primario de acuerdo con (3.60), será:

$$I_{1falta} = \frac{100}{4} \cdot 16,67 = 416,75 \text{ A}$$

que corresponde en el secundario a una intensidad:

$$I_{2falta} = \frac{100}{\varepsilon_{cc}} I_{2n}$$

y como quiera que I_{2n} es igual a:

$$I_{2n} = \frac{S_n}{V_{2n}} = \frac{250.000}{250} = 100 \text{ A}$$

se tendrá:

$$I_{2falta} = \frac{100}{4} \cdot 1.000 = 25 \text{ kA}$$

valores muy superiores a los asignados de la máquina y que habrán de eliminarse por medio de protecciones adecuadas: relés de sobreintensidad, Buchholz, etc., en el menor tiempo posible para no dañar al transformador.

Caída de voltaje en un trafo

Fuente: Fraile Mora

Caída de voltaje

Considérese un transformador alimentado por su tensión asignada primaria V_{1n}. En vacío, el secundario proporciona una tensión V_{20}; cuando se conecta una carga a la máquina, debido a la impedancia interna del transformador la tensión medida en el secundario ya no será la anterior sino otro valor que denominaremos V_2. La **diferencia aritmética o escalar entre ambas tensiones**:

$$\Delta V_2 = V_{20} - V_2 \tag{3.64}$$

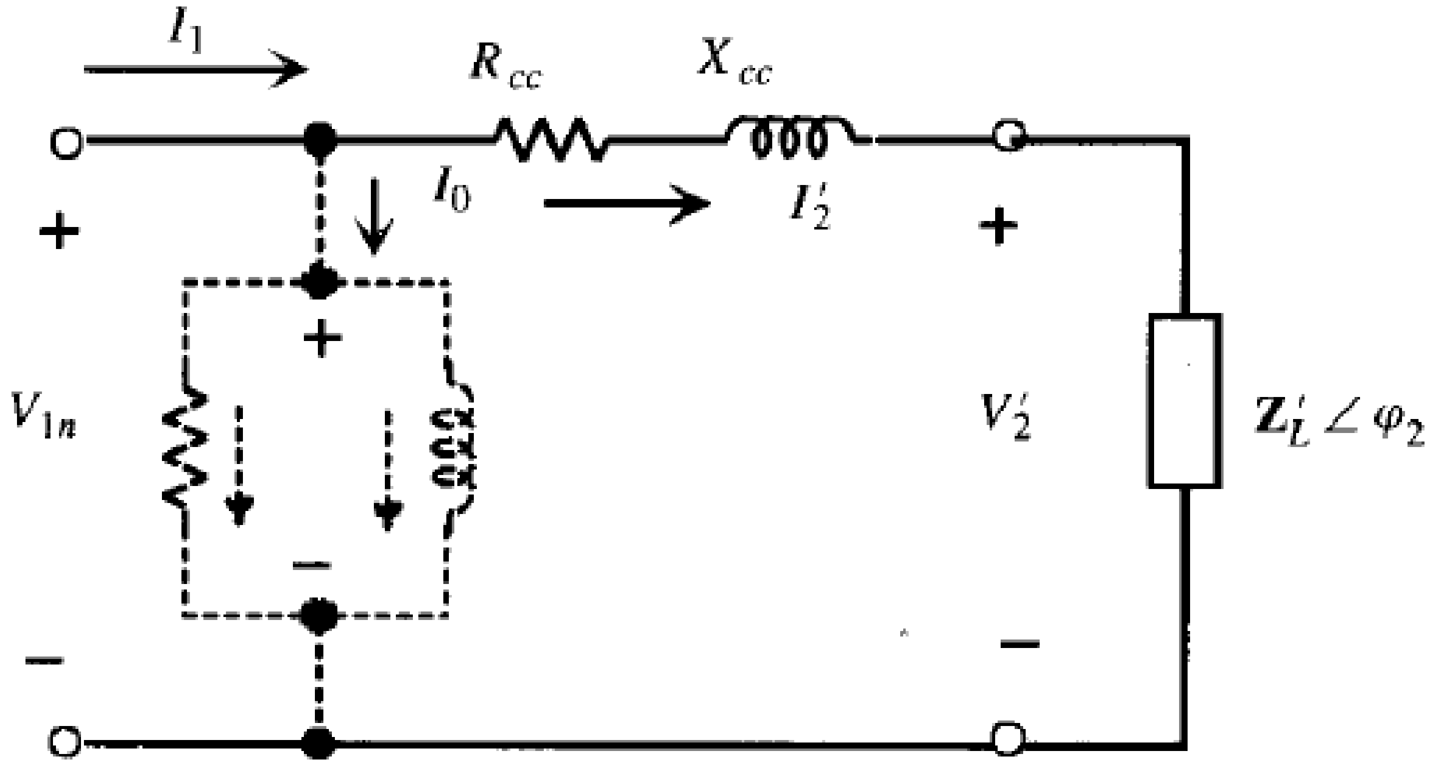
representa la caída de tensión interna del transformador.

Se denomina caída de tensión relativa o simplemente **regulación** a la caída de tensión interna, respecto a la **tensión secundaria en vacío** (asignada), expresada en tanto por ciento y que se designa por el símbolo ε_c (no confundir con ε_{cc} definido en (3.59):

$$\varepsilon_c = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} \cdot 100\,\%* \tag{3.65}$$

* En Europa este cociente define la caída de tensión relativa. En EE. UU. se emplea el término regulación, y en este caso en el denominador se pone V_2 en vez de V_{20}. Aquí no se hará distinción entre ambas definiciones.

<- (Ojo que el Chapman usa esa definición !)



Circuito eléctrico equivalente para determinar la caída de tensión de un transformador.

$$\mathbf{V}_{1n} = \mathbf{V}_2' + (R_{cc} + jX_{cc})\,\mathbf{I}_2'$$

Obs: Notar que se trabaja con el equivalente visto *desde el primario*

$$\mathbf{V}_{1n} = \mathbf{V}_2' + (R_{cc} + jX_{cc})\,\mathbf{I}_2'$$

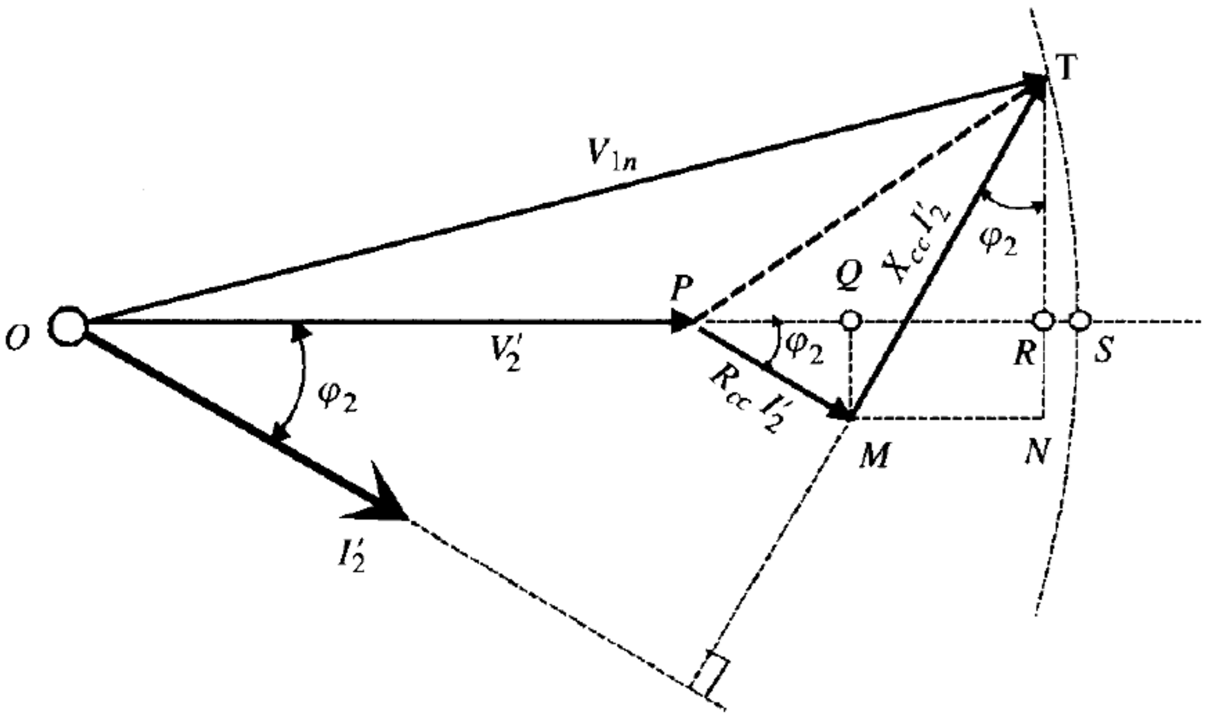


Diagrama fasorial de un transformador en carga.

$$V_{1n} - V_2' = |OS| - |OP| = |PS|$$

$$V_{1n} - V_2' = |PS| \approx |PR|$$

$$|PR| = |PQ| + |QR| = |PQ| + |MN|$$

$$|PR| = R_{cc} I_2' \cos\varphi_2 + X_{cc} I_2' \operatorname{sen}\varphi_2$$

$$V_{1n} - V_2' = R_{cc} I_2' \cos\varphi_2 + X_{cc} I_2' \operatorname{sen}\varphi_2$$

- Esta aproximación permite estimar caída (en voltios) a una corriente dada, sin manejar números complejos
- Funciona muy bien en la práctica.

Si se denomina **índice de carga** C al cociente entre la corriente secundaria del transformador y la asignada correspondiente, es decir:

$$\boxed{C = \frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{I'_2}{I'_{2n}} \approx \frac{I_1}{I_{1n}}} \tag{3.73}$$

la expresión (3.72) se puede poner:

$$V_{1n} - V'_2 = C R_{cc} I'_{2n} \cos \varphi_2 + C X_{cc} I'_{2n} \operatorname{sen} \varphi_2 \tag{3.74}$$

o en valores relativos:

$$\boxed{\varepsilon_c = \frac{V_{1n} - V'_2}{V_{1n}} \cdot 100\,\% = C\,\varepsilon_{R_{cc}} \cos \varphi_2 + C\,\varepsilon_{X_{cc}} \operatorname{sen} \varphi_2} \tag{3.75}$$

donde se ha tenido en cuenta, de acuerdo con (3.51) y (3.59), que:

$$\varepsilon_{cc} = \frac{Z_{cc} I_{1n}}{V_{1n}} \cdot 100$$

$$\varepsilon_{R_{cc}} = \frac{R_{cc} I_{1n}}{V_{1n}} \cdot 100 \approx \frac{R_{cc} I'_{2n}}{V_{1n}} \cdot 100 \quad ; \quad \varepsilon_{X_{cc}} = \frac{X_{cc} I_{1n}}{V_{1n}} \cdot 100 \approx \frac{X_{cc} I'_{2n}}{V_{1n}} \cdot 100 \tag{3.76}$$

- La ecuación (3.75) permite aproximar caídas porcentuales para un porcentaje de carga dado, sin manejar números complejos
- Funciona muy bien en la práctica, pero supone que el trafo se alimenta a tensión nominal primaria

EJEMPLO DE APLICACIÓN 3.5

Se dispone de un transformador monofásico de 250 kVA, 15.000/250 V, 50 Hz, que tiene unos parámetros $R_{cc} = 18\ \Omega$; $X_{cc} = 31{,}17\ \Omega$ (véase ejemplo de aplicación 3.4). Calcular: a) Caídas de tensión relativas $\varepsilon_{R_{cc}}$ y $\varepsilon_{X_{cc}}$. b) Regulación a plena carga con f.d.p. 0,8 inductivo. c) Tensión secundaria en el caso anterior. d) Regulación a media carga y tensión secundaria correspondiente con f.d.p. 0,6 capacitivo. e) Regulación a 3/4 de la plena carga con f.d.p. unidad y tensión secundaria correspondiente. NOTA: La tensión primaria se mantiene constante en todos los casos en 15.000 V.

- **Observaciones**

1) Este Ejemplo –no se dio en clase, pero se deja como ejercicio – ilustra la facilidad del uso la ecuación aproximada (3.75) de la diapo anterior cuando se cumplen los supuestos en los que se basa.

2) Cuando la ecuación no aplica (e incluso en este caso, aunque lleva algo más de esfuerzo) , siempre es posible acudir al modelo eléctrico y resolverlo mediante la teoría clásica de circuitos. El Ejemplo 3.6 de Fraile Mora (se recomienda verlo) ilustra este caso.

SOLUCIÓN

a) La corriente asignada primaria del transformador vale:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{V_{1n}} = \frac{250.000}{15.000} = 16{,}67 \text{ A}$$

y en consecuencia, teniendo en cuenta (3.76), se tiene:

$$\varepsilon_{R_{cc}} = \frac{18 \cdot 16{,}67}{15.000} \cdot 100 = 2\,\% \quad ; \quad \varepsilon_{X_{cc}} = \frac{31{,}17 \cdot 16{,}67}{15.000} \cdot 100 = 3{,}46\,\%$$

b) A plena carga $C = 1$, y la regulación de acuerdo con (3.75) será:

$$\varepsilon_c = 1 \cdot 2 \cdot 0{,}8 + 1 \cdot 3{,}46 \cdot 0{,}6 = 3{,}68\,\%$$

c) Teniendo en cuenta que:

$$\varepsilon_c = \frac{V_{1n} - V_2'}{V_{1n}} \cdot 100\,\% = \frac{15.000 - V_2'}{15.000} \cdot 100 = 3{,}68\,\% \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad \mathrm{V}_2' = 14.448 \text{ V} \quad \Rightarrow \quad V_2 = 240{,}8 \text{ V}$$

d) A media carga (C = 1/2) y para f.d.p. 0,6 capacitivo se cumplirá:

$$\varepsilon_c = \frac{1}{2}\, 2 \cdot 0{,}6 - \frac{1}{2}\, 3{,}46 \cdot 0{,}8 = -0{,}784\,\%$$

que corresponde a $V_2 = 251{,}96$ V, que es superior incluso a la de vacío (efecto Ferranti).

e) Para C = 3/4 y f.d.p. unidad resulta:

$$\varepsilon_c = \frac{3}{4}\, 2 \cdot 1 + \frac{3}{4}\, 3{,}46 \cdot 0 = 1{,}5\,\% \quad \Rightarrow \quad V_2 = 246{,}25 \text{ V}$$

Eficiencia de un trafo

Fuente: Chapman

Eficiencia del trafo

1. Definición de Eficiencia (η)

Fórmula general:

$$\eta = \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{ent}}} \times 100\% \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{sal}} + P_{\text{pérd}}} \times 100\%$$

Aplicación:

- Transformadores, motores y generadores.

Comparación con Transformadores Ideales

Transformador	Pérdidas	η típica
Ideal	0	100%
Real (pequeño)	Altas	85-93%
Real (grande)	Bajas	95-99%

2. Tipos de Pérdidas en Transformadores

Tipo de Pérdida	Causa	Circuito Equivalente
Pérdidas en el cobre (P_{Cu})	Resistencia de los devanados ().	I^2R (depende de la carga).
Pérdidas por histéresis	Magnetización y desmagnetización del núcleo.	R_c (rama de excitación).
Pérdidas por corrientes parásitas	Corrientes inducidas en el núcleo.	R_c (rama de excitación).

Nota:

- Las pérdidas en el núcleo () son **constantes** (no dependen de la carga).

3. Cálculo de la Eficiencia

Fórmula práctica:

$$\eta = \frac{V_S I_S \cos\ \theta}{P_{\text{Cu}} + P_{\text{núcleo}} + V_S I_S \cos\ \theta} \times 100\%$$

Donde:

- $V_S I_S \cos\theta$: Potencia activa de salida (carga).
- Pérdidas en el cobre (variables con la carga).
- Pérdidas en el núcleo (fijas).