

TEMA III:

**TRANSFORMADORES DE TENSION Y DE
CORRIENTE**

TEMA III: TRANSFORMADORES DE TENSIÓN Y DE CORRIENTE

INTRODUCCIÓN

Antes de cualquier intención de realizar una acción de protección o monitoreo de un equipo de un sistema eléctrico de potencia, el primer paso es la transducción de los valores de tensión y corriente de los niveles de alta tensión y elevadas corrientes del sistema a valores reducidos de las mismas, que no sean peligrosos para las personas ni para los equipos de medición y protección utilizados.

Las normas más importantes que rigen hoy en día y determinan las exigencias de los transformadores de medición son las europeas IEC 185 para transformadores de intensidad e IEC 186 para transformadores de tensión, y las normas americanas ANSI C57.13 -1978.

A continuación se verán los aspectos relacionados con los transformadores de tensión y corriente utilizados para esta tarea.

1. TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

Con los transformadores de tensión (TV) es esencial que la tensión del secundario debe ser proporcional a la tensión del primario. Los TV se diseñan de tal forma que la caída de tensión en los arrollamientos sean pequeñas y la densidad de flujo en el núcleo este lejos por debajo de los valores de saturación para que la corriente de excitación sea también despreciablemente pequeña; de esta forma se obtiene una impedancia de magnetización prácticamente constante sobre el rango de tensión requerido. La tensión del secundario de un TV puede ser 100, 110 (en Europa), 115 o 120 V (en USA) correspondiente a tensión de fase. 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

Los TV se pueden considerar como pequeños transformadores de potencia; luego se puede utilizar el mismo circuito equivalente, como se muestra en la fig. 1.1a. La rama de magnetización puede ser ignorada y el circuito equivalente se reduce al mostrado en la fig. 1.1b.

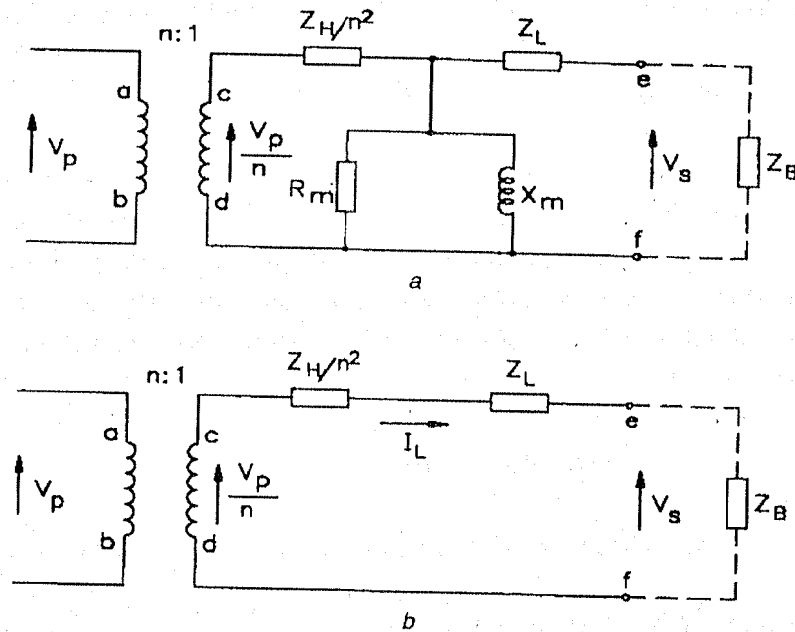


Fig. 1 Circuito equivalente de un transformador de tensión

En la fig. 1.2 se muestra el diagrama fasorial de un TV, con la caída de tensión longitudinal exagerada para mayor claridad. La tensión del secundario V_s atrasa respecto a la tensión V_p/n y es más pequeña en magnitud. En realidad el error máximo nominal es relativamente chico. Los TV tienen en general un excelente comportamiento transitorio y reproducen en forma precisa cambios abruptos en la tensión primaria.

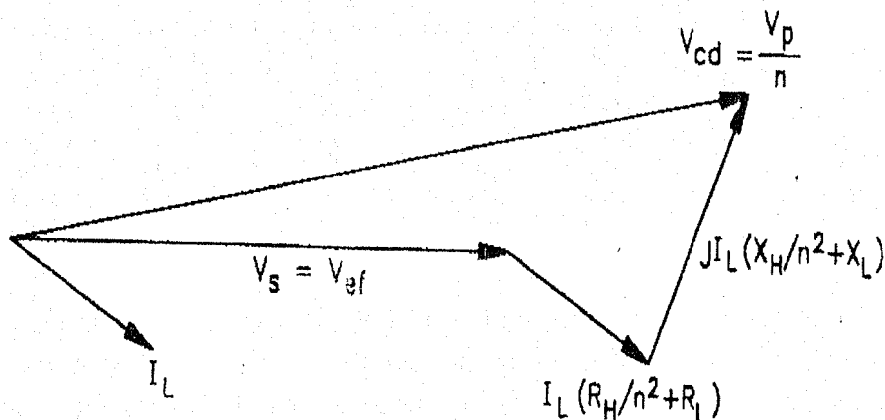


Fig. 1.2 Diagrama fasorial

1.2 ERRORES

Cuando se utiliza como instrumento de medición, la precisión del TV es importante, especialmente para aquellos valores cercanos a la tensión nominal del sistema. Aunque los requerimientos de precisión de un TV para aplicaciones en protección no son tan elevados, teniendo en cuenta la diversidad de elementos a los que están conectados (distintos tipos de relés, conexiones e incertidumbre de parámetros), los errores deben

estar 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.

Haciendo referencia al circuito 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 . Estas consisten en los errores bajo condiciones de circuito abierto cuando ZB es infinito, causada por la caída de tensión de la circulación de la corriente de magnetización a través del arrollamiento primario y errores debidos a las caídas de cómo resultado de la corriente de carga I_L circulando por ambos arrollamientos. Los errores en magnitud pueden calcularse de la ec.

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

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

1.3 CARGA DEL TV (BURDEN)

La carga estándar de un TV se expresa usualmente en VA a un especificado factor de potencia. La 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

Los TV se especifican en la Norma alemana VDE 0414, parte 3 por la clase de precisión. Los límites de error permitidos correspondientes a diferentes valores de clases se muestran en la tabla 1.2, donde V_n es la tensión nominal. El error de fase se considera 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 (±%)	Error de fase (±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.

Como ya se mencionó, en Europa las definiciones específicas para TV's inductivos son suministradas por las normas IEC 186. El rango de potencia nominal de los TV's es de 10 a 300 VA. Se requiere una potencia elevada cuando se accionan relés electromecánicos. En el caso de relés estáticos o digitales, las cargas son menores a 1 VA. Las clases definidas en la IEC 186 para propósitos de protección, 3P y 6P, tienen límites relativamente altos de precisión (tabla 1.3).

Tabla 1.3

Designación de la clase	Error permisible s 0.05 * Un y 1 * Un	
	Error de módulo	Error de ángulo
3P	±3.0%	120 min.
6P	±6.0%	240 min.

1.4. SELECCIÓN DE UN TV

Los TV se conectan entre fases o entre fase y tierra. La segunda se utiliza 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.

La tensión nominal primaria de un TV se selecciona generalmente teniendo en cuenta la tensión de aislación nominal más alta (kV) y la tensión nominal de servicio más cercana. Con el objeto de seleccionar la potencia nominal de un TV, es usual sumar todas las

cargas nominales en VA de los aparatos conectados al secundario del TV. Además es importante tener en cuenta las caídas de tensión en el secundario, especialmente si la distancia entre TV y el relé representa una carga grande.

1.5 TV CAPACITIVOS

Como para los TV's inductivos, pueden ser especificados en relación a su relación de transformación y clase de precisión. En general, el tamaño de un TV inductivo es proporcional a su tensión nominal y por esta razón, el costo se incrementa para TV de mayor tensión nominal primaria. Una alternativa, y una solución más económica, es utilizar un TV capacitivo.

El divisor capacitivo difiere del inductivo en que la impedancia equivalente de la fuente es capacitiva y que esta impedancia pueda ser compensada conectando una reactancia inductiva en serie en el punto de conexión. El divisor puede reducir la tensión a valores los cuales los errores pueden ser mantenidos en límites normales admisibles, y la tensión pueda ser reducida a tensiones estándar utilizando un TV de menor costo como se muestra en la fig. 1.3.

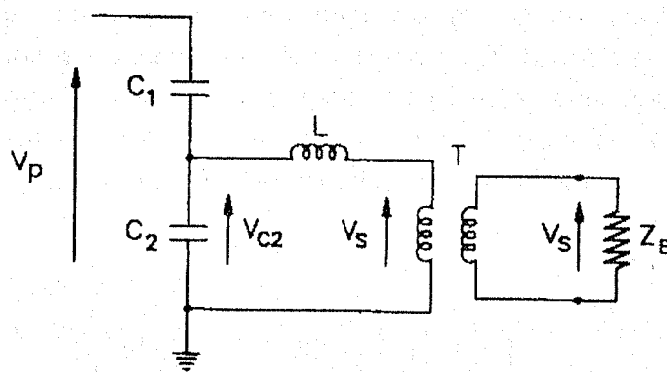


Fig. 1.3 Circuito básico de un TV capacitivo

La fig. 1.4 muestra un circuito simplificado de un TV capacitivo en el cual V_i es igual a la tensión nominal del primario, C es la impedancia equivalente igual a $(C1 + C2)$, L es la inductancia de resonancia, R_i representa la resistencia del arrollamiento primario del transformador T más las pérdidas en C y L , y Z_e es la impedancia de magnetización de T . La resistencia del circuito secundario y la impedancia de carga están representadas por R_s y Z_B respectivamente, mientras V_s e I_s representan la tensión y corriente del secundario referidas al nivel de tensión intermedio.

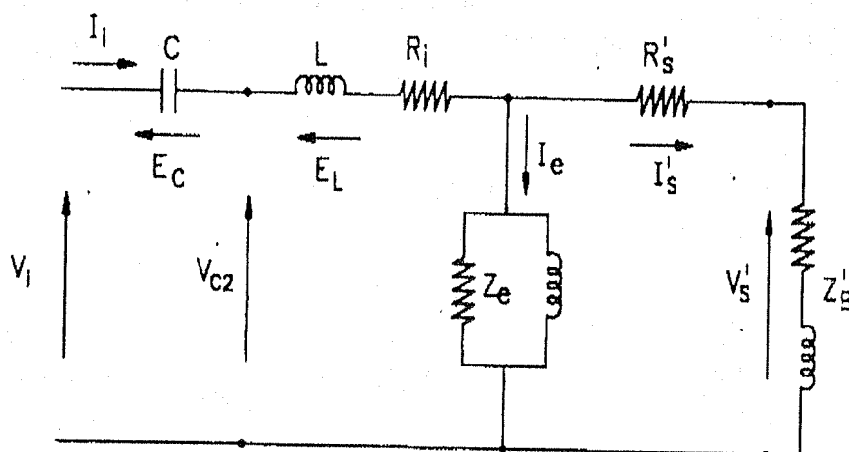


Fig. 1.4 Circuito equivalente de un TV capacitivo

Puede verse que con la excepción de C , el circuito e la fig. 1.4 es el mismo que para un transformador de potencia. Por lo tanto, a frecuencia nominal del sistema, C y L están resonando y bajo estas condiciones normales de operación el TV capacitivo actúa como un transformador convencional. R_i y R_s no son grandes y además I_e es pequeña comparada con I_s de tal forma que la diferencia vectorial entre V_i y V_s , la cual conforma el error en el TV capacitivo, es muy pequeña. Esto está ilustrado en el diagrama fasorial de la fig. 1.5 el cual está trazado para un factor de potencia cercano a la unidad. El error de tensión es la diferencia de magnitud entre V_i y V_s mientras que el error de fase está indicado por el ángulo θ . Del diagrama se puede ver que, para frecuencias diferentes de la frecuencia de resonancia, los valores de E_L y E_C predominan, causando errores serios en magnitud y fase.

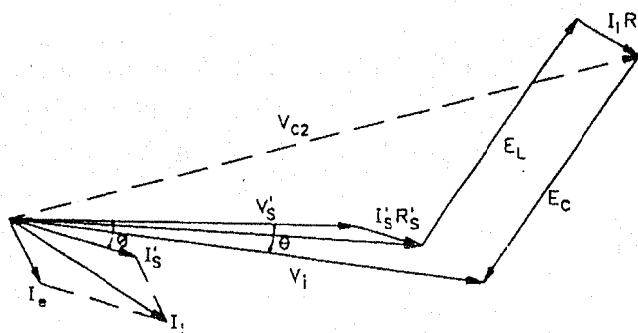


Fig. 1.5 Diagrama fasorial de un TV capacitivo

Los TV capacitivos muestran un mejor comportamiento transitorio que los TV electromagnéticos ya que las reactancias inductiva y capacitiva en serie son grandes en relación a la impedancia de carga referida a la tensión secundaria, y por lo tanto, cuando la tensión primaria colapsa, la tensión secundaria se mantiene por algunos milisegundos debido a la combinación de circuitos series y paralelos representados por L , C del transformador T .

1.5.1 COMPORTAMIENTO DEL TV CAPACITIVO EN ESTADO TRANSITORIO

En la fig. 1.6 se muestra un esquema más completo de un TV.

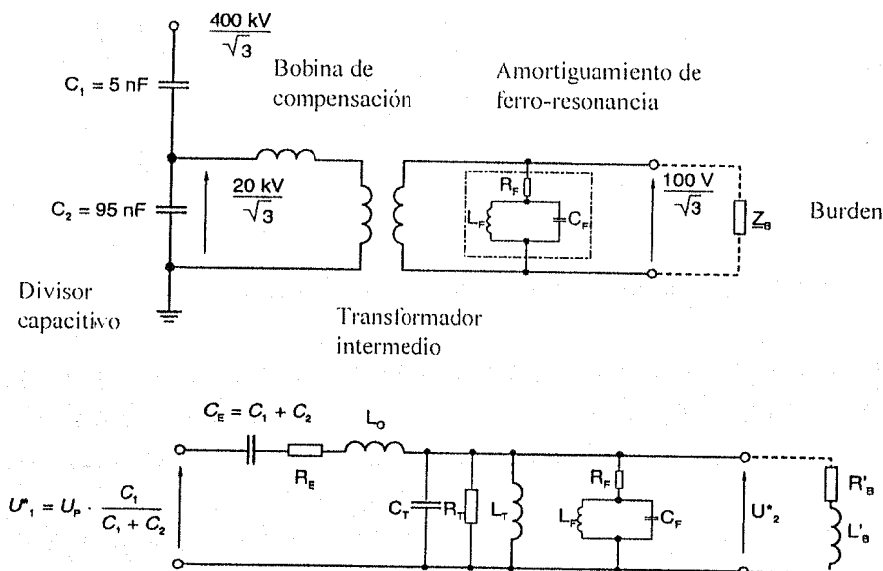


Fig. 1.6

A continuación de un colapso de tensión, aparecen distintos fenómenos dependiendo del ángulo de inserción de la falla:

a) Falla en un máximo de la tensión

En este caso, la capacidad a tierra C_T del primario del transformador intermedio se descarga, a través de la bobina de compensación L_0 , en el cortocircuito. Se presenta luego una oscilación amortiguada con una frecuencia de aprox. 500 – 2000 Hz (fig. 1.7). Se produce una oscilación similar en el caso de TV inductivo pero menos severa. Si la carga (burden) aumenta, la oscilación se amortigua correspondientemente.

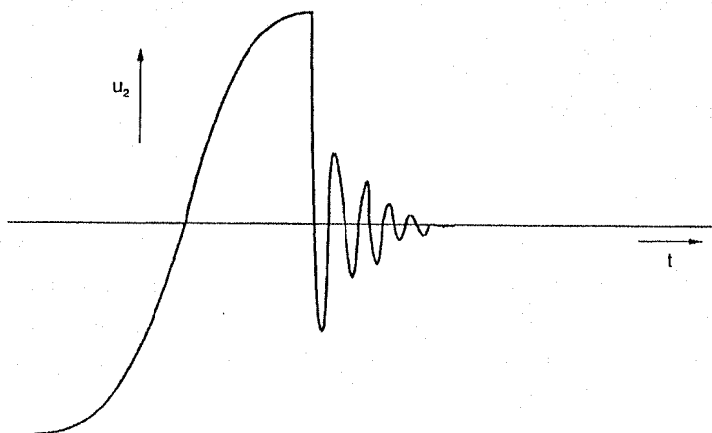


Fig. 1.7

b) Falla cuando la tensión pasa por cero

Se supone que el TV tiene conectado una carga (burden) inductiva-resistiva; este es el caso de la mayoría de los relés. En este caso las oscilaciones periódicas son amortiguadas ya que la carga inductiva L_B y la bobina de compensación L_o juntos con la capacidad C_E forman un circuito resonante (fig. 1.8). La frecuencia y amplitud son fuertemente dependientes de la carga. Se deben evitar grandes cargas con $\cos \varphi$ chico dado que generan oscilaciones débilmente amortiguadas de grandes amplitudes.

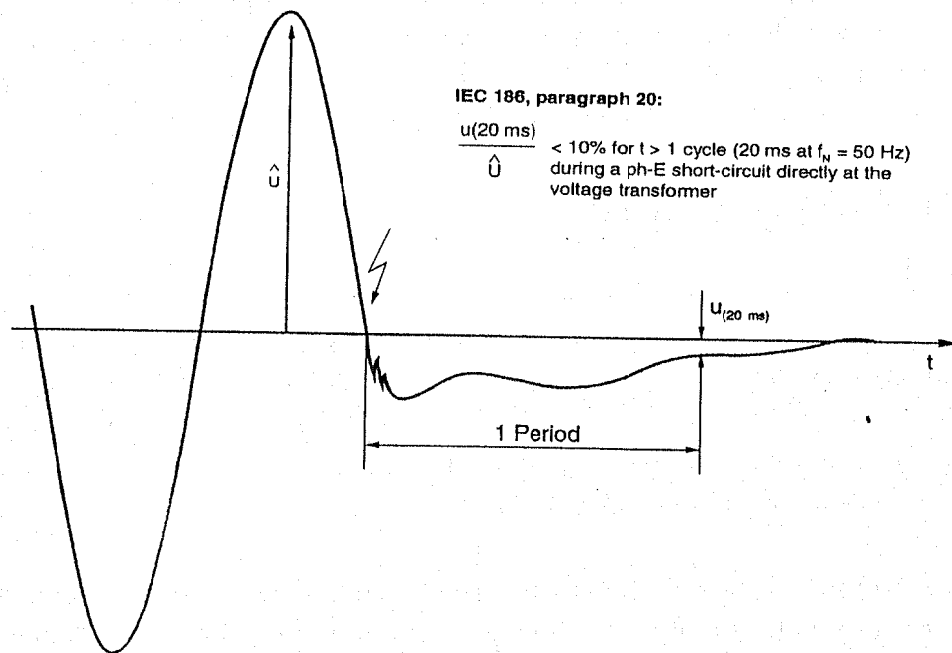


Fig. 1.8

c) Filtro de Ferro-resonancia

El filtro (LF, CF) con resistencia de acoplamiento pequeña R_F , resulta en oscilaciones transitorias, similares a las del caso anterior. Debe encontrarse luego un compromiso entre la amortiguamiento de la ferro-resonancia durante la energización y desenergización de una línea y la reducción de las oscilaciones transitorias que aparecen luego de una falla.

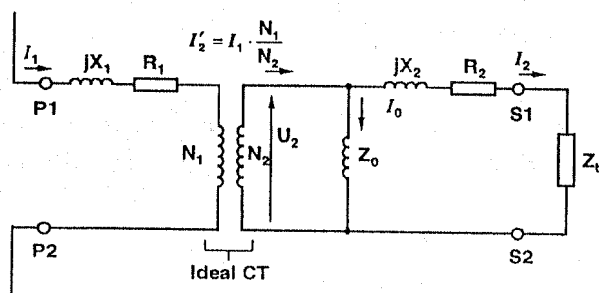
2. TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

A pesar de que la performance requerida de un transformador de corriente (TI) varía con el tipo de protección, se debe utilizar siempre TI de alta calidad; son más confiables y resultan con menos problemas de aplicación y, en general, proveen mejor protección. La calidad de los TI es muy importante para los esquemas de protección diferencial donde la operación de los relés esta directamente relacionada con la precisión de los TI bajo condiciones de falla así como bajo condiciones normales. Los TI pueden saturarse para valores altos de corrientes de falla causadas por fallas cercanas; para evitar esto, hay que tener la precaución de asegurar que, bajo las condiciones de falla más severas, el TI opere en la parte lineal de su característica de magnetización.

2.1 CIRCUITO EQUIVALENTE

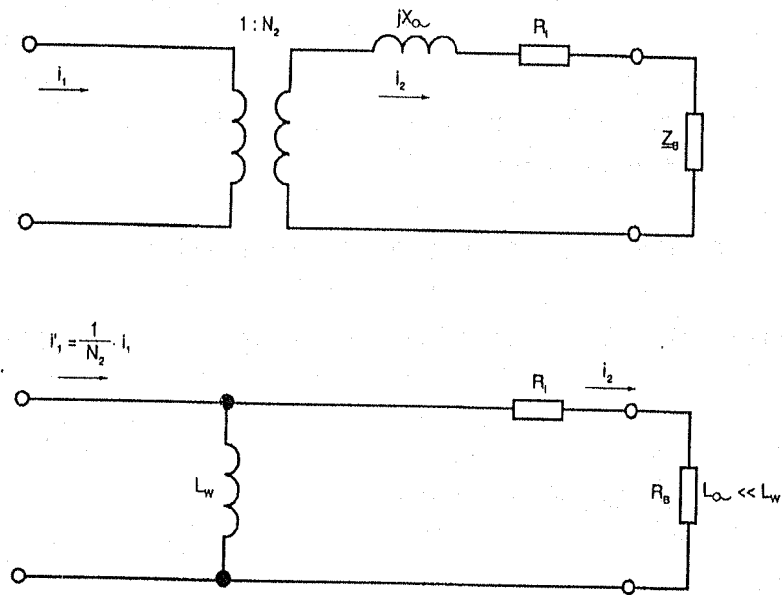
En la fig. 2.1 se muestra un circuito equivalente aproximado de un TI donde la impedancia primaria Z_1 , y la impedancia secundaria es $2L$. Z_0 representa las pérdidas y la excitación del núcleo. El circuito en la fig. 2.1a puede reducirse al circuito de la fig. 2.1b donde Z_1 se han despreciado, dado que no influye ni en la corriente I_1/n , ni en la tensión en Z_0 . Despreciando del mismo modo R_0 de la impedancia de magnetización, luego la corriente que circula por X_w es la corriente de excitación I_0 .

En la fig. 2.2 se muestra el diagrama fasorial correspondiente. Como puede verse I_0 es la principal fuente de error. Hay que notar que el efecto neto de I_0 es hacer a I_2 menor que $I_1 \cdot N_1/N_2$, que es la corriente del primario referida al secundario.



- 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

Fig. 2.1 a)



b)

Fig. 2.1 Circuitos equivalentes del transformador de corriente

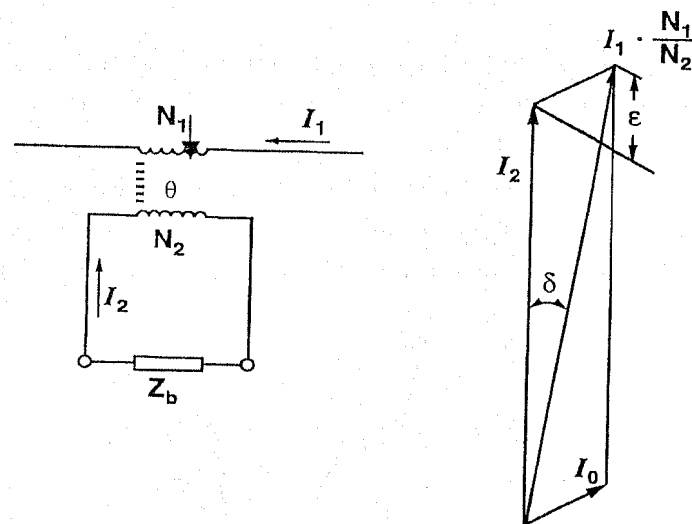


Fig. 2.2 Diagrama fasorial del circuito equivalente del TI

2.2 ERRORES

Las fuentes de errores en un TI son muy diferentes a aquellas asociadas con los TV. En efecto, la impedancia primaria de un TI no tiene la misma influencia en la precisión del equipo; solamente se suma una impedancia serie con la línea, la cual puede ser ignorada. Los errores son principalmente debidos a las corrientes que circulan por la rama de magnetización I_0 denominado error total. El error de magnitud es la diferencia entre I_1/n e I_2 ; y está compuesto luego por un error de magnitud o error de relación de transformación ϵ y un error de fase δ (ver fig. 2.2).

El error de fase es proporcional a la componente de I_0 la cual está en cuadratura con I_2 . La valores de los errores de magnitud y fase depende del desplazamiento relativo entre I_0 e I_2 . Debe notarse que una carga moderada inductiva, con I_0 e I_2 aproximadamente en fase, tiene un error de fase pequeño y la componente de excitación resulta casi enteramente en un error de magnitud.

2.3 SATURACIÓN CON CORRIENTE ALTERNA

Como se vio, los errores de un TI resultan de la corriente de excitación, tanto que para chequear si un TI está funcionando correctamente, es esencial medir o calcular la curva de excitación.

La corriente de magnetización de un TI depende de:

- la sección transversal
- largo del circuito magnético
- número de espiras de los arrollamientos
- y las características magnéticas del material.

Por ello, para un TI dado, y refiriéndose al circuito equivalente de la fig. 2.1b, se puede ver que la tensión en la impedancia de magnetización, U_2 , es directamente proporcional a la corriente del secundario. De aquí se puede concluir que, cuando la corriente primaria se incrementa y por lo tanto también la secundaria, esas corrientes alcanzan un punto donde el núcleo comienza a saturarse y la corriente de magnetización se vuelve lo suficientemente elevada como para producir un error excesivo (fig. 2.3).

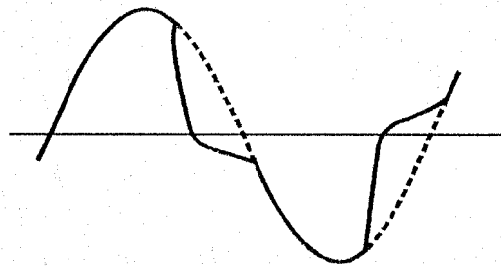
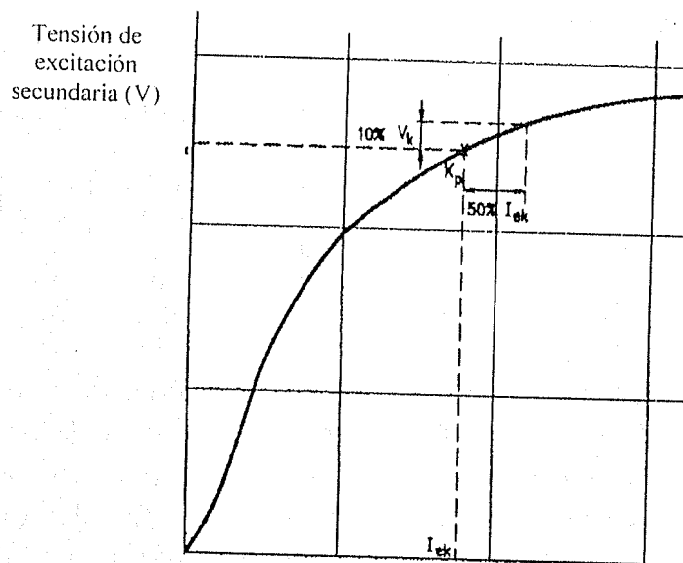


Fig. 2.3 Saturación por corriente alterna

Cuando se investiga el comportamiento de un TI, la corriente de excitación debe ser medida para múltiples valores de tensión (el llamado test de inyección del secundario). Usualmente es más conveniente aplicar una tensión variable al arrollamiento secundario dejando el arrollamiento primario abierto. La fig. 2.4a muestra la relación típica entre la tensión en el secundario y la corriente de excitación determinada de esta manera.

En las normas europeas el punto K_p de la curva 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. Este punto está referenciado en las normas ANSI/IEEE como la intersección de la curva de excitación con una línea tangente a 45°, como se indica en la fig. 2.4b. El codo según las normas europeas IEC se encuentra a una tensión mayor que el codo según las normas ANSI/IEEE.



Corriente de excitación secundaria (mA)

a)

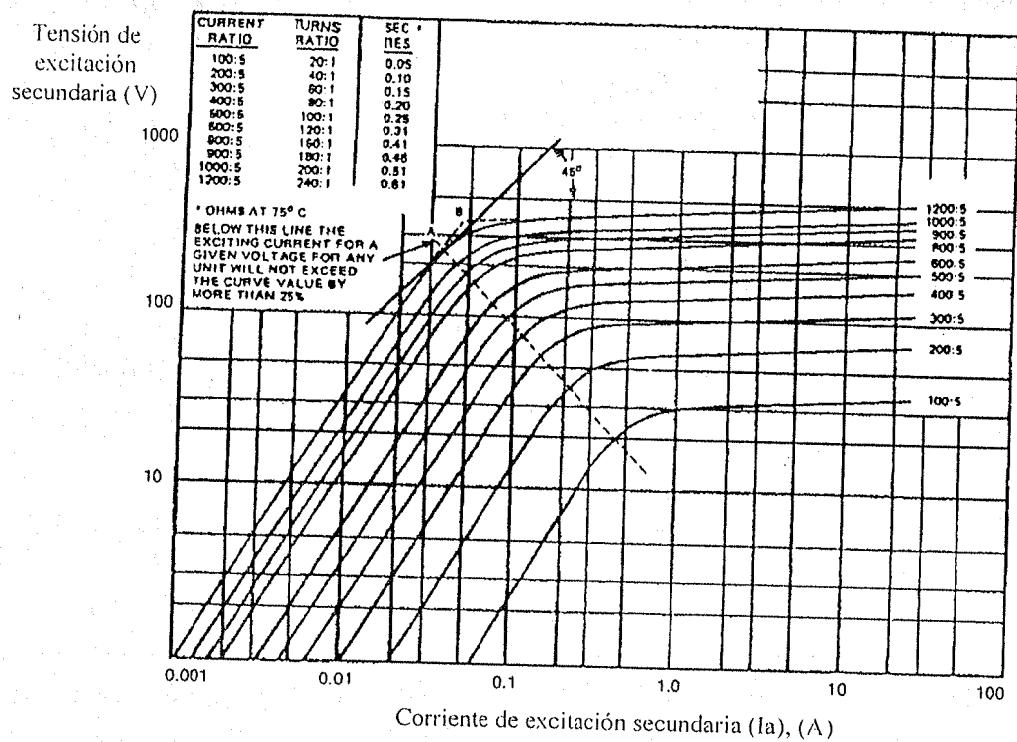


Fig. 2.4 Curvas de magnetización

2.4 CARGA DE UN TI (BURDEN)

La carga de un TI es el valor en Ohm de la impedancia en el lado secundario del mismo, debido a los relés y las conexiones entre TI y los relés. A modo de ejemplo, en la tabla 2.1 se muestran cargas estándar para TI con una corriente nominal de secundario de 5 A, basadas en la Norma ANSI C57.13.

Tabla 2.1 Cargas estándar para TI de protección con % 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

La Norma IEC 185 (1987) especifica los TI por clase de precisión seguido por una letra M o P, la cual denota si el TI es adecuado para propósitos de medición o protección respectivamente (ver punto 2.5.3). Los límites de error de fase y corriente para TI de medición y protección están indicados en la tabla 2.2a y 2.2b. 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:

$$\{(CTR \times I_2) - I_1\} \div I_1 (\%)$$

donde

I_1 : corriente primaria en A

I_2 : 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.

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							% de error de fase 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.

2.5 SELECCIÓN DE LOS TI

Cuando se selecciona un TI es importante 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; esto puede lograrse mediante la utilización de:

- Fórmulas
- Curvas de magnetización del TI
- Clases de precisión del TI

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

$$V_s = I_L(Z_L + Z_C + Z_R) \quad (1.6)$$

donde :

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

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

Z_R = 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:

$$V_s = 4.44 fANB_{\max} 10^{-8} V \quad (1.7)$$

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. Para utilizar la fórmula, V_s 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 0.31 Ω . La impedancia del relé incluyendo las conexiones es 2 Ω . 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_s , es $35000 \times 5 / 2000 = 87.5$ A, $N = 2000 / 5 = 400$ vueltas. Luego $V_s = 87.5 \times (0.31 + 2) = 202.1$ 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

Cuando se selecciona un TI es importante 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; para ello puede utilizarse la curva de magnetización del TI suministrada por los fabricantes, en las cuales brindan el valor eficaz de la corriente obtenida aplicando el valor eficaz de una tensión del lado secundario con el arrollamiento primario a circuito abierto, o sea la corriente de excitación requerida para obtener un valor específico de tensión en el secundario. El método consiste en producir una curva que muestre la relación entre las corrientes primarias y secundaria para un tap y condiciones de carga específicas como se muestra en la fig. 2.5.

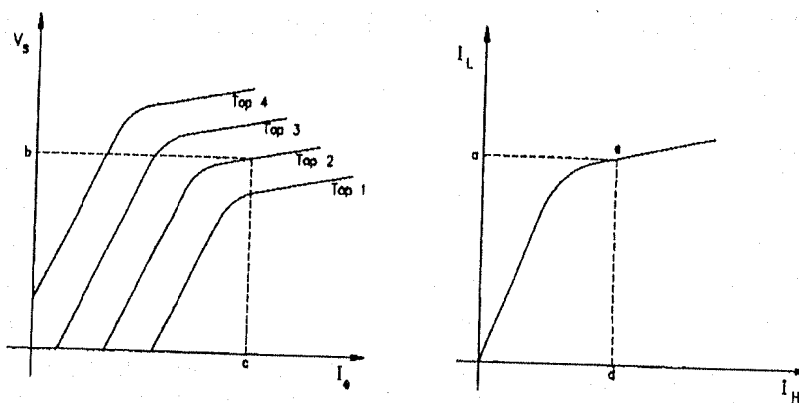


Fig. 2.5 Utilización de la curva de magnetización

Partiendo de cualquier valor de corriente secundaria, y con la ayuda de las curvas de magnetización, se determina el valor correspondiente de corriente primaria. El proceso se resume en los siguientes pasos:

- a) Asumir un valor de I_L , que puede ser el correspondiente a la máxima corriente de falla.
- b) Calcular V_s de acuerdo a la fórmula:

$$V_s = I_L * (Z_B + Z_C + Z_L) \quad (1.8)$$

donde:

Z_B : impedancia de carga del TI

Z_L : impedancia del arrollamiento secundario

Z_C : impedancia de los alambres de conexión

- c) Con V_s , encontrar el valor asociado de la corriente de magnetización I_e
- d) Calcular I_H/n ($= I_L + I_e$) y multiplicar este valor por n para referirlo al lado primario del TI.
- e) Esto provee un punto de una curva I_L vs. I_H , y el proceso se repite para obtener otros puntos; luego se obtendrá la curva completa.

Este método incurre en un error al calcular I_H/n sumando I_e e I_L 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.

Luego de la construcción debe chequearse la curva para confirmar si la corriente de falla primaria máxima no entra en la zona de saturación; si no, será necesario repetir el proceso cambiando el tap del TI hasta que se trabaje en la zona lineal de la característica.

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

NORMA ANSI C57.13

La clase de precisión, según Norma ANSI C57.13, se describe por dos símbolos: una letra y una tensión nominal; ellas definen la capacidad del TI. C indica que la relación de transformación se puede calcular y I indica que la relación de transformación debe ser determinada por medio de tests. La clasificación C incluye aquellos TI's con arrollamientos uniformemente distribuidos y TI's con un flujo de dispersión que tiene un efecto despreciable en la relación, dentro de límites definidos. La clasificación I incluye aquellos TI's con flujo de dispersión con efectos considerables en la relación de transformación.

Ejemplo: Suponiendo un TI clase C-100, luego: significa que se puede calcular la relación, y el error no debería 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.

Las clases de precisión son solamente aplicables para arrollamientos completos. Cuando se consideran arrollamientos con taps, cada tap tendrá una capacidad de tensión proporcionalmente menor, y en consecuencia se puede solamente alimentar una porción de la carga sin exceder el error límite del 10%. La carga permisible es definida como:

$$ZB = (N_p \cdot V_c) / 100$$

Donde:

ZB: es la carga permisible para un tap dado del TI,

N_p : es la fracción del número total de espiras utilizadas y

V_c : es la capacidad de tensión ANSI para el TI completo.

Ejemplo: La corriente máxima de falla en un circuito es 12000 A. La relación nominal del TI es 1200/5 y el mismo será utilizado con un tap de 800/5. La clase del TI es C-200, la resistencia del secundario es 0.2Ω , la carga total del secundario es de 2.4Ω y el factor de potencia es 0.6. Determinar si, ante la ocurrencia de una falla, el error excederá el 10%.

Solución:

La resistencia del arrollamiento secundario del TI puede ser ignorada dado que, por definición, la clase C-200 indica que el TI podría resistir 200 V más la caída producida por la resistencia del secundario con un rango de corriente igual a 20 veces el valor nominal, y con un factor de potencia de carga tan bajo como 0.5. Luego las caídas de tensión en el secundario pueden ignorarse solo si la corriente no excede 100 A. Para el ejemplo dado, $I_L = 12000 \times (5/800) = 75 \text{ A}$.

La carga permisible está dada por:

$$Z_B = (N_p V_c) \div 100$$

$$N_p = 800 / 1200 = 0.667$$

de tal forma que:

$$Z_B = (0.667 \times 200V) \div 100A = 1.334\Omega$$

Dado que la carga del circuito, 2.4Ω , es mayor que el máximo permisible (1.33Ω), luego el error podría exceder el 10% ante la ocurrencia de una falla de 12000 A, lo cual resultaría en una corriente secundaria máxima de 75 A. Consecuentemente, es necesario reducir la carga, incrementar el tap de corriente del transformador o utilizar otro TI de mayor clase.

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

Por ej., 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 (valor muy común) luego para una corriente de 50 A en el secundario el máximo error garantizado será del 5%; en la fig. 2.6 se muestran ejemplos para 5P5, 10P5, 5P10 y 10P10.

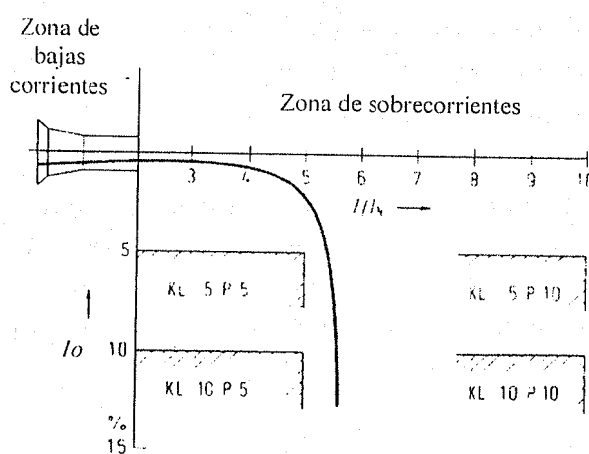


Fig. 2.6 Error total I_o porcentual

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 se ha discutido el comportamiento del TI en términos de estado estacionario, sin considerar la componente transitoria de corriente continua de la corriente de falla. Esta tiene una influencia mayor en la producción de una severa saturación comparada con la saturación por componente alterna vista.

La fig. 2.7 muestra un ejemplo de distorsión y reducción en la corriente secundaria que puede originarse por la saturación por componente continua. 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

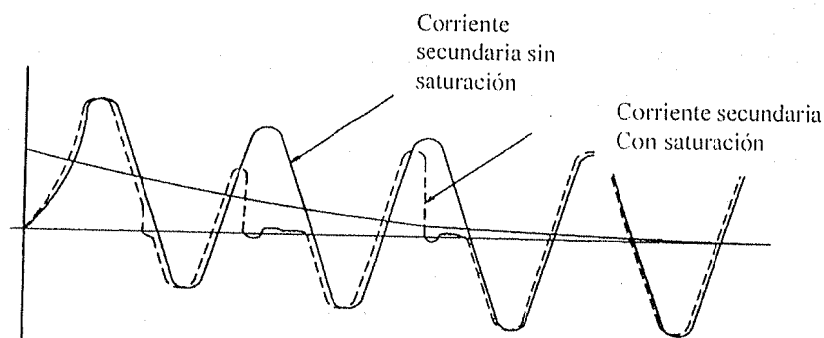


Fig. 2.7 Efecto de la saturación por componente continua en la corriente de secundario

La saturación por componente continua es particularmente significativa en esquemas de protección complejos dado que, en caso de fallas externas, circulan corrientes de falla elevadas por el TI (caso de la protección diferencial de barras). Si se presenta saturación en diferentes TI asociados a una determinada configuración de relés, esto podría resultar en la circulación de corrientes de desbalance en el secundario que podría causar la actuación inesperada del sistema de protección.

2.6.1 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TRANSITORIO

Teniendo en cuenta el circuito equivalente de un TI de la fig. 2.1b, la densidad de flujo del mismo es proporcional a la integral de la tensión en el secundario aplicada en la rama L_w :

$B \propto \int u_2(t) dt = (R_i + R_B) * \int i_2(t) dt$, y por lo tanto, proporcional al área debajo de la curva de la corriente de cortocircuito. La componente directa DC en la corriente de cortocircuito resulta en el incremento transitorio de la magnetización de un solo lado, hasta un múltiplo de la componente alterna, correspondiente de la constante de tiempo de la red bajo falla T_N . (fig. 2.8)

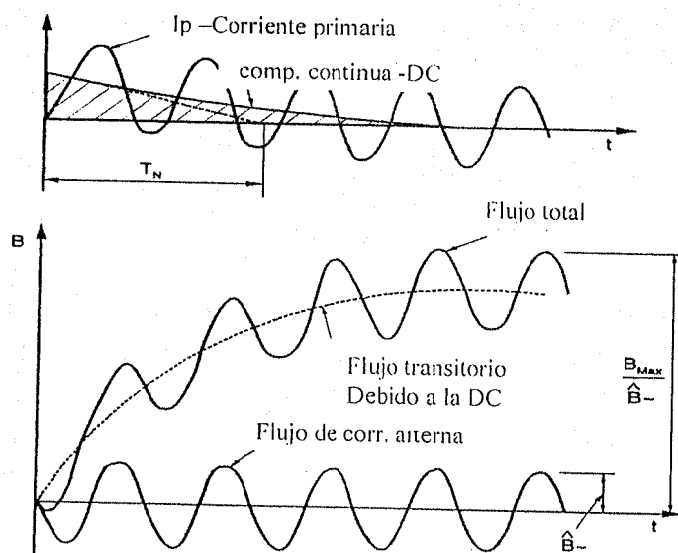


Fig. 2.8 Trayectoria temporal del flujo de un TI debido a corrientes de falla con DC

Para permitir esto, el TI debe tener dimensiones mayores. La trayectoria de la densidad de flujo se puede calcular con la ec.:

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

ec. (1.9)

el máximo valor:

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

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_N es la constante de tiempo de la red (constante de tiempo de la componente continua DC). T_s es la constante de tiempo del lado secundario. Está determinada por la inductancia principal del TI L_w y la suma de las resistencias del circuito 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. Esto ocurre normalmente cuando el núcleo del TI tiene incorporados entrehierros de aire. Las ecuaciones siguiente son válidas para 50 hz (60Hz):

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

ec. (1.13)

Debe notarse que el ángulo de error que aparece en la planilla de datos es válido si la carga conectada es igual a la nominal. Si la carga es menor, el ángulo de error se reduce y la constante de tiempo se incrementa. 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. En este momento el flujo es máximo, teniendo en cuenta además que luego de una apertura rápida, el TI puede estar todavía con una magnetización alta debido a la componente continua 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):

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

ec. 1.14

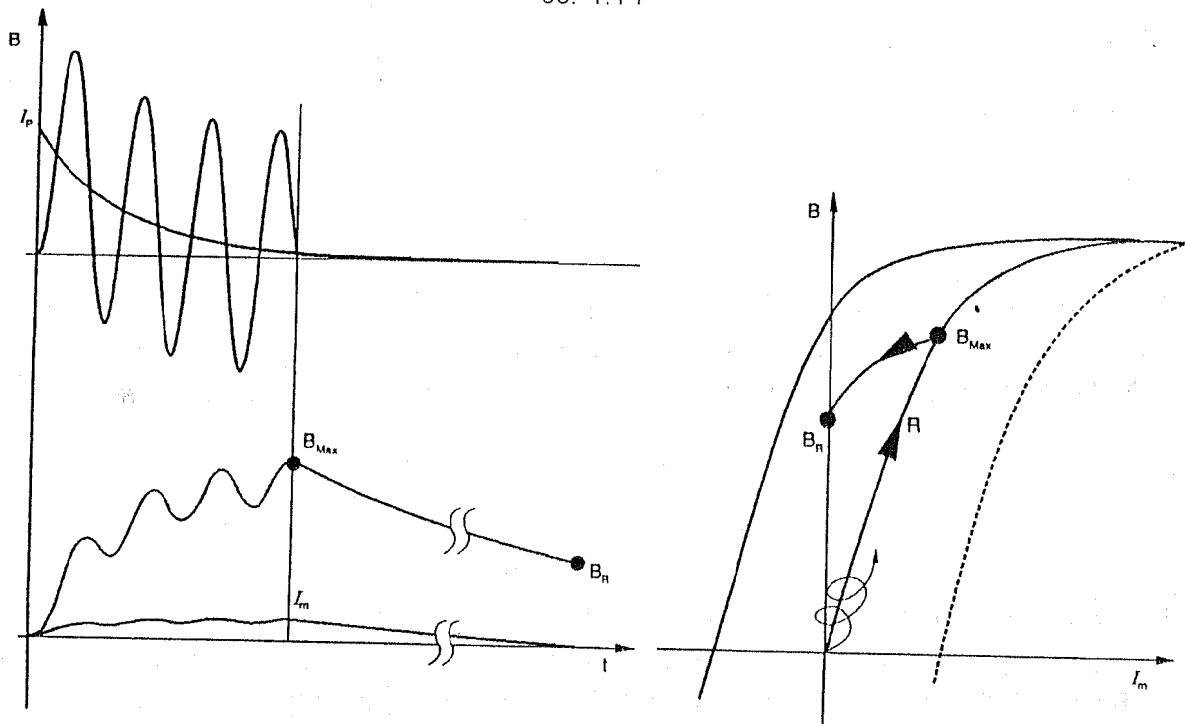
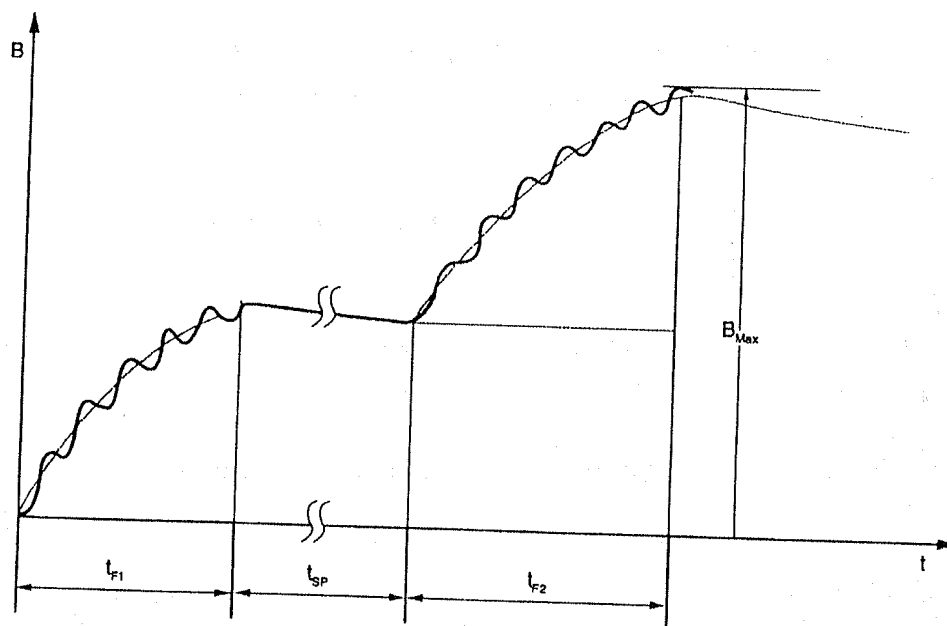


Fig. 2.9 Magnetización y desmagnetización de un TI

El flujo remanente se alcanza luego de aprox. $t = 3 \cdot Ts$. Si el circuito es conectado 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

Un ejemplo típico de recierre rápido en falla es el ciclo de autorecierre automático (ARC) no exitoso. En la fig. 2.10 se muestra la trayectoria del flujo para un ciclo completo de falla.



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:

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

ec. 1.15

2.6.4 CLASES DE TRANSFORMADORES TP

Los requerimientos de performance de los TI durante el transitorio con componentes continuas en la corriente de falla (Transient Performance Requirements) se definen en la Norma IEC 44-6. 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.

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. La consecuencia de esto es que ante un ARC no exitoso con el cierre del interruptor en el momento más inoportuno el flujo será aprox. el doble.

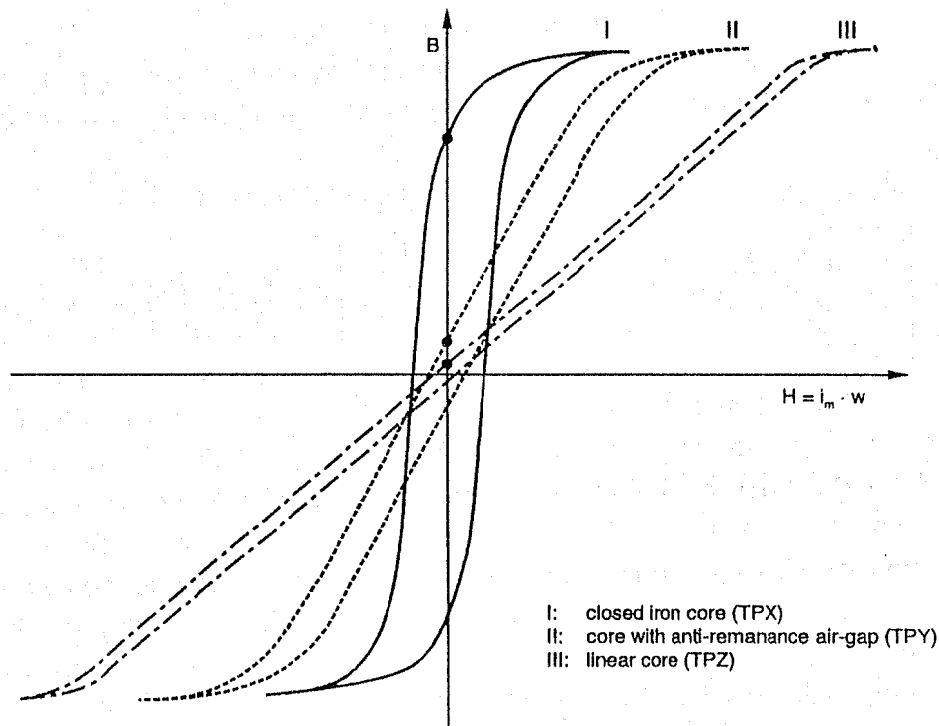
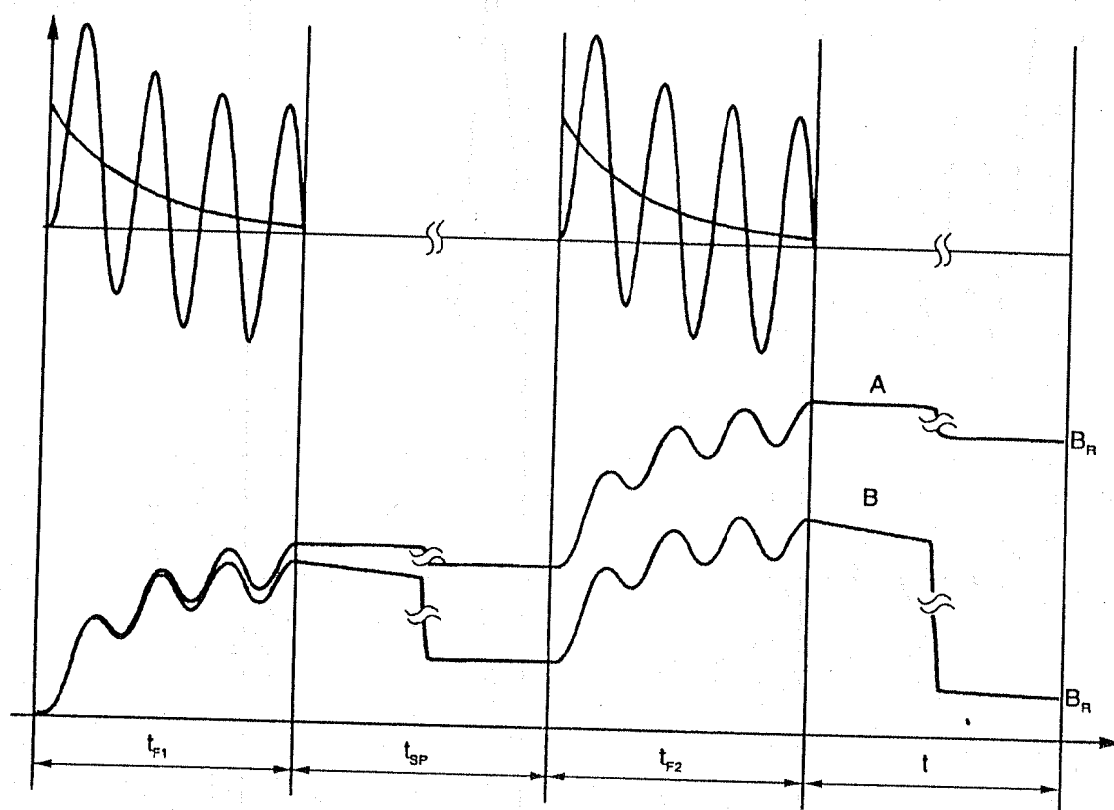


Fig. 2.11

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. Al mismo tiempo, se reduce el tiempo necesario para la desmagnetización al orden de segundo o menos. Sin embargo, la constante de tiempo del secundario puede no reducirse en el mismo orden, por lo tanto, tiempos de 200 ms a 300 ms serán el límite inferior. De acuerdo a esto, El 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-remnant air-gap (TPY)

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

Con grandes entrehierros de aire (núcleos linealizados de acuerdo a la clase TPZ), la componente DC es cortocircuitada dramáticamente durante el proceso de transformación, de tal forma que resulta un incremento substancialmente reducido del flujo desde el comienzo. En este caso, 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).

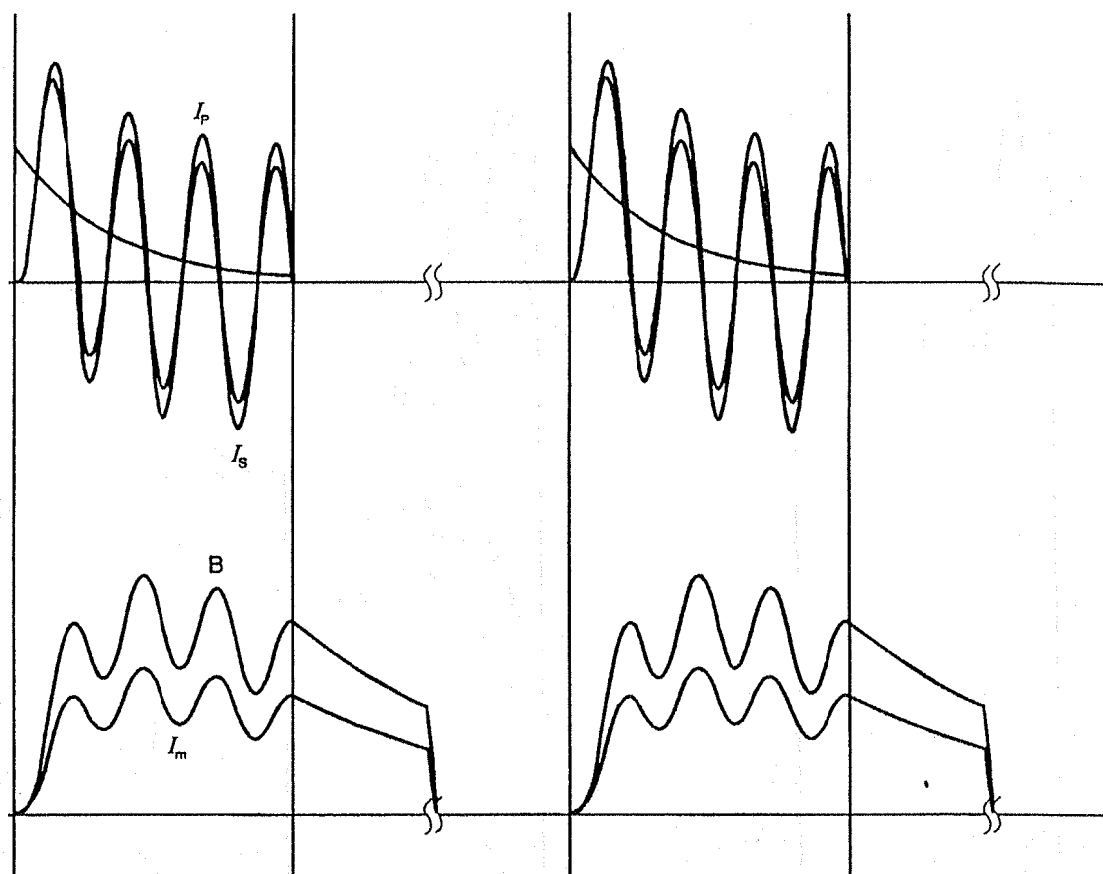


Fig. 2.13 Trayectoria del flujo en un TI clase TPZ con núcleo lineal para un ciclo ARC no exitoso.

2.7 PRECAUCIONES CUANDO SE TRABAJA CON LOS TI

Trabajar con TI con circuitos de red energizada puede ser extremadamente peligroso. En particular, abrir el circuito secundario podría dar origen a sobretensiones peligrosas que pueden afectar al personal o dañar equipamiento, dado que los TI están diseñados para ser utilizados en circuitos de potencia con una impedancia mucho mayor que la propia. Como consecuencia, cuando los circuitos secundarios permanecen abiertos, 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. Por ello, los secundarios deben permanecer siempre en la condición cerrado o cortocircuitados. Para ilustrar esto, se muestra un ejemplo utilizando los datos típicos de un TI y un alimentador de 13.2kV.

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.

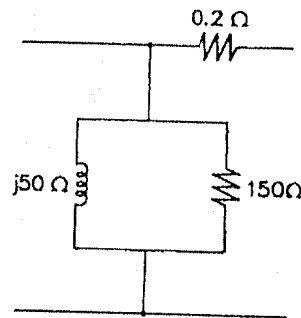


Fig. 11 Circuito equivalente del TI, referido al lado secundario

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:

$$V = \frac{13200}{3} * \frac{500}{5} = 76210236 \text{ V}$$

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

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

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

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:

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

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

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

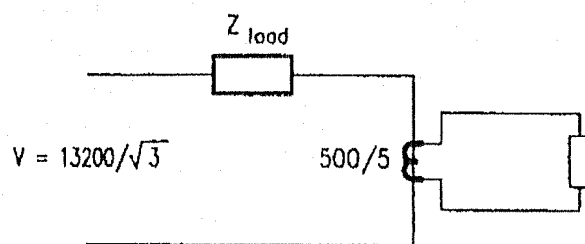


Fig. 12 Diagrama unifilar

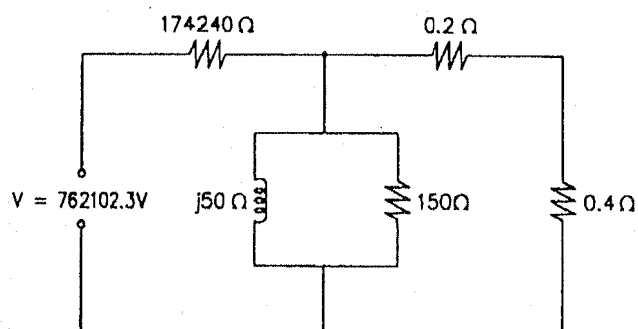


Fig. 13 Circuito equivalente

TEMAS IV:

PROTECCIÓN DE GENERADORES