

TRANSFORMADORES DE TENSIÓN Y DE CORRIENTE

INTRODUCCIÓN

- Normas que rigen hoy en día y determinan las exigencias de los transformadores de medición: "IEC 185 para transformadores de intensidad e IEC 186 para transformadores de tensión, y normas americanas ANSI C57.13 –1987".

1. TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

Criterios de diseño:

- Caída de tensión en los arrollamientos pequeña
- Densidad de flujo en el núcleo este por debajo de los valores de saturación → corriente de excitación despreciable y una impedancia de magnetización constante

Tensión del secundario:

- 100, 110 V (en Europa)
- 115 o 120 V (en USA)

- La mayoría de los relés de protección tienen una tensión nominal de 120 V o 69.3 V, dependiendo si su conexión es entre fases o fase-tierra.

1.1 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TV INDUCTIVO

- Circuito equivalente (fig. 1.1a).
- La rama de magnetización puede ser ignorada (fig. 1.1b)

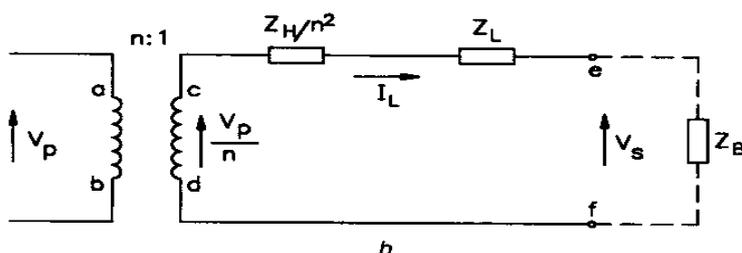
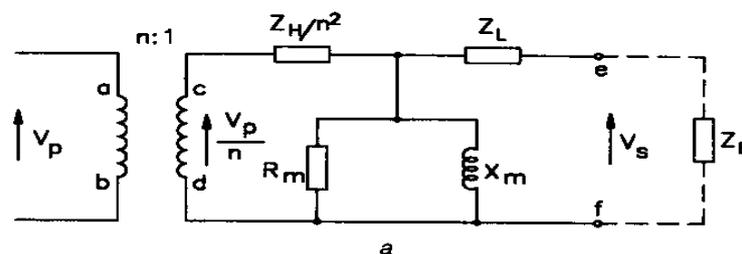


Fig. 1.1 Circuito equivalente de un transformador de tensión

- Diagrama fasorial (fig. 1.2): La tensión del secundario V_s atrasa respecto a la tensión V_p/n y es más pequeña en magnitud.

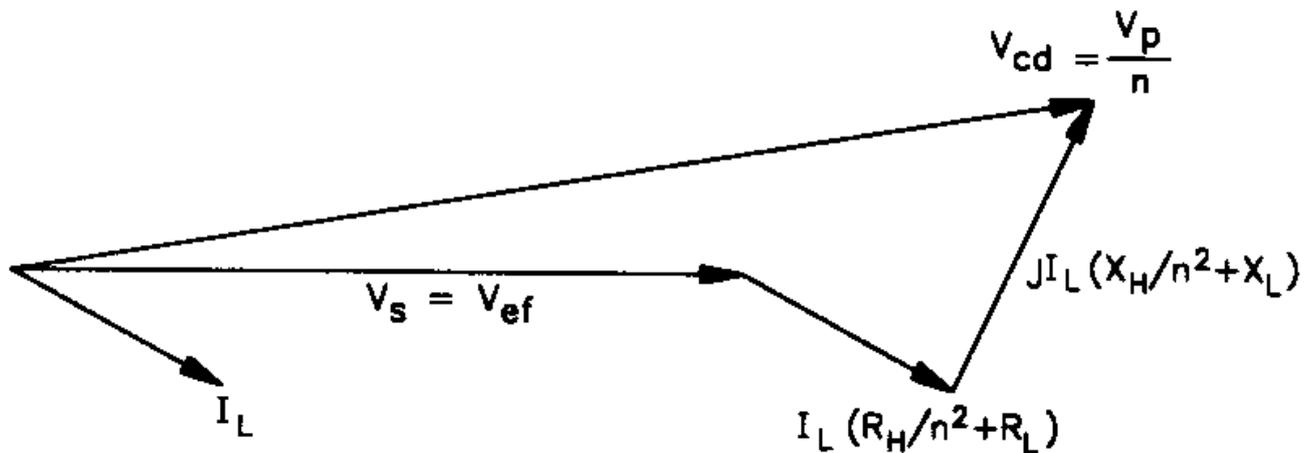


Fig. 1.2 Diagrama fasorial

1.2 ERRORES

- Errores confinados a una región estrecha dado el amplio rango de posibles valores de tensión bajo condiciones de falla. Este rango debe preverse entre el 5% y el 173% de la tensión nominal primaria para TV conectados entre fase y tierra.
- De la fig. 1.1a, los errores en un TV son debidos a diferencias en magnitud y fase entre V_p/n y V_s .

$$ERROR_{VT} = \{ (nV_s - V_p) / V_p \} \times 100\%$$

- Si el error es positivo, luego la tensión secundaria excede el valor nominal.

1.3 CARGA DEL TV (BURDEN)

- Se expresa usualmente en VA a un especificado factor de potencia (tabla 1.1 muestra cargas (burden) estándar basadas en las normas ANSI C57.13.)

Tabla 1.1 – Cargas estándar de TV basadas en las normas ANSI C57.13

Carga estándar			Característica para 120 V y 60 Hz			Característica para 69.3 V y 60 Hz		
Diseño	Volt - Amper	Factor De Potencia	Resistencia Ohm	Inductancia H	Impedancia Ohm	Resistencia Ohm	Inductancia H	Impedancia Ohm
W	12.5	0.10	115.2	3.040	1152	38.4	1.010	384
X	25.0	0.70	403.2	1.090	575	134.4	0.364	192
Y	75.0	0.85	163.2	0.268	192	54.4	0.089	64
Z	200.0	0.85	61.2	0.101	72	20.4	0.034	24
ZZ	400.0	0.85	31.2	0.0403	36	10.2	0.0168	12
M	35.0	0.20	82.3	1.070	411	27.4	0.356	137

- Norma alemana VDE 0414, parte 3 clasifica por la clase de precisión (Tabla 1.2, donde V_n es la tensión nominal)

Referencia:

- El error de fase es positivo cuando la tensión del secundario adelanta a la tensión de primario.
- El error de tensión es la diferencia porcentual entre la tensión en los terminales del secundario, V_2 , multiplicado por la relación de transformación nominal, y la tensión del primario V_1 .

Tabla 1.2 Límites de error de los TV

Clase	Tensión del primario	Error de tensión ($\pm\%$)	Error de fase ($\pm\text{min}$)
0.1	0.8 V_n , 1.0 V_n and 1.2 V_n	0.1	0.5
0.2		0.2	10.0
0.5		0.5	20.0
1.0		1.0	40.0
0.1	0.05 V_n	1.0	40.0
0.2		1.0	40.0
0.5		1.0	40.0
1.0		2.0	80.0
0.1	V_n	0.2	80.0
0.2		2.0	80.0
0.5		2.0	80.0
1.0		3.0	120.0

Donde V_n es la tensión nominal.

Según normas IEC 186:

- Rango de potencia nominal de 10 a 300 VA.
- Clases definidas para protección: 3P y 6P

Tabla 1.3

	Error permisible a 0.05 y $1 * U_n$	
	* U_n	
Designación de la clase	Error de módulo	Error de ángulo
3P	$\pm 3.0\%$	120 min.
6P	$\pm 6.0\%$	240 min.

1.4 SELECCIÓN DE UN TV

Conexión

- Fase-Fase o
- Fase y tierra: normalmente con grupos de tres unidades monofásicas conectadas en estrella en subestaciones con tensiones de 33kV o mayores, o cuando es necesario medir la tensión y factor de potencia de cada fase en forma separada.

Tensión nominal primaria: Tensión nominal de servicio más cercana.

Potencia nominal: suma de las cargas nominales en VA de los aparatos conectados al secundario del TV (caída de tensión en el secundario con la distancia entre TV y el relé !!!).

1.5 TV CAPACITIVOS

- El tamaño de un TV inductivo es proporcional a su tensión nominal → su costo se incrementa mientras mayor es la tensión nominal primaria.
- Una alternativa, y una solución más económica, es utilizar un TV capacitivo.

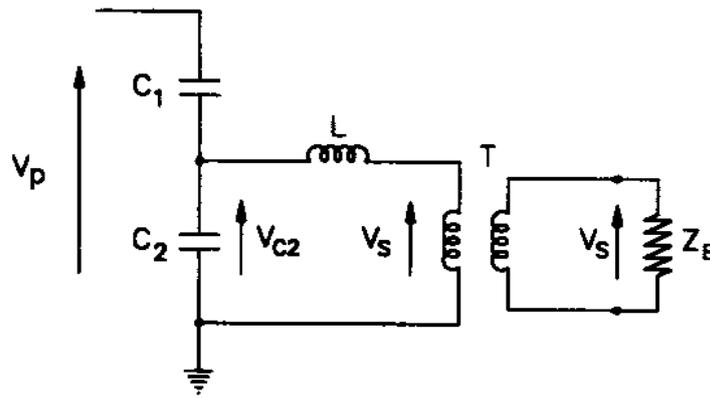


Fig. 1.3 Circuito básico de un TV capacitivo

- También pueden ser especificados por relación de transformación y clase de precisión.
- Impedancia equivalente de la fuente es capacitiva, compensada conectando una reactancia inductiva en serie.
- La fig. 1.4 muestra un circuito simplificado

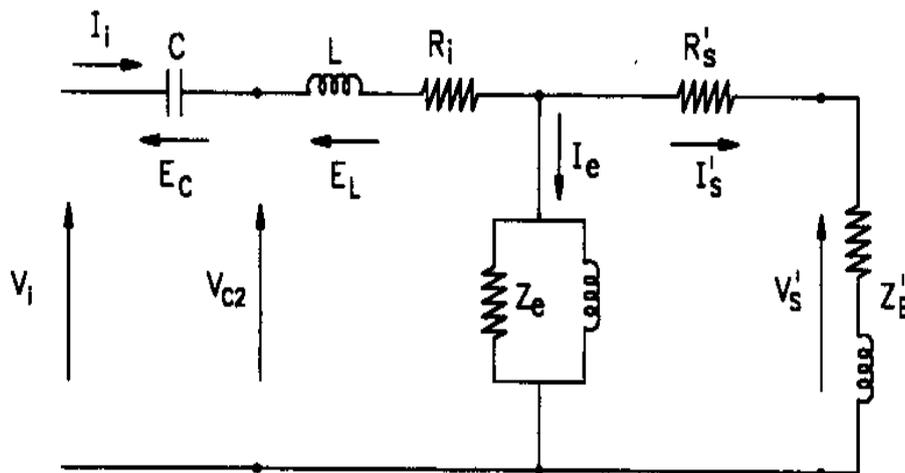


Fig. 1.4 Circuito equivalente de un TV capacitivo

Donde:

- V_i : tensión nominal del primario,
- C : impedancia equivalente igual a $(C_1 + C_2)$
- L : inductancia de resonancia
- R_i : resistencia del arrollamiento primario del transformador, más las pérdidas en C y L ,
- Z_e : impedancia de magnetización.
- R'_s : resistencia del circuito secundario
- Z'_B : impedancia de carga
- V'_s e I'_s : tensión y corriente del secundario referidas al nivel de tensión intermedio.

Condiciones de operación normal:

- A frecuencia nominal del sistema, C y L están resonando
- R_i y R'_s son pequeñas
- I_e es pequeña comparada con $I'_s \rightarrow$ la diferencia vectorial entre V_i y V'_s (error en el TV capacitivo) es muy pequeña.

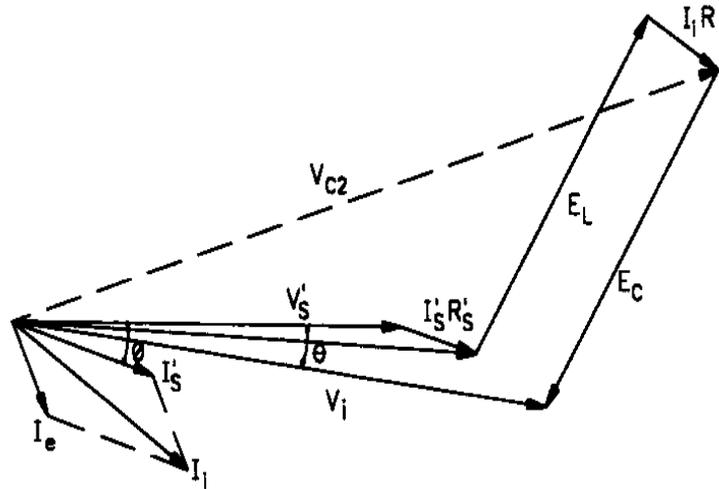


Fig. 1.5 Diagrama fasorial de un TV capacitivo

- Error de tensión: diferencia de magnitud entre V_i y V'_s
- Error de fase: ángulo θ

Para frecuencias diferentes de la frecuencia de resonancia, E_L y E_C son diferentes, causando errores serios en magnitud y fase.

1.5.1 COMPORTAMIENTO DEL TV CAPACITIVO EN ESTADO TRANSITORIO

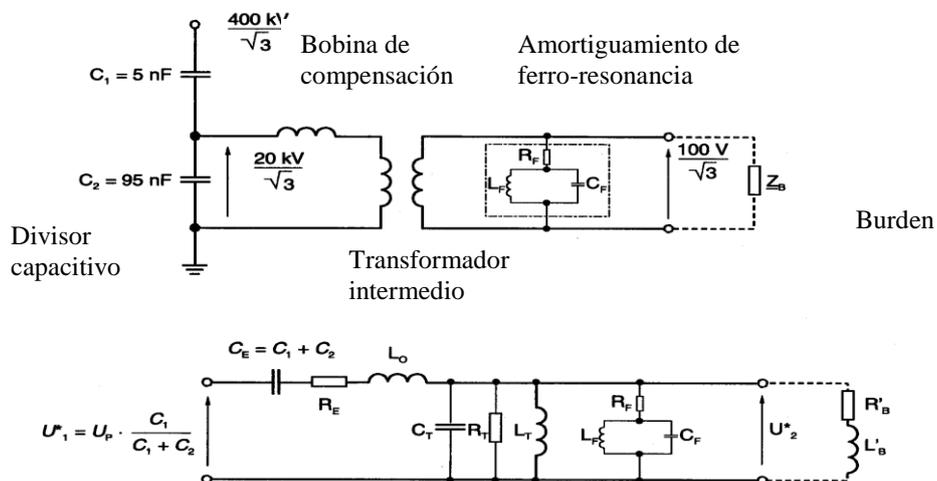


Fig. 1.6

- Siguiendo a un colapso de tensión, aparecen distintos fenómenos dependiendo del ángulo de inserción de la falla:

a) Falla en un máximo de la tensión

- La capacidad a tierra CT del primario del transformador intermedio se descarga, a través de la bobina de compensación L_0 .
- Se origina una oscilación amortiguada con una frecuencia de aprox. 500 – 2000 Hz (fig. 1.7).
- En un TV inductivo se produce una oscilación similar pero menos severa.

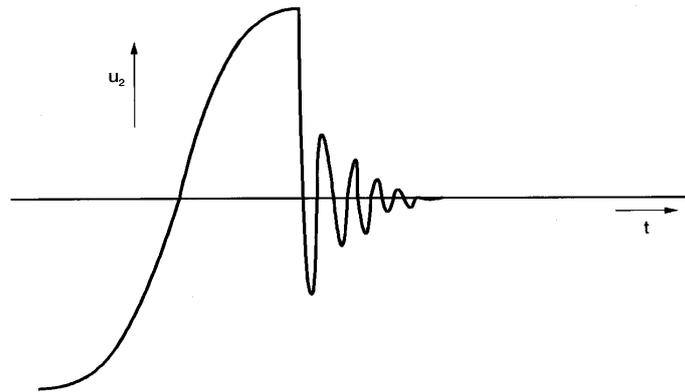


Fig. 1.7

b) Falla cuando la tensión pasa por cero

- Las oscilaciones periódicas son amortiguadas (fig. 1.8).

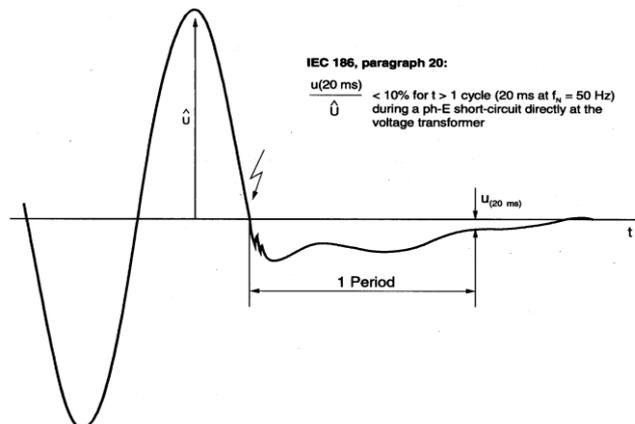


Fig. 1.8

c) Filtro de Ferro-resonancia

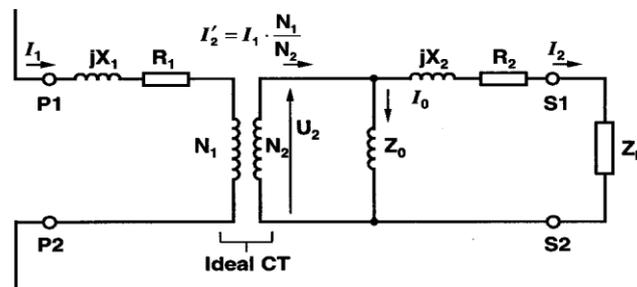
- El filtro (LF, CF) con resistencia de acoplamiento pequeña RF, resulta en oscilaciones transitorias, similares a las del caso anterior.

2. TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

- **TI de alta calidad:** son más confiables y resultan con menos problemas de aplicación y, en general, proveen mejor protección.
- **Premisa:** bajo las condiciones de falla más severas, el TI debe opere en la parte lineal de su característica de magnetización.

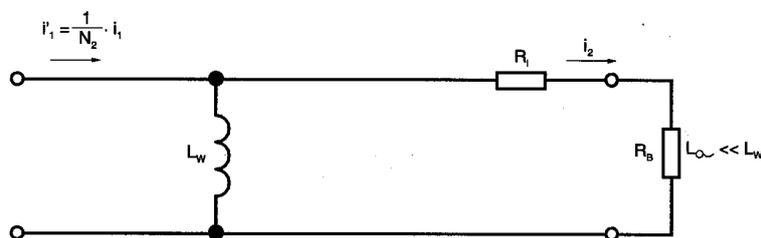
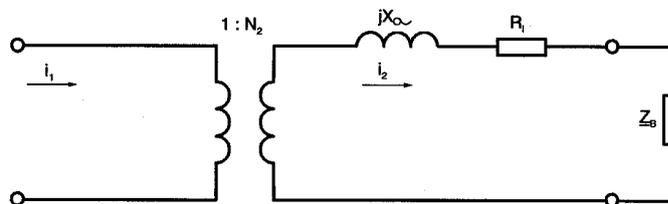
2.1 CIRCUITO EQUIVALENTE

- Circuito equivalente de un TI (fig. 2.1a):



X_1 = Primary leakage reactance
 R_1 = Primary winding resistance
 X_2 = Secondary leakage reactance
 Z_0 = Magnetizing impedance
 R_2 = Secondary winding resistance
 Z_b = Secondary load

a)



b)

Fig. 2.1 Circuitos equivalentes del transformador de corriente

- fig. 2.1b: Z_1 y R_0 se han despreciado; luego la corriente que circula por X_w es la corriente de excitación I_0 .

- fig. 2.2: diagrama fasorial correspondiente, donde puede verse I_0 es la principal fuente de error.
- Notar que el efecto neto de I_0 es hacer a I_2 menor que $I_1 \cdot N_1/N_2$

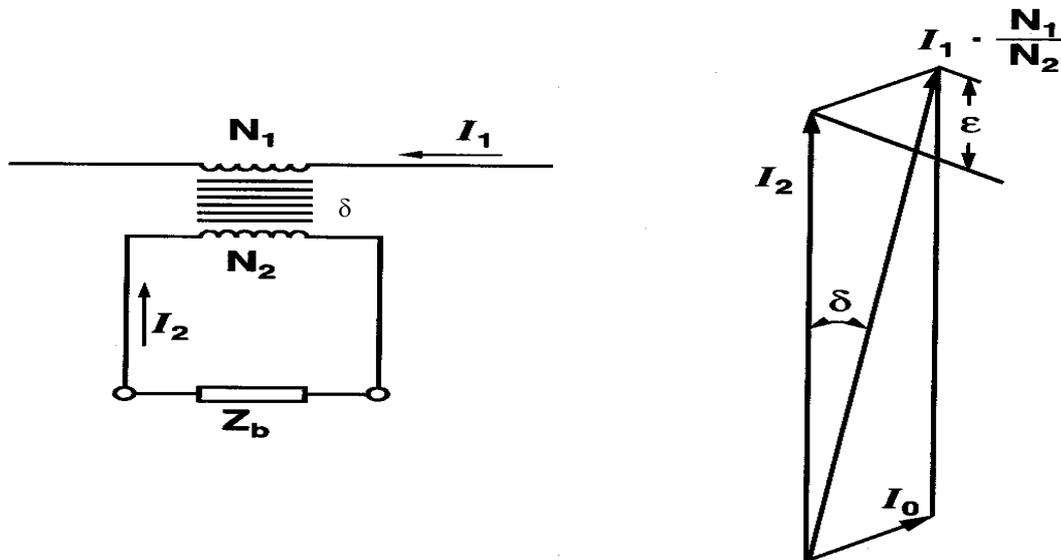


Fig. 2.2 Diagrama fasorial del circuito equivalente del TI

2.2 ERRORES

- Los errores son principalmente debidos a las corrientes que circulan por la rama de magnetización I_0 denominado error total (diferencia entre I_1/n e I_2):
 - error de magnitud o error de relación de transformación ϵ
 - error de fase δ (proporcional a la componente de I_0 la cual está en cuadratura con I_2 .)

2.3 SATURACIÓN CON CORRIENTE ALTERNA

- Los errores de un TI resultan de la corriente de excitación \rightarrow es esencial medir o calcular la curva de excitación.
- I_0 depende de:
 - la sección transversal
 - largo del circuito magnético
 - número de espiras de los arrollamientos
 - las características magnéticas del material.

- Cuando I_1 se incrementa, y por lo tanto también I_2 , se eleva la tensión aplicada a la impedancia de magnetización \rightarrow se puede saturar el núcleo e I_0 crece pudiendo producir un error excesivo (fig. 2.3).

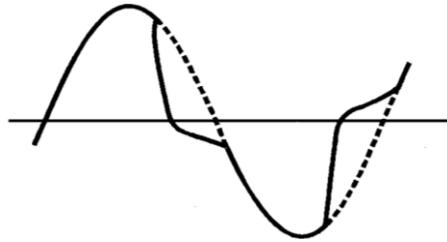
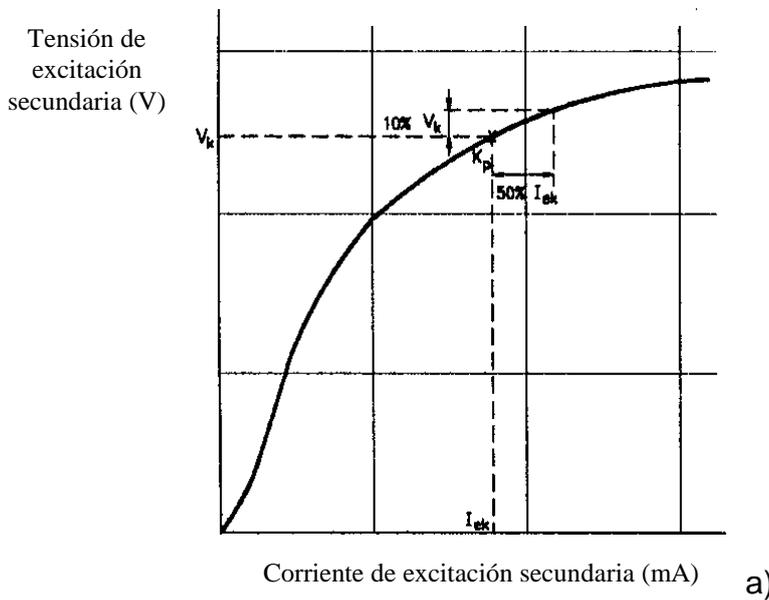


Fig. 2.3 Saturación por corriente alterna

- La fig. 2.4a muestra la relación típica entre la tensión en el secundario y la corriente de excitación determinada de esta manera.



Corriente de excitación secundaria (mA) a)

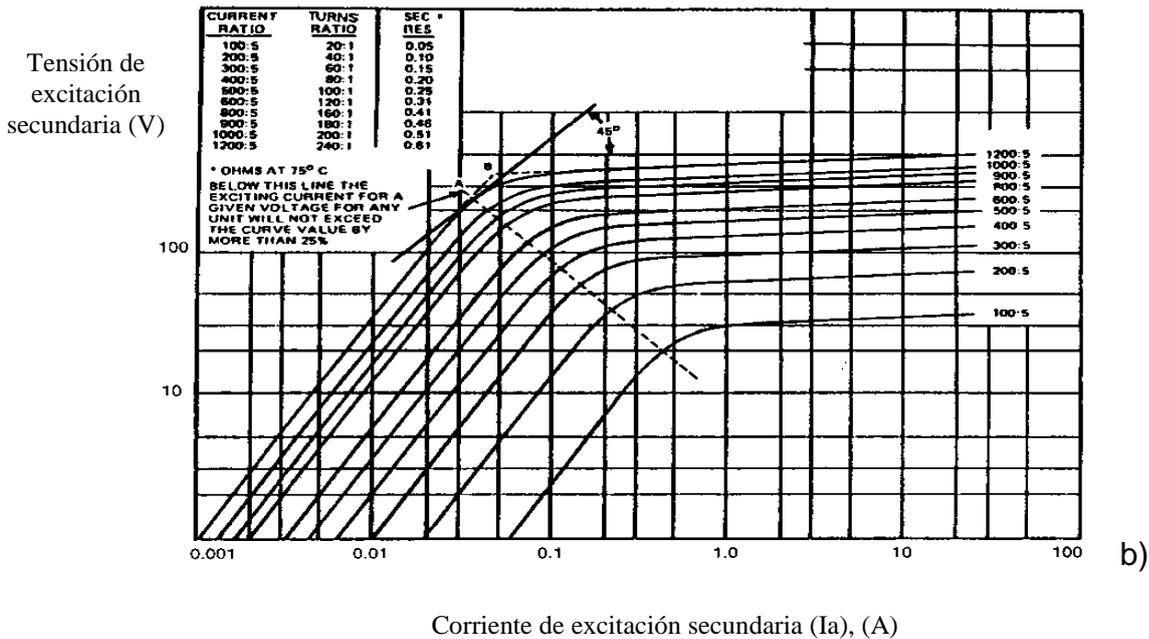


Fig. 2.4 Curvas de magnetización

- Fig. 2.4a: según normas europeas IEC 185, el punto K_p se llama punto o codo de saturación y es definido como el punto a partir del cual un incremento en la tensión de excitación del 10% produce un incremento del 50% de la corriente de excitación.
- Fig. 2.4b: según las normas ANSI/IEEE: intersección de la curva de excitación con una línea tangente a 45°.
- El codo según las IEC se encuentra a una tensión mayor que el codo según las normas ANSI/IEEE.

2.4 CARGA DE UN TI (BURDEN)

- Valor en Ohm de la impedancia en el lado secundario debido a los relés y las conexiones entre TI y los relés.

Tabla 2.1 Cargas estándar para TI de protección con 5 A de corriente secundaria (norma ANSI C57.13)

Designación	Resistencia Ohm	Inductancia Ohm	Impedancia Ohm	Volt-Amps A 5A	Factor de Pot.
B-1	0.5	2.3	1.0	25	0.5
B-2	1.0	4.6	2.0	50	0.5
B-4	2.0	9.2	4.0	100	0.5
B-8	4.0	18.4	8.0	200	0.5

- Según Norma IEC 185 (1987):
 - Se especifica clase de precisión
 - Letra M o P (medición o protección)

Tabla 2.2a Límites de error para TI de medición

Clase	% de error de corriente para los múltiplos específicos de la corriente nominal mostrados abajo							Error de fase en minutos para los múltiplos específicos de la corriente nominal mostrados abajo						
	2.0*	1.2	1.00	0.50	0.20	0.10	0.05	2.00*	1.20	1.00	0.50	0.20	0.10	0.05
0.1	—	0.1	0.1	—	0.2	0.25	—	—	5	5	—	8	10	—
0.2	—	0.2	0.2	—	0.35	0.50	—	—	10	10	—	15	20	—
0.5	—	0.5	0.5	—	0.75	1.00	—	—	30	30	—	45	60	—
1.0	—	1.0	1.0	—	1.5	2.00	—	—	60	60	—	90	120	—
3.0	—	3.0	—	3.0	—	—	—	—	120	—	120	—	—	—
0.1	0.1	—	0.1	—	0.2	0.25	0.40	5	—	5	—	8	10	15
0.2 ext	0.2	—	0.2	—	0.35	0.50	0.75	10	—	10	—	15	20	30
0.5 ext	0.5	—	0.5	—	0.75	1.00	1.50	30	—	30	—	45	60	90
1.0 ext	1.0	—	1.0	—	1.5	2.00	—	60	—	60	—	90	120	—
3.0 ext	3.0	—	—	3.0	—	—	—	120	—	—	120	—	—	—

* ext = 200%

Tabla 2.2b Límites de error para TI de protección

Clase	Error de corriente en % para la proporción de la corriente nominal primaria mostrada				Error de fase (minutos) para la proporción de la corriente nominal primaria mostrada			
	1.0	0.5	0.2	0.1	1.0	0.5	0.2	0.1
5P y 5P ext	1.0	—	1.5	2.0	60	—	90	120
10P y 10P ext	3.0	3.0	—	—	120	120	—	—

Nota: El error total para la corriente límite de error nominal y carga nominal es 5% para TI 5P y 5P ext y 10% para TI 10P y 10P ext.

- El error de fase se considera positivo cuando la corriente en el secundario adelanta respecto a la corriente del primario.
- El error de corriente es la desviación porcentual de la corriente en el secundario, multiplicada por la relación de transformación nominal, con respecto a la corriente primaria, es decir:

$$\{(CTR \times I2) - I1\} \div I1 (\%)$$

donde:

$I1$: corriente primaria en A

$I2$: corriente secundaria en A

CTR : relación de transformación nominal

- Aquellas clases de TI marcadas con 'ext' denotan a TI de amplio rango (extendido), con una corriente permanente de 1.2 o 2 veces la corriente nominal del fabricante.

2.5 SELECCIÓN DE LOS TI

- **Premisa:** "Asegurar que los niveles de falla y condiciones de carga normal no resulten en la saturación del núcleo y que los errores no superen los límites aceptables !!! "
- Metodología de selección:
 - Fórmulas
 - Curvas de magnetización del TI
 - Clases de precisión del TI

- Los dos primeros métodos proveen hechos precisos
- El tercer método provee solo una estimación cualitativa.
- La tensión del secundario U_2 en la fig. 2.1a debe ser determinada para la aplicación de los tres métodos. Si la impedancia del circuito magnético, Z_o es elevada, luego puede ser eliminada del circuito equivalente, resultando y por lo tanto:

$$U_2 = I_2(Z_L + Z_C + Z_B) \quad (1.6)$$

donde :

U_2 = valor eficaz de la tensión inducida en el arrollamiento secundario

I_2 = corriente máxima secundaria en A; esta puede determinarse dividiendo la máxima corriente de falla en el sistema por la relación de transformación.

Z_B = impedancia externa conectada

Z_L = impedancia del arrollamiento secundario

Z_C = impedancia de los alambres de conexión

2.5.1 UTILIZACIÓN DE FÓRMULAS

- Este método emplea la conocida ecuación del transformador:

$$U_2 = 4.44 f A N B_{\max} 10^{-8} V \quad (1.7)$$

donde:

f = frecuencia en Hz

A = sección transversal del núcleo (in^{**2})

N = número de espiras

B_{\max} = densidad de flujo (líneas/in^{**2})

- La sección transversal del metal y la densidad de flujo de saturación son algunas veces difíciles de obtener.
- La última puede tomarse igual a 100000 líneas/in^{**2}, el cual es un valor típico para los transformadores modernos.
- U_2 se determina de la ec. 1.6 y B_{\max} se calcula luego con la ec. 1.7.
- Si B_{\max} excede la densidad de saturación, podría haber un error apreciable en la corriente del secundario y el TI seleccionado no sería el apropiado.

Ejemplo: Considérese que se dispone de un TI con relación de transformación 2000/5, el cual tiene un núcleo de acero de alta permeabilidad, una sección transversal de 3.25 in^2 y un arrollamiento secundario con resistencia de 0.31Ω . La impedancia del relé incluyendo las conexiones es 2Ω . Determinar si el TI se saturaría para una falla de 35000 A a 50 Hz .

Solución:

Si el TI no se satura, luego la corriente de secundario, I_2 , es $35000 \times 5 / 2000 = 87.5 \text{ A}$, $N = 2000 / 5 = 400$ vueltas. Luego $U_2 = 87.5 \times (0.31 + 2) = 202.1 \text{ V}$. Utilizando luego la ec. 1.7 se puede calcular B_{\max} :

$$B_{\max} = \frac{202.1 \times 10^8}{4.44 \times 50 \times 3.25 \times 400} = 70030 \text{ líneas/in}^2$$

Dado que el transformador del ejemplo tiene una elevada permeabilidad, este valor relativamente bajo de densidad de flujo no provocaría saturación.

2.5.2 UTILIZACIÓN DE LA CURVA DE MAGNETIZACIÓN

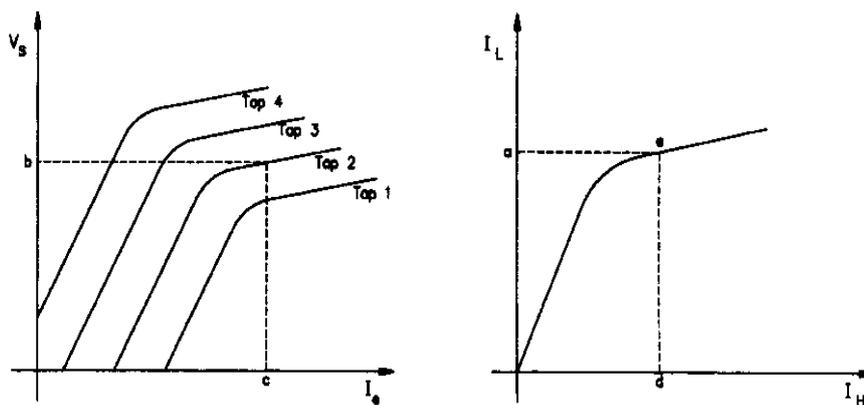


Fig. 2.5 Utilización de la curva de magnetización

- Asumir un valor de I_2 , que puede ser el correspondiente a la máxima corriente de falla.
- Calcular U_2 de acuerdo a la fórmula:

$$U_2 = I_2 * (ZB+ZC+ZL) \quad (1.8)$$

donde:

ZB: impedancia de carga del TI

ZL: impedancia del arrollamiento secundario

ZC: impedancia de los alambres de conexión

- c) Con U_2 , encontrar el valor asociado de la corriente de magnetización I_e
 - d) Calcular $IH/n (= I_2 + I_e)$ y multiplicar este valor por n para referirlo al lado primario del TI.
 - e) Esto provee un punto de una curva I_2 vs. IH , y el proceso se repite para obtener otros puntos; luego se obtendrá la curva completa.
- Este método incurre en un error al calcular IH/n sumando I_e e I_2 aritméticamente y no vectorialmente como corresponde, teniendo en cuenta el ángulo de carga y rama de magnetización del circuito equivalente. Sin embargo, este error no es grande y la simplificación hace más fácil la realización de los cálculos.

2.5.3 CLASES DE PRECISIÓN ESTABLECIDAS POR LAS NORMAS ANSI C57.13 e IEC 185

NORMA ANSI C57.13

- Se describe por una letra y una tensión nominal: C (la relación de transformación se puede calcular) y I (relación de transformación debe ser determinada por medio de tests)

Ejemplo: Suponiendo un TI clase C-100, luego: significa que se puede calcular la relación, y el error no debe superar el 10% si la corriente de secundario no supera el rango de 1 a 20 veces la corriente nominal y si la carga no excede 1 Ohm ($1 \text{ Ohm} \times 5 \text{ A} \times 20 = 100 \text{ V}$) para un factor de potencia mínimo de 0.5.

NORMA IEC 185

- La caracterización de los TI para protección, según la Norma IEC 185, tiene lugar a través de:
 - el error porcentual máximo total para la corriente límite de error (5% o 10%)
 - la letra P (de protección)

- y el factor límite de precisión

Ejemplo: clase 5P10 significa que el TI tendrá un error total máximo de 5% para una corriente 10 veces su corriente nominal; si la $I_n = 5A$ en el secundario luego para una corriente de 50 A en el secundario el máximo error garantizado será del 5%;

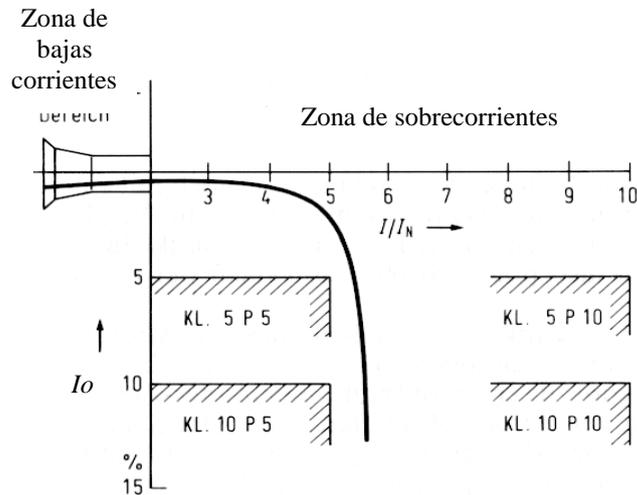


Fig. 2.6 Error total I_o porcentual

- Para especificar completamente un TI según esta norma se requiere los siguientes datos:

Relación de transformación nominal:

por ej. 600/1 o 600/5

la potencia nominal P_n : Potencia provista por el TI del lado secundario a corriente nominal y carga (burden) nominal, por ej.: 30VA

Clase de precisión:

5P o 10P

Factor límite de precisión:

ALF (por ej. 10 o 20)

Este múltiplo de la corriente nominal, sin componente de corriente continua DC, puede ser transformada por el TI con la clase de precisión definida, si la carga (burden) conectada es igual a la nominal ($\cos \varphi = 1$).

Resistencia interna del secundario:

Ri en ohm

Ejemplo: 400/1 A; 5P10; 30VA; Ri = 6.2 Ω

2.6 COMPORTAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE EN ESTADO TRANSITORIO

- Hasta ahora no se ha considerado la componente transitoria de corriente continua (DC) de la corriente de falla.
- La DC puede saturar más severamente que la componente alterna vista.

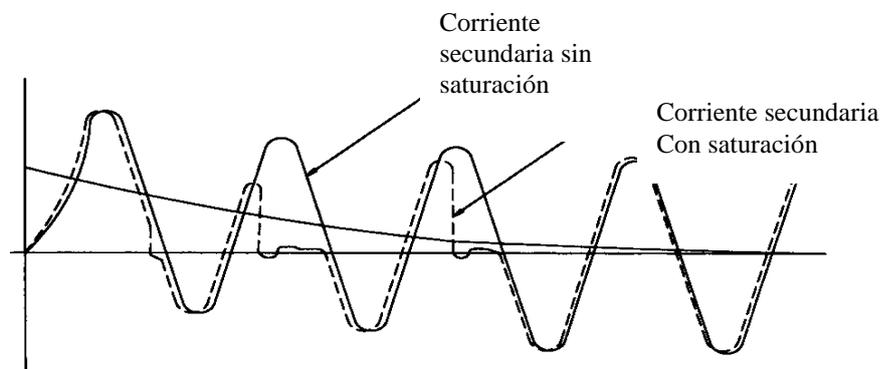


Fig. 2.7 Efecto de la saturación por componente continua en la corriente de secundario

- Sin embargo, la componente continua de la corriente de falla no produce saturación el TI si $V_k \geq 6.28 \cdot I \cdot R \cdot T_N$, donde:

V_k = tensión del codo de saturación de la curva de magnetización

I = corriente simétrica del secundario (valor eficaz en A)

R = resistencia total del secundario

T_N = constante de tiempo de la componente continua de la corriente primaria en ciclos, es decir

$$T_N = \frac{L_p}{R_p} f$$

donde:

L_p = inductancia del circuito primario

R_p = resistencia del circuito primario

f = frecuencia

2.6.1 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TRANSITORIO

Circuito equivalente de la fig. 2.1b:

- densidad de flujo B del mismo es proporcional a la integral de la tensión en el secundario aplicada en la rama L_w :

$$B \sim \int u_2(t) dt = (R_i + R_B) * \int i_2(t) dt$$

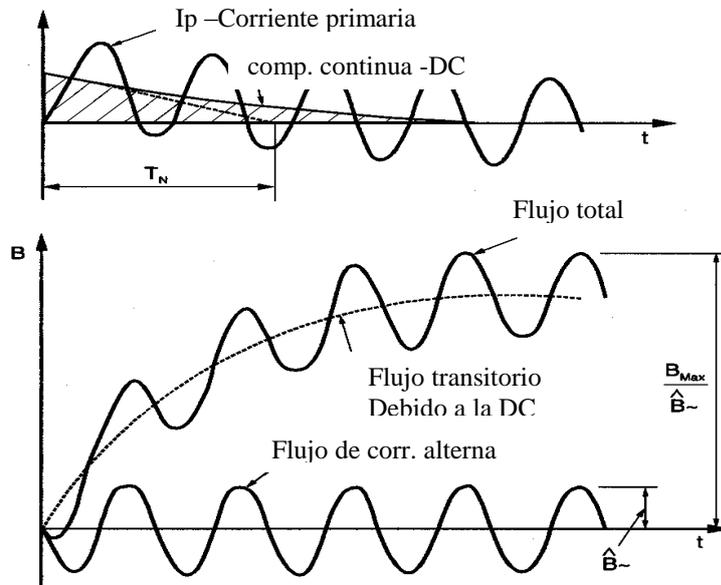


Fig. 2.8 Trayectoria temporal del flujo de un TI debido a corrientes de falla con DC

Para permitir esto, el TI debe tener dimensiones mayores.

La trayectoria de la densidad de flujo se puede calcular con la ec.:

$$\frac{B}{\hat{B}_{\sim}} = 1 + \frac{\omega \cdot T_N \cdot T_S}{T_N - T_S} \left(e^{-\frac{t}{T_N}} - e^{-\frac{t}{T_S}} \right)$$

ec. (1.9)

el máximo valor:

$$\frac{B_{Max}}{\hat{B}_{\sim}} = 1 + \omega \cdot T_S \cdot \left(\frac{T_N}{T_S} \right)^{\frac{T_S}{T_S - T_N}}$$

ec.(1.10)

es alcanzado en el instante:

$$t_{B_{Max}} = \frac{T_N \cdot T_S}{T_S - T_N} \cdot \ln \frac{T_S}{T_N}$$

ec. (1.11)

T_s es la constante de tiempo del lado secundario.

$$T_s = \frac{L_w}{R_i + R_B} = \frac{1}{\omega \cdot \tan \delta}$$

ec. (1.12)

La constante de tiempo del secundario decrece por lo tanto cuando el error de fase δ se incrementa (núcleo del TI con entrehierros de aire). Las ecuaciones siguiente son válidas para 50 hz (60Hz):

$$T_s = \frac{10900}{\delta_{[\text{min}]}} [\text{ms}] \left(T_s = \frac{9083}{\delta_{[\text{min}]}} [\text{ms}] \right)$$

ec. (1.13)

- El incremento de flujo determina el sobre-dimensionamiento necesario del TI:
 - Si el TI tiene que transformar sin saturación hasta el instante t_s , luego debe definirse $t = t_s$ en la ec. 1.9.
 - Si el TI no debe saturar durante toda la duración del cortocircuito, debe tomarse la densidad de flujo máximo calculada con la ec. 1.10.

2.6.2 PROCESO DE DESMAGNETIZACIÓN

- La corriente de cortocircuito es desconectada en el instante de paso por cero de la misma → flujo es máximo
- Adicionalmente, luego de una apertura rápida, el TI puede existir todavía una magnetización alta debido a la DC.
- La desmagnetización tiene lugar por medio de una corriente de relajación en el circuito secundario del TI.
- El flujo no retorna a cero; permanece un flujo remanente B_R (fig. 2.9):

$$B = B_R + (B_{\text{Max.}} - B_R) \cdot e^{-\frac{t}{T_s}}$$

ec. 1.14

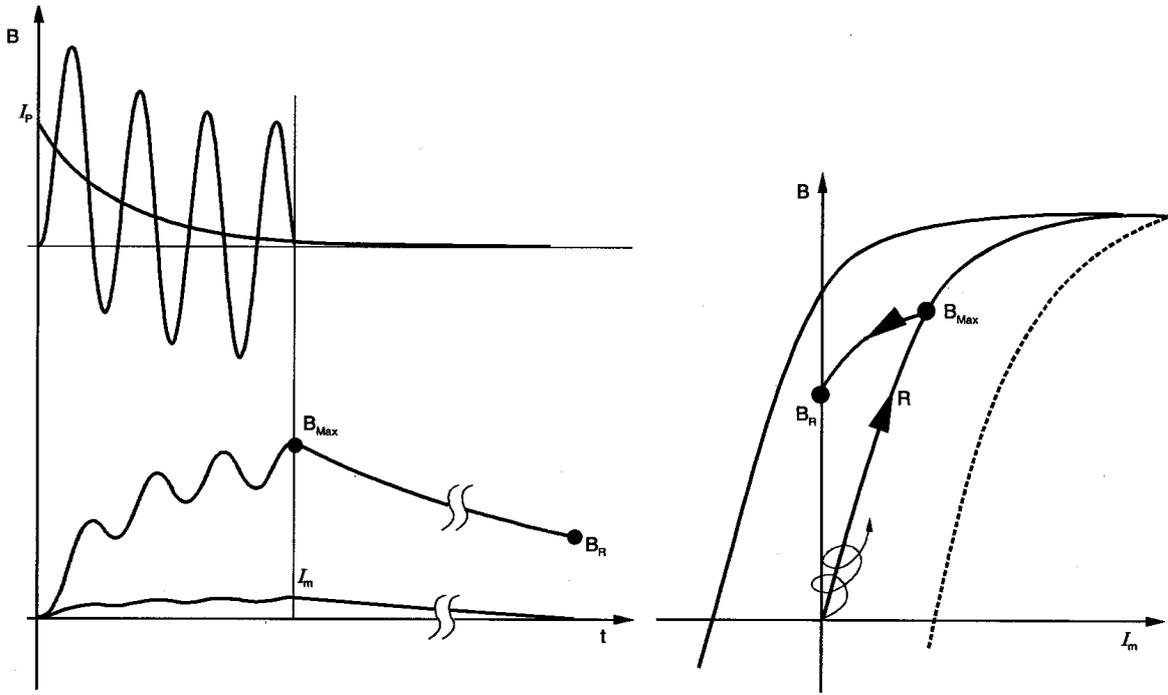
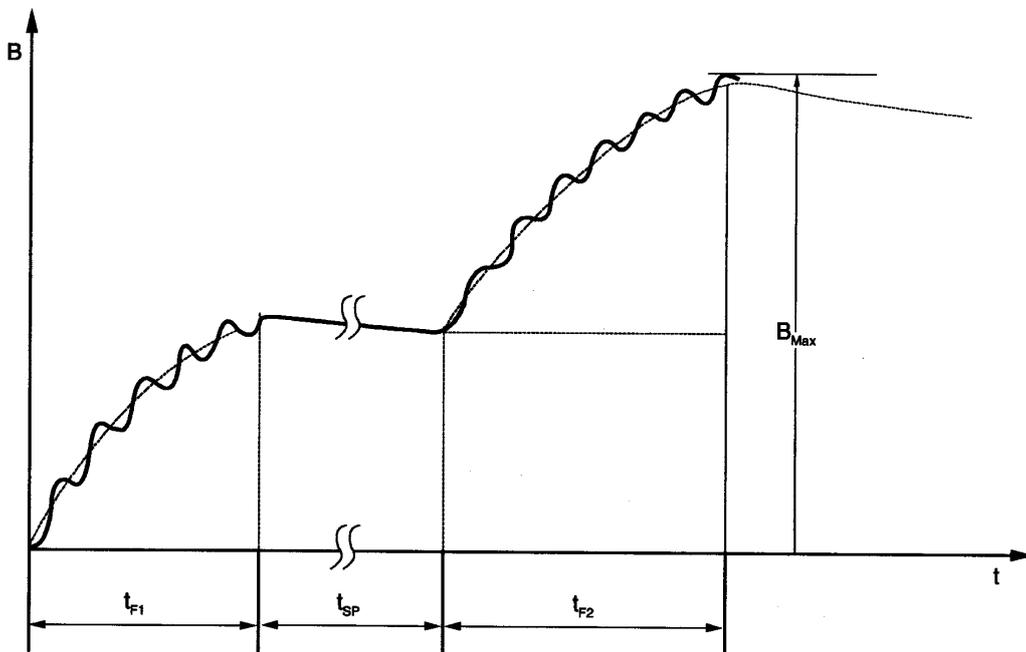


Fig. 2.9 Magnetización y desmagnetización de un TI

- El flujo remanente se alcanza luego de aprox. $t = 3 * T_s$.
- Si el circuito es reconectado en falla luego de esto, el flujo se incrementa desde un valor intermedio según la ec. 1.9.

2.6.3 CICLO DE RECIERRE NO EXITOSO



Donde:

TF1 : duración de la primer falla

TSP= duración del tiempo muerto

TF2 = duración de la segunda falla luego del recierre automático

Fig. 2.10 Trayectoria del flujo en el caso de un ciclo de recierre no exitoso

- La siguiente ec. es válida para el flujo alcanzado al final del ciclo de falla:

$$\frac{B_{Max}}{\hat{B}} = \left[1 + \frac{\omega \cdot T_N \cdot T_s}{T_N - T_s} \left(e^{-\frac{t_{F1}}{T_N}} - e^{-\frac{t_{F1}}{T_s}} \right) \right] \cdot e^{-\frac{t_{SP} + t_{F2}}{T_s}} + \left[1 + \frac{\omega \cdot T_N \cdot T_s}{T_N - T_s} \left(e^{-\frac{t_{F2}}{T_N}} - e^{-\frac{t_{F2}}{T_s}} \right) \right]$$

ec. 1.15

2.6.4 CLASES DE TRANSFORMADORES TP

- Norma IEC 44-6: Requerimientos de performance de los TI durante el transitorio con componentes continuas en la corriente de falla (Transient Performance Requirements).
- Esta norma hace diferencia entre cuatro clases dependiendo del tipo de construcción del núcleo del TI:

- Clase TPS:

Un TI con núcleo cerrado de hierro con flujo de dispersión pequeño. El comportamiento de transformación está definido por la curva de magnetización (tensión en el codo, corriente de magnetización) y la resistencia del arrollamiento secundario.

- Clase TPX:

Un TI con núcleo cerrado de hierro sin limitación de la remanencia. Esta construcción corresponde a TI's de la clase P de acuerdo a la norma IEC 185.

- Clase TPY:

TI's con entrehierro de aire anti-remanencia (remanencia $\leq 10\%$).

- Clase TPZ:

TI's con núcleo lineal (la remanencia puede ser despreciada). En este tipo de TI la componente continua es severamente cortocircuitada.

COMPORTAMIENTO:

TI's con núcleo de hierro cerrado:

- Transforman las componentes alterna y continua con alta precisión en un rango determinado.
- Su remanencia es sin embargo muy grande ($> 80\%$) (curva I en la fig. 2.11).
- La desmagnetización puede tomar desde medio minuto a varios minutos.
- Ante un ARC no exitoso con el cierre del interruptor en el momento más inoportuno el flujo será aprox. el doble.

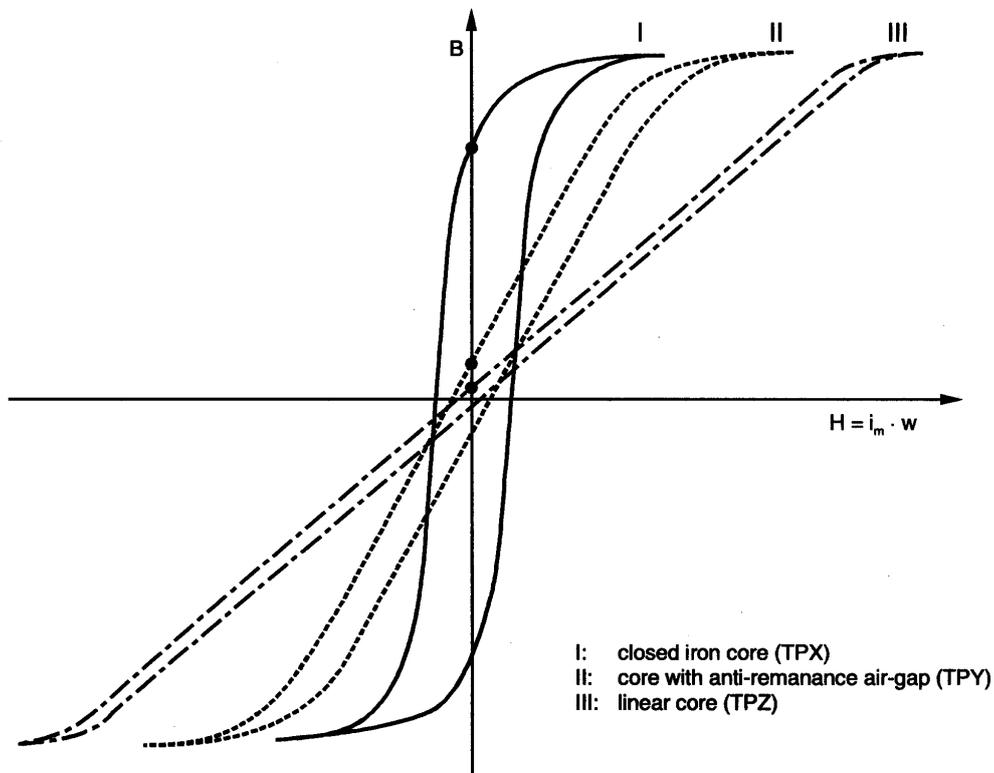
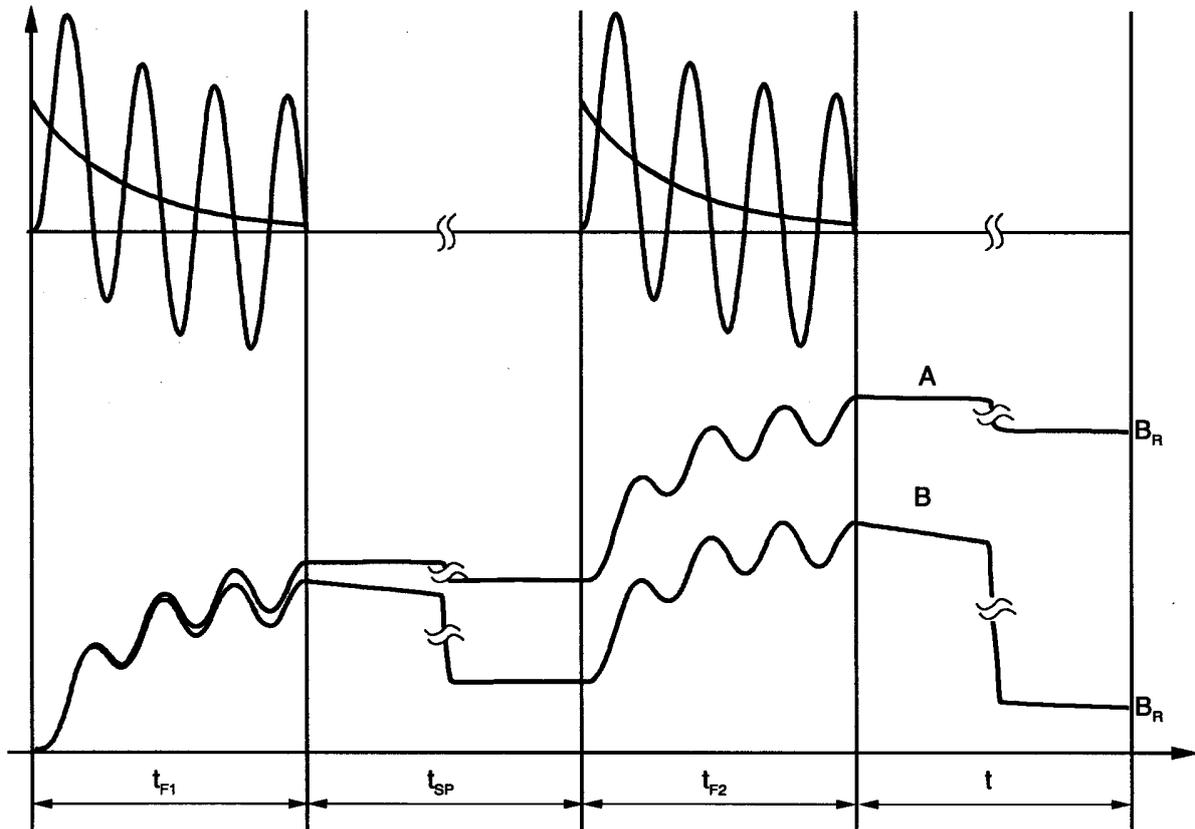


Fig. 2.11

TI's con entrehierros de aire en el núcleo de hierro:

- El entrehierro de aire en el núcleo reduce dramáticamente la magnitud del flujo remanente.
- Se reduce el tiempo necesario para la desmagnetización al orden de un segundo o menos.

- La constante de tiempo del secundario T_s puede no reducirse en el mismo orden, por lo tanto, tiempos de 200 ms a 300 ms serán el límite inferior → un TI clase TPY se desmagnetizará solo parcialmente, durante el tiempo muerto de un ARC (fig. 2.12).



A: closed iron core (TPX)
 B: core with anti-remnance air-gap (TPY)

Fig. 2.12 Trayectoria del flujo durante un ARC no exitoso.

- Los clase TPZ con entrehierros de aire (núcleos lineal), la componente DC es cortocircuitada dramáticamente durante el proceso de transformación
- El núcleo puede ser desmagnetizado en menos de 200 ms, cuando la constante de tiempo del TI sea aprox. de 60 ms
- Esto implica que aún para el tiempo muerto más corto de un ciclo de ARC, el flujo decaerá prácticamente a cero. (fig. 2.13).

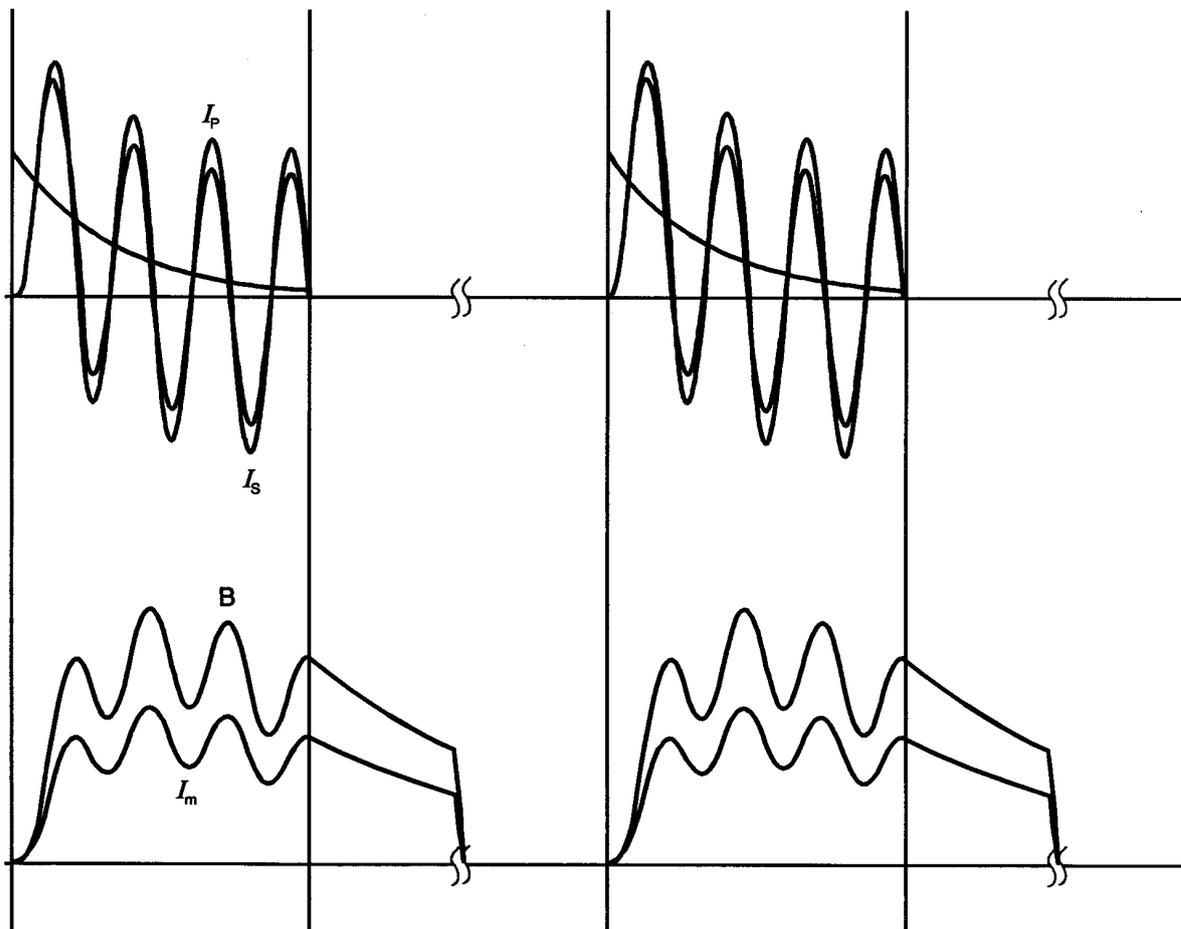


Fig. 2.13 Trayectoria del flujo en un TI clase TPZ con núcleo lineal para un ciclo ARC no exitoso.

2.7 PRECAUCIONES CUANDO SE TRABAJA CON LOS TI

- Abrir el circuito secundario podría dar origen a sobretensiones peligrosas que pueden afectar al personal o dañar equipamiento
- La impedancia equivalente del circuito primario permanece inafectada pero se origina una elevación de tensión considerable debido a la corriente del primario cuando circula por la impedancia de magnetización → los secundarios deben permanecer siempre en la condición cerrado o cortocircuitados.

Ejemplo: Considerar un alimentador de 13.2kV el cual transporta una carga de 10 MVA a un factor de potencia 1.0. Junto con este circuito hay un TI 500/5 alimentando un sistema de medición el cual tiene una carga total de 10 VA. El circuito equivalente del TI referido al secundario se muestra en la fig. 11. Calcular la tensión que se desarrollaría en el secundario si el secundario es abierto accidentalmente.

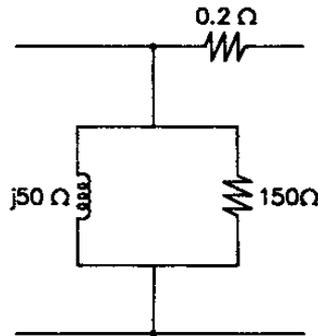


Fig. 11 Circuito equivalente del TI, referido al lado secundario

Solución:

El diagrama unifilar se muestra en la fig. 12 y el circuito equivalente en la fig. 13. Refiriendo los valores al lado secundario resulta:

$$V = \frac{13200}{\sqrt{3}} * \frac{500}{5} = 762102.36 \text{ V}$$

$$Z_{carga} = \frac{13.2^2}{10} * \left(\frac{500}{5}\right)^2 = 174240\Omega$$

Cuando el secundario es cerrado, se puede calcular aproximadamente la tensión en el sistema de medición, ignorando la rama shunt, como:

$$V_{meter} = \frac{76210236}{174240 + 0.2 + 0.4} A * 0.4\Omega = 4.37A * 0.4\Omega = 1.75V$$

Si el circuito secundario es abierto, la corriente es solo capaz de circular por la rama shunt. En esas condiciones la tensión que aparecerá en los terminales del TI será:

$$V_{CT} = \frac{76210236}{174240 + (150 // j50)} * (150 // j50) = 207.47 \angle 71.55 \text{ V}$$

Nota: el operador // significa el paralelo de las impedancias.

Por lo tanto, la tensión se incrementa aprox. 120 veces.

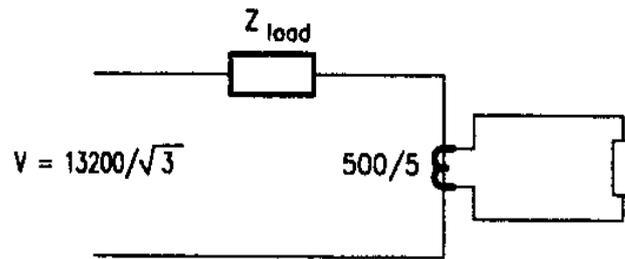


Fig. 12 Diagrama unifilar

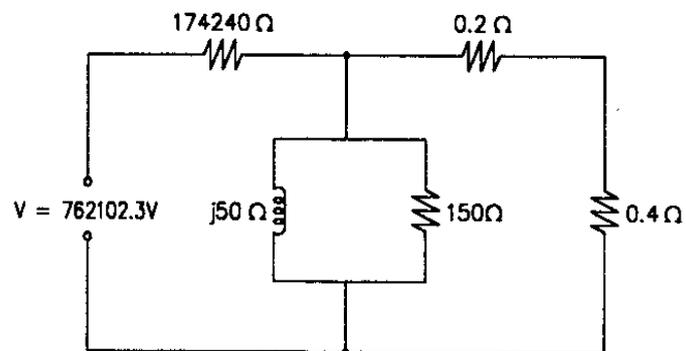


Fig. 13 Circuito equivalente