

Este documento está sometido a posibles cambios.
Póngase en contacto con ARTECHE para la
confirmación de las características y disponibilidades
aquí descritas.

Jaime Berrostequieta / Ángel Enzunza
© ARTECHE



Moving together

ÍNDICE

1. Transformadores de medida | 4
 - 1.1. Definiciones | 4
 - 1.2. Objetivos básicos | 4
 - 1.3. Generalidades sobre los transformadores de intensidad | 5
 - 1.4. Generalidades sobre los transformadores de tensión | 6
2. Teoría del transformadores de medida | 7
 - 2.1. Fundamentos | 7
 - 2.2. Transformador equivalente | 8
 - 2.3. Esquema equivalente del transformador | 8
3. El transformador de intensidad | 9
 - 3.1. Ecuaciones generales | 9
 - 3.2. Diagrama vectorial | 9
 - 3.3. Errores de intensidad y de fase | 10
 - 3.4. Transformadores de intensidad para medida | 12
 - 3.5. Transformadores de intensidad para protección | 14
 - 3.6. Transformadores de intensidad para protección en los que es esencial la respuesta en régimen transitorio | 16
 - 3.7. Carga | 18
 - 3.8. Resistencia a los cortocircuitos | 19
 - 3.9. Funcionamiento del Transformador de Intensidad a circuito abierto | 20
 - 3.10. Transformadores de intensidad de realización especial | 20
 - 3.11. Elección del transformador de intensidad | 21
4. El transformador de tensión | 22
 - 4.1. Ecuaciones generales | 22
 - 4.2. Diagrama vectorial | 22
 - 4.3. Errores de tensión y fase | 23
 - 4.4. Transformadores de tensión para medida | 24
 - 4.5. Transformadores de tensión para protección | 24
 - 4.6. Carga | 25
 - 4.7. Transformadores de tensión de realización especial | 26
 - 4.8. Transformadores de tensión para descarga de líneas | 27
 - 4.9. Sobretensiones | 28
 - 4.10. Funcionamiento del TT con el secundario en cortocircuito | 30
 - 4.11. Elección del transformador de tensión | 30
5. Otros transformadores de medida | 31
 - 5.1. Transformadores combinados de medida | 31
 - 5.2. Transformadores de tensión capacitivos (TTC) | 32
6. El aislamiento dieléctrico | 33
 - 6.1. Aislamiento en transformadores de medida | 33
 - 6.2. Ensayos de control de aislamiento | 34
7. Normas | 35
 - 7.1. Normas consultadas | 35
 - 7.2. Niveles de aislamiento | 35
 - 7.3. Condiciones ambientales | 35
 - 7.4. Transformadores de intensidad | 36
 - 7.5. Transformadores de tensión | 43

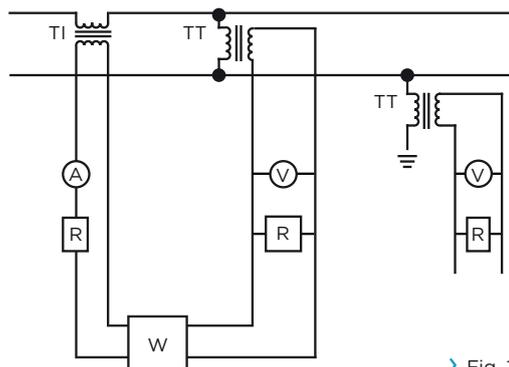
1. INTRODUCCIÓN A LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

1.1. DEFINICIONES

Transformadores de medida TM son los transformadores destinados a alimentar instrumentos de medida, contadores, relés y otros aparatos análogos.

Hay dos clases de transformadores de medida:

- › Transformadores de intensidad, en los cuales la intensidad secundaria es, en las condiciones normales de uso, prácticamente proporcional a la intensidad primaria y desfasada con relación a la misma un ángulo próximo a cero, para un sentido apropiado de las conexiones.
- › Transformadores de tensión, en los cuales la tensión secundaria es, en las condiciones normales de uso, prácticamente proporcional a la tensión primaria y desfasada con relación a la misma un ángulo próximo a cero, para un sentido apropiado de las conexiones.



› Fig. 1.1

1.2. OBJETIVOS BÁSICOS

La función de los transformadores de medida, es reducir a valores no peligrosos y normalizados, las características de tensión e intensidad de una red eléctrica.

De esta manera, se evita la conexión directa entre los instrumentos y los circuitos de alta tensión, que sería peligroso para los operarios y requeriría cuadros de instrumentos con aislamiento especial. También se evita utilizar instrumentos especiales y caros, cuando se quieren medir corrientes intensas.

En la figura 1.1 vemos un esquema sencillo en el que aparecen un transformador de intensidad TI y dos transformadores de tensión TT, uno de los cuales está conectado entre fases, y el otro entre fase y tierra.

1. INTRODUCCIÓN A LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

1.3. GENERALIDADES SOBRE LOS TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD

El primario de un transformador de intensidad consta de una o varias espiras, que se conectan en serie, con el circuito cuya intensidad se desea medir. El secundario alimenta los circuitos de intensidad de uno o varios aparatos de medida, conectados en serie.

El arrollamiento primario puede tener una, dos, o cuatro secciones, permitiendo una, dos o tres intensidades primarias nominales, mediante el adecuado acoplamiento de las mismas.

Puede haber también, uno o varios arrollamientos secundarios, bobinados cada uno sobre su circuito magnético. De esta manera no existe influencia de un secundario sobre el otro. En la fig. 1.2 vemos un T.I. con dos secundarios independientes. El núcleo de los T.I., normalmente, es de forma toroidal con el secundario uniformemente repartido, para reducir al mínimo el flujo de dispersión.

El primario consta de una o varias espiras que se conectan en serie con la línea. También existen T.I. en los que no está incorporado el primario. En este caso, el aislamiento principal puede estar en el primario (cables, pasamuros, etc.) o en el propio transformador.

En la fig. 1.3, vemos diversos tipos de T.I.

$$K_n = 100/5/5$$

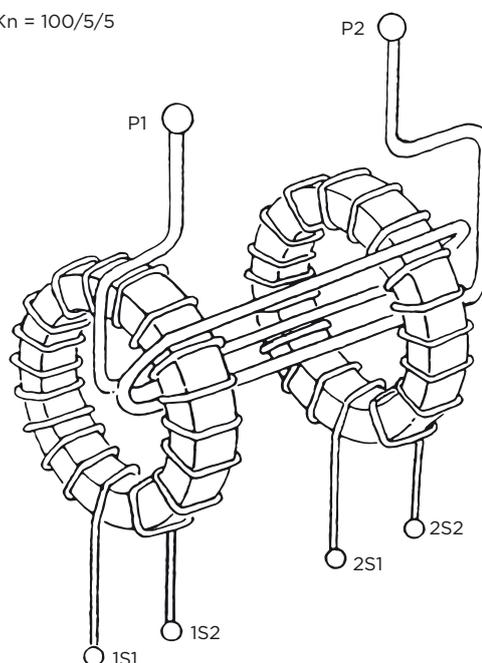
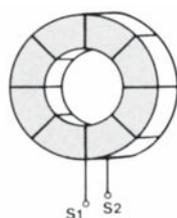
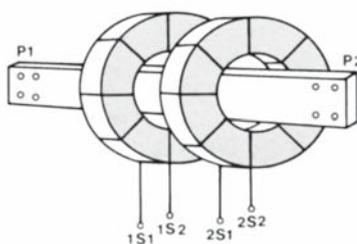


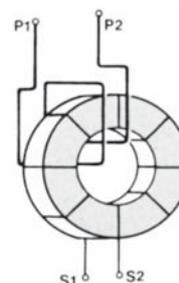
Fig. 1.2



T.I. sin primario incorporado



T.I. con una espira primaria



T.I. con varias espiras primarias

Fig. 1.3

1.4. GENERALIDADES SOBRE LOS TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

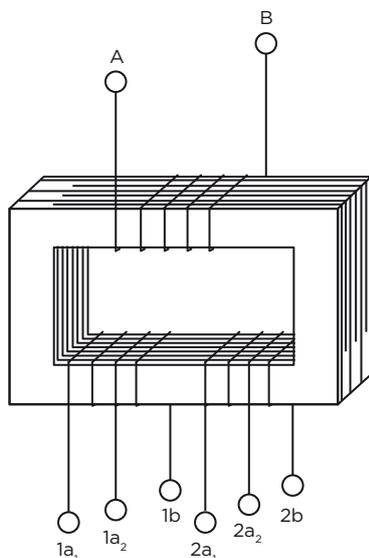
El primario de un transformador de tensión, se conecta a los bornes, entre los cuales se desea medir la tensión y el secundario se conecta a los circuitos de tensión de uno o varios aparatos de medida conectados en paralelo.

El transformador de tensión difiere menos de transformador de potencia, que el transformador de intensidad.

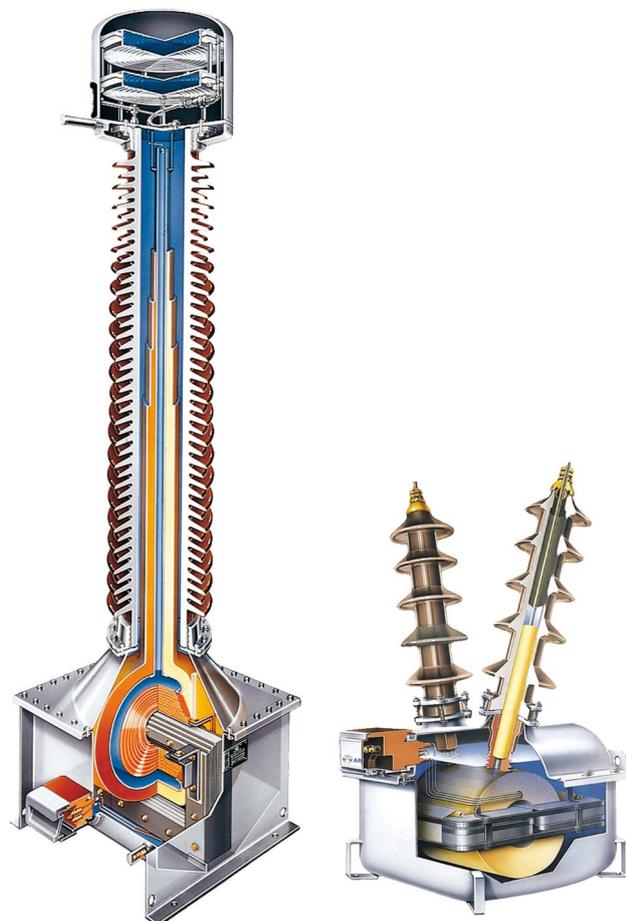
Por razones constructivas y de aislamiento, los T.T. se fabrican normalmente con núcleo rectangular y los secundarios (si hay más de uno) se bobinan sobre el mismo núcleo. No existe por lo tanto independencia entre ellos, a diferencia de lo que ocurre en los T.I., y la carga de un secundario influye en la precisión del otro.

En la fig. 1.4 vemos un transformador de tensión con dos secundarios y toma en cada uno de ellos. Los T.T. pueden estar destinados a medir la tensión entre fases o entre fase y tierra. En este caso, uno de los terminales primarios está conectado a tierra, interna o externamente al transformador.

En la fig. 1.5 vemos los dos tipos de T.T. A partir de cierta tensión (unos 72,5 kV) todos los T.T. son del tipo fase-tierra.



› Fig. 1.4



› Fig. 1.5

2. TEORÍA DEL TRANSFORMADOR DE MEDIDA

2.1. FUNDAMENTOS

Un transformador se compone de dos arrollamientos bobinados sobre un núcleo magnético. El primario es alimentado por la tensión U_p absorbiendo la intensidad i_p . El secundario suministra a la carga exterior la intensidad i_s con una tensión u_s . (Ver fig. 2.1).

Si los bornes secundarios están libres, el primario actúa como una autoinducción, sobre núcleo de hierro, absorbiendo la corriente de excitación i_{po} , que consta de una componente magnetizante i_{pm} , y de una componente de pérdidas en la chapa i_{pw} .

Si todo el flujo ϕ , creado por el primario, es recogido por el secundario, podemos establecer:

$$e_p = N_p \frac{d\phi}{dt} \quad e_s = N_s \frac{d\phi}{dt}$$

Aplicando la ley de Ohm, y despreciando la resistencia del bobinado primario, resulta:

$$\left. \begin{aligned} u_p - e_p = 0; \quad u_p = e_p = N_p \frac{d\phi}{dt} \\ u_s - e_s = 0; \quad u_s = e_s = N_s \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \right\} \frac{u_p}{u_s} = \frac{e_p}{e_s} = \frac{N_p}{N_s} = K$$

siendo K, la relación de transformación.

Al conectar una carga a los bornes secundarios, aparece la corriente secundaria i_s , que origina un flujo en oposición al creado por i_p . Para mantener constante u_p , la intensidad primaria aumenta de valor, cumpliéndose:

$$\frac{N_p i_p - N_s i_s}{R} = \phi$$

y por lo tanto como $F = \phi \cdot R = N_p \cdot i_{po}$, queda $N_p \cdot i_p = N_s \cdot i_s + N_p \cdot i_{po}$

En un transformador perfecto, $N_p \cdot i_{po}$ es despreciable, y por tanto,

$$N_p i_p = N_s i_s \quad \frac{i_p}{i_s} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{1}{K}$$

Si la carga el secundario es Z_s , se cumple:

$$i_s = \frac{u_s}{Z_s}, \text{ y por lo tanto: } i_p = \frac{i_s}{K} = \frac{u_s}{KZ_s} = \frac{u_p}{K^2Z_s}$$

donde vemos que el efecto es similar a colocar una carga K^2Z_s en el primario. En el transformador real, debemos tener en cuenta, además de la intensidad de excitación i_{po} , las resistencias R_p y R_s de los arrollamientos, y los flujos de fuga ϕ_p y ϕ_s , según vemos en la fig. 2.2.

Teniendo en cuenta que $N \cdot \phi = i \cdot \mathcal{L}$; las ecuaciones generales del transformador son:

$$U_p = N_p \frac{d\phi}{dt} + R_p i_p + \mathcal{E}_p = \frac{di_p}{dt}$$

$$U_s = N_s \frac{d\phi}{dt} + R_s i_s + \mathcal{E}_s = \frac{di_s}{dt}$$

$$N_p i_p = N_s i_s + N_p i_{po}$$

[2.1]

Y para magnitudes senoidales:

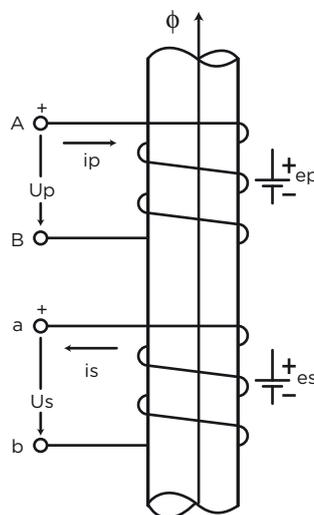
$$\bar{U}_p = N_p \bar{E} + R_p \bar{I}_p + jX_p \bar{I}_p$$

$$\bar{U}_s = N_s \bar{E} + R_s \bar{I}_s + jX_s \bar{I}_s$$

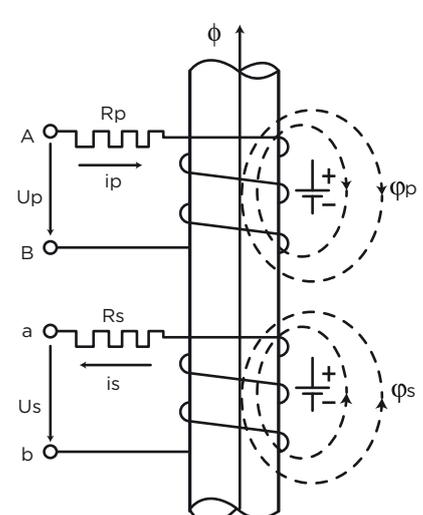
$$N_p \bar{I}_p = N_s \bar{I}_s + N_p \bar{I}_{po}$$

[2.2]

Donde E es la fuerza electromotriz inducida en una espira.



> Fig. 2.1



> Fig. 2.2

2.2. TRANSFORMADOR EQUIVALENTE

Para el estudio de los transformadores de medida, resulta interesante referirse al secundario, cuyos valores nominales varían poco en general.

Veamos la forma de reflejar en el secundario las magnitudes primarias.

De [2.2]:

$$N_p \bar{I}_p = N_s \bar{I}_s + N_p \bar{I}_{po}$$

dividiendo por N_s :

$$\frac{N_p}{N_s} \bar{I}_p = \bar{I}_s + \frac{N_p}{N_s} \bar{I}_{po}; K \bar{I}_p = \bar{I}_s + K \bar{I}_{po}$$

donde $K \bar{I}_{po}$ es la intensidad de excitación que absorbe el transformador, si se aplica al secundario la tensión U_p / K .

En adelante, llamaremos \bar{I}_o a $K \bar{I}_{po}$.

Por tanto, $K \bar{I}_p = \bar{I}_s + \bar{I}_o$

Del mismo modo, de las ecuaciones [2.2]:

$$\frac{\bar{U}_p}{K} = \frac{N_p \bar{E}}{K} + \frac{R_p \bar{I}_p}{K} + j \frac{X_p \bar{I}_p}{K}, \text{ de donde:}$$

$$\frac{\bar{U}_p}{K} N_s = \bar{E} + \frac{R_p}{K^2} (\bar{I}_s + \bar{I}_o) + j \frac{X_p}{K^2} (\bar{I}_s + \bar{I}_o)$$

Vemos que R_p/K^2 y X_p/K^2 son la resistencia y la reactancia del primario vistas desde el secundario. Por tanto, haciendo:

$$\frac{\bar{U}_p}{K} = \bar{U}'_p; \bar{I}_p K = \bar{I}'_p; \frac{R_p}{K^2} = R'_p \text{ y } \frac{X_p}{K^2} = X'_p$$

las ecuaciones [2.2] se transforman en:

$$\bar{U}'_p = N_s \bar{E} + (R'_p + jX'_p) \bar{I}'_p$$

$$\bar{U}_s = N_s \bar{E} - (R_s + jX_s) \bar{I}_s$$

$$\bar{I}'_p = \bar{I}_s + \bar{I}_o$$

[2.3]

2.3. ESQUEMA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR

A partir de las ecuaciones [2.3] podemos obtener el esquema equivalente del transformador, que aparece en la fig. 2.3.

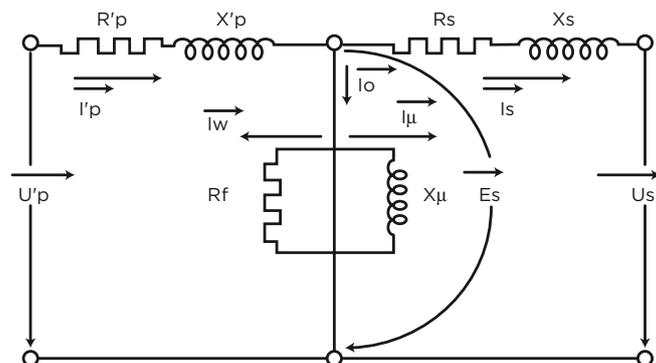


Fig. 2.3

3. EL TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

3.1. ECUACIONES GENERALES

De la fig. 2.3, al colocar la carga exterior, Z, obtenemos la fig. 3.1. Teniendo en cuenta las ecuaciones [2.3] podemos escribir:

$$\vec{E}_s = \vec{U}_s + \vec{Z}_s \vec{I}_s$$

$$\vec{I}'_s = \vec{I}_s + \vec{I}_o$$

siendo $\vec{E}_s = N_s \vec{E}$, y como

$$\vec{U}_s = Z \vec{I}_s \text{ resulta: } \vec{E}_s = (Z + Z_s) \vec{I}_s = Z_t \vec{I}_s$$

Recordando la fórmula de Boucherot:

$$\vec{E}_{\text{eff}} = 2,22 \frac{f}{50} N \vec{B}_{\text{max}} S \cdot 10^{-6} \text{ voltios}$$

válida para corrientes senoidales, si hacemos $f = 50 \text{ Hz}$, resulta: $\vec{E} = 2,22 N \vec{B}_{\text{max}} S \times 10^{-6}$

siendo: \vec{E} = tensión en voltios
 S = sección neta en cm^2
 B_{max} = inducción en Gauss
 N = número de espiras

Por tanto, la inducción necesaria, en el núcleo del transformador de intensidad, para alimentar la carga exterior Z es:

$$\vec{B} = \frac{(Z + Z_s) \vec{I}_s}{2,22 N_s S} \times 10^6 \text{ Gauss}$$

de donde obtenemos las conclusiones:

- Si la impedancia permanece fija, la inducción es proporcional a la intensidad secundaria.
- Si la intensidad secundaria permanece fija, la inducción es proporcional a la carga secundaria total.

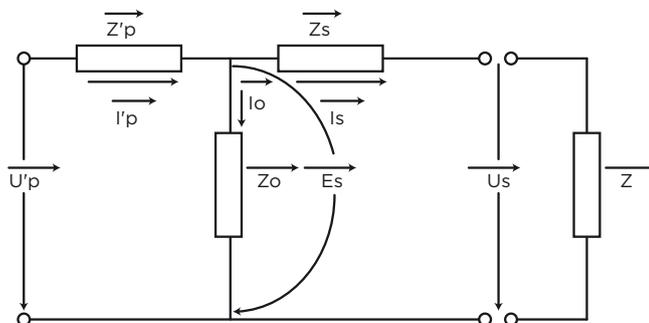
3.2. DIAGRAMA VECTORIAL

A partir de I_s , y teniendo en cuenta las ecuaciones [2.3] obtenemos el diagrama vectorial del transformador de intensidad. Para obtener I_o , debemos usar las curvas de magnetización de la chapa utilizada para el núcleo, hallando H_μ y H_w a partir de B. (Fig. 3.2).

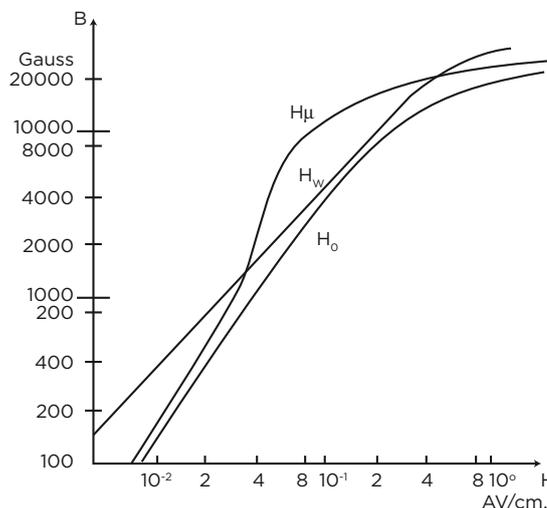
Así tenemos:

$$I_\mu = \frac{H_\mu L}{N_s} \quad I_w = \frac{H_w L}{N_s}$$

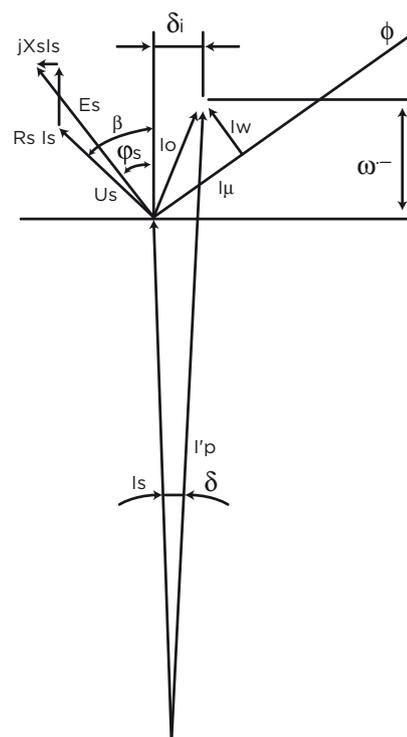
siendo L la longitud del circuito magnético. Finalmente, en la fig. 3.3 se indica el diagrama vectorial del T.I.



➤ Fig. 3.1



➤ Fig. 3.2



➤ Fig. 3.3

3.3. ERRORES DE INTENSIDAD Y DE FASE

Error de intensidad, ϵ_i , es el error que el transformador introduce en la medida de la intensidad, y que proviene de que su relación de transformación no es igual a la relación nominal. El error de intensidad ϵ_i , expresado en tanto por ciento, viene dado por la fórmula,

$$\epsilon_i (\%) = \frac{(K_n I_s - I_p)}{I_p} \times 100$$

donde:

K_n = Relación de transformación nominal.

I_p = Intensidad primaria real.

I_s = Intensidad secundaria real.

Desfase o error de fase de un transformador de intensidad, δ_i , es la diferencia de la fase entre los vectores de las intensidades primaria y secundaria, elegidos los sentidos de los vectores, de forma que el ángulo sea nulo para un transformador perfecto.

En la práctica, para cargas con $\cos \beta = 0,8$, el desfase no constituye un factor limitativo, por lo que se calcula el transformador para el máximo error de relación, es decir, cuando I_s e I_o están en fase.

En este caso:

$$\epsilon_i = \frac{N_s I_o}{N_p I_p} \approx \frac{N_s I_o}{N_s I_s}$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones:

› [Fórmula de Boucherot,](#)

$$E_s = 2,22 N_s B_{\max} S 10^{-6}$$

› [Ley de Maxwell-Ampere,](#)

$$H = N_s I_o / L$$

› [Ley de Ohm,](#)

$$I_s = E_s / Z_t$$

obtenemos:

$$\epsilon_i (\%) = 450000 \frac{L Z_t}{N_s^2 S \mu} \quad [3.1]$$

donde:

L = Longitud media del circuito magnético [cm].

Zt = Impedancia total del secundario (interior más carga) [Ω].

Ns = N° espiras de la bobina secundaria.

S = Sección del núcleo magnético [cm^2].

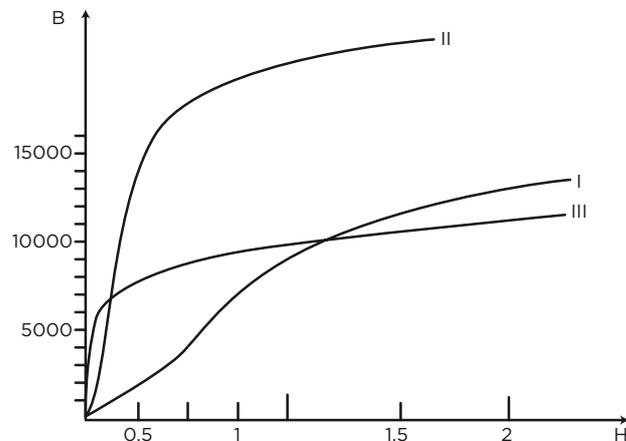
μ = B/H = Permeabilidad de la chapa magnética [Gauss/AV/cm].

La fórmula [3.1] obtenida, ilustra los diversos factores que intervienen en el error de un transformador de intensidad, y llegamos por tanto a las siguientes conclusiones:

1. Bajo el punto de vista de las chapas:

En la fig. 3.4, vemos las curvas de magnetización de diversas chapas.

La curva I, es la de una chapa antigua de alto porcentaje de silicio trazada a título comparativo; la curva II representa una chapa de alto índice de saturación; y la curva III nos muestra un débil poder de saturación, pero por el contrario, muy alta permeabilidad a baja inducción.



› Fig. 3.4

3. EL TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

En las figuras 3.5 y 3.6, vemos los valores μ y $1/\mu$, de estas chapas. Vemos por tanto, que para un error mínimo, debemos utilizar el valor mínimo de $1/\mu$, y por tanto la chapa I no es de interés.

La curva II, correspondiente a chapa de grano orientado, es interesante cuando el número de amperivoltas sea suficiente para realizar la precisión con una pequeña sección de hierro o cuando interese un factor de saturación elevado.

La curva III, corresponde a chapa de tipo Mumetal, que permite una inducción elevada con pocos amperivoltas, y un bajo factor de seguridad. La chapa a elegir dependerá por tanto de las diversas exigencias de tipo técnico y económico.

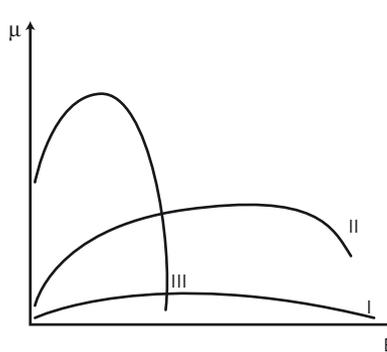


Fig. 3.5

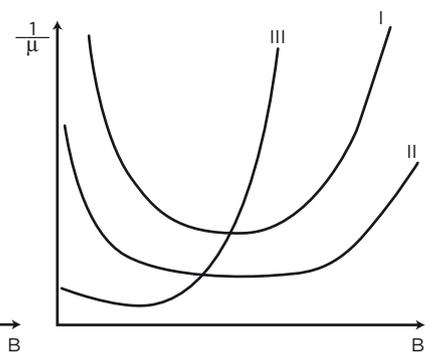


Fig. 3.6

En la fig. 3.7, vemos cómo varía el error, al variar I_s manteniendo Z_t constante. Esta curva refleja la variación de μ al variar B , que se mantiene proporcional a I_s .

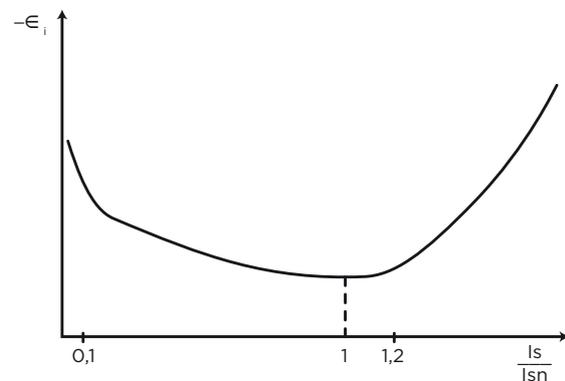


Fig. 3.7

2. Con relación a la potencia aparente:

La potencia aparente es prácticamente proporcional a la impedancia total, pues $Z_s \ll Z_t$ y por lo tanto, el error es directamente proporcional a la potencia aparente. Debemos realizar una sección de núcleo proporcional a la potencia aparente, para mantener el error dentro de los límites permitidos, teniendo en cuenta que si aumentamos la línea media, debemos aumentar de nuevo la sección, para anular su efecto.

Es interesante hacer notar, que si un transformador de intensidad está proyectado de forma que trabaje con μ máximo a la intensidad y carga nominales, al funcionar con una carga $Z_t/4$ reduciremos el error a la cuarta parte, si μ permanece constante, es decir, para $4 I_{sn}$, como vemos en la fig. 3.8.

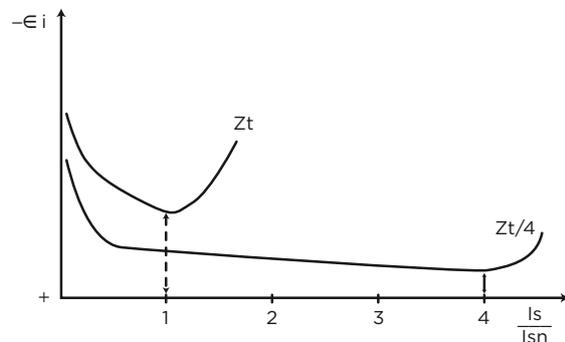


Fig. 3.8

Debido a que el error es siempre negativo, en la práctica se "centra" esta curva, respecto al eje de abscisas, dando un avance positivo igual o menor que el error. Esto se logra modificando la relación de espiras. En la fig. 3.9 vemos un caso real.

3. Según el número de amperivoltas:

Si mantenemos $I_s = 5A$, el número de amperivoltas es directamente proporcional a N_s , y por tanto, el error es inversamente proporcional al cuadrado del número de amperivoltas del secundario.

Es interesante, por tanto, elevar el número de amperivoltas, pero nos vemos limitados por las condiciones térmicas y dinámicas, que obligan a aumentar la línea media del circuito de hierro, y a disminuir por esta causa la precisión. Por otra parte, el aumento de espiras secundarias, eleva la impedancia total y por tanto, también hace aumentar el error.

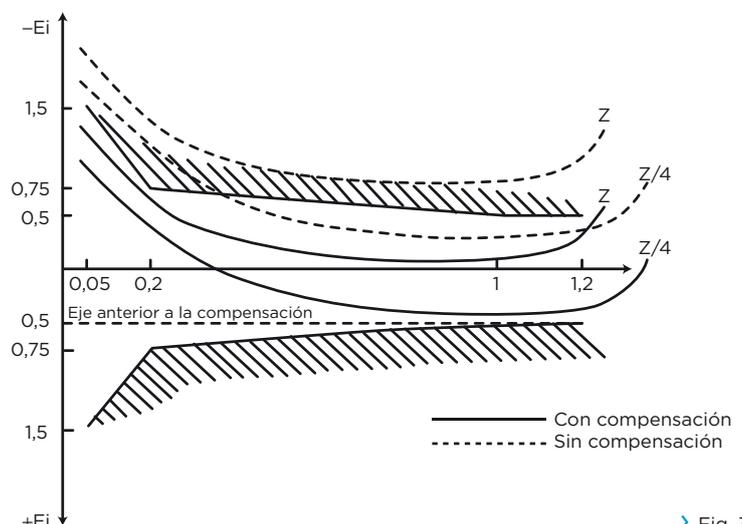


Fig. 3.9

3. EL TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

3.4. TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD PARA MEDIDA

Son los transformadores de intensidad destinados a alimentar los aparatos de medida, contadores y otros aparatos análogos.

3.4.1. CLASE DE PRECISIÓN

La clase de precisión de un transformador de intensidad para medida, está caracterizada por un número (índice de clase) que es el límite del error de relación, expresado en tanto por ciento para la intensidad nominal primaria estando alimentando el transformador la "carga de precisión".

Las clases de precisión de los transformadores de intensidad para medida según la norma IEC son: 0,1, 0,2, 0,5, 1 y 3.

Guía de aplicación:

Clase 0,1 - Laboratorio.

Clase 0,2 - Laboratorio, patrones portátiles, contadores de gran precisión.

Clase 0,5 - Contadores normales y aparatos de medida.

Clase 1 - Aparatos de cuadro.

Clase 3 - Para usos en los que no se requiere una mayor precisión.

3.4.2. TRANSFORMADORES DE GAMA EXTENDIDA

Son transformadores de intensidad para medida, cuyas características de precisión y calentamiento se extienden a valores de la intensidad primaria, superiores al 120% de la nominal. Es normal considerar como límite de la gama el 150% y el 200% de la intensidad primaria nominal.

Para ciertas aplicaciones, en los T.I. de clase 0,2 y 0,5 puede extenderse la precisión hasta el 1% de I_{pn} , pasando las clases a denominarse 0,2S y 0,5S.

3.4.3. FACTOR DE SEGURIDAD (FS)

Para proteger los aparatos alimentados por el transformador, en caso de corto-circuito en la red en la cual está intercalado el primario, se tiene en cuenta el "Factor nominal de seguridad", que se define como:

$$F_s = I_{ps} / I_{pn}$$

donde,

I_{ps} es la "intensidad nominal de seguridad"

I_{pn} es la "intensidad primaria nominal"

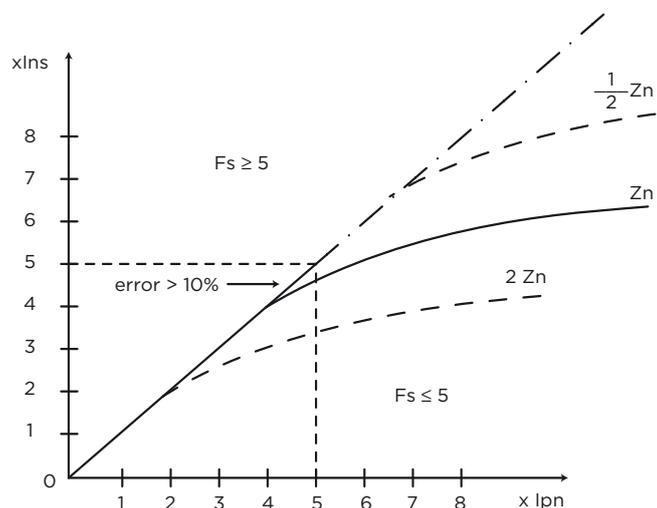
La intensidad nominal de seguridad, es la intensidad primaria, para la que, el transformador ha comenzado a saturarse. En este momento, la intensidad secundaria multiplicada por la relación de transformación nominal, debe ser menor o igual a 0,9 veces la intensidad primaria.

Se puede escribir entonces:

$$K_n I_{ss} < 0,9 I_{ps}$$

En la fig. 3.10 vemos la relación entre las intensidades primaria y secundaria, para $F_s \leq 5$.

Para que un transformador de intensidad pueda realizar una clase de precisión elevada con un factor nominal de seguridad bajo, es necesario utilizar en la construcción del núcleo, chapa magnética de gran permeabilidad y de saturación rápida. Esto se logra normalmente, aunque no siempre es posible, con chapa de alto porcentaje de níquel (por ejemplo: Mumetal), de elevado coste. Por ello, antes de escoger F_s , debemos comprobar si es necesaria su aplicación, y en caso afirmativo consultar con el fabricante la posible modificación del precio del transformador.



➤ Fig. 3.10

3. EL TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

3.4.4. VERIFICACIÓN

La verificación de la clase en los transformadores de intensidad para medida, consiste en medir su relación de transformación con una precisión que debe ser necesariamente del orden de 0,01%.

La realización de este ensayo, en forma absoluta, solamente es posible en laboratorios especializados.

Afortunadamente, utilizando transformadores patrones, debidamente contrastados, es posible obtener, por comparación, en puentes de verificación, los errores de cualquier transformador, con la precisión necesaria.

Para verificar el factor de seguridad, podemos utilizar dos métodos:

- › Alimentando el arrollamiento primario con la intensidad nominal de seguridad, verificando que el error en el secundario, con su carga de precisión, es mayor o igual al 10%.

- › Excitar el transformador a través del arrollamiento secundario hasta obtener en bornes secundarios: $U_o = F_s I_{sn} Z_t$, y comprobando que $Io \geq 0,1 F_s I_{sn}$.

Es importante recordar que el factor de seguridad depende de la carga secundaria, aumentando su valor, en la misma proporción en que la carga total disminuye.

Nota: Si bien en algunas normas se admiten los dos métodos de ensayo indicados, hay que tener en cuenta que en el método directo se mide el error de relación y en el indirecto el error compuesto. No obstante los valores de F_s obtenidos en ambos métodos difieren muy poco y la fácil aplicación del método indirecto justifica plenamente su utilización.

- › Transformadores de intensidad modelo CA de 420 kV. CFE, Chicoasén (México).



3.5. TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD PARA PROTECCIÓN

Son los transformadores de intensidad destinados a alimentar relés de protección. Deben, por tanto, asegurar una precisión suficiente para intensidades de valor igual a varias veces la intensidad nominal.

Para estas intensidades, el error a considerar es el "Error compuesto", que se define como el valor eficaz de la diferencia integrada sobre un período entre los valores, instantáneos de la intensidad primaria y el producto de la relación de transformación nominal por los valores instantáneos de la intensidad secundaria real. En tanto por ciento, viene dado por la fórmula:

$$\Sigma_c (\%) = \frac{100}{I_p} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n \cdot i_s - i_p)^2 dt}$$

Si i_p e i_s son senoidales, el error compuesto es la suma vectorial del error de relación y del error de fase.

En este caso, la fórmula anterior se transforma en:

$$\Sigma_c = \sqrt{\epsilon_i^2 + \delta_i^2}$$

3.5.1. CLASE DE PRECISIÓN

La clase de precisión de un transformador de intensidad para protección, está caracterizada por un número (índice de clase) y la letra "P" (inicial de protección). El índice de clase indica el límite superior del error compuesto para la intensidad límite de precisión nominal y la carga de precisión. Después de la letra "P", figura el factor límite de precisión nominal. Las clases de precisión normales son: 5P y 10P.

Para sistemas de protección, en los que las características del transformador son parte integrante del sistema (por ejemplo, dispositivos de protección diferencial de acción rápida) existen las clases de protección PR y PX.

La clase PR se refiere a transformadores que deben asegurar la protección como un factor de remanencia (relación entre flujo remanente y el flujo de saturación) limitado para los que, en algunos casos, puede especificarse un valor de la constante de tiempo del bucle secundario y/o un valor máximo de la resistencia del arrollamiento secundario. Las clases PX se aplican a los transformadores de baja inductancia de fuga (sin entrehierro) para los que el conocimiento de la curva de excitación del secundario, de la resistencia del arrollamiento secundario, de la resistencia de la carga secundaria y de la relación del número de espiras es suficiente para determinar su comportamiento en el sistema de protección al que está conectado.



3. EL TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

3.5.2. FACTOR LÍMITE DE PRECISIÓN (FLP)

Se define como Intensidad límite de precisión nominal al valor más elevado de la intensidad primaria, para la cual, el transformador, con la carga de precisión, responde a los límites exigidos del error compuesto.

El “Factor límite de precisión nominal” es la relación entre la intensidad límite de precisión nominal (I_{lpn}) y la intensidad nominal primaria (I_{pn}).

$$FLP = I_{lpn} / I_{pn}$$

Debe tenerse en cuenta, que el factor límite de precisión depende de la carga, y si ésta es superior a la carga de precisión, el factor límite de precisión es inferior al nominal. El “Factor de seguridad” y el “Factor límite de precisión” son conceptualmente similares, pues indican para qué múltiplo de I_{pn} comienza la saturación del T.I. con la carga nominal.

Para calcular el nuevo factor (tanto el de seguridad como el límite de precisión) puede aplicarse la siguiente fórmula:

$$F = \frac{A}{Z_s + Z}$$

donde A es una constante que puede obtenerse de los valores nominales de F y Z. (Ver fig. 3.10).

3.5.3. VERIFICACIÓN

En los transformadores de intensidad para protección, hay que verificar la precisión para la corriente nominal, y para ello se utiliza el mismo sistema que en los transformadores para medida. La verificación del error compuesto, para la intensidad límite de precisión, se puede realizar de dos maneras:

- a. Haciendo pasar por el arrollamiento primario una intensidad prácticamente sinusoidal, igual en valor eficaz a la intensidad límite de precisión.
- b. Determinando la intensidad de excitación para la frecuencia nominal y una tensión prácticamente sinusoidal de valor eficaz igual al de la fuerza electromotriz límite secundaria.

El primer método es de difícil aplicación, excepto para transformadores de pequeña intensidad primaria y bajo factor límite de precisión nominal. Se puede utilizar en los ensayos de tipo.

Para los ensayos individuales, el único método aplicable es el de excitación

Nota: Si bien hemos diferenciado netamente el transformador de intensidad para medida, del transformador de intensidad para protección, es usual que un mismo aparato cumpla ambas funciones, mediante dos o más núcleos independientes.



3. EL TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

3.6. TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD PARA PROTECCIÓN EN LOS QUE ES ESENCIAL LA RESPUESTA EN RÉGIMEN TRANSITORIO

3.6.1. GENERALIDADES

Si es necesario que el T.I. para protección responda correctamente durante los primeros ciclos de un cortocircuito, es necesario sobredimensionar el núcleo para que no se sature con la componente aperiódica.

El valor inicial de esta componente aperiódica, dependiendo del valor de la tensión en el momento de producirse el cortocircuito y de las características de la línea, oscila entre 0 y $\sqrt{2} I_{cc}$, siendo I_{cc} el valor eficaz de la intensidad de cortocircuito simétrica. Si consideramos este valor máximo, la intensidad de cortocircuito transitoria es:

$$i_{cc} = \sqrt{2} I_{cc} (e^{-t/T_1} - \cos wt)$$

donde $T_1 = L/R$ es la constante de tiempo de la línea.

Si consideramos que la carga secundaria es resistiva, el flujo necesario en el TI para que no se sature es:

$$\phi_T = \phi_A \left[\frac{w T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \text{sen } wt \right]$$

[3.2]

donde:

T_2 = Constante de tiempo del transformador.

ϕ_A = Valor de cresta de la componente sinusoidal de flujo.

Para simplificar esta fórmula, se puede tomar $\text{sen } wt = -1$. Si $T_2 \gg T_1$ (lo que ocurre con los TI normales), resulta:

$$\phi_T = \phi_A (w T_1 + 1)$$

Normalmente, en líneas de alta tensión, hay que tener en cuenta que tras el primer cortocircuito, existe un reenganche rápido que incrementa el flujo remanente del T.I.

En la fig. 3.11 se indica i_{cc} (a) y el flujo del T.I. (b). El coeficiente de sobredimensionamiento del núcleo del TI (K_{TD}), es la relación entre ϕ_T y ϕ_A .

A partir de la fórmula [3.2] y teniendo en cuenta el reenganche, resulta:

$$K_{TD} = \left[\frac{w T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t'}{T_2}} - e^{-\frac{t'}{T_1}} \right) + 1 \right] e^{-\frac{(FRT + T_D)}{T_2}} + \left[\frac{w T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{T_D}{T_2}} - e^{-\frac{T_D}{T_1}} \right) + 1 \right]$$

[3.3]

donde:

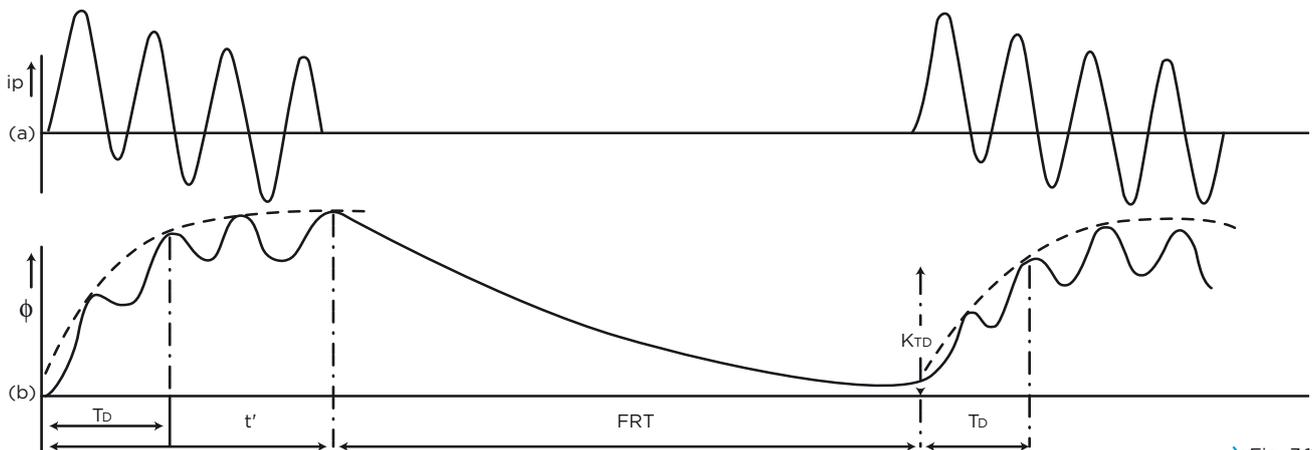
T_1 = Constante de tiempo de la línea.

T_2 = Constante de tiempo del TI.

t' = Duración del primer corto.

FRT = Tiempo de repetición del defecto (tiempo muerto).

T_D = Tiempo a partir del cual, se admite la saturación del TI.



> Fig. 3.11

3. EL TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

Si deseamos conocer el sobre-dimensionamiento que tiene un TI de protección normal, para estudiar su comportamiento durante el período transitorio, podemos utilizar la siguiente fórmula:

$$K'_{TD} = \frac{F_n (R_s + Z_n)}{K_{SSC} (R_s + R)}$$

donde:

- F_n = Factor límite de precisión nominal.
- R_s = Resistencia del arrollamiento secundario.
- Z_n = Impedancia de la carga nominal.
- K_{SSC} = Relación entre la intensidad simétrica de corto (I_{CC}) y la intensidad primaria nominal.
- R = Resistencia secundaria real

Si la carga real no es resistiva, puede tenerse en cuenta, sustituyendo en la fórmula [3.3] el sumando 1 por $1/\cos \beta$ donde, para calcular "β" interviene también R_s .

3.6.2. CLASIFICACIÓN DE LOS TI

Se consideran tres clases de TI:

TPX: TI con el núcleo sin entrehierros, pero de sección suficiente para responder correctamente durante el período transitorio. Refleja bien la componente aperiódica. El valor de T_2 es grande, comparado con el de T_1 .

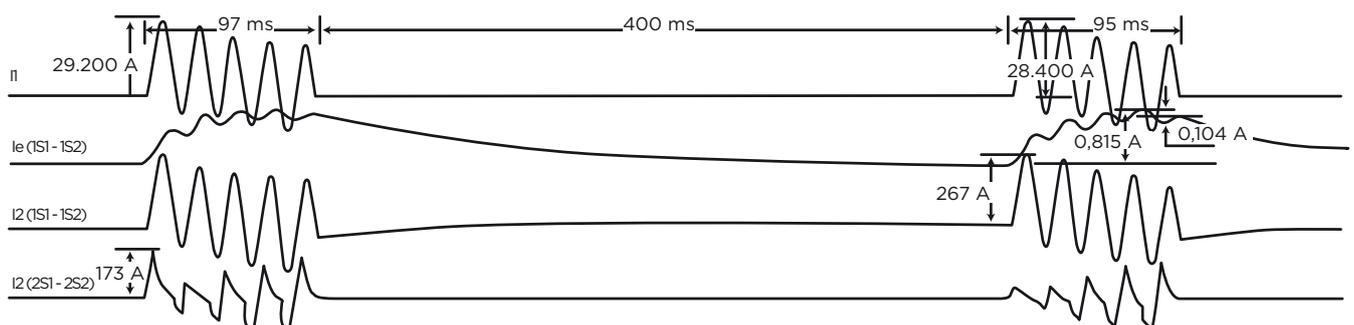
TPY: TI con pequeños entrehierros en el núcleo, para reducir la inducción remanente. Refleja bastante bien la componente aperiódica. El valor de T_2 depende de las exigencias de precisión (como orientación, puede oscilar entre 0,3 y 1 segundos).

TPZ: TI con entrehierros superiores a los del TPY. Refleja bien la componente alterna, pero no la aperiódica. El valor de T_2 , es del orden de 0,07 segundos. Debido a los entrehierros, no es posible obtener mucha precisión a I_n .

Ejemplo: Veamos los factores de sobre-dimensionamiento de cada clase de TI, para $T_1 = 0,1s$, $t' = 0,08s$, $T_D = 0,035s$, $FRT = 0,5s$, $f = 50$ Hz.

- a. **TPX.** Consideramos $T_2 = 10s$
 $K_{TD} = 26,4.$
- b. **TPY.** Sea $T_2 = 0,5s$
 $K_{TD} = 14,7.$
- c. **TPZ.** Sea $T_2 = 0,07s$
 $K_{TD} = 7,6.$

En la fig. 3.12 se ve cómo responden ante una intensidad primaria totalmente desplazada, un secundario TPZ (1S1-1S2) y un secundario de protección normal (2S1-2S2).



► Fig. 3.12

3. EL TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

3.7. CARGA

Es la impedancia del circuito exterior alimentado por el arrollamiento secundario, expresada en Ohmios, con indicación de su factor de potencia. Habitualmente se indica por su factor de potencia y la potencia aparente en voltio-amperios, que absorbe para la intensidad secundaria nominal.

Por ejemplo:

Potencia de precisión 30VA para $I_{sn} = 5 \text{ A}$

$$Z = \frac{30}{5^2} = 1,2 \text{ Ohmnios}$$

Al calcular la carga secundaria, hay que añadir a la carga de los aparatos de medida, la carga de los cables de conexión. En la fig. 3.13 vemos un gráfico del consumo en VA de los cables normalmente utilizados.

Veamos a continuación la tabla 3.1, en la que se indican los consumos en VA, de bobinas amperimétricas usuales.

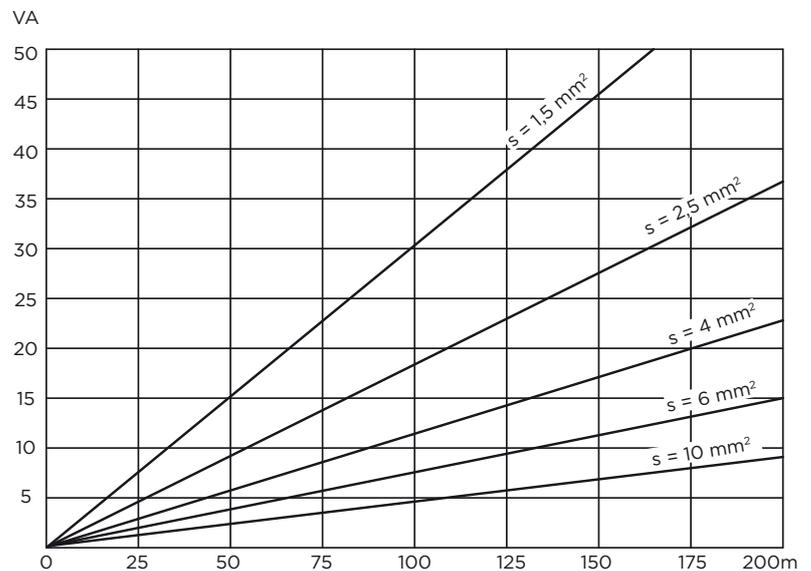


Fig. 3.13

Tabla 3.1. Consumo de algunos aparatos alimentadores por TI

| Aparato | VA a In. |
|--------------------------------------|----------|
| Amperímetros | |
| Indicadores | 0,25 a 2 |
| Registadores | 1,5 a 9 |
| Contadores | 0,5 a 3 |
| Vatímetros | |
| Indicadores | 1 a 3 |
| Registadores | 1,5 a 8 |
| Fasímetros | |
| Indicadores | 2 a 6 |
| Registadores | 6 a 12 |
| Maxímetros | 3 |
| Convertidores de potencia | 3 a 6 |
| Relés | |
| de sobreintensidad, de tiempo inver. | 5 a 8 |
| de sobreintensidad, temporizados | 1 a 5 |
| de sobreintensidad, instantáneos | 1 a 10 |
| direccionales | 1,5 a 10 |
| de potencia, temporizados | 1,5 a 3 |
| diferenciales | 3 a 12 |
| de distancia | 6 a 20 |
| Reguladores | 10 a 150 |

En los TI clase "TP", debe solicitarse justamente la potencia necesaria y evitar que el consumo en los cables sea importante. De esta manera se compensará parcialmente el sobredimensionamiento del núcleo respecto de los TI de protección normales.

3. EL TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

3.8. RESISTENCIA A LOS CORTOCIRCUITOS

Por estar conectados en serie a las líneas de alimentación, los transformadores de intensidad están sometidos a las mismas sobretensiones y sobreintensidades que éstas.

En general, estas sobreintensidades son muy superiores a las intensidades nominales de los TI y originan efectos térmicos y dinámicos que pueden dañar el transformador.

Los efectos térmicos obligan a dimensionar adecuadamente el primario del TI. Se considera que todo el calor producido queda almacenado en el conductor primario, cuyo calentamiento máximo se determina en cada norma.

Para evitar que el transformador se rompa por los esfuerzos dinámicos que se producen en el primario, es necesario adecuar una sujeción mecánica en dicho primario. Estos esfuerzos mecánicos, son función del valor máximo de cresta de la intensidad de cortocircuito.

La resistencia a los cortocircuitos de los transformadores de intensidad, se determina por las intensidades límite térmica y dinámica.

3.8.1. INTENSIDAD LÍMITE TÉRMICA (I_{th})

Es el valor eficaz más elevado de la intensidad primaria, que el transformador puede soportar al efecto Joule durante un segundo sin sufrir deterioro, estando el circuito secundario conectado en cortocircuito.

Conocida la potencia máxima de cortocircuito de la línea en la que está colocado el TI, podemos calcular la intensidad térmica con la fórmula:

$$I_{th} = \frac{P}{\sqrt{3} \times V}$$

donde:

- I_{th} = Intensidad térmica de cortocircuito (kA ef.)
- P = Potencia de cortocircuito (MVA)
- V = Tensión compuesta (kV)

Si la duración del cortocircuito es diferente de 1 segundo (entre 0,5 y 5) debe indicarse esta duración a continuación de I_{th} .

La relación que liga los tiempos y las intensidades es:

$$I_{th1} \times \sqrt{t1} = I_{th2} \times \sqrt{t2}$$

Para los transformadores de clase térmica A, se puede admitir una densidad de corriente de 180 A/mm² en los conductores de cobre, lo que corresponde a un incremento de temperatura de 235°C. (La norma IEEE/ANSI es algo más severa en este aspecto).

Salvo indicación contraria, los TI se construyen con $I_{th} = 80 I_n$ pero puede fabricarse incluso con $I_{th} = 1000 I_n$. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en este caso se reducen la potencia y clase de precisión que puede suministrar un determinado tipo de aparato al disminuir los amperivuelts nominales. (Ver 3.3).

3.8.2. INTENSIDAD LÍMITE DINÁMICA (I_{dyn})

Es el valor de cresta de la primera amplitud de la intensidad que puede soportar un transformador sin sufrir deterioro, cuando el circuito secundario está conectado en cortocircuito.

La intensidad dinámica de corto se obtiene a partir de la térmica, teniendo en cuenta que ésta viene dada en valor eficaz y aquélla en valor de cresta máximo. El coeficiente debido a la componente aperiódica, se considera normalmente 1,8 (normas IEC, etc.).

Por tanto:

$$I_{dyn} = 1,8 \sqrt{2} I_{th} = 2,5 I_{th}$$

donde:

- I_{dyn} = Intensidad dinámica de cortocircuito (kA pk.)

En la norma IEEE/ANSI, ambas intensidades se definen por separado y la intensidad límite dinámica se expresa en kA ef. con una corriente totalmente desplazada. Es decir:

$$I_{pk} = 2 \times \sqrt{2} \times I_{dyn} = 2,83 I_{dyn}$$

donde

- I_{dyn} = Intensidad dinámica nominal (kA pk.)

3.9. FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD A CIRCUITO ABIERTO

Supongamos que hemos realizado un transformador de intensidad, de relación 1.000/1, con un núcleo toroidal de longitud de línea media 35 cm cuya chapa magnética se puede considerar saturada con 1 AV/cm. Al funcionar con el circuito secundario abierto, a partir de $I_p = 35A = 0,035 I_{pn}$, el núcleo está saturado.

A partir de $0,1 I_{pn}$, la pendiente del flujo aumenta rápidamente y, asimismo, la tensión en los bornes secundarios, cuyo valor de cresta es proporcional a $\sqrt{I_p}$. También, las pérdidas en el núcleo aumentan, llegando a producir una elevación de temperatura inadmisibles.

Este problema es realmente importante en los transformadores para protección, debido a la dimensiones del núcleo, por lo que, a veces, se limita la tensión de cresta en los bornes del secundario a 4 u 8 kV, y se determina el tiempo máximo de funcionamiento del transformador en estas condiciones de común acuerdo cliente-fabricante, pues en principio los transformadores de intensidad no están garantizados para su funcionamiento con el secundario abierto si la tensión es superior a 3,5 kV cresta.

3.10. TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD DE REALIZACIÓN ESPECIAL

3.10.1. TRANSFORMADORES CON VARIOS NÚCLEOS

En realidad, podríamos decir que es una realización normal, pues la mayor parte de los transformadores se realizan con un núcleo para medida y otro (u otros) para protección.

Pueden realizarse tantos núcleos como se desee, siempre que las dimensiones totales permitan una ejecución económica.

3.10.2. TRANSFORMADORES EN CASCADA

Se realizan para tensiones elevadas, dividiendo en varios escalones la tensión total.

Dieléctricamente, resulta una solución interesante, pero desde el punto de vista de la precisión, hay que tener en cuenta que el núcleo superior debe suministrar la potencia de todos los secundarios.

Por ello, resulta difícil conjugar un secundario de medida de gran precisión y un secundario de protección, con un factor límite de precisión nominal elevado.

3.10.3. TRANSFORMADORES DE GRAN INTENSIDAD PRIMARIA

En estos transformadores, aparecen fenómenos de saturación local, debidos al descentrado de la barra primaria, a su forma, y principalmente a la proximidad de otras barras que dificultan la obtención de una elevada clase de precisión. Para anular estos defectos, es necesario realizar bobinados de compensación, que aseguren la constancia del flujo a todo lo largo del núcleo.

3. EL TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

3.11. ELECCIÓN DEL TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

Para el correcto funcionamiento de una instalación, es conveniente estudiar con detalle la elección del transformador de intensidad, recordando los siguientes puntos:

1. Tipo de instalación, interior o intemperie. Se debe tener en cuenta la altitud, para valores superiores a 1.000 m. sobre el nivel del mar.
2. Nivel de aislamiento. Recomendamos elegir los valores indicados en las diversas normas.
3. Relación de transformación nominal, recordando que se puede recurrir a la doble o triple relación y a la gama extendida, en caso necesario.
4. Clase de precisión, de acuerdo con las diversas normas.
5. Potencia nominal, de acuerdo con las diversas normas. Recomendando no elegir una potencia excesiva. Si hay mucha diferencia entre la potencia nominal y la potencia del aparato a instalar, se puede colocar una resistencia en serie.
6. Factor nominal de seguridad (en caso necesario).
7. Factor límite de precisión nominal. (Transformadores para protección).
8. Intensidades límites térmica y dinámica. No conviene excederse, pues en ciertas circunstancias estas exigencias pueden encarecer mucho el transformador.
9. Frecuencia nominal.
10. Número de secundarios (núcleos).
11. Detalles constructivos.

Si existen secundarios de protección de tipo "TP" hay que tener en cuenta también:

12. Constante de tiempo de la línea (T_L).
13. Características del cortocircuito (t' , FRT, T_D).
14. Precisión necesaria a I_n .
15. Precisión necesaria durante el período transitorio. Puede referirse solamente a la componente simétrica (TPZ) o también a la componente aperiódica (TPX, TPY).

► Transformadores de intensidad de 800 kV. FSK (Rusia).



4. EL TRANSFORMADOR DE TENSIÓN

4.1. ECUACIONES GENERALES

Ver fig. 2.3 y 3.1.

$$\bar{U}_s = \bar{E}_s - R_s \bar{I}_s - jX_s \bar{I}_s$$

$$\bar{U}'_p = \bar{E}_s + R'_p \bar{I}'_p + jX'_p \bar{I}'_p$$

y teniendo en cuenta que:

$$\bar{I}'_p = \bar{I}_s + \bar{I}_o$$

resulta:

$$\begin{aligned} \bar{U}'_p - \bar{U}_s &= (R'_p + jX'_p) (\bar{I}_s + \bar{I}_o) + (R_s + jX_s) \bar{I}_s \\ &= (R'_p + jX'_p) \bar{I}_o + [(R'_p + R_s) + j(X'_p + X_s)] \bar{I}_s \end{aligned} \quad [4.1]$$

Vemos por tanto, que el error de un transformador de tensión en carga, es debido a:

- > el error en vacío,
- > el error debido a la intensidad secundaria a través de la impedancia de cortocircuito.

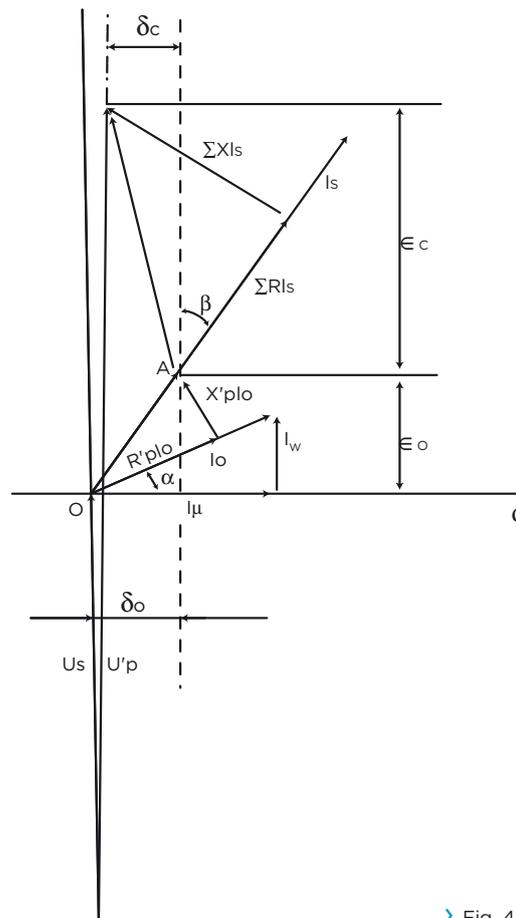
Sabemos por la fórmula de Boucherot, que:

$$E_s = 2,22 N_s BS \times 10^{-6} \text{ Voltios}$$

y como el error es pequeño:

$$U'_p \approx U_s \approx E_s$$

por lo que, si U'_p permanece constante, el transformador de tensión trabaja a inducción constante, aunque varíe la carga secundaria dentro de los valores admisibles.



> Fig. 4.1

4.2. DIAGRAMA VECTORIAL

De la ecuación [4.1] obtenemos el diagrama vectorial del transformador de tensión, según vemos en la fig. 4.1.

Partimos de U_s y como en el diagrama vectorial del transformador de intensidad, obtenemos I_o de las curvas de magnetización de la chapa.

4. EL TRANSFORMADOR DE TENSIÓN

4.3. ERRORES DE TENSIÓN Y DE FASE

Error de tensión es el error que un transformador introduce en la medida de una tensión y que proviene de que su relación de transformación no es igual a la relación nominal.

El error de tensión ϵ_u , expresado en el tanto por ciento, está dado por la fórmula:

$$\epsilon_u \% = \frac{(K_n U_s - U_p) 100}{U_p}$$

donde,

- K_n = relación de transformación nominal.
- U_p = tensión primaria real.
- U_s = tensión secundaria correspondiente a U_p en las condiciones de la medida.

Desfase, o error de fase de un transformador de tensión δ_u , es la diferencia de fase entre los vectores de las tensiones primaria y secundaria, elegidos los sentidos de los vectores de forma que el ángulo sea nulo para un transformador perfecto.

Tanto el error de relación como el error de fase, se componen del error en vacío y el error en carga según vemos en la fig. 4.1.

En la fig. 4.2 vemos los triángulos de vacío, que varían en función de U_p .

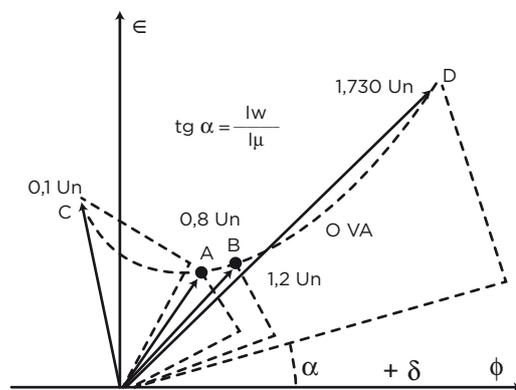
El margen de funcionamiento del transformador, en las normas UNE, CEI, etc., es entre $0,8 U_{pn}$ y $1,2 U_{pn}$.

En la fig. 4.3, vemos los errores dados por el diagrama de Kapp, en función del $\cos \beta$ partiendo del triángulo de vacío a $0,8 U_{pn}$.

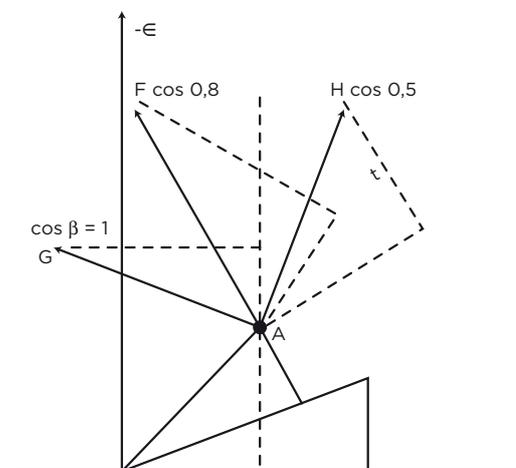
Para obtener el diagrama de Kapp a $1,2 U_{pn}$, hay que partir del punto B de la fig. 4.2, etc. Si ahora tenemos en cuenta la variación de la carga obtenemos la fig. 4.4., en la que vemos cómo varían los errores en función de la tensión, de la carga y del $\cos \beta$ de ésta.

Los errores en carga son rectas paralelas, cuyo ángulo depende del $\cos \beta$ de la carga, como se ve en la fig. 4.4. Como el error de relación es negativo, para una relación del número de espiras igual a la relación nominal de transformación, se suele "centrar" el error mediante una corrección en la relación del número de espiras para obtener el máximo aprovechamiento del núcleo.

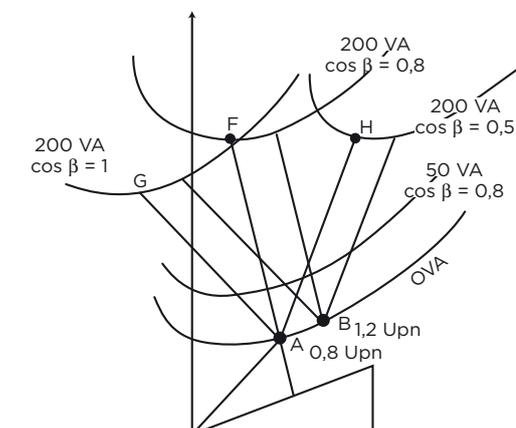
En la fig. 4.5 se ve cómo quedan los errores del TT al modificar debidamente la relación de transformación.



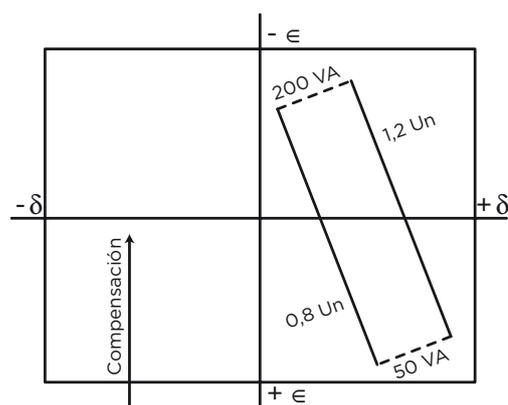
> Fig. 4.2



> Fig. 4.3



> Fig. 4.4



> Fig. 4.5

4. EL TRANSFORMADOR DE TENSIÓN

4.4. TRANSFORMADORES DE TENSIÓN PARA MEDIDA

4.4.1. DEFINICIÓN

Son los transformadores de tensión destinados a alimentar los aparatos de medida, contadores y otros aparatos análogos.

120% de la tensión nominal con una carga comprendida entre el 25% y el 100% de la carga de precisión.

4.4.2. CLASE DE PRECISIÓN

La clase de precisión de un transformador de tensión para medida, está caracterizada por un número (índice de clase) que es el límite del error de relación, expresado en tanto por ciento, para la tensión nominal primaria estando alimentado el transformador con la "carga de precisión".

Esta precisión debe mantenerse para una tensión comprendida entre el 80% y el

Las clases de precisión para los transformadores de tensión son: 0,1, 0,2, 0,5, 1 y 3.

Guía de aplicación:

Clase 0,1 - Laboratorio.

Clase 0,2 - Laboratorio, patrones portátiles y contadores de precisión.

Clase 0,5 - Contadores normales, aparatos de medida.

Clase 1 - Aparatos para cuadro.

Clase 3 - Para usos en los que no se requiera una mayor precisión.

4.5. TRANSFORMADORES DE TENSIÓN PARA PROTECCIÓN

4.5.1. DEFINICIONES

Son los transformadores de tensión destinados a alimentar relés de protección.

Si un TT va a ser utilizado para medida y para protección, normalmente no es necesario que existan dos arrollamientos separados como en los TI salvo que se desee una separación galvánica. Por ello, en la norma IEC, a los TT para protección se les exige también que cumplan una clase de precisión como TT para medida.

Para un mismo modelo de TT, la potencia de precisión, cuando sólo existe un secundario, es superior a la suma de las potencias de precisión de cada secundario, cuando existen dos, pues hay que tener en cuenta el espacio destinado a aislar entre sí ambos secundarios.

Se llama "arrollamiento de tensión residual", al destinado a formar un triángulo abierto (junto con los correspondientes arrollamientos de otros dos transformadores monofásicos), para suministrar una tensión residual en el caso de falta a tierra.

Debido a la interdependencia existente entre los secundarios de un TT, es necesario especificar si las potencias de precisión son simultáneas o no, pues si uno de los secundarios está cargado solamente durante cortos períodos de tiempo, puede admitirse que las cargas no son simultáneas.

4.5.2. CLASE DE PRECISIÓN

Los TT para protección, salvo los arrollamientos de tensión residual, deben especificarse también como TT para medida.

La clase de precisión, como TT para protección, está caracterizada por un número que indica el error máximo, expresado en tanto por ciento al 5% de la tensión nominal (Ver 8.5.4). Este número va seguido de la letra "P".

Las clases de precisión normales son: 3P y 6P.

4. EL TRANSFORMADOR DE TENSIÓN

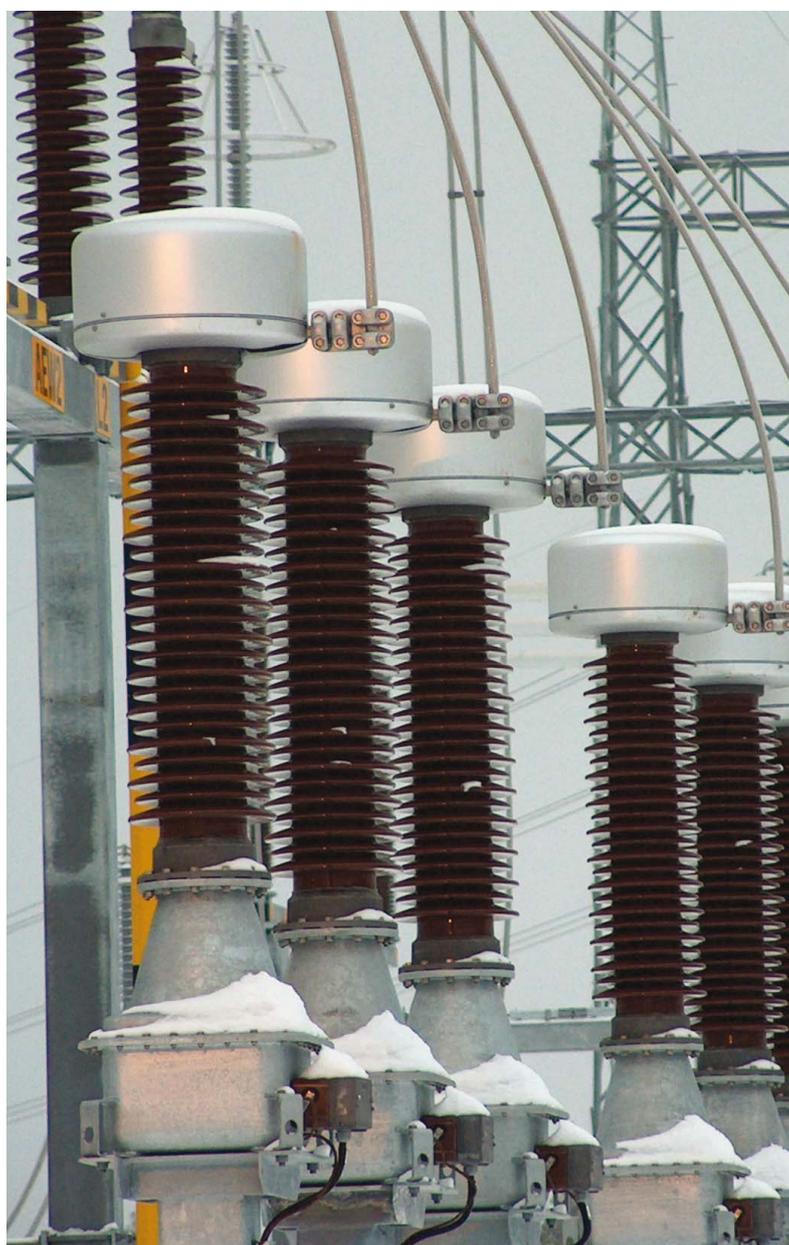
4.6. CARGA

Se define de la misma manera que en el transformador de intensidad. (Ver capítulo 3.7).

Indicamos en la Tabla 4.1 los consumos normales de las bobinas voltimétricas de los aparatos alimentados por los transformadores de tensión:

| Tabla 4.1. Consumo de algunos aparatos alimentados por TT | |
|---|--------------------------|
| Aparatos | Consumo aproximado en VA |
| Voltímetros | |
| indicadores | 2 - 6 |
| registradores | 10 - 25 |
| de nulo | 5 - 20 |
| Vatímetros | |
| indicadores | 1 - 4 |
| registradores | 3 - 15 |
| Fasímetros | |
| indicadores | 4 - 5 |
| registradores | 15 - 20 |
| Contadores | |
| | 3 - 5 |
| Frecuencímetros | |
| indicadores | 1 - 5 |
| registradores | 10 - 15 |
| Relés | |
| de máxima tensión | 10 - 15 |
| temporizados de máxima tensión o de intensidad | 25 - 35 |
| selectivos | 2 - 10 |
| direccionales | 25 - 40 |
| de mínima tensión | 5 - 15 |
| de contacto a tierra | 10 - 30 |
| de distancia | 10 - 30 |
| Sincronoscopios | 6 - 15 |
| Reguladores de tensión | 30 - 50 |

› Transformadores de tensión inductivos de 123 kV. Fingrid (Finlandia).



4.7. TRANSFORMADORES DE TENSIÓN DE REALIZACIÓN ESPECIAL

4.7.1. TRANSFORMADORES CON VARIAS TENSIONES PRIMARIAS NOMINALES

Estos transformadores se pueden realizar de cuatro maneras:

- › acoplamiento serie-paralelo en el primario,
- › bobinado primario con tomas,
- › acoplamiento serie-paralelo en el secundario,
- › bobinado secundario con tomas.

En los dos primeros, existen problemas de aislamiento y de aprovechamiento del núcleo, que limitan prácticamente su campo a la baja tensión, principalmente patrones.

La realización serie-paralelo en el secundario, solamente se utiliza si las dos secciones del bobinado secundario tienen el mismo número de espiras, pues de no ser así, aparece una corriente de circulación interna, absorbiendo potencia. También hay que tener en cuenta, que ambas secciones deben aislarse entre sí, al menos a 2 kV.

Por último, la realización por toma en el secundario, es interesante, principalmente cuando no es posible la realización serie-paralelo o cuando la potencia exigida es la misma para las dos realizaciones, con lo que el aprovechamiento del núcleo es máximo.

Antes de elegir un transformador con estas características, es conveniente consultar con el fabricante para que estudie la solución más económica.

4.7.2. TRANSFORMADORES CON VARIAS TENSIONES SECUNDARIAS NOMINALES

Estos se realizan de dos maneras:

- › acoplamiento serie-paralelo en el secundario,
- › bobinado secundario con toma.

El acoplamiento serie-paralelo en el secundario, sólo es utilizable para la relación 2 a 1, y conserva todas las características del transformador normal en cuanto a sus posibilidades.

La realización con toma en el secundario, se utiliza normalmente cuando la relación de tensiones no es 2 a 1.

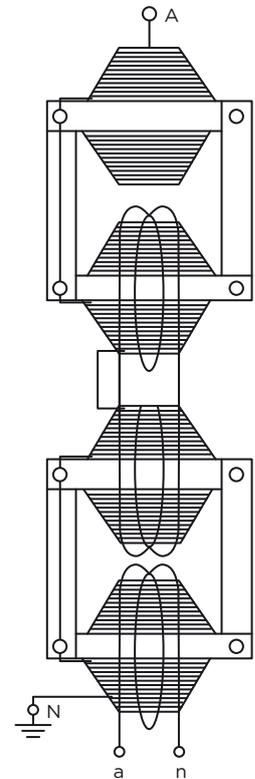
4.7.3. TRANSFORMADORES EN CASCADA

Cuando la tensión nominal de aislamiento del transformador de tensión es elevada, resulta difícil su realización en una sola bobina.

La construcción en cascada, consiste en repartir el arrollamiento primario en varias bobinas, estando él o los secundarios, únicamente sobre la última bobina. Esta construcción en cascada, permite que cada bobina sufra solamente una fracción de la tensión total.

El transformador en cascada se compone de uno o varios núcleos, cada uno de los cuales tiene dos bobinas. El núcleo, de forma rectangular, se pone al potencial medio de las dos bobinas.

Entre otras ventajas del transformador de tensión en cascada, conviene mencionar que los errores en vacío son muy pequeños, gracias a la reducción de la impedancia del arrollamiento primario. En la fig. 4.6, vemos el esquema de un transformador en cascada con dos núcleos y cuatro bobinas.



› Fig. 4.6

4.7.4. TRANSFORMADORES CON VARIOS ARROLLAMIENTOS SECUNDARIOS

Se pueden construir transformadores de tensión con varios arrollamientos secundarios sobre el mismo núcleo, pues si bien la carga de uno de ellos afecta a los restantes, no existen en cambio las limitaciones del transformador de intensidad, debidas a los factores de seguridad y de saturación.

En los transformadores de tensión, con el P2 a tierra, que vayan a instalarse en redes sin neutro a tierra, es conveniente realizar un terciario (segundo secundario) para proteger al transformador, si aparece el fenómeno de ferorresonancia. (ver punto 4.9)

El incremento que este secundario introduce en el coste del transformador es generalmente pequeño.

4. EL TRANSFORMADOR DE TENSIÓN

4.8. TRANSFORMADORES DE TENSIÓN PARA DESCARGA DE LINEAS

Cuando una línea de alta tensión queda aislada por la apertura de los interruptores, la energía capacitiva almacenada en ella puede ser causa de sobretensiones al producirse un reenganche.

Existen diversos procedimientos para la descarga de líneas, pero la experiencia ha demostrado que los TT dan buenos resultados si están correctamente dimensionados.

En caso contrario, puede suceder que la descarga no sea suficientemente rápida o que los TT se deterioren por calentamiento o por efectos dinámicos.

En un estudio simplificado del problema se puede suponer que cuando el TT no está saturado, la intensidad de descarga es despreciable, y la tensión de la línea permanece constante. Cuando se satura, la reactancia decrece al valor del arrollamiento primario en el aire, L. En este caso el circuito a considerar es el de la figura 4.7a, donde C es la capacidad de la línea y R la resistencia del arrollamiento primario del TT.

Si $R^2 C > 4L$, la descarga es aperiódica y lenta. Si $R^2 C < 4L$, la descarga es oscilante, como se indica en la fig. 4.7b.

A efectos del calentamiento, se considera que toda la energía almacenada en la línea se invierte en calentar el cobre del primario del TT. Esta energía es:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

donde V es la tensión de la línea en el momento de la apertura.

A efectos de los esfuerzos mecánicos, hay que tener en cuenta el valor máximo de la intensidad de descarga.

Para el caso oscilante, es:

$$i_{\max} = \frac{V}{L\omega_1} e^{-\frac{R\pi}{4L\omega_1}}$$

donde

$$\omega_1 = \frac{\sqrt{4L - R^2 C}}{2 L C}$$

es la pulsación natural del circuito.

Para calcular los tiempos t_1 (saturación del TT) y t_2 , podemos utilizar las siguientes fórmulas:

$$t_1 = \frac{B \text{ sat} \times N_1 \times S}{V} \times 10^{-8} \quad [s]$$

$$t_2 = \frac{\pi}{2 \omega_1} \quad [s]$$

donde:

- B sat = Inducción de saturación [Gauss].
- N_1 = Número de espiras del arrollamiento primario.
- S = Sección del núcleo (cm²).
- V = Tensión inicial de descarga (V).

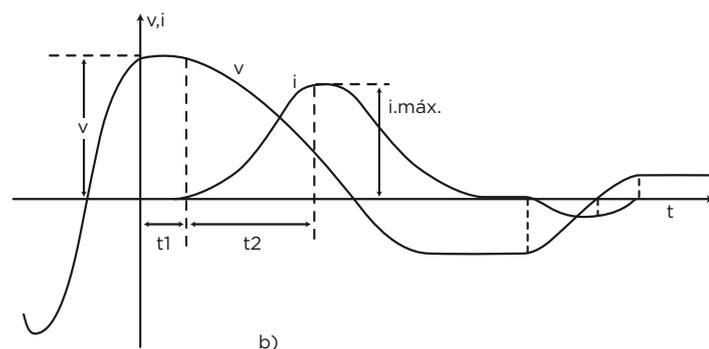
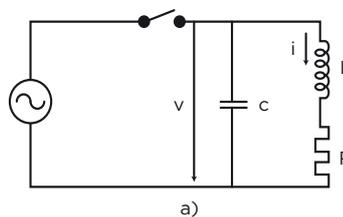


Fig. 4.7

4. EL TRANSFORMADOR DE TENSIÓN

4.9. SOBRETENSIONES

El transformador de tensión se encuentra sometido, como el resto de los aparatos instalados en el lado de alta tensión, una serie de sobretensiones que debe soportar sin que se altere su aislamiento. Recordemos que todo transformador (tanto de tensión como de intensidad) se ensaya durante un minuto a la tensión de ensayo a frecuencia industrial, y está capacitado para soportar la tensión de ensayo con onda de choque correspondiente a su nivel de aislamiento.

Como ejemplo, un transformador de medida, de tensión nominal de aislamiento 72,5 kV eficaces, que tienen en servicio una tensión $U_s = 72,5 / \sqrt{3} = 42$ kV eficaces, se ensaya a 140 kV eficaces ($3,3 U_s$) durante un minuto y soporta 325 kV cresta ($5,5 U_s$) de impulso tipo rayo.

Sin embargo, en los transformadores de tensión, aparece con cierta frecuencia el fenómeno de ferorresonancia serie o paralelo, en función de las características red-transformador.

Este fenómeno es complejo ya que puede ser de tipo monofásico o trifásico, y a frecuencia fundamental, armónica o subarmónica. Por ello, vamos a ver brevemente en qué consisten las ferorresonancias serie y paralelo.

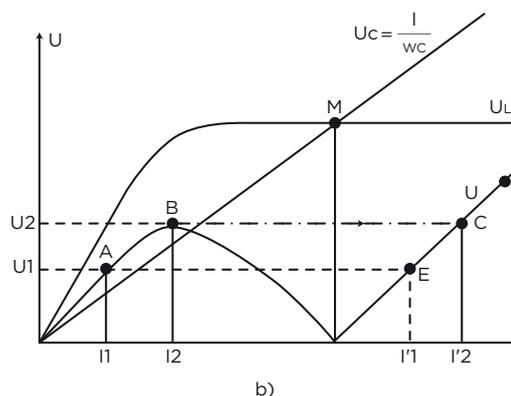
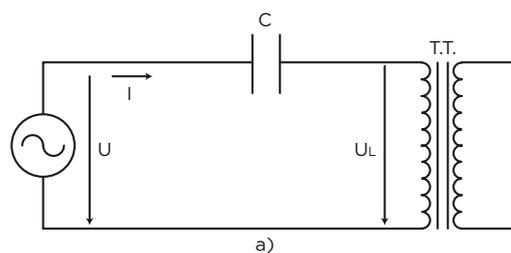
4.9.1. FERRORRESONANCIA SERIE

Supongamos que en el circuito de la fig. 4.8a, donde están en serie la capacidad C y la inductancia saturable del TT, el valor de C es tal, que la recta I/wC corta a U_L en el punto M. (fig. 4.8b)

Si la tensión nominal es U_1 , el punto de funcionamiento es A con una intensidad I_1 . Al producirse una sobretensión superior a U_2 , del punto A pasamos al D, a través de B y C, y al bajar de nuevo la tensión a U_1 , el nuevo punto de equilibrio es el E, donde $I'_1 \gg I_1$.

Si el tiempo que dura esta nueva situación es grande el TT se calienta excesivamente, pudiendo llegar a quemarse.

Para volver al punto de equilibrio A, es necesario reducir la tensión de la red o cargar el TT para que se amortigüe la ferorresonancia. Este fenómeno se produce en los transformadores de tensión capacitivos. También puede aparecer en una red trifásica con neutro a tierra con una fase abierta, si la capacidad es elevada (p. e., disyuntor con condensador de reparto).



> Fig. 4.8

4. EL TRANSFORMADOR DE TENSION

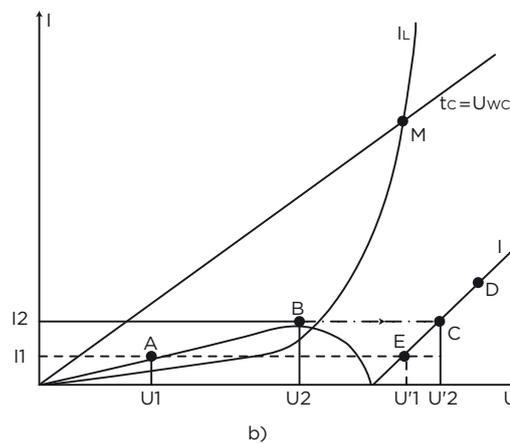
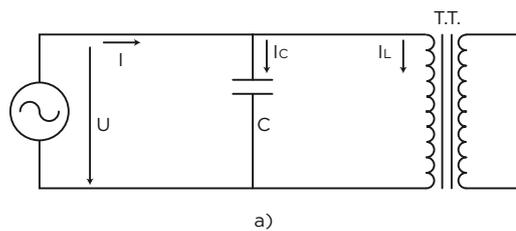
4.9.2. FERRORRESONANCIA PARALELO

En la fig. 4.9a se representa un circuito paralelo. La fig. 4.9b es similar a la fig. 4.8b cambiando I por U y viceversa.

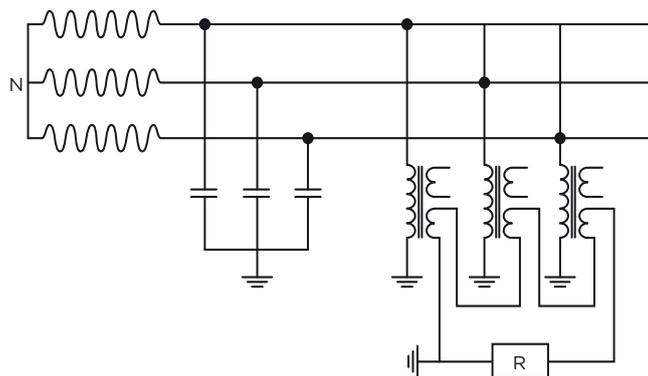
Al analizar ahora la ferorrresonancia, suponemos que el equilibrio se establece para $I = I_1$. Debido a una sobretensión o sobreintensidad pasamos como en el caso serie al punto D y luego al E, donde $U'_1 \gg U_1$ y se produce una sobretensión permanente.

Para que en un red trifásica se produzca este fenómeno, es necesario que el neutro esté aislado. El desplazamiento del neutro respecto a tierra provoca en uno o dos TT una sobretensión que puede ser superior a la compuesta.

Para evitar o amortiguar este fenómeno, es necesario colocar una resistencia de valor adecuado en el triángulo abierto de los terciarios de los TT como se indica en la fig. 4.10. Un valor normal está comprendido entre 25Ω y 50Ω .



> Fig. 4.9



> Fig. 4.10



> Transformadores de tensión inductivos de 123 kV. Transpower (Nueva Zelanda).

4.10. FUNCIONAMIENTO DEL TT CON EL SECUNDARIO EN CORTOCIRCUITO

Se llama “potencia de calentamiento” de un TT a la máxima potencia que puede suministrar en régimen permanente, sin que se excedan los límites de calentamiento, cuando la tensión secundaria es la nominal.

Si la carga secundaria es superior a la correspondiente a la potencia de calentamiento, el TT puede deteriorarse si no se limita el tiempo de funcionamiento.

Cuando el circuito secundario está en cortocircuito, la intensidad secundaria está limitada solamente por la impedancia interna del TT, por lo que el tiempo que el TT puede funcionar en estas condiciones es muy breve.

En algunas normas se exige que este tiempo sea como mínimo 1 segundo.

Se puede proteger el TT, colocando fusibles o disyuntores en el circuito secundario, pero hay que tener en cuenta que un fallo de estos dispositivos puede dar lugar al funcionamiento intempestivo del sistema de protección de la subestación.

Como gran parte de los fallos de los TT por cortocircuito secundario se producen por un mal conexionado de este cortocircuito, resulta práctico colocar fusibles de forma provisional, hasta comprobar que la instalación es correcta.

4.11. ELECCIÓN DEL TRANSFORMADOR DE TENSIÓN

Al realizar la elección del transformador de tensión, debemos tener en cuenta los siguientes puntos:

1. Tipo de instalación, interior o intemperie. Se debe tener en cuenta la altitud, para valores superiores a 1.000 m sobre el nivel del mar.
2. Nivel de aislamiento.
3. Relación de transformación nominal.
4. Clase de precisión.
5. Potencia de precisión.
6. Factor de tensión.
7. Frecuencia nominal.
8. Número de secundarios.
9. Detalles constructivos.

5. OTROS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

5.1. TRANSFORMADORES COMBINADOS DE MEDIDA

Son los aparatos, que dentro de una misma envolvente contienen un transformador de tensión y un transformador de intensidad.

Esta construcción tiene ciertas ventajas económicas, especialmente en alta tensión, donde la porcelana juega un papel importante en el costo del transformador de medida.

También tiene importancia en ciertos casos el menor espacio ocupado en la subestación.

En el diseño de los combinados, hay que tener en cuenta la influencia del T I sobre los errores del TT y viceversa. Dicha influencia está tipificada en la norma.

► Transformadores combinados de 72,5 kV en entrada de línea de subestación. L'ONEE (Marruecos).



5.2. TRANSFORMADORES DE TENSIÓN CAPACITIVOS (TTC)

5.2.1. DEFINICIONES

Son los transformadores de tensión formados por un divisor capacitivo y un elemento electromagnético. El divisor capacitivo (DC) consta de dos condensadores, C_1 y C_2 conectados en serie como se indica en la fig. 5.1, con el fin de obtener un borne de tensión intermedia, al que se conecta una inductancia L_1 y un transformador de tensión intermedia (TTI) de tipo inductivo.

5.2.2. FUNCIONAMIENTO DEL TTC

En la fig. 5.2 se representa el esquema equivalente de un TTC. Este esquema es similar al de la fig. 2.3 teniendo en cuenta que ahora R'_p , representa la resistencia de los arrollamientos del TTI y de la inductancia L_1 , las pérdidas en el hierro de L_1 , y las pérdidas en el dieléctrico de C_1 y C_2 y X'_p representa la

reactancia debido a la capacidad $C_1 + C_2$, a la inductancia L_1 y al primario del TTI. Asimismo,

$$U_p = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

De esta manera, podemos analizar el TTC de forma similar al TT inductivo (Cap. 4). Sin embargo, ahora hay que tener en cuenta también otros factores, que afectan a la precisión, como son: variaciones de frecuencia, variaciones de temperatura y estabilidad en el tiempo. La respuesta de un TTC en régimen transitorio, no es tan rápida como la de un TT inductivo, y en ciertos casos, las exigencias de las protecciones rápidas no permiten la utilización de TTC.

Sin embargo, los TTC, además de su utilización para medida y protección, permiten utilizar la línea alta tensión para comunicación mediante corriente portadora de alta frecuencia.

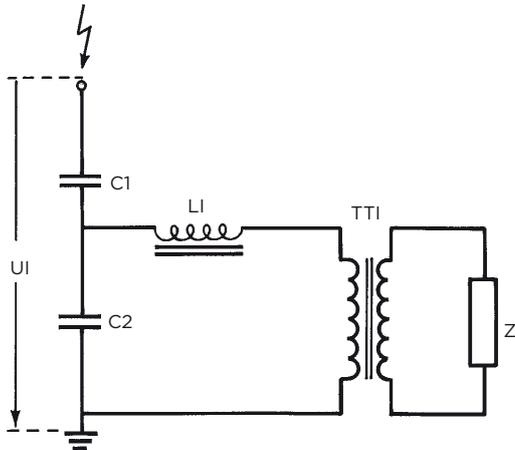


Fig. 5.1

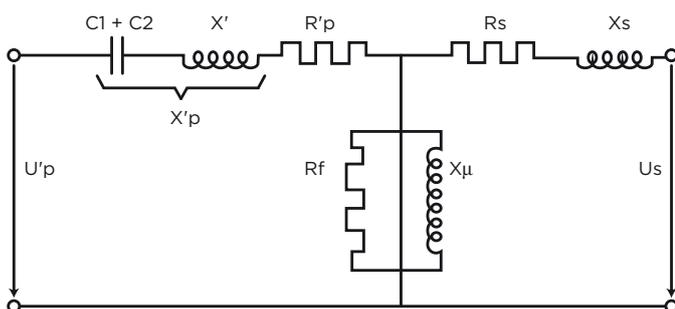


Fig. 5.2

Transformador de tensión capacitivo de 550 kV. UTE (Uruguay)



6. EL AISLAMIENTO DIELECTRICO

6.1. AISLAMIENTO EN TRANSFORMADORES DE MEDIDA

Desde el punto de vista dieléctrico, el transformador de medida, como cualquier máquina eléctrica, evoluciona en función de los nuevos materiales y de las nuevas exigencias.

Para analizar brevemente el estado actual de los TM vamos a considerar 3 casos: a) baja tensión; b) media tensión y c) alta y muy alta tensión.

En baja tensión, el problema dieléctrico es mínimo. Los aislantes utilizados dependen de otras exigencias como: clase térmica, resistencia mecánica, etc. Podemos citar como materiales modernos, cintas aislantes (p. e., Mylar), resinas epoxi y poliuretano para TM moldeados, materiales termoplásticos (ABS, etc.) y termoendurecibles (resinas fenólicas, etc.) para carcasas, etc.

En media tensión (p. e., hasta 72,5 kV) en servicio interior, las resinas sintéticas han permitido reducir notablemente el tamaño de los TM al cumplir la doble misión de aislar el primario, del núcleo y del secundario y de constituir la superficie aislante entre alta tensión y baja tensión en contacto con el aire.

Para servicio intemperie, las resinas cicloalifáticas han sustituido parcialmente a la porcelana, debido a su elevada resistencia a las corrientes superficiales y a la posibilidad de conseguir gran línea de fuga. La experiencia ha mostrado que estas resinas son adecuadas para el servicio intemperie, salvo en los casos de fuerte polución atmosférica de tipo conductor.

En los TT en parte se sigue utilizando aceite mineral como aislante interior, debido a la excelente impregnación de las bobinas. En el caso de utilizar resina como aislante exterior, se puede utilizar gas aislante (p. e., SF₆) para impregnar las bobinas. Hay que tener en cuenta que para evitar las descargas parciales (DP) el aislamiento principal debe carecer de poros, lo que resulta difícil en las bobinas de los TT si la impregnación no es adecuada.

En alta y muy alta tensión el aislamiento externo es bien de porcelana o bien de silicona, y el aislamiento interno es de papel-aceite o gas SF₆.

Un aspecto importante, en el aislamiento papel-aceite, es el secado del papel y la impregnación de aceite.

Durante el secado, se mantiene un vacío, con lo que se llega a un porcentaje de humedad en el papel inferior al 0,2%.

Posteriormente sin perder el vacío, se impregna con aceite mineral, secado previamente también bajo vacío. De esta manera, se consiguen niveles de DP muy por debajo de lo exigido en las normas, y el valor de Tg δ es menor que 0,3%.

Para lograr el máximo aprovechamiento de este dieléctrico hay que estudiar cuidadosamente el campo eléctrico evitando zonas de gradiente elevado.

› Fig. 6.1



6.2. ENSAYOS DE CONTROL DEL AISLAMIENTO

Para asegurar su correcto funcionamiento, en servicio, todos los transformadores se someten a diversos ensayos antes de salir de fábrica. Refiriéndonos al problema dieléctrico, los ensayos pueden ser individuales, de tipo o especiales.

En los ensayos de tipo, se verifica el diseño del transformador en general y pueden ser evitados, con la conformidad del cliente, si el fabricante presenta certificados de ensayo de transformadores del mismo modelo o similar.

En los ensayos individuales, se verifica el aislamiento de cada uno de los transformadores, pudiendo distinguir:

1. Ensayo dieléctrico a frecuencia industrial entre alta tensión y baja tensión.
2. Ensayos de descargas parciales (DP), y tangente del ángulo de pérdidas.
3. Diversos ensayos dieléctricos a frecuencia industrial, entre elementos aislados próximos.

El primer ensayo, consiste en someter el aislamiento entre alta y baja tensión, a gradientes de tensión muy superiores a los que va a tener en servicio, durante un breve período de tiempo, generalmente un minuto. Este ensayo es clásico y permite garantizar un cierto coeficiente de seguridad en el aislamiento. Sin embargo, sucede a menudo que un transformador que haya soportado este ensayo, tenga una vida activa inferior a la prevista. Esto puede ocurrir por pequeños defectos en el aislamiento, que no han podido ser detectados y que han provocado su envejecimiento prematuro. Ante este importante problema, se vienen realizando con éxito los ensayos de verificación de descargas parciales.

En el segundo grupo de ensayos, tenemos primero el ensayo de descargas parciales, que consiste en detectar las pequeñas descargas que se producen entre las paredes de las cavidades que existen en el aislamiento cuando es defectuoso. En la fig. 6.2a, se representa un dieléctrico defectuoso sometido a tensión alterna. La tensión entre las paredes opuestas de la cavidad es superior a la del aislante contiguo, debido a la menor constante dieléctrica del gas.

Asimismo, la rigidez de éste, es inferior a la del resto del aislante, especialmente si existe cierto grado de vacío (ley de Paschen). Por todo ello, se producen descargas entre los extremos de la cavidad, a una tensión de servicio muy inferior a la de rigidez del aislante, que alteran el mismo poco a poco.

Estas descargas son de alta frecuencia y pueden detectarse como se indica en la fig. 6.2b, donde C_1 es la capacidad del dieléctrico en paralelo con la cavidad, C_2 es la capacidad de la cavidad y C_3 la del dieléctrico en serie con ella. La capacidad C_k (de acoplamiento) sirve para detectar más fácilmente la DP (aparente) en la impedancia Z .

Existen diversos procedimientos, según la norma IEC 60270, pero el más adecuado para los TM es la medida de la descarga aparente en pC. En ARTECHE se miden las DP de los transformadores desde hace más de 50 años.

Este ensayo no es destructivo, y por lo tanto, permite verificar las posibles mejoras del aislamiento, en función del tratamiento realizado. También permite verificar si el ensayo dieléctrico a frecuencia industrial ha dañado el aislamiento, contrastando el nivel de las descargas parciales antes y después de dicho ensayo.

El ensayo de la tangente del ángulo de pérdidas ($Tg \delta$) es un excelente indicador de la calidad del tratamiento en los transformadores de papel-aceite y permite conocer la evolución del aislamiento en servicio.

En el tercer grupo de ensayos, podemos incluir los realizados para verificar el aislamiento entre bobinados aislados de un mismo arrollamiento, entre secundarios, etc.

Finalmente, conviene citar el análisis cromatográfico de los gases disueltos en el aceite, para los transformadores de alta tensión que llevan cierto tiempo en servicio. Mediante este ensayo puede detectarse cualquier anomalía, bien sea de tipo térmico, DP, etc., antes de que se produzca el fallo total del aislamiento, pero sólo puede realizarse en laboratorios especializados y su coste es elevado.

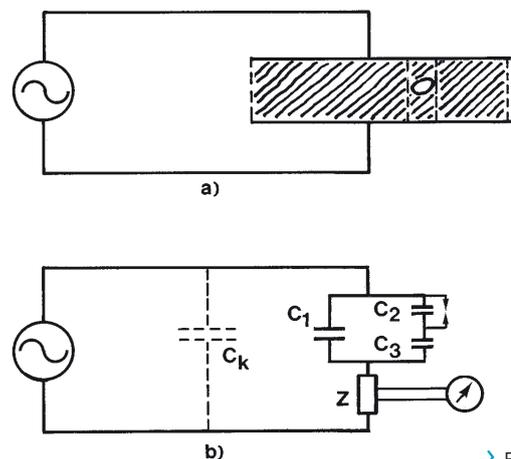


Fig. 6.2

7. NORMAS

7.1. NORMAS CONSULTADAS

Las normas consultadas son: **IEC 61869** y **IEEE C57.13**

7.2. NIVELES DE AISLAMIENTO

En la tabla 7.1. vemos los niveles de aislamiento según las diversas normas.

Algunas normas incluyen también ondas de impulso tipo rayo cortadas y ensayos bajo lluvia.

La tensión de impulso tipo rayo corresponde a la onda 1,2/50 μ s y la de tipo maniobra a la de 250/2500 μ s. Estos ensayos son de tipo.

Tabla 7.1

| Tensión máxima de servicio kVef | IEC | | | Tensión máxima de servicio (kV) | Tension Nominal (kV) | IEEE | | |
|---------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|---------------------------------|----------------------|-----------------------|---------------|----------------|
| | Frecuencia Industrial (kV) | Impulso (kVp) | Maniobra (kVp) | | | Power frequency (kVp) | Impulso (kVp) | Maniobra (kVp) |
| 0,72 | 3 | - | - | 0,66 | 0,6 | 4 | 10 | - |
| 1,2 | 6 | - | - | 1,2 | 1,2 | 10 | 30 | - |
| 3,6 | 10 | 20 / 40 | - | 2,75 | 2,4 | 15 | 45 | - |
| 7,2 | 20 | 40 / 60 | - | 5,60 | 5,0 | 19 | 60 | - |
| 12 | 28 | 60 / 75 | - | 9,52 | 8,7 | 26 | 75 | - |
| 17,5 | 38 | 75 / 95 | - | 15,5 | 15 | 34 | 95/110 | - |
| 24 | 50 | 95 / 125 | - | 25,5 | 25 | 40/50 | 125/150 | - |
| 36 | 70 | 145 / 170 | - | 36,5 | 34,5 | 70 | 200 | - |
| 52 | 95 | 250 | - | 48,3 | 46 | 95 | 250 | - |
| 72,5 | 140 | 325 | - | 72,5 | 69 | 140 | 350 | - |
| 100 | 185 | 450 | - | | | | | |
| 123 | 185 / 230 | 450 / 550 | - | 123 | 115 | 185/230 | 450/550 | - |
| 145 | 230 / 275 | 550 / 650 | - | 145 | 138 | 275 | 650 | - |
| 170 | 275 / 325 | 650 / 750 | - | 170 | 161 | 325 | 750 | - |
| 245 | 395/460 | 950/1050 | - | 245 | 230 | 395/460 | 900/1050 | - |
| 300 | 395 / 460 | 950 / 1050 | 750 / 850 | | | | | |
| 362 | 460 / 510 | 1050 / 1175 | 850 / 950 | 362 | 345 | 575 | 1300 | 825 |
| 420 | 570 / 630 | 1300 / 1425 | 950/1050 | | | | | |
| 550 | 630 / 680 | 1425 / 1550 | 1050 / 1175 | 550 | 500 | 750/800 | 1675/1800 | 1175 |
| 800 | 880/975 | 1950/2100 | 1425/1550 | 800 | 765 | 920 | 2050 | 1425 |

7.3. CONDICIONES AMBIENTALES

En normas IEC las temperaturas extremas normales para servicio intemperie varían desde -40°C hasta $+40^{\circ}\text{C}$ (categorías -40/40; -25/40; -5/40) aunque como especiales se contemplan también desde -50°C hasta $+50^{\circ}\text{C}$ (categorías -50/40; -5/50).

En la IEEE las temperaturas extremas normales varían desde -30°C hasta $+55^{\circ}\text{C}$ aunque también indican que puede haber otras como condición especial. En ambas normas la altitud normal es inferior a 1000 m. Si fuera superior se ha de aumentar el aislamiento externo.

En cuanto a línea de fuga, en la tabla 7.2 se indican los valores mínimos según IEC.

Tabla 7.2

| Nivel de contaminación | Mínima línea de fuga específica nominal entre fase y tierra (mm/kV entre fases) |
|------------------------|---|
| I Ligero | 16 |
| II Medio | 20 |
| III Fuerte | 25 |
| IV Muy fuerte | 31 |

7.4. TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD

7.4.1. INTENSIDADES PRIMARIAS ASIGNADAS

Según IEC

- a. Transformadores con una sola relación de transformación:

10 - 12,5 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 75

y sus múltiplos y submúltiplos decimales. Los valores subrayados son preferentes.

- b. Transformadores con varias relaciones de transformación:

Los valores normales indicados en a) se aplican a la menor intensidad primaria asignada.

7.4.2. INTENSIDADES SECUNDARIAS ASIGNADAS

En general se consideran 1 y 5A, con preferencia de este último valor.

También se admiten otros valores, especialmente 2A y, en los TI destinados a ser conectados en triángulo, los valores anteriores divididos por $\sqrt{3}$.

7.4.3. INTENSIDADES DE CALENTAMIENTO

El transformador de intensidad debe soportar su intensidad de calentamiento nominal, sin que la temperatura de los arrollamientos sobrepase el valor admisible, según la clase térmica del aislamiento.

En la norma IEC se admiten tantos límites de calentamiento como clases de aislamiento. En la norma IEEE/ANSI se admiten tres tipos de transformadores desde el punto de vista de calentamiento: los de 55 y 65°C de elevación de temperatura, tanto para temperaturas ambiente de 30 y 55°C y los de 80°C para aislamiento seco.

En la tabla 7.3 se indican los valores de la intensidad nominal de calentamiento según diversas normas, expresados como un número de veces la I_n .

En la norma IEEE/ANSI se especifica además la variación de la intensidad límite térmica (RF), en función de la temperatura ambiente.

7.4.4. POTENCIAS DE PRECISIÓN

Según IEC, se admiten las siguientes potencias nominales expresadas en voltiamperios:

2,5 - 5 - 10 - 15 - 30 y mayores
Factor de potencia $\cos \beta = 0,8$

La norma IEEE/ANSI difiere en la forma de expresar la potencia. Las cargas son:

B-0,1, B-0,2, B-0,5, B-0,9, B-1,8, B-1, B-2, B-4 y B-8

donde el número que aparece después en la letra B (Burden), indica el valor de la impedancia en ohmios a 60 Hz. Las cargas B-0,1, B-0,2, B-0,5, B-0,9 y B-1,8, se utilizan para medida con $\cos \beta = 0,9$, y las cargas B-1, B-2, B-4 y B-8, se utilizan para protección con $\cos \beta = 0,5$.

La tabla 7.4 muestra las equivalencias aproximadas entre las cargas IEC y IEEE/ANSI.

Tabla 7.3

| Gammas extendidas nominales | |
|-----------------------------|------------------------|
| IEC | IEEE/ANSI |
| 1 | 1 |
| 1,2 - 1,5 - 2 | 1,33 - 1,5 - 2 - 3 - 4 |
| | 3 - 4 |

Tabla 7.4

| Equivalencia de cargas IEC y IEEE/ANSI | |
|--|----------------------------|
| IEC | IEEE/ANSI |
| 2,5 VA | B-0,1 |
| 5 VA | B-0,2 |
| 15 VA | B-0,5 ($\approx 12,5$ VA) |
| 20 VA | B-0,9 ($\approx 22,5$ VA) |
| 30 VA | B-1 (≈ 25 VA) |
| 40 VA | B-1,8 (≈ 45 VA) |
| 50 VA | B-2 |
| 100 VA | B-4 |
| 200 VA | B-8 |

7. NORMAS

7.4.5. CLASES DE PRECISIÓN EN LOS TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD PARA MEDIDA

A continuación reproducimos las tablas 7.5, 7.6, 7.7 y las figuras 7.1 y 7.2 de los errores máximos admitidos en las normas IEC e IEEE.

Tabla 7.5

| Clase de precisión | Normas IEC | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---|------|-----|-----|---|----|-----|-----|-----------------|------|------|------|
| | Error de relación en %, para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad nominal $\pm \epsilon_i$ % | | | | Error de fase para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad nominal $\pm \delta_i$ % | | | | | | | |
| | | | | | Minutos | | | | Centirradiantes | | | |
| | 5 | 20 | 100 | 120 | 5 | 20 | 100 | 120 | 5 | 20 | 100 | 120 |
| 0,1 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 15 | 8 | 5 | 5 | 0,45 | 0,24 | 0,15 | 0,15 |
| 0,2 | 0,75 | 0,35 | 0,2 | 0,2 | 30 | 15 | 10 | 10 | 0,9 | 0,45 | 0,3 | 0,3 |
| 0,5 | 1,5 | 0,75 | 0,5 | 0,5 | 90 | 45 | 30 | 30 | 2,7 | 1,35 | 0,9 | 0,9 |
| 1,0 | 3,0 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 180 | 90 | 60 | 60 | 5,4 | 2,7 | 1,8 | 1,8 |

Tabla 7.6

| Clase de precisión | Normas IEC (Gama extendida) | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---|------|-----|-----|-----|---|----|----|-----|-----|-----------------|------|-----|-----|-----|
| | Error de relación en %, para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad nominal $\pm \epsilon_i$ % | | | | | Error de fase para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad nominal $\pm \delta_i$ % | | | | | | | | | |
| | | | | | | Minutos | | | | | Centirradiantes | | | | |
| | 1 | 5 | 20 | 100 | 120 | 1 | 5 | 20 | 100 | 120 | 1 | 5 | 20 | 100 | 120 |
| 0,2 S | 0,75 | 0,35 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 30 | 15 | 10 | 10 | 10 | 0,9 | 0,45 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 0,5 S | 1,5 | 0,75 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 90 | 45 | 30 | 30 | 30 | 2,7 | 1,35 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |

Tabla 7.7

| Clase de precisión | Normas IEEE / ANSI | | | |
|--------------------|---|--|---|--|
| | Error de relación en %, para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad nominal (*) $\pm \epsilon_i$ % | | Error de fase para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad nominal (*) $\pm \delta_i$ % (minutos) | |
| | 100 (**) | | 10 | |
| 0,3 | 0,3 | | 0,6 | |
| 0,6 | 0,6 | | 1,2 | |
| 1,2 | 1,2 | | 2,4 | |

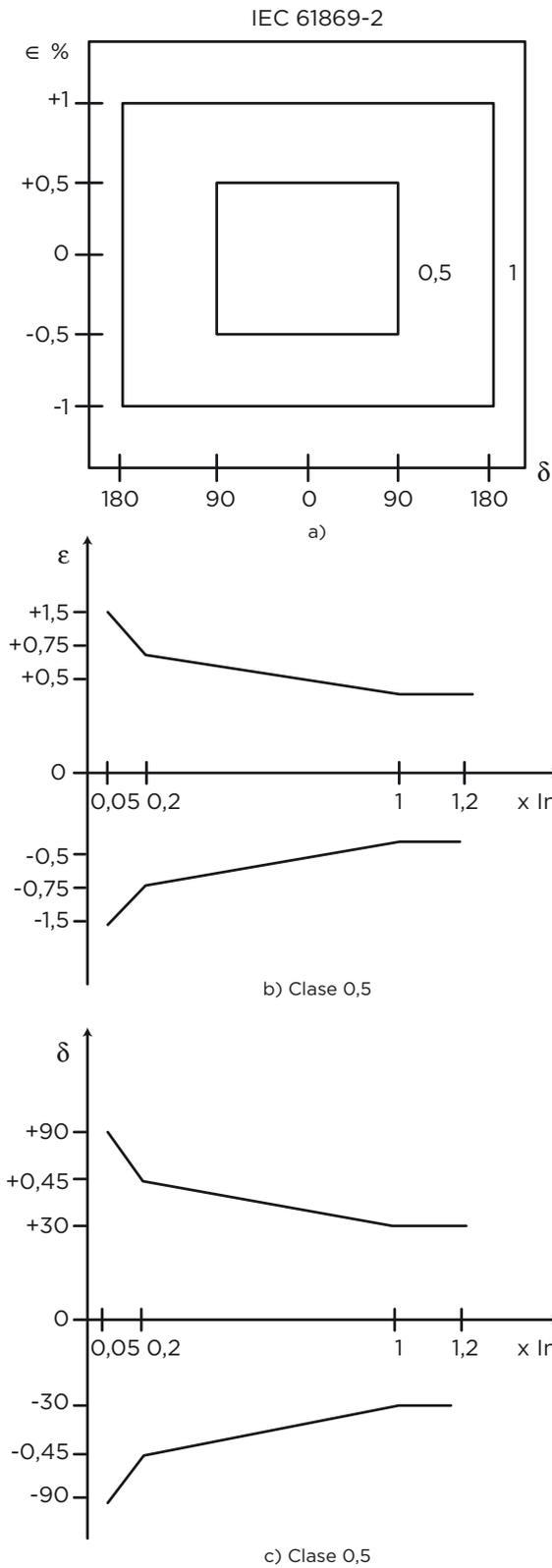
(*) Existe una interdependencia entre los errores permitidos en relación y en fase. Con los datos del cuadro, hay que realizar un gráfico como el de la fig. 7.2a, admitiendo solamente los errores dentro del paralelogramo.

(**) Estos valores deben cumplirse también para el RF (Ver 7.4.3).

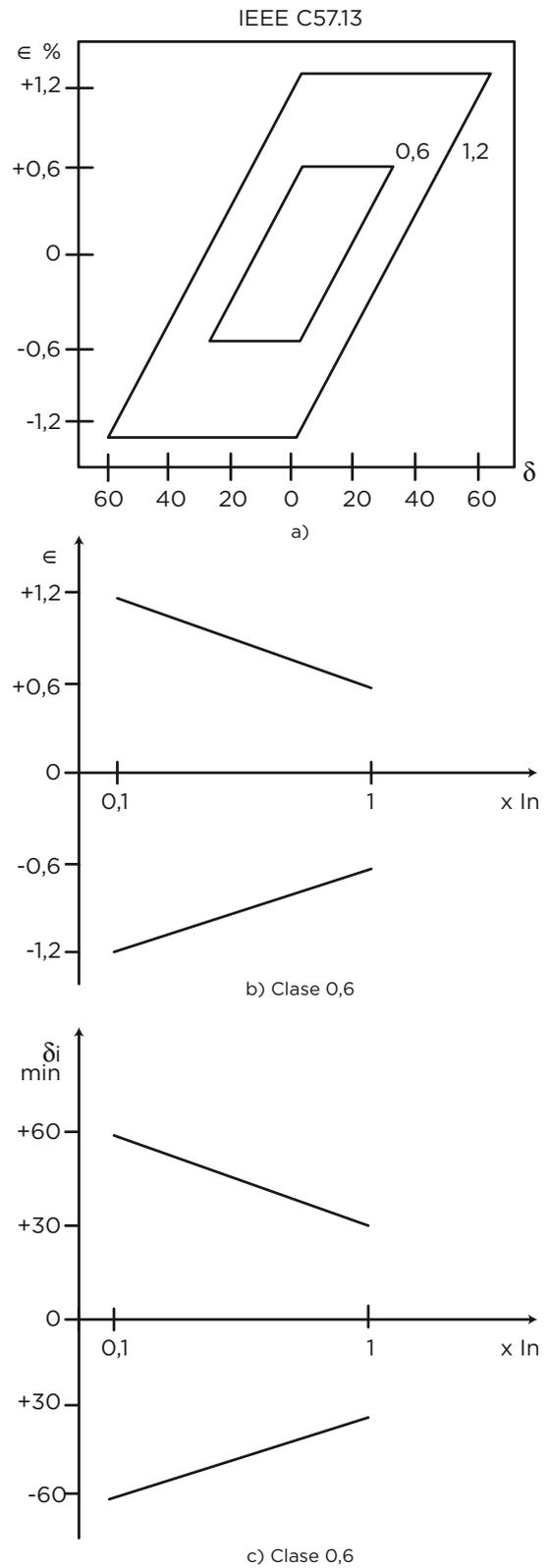
El valor del factor de potencia puede variar entre 0,6 y 1.

La norma IEEE para transformadores de medida de alta precisión, IEEE C57.13.6 define mejores clases de precisión que extienden el rango más allá de los límites tradicionales de IEEE C57.13 mencionados en esta tabla:

- › "Clase de alta precisión 0.15". Significa que desde el 100% de la corriente nominal hasta la intensidad de calentamiento el error debe ser menor de $\pm 0,15\%$ y desde el 5% hasta el 100% de la corriente nominal el error debe ser menor de $\pm 0,3\%$
- › "Clase 0.15S" Significa que desde el 5% de la corriente nominal hasta la intensidad de calentamiento el error debe ser menor de $\pm 0,15\%$.
- › "Clase 0.15 de alta precisión y gama extendida". Significa que desde el 1% de la corriente nominal hasta la intensidad de calentamiento el error debe ser menor de $\pm 0,15\%$



> Fig. 7.1



> Fig. 7.2

7. NORMAS

7.4.6. CLASES DE PRECISIÓN EN LOS TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD PARA PROTECCIÓN

Las normas IEC admiten las clases y errores que se indican en la tabla 7.8. Los secundarios deben ser cargados con su potencia nominal de precisión.

La norma IEEE/ANSI admite las clases C, K y T para los transformadores de intensidad para protección. Los transformadores clase C y K, son aquellos cuyo bobinado está uniformemente repartido y por tanto, las pérdidas de flujo son despreciables. Los errores de estos transformadores pueden verificarse mediante cálculo. Los de clase K incluyen además una restricción en su curva de saturación.

Todos los transformadores (clases C, K y T), deben tener un error de relación menor de 10% a $20 I_n$. La designación se realiza indicando la letra C, K o T, seguida de una cifra igual a la tensión que corresponde al secundario en régimen de sobreintensidad. Por ejemplo: la clase C100 expresa que a $20 I_n = 20 \times 5 = 100A$, la tensión en los bornes secundarios es 100 V (por tanto, la carga es de 1 Ohm).

7.4.7. INTENSIDADES DE CORTOCIRCUITO

La corriente que circula durante un cortocircuito en la línea crea problemas térmicos y dinámicos en el transformador.

Si I_{cc} es la intensidad de cortocircuito de la red y t su duración máxima en segundos (entre 0,5 y 5 seg), la intensidad límite térmica del transformador (expresada para 1 segundo) debe ser tal que se cumpla la condición:

$$I_{th} \geq I_{cc} \sqrt{t}$$

I_{th} e I_{cc} en valor eficaz.

El efecto dinámico se debe a la máxima amplitud de la onda de la corriente de cortocircuito. Por ello, algunas normas relacionan los valores de las intensidades térmica y dinámica.

En el peor de los casos IEC fija que:

$$I_{dyn} \geq 2,5 I_{th}$$

En IEEE/ANSI la intensidad dinámica se expresa como el valor de pico de la componente simétrica de una onda totalmente desplazada. Por tanto,

$$I_{dyn} = 2 \times \sqrt{2} \times I_{th} = 2,83 I_{th}$$

Tabla 7.8

| Clase de precisión | Error de relación para la intensidad nominal $\pm \epsilon_i$ % | Norma IEC | | Error compuesto para la intensidad límite de precisión Σ_c % |
|--------------------|---|---|----------------|---|
| | | Error de fase para la intensidad nominal δ_i | | |
| | | Minutos | Centirradianes | |
| 5P | ± 1 | ± 60 | $\pm 1,8$ | 5 |
| 10P | ± 3 | - | - | 10 |



7. NORMAS

7.4.8. DESIGNACIÓN Y MARCADO DE BORNES

Los bornes deberán estar marcados de una forma clara e indeleble sobre su superficie o en su proximidad inmediata. Según la norma IEC, se debe utilizar la letra P para el primario y la letra S para el secundario. En la tabla 7.9 vemos algunos ejemplos de marcado.

Según la norma IEEE/ANSI se debe utilizar la letra H para el primario y la letra X para el secundario. Si existen varios secundarios, se pueden utilizar las letras Y, Z, V, etc. La polaridad viene indicada por un número después de cada letra: por ejemplo, H1, H2, X1, X2, etc., correspondiendo los números impares a los bornes que son de la misma polaridad.

7.4.9. DATOS QUE DEBEN CONSIGNARSE EN LA PLACA DE CARACTERÍSTICAS

Según la norma IEC, todos los transformadores de intensidad deben indicar, por lo menos, los siguientes datos:

- El nombre del fabricante o una indicación que permita fácilmente su identificación.
- El número de serie o el tipo de aparato y el año de fabricación.
- La relación de transformación nominal en la forma:

$$K_n = I_{pn} / I_{sn}$$
 (ejemplo: $K_n = 100/5$)
- La frecuencia asignada. (Hz)
- Las potencias de precisión, las clases de precisión y la designación de los bornes correspondiente a cada arrollamiento.
- La tensión más elevada para el material y su nivel de aislamiento.
- Las intensidades de cortocircuito térmica y dinámica nominales en kA.
- Peso en kg.
- Temperatura de servicio.
- Clase mecánica.

En los transformadores de baja tensión, no son obligatorias las indicaciones f) y g).

Los transformadores de intensidad para medida deberán indicar además, si procede, el factor límite de seguridad (en la forma $F_s \leq x$), correspondiente a la carga de precisión indicada.

Para los transformadores de gama extendida, se anotará el grado de extensión a continuación de la clase de precisión. (Ejemplo: 15 VA clase 0,5 extensión 150%).

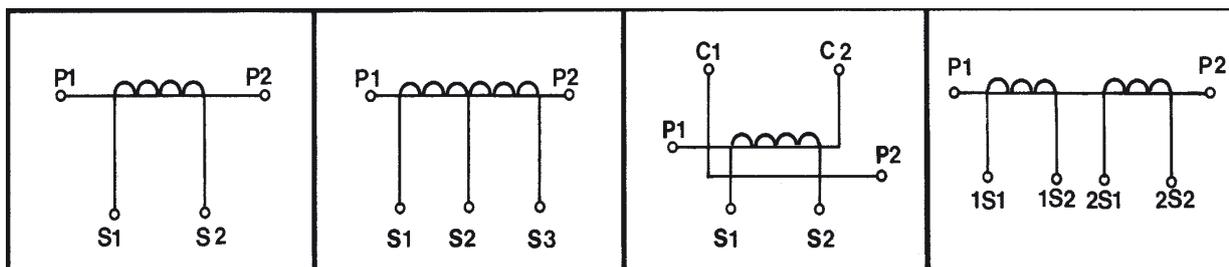
Los transformadores de intensidad para protección también deberán indicar el factor límite de precisión (ejemplo: 30 VA clase 5P10).

7.4.10. ENSAYOS INDIVIDUALES O DE RUTINA

Son los ensayos a los que se someten todos los transformadores. Las normas IEC consideran los siguientes ensayos como de rutina:

- Verificación del marcado de los bornes. Consiste en verificar que las marcas de los bornes son correctas.
- Ensayo dieléctrico a frecuencia industrial del arrollamiento primario. El aislamiento debe soportar, durante 1 minuto, la tensión de ensayo a frecuencia industrial correspondiente a su nivel de aislamiento, aplicada entre el primario y el o los arrollamientos secundarios conectados a tierra (Ver tabla 7.1). Si el arrollamiento primario está subdividido en dos o más secciones, cada sección debe soportar durante 1 minuto una tensión de valor eficaz 3kV, entre ella y todas las demás secciones.
- Ensayo dieléctrico a frecuencia industrial de los arrollamientos secundarios. Cada arrollamiento secundario debe soportar, durante 1 minuto, una tensión de valor eficaz 3kV, entre sí y los restantes arrollamientos secundarios puestos a tierra.

Tabla 7.9



7. NORMAS

d. Ensayo de sobretensión entre espiras. Se verifica cada arrollamiento secundario durante 1 minuto a la tensión inducida (si es menor que 4,5 kV de cresta), alimentando el arrollamiento primario con su intensidad nominal, estando el secundario abierto o viceversa. Si la tensión que aparece en los bornes del secundario es superior a 4,5kV de cresta, se ensaya con esta tensión.

e. Ensayos concernientes a la precisión. En los transformadores de intensidad para medida y para protección, se realizan los ensayos destinados a comprobar su conformidad con las indicaciones de las tablas de las normas correspondientes.

En los transformadores de intensidad para protección, los ensayos relativos al error compuesto se deben efectuar según el método de excitación, que consiste en determinar la intensidad de excitación (para la frecuencia nominal), aplicando al secundario una tensión prácticamente inusoidal de valor eficaz igual al producto del factor límite de precisión por la intensidad secundaria nominal y por la suma vectorial de la impedancia de la carga y de la impedancia del arrollamiento secundario del transformador.

f. Descargas parciales. Este ensayo se debe realizar siempre y cuando la U_m no sea menor de 7,2 kV.

En la tabla 7.10 se muestran los valores límites en la norma CEI para el nivel de descargas parciales (en pC) que no deben superarse a los niveles de tensión indicados después de un preacondicionamiento realizado con un nivel de tensión que equivalga al 100 u 80% de la tensión de ensayo dieléctrico a frecuencia industrial.

7.4.11. ENSAYOS DE TIPO

Son los ensayos a los cuales se somete un solo transformador de cada modelo. Estos ensayos podrán ser evitados si el fabricante presenta certificados de ensayo de transformadores de modelos similares que sean aceptados por el comprador.

Según la norma IEC, son los siguientes:

a. Ensayo de cortocircuito. Consiste en verificar la resistencia de los transformadores a las intensidades límite térmicas y dinámicas nominales.

Como la realización de estos ensayos es siempre muy costosa, en general se suele dar por cumplido el aspecto térmico si la densidad adoptada por el constructor no es superior a 180 A/mm² para cobre y 120 A/mm² para aluminio, y en el aspecto dinámico, si el constructor posee ensayos de otros modelos de configuración dimensional y fijación mecánica similares a los del aparato en cuestión.

b. Ensayo de calentamiento. El transformador debe soportar en permanencia, sin exceder los límites de calentamiento, una intensidad primaria igual a su intensidad de calentamiento, indicada en 7.4.3, en las condiciones normales de funcionamiento.

c. Ensayos de impulso tipo rayo y tipo maniobra.

Normalmente, en tipo rayo se aplican 15 impulsos consecutivos de polaridad positiva y negativa con ondas plenas de 1,2/50 μ s y en tipo maniobra, 15 impulsos positivos plenos de 250/2500 μ s. aunque cuando la tensión más elevada del material es ≥ 300 Kv tan solo son 3 impulsos de cada polaridad para la modalidad tipo rayo.

Tabla 7.10

| Tipo de transformador y conexión | Tipo de conexión a tierra | Tensión de medida descargas parciales (kV ef) | Nivel admisible de DP/pC | |
|--|--|---|--------------------------|--------|
| | | | Tipo de aislamiento | |
| | | | Líquido | Sólido |
| Transformadores de tensión fase-tierra y de intensidad | Neutro puesto a tierra | U_m | 10 | 50 |
| | | $1,2 U_m / \sqrt{3}$ | 5 | 20 |
| | Neutro aislado o no efectivamente a tierra | $1,2 U_m$ | 10 | 50 |
| | | $1,2 U_m / \sqrt{3}$ | 5 | 20 |
| Transformadores de tensión fase-fase | Neutro puesto a tierra | $1,2 U_m$ | 5 | 20 |
| | Neutro aislado o no efectivamente a tierra | $1,2 U_m$ | 5 | 20 |

7. NORMAS

- d. Ensayos bajo lluvia para los transformadores de servicio intemperie. Son ensayos destinados a verificar la validez del aislamiento externo.

Se aplica al ensayo dieléctrico a frecuencia industrial o el de impulso tipo maniobra, en función de la tensión más elevada del material.

- e. Medida de la tensión de radiointerferencia. Son pruebas destinadas a la aparición de efecto corona (descargas externas) y su limitación en orden a no perturbar las transmisiones radioeléctricas.
- f. Ensayos concernientes a la precisión. En los transformadores de intensidad para medida, puede considerarse como ensayo de tipo la verificación de la clase de precisión en todos los valores indicados en la tabla correspondiente.

Además se debe demostrar que cumple con el factor de seguridad utilizando el método de sobreintensidad o el de excitación de forma similar al factor límite de precisión de los transformadores para protección.

En los transformadores de intensidad para protección, se admiten como ensayo de tipo la verificación del error compuesto por el método de sobreintensidad primaria, además del método de excitación.

7.4.12. ENSAYOS ESPECIALES

Son ensayos que deben acordarse entre fabricante y comprador, habitualmente muy costosos. Son ensayos de diseño que justifican el comportamiento de una determinada familia de transformadores. Según la norma IEC, entre otros estarían:

- a. Impulso cortado tipo rayo. En combinación con el ensayo de impulso tipo rayo de polaridad negativa, se intercalan dos ondas cortadas.
- b. Ensayos mecánicos. Los transformadores deben soportar esfuerzos mecánicos estáticos (tabla 7.11) que comprenden sollicitaciones en servicio incluidos los debidos al viento y al hielo.

- c. Múltiples impulsos cortados. Ensayo destinado a verificar el comportamiento adecuado de las pantallas de reparto de campo eléctrico ante las ondas de alta frecuencia derivadas de maniobras de seccionadores. Se aplican 600 impulsos cortados de valor reducido (70%) y de polaridad negativa con ensayo de gases disueltos en el aceite antes y después de la aplicación de los mismos. El criterio para evaluar la validez o no del diseño son los incrementos de las concentraciones de gas.

- d. Sobretensiones transferidas a los secundarios. Ensayo que indica la compatibilidad electromagnética de un transformador. Aplicando un impulso escalón en la parte de alta tensión, se verifica qué porcentaje del mismo pasa a la parte de baja tensión.

- e. Ensayo de arco interno. Este ensayo se realiza sobre un transformador real, equipado con todos los accesorios y en condiciones de servicio. Se provocan una falta interna en el transformador y se aplica una corriente que generara la explosión del transformador. Tanto los valores y duración de esta corriente, el tipo de falta provocada y los criterios para superar este ensayo se encuentran recogidos en la norma IEC 61869-1, si bien también se pueden admitir otros acordados entre cliente y fabricante.

- f. Medida de capacidad y $\text{tg } \delta$. Estas dos medidas se hacen en conjunto, antes y después del ensayo dieléctrico a 50 Hz y entre 10 kV y $U_m/\sqrt{3}$. En ensayo de medida de capacidad comprueba la uniformidad de la producción. No hay valores límites, ya que cada diseño tiene su valor propio, el criterio para la superar este ensayo es que no debe haber variación significativa de la capacidad en las diferentes medidas. El ensayo de medida de $\text{tg } \delta$ comprueba la calidad del proceso de secado, que condiciona, en transformadores nuevos, el factor de disipación dieléctrica del aislamiento. El límite recomendado en la norma es 0,5%. En Artech se realiza este ensayo como rutina al 100% de los aparatos.

Tabla 7.11

| Cargas de ensayo estáticas soportadas | | |
|--|--|----------------|
| Tensión más elevada para el material U_m kV | Carga de ensayo estática soportada F_R (N) | |
| | Carga Clase I | Carga Clase II |
| 72,5 a 100 | 1.250 | 2.500 |
| 123 a 170 | 2.000 | 3.000 |
| 245 a 362 | 2.500 | 4.000 |
| ≥ 420 | 4.000 | 6.000 |

7. NORMAS

7.5. TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

7.5.1. TENSIONES PRIMARIAS ASIGNADAS

Los valores de la tensión primaria nominal se encuentran recogidos en la norma IEC 60038 y se pueden ver algunos de ellos en la Tabla 7.12.

En los transformadores de tensión monofásicos que no puedan ser conectados más que entre fase y tierra, se considerarán como tensiones primarias asignadas normalizadas, los valores indicados divididos por $\sqrt{3}$.

En las normas IEEE/ANSI se indican otros valores, existiendo 5 grupos de transformadores de tensión:

Grupo 1: Transformadores que pueden instalarse entre fases en una red de tensión U_p , o entre fase y tierra en una red de tensión $\sqrt{3}U_p$.

Grupo 2: Transformadores que pueden instalarse entre fases o entre fase y tierra, ambos en una red de tensión U_p .

Grupo 3-4-5: Transformadores que solamente pueden instalarse entre fase y tierra.

7.5.2. TENSIONES SECUNDARIAS ASIGNADAS

En casi todas las normas se admiten valores idénticos. La IEC los agrupa como sigue:

Para los transformadores monofásicos utilizados en redes monofásicas, o entre fases de redes trifásicas:

- a. Basado en la práctica de un grupo de países europeos:
100V y 110V
200V para los circuitos secundarios extendidos.
- b. Basado en la práctica de los Estados Unidos y Canadá:
120V para redes de distribución.
115V para redes de transporte.
230V para los circuitos secundarios extendidos.

Para los transformadores monofásicos destinados a ser montados entre fase y tierra en las redes trifásicas para las que la tensión primaria nominal es un número dividido por $\sqrt{3}$, la tensión secundaria nominal debe ser uno de los valores mencionados, dividido por $\sqrt{3}$, conservando así el valor de la relación nominal de transformación.

Tabla 7.12

| Norma IEC | |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| Tensiones nominales de aislamiento kV | Tensiones primarias asignadas V |
| 12 | 11.000 |
| 17,5 | 13.200 - 16.500 |
| 24 | 22.000 |
| 36 | 27.500 - 33.000 |
| 52 | 44.000 |
| 72,5 | 55.000 - 66.000 |
| 123 | 110.000 |
| 145 | 132.000 |
| 245 | 220.000 |
| 420 | 380.000 - 400.000 |
| 550 | 500.000 |

► Ensayo dieléctrico en laboratorio de A.T.



7. NORMAS

7.5.3. RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN

En todas las normas, se pretende que la relación de transformación tenga un valor entero. Por ello, la norma IEC aconseja que la relación nominal de transformación sea uno de los siguientes valores:

10-12-15-20-25-30-40-50-60-80
y sus múltiplos decimales.

7.5.4. FACTOR DE TENSIÓN

Es el factor por el que hay que multiplicar la tensión primaria asignada, para determinar la tensión máxima para la que el transformador debe responder a las especificaciones de calentamiento, durante el tiempo indicado, y la precisión.

En la tabla 7.13 se indican los valores normalizados del factor de tensión admitidos por la norma IEC.

La norma IEEE/ANSI indica un factor de tensión 1,1 para todos los transformadores de tensión en general, en lo que respecta al calentamiento y a la precisión.

Para los transformadores de los Grupos 1 y 3, se llegan a valores de factor de tensión de 1,25 en servicio continuo y 1,73 durante 1 minuto respectivamente, bajo ciertas condiciones de temperatura y de carga.

7.5.5. LÍMITE DE CALENTAMIENTO

En la norma IEC el calentamiento del transformador en régimen permanente no deberá sobrepasar los valores correspondientes a su clase de aislamiento para un factor de tensión 1,2.

Si corresponde además a un factor de tensión 1,5 ó 1,9, deberán ser ensayados a la tensión resultante durante el tiempo indicado, tabla 7.14, partiendo de las condiciones térmicas estables alcanzadas a 1,2 veces la tensión primaria asignada, sin sobrepasar en 10 °C el aumento de temperatura admisible.

7.5.6. POTENCIA DE PRECISIÓN

Según la norma IEC, los valores de la potencia de precisión para un factor de potencia 0,8 (circuito inductivo), expresados en voltiamperios, son:

10-15-25-30-50-75-100-
150-200-300-400-500

Los valores subrayados son preferentes.

La norma IEEE/ANSI admite las cargas de precisión indicadas en la tabla 7.14.

Tabla 7.13. Valores normales del factor de tensión asignada

| Factor de tensión | Tiempo asignado | Modo de conectar el arrollamiento primario y condiciones de puesta a tierra de la red |
|-------------------|-----------------|--|
| 1,2 | Continuo | Entre fases, en cualquier red Entre el punto neutro de los transformadores en estrella y tierra, en cualquier red |
| 1,2 | Continuo | Entre fase y tierra en una red con neutro efectivamente puesto a tierra (apartado 4.23 a) |
| 1,5 | 30 s | |
| 1,2 | Continuo | Entre fase y tierra, en una red con neutro no efectivamente puesto a tierra (apartado 4.23 b) con eliminación automática del defecto a tierra |
| 1,9 | 30 s | |
| 1,2 | Continuo | Entre fase y tierra en una red con neutro aislado (apartado 4.20), sin eliminación automática del defecto a tierra, o en una red compensada por bobina de extinción (apartado 4.21), sin eliminación automática del defecto a tierra |
| 1,9 | 8 h | |

Tabla 7.14

| Designación | Voltiamperios | Factor de pot. |
|-------------|---------------|----------------|
| W | 12,5 | 0,10 |
| X | 25 | 0,70 |
| Y | 75 | 0,85 |
| Z | 200 | 0,85 |
| ZZ | 400 | 0,85 |
| M | 35 | 0,20 |

7. NORMAS

7.5.7. CLASES DE PRECISIÓN EN LOS TRANSFORMADORES DE TENSIÓN PARA MEDIDA

Según las normas la clase de precisión de un transformador de tensión debe cumplirse a la frecuencia asignada en cualquier tensión comprendida entre el 80 y 120% de la tensión asignada y para todas las cargas comprendidas entre 25 y 100% de la de precisión, bajo un factor de potencia de 0,8 inductivo.

En la tabla 7.15 vemos los límites de error de relación y de fase en función de la clase de precisión. Los errores máximos admisibles en la norma IEEE/ANSI corresponden a los puntos situados dentro de los paralelogramos de la fig. 7.3 que deben cumplirse para todas las cargas, desde 0 hasta la nominal, y para las tensiones comprendidas entre 0,9 y 1,1 U_n , con un factor de potencia que puede variar entre 0,6 inductivo y 1.

En la figura 7.4 aparecen gráficamente los límites de error de la norma IEC, para las clases de precisión 0,5 y 1.

7.5.8. CLASES DE PRECISIÓN EN LOS TRANSFORMADORES DE TENSIÓN PARA PROTECCIÓN

Las normas IEC admiten las clases y límites de la tabla 7.16. Los errores no deben sobrepasar los valores de la tabla al 5% de la tensión asignada, y al producto del valor asignado por el factor de tensión (1,2; 1,5 ó 1,9) para cualquier carga comprendida entre el 25 y 100% de la carga nominal con un factor 0,8 inductivo.

Al 2% de la tensión asignada, los límites permitidos son el doble de los indicados en la tabla 7.16, bajo las mismas condiciones de carga.

Tabla 7.15. Límites de error de relación y de fase

| Clase de precisión | Error de relación \pm % | Desfase \pm min. |
|--------------------|---------------------------|--------------------|
| 0,1 | 0,1 | 5 |
| 0,2 | 0,2 | 10 |
| 0,5 | 0,5 | 20 |
| 1 | 1,0 | 40 |
| 3 | 3,0 | No especificado |

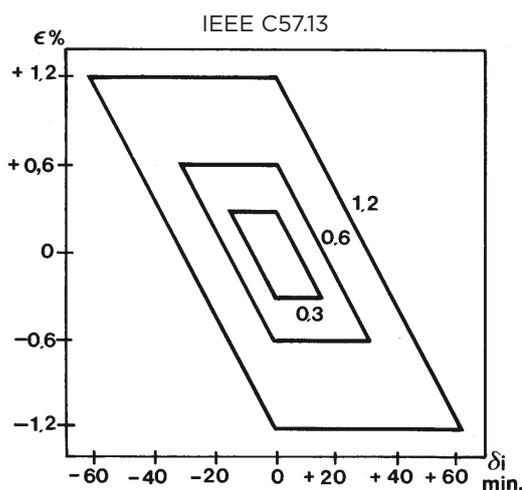


Fig. 7.3

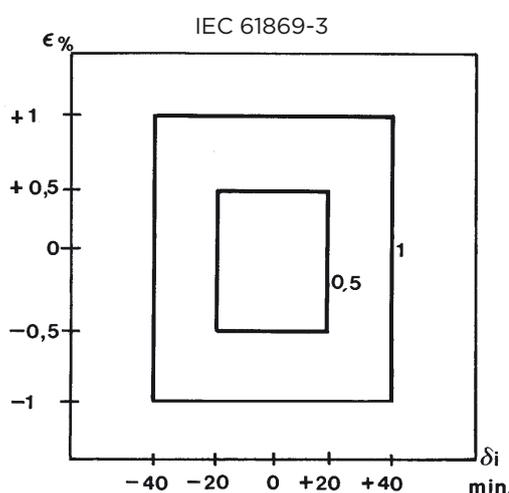


Fig. 7.4

Tabla 7.16. Límites de error de relación y de fase

| Clase de precisión | Error de relación \pm % | Desfase \pm min. |
|--------------------|---------------------------|--------------------|
| 3 P | 3,0 | 120 |
| 6 P | 6,0 | 240 |

7. NORMAS

7.5.9. RESISTENCIA DE LOS TRANSFORMADORES DE TENSIÓN A LOS CORTOCIRCUITOS

Cuando se produce un cortocircuito en los bornes secundarios el transformador sufre esfuerzos mecánicos y térmicos.

En las normas se especifica que todo transformador de tensión debe soportar, sin exceder ciertos límites de temperatura, un cortocircuito secundario durante 1 segundo, cuando esté alimentado con la tensión asignada.

7.5.10. DESIGNACIÓN DE LOS BORNES

En la tabla 7.17 se han recopilado algunos ejemplos de designación de los bornes según IEC. La designación indicada en 7.4.8 para los transformadores de intensidad, según la norma IEEEE/ANSI, es aplicable también a los transformadores de tensión.

7.5.11. DATOS QUE DEBERÁN CONSIGNARSE EN LA PLACA DE CARACTERÍSTICAS

Según la norma IEC, deben consignarse los siguientes datos:

- El nombre del fabricante o una indicación que permita fácilmente su identificación.
- El número de serie y el año de fabricación.
- El tipo de aparato.
- Las tensiones primarias y secundarias asignadas.
- La frecuencia asignada.
- Las potencias de precisión, las clases de precisión y la designación de los bornes correspondientes a cada arrollamiento.
- La tensión más elevada para el material y su nivel de aislamiento asignado, separados por trazos oblicuos.
- El factor de tensión asignado y duración asignada, si es necesario.
- La clase de aislamiento, si es diferente de la clase A.
- Peso en kg.
- Temperatura de servicio.

- Clase mecánica.
- Capacidad total y de cada unidad condensadora (solo para T.T.C.).

7.5.12. ENSAYOS INDIVIDUALES O DE RUTINA

En las normas se consideran los siguientes:

- Verificación del marcado de los bornes.
- Ensayos dieléctricos a frecuencia industrial de los arrollamientos primarios. Consiste en verificar, como en los transformadores de intensidad, que el aislamiento primario soporta durante 1 minuto la tensión de ensayo a frecuencia industrial correspondiente a su nivel de aislamiento.

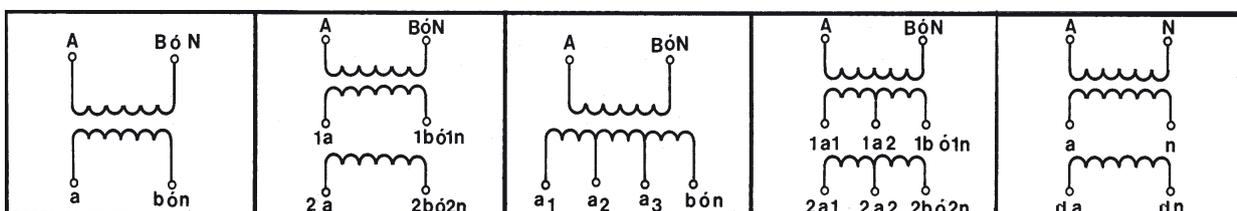
Al realizar este ensayo, hay que distinguir los transformadores para conexión entre fases y entre fase y tierra. Los transformadores conectados entre fases deben soportar un ensayo de tensión aplicada entre los dos bornes primarios, unidos entre sí, y los arrollamientos secundarios unidos a tierra, y otros dos ensayos con tensión inducida.

Estos dos últimos ensayos se pueden realizar aplicando tensión por el secundario o por el primario. En ambos casos la tensión medida en el lado de alta tensión debe ser igual a la tensión de ensayo especificada. Durante este ensayo un borne del arrollamiento secundario estará unido a un borne del arrollamiento primario y ambos puestos a tierra.

Los transformadores conectados entre fase y tierra se ensayan con este segundo método, teniendo cuidado de que el borne primario que va a ser conectado a tierra durante el servicio (N) sea el que se conecte a tierra durante el ensayo. Por otro lado, el borne N se ensayará como si de otro secundario se tratara.

- Ensayo de tensión soportada a frecuencia industrial de los arrollamientos secundarios o entre secciones. Cada arrollamiento o sección secundaria, debe ser ensayado con una tensión de 3kV (valor eficaz) estando todos los demás arrollamientos y secciones unidos entre sí y a tierra.

Tabla 7.17



7. NORMAS

d. Descargas parciales.

En general sirve lo comentado en 7.4.10 f) para transformadores de intensidad.

Cuando la tensión de funcionamiento es muy inferior al nivel de aislamiento especificado, puede haber dificultades en este ensayo debido a la saturación del núcleo. Por ello, es necesario un acuerdo entre fabricante y usuario.

e. Ensayos concernientes a la precisión. Se verifica la conformidad con los errores máximos admisibles, pudiendo realizarse con un número reducido de tensiones y cargas.

d. Ensayo de cortocircuito. Consiste en verificar que el transformador cumple lo especificado en 7.5.9.

e. Medida de la tensión de radiointerferencia. Son pruebas destinadas a la aparición de efecto corona (descargas externas) y su limitación en orden a no perturbar las transmisiones radioeléctricas.

f. Ensayos concernientes a la precisión. Debe verificarse la conformidad con los errores máximos admisibles indicados en la tabla 7.15.

7.5.13. ENSAYOS DE TIPO

En las normas se consideran los siguientes:

a. Ensayo de calentamiento. Consiste en verificar que el transformador cumple lo indicado en 7.5.4.

b. Ensayos de impulso tipo rayo y tipo maniobra.

Se aplican 3 ó 15 impulsos consecutivos de polaridad positiva y negativa con ondas plenas de 1,2/50 μ s para tipo rayo y 15 positivas de 250/2500 μ s para tipo maniobra, dependiendo de la tensión más elevada del material.

c. Ensayos bajo lluvia para los transformadores de servicio intemperie.

Son ensayos destinados a verificar la validez del aislamiento externo. Se aplican ondas tanto de frecuencia industrial como de impulso, en función de la tensión más elevada del material.

7.5.14. ENSAYOS ESPECIALES

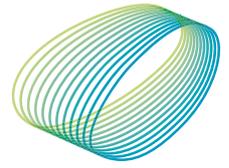
Se aplican las mismas pruebas que a los TI con algunas consideraciones particulares.

El ensayo de medida de capacidad y tg δ se considera ensayo de rutina para T.T.C.

Los esfuerzos mecánicos que debe soportar un TT están en la tabla 7.18.

Tabla 7.18

| Cargas de ensayo estáticas soportadas | | | |
|---|--|-----------------------------|-------|
| Tensión más elevada para el material U_m kV | Carga de ensayo estática soportada F_R N | | |
| | Transformadores de tensión con: | | |
| | Bornes de tensión | Bornes de corriente pasante | |
| Carga Clase I | | Carga Clase II | |
| 72,5 a 100 | 500 | 1.250 | 2.500 |
| 123 a 170 | 1.000 | 2.000 | 3.000 |
| 245 a 362 | 1.250 | 2.500 | 4.000 |
| ≥ 420 | 1.500 | 4.000 | 6.000 |



arteche
Moving together