

PROTECCIONES ELÉCTRICAS

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y TENSIÓN

I.E. JOSÉ DARIEL ARCILA ARIAS

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

El transformador de corriente tiene las siguientes funciones:

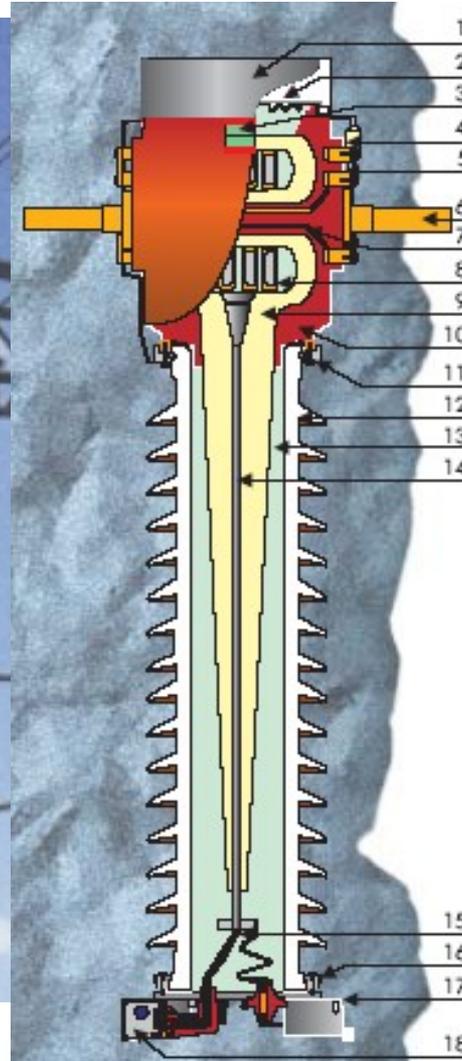
- Aislar los circuitos de medición y protecciones de las altas tensiones, permitiendo que los relés, equipos de medición y equipos de registro sean aislados solo para baja tensión. Por ejemplo, se pasa un sistema de 500 kV en el primario a un sistema de 600 V en baja tensión.
- Disminuir la corriente que circula a través de los circuitos de protección y medida a niveles que sean fácilmente manejables. Por ejemplo, se pueden tener 1000 A de corriente nominal en el primario y 1 A de corriente nominal en el secundario.

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

Los transformadores de corriente se aplican básicamente en:

- Circuitos de protecciones: para llevar las corrientes a los equipos de protecciones y equipos de registro de falla.
- Circuitos de medición: proporcionan la corriente necesaria para todos los equipos de medición tales como amperímetros, vatímetros, unidades multifuncionales de medida, contadores de energía, transductores para telemedida, etc.

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE



Componentes

1. Domo de Aluminio
2. Membrana
3. Indicador de nivel de aceite
4. Limitador de sobretensión
5. Barras de conexión
6. Bornes primarios
7. Devanado primario
8. Devanados secundarios
9. Aislamiento papel-aceite
10. Cabeza encapsulada en resina
11. Brida superior de fijación del aislador
12. Aislador de porcelana
13. Aceite aislante
14. Electrodo baja tensión
15. Conexiones secundarias
16. Brida inferior
17. Base
18. Caja de bornes de baja tensión.

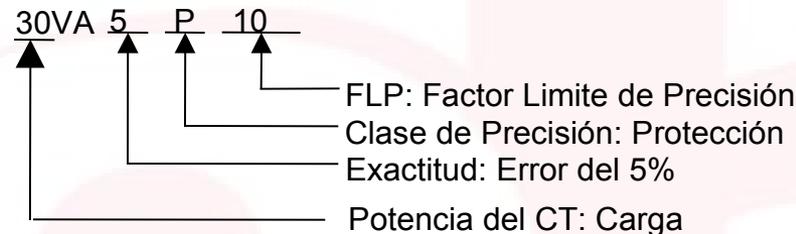
TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

La especificación de transformadores de corriente depende de las características del circuito al que estará asociado y de los equipos de control o protecciones a los cuales les proporcionará la corriente. Los principales factores que definen las características necesarias de un transformador de corriente son las siguientes:

- Corriente nominal del circuito al cual se le medirá la corriente.
- Tipo de aplicación: protección o medida.
- Corriente de cortocircuito máxima del circuito, esta característica es fundamental si el transformado de corriente es para protección.
- Carga secundaria. Ohmios o voltamperios de los equipos de medida o protección que se conectarán y de los respectivos cables.
- Corriente nominal secundaria

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

La clase de precisión de un transformador de corriente utilizado en protecciones, según la norma IEC 60044-1 1996 Instrument Transformers - Part I: Current Transformers, se especifica por el porcentaje de exactitud, seguido de la letra P (protección) y por el número de veces la corriente nominal del transformador, al cual se garantiza la exactitud indicada.



Por ejemplo, un transformador de corriente con clase de precisión 5P10 proporciona una precisión del 5% para 10 veces la corriente nominal cuando en el secundario se tiene la carga nominal.

Para la medida, simplemente se tiene el porcentaje de error que se garantiza para la corriente nominal, por ejemplo, una precisión de 0.2 significa un error máximo del 0.2% a la corriente nominal. También se tiene la clase de precisión extendida, la cual significa que el error se garantiza en un rango de corriente y no solo para la corriente nominal, por ejemplo, 0.2 s significa un error máximo del 0.2% para una corriente entre el 20% y 120% de la corriente nominal.

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

DEFINICIONES:

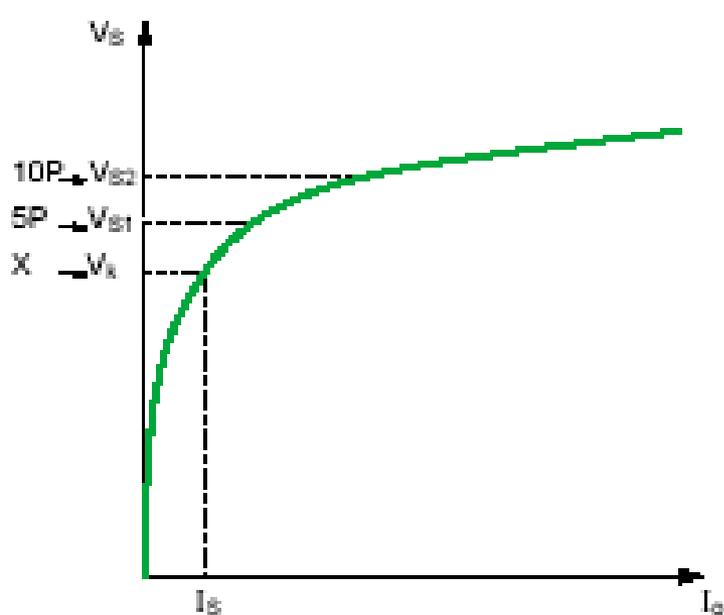
- **Corriente nominal primaria I_1 :** 10 – 12.5 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75
y sus multiples decimales
- **Corriente nominal secundaria I_2 :** 1 o 5
- **Carga de la Precisión:** Valor de carga en la cual se basan las condiciones de precisión
- **Potencia nominal de la Precisión P_n :** Potencia aparente en VA suministrada por el circuito secundario a la corriente nominal I_n y con la **carga de precisión**.
Valores estandares: 1 – 2.5 – 5 – 10 – 15 - 30 VA
- **Clase de precisión:** Error limite garantizado

| Accuracy class | Current error for the nominal current as a % | Phase shift for the nominal current | | Composite error for the accuracy limit current as a % |
|----------------|--|-------------------------------------|--------------|---|
| | | Minutes | Centiradians | |
| 5P | ± 1 | ± 60 | ± 1.8 | 5 |
| 10P | ± 3 | – | – | 10 |

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

DEFINICIONES:

- **Clases especiales de precisión PX:** Mínimo valor de la tensión V_k (knee point), es mejor que 5P y mas aun que 10P.
- **Knee Voltage:** Punto de la curva en el cual un incremento del 10% en tensión, causa un incremento del 50% en corriente.
- Factor de precisión real F_p o K_r : Radio entre la sobre corriente correspondiente con el error nominal y la corriente nominal del CT cuando la carga real es diferente de la nominal.



TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

DEFINICIONES:

- **Factor Limite de Precisión FLP ó Kn:** Radio entre la sobrecorriente nominal ($10I_n$) y la corriente nominal del CT (I_n), es decir (**10**).

- **Corriente sostenida de corta duración:** Corriente máxima I_{th} en KA, que puede ser mantenida por un segundo (cuando el secundario es cortocircuitado). Esta representa el soporte térmico del CT a sobrecorrientes.

- **Tensión nominal:** Tensión nominal a la cual esta sujeto el devanado primario.

Se debe tener en cuenta que el primario esta el terminal de HV y uno de los terminales del secundario es normalmente aterrizado.

NORMA ANSI

SELECCIÓN DE ACUERDO CON NORMAS ANSI

- En la norma IEEE C57.13-1993 Standard Requirements for Instrument Transformers, la clase de exactitud de un transformador de corriente usado para la conexión de protecciones está descrita por una letra la cual indica si la exactitud puede ser calculada (Clase C) o puede ser obtenida a través de pruebas físicas (Clase T).
- Esta letra es seguida por un número que corresponde al máximo voltaje terminal secundario que el transformador de corriente producirá a 20 veces la corriente nominal secundaria con un error no mayor al 10%.
- **Las cargas nominales de CT's 1, 2, 4 y 8 ohmios**
- A 20 veces los 5 amperios secundarios, los rangos son 100, 200, 400 y 800 voltios.
- Cuando circulan 100 amperios secundarios con un factor del 10%, el valor de voltaje puede ser leído desde la curva de excitación con una corriente de 100 amperios.

NORMA ANSI

- El voltaje secundario nominal es el voltaje que el CT soportará a la carga nominal cuando cruza una corriente de 20 veces la nominal sin exceder un 10% de error en la relación de transformación.
- Para la relación de 2000:5, el voltaje leído es de 496 voltios.
- En este caso el voltaje es menor a 800 y mayor a 400. Por tanto el rango es C400

Curva de Excitación

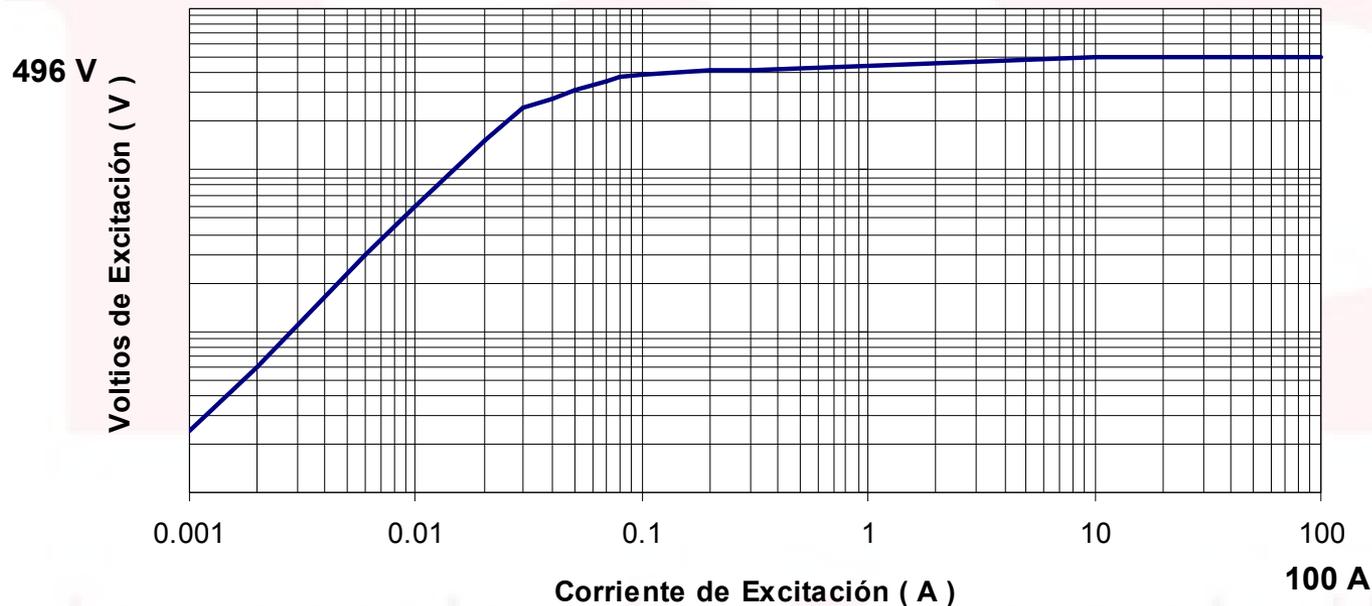


Figura 1 Curva de excitación transformador de corriente 2000:5 A

NORMA ANSI

- Con el fin de conservar la exactitud de los transformadores de corriente de protecciones durante fallas externas, se considera que el voltaje nominal secundario del CT debe ser 20 veces el voltaje que aparece sobre la carga a una corriente dada.
- Se puede establecer un criterio de selección de CTs a través de la siguiente expresión:
 - I_F es la máxima corriente de falla en por unidad
 - Z_B es la carga del CT en por unidad de la carga nominal (1,2,4,8 Ω)
 - X/R es la el factor de calidad del circuito de falla primario

$$20 \geq \left(\frac{X}{R} + 1 \right) * I_F * Z_B$$

$$Z_b \leq \frac{20}{\left(\frac{X}{R} + 1 \right) * I_F}$$

NORMA ANSI

Procedimiento para la selección de transformadores de corriente con aplicación en sistemas de protección de acuerdo con normas ANSI:

- Determinar la corriente máxima de falla en amperios primarios. Luego expresarla en por unidad de la corriente nominal del CT.
- Determinar la correspondiente relación X/R del circuito primario.
- Seleccionar el voltaje nominal del CT. Luego determinar la carga total en por unidad de la carga nominal del CT.
- Aplicar la ecuación 2 y seleccionar la carga máxima permitida en el secundario del CT.

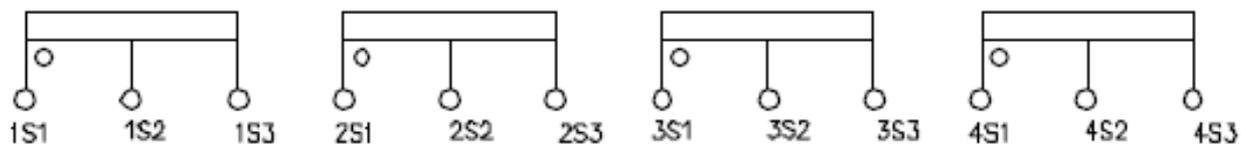
Por ejemplo:

Para una línea de transmisión con una relación de X/R igual a 12 y una corriente de falla de 4 veces la corriente nominal del CT, se encuentra que de acuerdo con la ecuación Z_B debe ser menor o igual a 0.38 P.U. de la carga nominal de 8 ohmios. Por tanto, la saturación será minimizada manteniendo una carga en el CT de 3.04 Ohm o menos.

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

Los transformadores de corriente de alta tensión normalmente cuentan con varias relaciones de transformación, por ejemplo, se puede tener un mismo núcleo con relaciones 800-400/5 A. El cambio de relación de transformación puede ser en el primario o en el secundario.

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE



| | | | | | | | | |
|----------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $I_p(A)$ | 200 | 400 | 400 | 800 | 400 | 800 | 400 | 800 |
| B-ST | 1S1-1S2 | 1S1-1S3 | 2S1-2S2 | 2S1-2S3 | 3S1-3S2 | 3S1-3S3 | 4S1-4S2 | 4S1-4S3 |
| $I_s(A)$ | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| VA | - | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| CL-KL | - | 0.25 | 5P20 | 5P20 | 5P20 | 5P20 | 5P20 | 5P20 |
| F_s | - | ≤ 10 | - | - | - | - | - | - |

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

CARGABILIDAD DE LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

La cargabilidad de los núcleos del transformador de corriente se obtiene sumando la potencia individual consumida por cada uno de los instrumentos de medida y relés de protección conectados, más la potencia consumida en las conexiones. Debido a la tendencia de disminuir el consumo de los VA en los relés modernos, la potencia consumida en las conexiones resulta ser un parámetro cada vez más importante para el cálculo de la cargabilidad de los transformadores de corriente, aún en los casos en los cuales la corriente nominal sea de 1 A; con la siguiente ecuación obtenemos la potencia consumida en el cable:

en donde:

$$P_C = I_s^2 * R_C * l$$

P_c: Potencia consumida por el cable, VA

I_s : Corriente que circula por el cable, 1 A

R_c: Resistencia del cable, Ω/km

l: Longitud del cable, km

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

CARGABILIDAD DE LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

Se calcula la tensión (Voltaje de saturación) que se produce en los terminales de cada uno de los núcleos del transformador de corriente a la corriente nominal con la siguiente fórmula:

$$V_{SAT} = I_S (R_i + Z_r) \qquad Z_r = \frac{P_B}{I_S^2}$$

en donde:

Is: Corriente nominal del secundario del transformador, 1 A

Ri : Resistencia interna del devanado del transformador, Ω

ZB: Impedancia de la carga conectada, Ω

Pr: P + PC: Carga total conectada al núcleo, VA

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

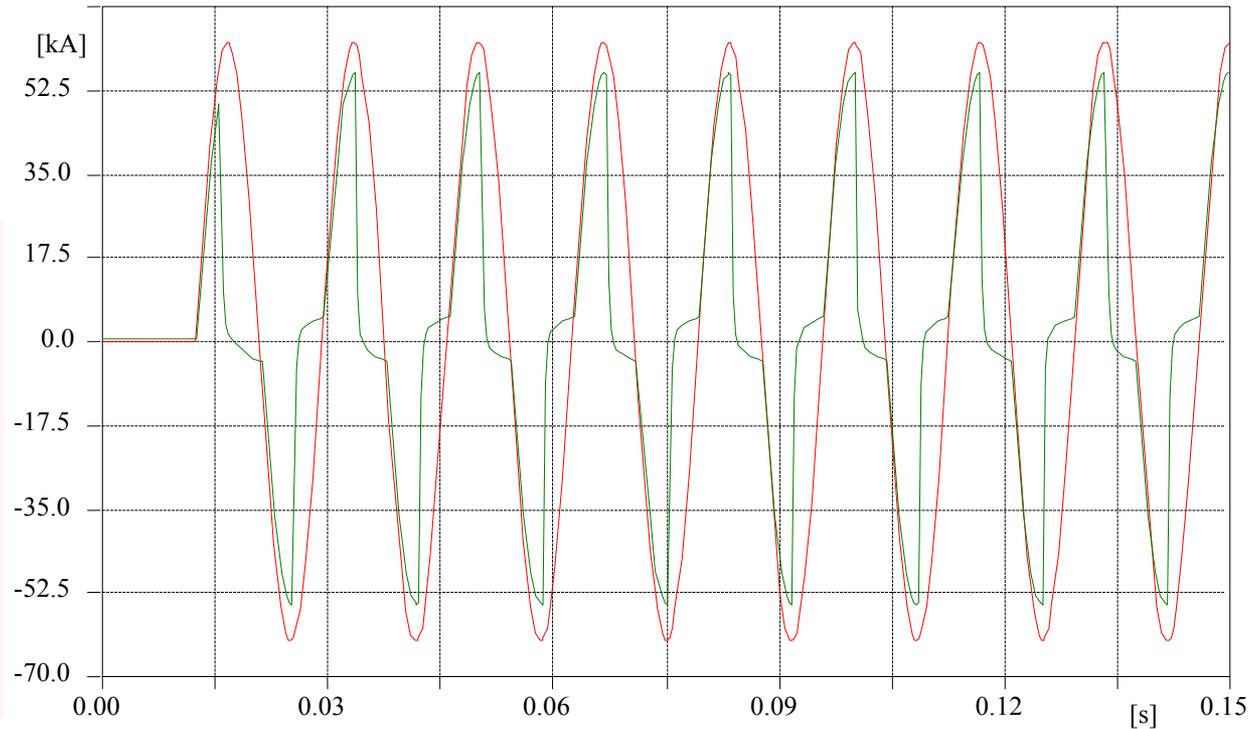
CARGABILIDAD DE LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

Para el cálculo de las pérdidas en el cable se utilizó un cable 10 AWG con una resistencia de 3.344 Ω /km:

- El máximo burden obtenido para el circuito de medida fue en el transformador de corriente TI03, con un consumo 1,452 VA que corresponde a una cargabilidad del 4,84%.
- Igualmente el máximo burden en el circuito de protección fue obtenido en este CT con un consumo de 0,892 correspondientes a una cargabilidad del 2,97%.
- Para cada uno de los núcleos se calculó la tensión de excitación en condiciones de carga nominal y en condiciones de cortocircuito.
- En la siguiente tabla se muestra un ejemplo de aplicación para uno de los transformadores de corriente de la subestación a 110 kV.

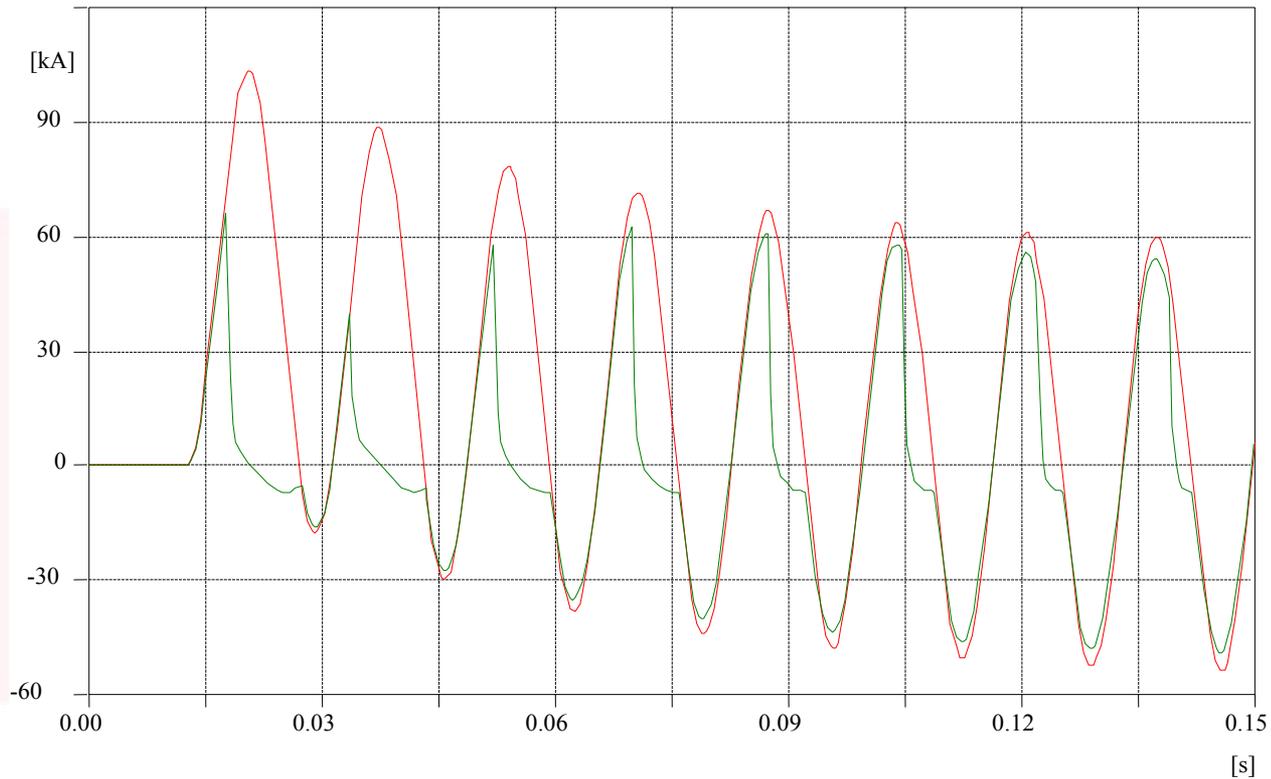
TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

SATURACIÓN AC



TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

SATURACIÓN DC



TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

El transformador de tensión tiene las siguientes funciones:

- Aislar los circuitos de medición y protecciones de las altas tensiones, permitiendo que los relés, equipos de medición y equipos de registro sean aislados solo para baja tensión. Por ejemplo, se pasa un sistema de 500 kV en el primario a un sistema de 600 V en baja tensión.
- Disminuir la tensión que se lleva a los circuitos de protección y medida a niveles que sean fácilmente manejables. Por ejemplo, se pueden tener 220 kV de tensión nominal en el primario y 110 V de tensión nominal en el secundario.
- En las líneas de transmisión que cuentan con sistema de portadora por línea de potencia, se utiliza la parte capacitiva de los transformadores para recibir la señal de comunicaciones que proviene del extremo remoto.

TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

Los transformadores de tensión pueden ser:

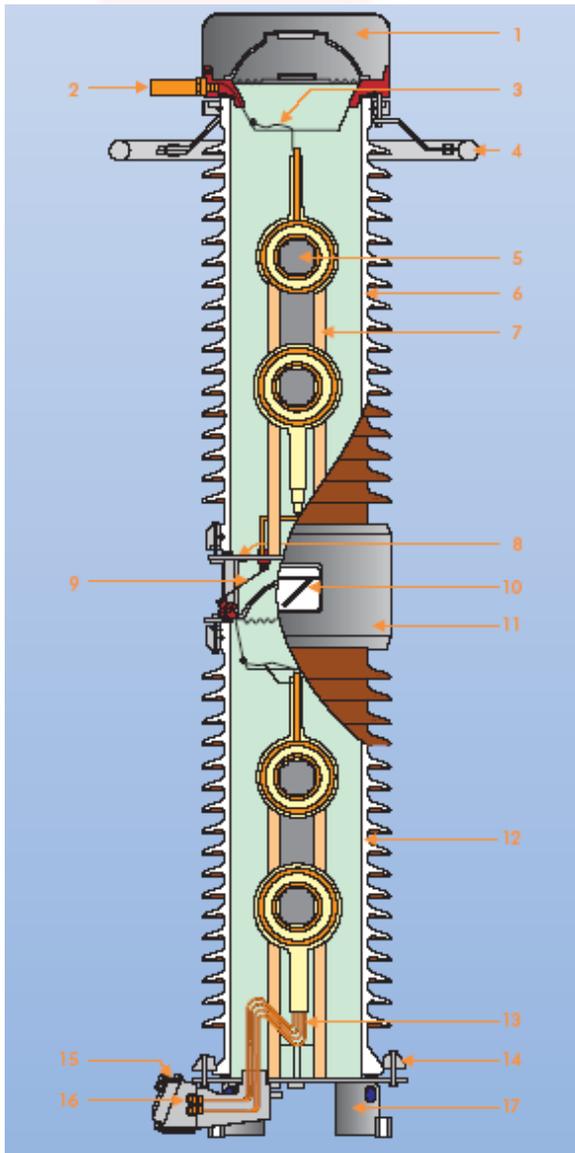
- Inductivos.
- De acople capacitivo: utilizan un divisor tipo capacitivo para disminuir la tensión a valores de media tensión, por ejemplo 15 kV. De la salida de la parte capacitiva se conecta un transformador inductivo.

TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

La especificación de transformadores de tensión depende de las características del circuito al que estará asociado y de los equipos de control o protecciones a los cuales les proporcionará la corriente. Los principales factores que definen las características necesarias de un transformador de corriente son las siguientes:

- Tensión nominal del circuito al cual se le medirá la corriente.
- Tipo de aplicación: protección o medida.
- Carga secundaria. Ohmios o voltamperios de los equipos de medida o protección que se conectarán y de los respectivos cables.
- Tensión nominal secundaria

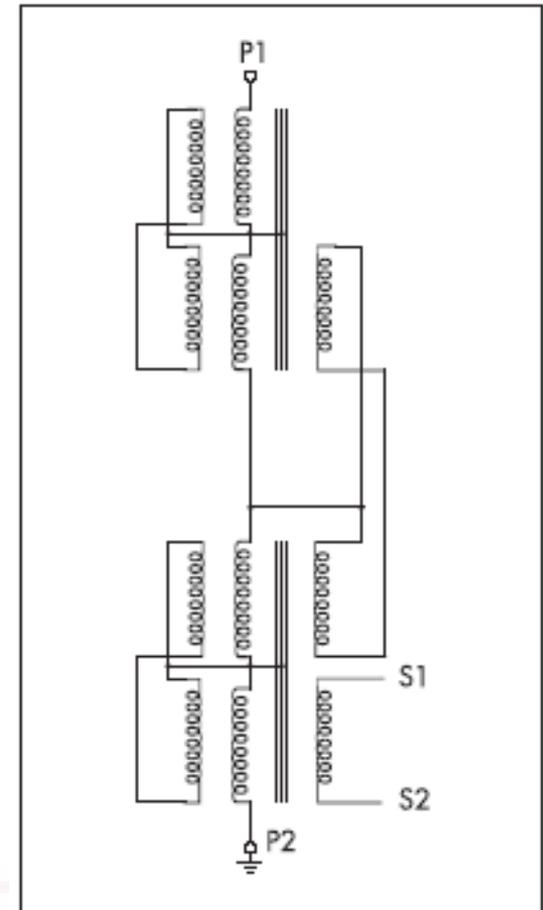
TRANSFORMADORES DE TENSIÓN INDUCTIVOS



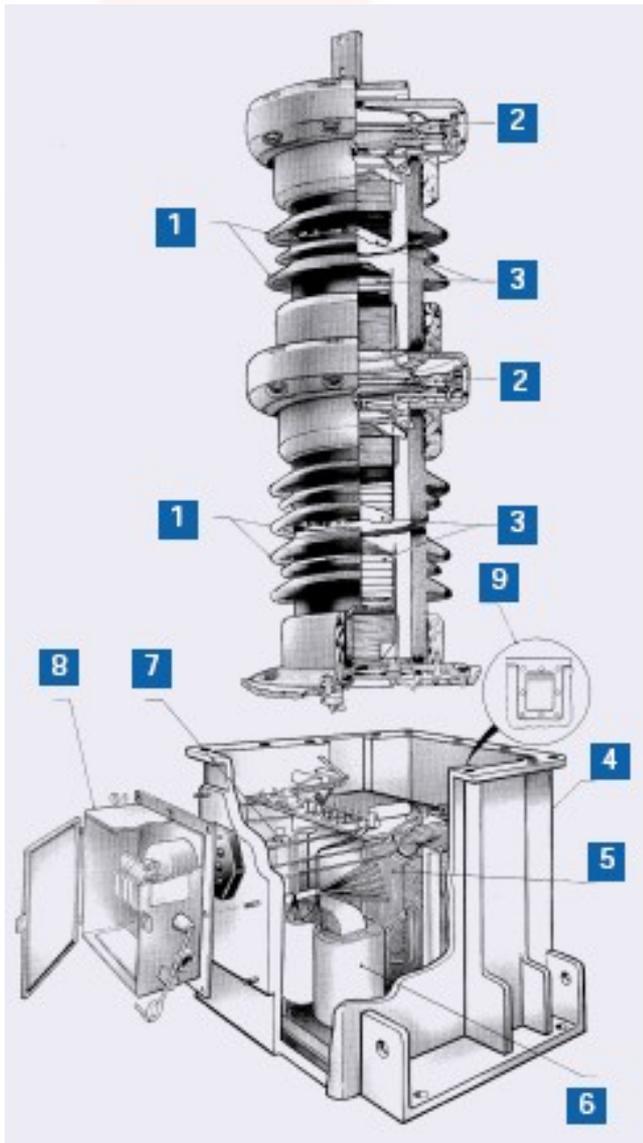
Legend

1. Hood
2. Primary terminal
3. Inner HV link
4. Corona ring
5. Cores and windings
6. Upper porcelain insulator
7. Core insulating rods
8. Pillar supporting the upper unit
9. Low voltage connections between the two units
10. Oil level indicator
11. Aluminium sheet enclosure
12. Lower porcelain insulator
13. Secondary connections
14. Clamping devices
15. Secondary terminals box
16. Secondary terminals
17. Base

Voltage transformer, two separate units construction (outline) and cascade connected diagram.

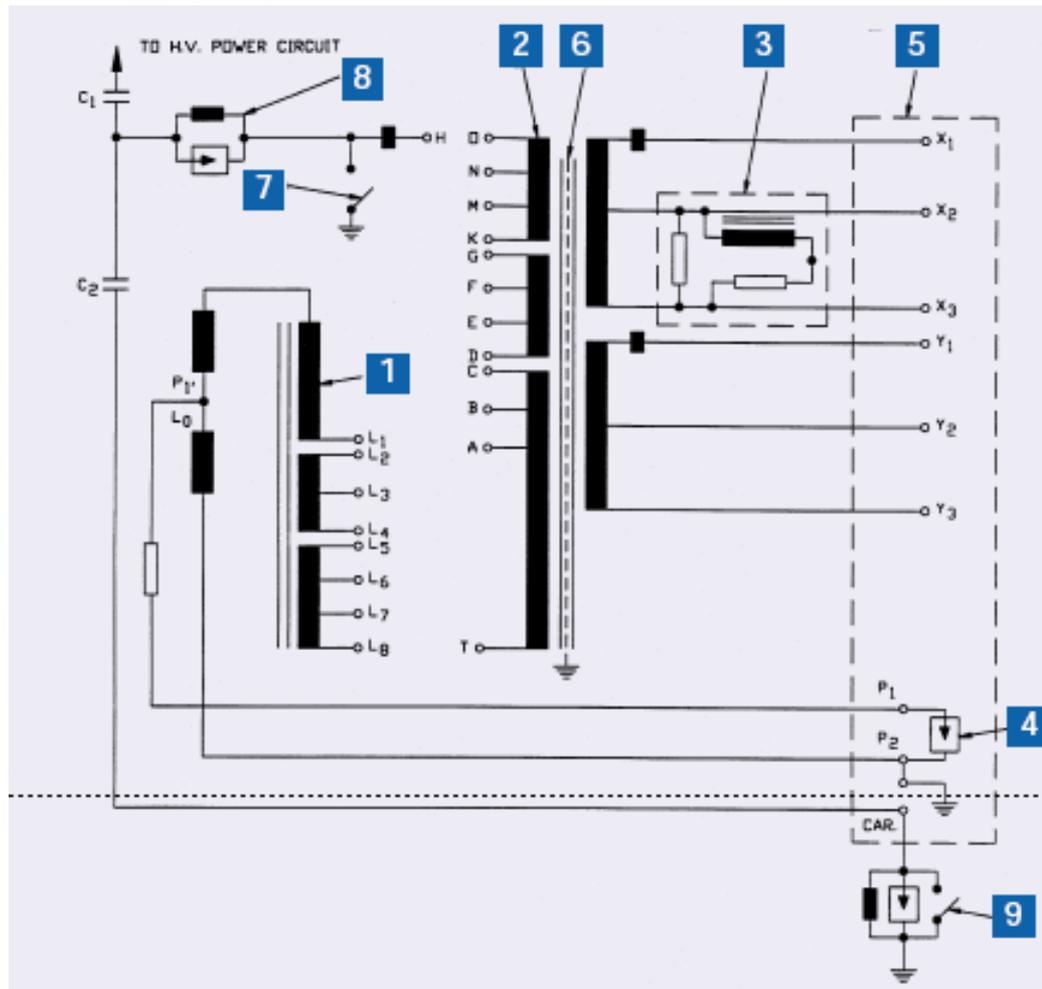


TRANSFORMADORES DE TENSIÓN DE ACOPLE CAPACITIVO



- 1** Porcelain Shell
- 2** Oil Filled Expansion Chamber
- 3** Capacitor Rolls
- 4** Oil Filled Basebox
- 5** Intermediate Transformer
- 6** Series Reactor
- 7** Stabilizing Burden
- 8** Low Voltage Terminal Box
- 9** Oil Level Side Glass

TRANSFORMADORES DE TENSIÓN DE ACOPLE CAPACITIVO



- 1 Series reactor
- 2 Intermediate voltage transformer
- 3 Harmonic suppression filter
- 4 Protective gap
- 5 Secondary terminal board
- 6 Faraday shield
- 7 Potential ground switch
- 8 Choke coil and gap assembly
- 9 Drain coil, gap and carrier ground switch assembly

TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

CARGABILIDAD DE LOS TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

La cargabilidad de los núcleos del transformador de tensión se obtiene sumando la potencia individual de cada uno de los instrumentos de medida y relés de protección conectados, adicionalmente se suman las pérdidas en el cable, las cuales se pueden calcular con la siguiente formula:

en donde:
$$P_C = I_c^2 * R_C * l$$

Pc: Potencia consumida por el cable, VA

Ic : Corriente que circula por el cable, A

Rc: Resistencia del cable, Ω /km

l: Longitud del cable, km

Pt: Carga total conectada al transformador, VA

Vs: Tensión nominal del secundario del transformador, V

$$I_C = \frac{P_t}{V_S}$$

TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

CARGABILIDAD DE LOS TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

Para cada uno de los núcleos del transformador de potencial se calcula la regulación de tensión de acuerdo a la siguiente formula:

en donde:

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_C}{V_S} * 100$$

VC : Tensión en el cable, V

VS : Tensión nominal del secundario del transformador, V

La caída de tensión en el cable se calcula como:

en donde:

$$V_C = I_C * R_C = \frac{P_T}{V_S} * R_C$$

PT : Potencia total, VA

RC : Resistencia del cable, Ω

VS : Tensión nominal del secundario del transformador, V

Por lo tanto,

$$\% \text{ Reg} = \frac{P_T * R_C}{V_S^2} * 100$$

TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

CARGABILIDAD DE LOS TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

Para el cálculo de las pérdidas en el conductor se utilizó un cable de cobre aislado con PVC-75°C-THW 12 AWG con una resistencia de $5,326 \Omega/\text{km}$. Se calculó la regulación para la potencia actualmente conectada y se verificó que esta no superara el 0,3%, valor recomendado en el código de redes.

A los núcleos de los transformadores de tensión correspondientes a los circuitos de medida se les adiciono la potencia del consumo de la fuente de cada uno de los contadores conectados, teniendo en cuenta que la fuente de alimentación se conecta entre las fases A y B del transformador, la fase C solamente tendría la carga del burden del circuito de tensión del contador de energía. Para los núcleos involucrados en la medida se obtuvieron valores similares de consumo, siendo el más alto en las fases A y B del transformador de tensión TU03, con un consumo de 5,933 VA correspondientes a una cargabilidad del 19,8% y una regulación de 0,151%. Para la fase C se tiene un consumo de 0,924 VA que corresponde a una cargabilidad de 3,081%.

En los demás núcleos de los transformadores de tensión correspondientes a los circuitos de protección la máxima cargabilidad se presenta en el núcleo 1 de los transformadores TU01 y TU03, con un consumo de 0,130 VA correspondiente a una cargabilidad de 0,433%.