

MEDIDAS ELÉCTRICAS

Guía de estudios

Capítulo 7

Ing. Jorge L. Dampé
Ing. Carlos D. Arrojo
Ing. Ricardo Dias
Cátedra de Medidas Eléctricas

Capítulo 7

Transformadores de medida

7.1. Comentarios previos

Cuando es necesario aumentar el alcance de un instrumento, hemos visto que se recurre a la conexión de divisores de tensión o resistencias multiplicadoras, en el caso de voltímetros o circuitos de tensión, o al agregado de derivadores cuando se trata de circuitos de corriente.

Este recurso, de aplicación masiva en corriente continua, presenta algunas dificultades cuando se trata de implementarlo en corriente alterna, entre las que cabe señalar:

- la división de corrientes o tensiones, que en régimen permanente de continua queda determinada en forma exclusiva por las resistencias del circuito, pasa ahora a ser función de las impedancias de los distintos elementos, y por lo tanto de la frecuencia de trabajo;
- el agregado de nuevos elementos de medida, aún cuando tengan los mismos alcances o valores nominales, resulta imposible;
- cuando las medidas deben hacerse a distancia considerable del punto de conexión del transductor (derivador o multiplicadora), o cuando la cantidad de aparatos es grande, la potencia que debe disipar el elemento adaptador de alcances resulta elevada;
- el mayor consumo propio de los instrumentos de corriente alterna significa mayor potencia de disipación de los derivadores o multiplicadoras;
- en los circuitos con tensiones elevadas resulta deseable lograr una separación galvánica entre el circuito de potencia y los instrumentos, lo que resulta imposible con derivadores o multiplicadoras.

Las antes citadas son algunas de las razones que hacen necesario plantear alguna alternativa de adecuación de alcances diferente en corriente alterna.

Una solución que parece natural es el empleo de un **transformador** para alimentar a los instrumentos.

El principio de funcionamiento de un transformador es ya conocido [1], por lo que aquí sólo repetiremos lo que se considera imprescindible para tratar el tema, comenzando por las relaciones básicas entre tensiones, corrientes y número de vueltas, e introduciendo el circuito equivalente.

Llamaremos **primario** al circuito por el que se excita al transformador, y **secundario** a aquél que alimenta a las cargas conectadas al transformador, utilizando los subíndices 1 para referirnos al primero, y 2 para el segundo. Un transformador puede tener más de un arrollamiento de cada tipo. En la figura siguiente se presenta el esquema de un transformador.

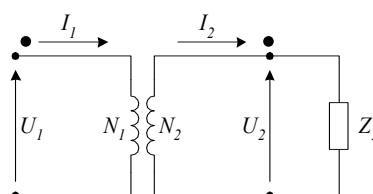


Figura 7.1: Esquema circuital elemental de un transformador.

Las relaciones entre corrientes, tensiones y número de espiras, están dadas por las siguientes expresiones:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (7.1)$$

$$N_1 * I_1 = N_2 * I_2 \quad (7.2)$$

$$S = U_1 * I_1 = U_2 * I_2 \quad (7.3)$$

En la figura (7.1) se han marcado dos bornes con un punto, uno en el primario y otro en el secundario. Son los llamados **bornes correspondientes u homólogos**, definidos de tal modo que, en valores instantáneos, si la corriente “entra” por uno de ellos, “saldrá” por el otro. Más adelante se precisará esta definición.

7.2. Transformadores de medida

En el punto 7.1 hemos precisado la razón de ser de los transformadores de medida, cuyo comportamiento como circuito electromagnético se estudia en el Anexo I. En lo que sigue nos ocuparemos de los transformadores de medida como componentes de un circuito de medición, para lo que deberemos caracterizar la relación que existe entre las señales que se les aplican y las que ellos proveen al instrumental, y de qué manera varían en función de los distintos estados de funcionamiento.

Un transformador de medida es un tipo particular de ellos “**destinado a alimentar instrumentos de medida, relés u otros aparatos similares**” [2]; como la misma definición lo trasunta, participa de todas las características generales de un transformador, pero posee otras específicas, que obedecen a que se trata de un elemento de medida. Los hay de tensión y de corriente, que nosotros individualizaremos en forma abreviada como T.V. y T.A., respectivamente.

Un transformador de tensión ideal permite obtener en su secundario una tensión que está en una relación perfectamente conocida e invariable respecto de la primaria, en tanto que uno de corriente permitirá hacer lo mismo con una intensidad. Valdrán para ellos, por lo tanto, las siguientes expresiones:

$$\frac{U_1}{U_2} = k_U \quad (7.4)$$

y

$$\frac{I_1}{I_2} = k_I \quad (7.5)$$

Como se comprende, en una máquina real existirán apartamientos de la condición de ideal que hacen que en las ecuaciones (7.4) y (7.5) deban reemplazarse los signos de igualdad por los de aproximadamente igual. En nuestro estudio de los transformadores de medida trataremos de encontrar las características distintivas de los distintos tipos que de ellos existen.

7.3. El transformador de corriente (T.A.)

Es un tipo particular de transformador de medida destinado a la medición de corrientes. Lo simbolizaremos de la siguiente manera:

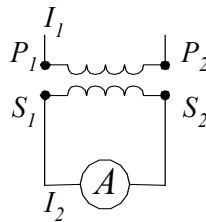


Figura 7.2: Representación circuital esquemática de un T.A.

P_1 y P_2 son los terminales primarios, en tanto que S_1 y S_2 son los correspondientes secundarios. P_1 y S_1 (lo mismo que P_2 y S_2), son homólogos en el sentido de la definición dada en el punto 7.1, de modo que el conjunto de instrumentos que se conectan en el secundario, y que han sido representados por un amperímetro genérico A , “ven” la corriente I_2 circular por ellos con el mismo sentido relativo que si hubieran estado conectados en el lado primario. La tipificación del transformador requiere de una serie de datos característicos, de los que mencionaremos a continuación los primeros de ellos, y los restantes a medida que vayamos progresando en nuestro estudio. En todos los casos seguiremos en nuestras definiciones los lineamientos de las normas internacionales aplicables a este tipo de aparatos [4]:

- Relación nominal: definida como el cociente de la corriente primaria nominal, I_{1n} , dividida por la corriente secundaria nominal, I_{2n} . Esto requiere que se definan las dos corrientes nominales que acaban de mencionarse.
- Corriente primaria nominal: valor de la corriente primaria a partir de la cual se han definido las características del transformador.
- Corriente secundaria nominal: valor de la corriente secundaria a partir de la cual se ha definido el comportamiento del transformador. Los valores normalizados son: 1, 5, $\frac{1}{\sqrt{3}}$ y $\frac{5}{\sqrt{3}}$ A.
- Prestación nominal, S_n : El valor de la impedancia secundaria, en módulo expresado en ohms, y argumento indicado mediante su factor de potencia, para la cual se ha definido el comportamiento del transformador.

La relación nominal, k_{I_n} , es constante sólo en forma aproximada, y es precisamente su falta de constancia la que hace que aparezcan los errores derivados del uso del transformador. Con referencia a la figura (7.2), el valor de la corriente primaria puede obtenerse a partir de:

$$I_1 = k_{I_n} * I_2, \quad (7.6)$$

de donde resulta que el error límite que afectará a I_1 dependerá, además del error de indicación del amperímetro, que no merece a esta altura comentarios especiales, **del error que afecta al módulo de la relación**, que llamaremos **error de relación**, y que notaremos con la letra η . En consecuencia puede escribirse:

$$e_{I_1} = \pm(\eta + e_{I_2}) \quad (7.7)$$

En el caso en que el instrumento conectado al secundario del transformador sea sensible además a la fase, como es el caso de por ejemplo, un vatímetro, se tiene que la expresión de la potencia del lado primario vale:

$$P_1 = k_{I_n} * P_2 \quad (7.8)$$

llamando P_2 al valor de potencia indicado por el vatímetro.

Si hacemos propagación de errores en la anterior, nos encontraremos con que el error que afecta a la potencia P_1 vale:

$$e_{P_1} = \pm [\eta + e_{P_2} + e_{fase}] \quad (7.9)$$

El término η conserva análogo significado al visto en la expresión anterior, el e_{P_2} puede calcularse fácilmente a partir de la clase del vatímetro y su indicación, en tanto que el término e_{fase} , aparece porque la corriente secundaria no está en fase, en general, con la primaria. Su cálculo resulta inmediato a partir de un diagrama fasorial que ponga de manifiesto la situación, como el siguiente:

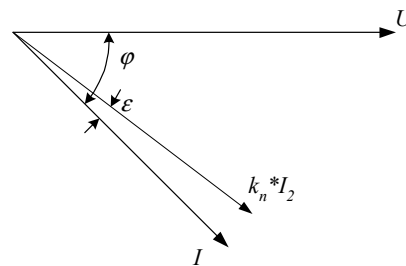


Figura 7.3: Diagrama fasorial para el análisis del error de fase de un T.A.

Resulta en un todo similar al analizado en el caso del error de fase del vatímetro, por lo que es evidente que se llegará a una expresión también en todo similar:

$$e_{fase} = \pm (\epsilon * \text{tg } \varphi) \quad (7.10)$$

donde aparece ahora un signo \pm debido a que, a menos que se tome la precaución de contrastar al transformador, resulta desconocido el signo del error de fase.

Resulta interesante notar que el error de relación y el de fase aparecen claramente, debido a que la relación nominal de transformación, que en un transformador ideal es una constante real, resulta, en uno real, un complejo con módulo y argumento que dependen, siguiendo relaciones no inmediatas, de los valores de corriente primaria, impedancia de carga secundaria, frecuencia, etc.

7.4. Caracterización del transformador desde el punto de vista de sus errores

Analizando las expresiones (7.9) y (7.10) se ve que para determinar los errores que afectan a una medida efectuada con la intervención de transformadores, será necesario poder encontrar los valores de η y ϵ , que dependen del tipo particular de transformador empleado y de sus condiciones de funcionamiento, y el valor de φ , propio del circuito (este último no siempre necesario). Para ello se definen las llamadas **clases de exactitud de los transformadores de corriente** [4], que es una denominación que se asigna a los transformadores cuyos errores

permanecen dentro de ciertos límites en condiciones especificadas de uso. Los valores normalizados son: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3; 5; 0,2S y 0,5S.

Para estas clases se dan tablas en las que aparecen los errores límites admisibles de relación y de fase, en función de la relación entre la corriente primaria y la corriente primaria nominal, para valores de prestación comprendidos entre el 25% y el 100% de la nominal, a $\cos\varphi = 0,8$ ind., excepto para prestaciones nominales inferiores a 5 VA, en que se establece $\cos\varphi = 1$. Las tablas 7.I, 7.II y 7.III fueron extraídas de la referencia [4].

Tabla 7.I: Errores de relación y fase para transformadores de corriente clases 0,1 a 1

Clase	± Error de relación a distintos porcentajes I_n				± Error de fase a distintos porcentajes I_n							
					[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	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

Tabla 7.II: Errores de relación y fase para transformadores de corriente de clases 0,2S y 0,5S

Clase	± Error de relación a distintos porcentajes I_n					± Error de fase a distintos porcentajes I_n									
						[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

Nota: Esta tabla se aplica solamente a transformadores con corriente secundaria nominal 5 A.

Tabla 7.III: Errores de relación para transformadores de corriente clases 3 y 5 *

Clase	± Error de relación a distintos porcentajes I_n	
	50	120
3	3	3
5	5	5

* para estas clases no se establecen límites para los errores de fase.

7.5. El transformador de corriente frente a sobreintensidades

En el uso normal un transformador de corriente debe estar en condiciones de soportar las sobrecorrientes resultantes de fallas en el circuito al que está conectado, que en una primera aproximación pueden pensarse como cortocircuitos en el mismo. En la figura siguiente se esquematiza tal situación:

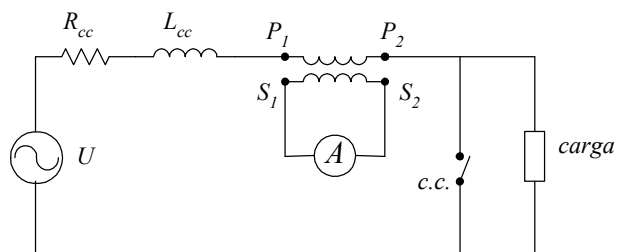


Figura 7.4: Esquema circuital para el estudio del comportamiento de un T.A. frente a sobreintensidades. (c.c. representa la llave cuyo cierre simula el cortocircuito)

En condiciones normales circula por el primario del transformador una corriente que podemos suponer que no excederá en mucho de la nominal. Cuando se produce un cortocircuito en un punto como el señalado, la corriente se incrementa hasta un valor que depende de la impedancia de cortocircuito del sistema, llamada Z_{cc} (R_{cc} y L_{cc} en la figura), y de la que presente el cortocircuito, que generalmente puede suponerse despreciable frente a la primera. La forma de onda de corriente será, como sabemos, la resultante de una sinusoidal, que es la respuesta en régimen forzado del sistema, más una componente unidireccional, con constante de tiempo $\tau=L/R$, y cuyo valor depende del instante de inicio del cortocircuito. En la figura 7.5 se esquematiza la situación, suponiendo que la corriente previa a la falla era nula, condición que no le quita generalidad a la discusión:

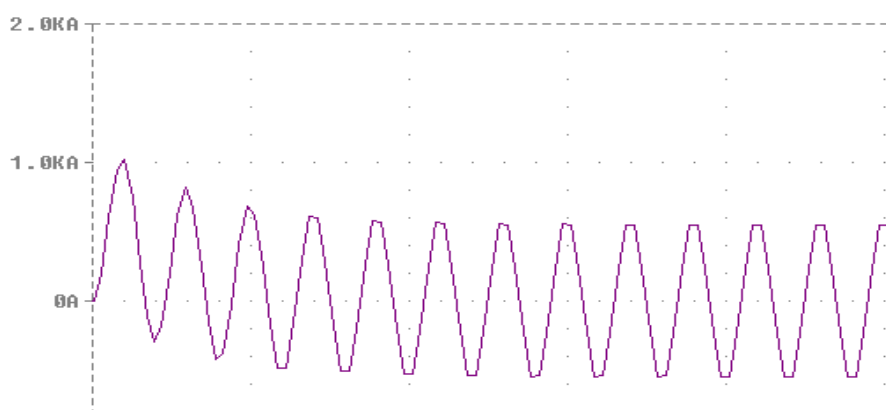


Figura 7.5: Ejemplo de forma de onda de la corriente en el T.A., al cerrarse c.c. en un circuito como el esquematizado en la figura 7.4

Esta corriente de falla circulará durante un tiempo, que corresponde al de actuación de los elementos que posee el circuito para protegerse de este tipo de condiciones anómalas de funcionamiento, y que, salvando las distancias, pueden compararse con los fusibles que posee una instalación convencional de baja tensión. El tiempo de circulación de la corriente, si bien varía de caso en caso, rara vez excede de algún segundo.

La circulación de corrientes como la que hemos analizado plantea exigencias tanto para el transformador como para los equipos que están conectados a su secundario, por lo que el análisis que haremos contemplará ese doble enfoque.

7.5.1 Exigencias para el transformador en sí

La circulación de una corriente que puede exceder en mucho a la nominal plantea una exigencia tanto desde el punto de vista térmico como desde el mecánico.

Desde el punto de vista **térmico**, el transformador debe ser capaz de soportar el calentamiento resultante de la circulación de dicha corriente durante el tiempo que dure la falla. Se define para caracterizar su comportamiento, [4], la llamada **corriente nominal de breve duración, I_{th}** , como "el 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, cuando el secundario está en cortocircuito". El tiempo de un segundo se ha tomado solamente como típico a efectos de la definición, y de ninguna manera debe inducir a pensar que todas las fallas se eliminen en ese lapso. Durante el breve tiempo que se ha considerado, puede suponerse el fenómeno de calentamiento como adiabático, de modo que combinaciones de corrientes y tiempos diferentes serán aceptables siempre que se cumpla que:

$$I_{th}^2 = I_f^2 t_f \quad (7.11)$$

expresión en la que I_{th} tiene el significado más arriba definido, e I_f y t_f son la nueva corriente de falla y su duración respectivamente. Con el fin de conservar las hipótesis de partida (calentamiento sin intercambio con el medio externo), t_f no deberá ser mayor de 5 s. A modo de ejemplo, un transformador diseñado con una I_{th} de 20 kA durante 1 s, será capaz de soportar 10 kA durante 4 s.

Además del efecto térmico de la corriente incrementada, aparece un efecto dinámico, debido al aumento de esfuerzo mecánico resultante, proporcional al cuadrado del valor cresta de la corriente. Para caracterizar el comportamiento del transformador se define la **corriente dinámica nominal, I_{dyn}** , como "El valor cresta de la corriente primaria que un transformador puede soportar, sin ser dañado eléctrica o mecánicamente por el esfuerzo resultante, cuando su secundario está en cortocircuito"

Si tenemos presente la figura 7.5, veremos que la cresta máxima, correspondiente al primer semiciclo de la corriente de cortocircuito, depende del instante de producción del mismo y de la relación X/R de la impedancia de cortocircuito del sistema. En los casos reales, la situación más desfavorable, correspondiente a máxima asimetría, da una relación:

$$\frac{I_{dyn}}{I_{th}} \approx 2,5$$

Cabe remarcar que este valor depende fuertemente de la instalación particular, escapando su cálculo detallado de los objetivos de esta materia.

Volviendo al ejemplo más arriba citado, de un transformador cuya corriente térmica sea 20 kA durante 1s, tendrá una $I_{dyn} = 50$ kA.

7.5.2 Exigencias para los elementos conectados al secundario del T.A.

En el caso de una falla como la analizada, será necesario determinar si interesa o no que los aparatos conectados al secundario del transformador la aprecien fielmente. Si se trata de amperímetros o instrumentos de cualquier otra clase, no previstos para medir correctamente en régimen transitorio, sencillamente serán incapaces de registrar el fenómeno, por lo que puede ser interesante lograr que el transformador sirva para protegerlos contra las altas corrientes resultantes de un cortocircuito, mediante un comportamiento que no resulte lineal cuando la corriente primaria excede en cantidad apreciable a la nominal. Si en cambio, lo que está conectado al secundario sirve para tomar alguna decisión que permita eliminar la falla, como podría ser dar la orden de apertura de un interruptor, es conveniente que el registro secundario sea fiel hasta donde sea posible, lo que significa una exigencia contrapuesta con la que se ha citado previamente. Resulta claro que un mismo transformador no podrá ser capaz de cumplir simultáneamente con ambos requisitos, por lo que aparece en forma natural una diferenciación en los transformadores de corriente en **transformadores de medición y transformadores de protección**, según que estén destinados a alimentar instrumentos de medida o dispositivos que cumplan funciones de protección en los sistemas.

Como nuestro análisis ahora se realizará en condiciones en las que el comportamiento de los transformadores ya no será lineal, resultará imprescindible definir nuevos conceptos de error, ya que los de error de relación y de fase antes definidos contemplaban un funcionamiento en el que todas las magnitudes tanto primarias como secundarias, tenían variaciones sinusoidales. Si en cambio, el equipo se comporta en una manera no lineal, las magnitudes secundarias no tendrán la misma forma que las primarias, con lo que los errores antes definidos perderán significado.

Se define un nuevo error, llamado **error compuesto**, ε_c , mediante la expresión:

$$\varepsilon_c = \frac{100}{I_p} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [k_{I_n} i_s - i_p]^2 dt} \quad (7.12)$$

donde i_s e i_p son los valores instantáneos de las corrientes secundaria y primaria respectivamente, T el período de la señal aplicada, y los restantes símbolos conservan las definiciones oportunamente establecidas.

7.5.3. Definiciones aplicables a los transformadores de corriente de medición en régimen de sobrecorriente

Con el criterio expuesto en 7.5.2 se han normalizado en [4] valores característicos que definen el comportamiento de un transformador de medida de medición en régimen de sobreintensidad. Son ellos:

- Corriente primaria límite nominal, I_{PL} : el valor de la corriente primaria para la cual el error compuesto es mayor o igual que el 10 %, con prestación nominal.
- Factor de seguridad de instrumentos, FS : el cociente entre la corriente primaria límite nominal y la corriente nominal, $FS = \frac{I_{PL}}{I_{1_n}}$.

De esta forma, el factor de seguridad de instrumentos es una medida de a qué valor de corriente primaria el transformador comienza a saturar, y por lo tanto su corriente secundaria deja de crecer linealmente con la primaria. Desde el punto de vista de la protección de los elementos conectados al secundario, interesa que FS sea la más pequeño posible. Valores típicos de FS van de 2 a 5.

7.5.4. Transformadores de corriente de protección

Teniendo en cuenta lo más arriba expuesto, resulta que un transformador de medida no resultará apto para alimentar a elementos destinados a la protección de los sistemas. Es por ello que existe una variedad de transformadores de corriente específicamente concebidos para cumplir con este cometido, y cuyas características salientes pueden resumirse en:

- sus requisitos de exactitud son menos severos que los de medición;
- deben responder linealmente hasta límites que exceden en mucho los impuestos a los T.A. de medición.

Para ellos se definen requisitos de exactitud en forma parecida a lo hecho para los de medida, mediante clases de exactitud, que en este caso son sólo dos, 5P y 10P, para las cuales los errores de relación y de fase límites son los que se presentan en la siguiente Tabla.

Tabla 7.IV: Errores de relación y fase para transformadores de corriente de protección.

Clase	Error de relación a la corriente primaria nominal [%]	Error de fase a la corriente primaria nominal [%]		Error compuesto a la corriente primaria límite de exactitud nominal [%]
		[minutos]	[centirradiares]	
5P	±1	±60	±1,8	5
10P	±3	-	-	10

En lo que respecta a su funcionamiento en régimen de sobrecorriente, se definen, en forma parecida a lo hecho para los de medida, los siguientes parámetros característicos:

- corriente primaria límite de exactitud nominal: el valor de la corriente primaria hasta la cual el transformador cumple con los requisitos de error compuesto;
- factor límite de exactitud: el cociente de la corriente primaria límite de exactitud nominal dividida por la corriente nominal. Los valores normalizados de este factor son 5, 10, 15, 20 y 30.

El número que precede a la denominación de la clase indica el error compuesto máximo a la corriente primaria límite de exactitud nominal.

La identificación del transformador se completa agregando a la designación de su clase el valor del factor límite de exactitud, así, por ejemplo, 5P 20.

7.6. El transformador de tensión

Todo lo que ya hemos dicho en ocasión de nuestro análisis de los transformadores de medida en general, y del de corriente en particular, conserva su validez, con el sólo cambio de corriente por tensión, cuando se habla de los transformadores de tensión, T.V.

Aplicaremos la misma convención que en los T.A. para designar a las magnitudes del primario y del secundario, notando a los bornes de la siguiente manera:

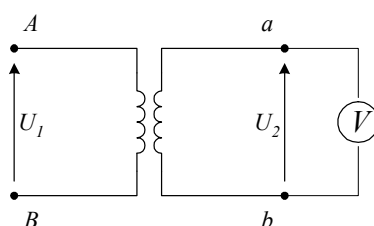


Figura 7.6: Representación circuital esquemática de un T.V.

Son bornes homólogos A y a (o B y b). La diferencia en la notación obedece a la necesidad de evitar erróneas interpretaciones en circuitos en los que se emplean ambos tipos de aparatos. Es oportuno señalar que la anterior es la notación universalmente aceptada, tomada de las referencia [5].

7.6.1. Prescripciones respecto de los errores

La norma IEC 60044-2/96, [5], establece para los transformadores de tensión exigencias en cuanto a los errores, agrupándolos en clases de exactitud, y estableciendo para las mismas cuáles son los errores límites cuando el transformador trabaja entre el 80 y el 120 % de su tensión nominal, con prestación comprendida entre el 25 % y el 100 % de la nominal, con $\cos \varphi = 0,8$. Las clases normalizadas son: 0,1; 0,2; 0,5; 1 y 3, y sus respectivos límites de error los que se muestran en la figura siguiente:

Tabla 7.V: Errores de relación y fase para transformadores de tensión de medición

Clase	± Error de relación	± Error de fase	
		[minutos]	[centirradiaes]
0,1	0,1	5	0,15
0,2	0,2	10	0,3
0,5	0,5	20	0,6
1	1,0	40	1,2
3	3,0	No especificado	No especificado

7.6.2. Transformadores de tensión de protección

En forma análoga a lo comentado para transformadores de corriente, existen situaciones derivadas de fallas del sistema que imponen condiciones de funcionamiento que no necesariamente será capaz de cumplir un T.V. normal. Para tales situaciones se utilizarán los transformadores de tensión **de protección**, que son capaces de responder correctamente para valores de tensión que pueden diferir apreciablemente de la nominal, tanto en más como en menos.

Las clases de transformadores de tensión de protección se individualizan agregando una letra "P" al número que las designa, en modo en un todo similar al de los T.A. En cuanto a las exigencias de error, se establecen entre el 5% de la tensión nominal y el llamado "factor nominal de tensión", definido como el múltiplo de la tensión nominal hasta el cual el aparato cumple con las

exigencias térmicas y de error. Este factor puede ser tan alto como 1,9. En la Tabla 7.VI, tomada de la misma referencia [5], se presentan las exigencias de error para los T.V. de protección, válidas entre los límites de tensión más arriba expresados, y para prestaciones comprendidas entre el 25% y el 100 % de la nominal, a $\cos\phi = 0,8$ ind. Al 2 % de la tensión nominal el error será el doble del correspondiente al 5 % de la misma.

Tabla 7.VI: Errores de relación y fase para transformadores de tensión de protección

Clase	± Error de relación	± Error de fase	
		[minutos]	[centiradianes]
3P	3,0	120	3,5
6P	6,0	240	7,0

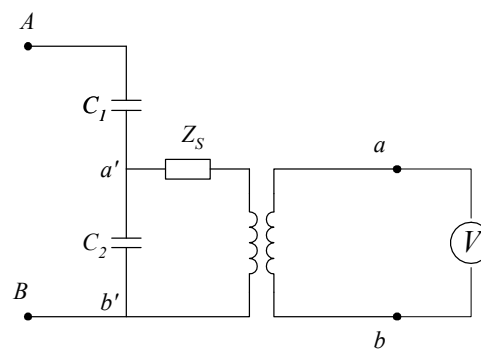
En la Tabla 7.VII se muestran los valores nominales de tensión, en el que se aprecian dos series de los mismos, una encabezada con “preferidos”, que corresponde a los más usuales, y otra en la que aparecen los alternativos, de seleccionar sólo cuando las condiciones de la instalación lo exijan.

Tabla 7.VII: Valores nominales de tensión para transformadores de tensión

Valores preferidos	Valores alternativos (no preferidos)	
[V]	[V]	
100	110	200
$100/\sqrt{3}$	$110/\sqrt{3}$	$200/\sqrt{3}$
$100/3$	$110/3$	$200/3$

7.7. El transformador de tensión capacitivo

El costo de la aislación de un transformador magnético crece más que proporcionalmente con la tensión, lo que lleva a pensar en alguna solución que resulte de interés económico cuando se plantea el problema de medir tensiones en sistemas cuya tensión nominal exceda de los 132 kV, entendiéndose por tensión nominal a la compuesta del sistema, pensado como trifásico. Una alternativa para resolver el problema la constituye el **transformador de tensión capacitivo, T.V.C.**, que consta de un divisor de tensión capacitivo que alimenta a un transformador magnético, al que a su vez van conectados los instrumentos. El esquema general es el que se aprecia en la figura 7.7, en la que se ha respetado la notación que hasta ahora hemos usado:



divisor capacitivo transformador magnético

Figura 7.7: Representación circuital esquemática de un T.V.C.

7.8. Esquema de conexionado de los transformadores de medida

Distinguiremos por separado los distintos casos que pueden presentarse, dibujando en los secundarios los instrumentos típicos que se conectan usualmente, y que resultan necesarios para comprender las reglas de conexionado. Los casos relevantes son los siguientes:

7.8.1. Transformador de intensidad en un circuito de baja tensión

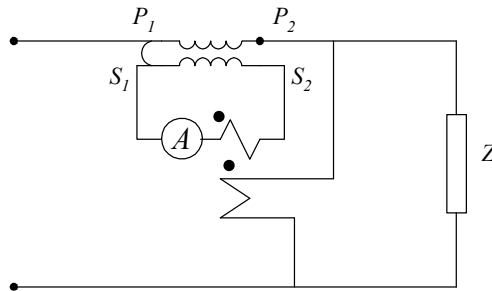


Figura 7.8: Esquema de conexionado de un T.A. en un circuito de baja tensión

El puente entre primario y secundario obedece a la necesidad de fijar los potenciales relativos de las bobinas de tensión y corriente de ciertos vatímetros.

7.8.2 Transformador de intensidad en media (o alta) tensión

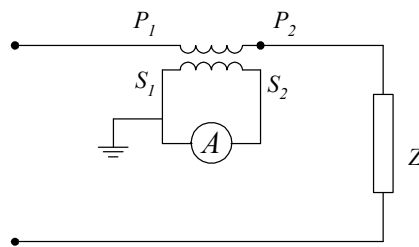


Figura 7.9: Esquema de conexionado de un T.A. en un circuito de media (o alta) tensión

Es necesario aclarar que en media o alta tensión la presencia de sólo un T.A. (sin T.V.), se da en los casos en que es de interés solamente la medida de corriente o la conexión de relés sensibles a la misma. Se hace imprescindible fijar el potencial del secundario, para lo que se realiza la conexión a tierra del mismo, por razones obvias de seguridad.

7.8.3. Transformadores de tensión y corriente combinados

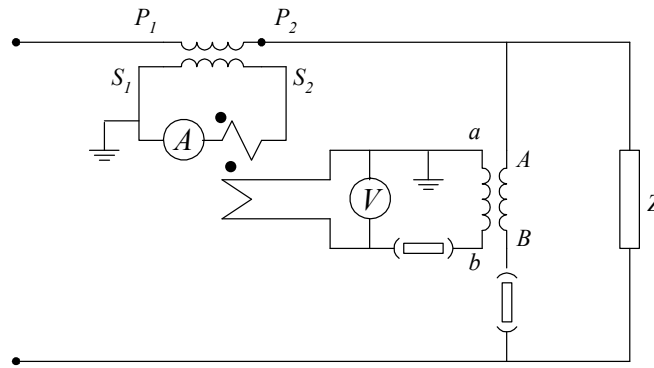


Figura 7.10: Esquema de conexionado de un T.A. y un T.V. combinados

Con los mismos argumentos que en el caso del T.A. solo se explica la presencia de las conexiones a tierra. Si bien este esquema es el de elección en los casos de media o alta tensión, también suele encontrárselo en los casos de baja tensión en que la eventual multiplicadora de los sistemas voltimétricos sea reemplazada por un T.V.

7.9. Referencias

- [1] Harris, "Electrical Measurements", John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Bossi Coppi, "Misura Elettriche", U. Hoepli
- [3] Skilling, Hugh H., "Circuitos en Ingeniería Eléctrica", Compañía Editorial Continental S.A.
- [4] Comisión Electrotécnica Internacional, Norma IEC 44-1, año 1996: "Instrument transformers. Part 1: Current transformers."
- [5] Comisión Electrotécnica Internacional, Norma IEC 44-2, año 1996: "Instrument transformers. Part 2: Inductive voltage transformers."

Anexo I

Modelos de los distintos transformadores de medida

Cuando se desea estudiar un transformador desde el punto de vista de su comportamiento en un circuito, resulta útil reemplazarlo por un **circuito equivalente**, que lo representa para un **dado estado de funcionamiento**, para el que ha sido deducido, de tal manera que resulta indistinguible el circuito equivalente del aparato por él representado. Sin duda, el circuito equivalente puede cambiar si lo hacen las condiciones que se desean representar. En la siguiente figura se presenta el circuito equivalente en baja frecuencia de un transformador [1], a partir del cual resulta sencillo encontrar relaciones entre las magnitudes primarias y secundarias:

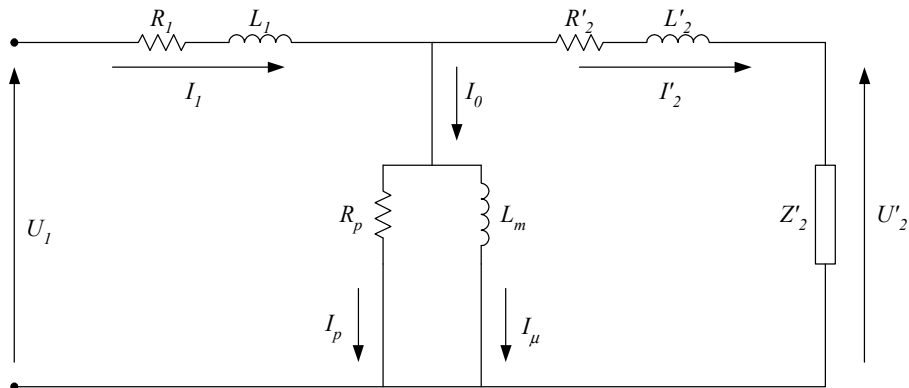


Figura 7.AI.1: Circuito equivalente en baja frecuencia de un transformador

En el anterior se ha eliminado la separación galvánica que existe entre el primario y el secundario de un transformador real, con el fin de facilitar el análisis del comportamiento del circuito. Con este recurso las impedancias de las distintas partes toman aproximadamente los mismos valores, en tanto que las caídas de tensión, y las relaciones entre los fasores de tensión y corriente son inmediatas.

Los valores del secundario, identificados con “‘2”, se dice que se han **referido al primario**, para lo que se los ha multiplicado por factores que hacen que produzcan el mismo efecto, cuando son sometidos a la tensión primaria, que harían en el lado secundario. El factor de conversión se encuentra fácilmente teniendo en cuenta que los efectos producidos por las magnitudes de uno cualquiera de los lados del transformador, y las correspondientes referidas, deben ser idénticas. Así, para referir al primario, por ejemplo, procederemos de la siguiente manera:

Corrientes: Teniendo en cuenta la relación antes escrita, punto 7.1, se puede decir que los amperevueltas (NI) que produce una corriente o su reflejada deben ser idénticos, de donde, para obtener I'_2 se deberá multiplicar a I_2 por la relación de espiras. El efecto que produce I'_2 circulando por las N_1 vueltas del primario, debe ser igual al efecto que produciría I_2 (la corriente que se quiere representar), al hacerlo por las N_2 espiras del secundario. Las ecuaciones que describen el proceso son las siguientes:

$$N_1 I'_2 = N_2 I_2 \Rightarrow I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (7.AI.1)$$

Recordando lo que se expuso en el punto 7.1, la relación N_2/N_1 coincide con la relación de transformación del transformador de corriente, y es la inversa de la misma en el caso de los transformadores de tensión.

Tensiones: aplicando conceptos similares a los anteriores llegamos a la conclusión que para referir una tensión al lado primario será necesario multiplicar por una relación inversa a la antes expresada:

$$U'_2 = \frac{N_1}{N_2} U_2 \quad (7.AI.2)$$

Observemos que el cociente N_1/N_2 coincide con la relación de un transformador de tensión y es la inversa de la de uno de corriente.

Impedancias: En este caso tendremos en cuenta que la potencia aparente puesta en juego en la impedancia referida a un dado lado, al ser recorrida por la corriente referida, debe ser la misma que se manifestaría en la impedancia original cuando por ella circula la correspondiente corriente (primaria o secundaria). A partir de lo dicho:

$$I_2'^2 Z_2' = I_2^2 Z_2 \quad (7.AI.3)$$

que puede escribirse, teniendo en cuenta la forma en que se definió I_2' :

$$Z_2' = \left(\frac{I_2}{I_2'} \right)^2 Z_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2 \quad (7.AI.4)$$

que simplemente nos dice que para referir una impedancia de un lado al otro de un transformador basta con multiplicar por el cuadrado de la relación de espiras.

Ejemplo 7.AI.1

Supóngase tener un transformador de relación 200/20 V, cuyo secundario tiene una impedancia de 0,1 Ω . Referir dicha impedancia al lado primario.

Solución

Para aplicar la expresión (7.AI.4) es necesario conocer la relación de espiras del aparato, que en este caso no es dato. No obstante, sin error apreciable, puede considerarse que ella coincide con la relación de tensiones, como se señalara oportunamente. En consecuencia:

$$Z_2' = \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 Z_2 = \left(\frac{200}{20} \right)^2 0,1 = 10 \Omega$$

7.AI.1. Análisis de los errores del transformador de corriente

Emplearemos los rudimentos definidos en el punto anterior para la construcción de un circuito equivalente de un transformador, cuyo diagrama fasorial nos servirá para calcular los errores del mismo. En este punto analizaremos el comportamiento de los mismos a partir del diagrama fasorial resultante del circuito equivalente del transformador más arriba propuesto, y trataremos de determinar el grado en que las distintas magnitudes de influencia pesan en el ellos. Nuestra representación será válida sólo para el régimen sinusoidal, pero también nos dará una idea básica respecto de lo que sucede en los casos de saturación, en los que la representación fasorial pierde validez. En la figura siguiente se presenta el diagrama fasorial del transformador:

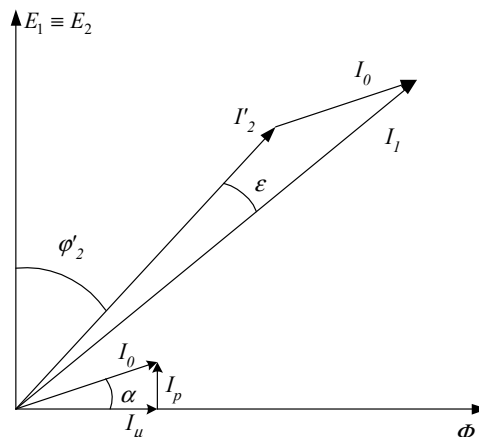


Figura 7.AI.2: Diagrama fasorial de un transformador

Se aprecia que la corriente I_1 y la I_2' difieren entre sí en el monto de la I_0 , que recibe el nombre de **corriente de vacío** del transformador, y que, como es evidente, es la responsable de los errores del mismo. Con respecto a I_0

cabe decir que posee dos componentes: una notada I_μ , recibe el nombre de **corriente magnetizante**, y es la que establece el flujo en el circuito magnético. En el caso de materiales ferromagnéticos comunes, con comportamiento alinear, resulta no sinusoidal, por lo que la dibujada aquí es una *corriente eficaz equivalente*, aproximación válida si se tiene en cuenta la escasa entidad de I_μ frente a las demás corrientes. En cuanto a I_p es la **corriente de pérdidas**, que atiende a las pérdidas en el circuito magnético. Con la notación de la figura 7.AI.2 se puede llegar a las siguientes relaciones:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_1}{N_2} \left[1 + \frac{I_0}{I_1} \sin(\varphi'_2 + \alpha) \right] \quad (7.AI.5)$$

y

$$\varepsilon \approx \frac{I_0}{I_1} \cos(\varphi'_2 + \alpha) \quad (7.AI.6)$$

La segunda da directamente el error de fase, en tanto que a partir de la primera se puede concluir que el segundo sumando del corchete es el responsable del error de relación, pues es el término que da el apartamiento del transformador respecto del ideal (comparar con la expresión 7.2).

Del análisis de ambas se concluye que, como habíamos ya establecido, el término I_0 es responsable de los errores del T.A., pero aparece afectado en las (7.AI.5) y (7.AI.6) por un término seno y un coseno del mismo argumento, lo que lleva a la consideración que valores de $(\varphi'_2 + \alpha)$ que disminuyan uno de ellos aumentarán el otro y viceversa, lo que obligará a la búsqueda de un punto intermedio de equilibrio. El inconveniente radica en que tanto I_0 como el argumento de las dos funciones que aparecen tienen variaciones no lineales, que hacen que sea muy difícil eliminar sus efectos. En la práctica, el fabricante debe acotar sus efectos, de tal manera de poder garantizar los errores del transformador dentro de los límites de variación de corriente y prestación que establecen las normas.

7.AI.2. Modos de disminuir los errores

De lo antes expuesto resulta claro que disminuir los errores del T.A. requiere disminuir el valor de I_0 . Los expedientes que se pueden aplicar consisten en:

- disminuir I_μ , para lo cual será necesario trabajar con una baja inducción, requisito impuesto también por la necesidad de conservar la linealidad aún con valores de corriente que pueden exceder en varias veces la nominal del transformador, seleccionar materiales de muy buena permeabilidad y achicar al máximo la reluctancia del circuito magnético, para lo que se recurre a núcleos toroidales, que lógicamente casi no poseen entrehierros.
- reducir I_p , lo que obliga a emplear laminaciones lo suficientemente delgadas, y, concordantemente con lo indicado más arriba, usar inducciones bajas.
- De la observación de las expresiones de los errores surge que la impedancia de carga secundaria condiciona en cierta medida el valor que aquéllos pueden tomar, pues al estar I_1 impuesta, resulta I_2 fijada en las condiciones normales de uso, y por lo tanto, Z'_2 determina la tensión U_2 , que a su vez es la que establece el valor de α y por ende de B necesario. Esta situación es tenida en cuenta por el fabricante, quien ajusta la relación de espiras de modo de lograr que los errores del transformador estén dentro de lo garantizado para valores de impedancia secundaria dados, por lo que, si se lo hace trabajar con impedancias diferentes, puede suceder que los errores excedan los establecidos. Usualmente se caracteriza la impedancia secundaria por la potencia aparente en VA que corresponde a la corriente secundaria nominal, a la que se le da el nombre de **prestación** del transformador, que es del orden de las decenas de VA como máximo.
- También la corriente primaria es condicionante de los errores, pues aparece en la expresión I_0/I_1 , que debido a la alinearidad del hierro, no es constante. Esto hace que con valores de I_1 muy diferentes del nominal los errores se agranden. En particular, con I_1 muy bajos, la disminución de permeabilidad del hierro hace que el término I_0/I_1 , crezca notablemente y por ende los errores.

7.AI.3 Análisis de los errores del transformador de tensión

A partir del circuito equivalente general de un transformador en baja frecuencia, que repetiremos aquí, podremos analizar el comportamiento del transformador de tensión:

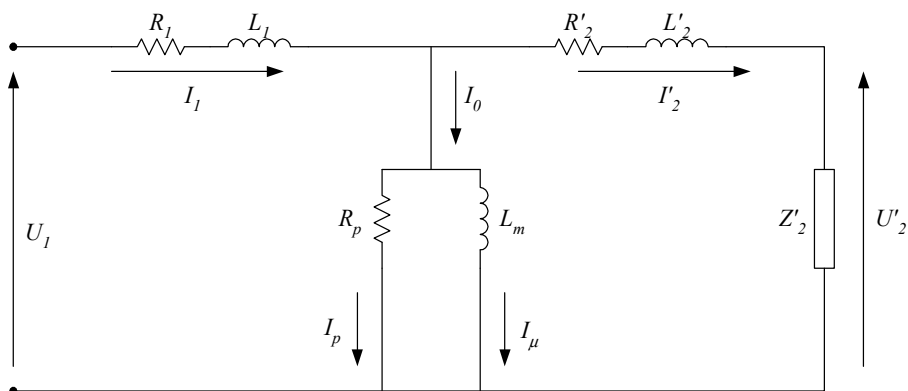


Figura 7.AI.3: Circuito equivalente en baja frecuencia de un transformador

Con un criterio similar al que se aplicó en el punto 7.AI.1 podremos lograr construir el fasorial que se presenta en la figura 7.AI.4. Como en este caso el transformador estará excitado por una fuente de tensión, y nos interesará analizar las relaciones que existen entre las tensiones del primario y del secundario, poniendo en evidencia en qué manera actúan los parámetros de ambos lados en las relaciones entre las diferentes magnitudes, es que resaltaremos las partes del fasorial que contienen la mayor información. Se sugiere al lector que compare detenidamente ambos fasoriales, que representan el estudio de circuitos formalmente idénticos, pero sometidos a distintas excitaciones y con énfasis en respuestas diferentes (corrientes y tensiones, respectivamente).

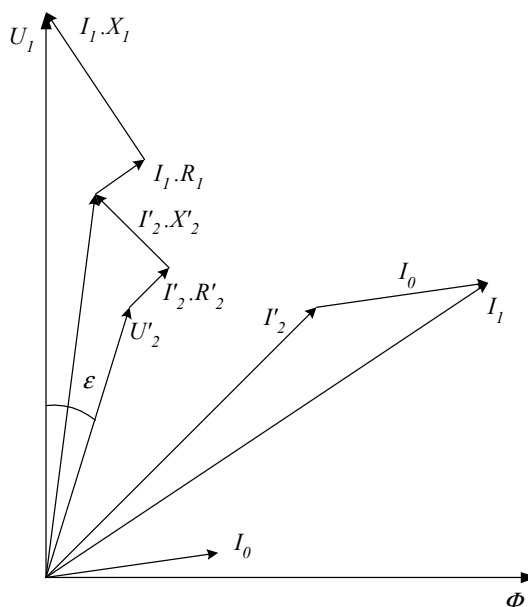


Figura 7.AI.4: Diagrama fasorial de un transformador

De él se pueden extraer varias conclusiones en forma inmediata:

- al igual que en el caso del T.A. aparecen aquí errores de relación y de fase, debido a que U'_2 y U_1 no están en fase y no resultan de módulos coincidentes.
- A diferencia de lo que sucede en un T.A., la causa principal de los errores no hay que buscarla en I_0 , sino en las caídas que se producen en las impedancias de dispersión del primario y del secundario. Más aún, al ser I_0 generalmente más baja que I'_2 , y circular sólo por la rama primaria, su contribución al error resulta en general menor.
- Debido a las condiciones de funcionamiento que le impone el sistema, derivadas del hecho de que la tensión debe permanecer tan constante como sea posible, el transformador de tensión trabaja en condiciones de flujo

aproximadamente constante, pareciéndose mucho a un transformador de potencia, por lo que I_0 resulta también constante, y por lo tanto relativamente sencillo contrarrestar su influencia en el error.

- Concordantemente con lo dicho en el párrafo anterior, el flujo al que trabaja un T.V. es sensiblemente mayor que el correspondiente a un T.A. Valores de hasta $1,2 \text{ Wb/m}^2$ son normales.
- Siendo la causa de error las caídas en las impedancias de dispersión del primario y del secundario, todos los esfuerzos del constructor se dirigen a reducir sus efectos. Para ello se trabaja con densidades de corriente en régimen permanente mucho más bajas que las que resultarían de consideraciones térmicas, por lo que los arrollamientos resultan de secciones mayores que las que tendría un transformador de potencia equivalente. En cuanto a la reactancia de dispersión, se controla hasta la medida de lo posible.
- Con el fin de disminuir los errores se ajusta la relación de espiras teniendo en cuenta la carga que deberá alimentar el transformador en condiciones de funcionamiento nominal, valiendo aquí las mismas consideraciones ya hechas en el caso del T.A. respecto de la conveniencia de trabajar con prestaciones cercanas a la nominal. En este caso, la prestación se define como la potencia aparente que se pone en juego en la impedancia de carga cuando la tensión aplicada es la secundaria nominal del transformador de tensión. En forma similar a lo que se hace en los T.A. una manera alternativa, menos común, es indicar el valor de la impedancia de carga nominal, en módulo y argumento.

7.AI.4. Análisis de los errores del transformador de tensión capacitivo

Si se considera el esquema circuital definido en 7.7. es inmediata la construcción del circuito equivalente, y luego el análisis de los errores, cosa que resulta en un todo similar a la ya hecha en ocasión del estudio del T.V.:

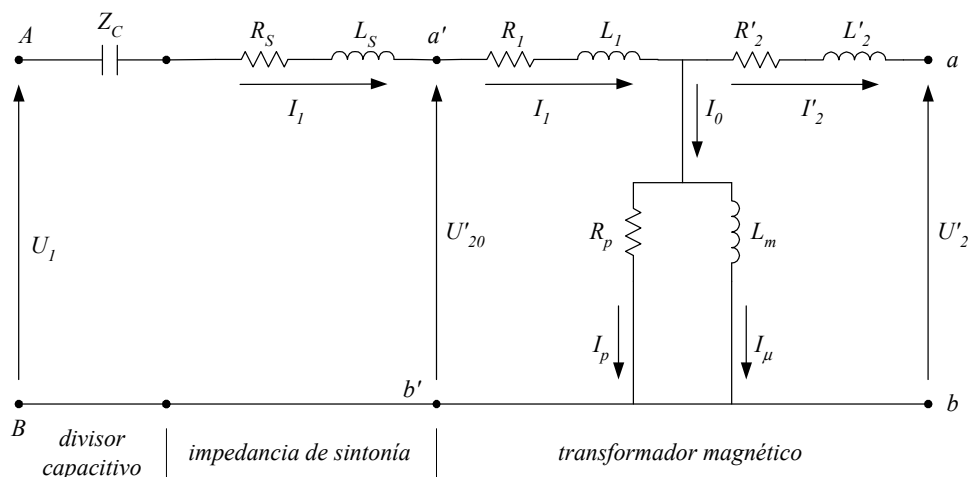


Figura 7.AI.5: Circuito equivalente en baja frecuencia de un transformador de tensión capacitivo.

Si tenemos presente lo más arriba dicho respecto de las causas de error de los T.V. concluiremos que si las impedancias Z_C , de salida del divisor capacitivo, y de dispersión del transformador magnético resuenan a la frecuencia de trabajo, la impedancia total quedará formada sólo por una parte resistiva, pequeña, lo que es saludable desde el punto de vista de los errores. Como normalmente no alcanza el valor de la Z propia del transformador magnético, se recurre al agregado de un reactor de sintonía, que es el dibujado como Z_s en la figura precedente.

La marcada similitud de ambos circuitos equivalentes hacen que sea similar el análisis de los errores del T.V. y del T.V.C., con las pequeñas diferencias que a continuación se enumeran:

- si la resonancia es perfecta, y $R_s \rightarrow 0$, el circuito equivalente es absolutamente similar al del T.V. Por supuesto que esta situación constituye una idealización.
- Si la frecuencia varía aparece un nuevo error, debido a que desaparece la condición de resonancia más arriba estudiada. Esta situación no es extremadamente grave por la índole de los sistemas en los que se emplean los T.V.C., que son generalmente de gran potencia y por lo tanto de frecuencia casi constante. Para disminuir dicha influencia hay dos caminos: achicar Z_C , lo que implica aumentar C_1 y C_2 , o aumentar la tensión primaria del transformador magnético, lo que supone una disminución de la corriente de carga para el divisor capacitivo. En la práctica, dicha tensión es del orden de 15 - 30 kV, aproximadamente.

En cuanto a las definiciones generales y valores normalizados, son las mismas para transformadores magnéticos y capacitivos [2].