

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



Moving together

ÍNDICE

1. Introducción | 4
2. Por qué transformadores de medida | 5
3. Qué son los transformadores de medida | 7
4. Cómo son los transformadores de medida | 9
 - 4.1. Circuitos eléctricos. Primario. Secundario | 9
 - 4.2. Circuito magnético. El núcleo | 10
 - 4.3. El aislamiento | 11
5. Fabricación y clasificación de los transformadores de medida | 12
 - 5.1. Fabricación | 13
 - 5.2. Clasificación según su emplazamiento | 20
 - 5.3. Clasificación según su nivel de tensión | 23
6. Exigencias que la industria impone a los transformadores de medida | 26
 - 6.1. Exigencias eléctricas | 52
 - 6.2. Otras exigencias | 53

1. INTRODUCCIÓN

Este documento está redactado como una aportación más a la formación sobre transformadores de medida (T.M.). Dedicada a las personas que habiendo cursado estudios técnicos, se incorporan a un trabajo en el que precisan conocimientos más amplios sobre estos equipos.

Se ha empleado un método expositivo moderno que sintetiza y enlaza conocimientos con realidades, obligándonos a un positivo esfuerzo de comprensión que consigue “acercarnos” a los transformadores de medida.

Estas máquinas nacieron en el siglo XIX en Alemania, como algo sencillo que cubría necesidades elementales. La complejidad a la que han llegado las actuales, confirma la evolución que ha sufrido el “Control y la Medida eléctrica” debido al avance de las matemáticas, la electrónica o la informática.

Pero no se puede mejorar un producto si a esta inquietud científica no se le aportan otras iniciativas, otras ideas y otros esfuerzos. Es la suma de la colaboración de todos los que trabajan en este medio, lo que permitirá alcanzar un sistema que integre y simplifique la utilización y versatilidad de estas máquinas.

Desearíamos que la lectura de esta obra, además de ayudarnos a conocer mejor el entorno profesional en que nos movemos, sirviera también para acrecentar nuestro afán por saber y nuestro deseo de mejora.

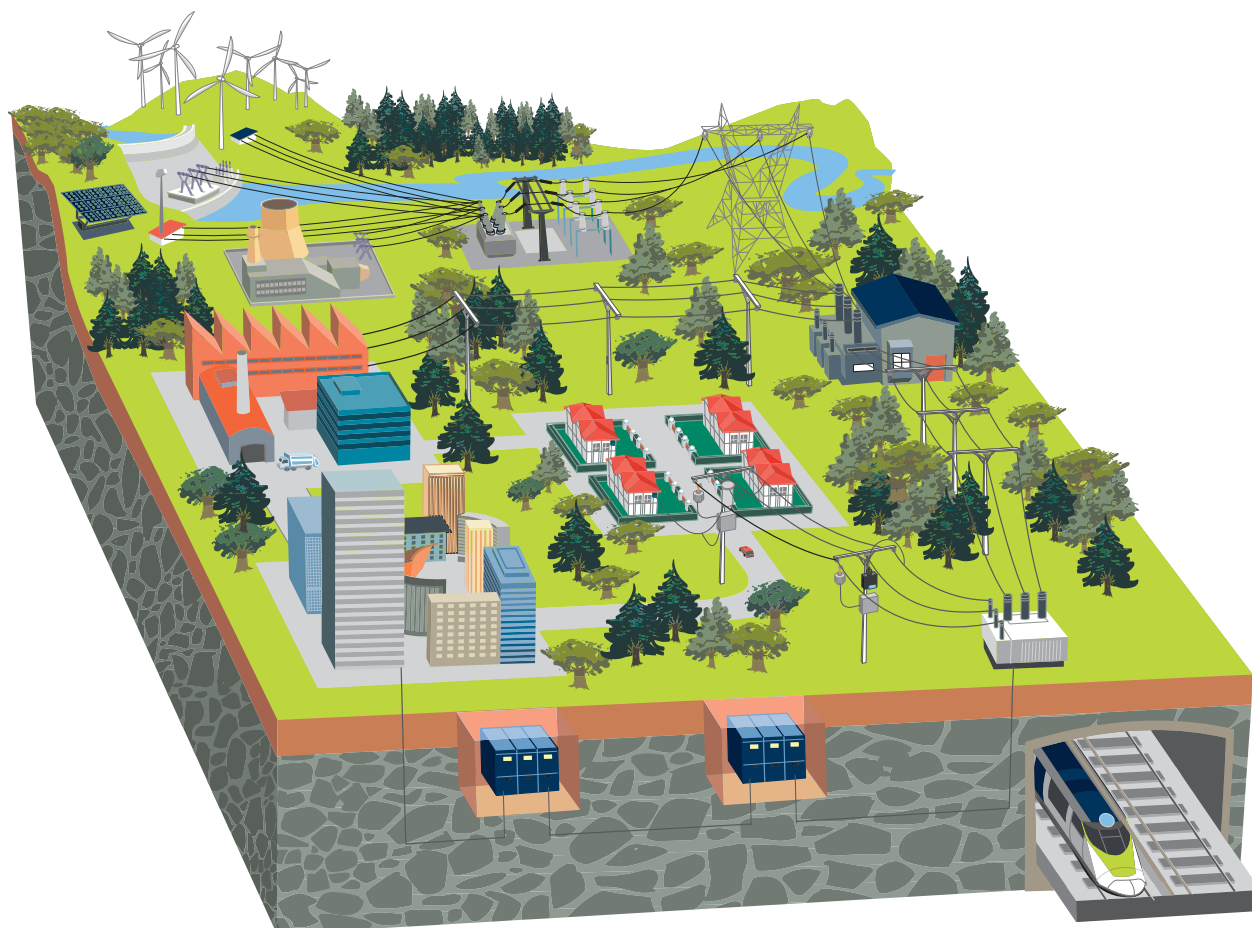


2. POR QUÉ TRANSFORMADORES DE MEDIDA

La energía eléctrica que se consume con fines domésticos, industriales, de alumbrado público, etc. se genera en grandes centrales (hidráulicas, térmicas, nucleares, eólicas...) que suelen encontrarse a distancias considerables de los puntos de consumo. La conexión entre las centrales generadoras y los consumidores se produce a través de una red muy compleja y muy mallada de transporte y distribución. Esta red no es exclusiva de una compañía eléctrica, ni siquiera de un solo país; en Europa todas las centrales están interconexiónadas entre sí y con todos los puntos de consumo. Así es que en un momento dado bien podría decirse que energía generada en el sur de España se consume en un electrodoméstico sueco. Para poder controlar los intercambios energéticos que se producen es necesario medir continuamente en una gran cantidad de puntos el estado eléctrico en que se encuentra cada uno de esos puntos de la red.

En la práctica, la medida vectorial (módulo, dirección y sentido), instantánea y simultánea de la tensión y la intensidad nos define el estado eléctrico de un punto en un sistema.

De hecho, se mide a la salida de cada una de las centrales generadoras y en cada uno de los puntos de consumo, además de a la entrada y a la salida de cada una de las líneas que confluyen en cada subestación transformadora y de distribución. Estas medidas tienen un objetivo económico, saber exactamente cuánto genera cada compañía y cuánto consume cada cliente a efectos de facturación. Pero también coexiste un objetivo técnico, pues hay que estar atento a no sobrecargar las líneas, a las averías que se producen en la red y a conseguir optimizar la generación y la distribución, haciéndolas posibles en la forma más económica y segura.



2. POR QUÉ TRANSFORMADORES DE MEDIDA

La intensidad se mide intercalando el aparato de medida en el mismo punto de la línea donde se quiere medir. Así la intensidad que pasa por la línea atraviesa toda ella el aparato de medida amperimétrico.

La tensión o diferencia de potencial entre dos puntos implica comparación y se mide entre el punto que nos interesa y otro. Como punto de referencia común para la medida de la tensión se adopta preferentemente la tierra.

En los primeros tiempos del desarrollo eléctrico las redes y sistemas existentes eran pocos y pequeños. Las medidas a tomar eran pocas y los aparatos de medida empleados se construían especialmente para aquella aplicación. Pronto fueron aumentando de tamaño y complejidad las redes eléctricas y la fabricación de aparatos de medida especiales para cada uno de los diferentes puntos en que se quería medir se fue haciendo más y más difícil. Es claro que hacer un amperímetro que pueda medir una corriente de 100 A es complicado y lo mismo si se trata de fabricar una bobina voltimétrica cuyos extremos deban estar aislados entre sí a 10.000 V. Hoy en día es frecuente tener que medir intensidades de más de 5.000 A y tensiones de 800 kV.

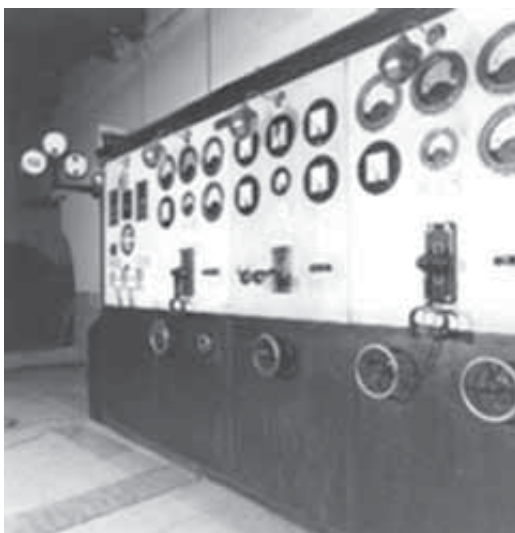
Al continuar el crecimiento y la complejidad de las redes eléctricas, la medición se iba haciendo necesaria cada vez en más puntos, y para poder controlarlas era deseable conseguir una centralización de las medidas en cuadros de control que permitiesen una supervisión conjunta de todo el sistema.

Esto obligaba a montar muchos aparatos de medida semejantes en un mismo panel y resultaba evidente que cuanto más pequeños y más parecidos fueran todos, más económicos saldrían estos montajes y más fáciles de vigilar los sistemas representados en los cuadros de control.

Los transformadores de medida (T.M.) permiten reducir los valores de intensidad y de tensión, del punto de la red en que están conectados, a valores proporcionales a aquéllos pero más pequeños. En estas condiciones es posible fabricar todos los aparatos de medida para valores apropiados económica y tecnológicamente, en lo que se refiere a materiales y tamaño de los mismos. Al ser su tamaño más reducido, es más fácil su colocación en paneles de control. Siendo los valores de intensidad y tensión que a ellos llegan suficientemente reducidos, su manipulación, entretenimiento y colocación no resultan peligrosos para el personal. Además, si convenimos en que siempre reduciremos los valores de intensidad y tensión a los mismos valores finales, resulta que los aparatos de medida serán intercambiables y se podrán fabricar en grandes series, lo que reducirá sus costos enormemente y facilitará su instalación al ser siempre iguales.

Efectivamente se ha llegado a bastante unanimidad en este punto y la casi totalidad de los T.T. (transformadores de tensión) reducen los valores de la tensión a que están conectados a 110 V o 100 V y los T.I. (transformadores de intensidad) reducen la intensidad a 5 A o 1 A.

- Evolución de los aparatos en una sala de control.



3. QUÉ SON LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

Son transformadores de características especialmente diseñadas para medir. Como transformadores, son máquinas eléctricas que aprovechan las propiedades electromagnéticas de las corrientes alternas y de los materiales ferromagnéticos para conseguir su finalidad, que es obtener de la energía eléctrica que sale de ellos un reparto diferente en tensión e intensidad que de la que entra a ellos.

Las corrientes eléctricas alternas crean flujos magnéticos alternos que son capaces, a su vez, de inducir otras corrientes eléctricas alternas en materiales conductores que se hallen bajo su influencia.

Las corrientes eléctricas alternas que pasan a través de conductores arrollados crean campos magnéticos muy concentrados en el interior de los arrollamientos.

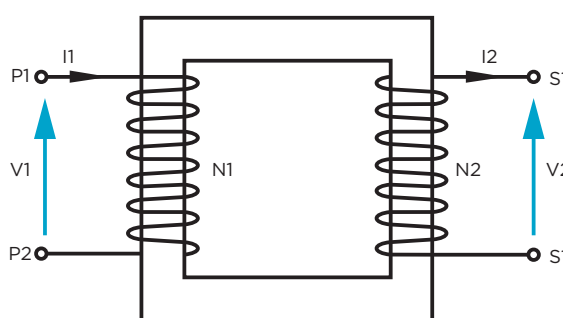
Los materiales ferromagnéticos tienen la propiedad de conducir muy bien los flujos magnéticos. En el transformador aprovechamos esta cualidad para conducir el flujo magnético que genera el arrollamiento primario en el interior del núcleo ferromagnético.

Al atravesar el flujo magnético al arrollamiento secundario se induce en él una corriente eléctrica alterna semejante a la primaria que ha generado el flujo magnético, pero que puede tener características diferentes de aquella si los arrollamientos no son iguales.

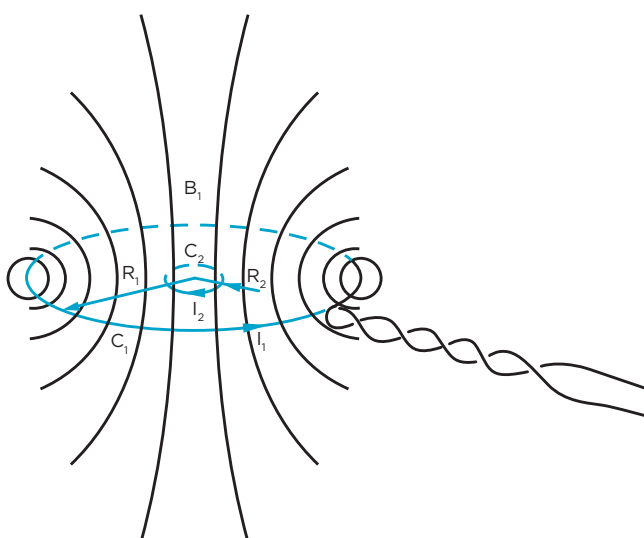
Podríamos definir un transformador como una máquina eléctrica que, aprovechando los fenómenos electromagnéticos, varía las características eléctricas que se dan a su entrada hasta obtener las deseadas en su salida con pérdida mínima de energía.

Para ello consta de:

- › Un primario, que es un arrollamiento conductor conectado a la red de alimentación.
- › Un núcleo de material ferromagnético que hace de eslabón entre el primario y el secundario transfiriendo la energía de uno a otro.
- › Un secundario, que es un arrollamiento conductor conectado a los instrumentos de medida y/o protección.



› Diagrama esquemático de un transformador.



› Corriente inducida en una espira.

3. QUÉ SON LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

La diferencia constructiva entre primario y secundario es la que hace variar las características con que se manifiesta la energía en uno y otro. La diferencia más destacada es la que hace referencia al número de espiras. En un transformador se cumple aproximadamente que

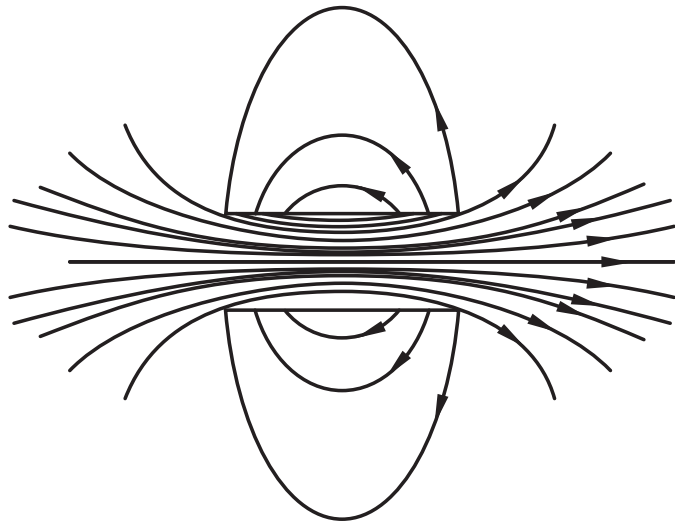
$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

- › I1: Intensidad primaria.
- › V1: Diferencia de potencial primaria.
- › N1: Número de espiras primarias.
- › I2: Intensidad secundaria.
- › V2: Diferencia de potencial secundaria.
- › N2: Número de espiras secundarias.

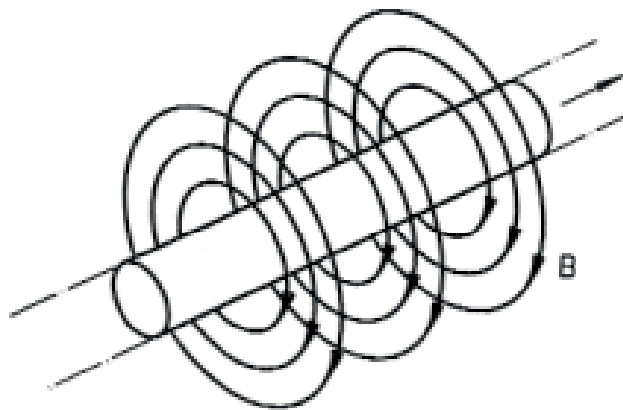
A este cociente se le llama relación de transformación del transformador.

Los transformadores de medida se distinguen entre los diversos tipos de transformadores que hay (de potencia, separadores de circuitos, variadores de frecuencia, para soldadura, etc.), fundamentalmente porque tratan de conseguir que esa relación sea lo más precisa posible.

El estado eléctrico de un punto en un sistema viene determinado por los valores de la tensión e intensidad que en él se midan, y los T.M. (transformadores de medida) se especializan en conseguir que su relación de transformación fije muy exactamente la proporción entre sus intensidades primaria y secundaria, con lo que tendremos los T.I. (transformadores de intensidad); o que lo sea la proporción entre sus tensiones primaria y secundaria, y entonces estaremos ante los T.T. (transformadores de tensión).



› Campo magnético creado por un arrollamiento cilíndrico.



› Campo magnético creado por un conductor longitudinal.

4. CÓMO SON LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

Vamos a tratar de ver en este apartado las partes que constituyen un T.M. real y la forma en que están diseñadas y construidas para hacer frente a los problemas específicos de cada una de ellas. Distinguiremos entre primario, secundario y núcleo.

En cada uno de ellos veremos cómo influyen el campo eléctrico y el campo magnético, así como la necesidad de separarlos y confinarlos mediante el aislamiento.

4.1. CIRCUITOS ELÉCTRICOS - PRIMARIO - SECUNDARIO

Tanto el primario como el secundario son arrollamientos de material muy buen conductor eléctrico. Los mejores conductores a nivel industrial son el cobre y la plata, y dado que este último es el más caro, se usará comúnmente el cobre. En particular, se usa cobre recocido porque se dobla más fácilmente y así facilita su trabajo. El aluminio es un metal que conduce bien la electricidad, aunque en menor grado que el cobre pero, como es bastante más barato y más ligero, compite con él en algunas aplicaciones.

Es importante que los arrollamientos estén hechos de material buen conductor porque su misión es transportar la corriente eléctrica con las menores pérdidas posibles.

Los bornes, que son los terminales de los arrollamientos que luego estarán en contacto con el ambiente, suelen ser de aleaciones de cobre (bronce o latón), cobre puro o aluminio y a veces de otras composiciones metálicas menos empleadas.

› Arrollamientos secundarios para transformadores de intensidad.



4.2. CIRCUITO MAGNÉTICO - EL NÚCLEO

Ya vimos que una corriente eléctrica alterna crea un flujo magnético alterno. El flujo magnético siempre forma líneas cerradas a través del espacio, pero en algunos materiales tiene más facilidad para circular que en otros. Los materiales en que el flujo magnético transita más fácilmente se llaman ferromagnéticos porque el hierro es uno de ellos. A modo de comparación puede decirse que en el hierro el flujo magnético transita como mil veces más fácil que en el aire.

Como en un T.M. (transformador de medida) lo que se pretende es que todo el flujo magnético que genera el primario, atraviese el secundario, para generar a su vez en éste una intensidad o tensión semejante a la del primario, lo que se hace es facilitar el paso de todo el flujo por el interior del secundario, dándole la posibilidad de ir a través del hierro del núcleo, alrededor del cual se dispone el secundario lo más cerradamente posible.

La circulación del flujo a través del núcleo produce pérdidas. Se trata de la energía eléctrica consumida en la magnetización del hierro y en el calentamiento del mismo. Lo más importante es disminuir estas pérdidas al mínimo, empleando varias vías:

- › Elección de un material ferromagnético adecuado a las características que se pretenden, p. ej. hierro con un 70% de níquel (Mumetal), chapas de grano orientado, etc.
- › Tratamiento térmico de las chapas, p. ej. laminado en frío y posterior recocido.
- › Empleo de chapas muy finas apiladas, aisladas eléctricamente una de otra para

eliminar corrientes eléctricas que el flujo magnético mismo induce sobre el núcleo, a causa de que éste está fabricado con material que también conduce eléctricamente (el hierro es como cuatro veces peor conductor eléctrico que el cobre).

- › Eliminación de entrehierros y discontinuidades, como pernos y similares, a la hora de fabricar el núcleo y montarlo.

El tamaño del núcleo será diferente según la cantidad de potencia eléctrica que deba transmitir de primario a secundario por vía electromagnética. Cuanto mayor sea la potencia eléctrica mayor será el flujo magnético creado y mayor será la cantidad de hierro que éste va a usar como camino. Igual que cualquier camino, el núcleo ofrece un valor de ocupación óptima; si el valor del flujo es pequeño el núcleo estará infrutilizado y si el valor del flujo es demasiado grande el núcleo se satura.

El estado de saturación del núcleo depende de la sección del hierro que se ofrece al paso del flujo magnético, y del número de amperivoltas (A.V.) que se hayan establecido. Los amperivoltas, como su mismo nombre indica, son el producto del número de amperios que circulan por los arrollamientos conductores y el número de vueltas o espiras de que estos se componen. Los amperivoltas son imagen de la magnitud del flujo creado, y se mantienen constantes en el primario y en el secundario; los primeros crean el flujo magnético y los segundos son generados por él.



› Núcleo magnético para transformadores de tensión.

4. COMO SON LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

4.3. EL AISLAMIENTO

Como en todos los transformadores, en el T.M. (transformador de medida) hay que aislar y separar convenientemente unos circuitos de otros entre sí y del exterior.

Así, en cada uno de los arrollamientos primario y secundario, debe aislarse cada espira de la siguiente para que la corriente las atraviese ordenadamente una después de otra y no todas a la vez. En el caso de hilos de cobre al comprarlos esmaltados, o sea con un recubrimiento continuo de esmalte aislante, ya se tiene un primer aislamiento entre espiras que luego se reforzará con sucesivas capas de papel. Si no vinieran aislados los hilos habría que proceder a su aislamiento, como se hace en el caso de pletinas y cintas desnudas que se aíslan con fundas o cartones. El papel impregnado de gas aislante (hexafluoruro de azufre: SF₆) o de aceite es mucho mejor aislante que el papel solo. Esta circunstancia se utiliza en el aparato completo al realizar una impregnación con estos elementos.

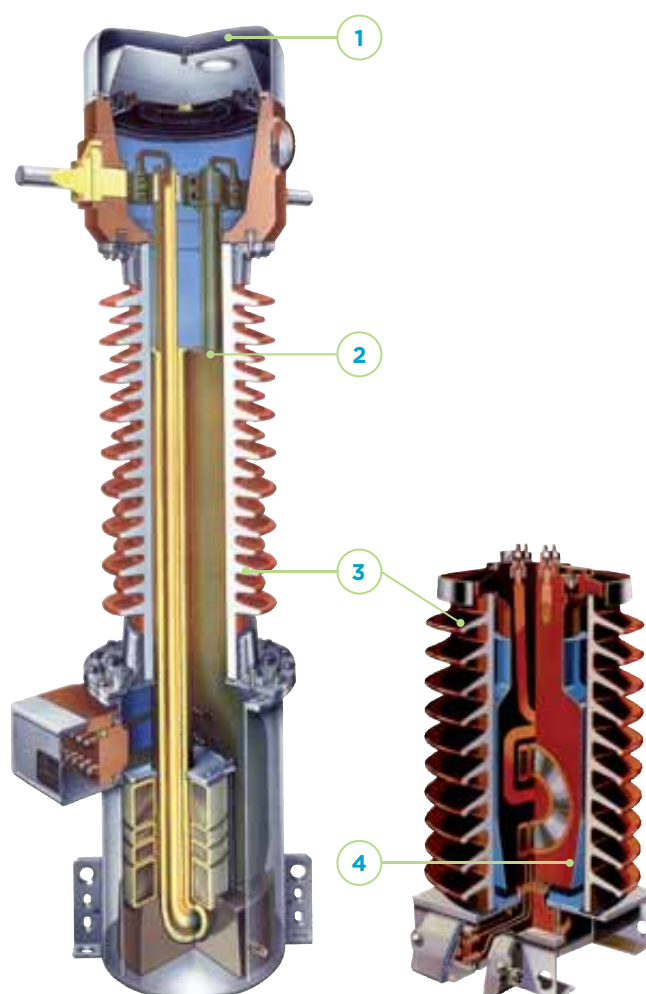
Para aislar un arrollamiento del otro también se recurre a papel impregnado o a resina (hasta media tensión) Este mismo tipo de aislamiento se da al núcleo respecto a cada uno de los arrollamientos.

El aislamiento del aparato frente al ambiente se consigue mediante porcelana, silicona o resina cicloalifática en los de ser vicio exterior o intemperie y a base de resina epóxida en los de ser vicio interior.

Hemos de consignar también el aislamiento que se procura entre cada una de las finas chapas que componen el núcleo. De lo que se trata en este caso es de impedir que el núcleo, que está hecho de material que además de ser muy buen conductor del flujo magnético (que es lo que queremos) es un mediano conductor de la corriente eléctrica (cualidad que no

deseamos), se dedique a funcionar como si de un secundario más se tratara. Aislado entre sí las chapas se interrumpen las corrientes eléctricas que el flujo magnético genera en ellas, manteniéndolas así muy pequeñas (pérdidas de Foucault). Este aislamiento lo da el mismo fabricante de las chapas proporcionándoles un recubrimiento superficial aislante.

La forma y calidad del aislamiento depende en cada caso de múltiples factores, siendo el principal el valor de la tensión que existe entre los dos extremos a aislar. Aquí conviene tener presente que la relación entre espesor de aislante y tensión aplicada no es lineal, así que no se cumple que a doble tensión aplicada doble espesor de aislante a interponer, sino que habrá que atenerse a lo que en cada caso corresponda a la naturaleza del dieléctrico. (Material dieléctrico es cualquier material aislante, es decir, un mal conductor).



1. Compensador de volumen de aceite
2. Papel impregnado en aceite
Aislamiento entre A.T. y B.T.
3. Aislador exterior (porcelana o silicona)
4. Aislamiento (resina)

➤ Modelos CH y CX.

5. FABRICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

A la vista de los principios generales comentados en los apartados anteriores, vamos a observar la forma en que se aplican en los diversos casos que se presentan en la práctica y que se han clasificado según varias categorías simultáneas, atendiendo a algunos hechos o prestaciones características que los identifican.

Vamos a efectuar tres distinciones principales referentes: al tipo de medida a efectuar, de intensidad o de tensión, a su emplazamiento, interior o a la intemperie y a la tensión de la red a que se van a conectar, baja, media o alta tensión.

Según se trate de unos u otros casos, determinadas características tendrán mucho o poco interés y se acudirá a unos materiales o a otros y a unos procesos de fabricación u otros según el tipo de compromiso que se establezca en cada caso.

› Transformadores de intensidad y tensión inductivos de 420 kV. Red Eléctrica de España.



5. FABRICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

5.1. FABRICACIÓN

TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD -T.I.-

Los transformadores de intensidad se conectan intercalados en la misma línea conductora, de modo que la corriente que ésta transporta pasa toda ella a través del primario del T.I. Tienen siempre dos bornes primarios. La resistencia eléctrica entre estos dos bornes es siempre muy pequeña, de modo que en condiciones normales la diferencia de potencial entre ellos es insignificante, del orden de mV.

El primario puede pasar una o más veces a través del núcleo, según que la intensidad que circula por él sea bastante para hacer que aquél quede suficientemente magnetizado, es decir, lo atraviesen bastantes amperivueluntas; o bien se deban reforzar estos dando más vueltas al primario, ya que los amperios que transporta no son suficientes.

En el caso de que con una sola vez que se atraviese al núcleo sea suficiente, el primario suele fabricarse a base de una simple barra conductora de cobre o aluminio. Cuando deben dar varias vueltas se aísla cada una de ellas, o espira, de las demás con algunos mm de papel o cartón.

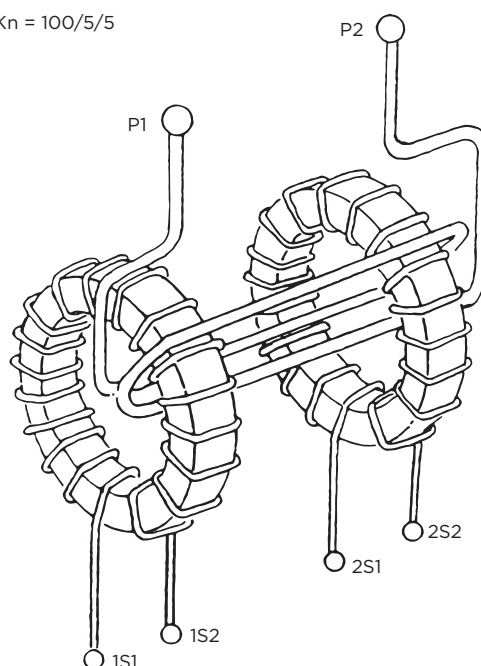
Siempre tratamos de que el núcleo de material ferromagnético abrace lo más estrechamente posible al primario para aprovechar al máximo el campo magnético que aquél genera, sin embargo, hay veces que la intensidad que circula por el primario es tanta que sobra para magnetizar adecuadamente al núcleo aunque ambos estén ligeramente separados.

En estos casos los T.I. (transformadores de intensidad) se diseñan en lo que se dice “paso intensidad primaria se refiere, fabricaremos el T.I. con una sola espira, o sea pasando una sola vez el primario a través del núcleo, pero para aprovechar al máximo la intensidad primaria haremos que el núcleo abrace lo más estrechamente posible el primario y el T.I. se realizará con “barra incorporada”, a cuyos bornes habrá luego que conectar la línea conductora. Un T.I. con “primario bobinado” tendrá el mismo aspecto exterior que el anterior, pero el conductor primario dará más de una vuelta alrededor del núcleo.

El núcleo de los T.I. se fabrica enrollando simplemente chapa fina continua en forma toroidal hasta completar la sección necesaria. Ya dijimos que la chapa viene de fábrica con un recubrimiento aislante y ésta es la forma más cómoda de apilarla apretadamente de manera que forme un todo homogéneo sin entrehierros ni inserciones extrañas. Por otro lado, el que en los T.I. normalmente el número de espiras secundarias a dar sea relativamente bajo, del orden de centenares, permite sin excesivo encarecimiento usar el procedimiento de arrollar éstas directamente sobre un núcleo toroidal cerrado. Entonces lo que se hace es proteger y aislar el núcleo toroidal mediante cartón y cinta plástica hasta un nivel de 4 kV generalmente y arrollar encima el secundario, procurando que éste quede uniformemente repartido por toda la circunferencia.



$K_n = 100/5/5$



- Bobinado del núcleo del transformador.
- Transformador de intensidad.

5. FABRICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

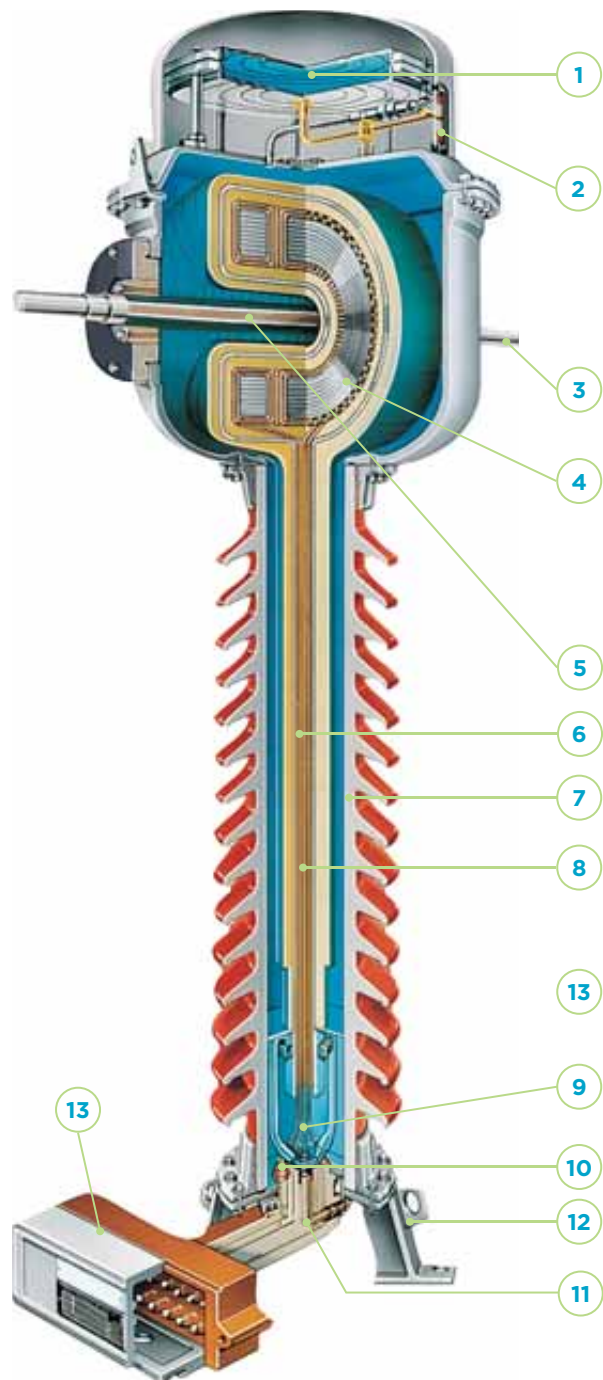
Es práctica usual emplazar más de un secundario por aparato aprovechando que haya sitio. Para ello se realizan otros tantos núcleos toroidales (con su arrollamiento secundario bobinado encima) los cuales dispuestos uno al lado del otro con los agujeros bien centrados de forma que sean atravesados conjuntamente por el mismo primario.

En el caso de los T.I. de A.T., para simplificar en lo posible los problemas de aislamiento a esas tensiones entre primario y secundario tan elevadas, lo que se hace es introducir todos los núcleos con sus secundarios arrollados en una caja metálica (de aluminio) cuya forma se ha estudiado cuidadosamente para que tenga efectos correctores sobre el campo eléctrico y que encierra totalmente a aquéllos. Esto permite prever un programa de aislamiento común a todos los T.I. (transformadores de intensidad) de igual modelo, aunque sea diferente el número y tamaño de los secundarios que lleven.

Hay veces que se prevé una futura ampliación de una instalación, de modo que la intensidad cambiará. Para no tener que retirar entonces el T.I., cambiándolo por otro nuevo adecuado a esa intensidad diferente, es frecuente pedir inicialmente el T.I. con varias intensidades primarias nominales. También se hace, sobre todo en A.T. (alta tensión), con el fin de pedir iguales todos los T.I. de una subestación y facilitar así su reemplazamiento y entretenimiento aunque deban transformar cada uno intensidades diferentes.

Constructivamente puede hacerse esto mediante tomas en los arrollamientos secundarios (con la particularidad de que en cada una el número de A.V. será distinto), o bien mediante la realización del primario en dos o cuatro arrollamientos iguales, que

conectados en serie o paralelo darán lugar a la doble relación primaria (D.R.P.) y en serie paralelo, en el caso de cuatro arrollamientos, a la triple relación primaria (T.R.P.). En este caso se mantienen constantes los A.V. en cada una de las conexiones, pero encareciendo algo el aparato a causa de la mayor cantidad de cobre que lleva el primario para establecer dichas conexiones.



1. Compensador de volumen de aceite
2. Indicador de nivel de aceite
3. Terminal primario
4. Núcleos y arrollamientos secundarios
5. Conductor primario
6. Conductores secundarios
7. Aislador (porcelana o silicona)
8. Borna condensadora
9. Conexión de tierra reforzada
10. Toma de muestras de aceite
11. Toma medida tangente delta
12. Terminal de puesta a tierra
13. Caja de terminales secundarios

➤ Modelo CA.

5. FABRICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

TRANSFORMADORES DE TENSIÓN INDUCTIVOS - T.T.I. -

Los transformadores de tensión se conectan entre dos puntos a potencial diferente entre sí. Se distingue entre el hecho de que estos dos puntos estén ambos a diferente potencial que tierra, o que uno de ellos esté directamente puesto a tierra. A los primeros los denominamos bifásicos (fase-fase, dos polos) y a los segundos monofásicos (fase-tierra, un polo). Eléctricamente y desde el punto de vista constructivo son más racionales los T.T.I. monofásicos, pero determinadas medidas trifásicas pueden hacerse utilizando dos transformadores bifásicos en vez de tres monofásicos, lo que da a aquéllos cierta ventaja económica. Sin embargo a partir de los 52 kV es muy raro encontrar T.T.I. bifásicos.

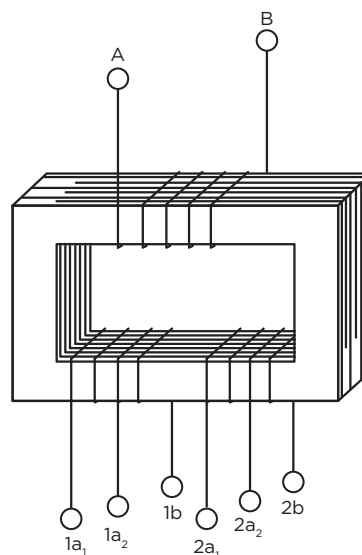
Los T.T. llevan normalmente un solo núcleo sobre el que se arrollan apretadamente entre uno y tres secundarios y un primario. Los secundarios tienen del orden de cientos de espiras y entre sus extremos se miden cientos de voltios, por lo que basta, entre las espiras de una capa, el aislamiento de esmalte de que van recubiertos los hilos con que se fabrican, y, entre capas, unas décimas de mm de papel. Respecto a tierra deben aislarse a 3 o 4 kV y entonces se necesita del orden del mm de papel.

En los aparatos monofásicos el núcleo y uno de los bornes de cada uno de los arrollamientos se conecta rígidamente a tierra, al igual que todas las demás partes metálicas que componen el aparato: cuba, base, etc.

En los bifásicos ocurre igual, excepto en lo que concierne al primario. Cada uno de los extremos de éste está aislado respecto del otro a la tensión nominal (la tensión de línea, o entre fases, que es lo mismo) de la red. Respecto a tierra, los extremos del primario están aislados a la tensión nominal dividida por $\sqrt{3}$ (tensión de fase de la red).

Entonces a fin de aprovechar mejor el programa de aislamiento se divide en algunos casos el arrollamiento primario en dos secciones simétricas, cada una de las cuáles está aislada entre sus extremos a la mitad de la tensión nominal del aparato, estando el punto medio de conexión entre ambos a una tensión intermedia de la nominal.

Se utilizan núcleos rectangulares de dos columnas, o a veces, por problemas de espacio, acorazados. Se cortan las chapas de cada lado del rectángulo separadamente y se ensamblan luego mediante pernos roscados. Las características electromagnéticas de estos núcleos son inferiores a las de los núcleos toroidales utilizados en los T.I. (transformadores de intensidad), debido a los entrehierros e inserciones entre chapas.



> Transformador de tensión.

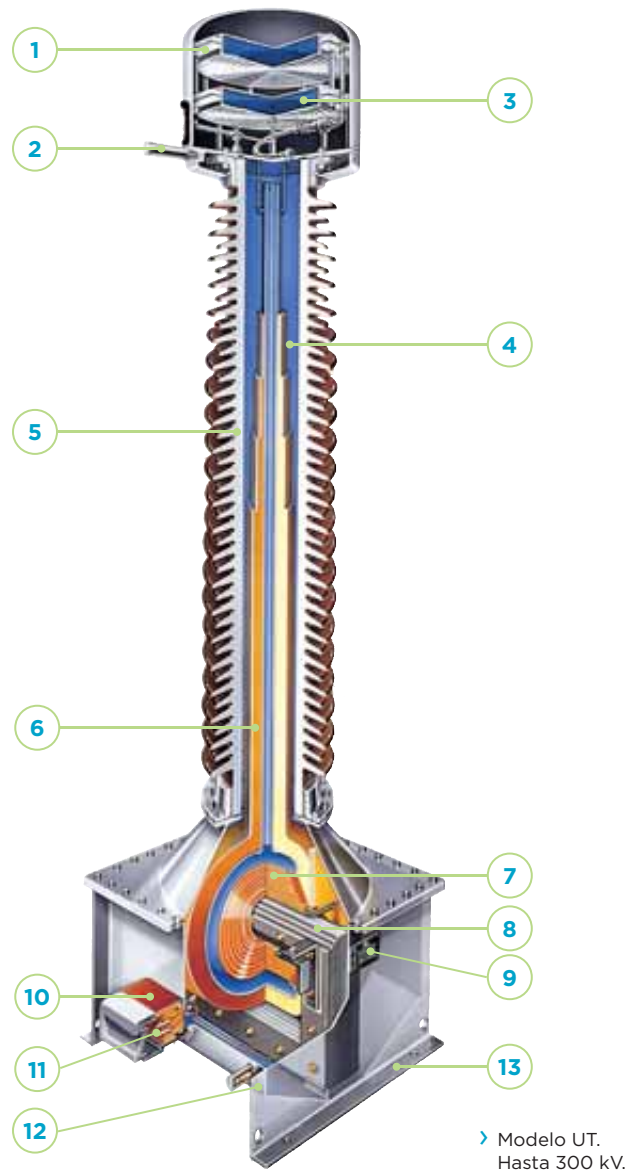


> Transformadores de tensión de uno y dos polos.

5. FABRICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

Aun así, se prefieren estos núcleos, que obligan a tamaños más grandes de aparatos, por tener que realizar bobinados primarios con un elevado número de espiras. Al ser tantas las espiras se hace obligado el empleo de bobinadoras rectas de gran velocidad que arrollan los bobinados sobre un mandrino cilíndrico que luego se introduce en el núcleo, por lo que éste debe poder abrirse.

Si, por similares razones que en los T.I. se requieren T.T. con varias tensiones primarias distintas, casi siempre se realizan por tomas en el secundario. El motivo de ello es que sacar una borna a tensión primaria intermedia es mucho más caro que sacar una toma secundaria, incluso en el caso de que para conseguirlo haya que ir a un T.T. de una serie superior.



1. Indicador de nivel de aceite
2. Terminal primario
3. Compensador de volumen de aceite
4. Borna condensadora
5. Aislamiento papel-aceite
6. Aislamiento (porcelana o silicona)
7. Arrollamientos primarios
8. Arrollamientos secundarios
9. Núcleo
10. Toma medida tangente delta
11. Caja terminales secundarios
12. Toma de muestras de aceite
13. Terminal de puesta a tierra



5. FABRICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

TRANSFORMADORES DE TENSIÓN CAPACITIVOS -T.T.C.-

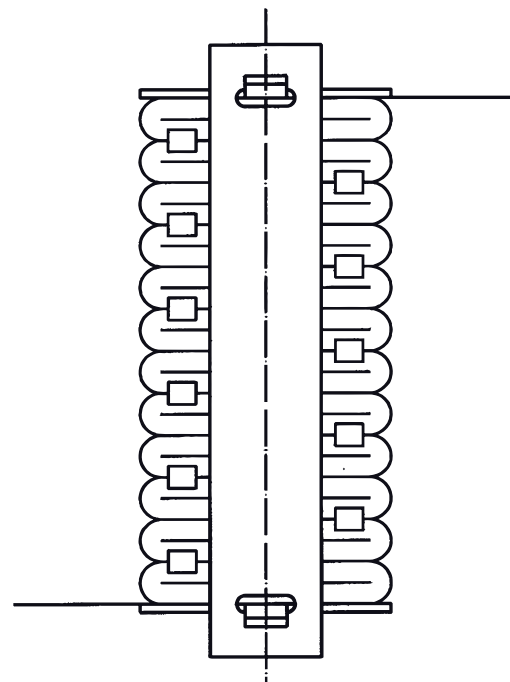
Los transformadores de tensión inductivos tratados en el apartado anterior necesitan más espiras cuanto mayor es su tensión nominal. Con esto el proceso de fabricación se alarga y encarece, las bobinas son cada vez mayores, exigen más espacio y en consecuencia aparatos más grandes.

Para reducir una tensión a otra menor y proporcional a ella se conocen más procedimientos que el electromagnético. Si conectamos varios condensadores en serie y aplicamos una determinada tensión entre el primero y el último, cada uno de ellos quedará cargado a una tensión parcial proporcional a su capacidad; sumando todas las tensiones parciales tendremos obviamente la total.

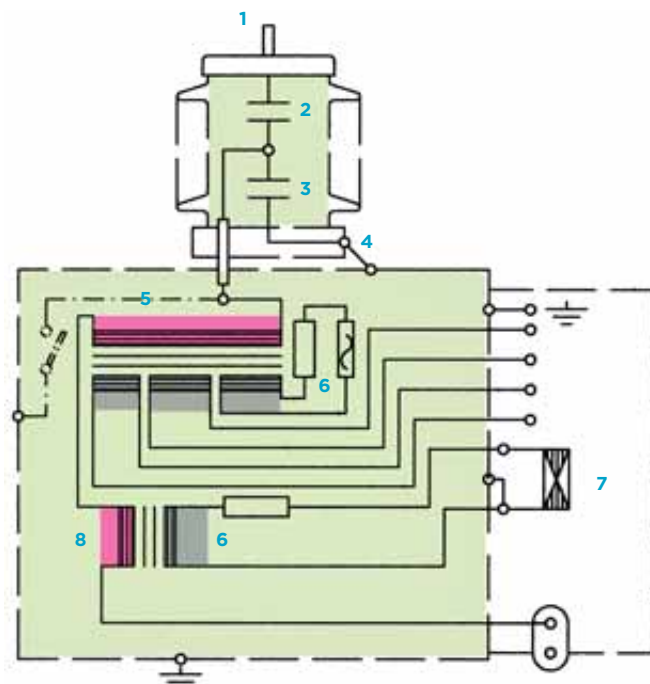
Si hacemos iguales todos los condensadores, todas las capacidades serán iguales, y por lo mismo, serán iguales todas las tensiones parciales. La diferencia de potencial entre dos puntos dados de la serie de condensadores será proporcional al número de estos que haya intercalados entre esos dos puntos. Esta idea da lugar al divisor capacitivo (D.C.) de tensión. El T.T.C. es un transformador de tensión que incluye una columna de condensadores con una toma de tensión intermedia, o sea, un divisor capacitivo, y un transformador de tensión inductivo que va conectado a dicha toma. Esa toma se elige a una tensión tal que el T.T.I. sea de construcción económica (por ejemplo $22/\sqrt{3}$ kV), de modo que el T.T.I. sea un transformador de tensión de media tensión común.

La fabricación de la columna de condensadores ha de ser muy cuidadosa en lo que respecta a los materiales utilizados y al ambiente de proceso pero tiene la ventaja de que es sencilla y repetitiva. Se reduce a bobinar sobre un mandrino cilíndrico dos finas capas conductoras de aluminio separadas por varias de papel y/o plástico hasta alcanzar una longitud prefijada que se corresponda con la capacidad que se pretende conseguir. Luego se prensa esta bobina aplanándola y se agrupan varias de ellas en paquetes que se sujetan para que mantengan su tamaño. La magnitud de estos paquetes se hace corresponder con la tensión intermedia de modo que los aparatos lleven un número entero de paquetes.

Los paquetes de condensadores son de sección cuadrada y se introducen justamente en la porcelana. Después de secado y hecho vacío se llena de aceite. Las variaciones de volumen con la temperatura se neutralizan por unos compensadores cilíndricos de acero inoxidable. Así es que cada porcelana forma un conjunto separado, que puede luego ensamblarse con otros iguales en los casos de más altas tensiones y con el T.T. inductivo que va en una cuba metálica que sirve de base al divisor capacitivo.



► Paquete condensador.



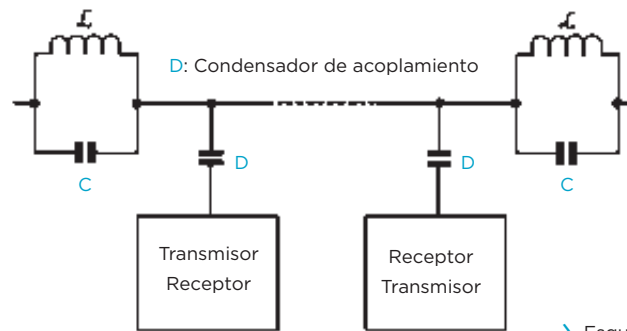
1. Terminal primario
2. Condensadores
3. Condensadores
4. Terminal de alta frecuencia
5. Transformador de tensión inductivo
6. Circuito de supresión de ferresonancia
7. Caja de bornes secundarios
8. Reactancia de compensación

5. FABRICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

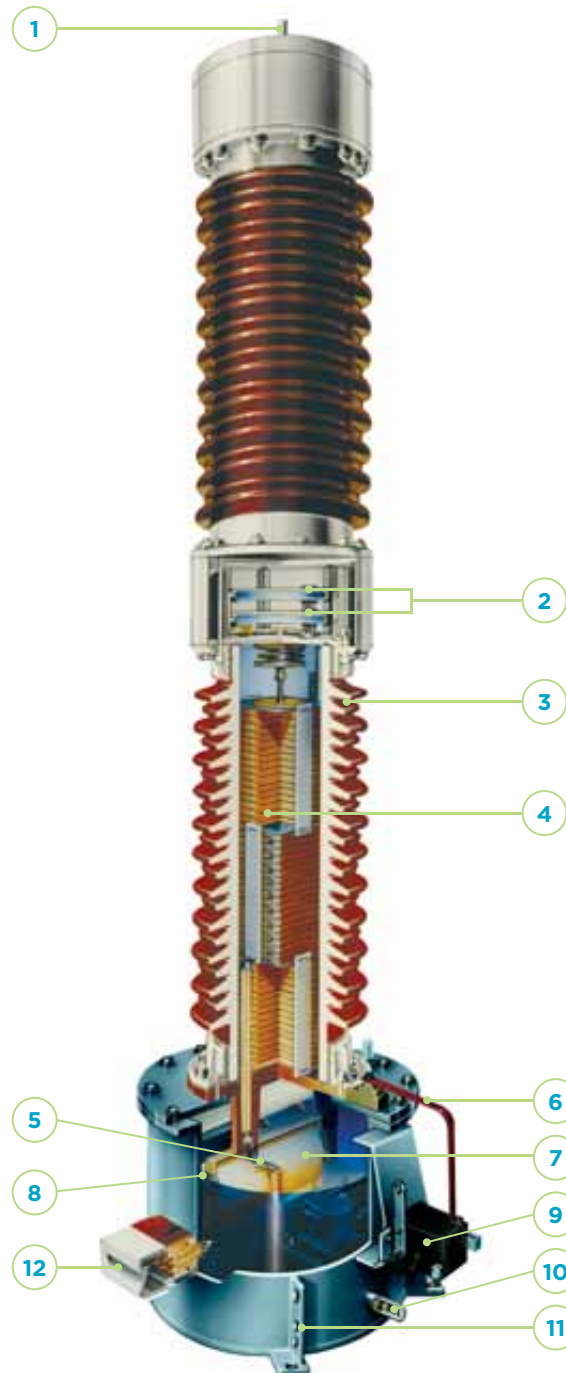
Otra razón para usar T.T.C. son las necesidades de telecomunicaciones entre subestaciones. Las redes eléctricas interconectan puntos geográficamente distantes entre sí: las centrales generadoras, las subestaciones de distribución, los despachos de control y los centros de consumo. Es necesario transmitir información entre cada uno de estos lugares. Desde un principio se han empleado los mismos cables de transmisión de energía como portadores de las señales de alta frecuencia, de tipo telefónico que establecen esta intercomunicación. No es la única forma de comunicación empleada; se usan también las redes telefónicas, enlaces de microondas, de radio y fibra óptica.

Para transmitir señales de A.F. (40 kHz÷500 kHz) por los cables de alta tensión portadores de la energía a 50 Hz es necesario conseguir una entrada de la señal de A.F., que no permita escapar a la energía transportada. Esto se hace a través de un condensador de acoplamiento (C.A.) que presenta alta impedancia a 50 Hz y muy baja a más de 40 kHz.

Del análisis de todo lo anterior se llegó a la conclusión de unir en una sola pieza el D.C. y el C.A., con lo que se conseguirían importantes ventajas económicas. Esta consideración dio un gran impulso a los Transformadores de Tensión Capacitivos teniendo en cuenta que el T.T.C. es económico incluso empleado sólo como transformador, de modo que los accesorios de corriente portadora de A.F. son opcionales.



› Esquema de principio de inserción de bobinas de bloqueo en una línea de alta tensión.



1. Terminal primario
2. Compensador de volumen de aceite
3. Aislador (porcelana o silicona)
4. Condensadores
5. Toma de tensión intermedia
6. Terminal de alta frecuencia
7. Transformador de tensión inductivo
8. Indicador de nivel de aceite
9. Accesorios de onda portadora
10. Toma de muestras de aceite
11. Terminal de puesta a tierra
12. Caja terminales secundarios

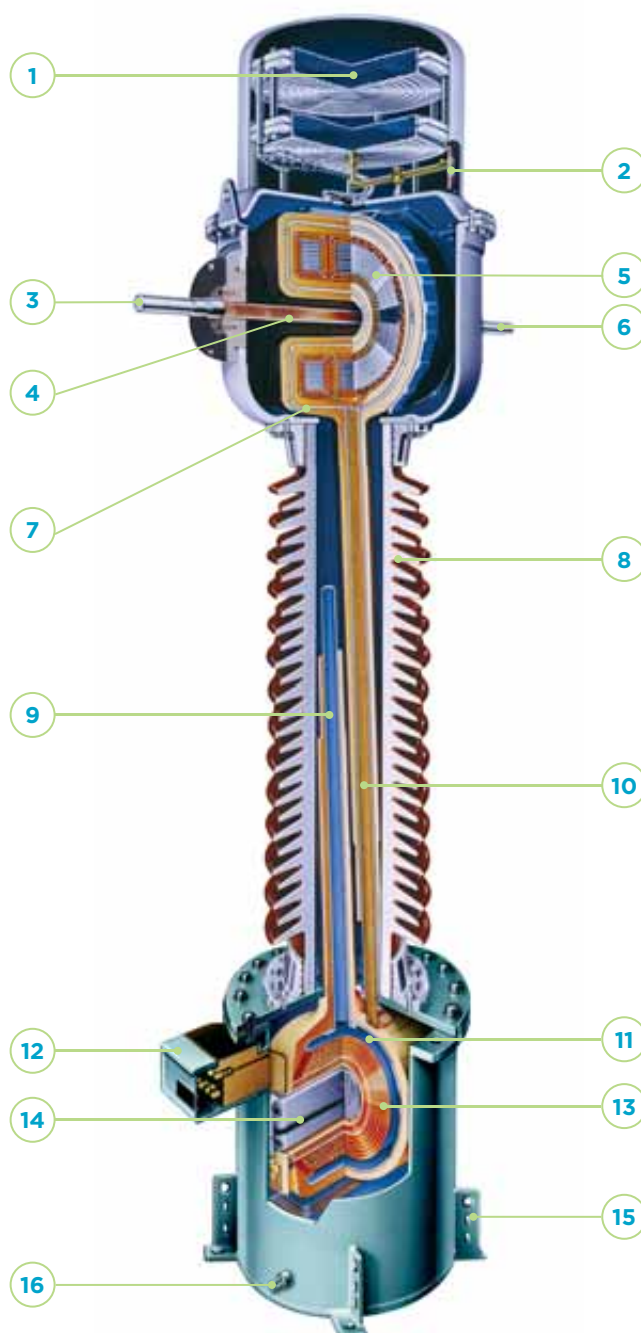
› Transformador de tensión capacitivo.

5. FABRICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

TRANSFORMADORES COMBINADOS DE MEDIDA

Estos aparatos albergan en su interior conjuntamente un T.I. (transformador de intensidad) y un T.T. (transformador de tensión) La razón más importante de que se fabriquen estos aparatos estriba en economizar piezas y espacio.

En la parte superior esta el T.I., y en la inferior el T.T., debido a la proximidad entre ambos., los campos eléctricos se influyen mutuamente a la hora de hacer sus respectivas medidas; por tal motivo se debe realizar un diseño más crítico para conseguir la misma precisión en la medida que los T.I. y los T.T. logran por separado. También hay que tener presente que si por cualquier razón se avería el uno de ellos, al retirar de servicio el transformador, nos quedaríamos sin ambos.



1. Compensador de volumen de aceite
2. Indicador de nivel de aceite
3. Terminal primario (P1)
4. Conductor primario de T.I.
5. Bobinado secundario de T.I.
6. Terminal primario (P2)
7. Núcleos de T.I.
8. Aislamiento porcelana o silicona
9. Borna condensadora T.T.
10. Borna condensadora T.I.
11. Bobinado primario de T.T.
12. Caja terminales secundarios
13. Bobinado secundario de T.T.
14. Núcleo de T.T.
15. Terminal de puesta a tierra
16. Toma de muestras de aceite

► Modelo UTG.

TRANSFORMADORES DE MEDIDA ÓPTICOS

Estos tipos de transformadores de medida son denominados “Transformadores no Convencionales” debido a la utilización de nuevas tecnologías para la captación de la corriente y tensión. A diferencia de los transformadores de medida convencionales, estos aparatos se basan generalmente en efectos ópticos de muy baja potencia para medir corriente y la tensión. Llevan sensores de fibra óptica encargados de captar y transmitir las señales y una electrónica encargada de transformar esas medidas en datos digitales (normalmente) o en señales analógicas de baja potencia (± 5 V).

Debido al avance en el desarrollo de los microprocesadores, hoy en día prácticamente todos los equipos de medida y protección son digitales, por ello se puede enviar los datos de las medidas de una red eléctrica (corriente y tensión), mediante un determinado protocolo de comunicaciones (p. ej. IEC 61850).

Estos nuevos transformadores tienen la ventaja principal del aislamiento entre la alta tensión y tierra, pues tan solo es necesario una fibra óptica por el interior de un aislador (normalmente se usan aisladores sintéticos), por donde viaja la información de la señal medida en la alta tensión. Después, una electrónica situada en la caseta de relés prepara toda la información para enviarla a los equipos de medida y protección.

Los transformadores ópticos tienen un tamaño mucho menor que los T.M. convencionales, y en una subestación sólo habría fibras ópticas (en lugar de conductores). Los principales inconvenientes son su poca experiencia en campo y que la mayoría de los equipos de medida y protección que hay instalados hoy día, están preparados para conectarse con los equipos convencionales.

› Transformadores smART DO. Powerlink (Australia).



5. FABRICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

5.2. CLASIFICACIÓN SEGÚN SU EMPLAZAMIENTO

TRANSFORMADORES DE MEDIDA PARA SERVICIO EXTERIOR

Estos aparatos se encuentran totalmente a merced de las inclemencias atmosféricas. Están sometidos a precipitaciones en forma de lluvia, granizo y nieve. La contaminación ambiental los mancha, cubre e incluso ataca a los materiales superficiales. Las variaciones extremas de temperatura dan lugar a condensaciones, rocío, escarcha o hielo. Los materiales se ven sometidos a dilataciones y contracciones. Hay viento, movimientos del suelo por terremotos, o por cambios del agua subterránea. La exposición a la luz solar y sus rayos ultravioleta es total.

Para combatir estos fenómenos el material que tradicionalmente ha dado mayores pruebas de fortaleza es la porcelana, que se viene empleando ininterrumpidamente desde los inicios de la electricidad. Es un material conformable que, esmaltado, presenta una superficie prácticamente inalterable a las agresiones químicas, erosiones mecánicas o acción luminosa.

Es muy buen aislante. Su consistencia mecánica cumple con las especificaciones más exigentes en las diferentes condiciones de servicio.

En los últimos años se han desarrollado otros materiales para sustituir a la porcelana, debido a sus principales inconvenientes: precio y fragilidad. Por un lado tenemos los aisladores sintéticos, fabricados a partir de un tubo hueco de fibra de vidrio, con recubrimiento de silicón. Estos aisladores compuestos presentan menor peso y mayor resistencia y seguridad frente a impactos externos y explosiones. Por otro lado, en media tensión se han desarrollado aisladores en resina cicloalifática, que suponen una opción más económica para estos niveles de tensión.



- › Aislamiento de resina. Transformador de tensión UR.
- › Aislamiento de porcelana. Transformador de intensidad CH.
- › Aislamiento de silicón. Transformador de tensión UG.

5. FABRICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

La forma de todos estos aisladores es a base de rizos y encuentra su causa en las precipitaciones atmosféricas y obedece a la voluntad de impedir que se formen películas conductoras, de agua u otros elementos, que unan las partes bajo tensión con las que están puestas a tierra.

Los aisladores deben tener también características de estanqueidad ya que se emplean como recipiente del aceite que impregna el papel utilizado para aislar las bobinas. Como el aceite pierde rápidamente sus excelentes propiedades dieléctricas si es que se ve contaminado por agentes químicos exteriores (siendo el más usual, y por ello el más comúnmente peligroso, el agua), se pone especial cuidado en impedir que el aceite entre en contacto con la atmósfera. Para ello se encierra de forma hermética, elásticamente. El cierre elástico se consigue empleando membranas de goma o metálicas que se adaptan a sus cambios de volumen. Otras veces se hace que el elemento elástico sea un gas compresible e inerte como el nitrógeno.

En el caso de los transformadores aislados en gas, el aislador cumple esta función de recipiente estanco a presión, y es particularmente importante evitar las fugas del gas aislante, ya que conducirían irremediablemente a una bajada de la presión de dicho gas con la consiguiente pérdida de sus propiedades aislantes.

Hay situaciones en que las temperaturas alcanzadas son tan bajas (p. ej. -50°C), que obligan a revisar el diseño completo del T.M. Obligan a cambiar el tipo de aceite o gas, las gomas usadas en las juntas, e incluso el material de tornillería y fijación, por otros especiales adecuados a esas temperaturas.

La implantación de los T.M. en lugares a gran altitud, entre 1.000 y 5.000 m, obliga a estudiar muy cuidadosamente el reparto del campo eléctrico a lo largo de la superficie externa del aparato y la adopción de mayores distancias de fuga (cuerda tendida, cuerda desarrollada) a causa de la menor densidad del aire atmosférico y, por ello, su menor poder dieléctrico.



5. FABRICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

TRANSFORMADORES DE MEDIDA PARA SUBESTACIONES BLINDADAS

En los últimos años se está extendiendo el uso de subestaciones blindadas muy compactas de ubicación urbana preferentemente. En ellas todos los elementos y dispositivos eléctricos van encerrados por una envolvente metálica hermética puesta a tierra que contiene gas SF₆ (hexafluoruro de azufre) a presión. Las características aislantes de este gas son notables y permiten gran capacidad en las instalaciones. Su disposición y las técnicas constructivas empleadas varían notablemente frente a las habituales, por lo que los T.M. en este caso, son bastante diferentes a los habituales.

Los T.I. (transformadores de intensidad) son de forma toroidal “paso barra” aislados a B.T. normalmente (o hasta algunas decenas de kV) que se colocan abarcando las tuberías que enlazan diferentes dispositivos. Sus dimensiones diametrales son muy superiores a lo habitual y resultan caros en material ferromagnético aunque son de construcción sencilla.

Los T.T. (transformadores de tensión) suelen ir inmersos en SF₆, formando parte de la instalación, o en una unidad independiente separada de la instalación mediante conos aislantes, normalmente de resina, embridados al resto de la instalación. Su diseño plantea mayores dificultades debido al poco espacio que hay para igualar la distribución de campo eléctrico y a la cercanía de la pantalla de puesta a tierra.



► Transformador de tensión para subestaciones GIS.

► Transformadores de tensión en una subestación GIS.



TRANSFORMADORES DE MEDIDA PARA SERVICIO INTERIOR

Son los que se disponen en lugares cerrados a las inclemencias del tiempo, de forma que muchas de ellas quedan aminoradas o incluso no se dan. Así no están sometidos ni a la lluvia ni a las radiaciones ultravioletas, y las temperaturas extremas y la polución son menores que las que se dan a la intemperie.

En virtud de estas circunstancias su aislamiento externo presenta pocos bajorrelieves, sus superficies son lisas y predomina el empleo de resinas epóxicas y otros polímeros como aislantes frente al ambiente.

Estos aparatos se disponen en el interior de edificios o celdas, bien de obra o metálicas prefabricadas. Normalmente solo albergan aparellaje y T.M. (Transformadores de Medida) de M.T. (media tensión) hasta 72,5 kV. Dado que estas construcciones son caras, se buscan siempre las menores dimensiones posibles.

Como los fabricantes de celdas tratan de meter la mayor cantidad de aparatos en el menor espacio posible, la colocación de los T.M. es muy variada y por eso es habitual encontrar ligeras modificaciones en la colocación y forma de los bornes primarios y secundarios en un mismo modelo servido a diferentes fabricantes de celdas.

› Transformadores de medida en celdas de media tensión.



5.3. CLASIFICACIÓN SEGÚN SU NIVEL DE TENSIÓN

TRANSFORMADORES DE MEDIDA PARA BAJA TENSIÓN

Consideramos B.T. (baja tensión) al intervalo de tensiones inferior a 1.000 V. Los T.M. empleados en este caso se caracterizan por su reducido aislamiento, seco normalmente y formado por foliados de papel o polímeros. Suelen emplearse en cuadros y paneles de medida y control, son de pequeñas dimensiones y van encapsulados en plástico o embebidos en resina.

Grupo aparte forman los transformadores de intensidad que se ubican dentro de los pasamuros aisladores de porcelana de las bornas de los transformadores de potencia. Sus dimensiones toroidales relativamente grandes, dependen del tamaño y la tensión del transformador de potencia, cuyo aislamiento exterior lo realiza el propio pasamuros de la borna. Así se ahorra en espacio y en aislamiento, ya que el aislamiento que estos transformadores llevan de fábrica es de B.T.

Según se ha comentado en el apartado de “Transformadores de medida para subestaciones blindadas”, los transformadores de intensidad se colocan en las subestaciones blindadas con aislamiento gaseoso de SF₆. El diámetro interior suele ser muy grande ya que deben abarcar toda la tubería externa por lo que se encarece el aparato. Aún así son interesantes ya que su construcción es muy sencilla y su aislamiento mínimo.



5. FABRICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

TRANSFORMADORES DE MEDIDA PARA MEDIA TENSIÓN

Al intervalo de tensiones comprendido entre 1 y 72,5 kV lo denominamos M.T. (media tensión). Es una clasificación algo arbitraria, pero coincide en líneas generales con las tensiones empleadas en la distribución de energía eléctrica. Es una clasificación operativa que va cambiando de acuerdo con los usos del mercado a medida que se van elevando las tensiones de distribución.

En general se pueden considerar los siguientes escalones de tensión: 7,2 - 12 - 17,5 - 24 - 36 - 52 y 72,5 kV.

Es en M.T. donde fundamentalmente se emplean los aparatos de interior. Se tiende a ahorrar espacio al máximo. Los aparatos suelen disponerse en celdas prefabricadas de distribución y medida buscando al máximo la compacidad. Por esta razón se modifican a menudo las formas exteriores de los bornes primarios de acuerdo con los deseos del cliente.

En los aparatos para exterior de M.T. se ha introducido el uso de la resina cicloalifática como alternativa a la porcelana. La seguridad y robustez de diseño se busca insistentemente junto con la economía.

Se emplean T.I. tipo pasamuros tanto interior-interior como interior-exterior o exterior-exterior.



5. FABRICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

TRANSFORMADORES DE MEDIDA PARA ALTA TENSION

Las tensiones superiores a 72,5 kV se llaman A.T. (alta tensión). Coinciden generalmente con las tensiones empleadas en el transporte de energía eléctrica. De forma general se pueden considerar los siguientes escalones: 100 - 123 - 145 - 170 - 245 - 300 - 362 - 420 - 550 - 800 kV.

Según se van empleando tensiones mayores para el transporte se suele hablar de Muy-Altas Tensiones (M.A.T.), Extra-Altas Tensiones (E.A.T.) o Ultra-Altas Tensiones (U.A.T.). Hasta hace unos años 420 kV era E.A.T.; ahora podrían considerarse así 525 kV y 765 kV. Estas clasificaciones son puramente orientativas y a veces algo desorientadoras. Donde sí puede establecerse cierta generalidad es en que las tensiones de transporte son de A.T.

Todos los transformadores de tensión empleados en A.T. son monofásicos. Los transformadores combinados de medida y los transformadores de tensión capacitivos sí que resultan rentables en algunos casos. Casi todos los aparatos son de tipo columna y llevan aislador exterior de porcelana o silicón.

Sólo se fabrican para interior aparatos para laboratorio, que son prácticamente iguales que los normales, pero generalmente se sustituye el aislador de porcelana por un tubo liso de baquelita.

Como las tensiones :

difícil realizar programas de aislamiento suficientemente compactos, de forma que en el caso de los T.T. es común acudir a la fabricación de bobinas en cascada, con lo que cada una de ellas lleva sólo el aislamiento correspondiente a una fracción de la tensión total. Es muy común emplear dos o cuatro bobinas.

Los transformadores de intensidad no tienen este problema porque la tensión se establece entre los bobinados primarios y secundarios, y no entre extremos de un mismo arrollamiento. Los secundarios se agrupan entonces en una caja metálica que se aísla del primario mediante papel impregnado en aceite. Las tomas secundarias de baja tensión salen de la caja y llegan hasta el bloque de bornes a través de un tubo metálico. Este tubo lleva un aislamiento en pasamuros condensador de papel más aceite con pantallas metálicas.



> Transformadores de medida para alta tensión. Modelos DDB, KA, CA y UTF.

6. EXIGENCIAS QUE LA INDUSTRIA IMPONE A LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

Los transformadores de medida se fabrican de forma industrial y para satisfacer necesidades de la industria. Son pues los usos, necesidades y posibilidades industriales, y no meros planteamientos teóricos, los que determinan sus formas y características constructivas y las prestaciones que alcanzan.

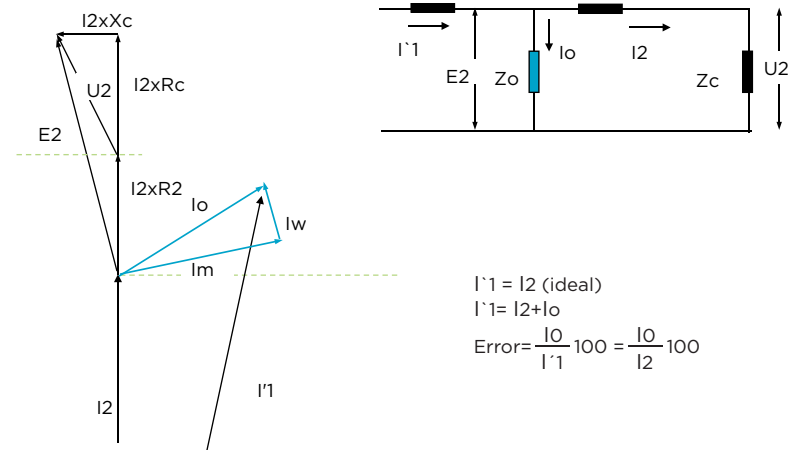
El compromiso entre necesidades y posibilidades industriales toma la forma de normas y especificaciones que se redactan de común acuerdo entre usuarios, fabricantes y algunas entidades de tipo corporativo que asumen el papel de árbitro. Al ir coordinándose los mercados, cada vez más se ejerce una fuerte tendencia hacia la unificación progresiva de las normas.

6.1. EXIGENCIAS ELÉCTRICAS

PRECISIÓN

La precisión es la propiedad principal que se pide a los transformadores de medida. Quedó dicho que el empleo de la conversión electromagnética de energía tiene pérdidas en el hierro a las que se añaden las pérdidas en el cobre, es decir, las pérdidas que se producen por efecto Joule en los conductores al paso de la corriente. Estas pérdidas son las causantes de que no salga todo lo que entra, es decir, que se produzca un error. Como las magnitudes eléctricas medidas, tensión e intensidad, tienen carácter vectorial, el error es también vectorial, esto es, que hay error en módulo y en argumento. Solemos denominarlos errores de relación y de ángulo respectivamente.

Las medidas que se efectúan en las redes eléctricas no tienen todas igual carácter ni significación, de modo que en todas ellas no se necesita el mismo grado de precisión. Las medidas de laboratorio, para investigación y control, y las medidas para contaje, con fines estadísticos y de venta de energía, son las más precisas. Se realizan luego contajes y medidas que sirven para controlar procesos, y por último otras cuyo fin es solamente dar una idea más cualitativa que cuantitativa de conjuntos de procesos en curso.



6. EXIGENCIAS QUE LA INDUSTRIA IMPONE A LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

Atendiendo a cada división en lo que respecta a las necesidades, teniendo en cuenta las posibilidades que permiten los materiales y métodos de fabricación actuales, los errores se cuantifican usualmente como sigue: entre 0,1% y 0,2% para la primera categoría de medidas citada. El error admitido en la segunda se suele escoger del 0,5%; y entre el 1% y 3% para la tercera, en lo que a módulo o error de relación se refiere. En lo tocante a error de ángulo, los valores correspondientes a las categorías citadas van desde 5 minutos a 1 grado.

Al ir aumentando las redes eléctricas de tamaño y complejidad y, a un tiempo, tomado más importancia la demanda de energía eléctrica en las comunidades más desarrolladas industrialmente, el capítulo dedicado a la protección de dichas redes frente a funcionamientos anómalos fue creciendo también. Así es que muchas de las medidas eléctricas realizadas tenían como fin alimentar relés y otros instrumentos de protección. Poco a poco este campo fue especializándose y dando lugar a unas exigencias específicas que se dirigían no tanto a pedir más precisión (basta con que el error se mantenga dentro de las categorías segunda o tercera mencionadas) sino más bien a asegurar la transmisión rápida y fidedigna de los fenómenos anómalos que tenían lugar.

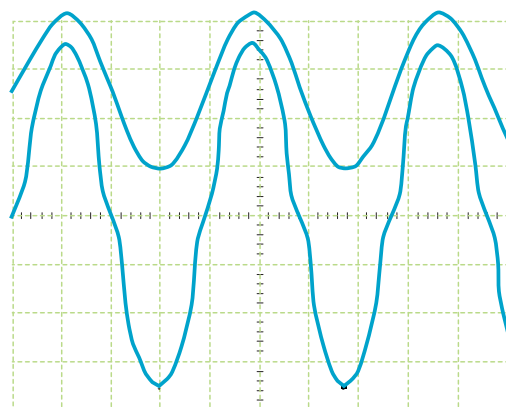
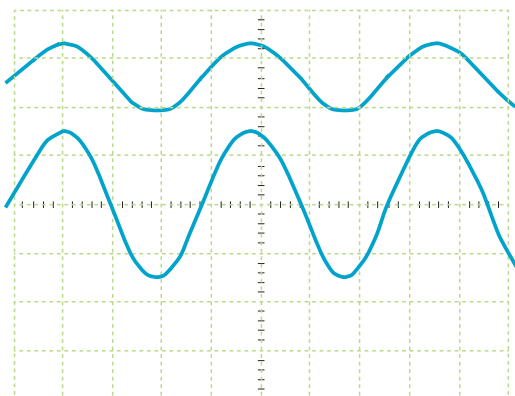
Puesto que los fallos que se dan comúnmente en las redes eléctricas traen como consecuencia la aparición de sobreintensidades y sobretensiones, a veces tan elevadas que pueden causar la saturación del núcleo de hierro del T.M., una preocupación importante en los transformadores dedicados a protección es evitar esta saturación. Al saturarse el núcleo, su salida secundaria, ya no se mantiene semejante en forma y tamaño a la entrada, de modo que las protecciones montadas en el secundario no ven lo que realmente está ocurriendo en el primario, o sea en la red.

Las protecciones deben decidir si actuar o no comparando las condiciones anómalas que detectan con las condiciones normales previsibles de trabajo, para poder decidir si es que se trata o no de un fallo. Para eso necesitan una información fidedigna de las señales primarias, aunque éstas sean muchas veces mayores que las normales de trabajo para las que está diseñado el sistema.

El sistema de distribución de energía eléctrica actualmente en uso se fundamenta en mantener lo más constante posible la tensión, para lo que, en función de la potencia generada y absorbida, varía la intensidad. Este sistema implica que las variaciones de tensión nunca serán demasiado grandes, como mucho en el orden del doble de la nominal; pero sí que podrán serlo las variaciones de intensidad, hasta más de mil veces la nominal en algunos casos. Por eso el comportamiento de los transformadores de tensión y de los transformadores de intensidad, en lo referente a protección, difiere bastante.

En los T.I. se define el factor límite de precisión, que indica las veces que la intensidad primaria a medir puede llegar a ser mayor que la nominal, debiendo mantenerse en dicho intervalo los límites de error impuestos; esto es, sin que llegue el núcleo a su saturación.

En los T.T. cuando se prevé su conexión a redes en que pueden darse casos de faltas que tengan como consecuencia sobretensiones, se exige que puedan soportar 1,5 o 1,9 veces la tensión nominal durante algún tiempo, que puede llegar a ser de hasta 8 horas, manteniendo la precisión. Esto exigen porque, a diferencia del T.I., en que las faltas de sobreintensidad se procura por todos los medios que tengan muy corta duración, hay veces que se mantiene la falta de sobretensión durante períodos relativamente prolongados por conveniencias de explotación.



› Comparación respuesta de un T.I. sin saturar y saturado.

6. EXIGENCIAS QUE LA INDUSTRIA IMPONE A LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

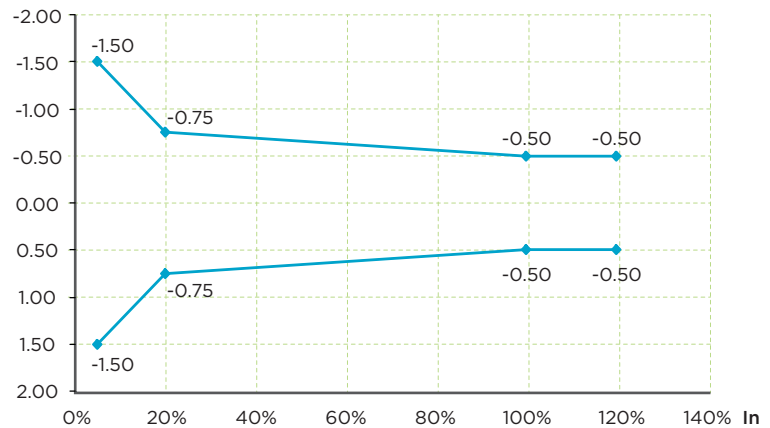
Este fenómeno de la saturación del núcleo, que no es favorable en el caso de protecciones, como acabamos de ver, sí que resulta interesante si es que se trata de un T.M. al que van a ir conectados aparatos de medida.

Ya comentamos que los aparatos de medida son pequeños y relativamente poco robustos. Normalmente no tienen problema en aguantar el doble de su tensión nominal, pero desde luego se resienten y estropean si la intensidad es muchas veces superior a la del diseño. Entonces lo que se hace es diseñar el T.I. de tal modo que su núcleo se sature cuando la intensidad crece por encima de un determinado número de veces la nominal (normalmente 5 o 10 veces).

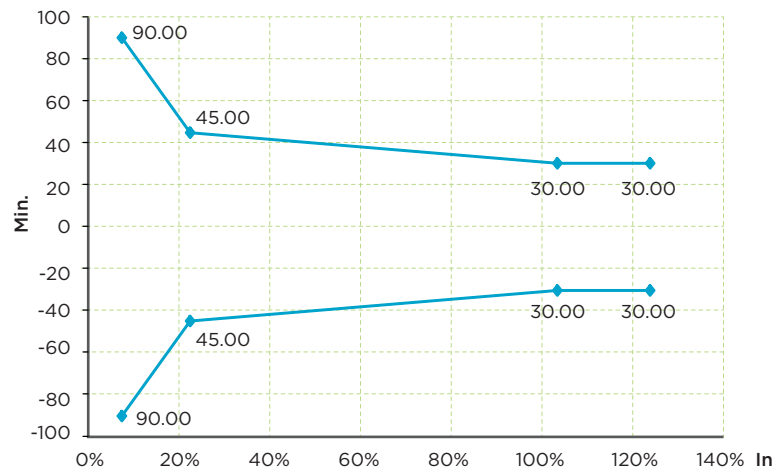
Así ocurre que aunque la intensidad primaria siga creciendo, al estar saturado el núcleo, su valor reflejado en el secundario apenas crece, y los aparatos conectados a él quedan protegidos. Al número de veces la nominal que puede alcanzar la intensidad primaria antes de que deje de crecer con ella la intensidad secundaria, o sea, antes de que entre el núcleo en saturación, se le llama factor de seguridad.

La precisión exigida a los transformadores de medida se comprueba en todos y cada uno de los que salen de fábrica. Es la cualidad que justifica su uso y por ello se debe estar absolutamente seguro de que la cumple. Se trata por eso de un ensayo de rutina o comprobación individual.

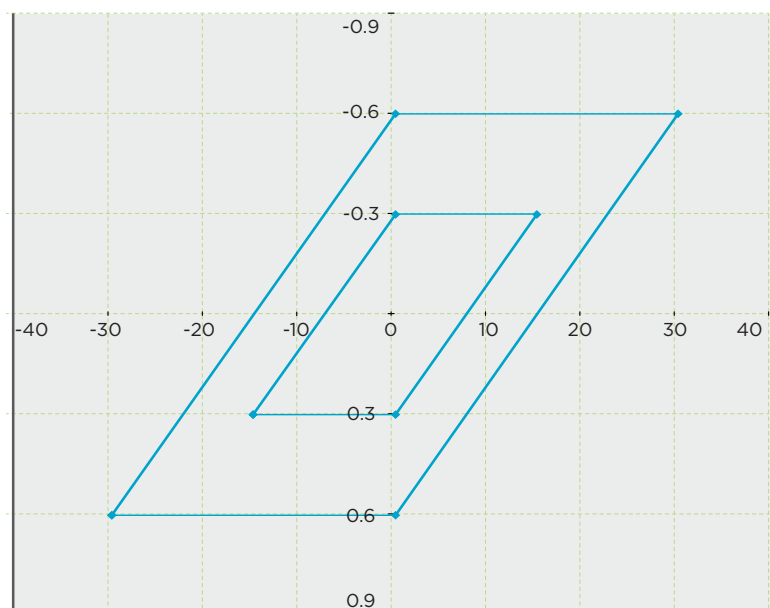
Límites error módulo según IEC. Clase 0.5



Límites error ángulo según IEC. Clase 0.5



Límites error según IEEE/ANSI



6. EXIGENCIAS QUE LA INDUSTRIA IMPONE A LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

OTRAS SOLICITACIONES ELÉCTRICAS

A la vista de las solicitaciones a que previsiblemente va a verse sometido, hay diferentes ensayos que se le aplican además de los de precisión. No todos los aparatos se ven sometidos a estos ensayos, solamente si es que es previsible que vaya a estar expuesto a las condiciones que se pretende simular. Así, por ejemplo, un aparato que va a utilizarse como patrón en un laboratorio no se ensayará a onda de choque, pues no es previsible que vaya a caerle un rayo.

Que un transformador de intensidad deba soportar más de una vez la corriente de cortocircuito a lo largo de su vida útil es fácilmente previsible. Las consecuencias térmicas y dinámicas que se desprenden darán lugar a diferentes ensayos. Se verán más adelante.

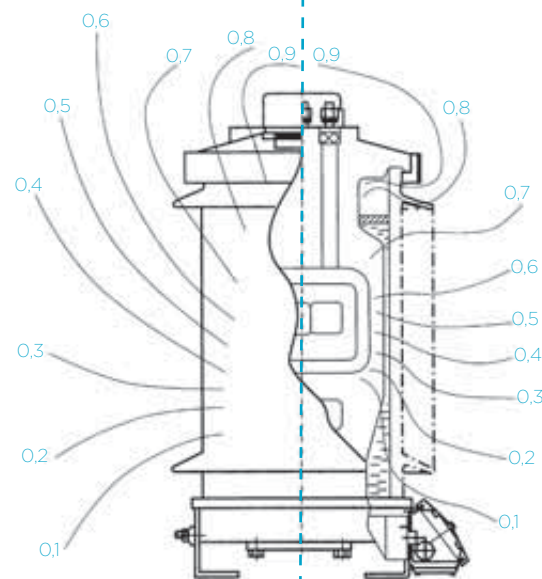
Aunque las redes eléctricas actuales están previstas para funcionar a valores de tensión muy cercanos al nominal, hay veces en que pueden llegar a ponerse a un valor casi doble que aquél durante distintos períodos de tiempo. La magnitud de la tensión alcanzada y del período de tiempo a considerar variará en las diferentes explotaciones y circunstancias. Por eso al diseñar los T.M. se les dota de un aislamiento superior al requerido por el valor nominal de su nivel de tensión.

En las diferentes normas se ha llegado a unos valores de tensiones generalmente aceptados para la prueba del poder dieléctrico de los aparatos. Esta comprobación se realiza de manera individual en cada uno de los T.M. durante un corto período de tiempo, generalmente un minuto. Así, la prueba de rigidez dieléctrica entre las diferentes partes de un T.M., constituye un ensayo de rutina (Secundario frente al primario, cada uno de ellos frente al núcleo y a tierra o partes metálicas del aparato. Análogamente se procede si hubiera más de un secundario).

Según los materiales y procesos de fabricación que se empleen resulta que el envejecimiento de ellos y la pérdida de características del T.M. será más o menos rápido. Esto es, que aunque en un principio aíslan bien, luego puede ser que sigan aislando durante mucho tiempo o que pierdan su poder dieléctrico en corto plazo. Se ha comprobado que la rapidez de envejecimiento depende mucho de la homogeneidad conseguida, tanto en el propio material empleado, como en la forma en que se ha dispuesto al fabricarlo, como en las condiciones electromecánicas a que se halla sometido. Así es que la selección de los materiales empleados debe hacerse con gran cuidado exigiendo la máxima calidad, uniformidad y pureza: resinas, papel, aceites, cintas, conductores, chapa magnética, etc.

Además se pone buen cuidado en la fabricación para conseguir buen centrado, uniformidad de aprietes, temperaturas homogéneas en los tratamientos, eliminación de la humedad, impregnación total y bien repartida; mediante una manipulación cuidadosa y el empleo del vacío para secar e impregnar.

SIN ANILLO EQUIPOTENCIAL | CON ANILLO EQUIPOTENCIAL



➤ Campo eléctrico en un T.I.

6. EXIGENCIAS QUE LA INDUSTRIA IMPONE A LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

Desde el diseño se tiene ya en cuenta esta exigencia, dando a las superficies determinadas formas bien estudiadas para que el reparto de los campos eléctrico y magnético sea homogéneo y uniforme dentro de unos valores adecuados. Se prevé además la imposibilidad de encontrar materiales económicamente perfectos y así, por ejemplo, se aplican varias capas de papel, en vez de una sola de grosor equivalente, para que los pequeños gránulos e imperfecciones que tenga éste no coincidan y no vayan por eso de parte a parte de la capa.

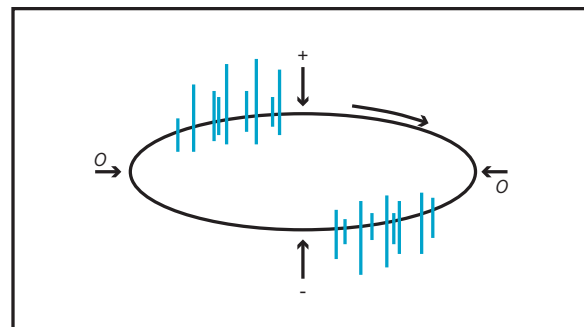
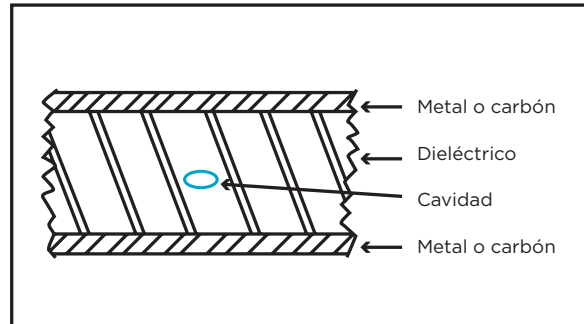
Si no se consigue buena uniformidad al aplicar tensión, el campo eléctrico se distribuye desigualmente, solicitando más a unas zonas que a otras. En las zonas no homogéneas (inclusiones granulares en el papel, pequeñas burbujas de gas en la masa de resina, vapor de agua ocluido y similares) se producen pequeñas descargas que van disgregando y estropeando el dieléctrico y eliminando su rigidez. En las normas y especificaciones se proponen diversos procedimientos para detectar estas descargas nocivas y se determina la magnitud que pueden alcanzar sin dar lugar a un envejecimiento prematuro del transformador de medida. A este ensayo, que da idea de la calidad del aislamiento, se le denomina de “descargas parciales”.

La caída de rayos es relativamente frecuente en las líneas aéreas que componen las redes de transporte y distribución de la energía eléctrica. El rayo es una descarga eléctrica de muy elevada tensión, muchos millones de voltios, pero poca energía. Si cae sobre una línea se propaga a lo largo de ésta, a veces durante considerables distancias. Si una onda de tensión de tipo rayo atraviesa un T.M. supone para su aislamiento un enorme esfuerzo que dura muy poco tiempo. Por eso se pide que los T.M. puedan soportar una cierta cantidad de rayos siempre que estos no tengan un valor de tensión exagerado.

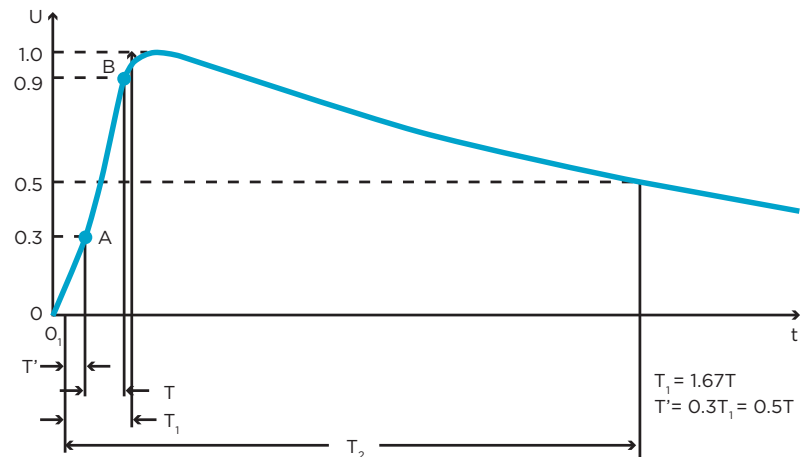
Las diferentes normalizaciones establecen como ensayo tipo el someter a un determinado número de ondas de choque, de polaridad, forma y magnitud definidas, a los T.M. Decimos “ensayo tipo” cuando no se realiza en todos y cada uno de los aparatos, sino solamente en uno de cada tipo, pensando que, si la fabricación y el diseño han sido similares, todos tendrán parecidas características. A veces algunas normas se establecen ensayos con onda de choque cortada a fin de distinguir entre el comportamiento del aislamiento interno del aparato y el comportamiento del aislamiento externo.

En determinados casos se pide la realización de este ensayo bajo lluvia para acercarnos más aún a las peores condiciones que puedan darse en la práctica.

También las maniobras de apertura y cierre de interruptores dan lugar en las redes de A.T. a sobre tensión transitoria parecida a las que producen los rayos, pero con más energía que disipar. Así es que hay veces que también se pide como ensayo tipo el ensayo a “onda de maniobra”.



- › Dieléctrico con defecto (cavidad).
- › Representación típica de las descargas parciales.



- › Impulso tipo rayo.

6. EXIGENCIAS QUE LA INDUSTRIA IMPONE A LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

Algunos aparatos van a colocarse en lugares especialmente expuestos a caída de rayos de tensión muy elevada. Hay zonas geográficas cuya meteorología incluye un valor isoceraúnico muy alto. También hay líneas y subestaciones en que las maniobras dan lugar a ondas de tensión muy elevada. En estos casos no basta el diseño convencional del aislamiento frente a onda de choque. Entonces se recurre al empleo de explosores encapsulados o pararrayos auto-válvula.

La particularidad de las ondas de choque tiene dos vertientes principales. La onda puede desplazarse simplemente a lo largo de la línea, con lo que causa enormes diferencias de potencial entre puntos muy próximos entre sí, dando lugar a la destrucción del aislamiento que hubiera entre estos. Es claro este problema en el caso de T.I. donde el aislamiento que rodea al conductor primario es relativamente débil. En este caso se coloca un explosor en paralelo con el arrollamiento de modo que, calibrado a una tensión inferior a la de destrucción del aislamiento, salte una chispa exterior que consuma la mayor parte de la energía del rayo. La otra posibilidad es que la onda de choque se descargue a tierra desde la línea a través del T.M., destruyendo el aislamiento entre A.T. y B.T. .

Se colocan en este caso descargadores exteriores que suelen adoptar la forma de cuernos. En el caso del T.T.C. empleado como condensador de acoplamiento se recurre al empleo de pararrayos auto-válvula colocados en paralelo con la bobina de drenaje.

Hay aún otros fenómenos eléctricos que a veces han de tenerse en cuenta y que influyen en la elección del aparato y en los ensayos a que se le somete. Así hay redes en que se produce ferorrresonancia dando lugar a importantes sobreintensidades con efectos térmicos y dinámicos similares a los de cortocircuito.

Si la ubicación del T.M. va a ser a mucha altura sobre el nivel del mar hay que tener en cuenta que la atmósfera estará enrarecida y el poder dieléctrico del aire será inferior al normal, lo que motivará mayores exigencias respecto al nivel de aislamiento. Habrá similares consideraciones particulares a tener en cuenta en zonas costeras muy húmedas, ambientes muy polucionados, zonas muy frías o muy calientes. Todas esta condiciones anómalas afectan al normal diseño eléctrico del aparato y se suele recurrir a ensayos tipo específicos para probar su adecuación.

› Ensayos dieléctricos en laboratorio de Ultra-Alta Tensión.



6.2. OTRAS EXIGENCIAS

MECÁNICAS

En caso de que se dé un cortocircuito en una línea en la que esté intercalado un T.I. pasará por el primario de éste una intensidad que puede ser tremendamente elevada. La corriente, a su paso por un conductor, provoca alrededor de él un campo magnético según dijimos. Al ser la corriente en el caso de cortocircuito mucho más elevada que la nominal, el campo magnético producido entonces será mucho más intenso que el habitual para el que se diseña el aparato. Un conductor introducido en un campo magnético tiende a tomar una posición espacial acorde con las líneas de campo de aquél. Si el primario del T.I. es bobinado, los campos magnéticos creados por la corriente al pasar por los lados contrapuestos de la espira se oponen y tienden a deformar ésta. Supongamos que la sujeción del primario se haya previsto para las condiciones nominales de funcionamiento: si la corriente de cortocircuito es suficientemente fuerte, la deformación será tal en la bobina primaria que romperá las sujeciones y destrozará el propio aparato.

Por ello el cliente debe precisar cuál será la amplitud de la corriente de cortocircuito más elevada que es previsible deba soportar el T.I. que desea adquirir, para que su diseño y construcción sean acordes a esas exigencias.

Normalmente, para cada tipo de aparato diseñado, se realiza un ensayo de cortocircuito dinámico en la relación más desfavorable, de

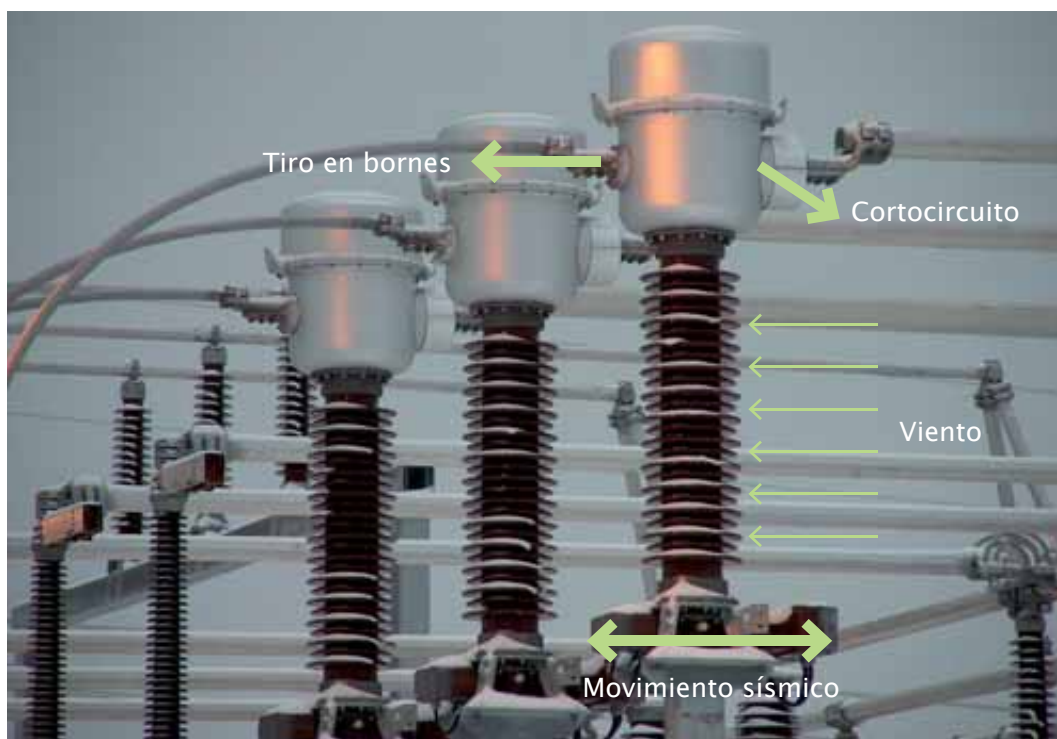
modo que se fijan los amperivoltios dinámicos máximos que soporta el T.I. sin estropearse. Este es, por supuesto, un ensayo tipo.

En el caso de que el T.I. sea paso barra se garantiza que aguantará cualquier cortocircuito que se produzca en redes normalmente diseñadas, ya que es el conductor mismo el que crea el único campo magnético importante presente y éste no le afecta desfavorablemente a él.

En el caso de instalaciones a la intemperie los conductores están suspendidos de cadenas aisladoras. Hay veces que se sujetan directamente a los T.M. y ejercen un tiro importante sobre los bornes primarios de estos. También se hacen ensayos tipo sobre esfuerzos en los bornes en las diferentes direcciones para prevenir estas exigencias.

Hay lugares en que la acción del viento puede ser muy importante y su empuje debe tenerse en cuenta a la hora de elegir el transformador de medida.

En zonas donde se producen temblores de tierra y terremotos debe preverse la adecuación del T.M. elegido para soportar también este tipo de esfuerzos vibratorios, llegándose incluso a equipar el transformador con amortiguadores. Hay ensayos tipo adecuados a fenómenos de esta especie.



› Esfuerzos mecánicos en un transformador.

6. EXIGENCIAS QUE LA INDUSTRIA IMPONE A LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

TÉRMICAS

Todos los T.M. tienen pérdidas internas que se convierten en calor. Hay pérdidas por efecto Joule en los arrollamientos conductores y hay pérdidas en el hierro por corriente de Foucault e histéresis. También las hay en el dieléctrico por corriente de pérdidas que crecen mucho al aumentar la temperatura y pueden llegar a ser importantes. Todo este calor que se produce internamente, debe ser disipado al exterior sin que la temperatura del transformador alcance valores tan elevados como para que puedan dañarle o envejecerle prematuramente.

Los T.M. se diseñan para que esto sea posible en condiciones normales de régimen nominal, e incluso bajo condiciones anómalas especificadas en normas. Habida cuenta, además, de que las condiciones ambientales exteriores pueden variar enormemente de una estación a otra y de una zona geográfica a otra. Así es que en las diferentes normas se dan valores máximos y mínimos de temperatura ambiente e incrementos de temperatura en diferentes partes del transformador. En estas condiciones se realizan ensayos tipo.

En caso de cortocircuito u otros fenómenos que produzcan fuertes sobreintensidades, como el de ferorresonancia, las pérdidas por efecto Joule se hacen tremendas. Si las protecciones no actúan a tiempo, el T.M. se podría quemar por calentamiento. Por tal motivo los transformadores deben soportar sin dañarse durante un corto tiempo (1 o 3 segundos generalmente) este sobrecalentamiento, dando tiempo a que actúen las protecciones. Este efecto térmico de los cortocircuitos e intensidades de corta duración se prevé en el diseño del aparato y se adecúa a las necesidades del usuario en función de la potencia de cortocircuito que tenga en su red. Es objeto igualmente del ensayo tipo correspondiente.

La acción meteorológica es muy importante en este tema y hay un sinfín de circunstancias a tener en cuenta: lugares muy fríos o muy calientes, grandes precipitaciones o fuer te humedad ambiente. Zonas que pasan de temperaturas elevadísimas a otras muy frías en cuestión de horas. Lugares en que la humedad ambiente cambia desde su práctica inexistencia a valores de saturación y otras condiciones climáticas y ambientales que se deben contemplar en cada caso y según sus consecuencias sobre el normal diseño del T.M. y su comportamiento térmico.

QUÍMICAS Y OTRAS

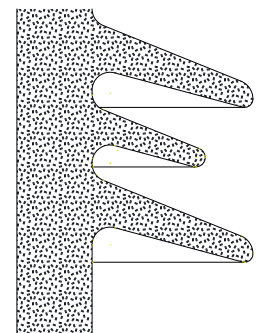
Los materiales de que está fabricado el transformador de medida deben ser resistentes a las agresiones químicas del ambiente donde se ubique. La corrosión de las partes metálicas en ambientes costeros, húmedos, fuertemente polucionados y de atmósfera agresiva, obliga a estudiar la naturaleza de estos empleando inoxidable, recubrimientos por electrodeposición metalizado, galvanizado, cromado, imprimaciones y pinturas.

Se eligen cuidadosamente las resinas para uso exterior ya que la acción ultravioleta de los rayos solares puede afectarlas. La formación de ozono alrededor de las partes de A.T. obliga a cuidar el que haya suficiente ventilación y que las gomas, lacas, pinturas y otros elementos no se vean degradados por su acción.

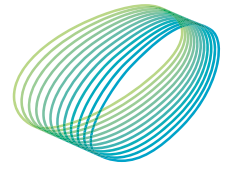
La lluvia, el granizo, la nieve y el hielo forman caminos conductores sobre las superficies aislantes de modo que se provee a éstas de aletas de formas y tamaños diferentes, de resaltes y bajorrelieves que dificulten su formación. El polvo de carbón y combinados de azufre, en zonas mineras e industriales, forman también, aliados con los accidentes atmosféricos mencionados, barro y costras conductoras que además producen agresión química.

Las tormentas de arena erosionan la superficie de los materiales destruyendo los tratamientos que pretenden proteger éstos, por lo que deben hacerse especiales o más gruesos.

Todas estas exigencias, bien por separado, ya juntas, obligan a estudiar cuidadosamente el diseño del T.M. para adecuarlo a su misión y su emplazamiento. Cuando las circunstancias se apartan mucho de lo común puntualizado en normas, cliente y fabricante deben llegar a un acuerdo y dan lugar a unas especificaciones que contemplan una serie de ensayos especiales para los equipos concretos, o bien forman parte del crédito que se da a una empresa en virtud de su trayectoria en el mercado y la confianza y reputación que haya sabido acumular.



➤ Aletas de porcelana.



arteche
Moving together