Sobretensiones en Transformadores

Parte 1

1. Introducción

En este trabajo vamos a analizar los efectos que provocan los estados de sobretensión en los bobinados de los transformadores de distribución y de potencia.

En primer término, procederemos a explicar las clases características de los transitorios que pueden establecerse en los SEP.

De la mano de lo anterior, haremos una introducción a los tipos de sobretensiones asociadas a cada uno de los eventuales transitorios.

A los fines del análisis de los efectos nocivos de las sobretensiones sobre los bobinados del transformador, nos abocaremos solamente a aquellas que presentan características impulsivas.

En esta categoría, se destacan dos tipos de sobretensiones. La primera corresponde a las denominadas Sobretensiones de Maniobra, las cuales se derivan de procesos asociados con la conexión y desconexión de interruptores, variaciones intempestivas de las cargas, cortocircuitos, etc.

En cuanto a la segunda categoría, encontramos las Sobretensiones Atmosféricas, cuya causa fundamental es el impacto y transmisión de un rayo sobre una LAT (propagación de una onda viajera), así como las eventuales tensiones inducidas por la acción de los rayos.

En base a lo antedicho, vamos a desarrollar el presente trabajo en dos partes, con los siguientes contenidos, para cada una:

<u>Parte 1</u>

1. Introducción.
2. Transitorios en los SEP.
3. Tipos de sobretensiones en los SEP.
4. Transitorios de maniobra.
5. Transitorios por descargas atmosféricas.

<u>Parte 2</u>

1. Distribución de la tensión en los bobinados.
2. Especificación de las capacidades de los bobinados.
3. Diseño óptimo de los bobinados ante sobretensiones.
4. Conclusiones.

2. Transitorios en los SEP

NOVA MIRON S.A.
Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión
Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar
SERVICIO DE ATENCION PERMANENTE Cel.: 15 4945 1170 / 71/ 72

Un proceso transitorio, en una instalación eléctrica, se define como el intervalo de tiempo que transcurre entre dos estados estacionarios, en donde los parámetros electromagnéticos presentan variaciones no periódicas.

Por ejemplo, un proceso transitorio se establece cuando una descarga atmosférica impacta sobre una LAT, o bien cuando esta descarga impacta directamente sobre una subestación eléctrica.

También podemos tener el caso del desarrollo de un proceso transitorio ante una acción de maniobra en el SEP, como es el caso del cierre y apertura de un interruptor.

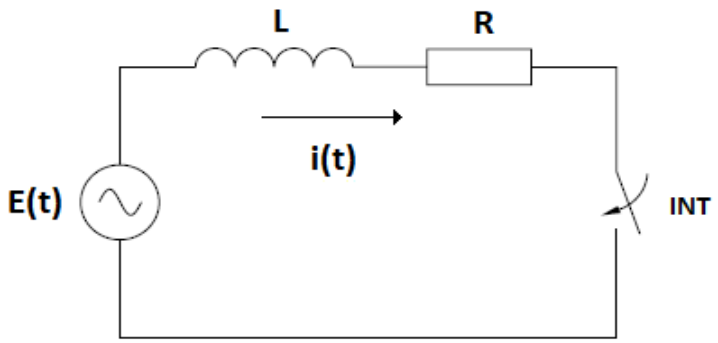
Una de las características principales de los procesos transitorios es que se manifiestan en intervalos muy cortos de tiempo, en el orden de microsegundos a milisegundos.

Aun así, con períodos de tiempo muy cortos, se desarrollan sobrecorrientes y sobretensiones sobre los componentes del SEP, que provocan graves daños sobre los mismos.

Entre estos componentes, el que nos ocupa en el presente trabajo, es el transformador de potencia.

A modo de ejemplo, vamos a desarrollar el proceso transitorio del cierre de un interruptor (INT) sobre un cortocircuito en una LAT.

Figura N° 1



NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

En donde:

E(t) = Emax sen(ωt + φ) = Fuente de tensión de la red.
R = componentes resistivas de la red y la LAT.
L = componentes inductivas de la red, transformadores y LAT.

Por lo tanto, la ecuación diferencial que describe el proceso transitorio, al momento de cerrar el interruptor sobre el cortocircuito será:

$$R\,i(t) + L\,\frac{di(t)}{dt} = E_{max}\,\mathrm{sen}\,(\omega t + \varphi)$$

Cuya solución, considerando un valor inicial nulo para la corriente, en el instante del cierre del interruptor, será:

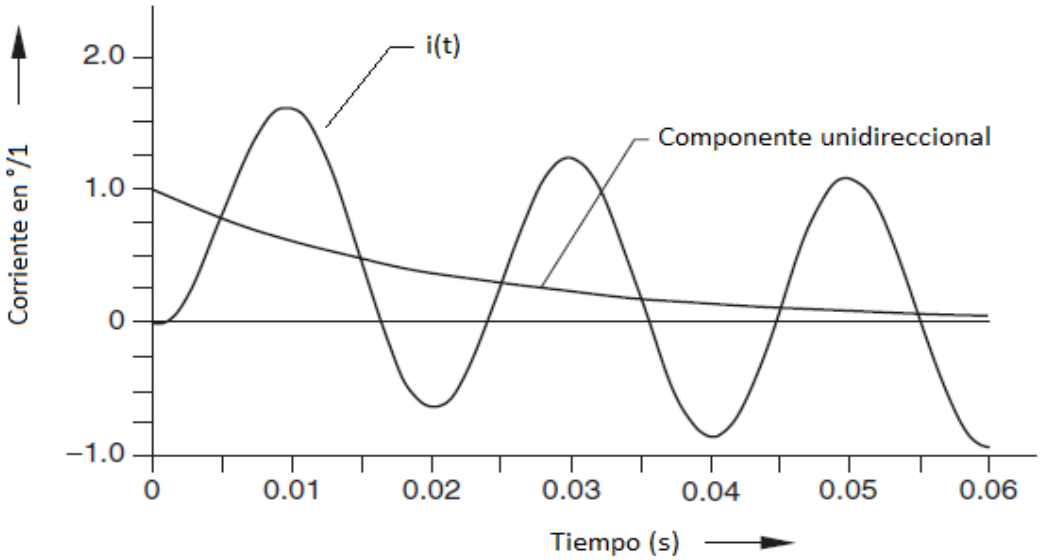
$$i(t) = e^{-(R/L)t}\left\{\frac{-E_{max}}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}\,\mathrm{sen}\left[\varphi - \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)\right]\right\} + \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}\mathrm{sen}\left[\omega t + \varphi - \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)\right]$$

Se destaca la existencia de una componente unidireccional, dada por el primer término del resultado, es decir:

Componente unidireccional = $e^{-(R/L)t}\left\{\frac{-E_{max}}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}\ \mathrm{sen}\left[\varphi-\tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)\right]\right\}$

Graficando la expresión de la corriente en función del tiempo:

Figura N° 2



Un hecho a tener en cuenta en este proceso transitorio del cierre de un interruptor sobre un cortocircuito en la línea, es que cuando se cumpla la condición $\mathrm{sen}\left[\varphi-\tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)\right]=0\ o\ k\pi, con\ k\ \in\ enteros$, la componente unidireccional será nula.

En esta situación, la corriente adquiere instantáneamente su valor de estado estacionario, tal como se deriva del resultado de la i(t), obteniendo así una característica simétrica, sin oscilaciones transitorias.

En el caso de presentarse la máxima componente unidireccional, el pico de corriente puede alcanzar el doble de la corriente simétrica, dependiendo del valor de la constante de tiempo (L/R), En esta situación obtenemos una característica asimétrica de la corriente.

Como se desprende de la exposición previa, podemos detallar un conjunto de características asociadas al análisis y cálculo de los procesos transitorios.

- Cálculos analíticos complejos, con ecuaciones diferenciales multivariables.
- Parámetros de los componentes variables en el tiempo.
- Introducción de elementos no lineales,
- Difícil establecimiento de un modelo integral del fenómeno físico.
- Dependencia de la frecuencia en ciertos parámetros de los componentes modelados.

3. Tipos de sobretensiones en los SEP

En los SEP pueden desarrollarse distintos tipos de sobretensiones, dependiendo de las causas.

Lo importante a tener en cuenta es que estos altos niveles de tensión, que se manifiestan en períodos cortos de tiempo, son la causa de graves daños en los sistemas de aislación de los componentes de la red, en general en las máquinas eléctricas y en particular los transformadores.

Es decir, la sobretensión representa una variación del potencial de la red, la cual se caracteriza por sobrepasar al valor de la tensión normal, la cual se referencia al valor pico de la tensión más elevada o máxima del sistema eléctrico.

Por lo tanto, conocer el tipo de sobretensiones a que estará sometido un dado transformador, será un factor importante en el diseño dieléctrico de los bobinados.

En tal sentido, resulta conveniente cuantificar las sobretensiones a través de ciertos coeficientes que permitan asistir en la etapa de diseño dieléctrico de los componentes del SEP.

Se definen, en base a lo especificado en la norma IEC 60071 (Coordinación de la aislación):

$$\mathrm{Kft} = \frac{\text{Valor de pico de la sobretensión de fase a tierra}}{\text{Tensión de fase a tierra correspondiente a la máxima de diseño del equipo}}$$

$$\mathrm{Kff} = \frac{\text{Valor de pico de la sobretensión de fase a fase}}{\text{Tensión de fase a fase correspondiente a la máxima de diseño del equipo}}$$

Siendo:

Kft = sobretensión de fase a tierra en °/1.
Kff = sobretensión de fase a fase en °/1.

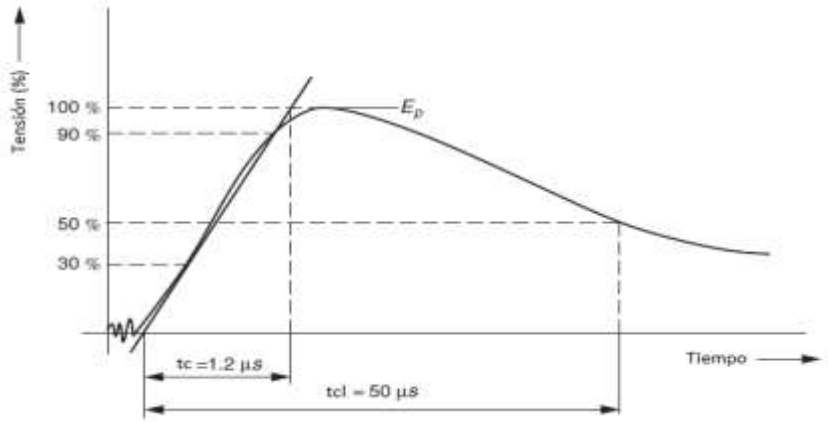
A grandes rasgos, las sobretensiones se pueden clasificar en las siguientes:

a) <u>Sobretensiones por Descargas Atmosféricas</u>

Son de origen externo al SEP, cuya causa es la descarga atmosférica (rayo) sobre un componente de la red.
En el caso de que la descarga se efectúe sobre una línea de transmisión, se generará una onda viajera en ambos sentidos del punto del impacto.

En la siguiente figura podemos observar la forma de onda característica de una sobretensión por descarga atmosférica, según se indica en la norma IEC 60060.

Figura N° 3

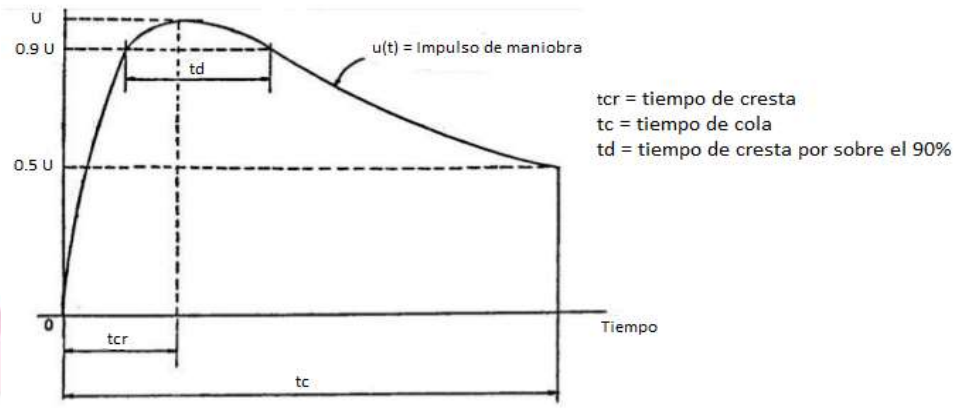


Su característica fundamental es de ser de muy corta duración y fuertemente amortiguada. Se representa, como se puede apreciar en la figura, a través de una onda normalizada del tipo 1,2/50 µs.
Un hecho a tener en cuenta es el de que los efectos de las sobretensiones atmosféricas son de mayor impacto, a medida que decrece el nivel de tensión de la red.
También debemos destacar los efectos nocivos de la descarga, relacionados con la actividad <u>térmica</u>, <u>química</u> y <u>dinámica</u>.
En cuanto a los efectos térmicos, éste se encuentra asociado al calentamiento derivado por la disipación de la alta corriente que circula por los cables, al momento de producirse la descarga. Por lo tanto, se deberá considerar el tiempo de acción del rayo para realizar los cálculos de la instalación.
El efecto químico debe su causa a la generación de ozono y ácido nítrico en el camino de propagación de la descarga (a través del aire, la tierra y elementos metálicos). Lo anterior lleva al desarrollo de un proceso de corrosión en los elementos metálicos.
Finalmente, el efecto dinámico se asocia directamente con las fuerzas que se establecen entre los conductores de la instalación.
En este último caso debemos considerar que las corrientes que circulan por los conductores, como consecuencia de una descarga atmosférica, pueden llegar al valor de 200 kA de pico o más. Por tal motivo, los esfuerzos electrodinámicos serán de alto valor, superando ampliamente a los derivados de los estados de cortocircuito.

b) <u>Sobretensiones por Actividades de Maniobra</u>

En este caso se caracterizan por ser de origen interno al SEP, cuya causa principal son las actividades u operaciones de maniobra realizadas en la red.
También se caracterizan por ser de corta duración y presentar un alto coeficiente de amortiguamiento en la onda.
En cuanto al tiempo de acción, son de mayor valor que las correspondientes a las sobretensiones por descargas atmosféricas.
Su característica principal es que el valor de la sobretensión es prácticamente proporcional al nivel de tensión de la red.
Por tal motivo, estas sobretensiones son preponderantes, tanto en los efectos como en los cálculos, en los diseños de los sistemas de aislación de los componentes pertenecientes a las redes con niveles de tensión > 300 kV.
En la figura N° 4 se observa una onda característica de sobretensión de impulso de maniobra, en base a lo especificado en la norma IEC 60060.

Figura N° 4



SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Se destacan los siguientes valores para los parámetros:

tcr = 250 µs de 0 a U.
tc = 2500 µs de 0 a 0,5 U de la onda descendente.

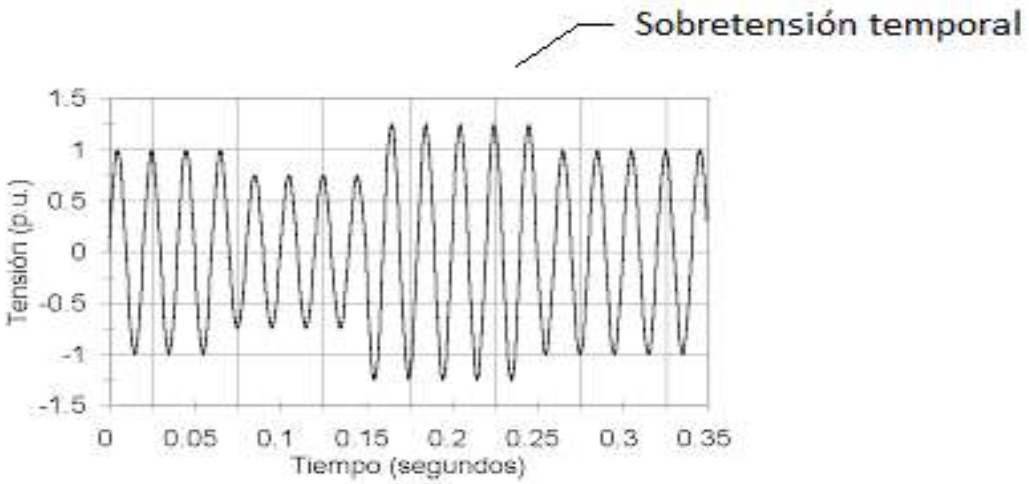
Por lo tanto, como se puede determinar de la figura, estas sobretensiones se representan a través de una onda normalizada, del tipo 250/2500 µs.

c) <u>Sobretensiones de Frecuencia Fundamental o Temporales</u>

Son de origen interno a la red, de larga duración (del orden de milisegundos a minutos), de característica poco amortiguada y con una frecuencia igual o cercana a la frecuencia del sistema (50 Hz).

A continuación se observa una sobretensión de este tipo.

Figura N° 5



Entre las eventuales sobretensiones temporales, podemos nombrar a aquellas que se derivan por estados de cortocircuitos monofásicos, problemas de ferrorresonancia, rebotes en la carga, etc.
Son de desarrollo característico en las redes de AT y EAT, como consecuencia de las variaciones en la configuración de las cargas.
Se clasifican en función de la frecuencia de la onda, a saber:

NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

- <u>Grupo A</u>

  Comprende a las sobretensiones cuyas ondas poseen una frecuencia igual o cercana a la de la red (50 Hz). Son de forma prácticamente senoidal.
  Un ejemplo de este caso es la sobretensión que se establece por el transitorio derivado de una maniobra en uno de los contactos de un interruptor de 500 kV, luego de energizar una LAT en vacío.
  Otro ejemplo es aquel en que se establece una sobretensión de este tipo, ante un estado de cortocircuito monofásico con el neutro aislado.

- <u>Grupo B</u>

  Se agrupan las sobretensiones cuyas ondas tienen una frecuencia superior a la frecuencia de la red.

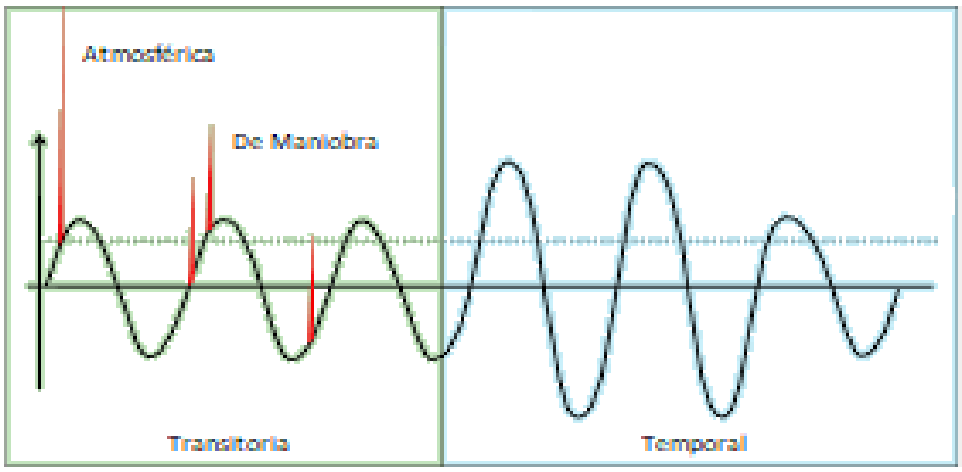
Tienen su origen en los armónicos que se establecen en el sistema, como consecuencia de la existencia de componentes no lineales (sistemas de rectificación, núcleo magnético de transformadores).
El valor pico de la tensión resultante por la acción de los armónicos (valores relativos en función de la componente fundamental), puede exceder el valor máximo permitido para la instalación.

- Grupo C

Aquí se incorporan las sobretensiones cuyas ondas tienen una frecuencia inferior a la frecuencia de la red.
Es muy común que se establezcan en los capacitores en serie en una red eléctrica.
Las causas pueden deberse a fenómenos alineales que generan ondas de baja frecuencia (del orden de 10 Hz), las cuales, si bien no provocarán sobretensiones en los elementos inductivos, sí establecerán sobretensiones en los capacitivos.

Con el fin de comparar los efectos de los distintos tipos de sobretensiones, a través del tiempo, sobre la onda fundamental de tensión de la red, podemos observar el siguiente gráfico.

Figura N° 6



4. Transitorios de maniobra

Como ya hemos comentado en el ítem 3, las sobretensiones impulsivas de maniobra deben su causa a las operaciones de cierre y apertura que se realizan en componentes del SEP, más específicamente sobre los interruptores de potencia.

Es decir, las sobretensiones pueden tener su causa en los transitorios de corriente, así como en los transitorios de tensión, luego de haberse efectuado acciones de maniobra, tanto en operación normal como también al despejar una falla del sistema.

En estos casos, se establecerán altos niveles de tensión al instante de implementarse las maniobras, en relación a eventuales cierres, aperturas o las transiciones cierre-apertura.

A continuación detallamos algunas de las operaciones de maniobra más comunes, que son causa de la generación de sobretensiones en la red. Recordemos que estas sobretensiones son preponderantes para redes con Un > 300 kV, según ya explicamos en el ítem 3.

a) Energización de líneas de transmisión.

b) Energización de líneas de transmisión con carga residual. Operación de recierre en la línea.

c) Energización de una línea de transmisión terminada con un trafo en vacío.

d) Energización de una línea de transmisión por el lado fuente.

e) Apertura de una línea de transmisión en vacío.

f) Rechazo de carga al final de una línea de transmisión.

g) Desconexión de un trafo en vacío.

h) Desconexión de reactores.

i) Desconexión de un trafo con reactor en el arrollamiento terciario.

j) Apertura de banco de capacitores.

Las sobretensiones de maniobra provocan daños en las aislaciones de los activos de AT y EAT (para Un > 300 kV), ya que los esfuerzos dieléctricos derivados conllevan al envejecimiento prematuro.

De ahí la importancia del análisis y evaluación de las mismas, con el fin de determinar las solicitaciones dieléctricas sobre los componentes de la red.

5. Transitorios por descargas atmosféricas

Las sobretensiones generadas por este tipo de transitorio son de origen externo al SEP, siendo su causa la actividad por descargas atmosféricas.

Los niveles de intensidad de las descargas, así como las formas características de la onda, presentan variaciones, no observándose uniformidad en estos parámetros.

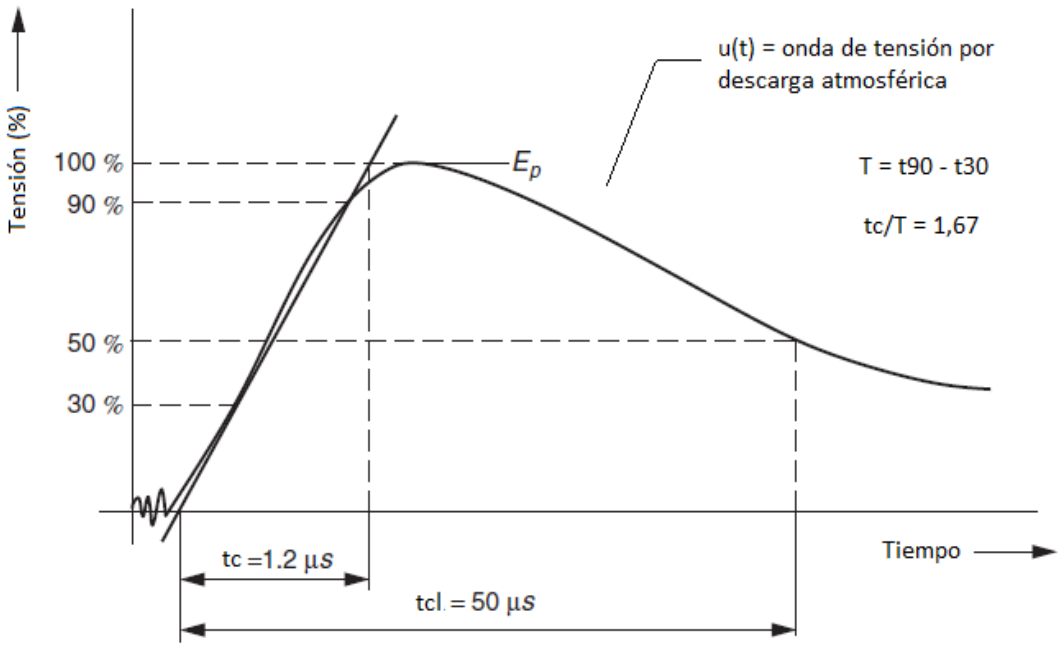
Cuando esta onda de corriente se propaga, también lo hará una onda de tensión, la cual se encuentra asociada a la primera.

De tal forma, la relación entre el valor de la onda de tensión y el valor de la onda de corriente, para un cierto punto de la línea, será la impedancia característica en ese lugar.

A los fines de poder favorecer la implementación de ensayos de laboratorio, con el objetivo de verificar los esfuerzos dieléctricos de los componentes a ser instalados en el SEP, se ha procedido a normalizar una onda característica de descarga atmosférica.

La norma IEC 60060 establece la siguiente normalización de la onda por descarga atmosférica, denominada 1,2/50 µs, tal cual se observa en la siguiente figura.

Figura N° 7



El tiempo de crecimiento (tc), establecido en 1,2 µs, se define como 1,67 veces el intervalo de tiempo entre el valor al 30 % y al 90 % del valor pico

El tiempo de cola (tcl), establecido en 50 µs, se define como aquel tiempo en que el valor de la onda alcanzó el 50 % de su valor de pico, en su fase descendente.

En cuanto al análisis de estas sobretensiones, hay que tener en cuenta la forma en que se generan las mismas, estando este hecho relacionado con la forma en que la descarga impacta sobre la instalación. En tal sentido, se determinan las siguientes categorías:

- Impacto directo de la descarga sobre los conductores de una línea de transmisión, generando así una onda de corriente que se propaga a través de la misma.

- Impacto de la descarga en las adyacencias de una línea de trasmisión, no haciéndolo sobre los conductores de la misma.

- Impacto directo de la descarga sobre las torres o hilos de guarda de una línea de transmisión.

A los fines del estudio de los efectos de las ondas de descarga atmosférica sobre los elementos de la instalación (ej. transformadores), es oportuno considerar que los niveles del pico de corriente se encuentran en el orden de los 20 kA a 100 kA y con excepciones llegan a los 200 kA.

Se puede establecer una expresión analítica para este tipo de onda de tensión normalizada y que resulta útil para el modelado de los sistemas y posterior estudio de los efectos de las mismas sobre los componentes. Tenemos:

$$u(t) = Ep\,(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

En ésta, el parámetro “α” se encuentra asociado con el tiempo de cola y el parámetro “β” con el tiempo de crecimiento.

Si se adopta α = 1,4 E4 1/s y β = 4,5 E6 1/s, se obtiene la onda 1,2/50.

Ingenieria Nova Miron S.A.

NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES