

Instrumentación – Transformadores de Medida

1 Introducción

En el capítulo “Instrumentos Analógicos - Instrumentos de bobina móvil e imán permanente, puntos 1.8 y 1.9” se estudió la forma de aumentar el alcance de un sistema de medida de DC recurriendo agregado de un transductor de nivel, ya sea un derivador (o shunt) en circuitos de corriente) o un divisor de tensión (o resistencia multiplicadora) en circuitos de tensión.

Sin embargo cuando se trata de adecuar la magnitud de una señal de AC el uso de este tipo de transductor de nivel no siempre es viable debido a las dificultades que se presentan, entre las que cabe señalar:

- Las mediciones en circuitos de alta tensión (y de baja tensión en el caso de sistemas electrónicos) hacen necesario lograr una separación galvánica entre el circuito de potencia y el sistema de medida
- Los instrumentos analógicos de AC poseen un mayor consumo propio lo que acarrea una mayor disipación de potencia si se utilizan resistencias multiplicadoras o derivadoras.
- La frecuencia de trabajo de la señal a medir influye en las impedancias de los elementos divisores de corrientes o tensiones afectando las mediciones.
- Si la cantidad de aparatos a conectar al elemento adaptador de alcance es grande, la potencia que éste debe disipar resulta elevada.

Estas dificultades para la adecuación del alcances en AC se resuelven utilizando *transformadores* como transductor de nivel. Su uso trae además asociadas ventajas tales como:

- Pueden realizarse mediciones remotas, a distancias considerables del punto de conexión del transformador.
- Pueden agregarse nuevos elementos de medida, siempre y cuando posean los mismos alcances
- Se puede uniformar el alcance de los instrumentos normalizando las tensiones y corrientes obtenibles a la salida del transformador.

2 Definiciones básicas

Los transformadores utilizados como transductor de nivel tienen todas las características generales de un transformador de potencia y otras específicas asociadas a los sistemas de medición de tensiones y corrientes.

Dado que el principio de funcionamiento de los transformadores es conocido, se presentan a continuación las definiciones básicas y el modelo (circuito equivalente) del transformador válido para señales de baja frecuencia (hasta algunos cientos de Hz).

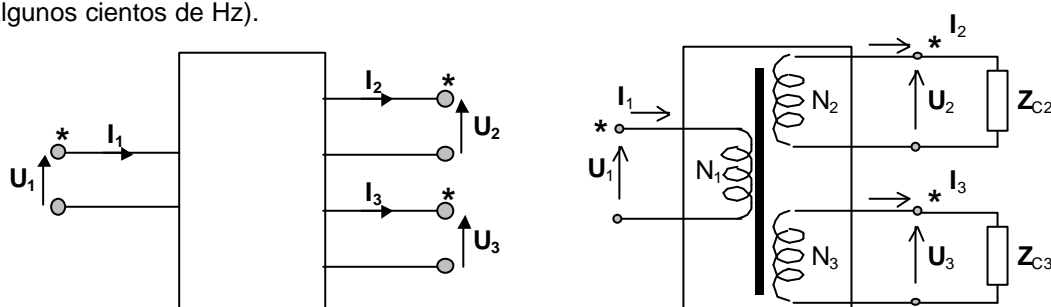


Figura 1

- *arrollamiento primario*: conectado al sistema de alta tensión de donde recibe la excitación el transformador. Identificado con el subíndice 1 (figura 1).
- *arrollamiento secundario*: conectado al sistema de baja tensión, alimentando a la carga. Identificado con el subíndice 2 (figura 1).
- *arrollamiento terciario* (si existe): conectado a otro sistema de baja tensión. Identificado con el subíndice 3 (figura 1).
- *número de espiras*: cantidad de vueltas de los arrollamientos definidos anteriormente
- *relación de espiras*: relación entre el número de espiras primarias y secundarias $a_{12} = N_1/N_2$ o terciarias $a_{13} = N_1/N_3$.
- *relación de tensiones*: relación entre voltaje primario y secundario U_1/U_2 o terciario U_1/U_3 .
- *relación de corrientes*: relación entre corriente primaria y secundaria I_1/I_2 o terciaria I_1/I_3 .

- *bornes correspondientes u homólogos*: se definen de forma tal que, en valores instantáneos, cuando la corriente entra por el borne primario, sale por el borne secundario (terciario). Identificados con * (figura 1)
- r_1 , y r_2 : parámetros que representan la pérdida en el cobre en los arrollamientos, es decir la resistencia a la AC de los arrollamientos primario y secundario (transformador de dos arrollamientos - figura 2).
- x_{D1} , y x_{D2} : parámetros que representan el flujo disperso no concatenado por ambos arrollamientos es decir la reactancia de dispersión de los arrollamientos primario y secundario (transformador de dos arrollamientos - figura 2).
- g_0 y b_0 : parámetros que representan la pérdida en el hierro del núcleo (conductancia) y el flujo concatenado por ambos arrollamientos (susceptancia). Pueden ser dados del lado primario o secundario (transformador de dos arrollamientos - figura 2).
- *transformador ideal*: sistema sin ninguna de las pérdidas representadas por los parámetros anteriores (zona punteada en figura 2). En el mismo se cumple que:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (1) \quad \text{y} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = a^{-1} \quad (2)$$

- *valores referidos al primario*: tensiones, corrientes e impedancias del circuito secundario adecuadas a la escala de los parámetros primarios (transformador de dos arrollamientos – figura 3).

$$U'_2 = a \cdot U_2 \quad (3)$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{a} \quad (4)$$

$$Z'_2 = a^2 \cdot Z_2 \quad (5)$$

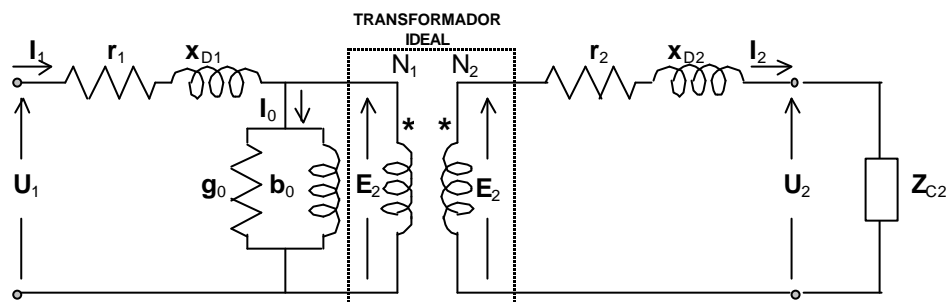


Figura 2: circuito equivalente completo

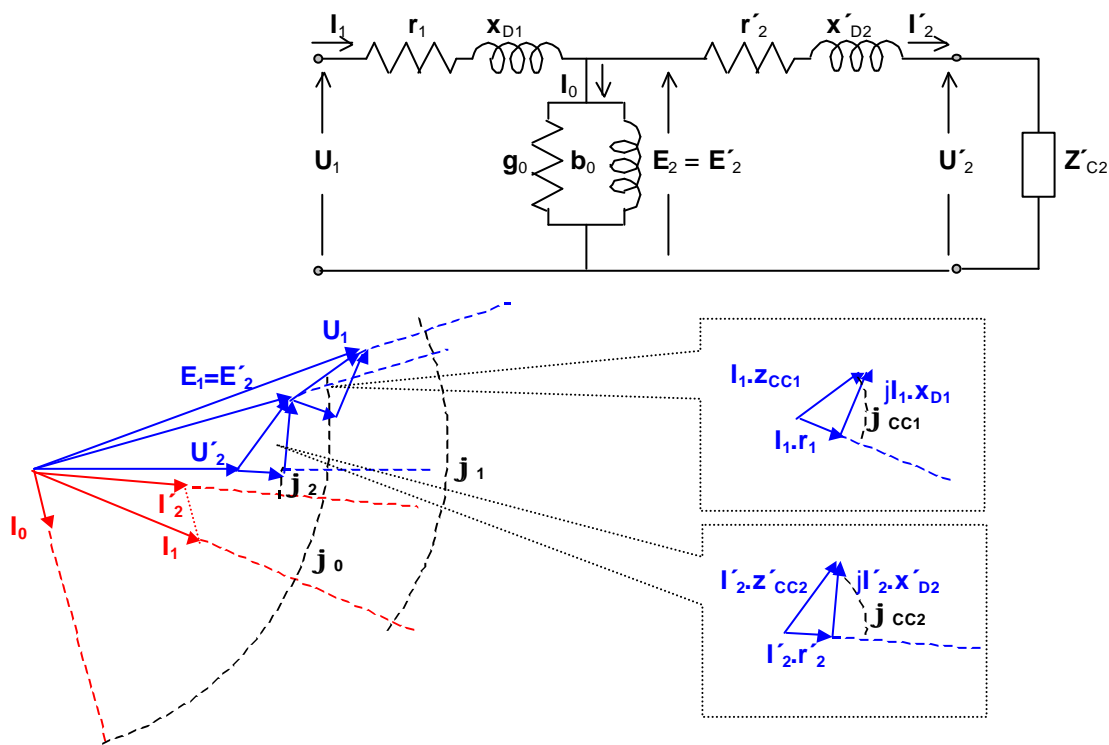


Figura 3: circuito equivalente "reducido" al primario y su diagrama fasorial de tensiones y corrientes primarias y secundarias reducidas al primario

3 Transformadores de medida

Los transformadores utilizados para adecuar los alcances de los sistemas de medición de tensiones y corrientes se denominan *transformadores de medida* a. De acuerdo a la aplicación pueden clasificarse en:

- *transformador de tensión (TV)*: transductor utilizado para adecuar los niveles de tensión a los alcances de los elementos sensores de tensión y/o aislarlos galvánicamente de la red. Su arrollamiento primario se conecta en paralelo con la carga cuya tensión se desea medir. (PT - potential transformer, en inglés).
- *transformador de corriente (TI)*: transductor utilizado para adecuar los niveles de corriente los alcances de los elementos sensores de corriente y/o aislarlos galvánicamente de la red. Su arrollamiento secundario se conecta en serie con la carga cuya corriente se desea medir. (CT - current transformer, en inglés).

Si se consideran transformadores de medida ideales, como se planteó en el punto anterior, se pueden obtener los valores eficaces (módulo) de tensión y corriente en el secundario, a través de las respectivas relaciones ideales K_U y K_I .

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K_{UT} \quad (6) \quad \text{y} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = K_{IT} \quad (7)$$

Sin embargo, en el transformador real existe un apartamiento de las condiciones ideales, debiendo reemplazar los signos de igualdad por los de aproximadamente igual.

3.1 Conexiones y nomenclatura de bornes homólogos

En el caso general de un sistema de medición que emplea TV y TI, el esquema de conexionado es el indicado en la figura 4.

Los bornes marcados con P1 y P2 son los del circuito primario y con S1 y S2 los del secundario.

P1 y S1 son bornes homólogos, tal como se definió en el punto 2. La identificación de éstos bornes puede realizarse de diversas maneras:

- con una marca (punto - , asterisco * , flecha - , etc.)
- con letras **P1 - P2** y **S1 - S2** o **U - V** y **u - v** en el caso de TV.
- con letras **P1 - P2** y **S1 - S2** o **K - L** y **k - l** en el caso de TI.

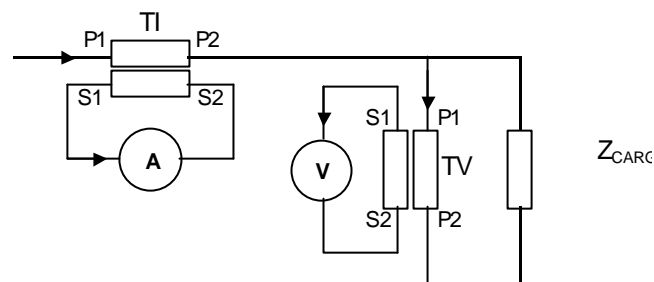


Figura 4

Es muy importante resaltar una diferencia fundamental entre los TV y los TI:

- en el transformador de tensión, el voltaje primario está definido por la caída de tensión en el circuito a medir (Z_{CARGA} en la figura 4) y la corriente en el secundario es función de la impedancia de los instrumentos conectados a él (voltímetro V en este caso, o el valor del paralelo de impedancias).
- en el transformador de corriente, la corriente primaria es fijada por la corriente que circula en el circuito a medir, mientras que la impedancia de los instrumentos conectados en el secundario (amperímetro A en este caso, o el valor de la serie de impedancias) define la tensión en bornes del secundario y por lo tanto en los bornes del primario. Se asume que la impedancia del conjunto TI- Z_{SEC} no influyen en el valor de la corriente primaria.

3.2 Transformador de corriente:

3.2.1 Datos característicos – parámetros metrológicos:

Los TI se especifican mediante un conjunto de parámetros, a saber:

- *corriente primaria nominal* I_{1N} : definida por las características de la carga, es la corriente nominal de trabajo para un régimen normal de funcionamiento.
- *corriente secundaria nominal* I_{2N} : normalizada en los valores 1 A , 5 [A], $1/\sqrt{3}$ [A] y $5/\sqrt{3}$ [A].
- *relación nominal* K_{IN} : cociente entre la corriente primaria nominal y la corriente secundaria nominal; raramente expresada como un número; se indican los valores de I_{1N} / I_{2N} (por ejemplo, 1000 [A] / 5 [A]).
- *carga de precisión o prestación (burden en inglés)*: potencia aparente nominal S_N en bornes del secundario, dada para la corriente secundaria nominal. También definida por la impedancia nominal Z_N que puede conectarse en los bornes secundarios

$$S_N = U_{2N} \cdot I_{2N} = I_{2N}^2 \cdot Z_{2N} \quad (8)$$

El término carga de precisión (norma IRAM) proviene de la publicación del CEI, versión en francés, mientras que prestación ha sido tomado de la norma italiana (*prestazione*).

- **error de relación (e_{REL})** : error introducido en la medición por el apartamiento, para distintos valores de corriente, de la relación entre corrientes primarias y secundarias ($KI = I_1/I_2$) de la relación nominal KI_N . Se define en forma relativa $e_r\% = \frac{KI_N - KI}{KI} \cdot 100$. (9)
- **error de fase (e_{FASE})** : error introducido en la medición por la aparición, para distintos valores de corriente, de una diferencia β de fase entre la corriente secundaria con respecto a la primaria.
- **clase de exactitud**: límite de error admisible tanto en la magnitud como en la diferencia de fase. Según IRAM 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3 – 5 (ver tabla de variación mas adelante). También denominada *clase de inexactitud*.
- **corriente térmica nominal de breve duración I_{th}** : valor eficaz de la corriente primaria que el transformador está en condiciones de soportar durante un segundo, sin sufrir daños que le impidan su funcionamiento, estando el secundario en cortocircuito.
- **corriente dinámica nominal de breve duración I_{dyn}** : valor de cresta de la corriente que el transformador puede de soportar, sin ser dañado eléctrica o mecánicamente por el esfuerzo resultante, estando el secundario en cortocircuito.
- **factor de seguridad nominal F_{SN}** : valor que toma la relación entre corriente primaria y corriente primaria nominal (I_P/I_{PN}) cuando el error de relación es igual al 10%, con el TI cargado con su prestación nominal.
- **tensión nominal de trabajo U_l** : valor eficaz de la tensión de línea a línea del sistema donde va a ser conectado el primario del transformador
- **frecuencia nominal**: frecuencia de referencia a la que fue calibrado el TI; en sistemas estándares de potencia 50 o 60 [Hz]; en sistemas de tracción, 25 [Hz]; sistemas de control y generación para excitación 300 o 400 [Hz]
- **tensión de aislación U_A** : tensión máxima que soporta el TI entre los bornes primarios y secundarios.
- **ejecución (condiciones de trabajo)**: interior o intemperie.
- **aplicación**: medición o protección

3.2.2 Régimen de funcionamiento - tipos de TI:

En el estudio del comportamiento de las redes se distinguen dos regímenes de funcionamiento:

- el **normal** que corresponde a valores cercanos o inferiores a la corriente nominal de diseño de la red
- el de **sobreintensidad** que se pone de manifiesto ante fallas de aislamiento, cortocircuitos, contactos accidentales entre conductores y/o tierra, maniobras inadecuadas, originándose valores de corriente muy superiores al nominal de la carga del circuito. El transformador debe soportar las condiciones impuestas en condiciones de sobreintensidad, sin que esto afecte sus características de funcionamiento normales.

Cuando se deben realizar mediciones de valores correspondientes solo al régimen normal, la corriente secundaria que “ve” el sistema de medida debe limitarse a un valor máximo para que los instrumentos no sean afectados por las altas corrientes debidas al régimen de sobreintensidad.

Si el propósito es utilizar un sistema de protección o registro, es preciso “copiar” en el secundario la “imagen” de la corriente primaria, bajo el régimen de sobreintensidad; el rango de trabajo es ahora muy superior al caso anterior.

Es necesario utilizar entonces dos tipos distintos de TI, de acuerdo a la aplicación:

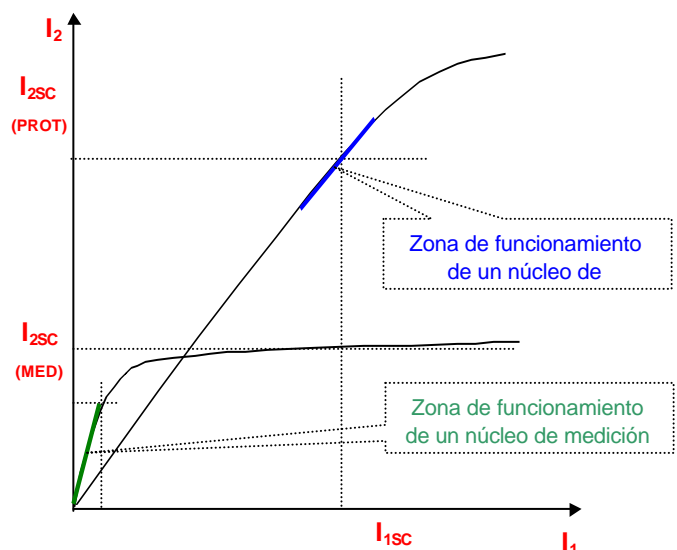


Figura 6

- *transformador de corriente de medición*: utilizado para adecuar los niveles de corriente al alcance de los instrumentos de medida, y/o aislarlos de la red.
- *transformador de corriente de protección*: utilizado para adecuar los niveles de corriente o tensión, a los valores nominales de las protecciones eléctricas de la red o equipos de registros transitorios, y/o aislarlos de la red. Exclusivamente utilizados para éste fin. No usados para medición.

Aprovechando la característica de saturación de los materiales magnéticos se puede definir el límite superior de la corriente secundaria. El comportamiento de los núcleos magnéticos para TI de medición y protección se muestran en la figura 5.

Para un mismo valor de corriente de cortocircuito (I_{ISC}) se observa que en el caso del núcleo de TI de medición la corriente secundaria que se obtiene es mucho menor que el caso de un núcleo de TI de protección.

Normalmente el rango de trabajo de un TI con núcleo para medición es de $0,05.I_N \leq I \leq 1,2.I_N$, siendo el límite superior el nivel de sobrecarga permanente.

En el caso de un TI de protección, el rango de trabajo puede alcanzar hasta $30.I_N$.

3.2.3 Análisis de los errores del TI:

Partiendo del diagrama fasorial del circuito equivalente reducido al primario (figura 3), se determinará el grado de influencia de cada una de las magnitudes de sobre los errores de relación y de fase.

Si se considera un transformador ideal (figura 6), tal como se definió en el punto 2, la ausencia de pérdidas de cualquier tipo dará como resultado una relación nominal igual a una *constante real*. Del diagrama:

$$N_1.I_1 + N_2.I_2 = 0 \quad (10)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = -\frac{N_2}{N_1} = -K_{IT} \quad (11)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = K_{IT} \quad (12)$$

Por lo tanto:

$$I_1 = K_{IT} I_2 = I'_2 \quad (13)$$

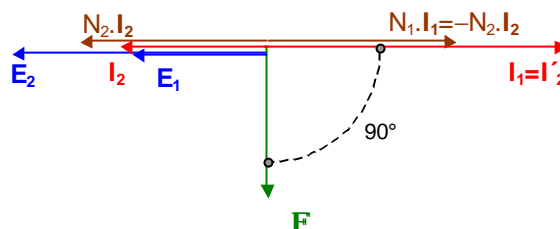


Figura 6

La relación entre las corrientes primaria y secundaria es una constante, y la diferencia angular de 180° , **por lo que los errores de relación y fase son nulos.**

Sin embargo en el transformador real se tiene, como se vio en el punto 2:

1. caídas de voltaje debidas al flujo disperso y la resistencia (pérdidas por calentamiento) de los arrollamientos
2. pérdidas en el núcleo del circuito magnético (histéresis y Foucault)
3. corriente magnetizante para establecer el flujo Φ

Esto implica un apartamiento de las condiciones ideales, **dando ahora errores de relación y fase**

Como se verá, los puntos 2 y 3 son los que influyen principalmente sobre los errores, no aportando a ellos en forma significativa el primer punto.

La figura 7 esquematiza la conexión del sistema de medida en el secundario, con una impedancia $Z_{INS} = |Z_{INS}| \angle \varphi_{INS}$, conformada por la suma de las impedancias de todos los componentes conectados en serie (instrumentos más conductores).

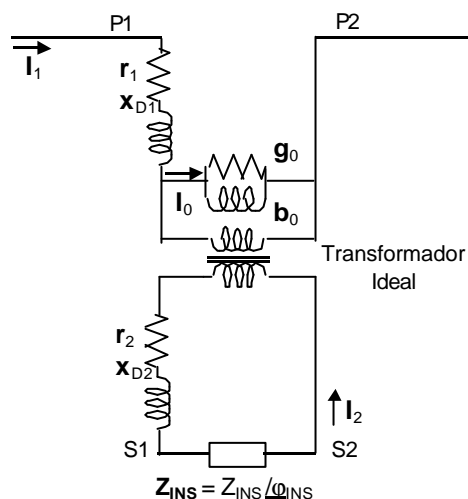


Figura 7

Construyendo ahora el diagrama fasorial (figura 8), se observa que la diferencia entre los fasores I_1 e I'_2 está dada por la corriente de vacío I_0 , compuesta por la corriente magnetizante I_M , en fase con el flujo F , y la de pérdidas en el núcleo I_P , en fase con E_1 .

Es preciso recordar que, dado el comportamiento no lineal de los materiales ferromagnéticos, la corriente I_M es de forma no senoidal, por lo que la dibujada en el diagrama es una corriente equivalente. Esta aproximación no introduce un error apreciable ya que I_M tiene una pequeña magnitud frente a las otras corrientes.

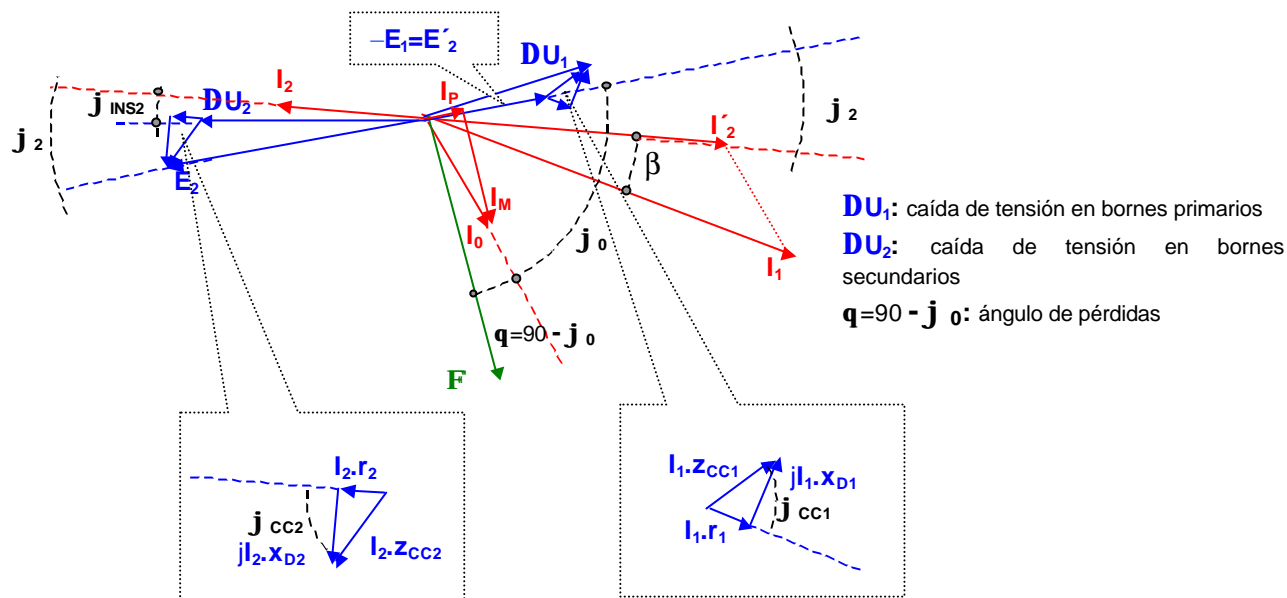


Figura 8

3.2.3.1 error de relación: dado el pequeño valor de β , se puede tomar como diferencia de magnitud entre I_1 e I'_2 la proyección de I_0 , según la dirección de I'_2 :

$$I_1 = I'_2 + I_0 \cdot \cos(\phi_0 - \phi_2) \quad (14)$$

Dividendo por I_2 ambos miembros y multiplicando y dividiendo por K_{IT} el segundo término

$$K_I = \frac{I_1}{I_2} = \frac{I'_2}{I_2} + K_{IT} \frac{I_0}{K_{IT} \cdot I_2} \cdot \cos(\phi_0 - \phi_2) \quad (15)$$

$$\frac{K_I}{K_{IT}} \cong 1 + \frac{I_0}{I_1} \cos(\phi_0 - \phi_2) \quad (16)$$

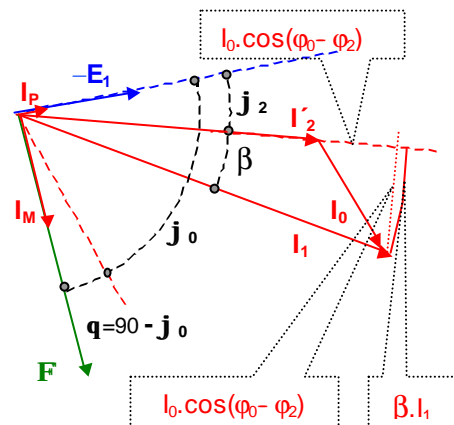


Figura 9

3.2.3.2 error de fase: en este caso se puede calcular β asumiendo que el arco $\beta \cdot I_1$ es aproximadamente igual a la proyección de I_0 , sobre la perpendicular a la dirección de I'_2 :

$$\beta \cdot I_1 = I_0 \cdot \sin(\phi_0 - \phi_2) \quad (17)$$

por lo que el error de fase, en valor absoluto, es:

$$\beta = \frac{I_0}{I_1} \cdot \sin(\phi_0 - \phi_2) \quad (18)$$

3.2.3.3 conclusiones: analizando las ecuaciones (16 y 18) se ve que los errores de relación y fase dependen en forma directa del valor eficaz de la corriente de vacío I_0 , y de las funciones $\cos(\phi_0 - \phi_2)$ y $\sin(\phi_0 - \phi_2)$.

Por lo general los arrollamientos de los TI se construyen cuidadosamente para hacer muy pequeño el flujo disperso, con lo que las reactancias de dispersión son despreciables frente a las resistencias de los arrollamientos. Además las impedancias de los sistemas amperométricos son de característica netamente resistiva. Con estas características se puede considerar a $\phi_2 \cong 0$.

Así, en el caso del error de relación, el apartamiento de la relación de corrientes del valor ideal K_{IT} es función de $I_p = I_0 \cdot \cos \phi_0$, por lo que deberá actuarse sobre ella para disminuir el error de relación.

De igual forma, en el caso del error de fase, disminuyendo la componente magnetizante $I_M = I_0 \cdot \sin \phi_0$, se logra reducir el ángulo β .

3.3 Transformador de tensión :

3.3.1 Datos característicos – parámetros metrológicos:

Al igual que los TI, los TV se especifican mediante un conjunto de parámetros, a saber:

- *tensión primaria nominal* U_N : definida por las características del sistema, es la tensión nominal de trabajo (régimen normal de funcionamiento).
- *tensión secundaria nominal* U_{2N} : normalizada en los valores 100 [V], 110 [V], $100/\sqrt{3}$ [V] y $110/\sqrt{3}$ [V]
- *relación nominal* KU_N : cociente entre la tensión primaria nominal y la tensión secundaria nominal; se indican los valores de U_{1N} / U_{2N} (por ejemplo, 13,2 [KV] / 0,11[KV]).
- *carga de precisión o prestación (burden en inglés)*: potencia aparente nominal S_N en bornes del secundario, dada para la tensión secundaria nominal. También definida por la impedancia nominal Z_{2N} que puede conectarse en los bornes secundarios

$$S_N = U_{2N} \cdot I_{2N} = I_{2N}^2 \cdot Z_{2N} \quad (19)$$

El término carga de precisión (norma IRAM) proviene de la publicación del CEI, versión en francés, mientras que prestación ha sido tomado de la norma italiana (*prestazione*).

- *error de relación* (e_{REL}) : error introducido en la medición por el apartamiento, para distintos valores de la tensión, de la relación entre tensiones primarias y secundarias ($KU = U_1/U_2$) de la relación nominal KU_N . Se define en forma relativa $e_r\% = \frac{KU_N - KU}{KU} \cdot 100$ (20)
- *error de fase* (e_{FASE}) : error introducido en la medición por la aparición, para distintos valores de tensión, de una diferencia β de fase entre la tensión secundaria con respecto a la primaria.
- *clase de exactitud*: límite de error admisible tanto en la magnitud como en la diferencia de fase. Según IRAM 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3 – 5 (ver tabla de variación mas adelante). También denominada *clase de inexactitud*.
- *frecuencia nominal* : frecuencia de referencia a la que fue calibrado el TV; en sistemas estándares de potencia 50 o 60 [Hz]; en sistemas de tracción, 25 [Hz]; sistemas de control y generación para excitación 300 o 400 [Hz]
- *tensión de aislación* U_A : tensión máxima que soporta el TU entre los bornes primarios y secundarios.
- *ejecución (condiciones de trabajo)* : interior o intemperie.
- *aplicación* : medición, protección, control

3.3.2 Régimen de funcionamiento - tipos de TU:

El comportamiento de las redes de servicio eléctrico se caracteriza por un suministro de energía a un nivel de tensión determinado, el cual puede variar dentro de límites bien definidos bajos *condiciones normales de funcionamiento*. En redes con tensiones mayores a 220 KV un incremento del 30% por encima del nominal puede comprometer seriamente las aislaciones del sistema. También, tensiones muy por debajo del valor nominal, deben ser evitadas para proteger a las cargas conectadas. Es por ello que, además de los sistemas de medición y registro, existen sistemas de regulación y protección que mantienen el nivel de tensión dentro de los límites establecidos y, si esto no se cumple por *condiciones anormales de funcionamiento*, efectúan la desconexión del alimentador de la red.

Por lo expuesto el comportamiento del TU puede analizarse como si fuera un transformador de potencia, con una carga muy pequeña en el secundario.

Como en el caso de los TI se puede realizar una clasificación según sea el uso del TV, difiriendo los valores de tensión secundarios:

- *transformador de tensión de medición*: utilizado para adecuar los niveles de tensión al alcance de los instrumentos de medida, y/o aislarlos de la red.
- *transformador de corriente de protección o control*: utilizado para adecuar los niveles de tensión, a los valores nominales de las protecciones eléctricas y control de la red, y/o aislarlos de la red.

3.3.3 Análisis de los errores del TU:

Partiendo del diagrama fasorial del circuito equivalente reducido al primario (figura 3), se determinará el grado de influencia de cada una de las magnitudes de sobre los errores de relación y de fase.

Considerando transformador ideal (figura 10), igual que en el punto 3.2.3, la ausencia de pérdidas de cualquier tipo dará como resultado una relación nominal igual a una *constante real*. Del diagrama:

$$U_1 = - E_1 \quad (21) \quad \text{y} \quad E_2 = U_2 \quad (22)$$

$$E_1 = -j\sqrt{2} \pi \cdot f \cdot N_1 \cdot F_{\max} \quad (23)$$

$$E_2 = -j\sqrt{2} \pi \cdot f \cdot N_2 \cdot F_{\max} \quad (24)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = -\frac{E_1}{E_2} = -\frac{N_1}{N_2} = -K_{IT} \quad (25)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K_{IT} \quad (26)$$

Por lo tanto:

$$U_1 = K_{UT} U_2 = U'_2 \quad (27)$$

La relación entre las tensiones primaria y secundaria es una constante, y la diferencia angular de 180° , **por lo que los errores de relación y fase son nulos.**

Sin embargo en el transformador real se tiene, como se vio en el punto 2:

1. caídas de voltaje debidas al flujo disperso y la resistencia (pérdidas por calentamiento) de los arrollamientos
2. pérdidas en el núcleo del circuito magnético (histéresis y Foucault)
3. corriente magnetizante para establecer el flujo Φ

Esto implica un apartamiento de las condiciones ideales, **dando ahora errores de relación y fase**

Como se verá, los puntos 2 y 3 no aportan a los errores en forma significativa, y el primero es el que influyen principalmente sobre ellos.

La figura 11 esquematiza la conexión del sistema de medida en el secundario, con una impedancia $Z_{INST} =$

$|Z_{INST}| \angle \varphi_{INS}$, conformada por la combinación de las impedancias de todos los instrumentos conectados en paralelo, mas los conductores de conexión, si bien esta es despreciable frente a la de los instrumentos.

Construyendo ahora el diagrama fasorial (figura 12), se observa que la diferencia entre los fasores U_1 y U'_2 está dada por las caídas de tensión, debidas a I_1 e I_2 , en las resistencias y reactancias de los arrollamientos primarios y secundarios.

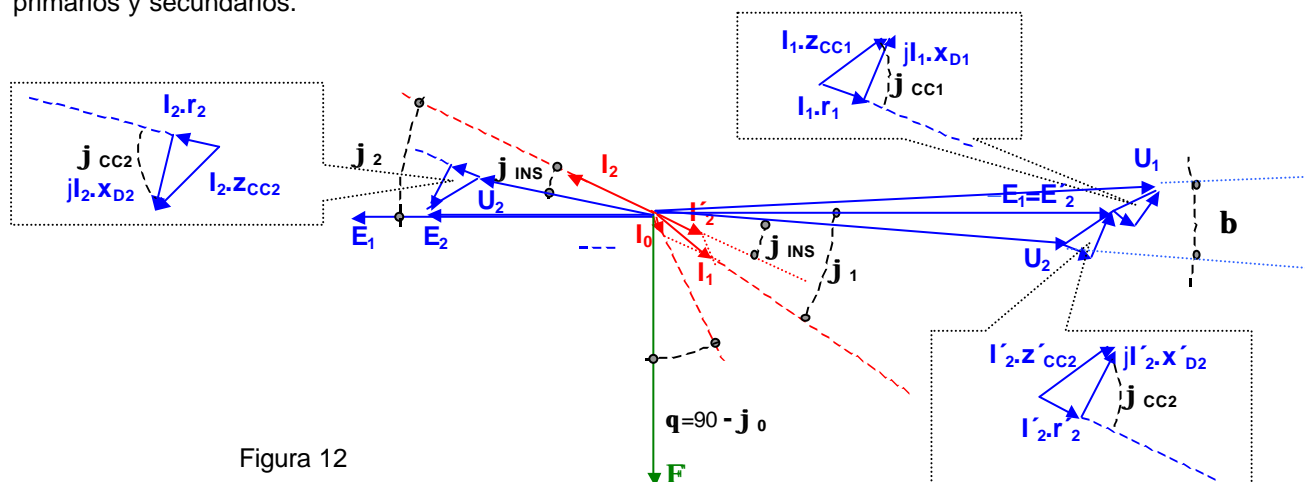


Figura 12

3.3.3.1 error de relación: dado el pequeño valor de β y la característica prácticamente resistiva de la Z_{INS} , la diferencia de magnitud entre U_1 y U'_2 se puede tomar como la proyección de las caídas de tensión $I'_2 \cdot Z'_{CC2}$ y $I_1 \cdot Z_{CC1}$ según la dirección de U'_2 . Como I_1 es la composición de I'_2 e I_0 , entonces $I_1 \cdot Z_{CC1}$ se puede separar en $I'_2 \cdot Z_{CC1}$ e $I_0 \cdot Z_{CC1}$ (figura 13).

$$U_1 = U'_2 + I'_2 \cdot r'_2 \cdot \cos \varphi_{INS2} + I'_2 \cdot x'_{D2} \cdot \sin \varphi_{INS2} + I'_2 \cdot r_1 \cdot \cos \varphi_{INS2} + I'_2 \cdot x_{D1} \cdot \sin \varphi_{INS2} + I_0 \cdot r_1 \cdot \cos \varphi_0 + I_0 \cdot x_{D1} \cdot \sin \varphi_0 \quad (28)$$

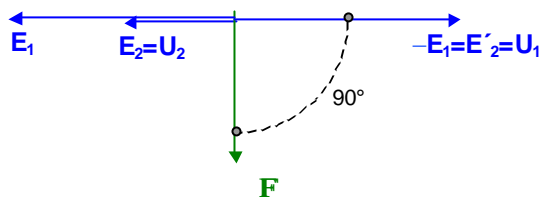


Figura 10

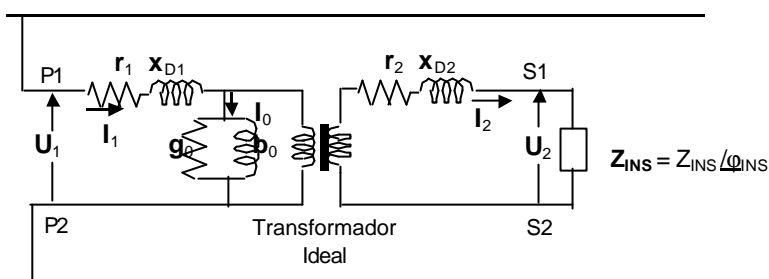


Figura 11

como, $r'_2 + r_1 = r_{CC}$, $x'_{D2} + x_{D1} = x_{CC}$, $I_0 \cos \varphi_0 = I_P$ y $I_0 \sin \varphi_0 = I_M$

$$U_1 = U'_2 + I'_2 \cdot (r_{CC} \cos \varphi_{INS2} + x_{CC} \sin \varphi_{INS2}) + I_P \cdot r_1 + I_M \cdot x_{D1} \quad (29)$$

Dividiendo por U_2 ambos miembros y multiplicando y dividiendo por KU_T el segundo y tercer término del segundo miembro:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{U'_2}{U_2} + \frac{KU_T}{KU_T} \frac{I'_2}{U_2} \cdot (r_{CC} \cos \varphi_{INS2} + x_{CC} \sin \varphi_{INS2}) + \frac{KU_T}{KU_T} \frac{1}{U_2} \cdot (I_P \cdot r_1 + I_M \cdot x_{D1}) \quad (30)$$

$$\frac{KU}{KU_T} = 1 + \frac{I'_2}{U'_2} \cdot (r_{CC} \cos \varphi_{INS2} + x_{CC} \sin \varphi_{INS2}) + \frac{I_P}{U'_2} r_1 + \frac{I_M}{U'_2} x_{D1} \quad (31)$$

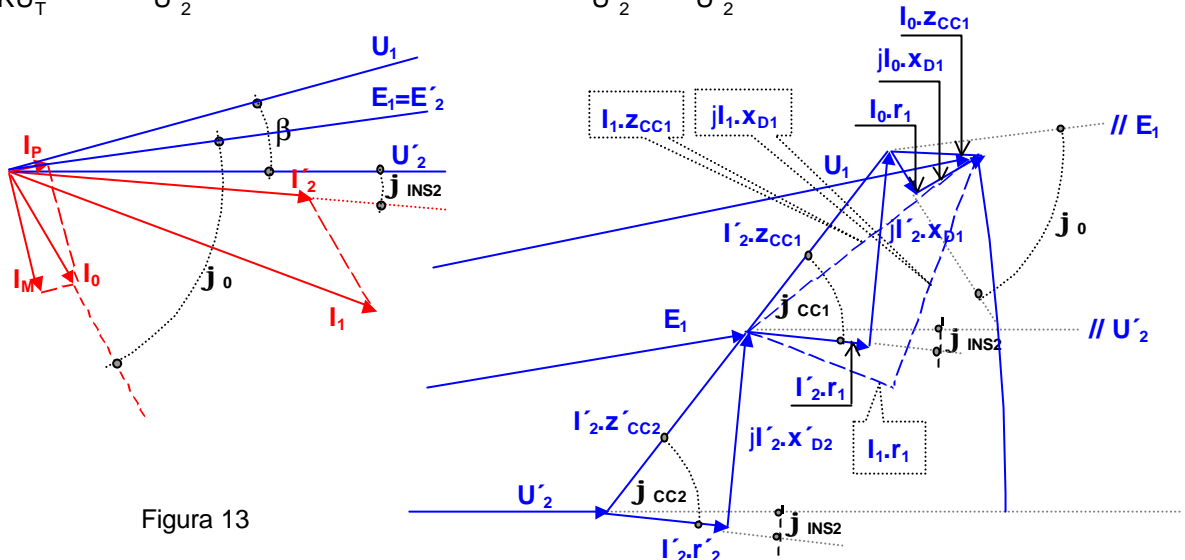


Figura 13

3.3.3.2 error de fase: en este caso se puede calcular β asumiendo que el arco $\beta \cdot U_1$ es aproximadamente igual a la proyección de las caídas de tensión $I'_2 \cdot Z'_{CC2}$ y $I_1 \cdot Z_{CC1}$ sobre la perpendicular a la dirección de U'_2 :

$$\beta \cdot U_1 = -I'_2 \cdot r'_2 \cdot \sin \varphi_{INS2} + I'_2 \cdot x'_{D2} \cdot \cos \varphi_{INS2} - I'_2 \cdot r_1 \cdot \sin \varphi_{INS2} + I'_2 \cdot x_{D1} \cdot \cos \varphi_{INS2} - I_0 \cdot r_1 \cdot \sin \varphi_0 + I_0 \cdot x_{D1} \cdot \cos \varphi_0$$

$$\beta \cdot U_1 = I'_2 \cdot (x_{CC} \cos \varphi_{INS2} - r_{CC} \sin \varphi_{INS2}) - I_M \cdot r_1 + I_P \cdot x_{D1} \quad (33)$$

$$\beta = \frac{I'_2}{U_1} \cdot (x_{CC} \cos \varphi_{INS2} - r_{CC} \sin \varphi_{INS2}) + \frac{1}{U_1} \cdot (I_P \cdot x_{D1} - I_M \cdot r_1) \quad (34)$$

3.3.3.3 conclusiones: analizando las ecuaciones (31) y (34) se ve que los errores de relación y fase dependen en forma directa del valor eficaz de la corriente de secundaria I_2 , es decir por el valor de la impedancia Z_{INS2} , de la resistencia y reactancia de dispersión de los devanados y del factor de potencia de la carga ($\cos \varphi_{INS2}$).

Dependiendo de las características constructivas de los arrollamientos, se puede minimizar el flujo disperso, y por lo tanto las reactancias de dispersión. Además la característica generalmente inductiva ($F.P. > 0.85$) de las impedancias de los sistemas voltimétricos hacen que el $\sin \varphi_{INS2} < 0.50$.

En el caso del error de relación, una vez fijada la Z_{INS2} , el apartamiento de la relación de tensiones del valor ideal KU_T es función directa de la resistencia y reactancia de dispersión, y en menor medida de la corriente de vacío, por lo que deberá actuarse sobre ellas para disminuir el error de relación.

Para el error de fase puede darse una compensación para valores adecuados de resistencia y reactancia de dispersión y corriente de vacío. De acuerdo a los valores que asuman, el error puede tener signo positivo o negativo.

4 Características de los transformadores de medida

4.1 Transformadores de corriente

4.1.1 Características constructivas

4.1.1.1 características necesarias para lograr bajos valores de los errores de relación y fase.

- características magnéticas de los núcleos: inducción y reluctancia: en la construcción de los núcleos se utilizan aleaciones especiales a fin de lograr altas permeabilidades a bajas inducciones, con lazos de

histéresis extremadamente estrechos (pérdidas reducidas). El circuito magnético debe tener una longitud lo más corta posible, para la sección especificada. Dado que la inducción magnética es la responsable de las pérdidas y de la intensidad de campo necesaria, su valor debe acotarse. Normalmente se recomienda un valor de $B = 0,05$ [T], y en casos extremos $B = 0,3$ [T] (los transformadores de potencia se diseñan con $B \leq 1,2$ [T]).

- fuerza magnetomotriz primaria: se adoptan valores del orden de 500 a 1000 [AV] para $N_1 \cdot I_1$; cuando el primario tiene una sola espira, el valor de la F.M.M. queda fijado por la corriente primaria.
- arrollamientos primario y secundario: el arrollamiento secundario se coloca siempre cerca del núcleo debido a razones magnéticas y de aislamiento. Su diseño depende del tipo de núcleo utilizado. En el caso de núcleo rectangular el flujo de dispersión es una fuente importante de error si el primario no es solidario al núcleo, ya que la posición influye de sobremanera en la concentración del flujo. Si es preciso lograr errores pequeños es imprescindible el uso de núcleos toroidales, lo que permite además utilizar arrollamientos primarios de diferentes relaciones, sin que la posición afecte la relación de transformación.

4.1.1.2 densidad de corriente: se toma de 1 a 2 [A/mm²]. Una vez adoptada la I_{2N} se realiza el cálculo aproximado de N_2 haciendo la FMM primaria igual a la secundaria.

4.1.1.3 aislamiento: en el caso de TI de media y alta tensión el arrollamiento primario debe estar separado del núcleo y del arrollamiento de baja tensión por medio de un dieléctrico de constante y espesor adecuados. Se utilizan papel y aceite, hexafluoruros, porcelana, resina epoxi, etc.

4.1.1.4 esfuerzos: el diseño del arrollamiento primario debe tener en cuenta los esfuerzos electromecánicos y térmicos que se pueden producir por las corrientes de cortocircuito (régimen de sobreintensidad) a esperarse en el punto de instalación del TI, para la configuración establecida de la red de potencia

4.1.1.5 tipos de TI: la construcción depende del uso a darle y condiciones de trabajo. Se pueden clasificar así:

- uso:
 - portátiles de laboratorio: dimensiones y peso reducidos; núcleo de forma toroidal con los arrollamientos distribuidos; tensión de aislación no mayor a 2 KV; exactitud alta (≤ 0.5); relaciones múltiples de transformación (por varios arrollamientos primarios).
 - portátiles de campo (tipo pinza o cuadro): dimensiones y peso reducidos; núcleo seccionable de forma rectangular o toroidal con el arrollamiento secundario concentrado (mayor flujo de dispersión); tensión de aislación no mayor a 2 KV; exactitud media - baja (entre 0.5 y 3); posibilidad de relaciones múltiples a través del secundario; necesitan mayor corriente I_0 debido al entrehierro presente; con o sin instrumento indicador.
 - de línea: de instalación fija; peso y dimensiones de acuerdo al nivel de corriente y aislación; son parte de la línea y deben soportar todos los efectos derivados de regímenes anormales tanto de corriente como de sobre-tensiones.
- construcción:
 - de barra pasante: para altas corrientes; $N_p = 1$
 - con bobinado primario colocado: para corrientes medias - bajas; $N_p > 1$
- nivel de tensión (de acuerdo a la tensión de la red, lo que define el nivel de tensión de aislación entre bobinado primario y secundario):
 - de baja tensión (hasta 400 V)
 - de media tensión (hasta 15 KV)
 - de alta tensión (hasta 33 KV)
 - de muy alta tensión (mayor a 33 KV)
- ejecución: depende de la ubicación del TI y define el grado de protección contra agentes atmosféricos
 - interior: para tensiones de red de hasta 132 KV (con aislantes especiales).
 - intemperie: en subestaciones de media tensión (15 KV) a muy alta tensión

4.2 Transformadores de tensión

4.2.1 Características constructivas

4.2.1.1 características necesarias para lograr bajos valores de los errores de relación y fase: aunque la concepción del TV es básicamente similar al de potencia, el requerimiento de que la relación K_U/K_{U_T} sea prácticamente constante hace que los criterios de diseño y construcción de los de potencia no sean aplicables.

- características magnéticas de los núcleos - inducción y reluctancia: en la construcción de los núcleos se utilizan aleaciones especiales a fin de lograr altas permeabilidades con inducciones lo más elevadas posibles

pero alejadas del codo de saturación, con lazos de histéresis extremadamente estrechos (pérdidas reducidas). El circuito magnético debe tener una longitud lo más corta posible, para la sección especificada. Dado que la inducción magnética es la responsable de las pérdidas y de la intensidad de campo necesaria, su valor debe acotarse. Normalmente se recomienda un valor de $B = 1.0 \text{ [T]}$ (los transformadores de potencia se diseñan con $B \leq 1,2 \text{ [T]}$). La forma del circuito magnético está determinada por los gradientes de tensión exigidos por el nivel de aislamiento.

- arrollamientos primario y secundario: el arrollamiento secundario se coloca siempre cerca del núcleo debido a razones magnéticas y de aislamiento. Debido a que el núcleo es rectangular, se tiene que el flujo de dispersión es una fuente importante de error, principalmente en el primario; este no es solidario al núcleo y además, por razones dieléctricas, se construye por secciones (galletas) conectadas en serie en un número determinado por la tensión U_s aplicada. Una vez fijada la sección del núcleo, se determina el número de espiras N_s en base a la ecuación: $U_s \cong E_p = 4.44.f.s.N_p.B_{MAX}$. De igual forma se determina en forma aproximada $N_s = N_p \cdot U_s/U_p$.
- fuerza magnetomotriz secundaria: queda fijada por la corriente secundaria, generalmente de muy bajo valor dado el escaso consumo de los instrumentos.

4.2.1.2 aislamiento: entre el arrollamiento primario y secundario se coloca un material aislante de constante dieléctrica y espesor adecuados. Se utilizan papel y aceite, hexafluoruros, porcelana, resina epoxi, etc. Se debe tener en cuenta las sobretensiones debidas a regímenes anormales de la red.

4.2.1.3 tipos de TV: la construcción depende del uso a darle y condiciones de trabajo. Se pueden clasificar así:

- uso:
 - portátiles de laboratorio: tensión de aislación adecuada a los niveles de tensión a medir; exactitud alta (≤ 0.5); relaciones múltiples de transformación (por varios arrollamientos primarios).
 - de línea: de instalación fija; peso y dimensiones de acuerdo al nivel de tensión; son parte de la línea y deben soportar todos los efectos derivados de regímenes anormales de sobretensiones.
- nivel de tensión (de acuerdo a la tensión de la red, lo que define el nivel de tensión de aislación entre bobinado primario y secundario):
 - de baja tensión (hasta 400 V)
 - de media tensión (hasta 15 KV)
 - de alta tensión (hasta 33 KV)
 - de muy alta tensión (mayor a 33 KV)
- ejecución: depende de la ubicación del TV y define el grado de protección contra agentes atmosféricos
 - interior: construidos para tensiones de red de hasta 132 KV (con aislantes especiales).
 - intemperie: en subestaciones de media tensión (15 KV) a muy alta tensión (500 KV)

4.3 Tablas de límites de error

Se indican los errores de relación y fase para TI y TV, en función del % de la I_{PN} y U_{PN} respectivamente. Las mismas se definen para determinadas condiciones de la impedancia conectada en el secundario (Z_{NS2}). El error de fase se expresa en minutos y en centiradian. Recordar que $[\text{centiradian}] = [\text{minuto}] \times 360 \times 60 / (2 \times \pi \times 10^2)$

4.3.1 Transformadores de corriente

Clase de exactitud d (1)	\pm Error porcentual de relación				\pm Error de fase en							
					minuto				Centiradian = minuto*360*60/(2* π *10 ²)			
	5%	20%	100%	120%	5%	20%	100%	120%	5%	20%	100%	120%
0.1	0.40	0.20	0.10	0.10	15	8	5	5	0.45	0.24	0.15	0.15
0.2	0.75	0.35	0.20	0.20	30	15	10	10	0.90	0.45	0.30	0.30
0.5	1.50	0.75	0.50	0.50	75	37	25	25	2.20	1.10	0.72	0.72
1.0	3.00	1.50	1.00	1.00	150	75	50	50	4.40	2.20	1.44	1.44

Clase de exactitud d (2)	\pm Error porcentual de relación	
	50%	120%
3	3	3
5	5	5

Clase de exactitud (3)	± Error porcentual de relación					± Error de fase en									
						minuto					centiradian (4)				
	1%	5%	20%	100%	120%	1%	5%	20%	100%	120%	1%	5%	20%	100%	120%
0.2s	0.75	0.35	0.20	0.20	0.20	30	15	10	10	10	0.90	0.45	0.30	0.30	0.30
0.5s	1.50	0.75	0.50	0.50	0.50	90	45	30	30	30	2.70	1.35	0.90	0.90	0.90

- (1) para valores de prestación comprendidos entre el 25 y 100% de Z_N con F.P. inductivo = 0.8
- (2) para valores de prestación comprendidos entre el 50 y 100% de Z_N . No se especifica el error de ángulo en este caso
- (3) transformadores para aplicaciones especiales (medición de energía)

4.2.2 Transformadores de tensión

Clase de exactitud (4)	± Error porcentual de relación		± Error de fase en			
			minuto		centiradian	
	80%	120%	80%	120%	80%	120%
0.1	0.1	0.1	5	5	0.15	0.15
0.2	0.2	0.2	10	10	0.30	0.30
0.5	0.5	0.5	20	20	0.60	0.60
1.0	1.0	1.0	40	40	1.20	1.20
3.0	3.0	3.0	NE	NE	NE	NE

4.4 Determinación de la polaridad

La determinación de la polaridad de los transformadores de medida (bornes homólogos, punto 3.1) es importante cuando se necesita establecer la fase entre tensiones y corrientes (p.e. si son utilizados para la medición de potencia o energía).

La forma mas sencilla es aplicar un escalón de tensión reducida con polaridad conocida, en uno de los dos arrollamientos y determinar la polaridad de la tensión inducida en el otro. Se utiliza el circuito de la figura 14, donde se conecta a un arrollamiento la fuente de DC y en el otro un milivoltímetro de imán permanente y bobina móvil, con las polaridades indicadas.

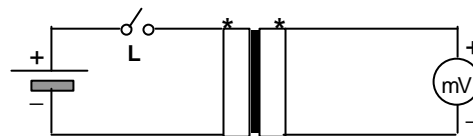


Figura 14

Si al cerrar la llave **L** la aguja del instrumento tiene una deflexión normal, los bornes homólogos son los marcado con asterisco.

4.5 Conexión a tierra de los circuitos secundarios

Por razones de seguridad es necesario conectar un punto de los circuitos secundarios a tierra para evitar que el instrumental sea afectado por una eventual falla de aislamiento entre el primario y secundario.

Se muestra el caso de un conjunto de TI y TV de un sistema de medición de energía, en una línea trifilar, utilizando un contador de tres sistemas.

