

3.- SOBRETENSIONES TRANSITORIAS POR MANIOBRAS

El deterioro del $\cos \Phi$ debido a las cargas auto-inducidas, provoca un aumento significativo de intensidad en las instalaciones eléctricas y produce pérdidas en las líneas y transformadores. Las Compañías distribuidoras y las industrias están obligadas a poner en servicio las baterías de condensadores.

Al conectar y desconectar los condensadores produce fenómenos muy particulares que influyen directamente en las características de los aparatos de maniobra y de protección.

3.1.- Compensación de la energía reactiva

La implantación de condensadores sobre una red eléctrica constituye lo que llamamos el «modo de compensación». Su implantación viene dada por:

El objetivo propuesto (descarga de cables y transformadores).

La estabilización de los niveles de tensión.

El modo de distribución de la energía eléctrica.

El régimen de carga.

La influencia de los condensadores sobre las características de la red.

El costo de la instalación.

La compensación de la energía reactiva puede verse en la figura 3.1.

En la compensación global:

En la red de AT para Cía. de distribución (1)

En la red de MT para un abonado en MT (2).

En red de BT (3) para un abonado en BT sobre batería de tipo fijo.

Compensación por sectores:

Centro de distribución de Cía. Eléctrica (4), (central generadora).

Fábrica, taller o edificio, para un abonado en BT (5).

Compensación individual:

Esta compensación es técnicamente ideal ya que produce la energía reactiva en el puntomismo de consumo y en cantidadrigurosamente ajustada a la demanda.

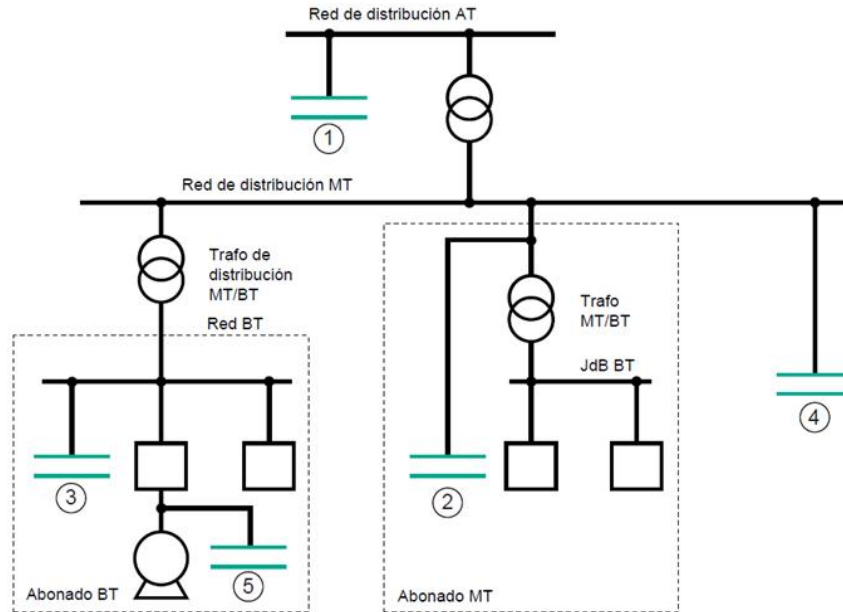


Figura N° 3.1.- Compensación de energía reactiva y sus tipos

A pesar de ello, esta solución es económicamente desfavorable, y conduce generalmente a una sobrecompensación ya que no contempla la posibilidad de aplicación de los coeficientes de utilización y simultaneidad de las cargas. En la práctica esto se da en grandes motores de MT o BT. Las baterías de condensadores en media y alta tensión, resulta económicamente ventajoso para potencias de unos 1000 kVAr o superiores.

Analizando las redes diversas se llega a la conclusión que no es posible establecer una regla universal. El modo de compensación depende de la política energética de los países y distribuidores. En los Estados Unidos la compensación se realiza esencialmente en MT por razones de tipo tarifario. Por lo contrario, en Alemania, la compensación se realiza preferentemente en BT, ya que parece lógico compensar exactamente en el punto de consumo de la energía reactiva. Los abonados en MT o BT deben

compensar sus instalaciones para poder obtener el $\cos\Phi$ en el punto de suministro a la red, igual o superior a 0.928. Este documento sólo trata de la compensación de la energía reactiva en MT.

Compensación en media tensión tradicional

Las baterías de condensadores se conectan en derivación sobre la red. Estas pueden ser:

Únicas o fijas (figura 3.2), cuando la potencia reactiva es pequeña y la carga a compensar relativamente estable.

Fraccionadas (figura 3.3), este tipo de compensación comúnmente se denomina «en escalones» (back to back). Este tipo de batería es muy utilizada en grandes industrias (potencia instalada importante), y los distribuidores de energía (centrales generadoras). Permite una regulación paso a paso de la energía reactiva. La conexión o desconexión de los escalones de condensadores puede pilotarse con relés de tipo «varmétrico» (reguladores del factor de potencia).

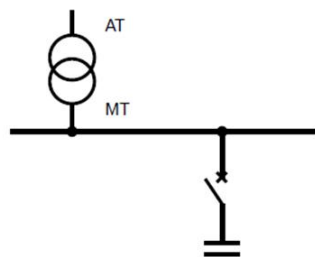


Figura N° 3.2.- Batería de condensadores única

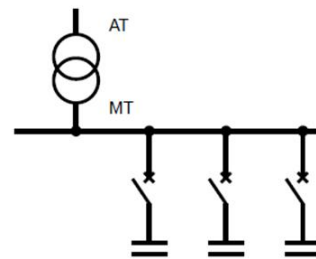


Figura N° 3.3.- Batería de condensadores fraccionada ó en escalones

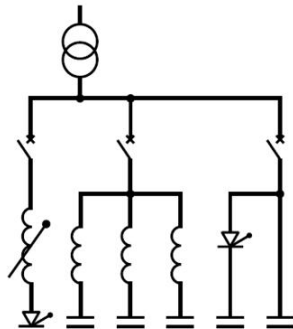


Figura N° 3.4.- Principio de banco de condensadores estático

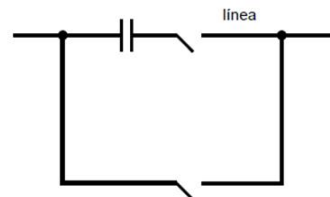


Figura N° 3.5.- Batería de condensadores serie

Compensaciones particulares

Los compensadores estáticos instantáneos. En el caso que sea necesaria una compensación variable y continua (industrias de grandes cargas muy variables y regulación de tensión en algunas redes de MAT) se realizan instalaciones aplicando simultáneamente condensadores, inductancias variables y electrónica de potencia (figura 3.4). El conjunto se compone generalmente de:

Una batería de condensadores fija.

Un conjunto de filtros de armónicos para absorber los armónicos de la red y los propios de la instalación (electrónica de potencia).

Una inductancia variable conectada por tiristores; esta inductancia absorbe la energía reactiva excedente, generada por los condensadores.

Por su parte, los condensadores pueden estar conmutados por tiristores.

Baterías en serie. En el caso de grandes redes con líneas muy largas, las baterías de condensadores pueden estar montadas en serie sobre la línea (figura 3.5). Este tipo de montaje permite una compensación adaptada permanentemente a las necesidades ya que la energía reactiva suministrada depende de la corriente que circula por la línea. Es necesario un sofisticado sistema de puesta en cortocircuito para evitar la descarga de los condensadores cuando por la línea circula una corriente de cortocircuito.

En este estudio se trata únicamente circuitos trifásicos.

Las notaciones son las siguientes:

❖ La fuente.

U : tensión entre fases de la red.

I_{cc} : corriente de cortocircuito de la red.

S_{cc} : potencia de cortocircuito de la red.

$$S_{cc} = \sqrt{3}UI_{cc} = \frac{U^2}{L_0\omega}$$

L_0 : inductancia de cortocircuito de la red.

f: frecuencia industrial.

w: pulsación a frecuencia industrial.

❖ Las conexiones.

L: inductancia de conexión (serie) con la batería (caso de batería única).

l: inductancia de conexión (serie) con cada escalón de la batería.

L: inductancia de choque.

❖ La carga.

C: capacidad de la batería.

Q: potencia de la batería.

$$Q = U^2 C W = \sqrt{3} U I_{\text{capa}}$$

I_{capa}: corriente capacitiva que circula por la batería.

❖ Los fenómenos transitorios.

I_e: intensidad pico de cierre.

f_e: frecuencia propia de oscilación de I_e.

S_a: coeficiente de sobretensión aguas arriba (lado red).

S_a en p.u. = tensión de pico máxima aguas arriba, al cierre, dividida por:

$$\frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

S_b: coeficiente de sobretensión aguas abajo (lado condensador).

❖ Equipamiento

▪ I_n: intensidad en servicio continuo.

▪ I_{ciemáx}: intensidad de pico máxima de cierre.

3.2.- Maniobra de las baterías de condensadores

El condensador a conectar a la red se supone totalmente descargado. El condensador C está provisto de una resistencia de descarga R, esta hipótesis se verifica cuando el condensador es desconectado después de, al menos, 2 ó 3 veces la constante RC. Toda conexión intempestiva antes de este intervalo será peligrosa. La norma CEI 871 estipula que en un intervalo

de 10 minutos, la carga residual de una batería de condensadores no debe exceder de 75 V. Si la aplicación necesita una respuesta más rápida de la regulación, la instalación debe preverse de dispositivos adecuados. La conexión de una batería de condensadores destinada a funcionar en derivación sobre una red, va acompañada de un régimen transitorio resultante de la carga de la batería.

3.3.- Fenómenos eléctricos en la conexión

Desde el punto de vista de la intensidad de la corriente, la carga oscilante provoca una sobreintensidad de amplitud que está en función de las características de la red y la batería. La conexión equivale prácticamente a establecer, en el punto considerado, un cortocircuito de corta duración (frecuencia elevada con relación a la frecuencia de la red). Desde el punto de vista de tensión, la carga va acompañada de la propagación, sobre la red, de una onda de choque. Estos fenómenos transitorios dependen de las características de la red, del instante de cierre de los contactos o supresión. Hay que considerar dos casos: batería única y batería fraccionada con varios escalones.

Batería o condensador único (figura 3.6) $L \leq L_0$.

Despreciamos L con relación a L_0 para los cálculos que siguen. La conexión sobre la red, de una batería en estrella aislada, el esquema de principio y curvas de corriente y de tensión, mostrando la sobreintensidad de corriente y las sobretensiones aguas arriba y abajo que acompañan a la conexión, está representada en la figura 3.7.

La frecuencia propia de las oscilaciones es igual a: $f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C}}$

Las sobretensiones aguas arriba y abajo son iguales: $S_A = S_B = 2 \text{ p.u.}$

La intensidad de pico al cierre viene dada por:

$$I_e = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C}{L_0}} = I_{\text{capa}} \sqrt{2} \sqrt{\frac{S_{\text{CC}}}{Q}}$$

Siendo:

S_{CC} = potencia de cortocircuito de la fuente, en MVA en el punto de conexión.

Q = potencia del condensador en Mvar.

Batería fraccionada (figura 3.8) para simplificar las ecuaciones, sólo consideramos el caso de escalones con condensadores idénticos. Los cálculos son más complicados en el caso general (ver norma CEI 56. 1987 anexo BB).

L_0 = inductancia del generador (conexión al juego de barras).

l = inductancia de la conexión serie.

n = número de escalones en servicio cuando se conecta el $n+1$.

La conexión de un escalón se realiza en presencia de condensadores ya en tensión y va acompañada de dos fenómenos transitorios superpuestos, y son:

El primero, muy rápido, de frecuencia: $\frac{1}{2\pi\sqrt{lC}}$ que corresponde a la descarga de los condensadores sobre el escalón conectado.

El segundo, más lento de frecuencia $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C}}$ y a menudo despreciable, en comparación al anterior (L_0 es muy superior a l), corresponde a la descarga sobre la red del conjunto de baterías, cuyos potenciales se igualan. La conexión del $n+1$ escalón de una batería fraccionada a la red (esquema de principio y curvas de intensidad y tensión mostrando la sobreintensidad y las sobretensiones por efecto de la conexión, con distinción de los dos fenómenos; están representados en la figura 3.9.

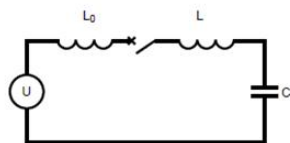


Figura N° 3.6.- Esquema de principio de la maniobra de una batería aislada de la red.

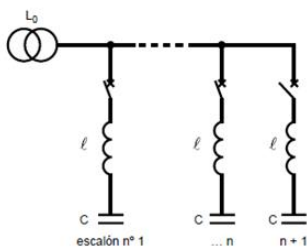


Figura N° 3.8.- Esquema de principio de una batería múltiple.

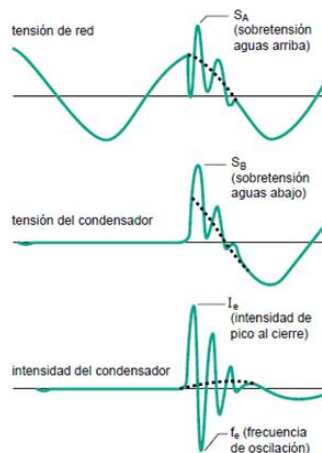


Figura N° 3.7.- Tensión e intensidad a la conexión en red una batería aislada



Figura N° 3.9.- Tensión e intensidad a la conexión en red de una batería múltiple.

Obsérvese que la sobretensión propagada, S_A es tanto más débil cuanto mayor es el número de escalones en servicio. Entonces, cuantos más escalones estén en servicio, tanto mayor es la sobreintensidad.

$$I_e = \frac{n}{n+1} \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C}{L_0}} = I_{\text{capa}} \sqrt{2} \frac{n}{n+1} \frac{f_e}{f}$$

Siendo la frecuencia propia de oscilación: $f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

La sobretensión lado red: $SA = \frac{n+2}{n+1} p \cdot u$

La sobretensión en lado condensador: $SA = \frac{2n}{n+1} p \cdot u$

Estas sobretensiones, que alcanzan como máximo dos veces la tensión de red, no presentan generalmente problemas ya que, por construcción, todos los componentes son capaces de soportar este nivel.

Las sobreintensidades a menudo necesitan definir medios adecuados para evitar el deterioro de los condensadores y el equipamiento.

3.4.- Fenómenos eléctricos relacionados con la desconexión

Con la extinción del arco en el aparato de maniobra, a un paso por cero de la intensidad, la batería separada sigue cargada a la tensión de pico. Esta

tensión se reduce rápidamente a cero gracias a las resistencias de descarga de cada condensador (tiempo: 1 a 5 minutos).

La tensión de restablecimiento en bornes del interruptor alcanza pues 2 en un semiperíodo. La ruptura se consigue normalmente cuando la regeneración dieléctrica del interruptor crece más rápidamente que la tensión de restablecimiento. Por lo contrario, si la regeneración crece menos que la tensión de restablecimiento, se produce una descarga (figura 3.10 c). La norma distingue entre re-encendido (descarga antes del cuarto de período después de la ruptura), fenómeno que da paso a un crecimiento de la tensión y el recebado (descarga después de un cuarto de período).

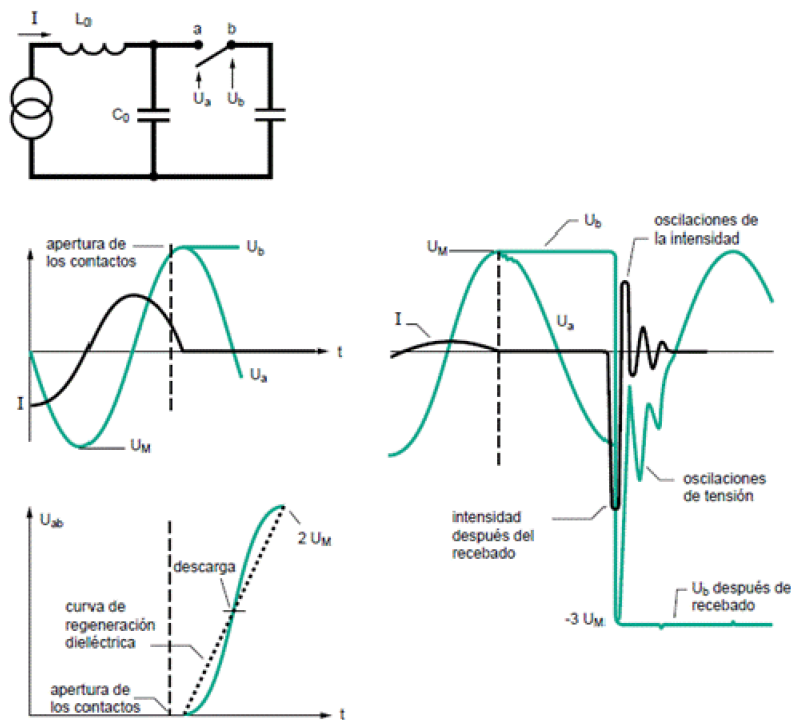


Figura Nº 3.10.- Tensión e intensidad a la desconexión de una batería

En este caso (figura 3.10), los fenómenos son similares a los que encontramos en el cierre, pero pueden ser amplificados por el hecho que el re-

cebado puede producirse bajo una tensión doble de la que puede presentarse en el cierre. Desde el punto de vista teórico, si se producen varios recibidos, se comprueba que:

- Las ondas de choque crecientes: 2 UM; 4UM; 6 UM ...
- Las sobretensiones crecientes: 3 UM; 5 UM; 7 UM...
- Tensiones de restablecimiento crecientes: 2 UM; 4 UM...

En la práctica las tensiones no aumentan tan rápidamente ni de forma tan regular a cada recibido; de forma que no aparecen siempre que la diferencia de tensión es máxima y la amortiguación juega un papel importante.

Las sobreintensidades a la conexión son muy variables según los tipos de montaje.

- En el caso de una batería única, el pico máximo de intensidad transitoria depende de la potencia de cortocircuito en el punto de conexión.

La figura 3.11 da la relación: I_e / I_{capa} en función de S_{cc} y de la potencia de la batería Q . Por experiencia en instalaciones existentes, la sobreintensidad no rebasa nunca 100 veces la intensidad asignada (I_{capa}). Como valor medio, la sobreintensidad es del orden de 10 a 300 veces I_{capa} . La frecuencia propia del régimen transitorio es de 300 a 1000 Hz:

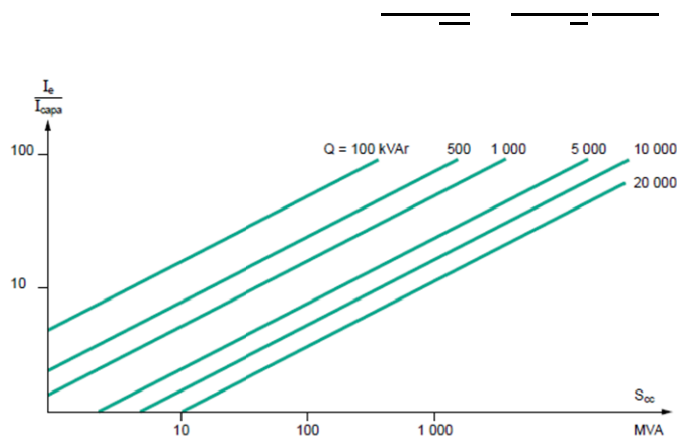


Figura N° 3.11.- Sobre intensidad al cierre de una batería en función de: su potencia y potencia de corto circuito

Cálculo de las intensidades de conexión e inductancias de choque
 En función de las tensiones e intensidades nominales (con $I_{\text{capa}} \leq 0,7 I_n$),
 del poder de ruptura, etc., se eligen los equipos en función de los cálculos
 que siguen.

Batería única

Potencia: —

Intensidad de conexión o cierre: — — — —

con:

L_0 : inductancia de cortocircuito de la fuente.

S_{cc} : potencia de cortocircuito de la red.

La frecuencia propia de oscilación: —

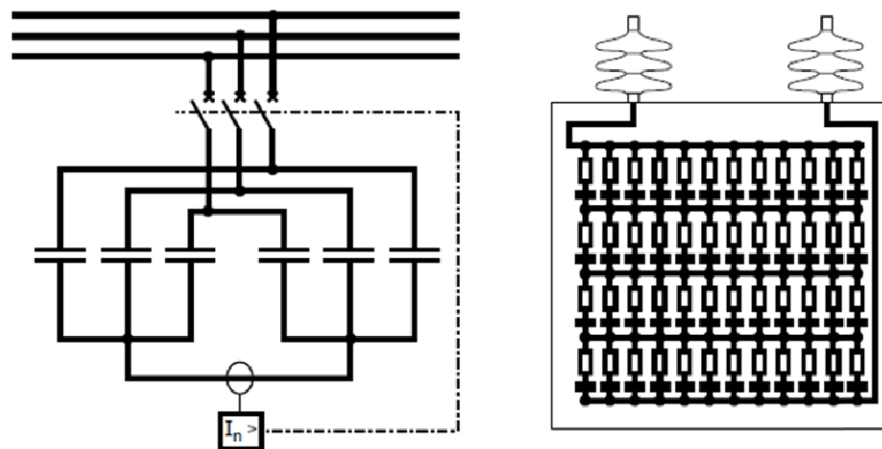


Figura N° 3.12.- batería de condensadores en media tensión

En general no es necesario emplear inductancia de choque, salvo en el caso
 que S_{cc} sea muy elevada y Q muy débil; en cuyo caso debe limitarse el pico
 de corriente:

Para los condensadores $I_e > 100 I_{\text{capa}}$

Para los equipos (I_e ver incompatibilidad)

Cálculo de la inductancia de choque L (que debe añadirse a L_0)

- 1er caso: $I_e > 100 I_{\text{capa}}$ (limitación condensador)

$$\text{Tomar } L \geq \frac{U^2}{W} \left(\frac{200}{Q} - \frac{10^6}{S_{CC}} \right)$$

siendo: Len mH, Q en MVar, U en kV y S_{cc} en MVA

- 2º. Caso: I_e > I_{ci} emáx corriente de pico máxima del aparato, tomar:

$$L \geq \frac{10^6}{W} \left(\frac{2Q}{3(I_{\max \text{ conexion}})^2} - \frac{U^2}{S_{CC}} \right)$$

con: Len mH, Q en MVar, U en kV, I_{dis} paromáx en KA.

- 3er caso: Corresponde a la suma del primero y el segundo. Tomar para L el valor mayor de ambos.

Las inductancias de choque

La aplicación de las inductancias de choque deberá determinarse en función a las posibilidades de los fabricantes y de las consideraciones económicas. Se trata de inductancias al aire, sin núcleo magnético.

Instalación: interior – exterior con intensidad permanente nominal: 1,3 a 1,5 I_n.

Valor de la inductancia: 0 + 20%.

Capacidad térmica a las sobre-intensidades instantáneas: 30 a 50 I_n.

Comportamiento electrodinámico: I_{cc} de pico aplicada en el punto de conexión.

Los valores más utilizados son de inductancias de 50, 100 ó 150 mH. Ejemplo: 50 mH 200 A con tres escalones de 4,8 MVar a 20 kV.

3.5.- Sobretensiones y coordinación del aislamiento

Se definen como tales las perturbaciones que se superponen a la tensión nominal de un circuito. Pueden aparecer: entre fases o entre circuitos distintos, y son llamadas de modo diferencial. Entre los conductores activos y una masa, o la tierra, y son llamados de modo común.

tipo de sobretensión (causa)	coeficiente sobretensión MT-AT	duración	pendiente del frente frecuencia	amortiguamiento
a frecuencia industrial (defecto aislamiento)	$\leq \sqrt{3}$	larga > 1 s	frecuencia industrial	débil
de maniobra (interrupción de cortocircuito)	2 a 4	corta 1 ms	media 1 a 200 kHz	medio
atmosférica (caída directa del rayo)	> 4	muy corta 1 a 10 μ s	muy elevada 1000 kV/ μ s	fuerte

Figura N° 3.13.- Características de los diferentes tipos de sobretensión

Su comportamiento variado y aleatorio las hace difícil de caracterizar y sólo autoriza una aproximación estadística en lo que concierne a su duración, sus amplitudes y sus efectos. La tabla de la figura 3.13 presenta las principales características de estas perturbaciones.

En realidad los riesgos se sitúan esencialmente al nivel de los disfuncionamientos, de la destrucción del material y, como consecuencia en la no continuidad del servicio. Sus efectos pueden presentarse en las instalaciones de los usuarios. Las perturbaciones pueden conducir a:

- Interrupciones cortas (reenganche automático en las instalaciones de distribución pública MT por líneas aéreas).
- Interrupciones largas (intervención para el cambio de los aislantes destruidos; ver reemplazo del material). Los aparatos de protección permiten limitar los riesgos. Su puesta en servicio necesita la elaboración reflexiva de los niveles coherentes de aislamiento y protección. Para ello, es indispensable una comprensión previa de los diferentes tipos de sobretensión, que es el objetivo de este capítulo.
- Sobretensiones a frecuencia industrial bajo esta denominación de frecuencia industrial se reagrupan las sobretensiones de frecuencias inferiores a 500 Hz.

- Las frecuencias industriales más frecuentes son: 50,60 y 400 Hz. Sobretensiones provocadas por un defecto de aislamiento (figura 3.14)
- Una sobretensión debida a un defecto de aislamiento se manifiesta en una red trifásica, cuando el neutro está aislado, o es impedante.

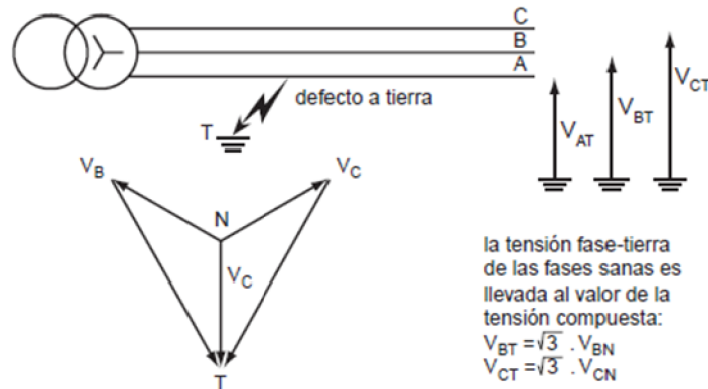


Figura N° 3.14.- Sobretensión temporal en una red a neutro aislado de la red, al presentarse un defecto de aislamiento

En efecto, después de un defecto de aislamiento entre una fase y la masa o la tierra (daño en un cable subterráneo, puesta a tierra de un conductor aéreo por una rama, defectos en el equipamiento), la fase afectada se pone al potencial de tierra y las otras dos fases quedan entonces, con respecto a tierra sometidas a la tensión compuesta

De forma más exacta, después de un defecto de aislamiento en la fase A, se define como factor Sd de defecto a tierra la relación de la tensión de fases B y C con relación a tierra, a la tensión simple de la red.

La siguiente ecuación permite calcular este factor Sd:

$$S_d = \frac{V_{BT}}{V_{BN}} \quad \text{con} \quad \frac{V_{CT}}{V_{CN}}$$

Siendo X_0 la reactancia homopolar y X_d la reactancia directa de la red vista desde el defecto. Cabe señalar que:

Si el neutro está perfectamente aislado (o sea $X_0 = \infty$):

Si la puesta a tierra del neutro es perfecta (o sea $X_0 = X_d$): $S_d = 1$.

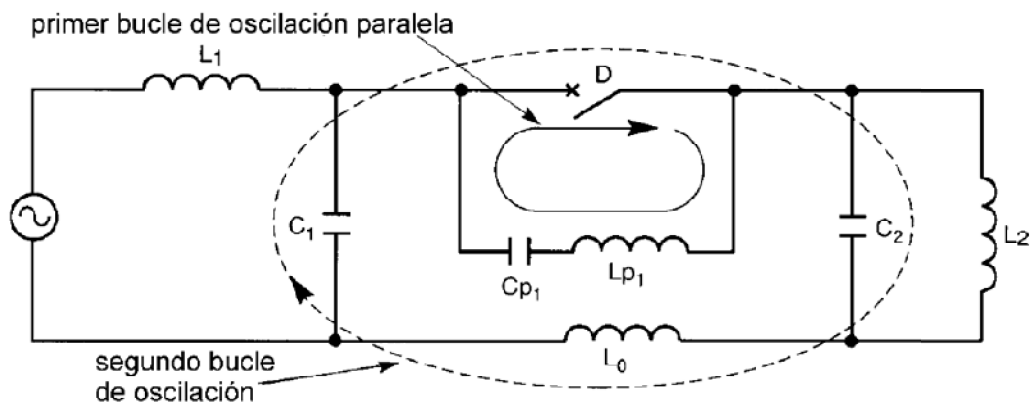
Si, como se tiene en general, $X_0 \leq 3 X_d$: $S_d \leq 1,25$.

Las sobretensiones en una línea larga en vacío (efecto Ferranti) se puede producir una sobretensión cuando una línea de gran longitud es alimentada por una de sus extremidades y sin carga en la otra. Ello se debe a un fenómeno de resonancia que se manifiesta por una onda de tensión de crecimiento lineal a lo largo de la línea.

La ferro-resonancia, al depender de la variabilidad de L , puede producirse en una banda ancha de frecuencia. Una demostración análoga puede tenerse en el caso de resonancia paralelo. Una carga conectada al circuito juega el papel de una resistencia de amortiguamiento e impide el mantenimiento de las condiciones de resonancia.

Las sobretensiones provocadas por el establecimiento o la interrupción de pequeñas corrientes inductivas. Este tipo de sobretensión tiene tres fenómenos generadores: la supresión brusca de la corriente, el recebado y el precebado. El esquema de la figura 3.15 representa una red que alimenta una carga a través de un interruptor automático y comporta:

Una fuente de tensión senoidal, de inductancia L_1 y de capacidad C_1 .



C_{p1} : Capacidad del interruptor automático

L_{p1} : Inductancia del interruptor automático

Figura N° 3.15.- Circuito equivalente para el estudio de las sobretensiones provocadas por la interrupción de corrientes inductivas

Un interruptor automático D , no dissociable de sus elementos parásitos L_{p1}

y C_{p1} ; una carga inductiva L_2 de la que no puede ignorarse su capacidad repartida simbolizada por el condensador C_2 ; por último una inductancia de línea L_0 , generalmente despreciable y supresión brusca de una corriente.

Estas variaciones de fuerza electromotriz pueden generar en las capacidades vecinas, parásitas o voluntarias, corrientes oscilatorias (figura 3.15) de elevada frecuencia: la amplitud de estas corrientes puede llegar a ser no despreciables frente a la corriente 50 Hz y alcanzar el 10% del valor de ésta. La superposición de la corriente 50 Hz y de esta corriente de alta frecuencia en el interruptor automático va a motivar la existencia de muchos pasos por cero de la corriente en las proximidades del cero de la onda fundamental de 50 Hz (figura 3.16). El interruptor automático poco solicitado por estas corrientes de reducidos valores es a menudo capaz de cortar al primer paso por cero que se presenta.

Si C_2 sólo está constituida por las capacidades parásitas respecto a masa, el valor de V puede tomar valores peligrosos para los aislantes presentes en los materiales (interruptor automático, o la carga).

El circuito del generador tiene un comportamiento equivalente, pero su autoinducción L_1 , es generalmente muy inferior y las tensiones que aparecen en los bornes de C_1 son, pues, más reducidas.

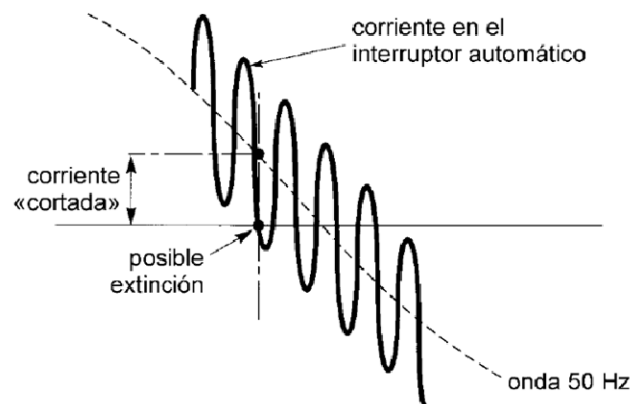


Figura Nº 3.16.- Superposición de la corriente oscilante de alta frecuencia sobre una corriente de frecuencia industrial

El recebado se produce cuando el fenómeno de supresión antes explicado ha hecho aparecer entre los bornes del interruptor automático una sobretensión diferencial que éste no puede soportar: entonces se produce un arco. Esta explicación elemental y básica se complica por la presencia de los elementos parásitos precedentemente citados. En efecto, después de la ruptura de la corriente y del recebado del arco, sobrevienen simultáneamente tres fenómenos oscilatorios a las frecuencias respectivas: $FP_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LP_1 - CP_1}}$ es del orden de algunos MHz.

En el bucle D - C₁ - L₀ - C₂: $FP_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_0 C_1 C_2}}$ es del orden: 100 a 500 kHz,

En el conjunto del circuito: $F_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_1 C_2}}$

Aparecen entonces múltiples recebados (hachazos) hasta que la separación de los contactos, que va en aumento, los hace imposibles. Se caracterizan por trenes de ondas de alta frecuencia de amplitud creciente.

Sin embargo, como la tensión dieléctrica entre los contactos va disminuyendo a medida que se cierra, las sobretensiones sucesivas disminuyen hasta el cierre completo.

En el momento de la puesta en tensión de baterías de condensadores, a priori sin carga inicial y en el caso de un aparato de maniobra lento, un cebado de arco se produce entre los contactos de cierre en las proximidades de la cresta de la onda de tensión de 50 Hz. Aparece entonces una oscilación amortiguada en el sistema LC. Este segundo caso más frecuente que el rayo directo, puede manifestarse también peligroso.

Si el rayo cae sobre una torre, o sobre el cable de guarda, el paso de la corriente a tierra determina un aumento del potencial de las masas.

Para tensiones de red superiores a 150 kV este arco de retorno es poco probable. La calidad de la toma de tierra de las torres juega un papel importante. A partir de los 750 kV, no hay prácticamente ningún riesgo de

un arco de retorno, lo que justifica la instalación de cables de guarda en las líneas de MAT. Por debajo de los 90 kV estos cables no constituyen una protección eficaz más que en el caso de que la tierra de las torres sea excelente. Las ondas de tensión inducidas en la línea son similares en forma y amplitud, a las obtenidas por la caída del rayo directo. Su característica principal es su frente, muy abrupto, (del orden del microsegundo) y su amortiguación (aperiódica o no) muy rápida, (características típicas de estaciondas según CEI 60: duración del frente $1,2 \mu s$ y duración de la semi-amplitud de la cola $50 \mu s$), cuando la onda de tensión de una caída de rayo alcanza un transformador MT/BT, la transmisión de tensiones se hace esencialmente por acoplamiento capacitivo. La amplitud de la sobretensión así transmitida, observada sobre el secundario lado BT, es inferior al 10% de la que se tiene en el lado MT (generalmente inferior a 70 kV). Por tanto, en las líneas BT las sobretensiones inducidas son, en general, inferiores a 7 kV. una observación estadística, obtenida por el Comité Electrotécnico Francés, ha demostrado que el 91% de las sobretensiones en los abonados de BT no exceden de 4 kV y el 98% de 6 kV. De aquí, por ejemplo, la norma de fabricación de los interruptores automáticos de acometida que prescribe una tensión de choque de 8 kV.

3.6.- Sobretensiones electrostáticas

En efecto, si la mayoría de sobretensiones inducidas son de origen electromagnético, algunas son de origen electrostático e interesan particularmente a las redes aisladas de tierra.

Por ejemplo, durante los minutos que preceden a la caída del rayo, cuando una nube cargada a un cierto potencial se encuentra encima de una línea, ésta toma una carga de sentido contrario. Antes de que se produzca la caída del rayo que ha de permitir la descarga de la nube, se tiene, pues, entre la línea y el suelo un campo eléctrico E que puede alcanzar 30 kV/m ,

bajo cuyo efecto se carga el condensador línea/tierra a un potencial del orden de 150 a 500 kV, según la altura de la línea con relación al suelo. Existen riesgos de chispas poco enérgicas a nivel de los componentes menos aislados de la red. Después de la caída del rayo entre la nube y la tierra, al desaparecer el campo eléctrico, las capacidades se descargan.

3.7.- La coordinación del aislamiento

Las primeras redes eléctricas (Grenoble-Jarrie 1883) eran tecnológicamente muy rudimentarias y a merced de las condiciones atmosféricas, como el viento y la lluvia. El viento, haciendo variar las distancias entre los conductores, era el origen de cebado de arcos, y la lluvia favorecía las corrientes de fuga a tierra. Estos problemas han conducido a: utilizar aisladores, determinar las distancias de aislamiento, unir las masas metálicas de los aparatos a tierra.

La coordinación del aislamiento tiene por objeto determinar las características de aislamiento necesarias y suficientes de los diversos componentes de las redes con vistas a obtener una rigidez homogénea a las tensiones normales, así como a las sobretensiones de origen diverso. Su finalidad principal es la de permitir una distribución segura y optimizada de la energía eléctrica. Para optimizar es necesario comprender y buscar la mejor relación económica entre los diferentes parámetros que dependen de esta coordinación: costo del aislamiento, costo de las protecciones y averías (pérdida de explotación).

Además, las líneas de fuga pueden estar sujetas a fenómenos de envejecimiento, propios del material aislante considerado, que implica una degradación de sus características. Los factores influyentes son principalmente:

Las condiciones ambientales (humedad, polución, radiaciones UV).

Las tensiones eléctricas permanentes (valor local del campo eléctrico).

La tensión soportada en el gas es función igualmente de la presión:

Variación de la presión del aire con la altura.

Variación de la presión de llenado de un aparato.

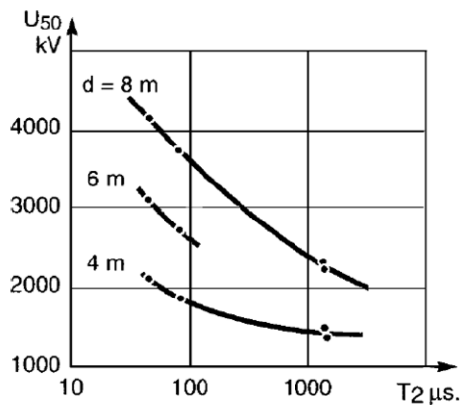


Figura N° 3.17.- U_{50} en función del T_2 de la semiamplitud en la cola. Intervalo entre punta positiva y plano: $d = 4\text{--}6\text{--}8\text{ m}$.

T_{cr} (μs)	7	22
T_2 (μs)	1 400	1 500
U_{50} (kv)	2 304	2 227
σ	370	217

Figura N° 3.18.- Influencia de la duración hasta la cresta sobre la tensión soportada dieléctrica de un intervalo punta positiva plano $d = 8\text{ m}$

Aquí también existe el fenómeno de dispersión, con una tensión soportada a la polaridad positiva (la más aplicada al electrodo más puntiagudo) menos buena que a la polaridad negativa. Las dos simples fórmulas que siguen, permiten apreciar las redes de MAT y MT, las solicitaciones al choque de polaridad positiva $1,2\mu s / 50\mu s$ de un intervalo de aire: —

U_{50} = tensión para la cual la probabilidad de la chispa es del 50%. —

U_0 = tensión soportada siendo d la distancia de aislamiento en metros, U_{50} y U_0 vienen dadas en MV. Numerosos estudios experimentales han permitido confeccionar tablas precisas de correspondencia entre la distancia y la tensión soportada, tomando en consideración diferentes factores, tales como la duración del frente de onda y de cola, la polución ambiental y la naturaleza del aislante. A título de ejemplo, la figura 3.18 nos da las variaciones de la tensión U_{50} en función de la distancia y de la duración de cola T_2 para un intervalo punta positiva-plena. El estudio de estas «condiciones» permite determinar el nivel de sobretensión que podrá solicitar el material durante su utilización.

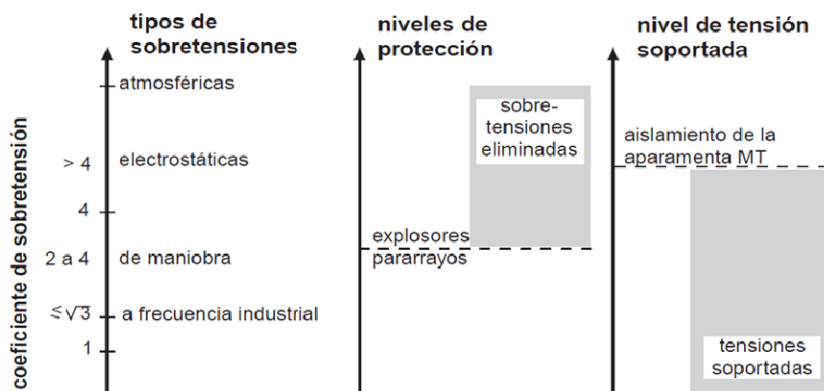


Figura N° 3.19.- Coordinación de aislamiento: posicionar correctamente el nivel de protección y la tensión soportada de los equipos en función de las probables tensiones

La elección del nivel de aislamiento adoptado permitirá asegurar que, frente a la frecuencia industrial y a los choques de maniobra, al menos, el nivel de aislamiento no será nunca sobrepasado. Frente a la caída del rayo deberá realizarse generalmente un compromiso entre el nivel de protección de los pararrayos eventuales y el riesgo de fallos admisible.

Para dominar bien los niveles de protección aportados por los limitadores de sobretensión, conviene conocer bien sus características y su comportamiento; este será el objetivo del capítulo siguiente.

Además, después del cebado, la ionización entre los electrodos hace que el arco se mantenga alimentado por la tensión de la red y puede dar lugar (en función de la puesta a tierra del neutro) a una corriente de fuga a la frecuencia industrial. Para interrumpir esta corriente, que define un defecto franco a tierra, se necesita la intervención de protecciones situadas a la cabeza de la línea (por ejemplo: interruptor automático con reenganche rápido o interruptor automático en derivación). Por último el cebado provoca la aparición de una onda cortada de frente abrupto susceptible de dañar los devanados (transformadores y motores) situados en sus proximidades. Aunque, aún montados en las redes, los explosores son hoy día, cada vez más, reemplazados por los pararrayos.

3.8.- Normativas en la coordinación del aislamiento

Después de numerosos años la Comisión Electrotécnica Internacional ha abordado el problema de la coordinación del aislamiento en AT.

Dos documentos generales tratan de la coordinación del aislamiento:

CEI 664 para el dominio de la BT y el CEI 71 para el dominio de la AT. El CEI 71 está organizado en dos partes, la segunda es una guía de aplicación muy completa. Las normas producidas o sea:

CEI 694 (partes comunes para la equipos) y la CEI 76 (transformadores).

Esta determinación favorece la búsqueda de una optimización, o sea una bajada de los niveles de tensión soportada.

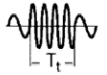
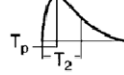
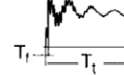
La CEI 71 propone una modelización convencional de las solicitaciones reales por formas de onda realizables en los laboratorios y que han demostrado una equivalencia satisfactoria. Por otra parte, aparecen dos preocupaciones nuevas en esta norma:

El aislamiento longitudinal (entre los bornes de la misma fase de un aparato abierto) toma en cuenta de la altitud así como del fenómeno de envejecimiento de las instalaciones. En este proyecto se distinguen el aislamiento interno, el aislamiento externo y dos gamas de tensiones: el aislamiento interno interesa a todo lo que no está emplazado en el aire atmosférico (aislamiento líquido para los transformadores, SF₆ o vacío para los interruptores automáticos); el aislamiento externo corresponde a distancias en el aire.

Determinación de los niveles de aislamiento.- La norma no indica con precisión tensiones soportadas invariables y válidas en todos los casos, pero permite la realización de estudios de coordinación de aislamiento en varias etapas.

Una vez reunidos estos datos, para cada clase de sobretensión, es necesario determinar la tensión soportada de coordinación correspondiente teniendo en cuenta la garantía buscada y generalmente el porcentaje de fallos

aceptables del aislamiento.

clase de sobretensión	baja frecuencia		transitoria		
	permanente	temporal	de frente lento	de frente rápido	de frente muy rápido
forma					
gama de formas (frecuencia, frente de subida, duración)	$f = 50 \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 < f < 500 \text{ Hz}$ $3 \text{ 600} \geq T_1 \geq 0,03 \text{ s}$	$5 \text{ 000} > T_p > 20 \text{ }\mu\text{s}$ $20 \text{ ms} \geq T_2$	$20 > T_1 > 0,1 \text{ }\mu\text{s}$ $300 \text{ }\mu\text{s} \geq T_2$	$100 > T_f > 3 \text{ ns}$ $0,3 > f_1 > 100 \text{ MHz}$ $30 > f_2 > 300 \text{ kHz}$ $3 \text{ ms} \geq T_1$
forma normalizada	$f = 50 \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ $T_1 (*)$	$48 \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 }\mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 = 50 \text{ }\mu\text{s}$	(*)
ensayo de tensión soportada normali- zada	(*)	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo de choque de maniobra	Ensayo de choque de rayo	(*)
(*) a especificar por el Comité del producto considerado					
Figura N° 3.20.- Forma de sobretensiones representativas y ensayos considerados por el proyecto de la norma CEI 71					

El valor obtenido específico de la red estudiada y de su situación: es la tensión más reducida soportada a la sobretensión considerada que la red debe tener en sus condiciones de explotación. Para escoger los elementos constitutivos de una red deben definirse sus tensiones soportadas especificadas. La determinación de las tensiones soportadas de coordinación consiste en fijar los valores mínimos de la tensión soportada de aislamiento que satisfacen al criterio de garantía, cuando el aislamiento está sometido a las sobretensiones representativas en las condiciones de servicio.

Las modelizaciones pretendidas presentan siempre un carácter hasta cierto punto arbitrario en una primera lectura, pero han sido validadas por la experiencia.

El lector deseoso de profundizar en el tema puede hallar informaciones más detalladas en las publicaciones citadas. Los progresos realizados en el conocimiento de los fenómenos permiten hoy en día conseguir una acrecentada fiabilidad en las instalaciones, autorizando una optimización en el plano económico y en el de los esfuerzos en servicio.

La utilización cada vez más frecuente de pararrayos coadyuva a un mejor dominio del nivel de protección, especialmente por la mejora de sus características y su fiabilidad. La toma en cuenta de este proceso por la normalización voluntaria, tanto a nivel general como a nivel de recomendación, muestra la importancia del tema y las ventajas que se pueden encontrar.

3.9.- Corrientes de transición e inserción en transformadores

Corriente de transición.- Para determinar las características de los límites de funcionamiento del conjunto, la búsqueda de las condiciones más severas posibles lleva a considerar el siguiente funcionamiento (figura 3.20):

- Sometido a una corriente de defecto I_d , el primer fusible que funde está en la zona de tolerancia mínima de la curva tiempo-corriente.
- Los otros dos fusibles están en la tolerancia máxima y quedan sometidos a partir del momento en que corta la primera fase, a una corriente de valor reducido $0,87 I_d$.

La norma CEI 420, que trata de los combinados, propone un cálculo detallado que lleva a la siguiente conclusión: la corriente de transición es la corriente que corresponde a una duración de la fusión sobre la característica mínima igual a:

$$t_{I_t} = \frac{0.87^\alpha t_s}{1.13^\alpha - 1}$$

Donde t_s es el tiempo de apertura del combinado bajo la acción del percutor, y tiene la pendiente de la característica tiempo-corriente del fusible próximo del punto considerado (figura 3.21).

Generalmente, es necesario un cálculo repetitivo, en varios pasos, debido a la variación de la pendiente a lo largo de la característica. Se puede utilizar

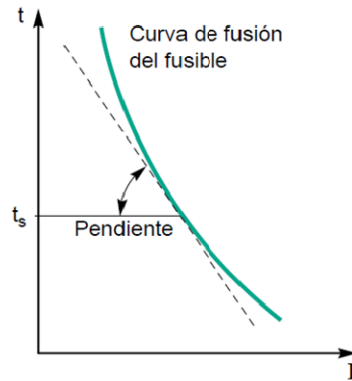


Figura N° 3.20.- Determinación del coeficiente de pendiente de la curva de fusión de un fusible

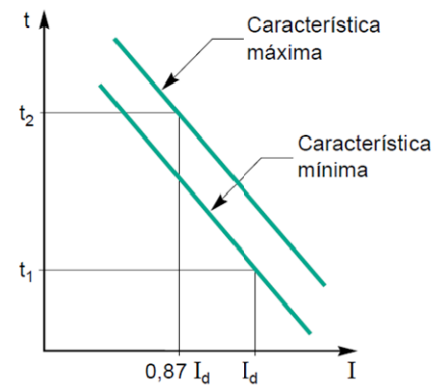


Figura N° 3.21.- Determinación de la corriente de transición

el valor de t_s como valor inicial de t_{It} para una iteración de este tipo (figura 3.21). Los parámetros constructivos de los fusibles pueden variar de un calibre a otro en un mismo tipo de producto. A título de ejemplo, en el tipo FUSARC de MerlinGerin, el coeficiente α varía entre 2,2 y 5,2. La corriente de transición para cualquier fusible utilizado en un combinado debe de ser inferior a la corriente de transición asignada del combinado.

Ejemplo.- Consideremos un combinado interruptor-fusibles equipado con fusibles de 80 A/24 kV, cuyo tiempo de apertura por la acción del percutor es de 60 ms (t_s). Si se han escogido fusibles SIBA, la pendiente obtenida a partir de la característica es de $a = 3,32$; se obtiene así una duración de fusión a la transición igual a: _____, o sea; después de las curvas de fusión $I_t = 850$ A. Si se han escogido fusibles MerlinGerin, se tiene $\alpha = 3,34$ que es similar. La curva de transición se obtiene después de las curvas de fusión, $I_t = 800$ A. Por tanto, estos dos fusibles utilizados en el combinado RM6 tienen funcionamientos equivalentes.

Consideremos ahora el mismo conjunto, pero con fusibles 125 A/12 kV. En el caso de fusibles SIBA, las curvas nos dan un coeficiente $\alpha = 3,1$, o sea, un tiempo de fusión a la corriente de transición igual a 85 ms. La corriente de transición es entonces de 1300 A. Si se utilizan fusibles MerlinGerin, las

curvas dan $\alpha = 2,65$, o sea, un tiempo de fusión igual a 108 ms. La corriente de transición entonces no es mayor de 870 A. En este caso, la elección de los fusibles influye mucho en la sollicitación del interruptor del combinado, incluso si estos dos valores pudieran ser aceptables.

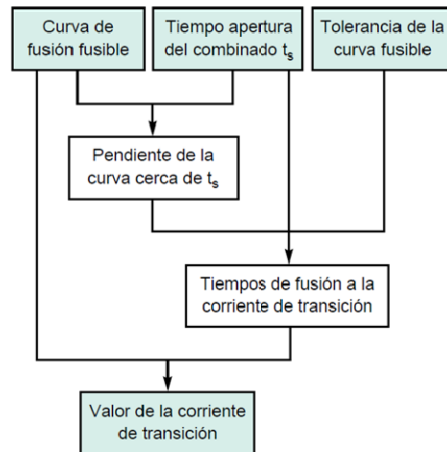


Figura N° 3.21.- Principio de establecimiento de la corriente de transición

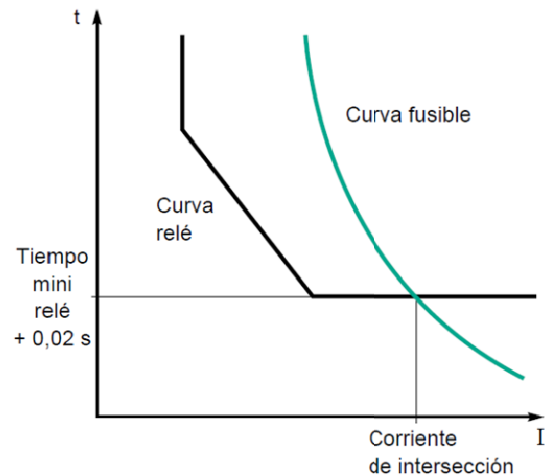


Figura N° 3.22.- Determinación del punto de intersección

Corriente de inserción.- La corriente de inserción de un combinado (designada por I_5) es la corriente de intersección máxima admisible. El constructor de los equipos proporciona el tiempo de apertura t_d del interruptor bajo la acción del relé de disparo. Hay que asegurarse de que todos los fusibles utilizados en el combinado respeten la corriente de inserción asignada (figura 3.22). En el peor caso un fusible se caracteriza de la siguiente manera:

- **Funcionamiento «instantáneo» del relé externo:** la norma propone utilizar un tiempo de reacción de 20 ms para este funcionamiento instantáneo. El tiempo de apertura resultante es entonces el tiempo de apertura del combinado bajo la acción del relé de disparo (t_d), aumentado en 20 ms.
- **Fusible frío y al mínimo de su tolerancia:** (la norma considera que la tolerancia para las curvas de fusión es de $\pm 10\%$ sobre la corriente, permitiendo utilizar un valor de dos márgenes típicos, o sea $\pm 6,5\%$).

La corriente de inserción indica sobre la característica tiempo-corriente en las condiciones antes expresadas, una duración de la fusión de $t_d + 0,02$ s. Desde hace largo tiempo el ATP nos ofrece la posibilidad de estudiar los fenómenos relacionados con las corrientes de vacío, inserción, y otros efectos que se presentan en los transformadores; la dificultad se encuentra en obtener los datos representativos. Si estos se obtienen de ensayos válidos o se logran estimar correctamente, armar el modelo para ATP es inmediato; el ATPDraw ha facilitado aún más este acercamiento permitiendo llegar a aplicaciones didácticas también en los cursos de grado. La dificultad se mantiene en lograr una buena representatividad de datos, de las máquinas que se quieren investigar frente a un fenómeno que el ATP resuelve eficientemente.

3.10.- Aplicación del ATPDraw

El informe que el programa desarrolla incluye gran cantidad de datos dimensionales y parámetros que se van determinando paso a paso, y volcándose en el largo informe de cálculo, pensando en la aplicación didáctica creímos conveniente determinar todos los valores para generar el modelo de transformador como ATPDraw requiere. Hasta ahora nunca nos fue fácil obtener del fabricante del transformador los datos que ATP necesita, es más sorprende constatar que algunos proyectistas desconocen la herramienta, que les permitiría avanzar y ayudar a quien quiere profundizar el comportamiento del transformador en la instalación.

La idea de agregar un módulo al programa TRADIM, que preparara datos para ATP parecía entonces la más adecuada; se amplía así la posibilidad que el programa brinda, no sólo al alumno que se interesa de la construcción de las máquinas eléctricas, sino también satisface a quien quiere ponerlas a prueba dentro de un proyecto.

Presentación de resultados de la corriente de vacío

Los ejemplos que siguen en los que se hacen estos análisis, se han desarrollado con el programa ATP (Alternative Transients Program, GNU Linux o DOS). All rights reserved by Ç Can/Am user group of Portland, Oregon, USA.

Observaremos primero la corriente magnetizante en régimen permanente de un transformador trifásico de 315 kVA, considerando distintos casos de conexión en alta tensión y en bajatensión, Y o D, con y sin el neutro a tierra, y situaciones con flujos vinculados (transformador trifásico de tres columnas), o no vinculados (núcleo acorazado o tres transformadores monofásicos).

TABLA III	Arr. 1	Neutro	Arr. 2	Flujos	Lotes datos	Figura
1	YN	Tierra	Y	No vinculados	In3yyp.adp	3
2	Y	Aislado	Y	No vinculados	In3yyq.adp	5
3	YN	Tierra	Y	Vinculados	In3yyr.adp	7
4	Y	Aislado	Y	Vinculados	In3yys.adp	9
5	YN	Tierra	D	No vinculados	In3ydp.adp	11
6	Y	Aislado	D	No vinculados	In3ydq.adp	12
7	YN	Tierra	D	Vinculados	In3ydr.adp	13
8	Y	Aislado	D	Vinculados	In3yds.adp	14
9	D	Aislado	Y	No vinculados	In3dyp.adp	15
10	D	Aislado	Y	Vinculados	In3dyr.adp	
11	D	Aislado	D	No vinculados	In3ddq.adp	
12	D	Aislado	D	Vinculados	In3dds.adp	

Figura Nº 3.23.- Conexionado de los primarios y secundarios

Las formas de la onda de corriente magnetizante son distintas según el caso que se analice, comenzaremos de las formas más simples de explicar, para llegar a los casos más complicados.

Para que las corrientes magnetizantes de las columnas sean las mismas, las tensiones aplicadas a las columnas se han hecho iguales en todos los transformadores; es decir, aquellos con arrollamiento en Y se alimentan con $13.2 \sqrt{3}$ kv y los que tienen arrollamiento en D con 13.2 kV, con corrientes nominales respectivamente de 7.95 A (para Y) y 13.78 A (para D), en ambos casos la misma corriente en la columna.

Se desarrollan los siguientes casos:

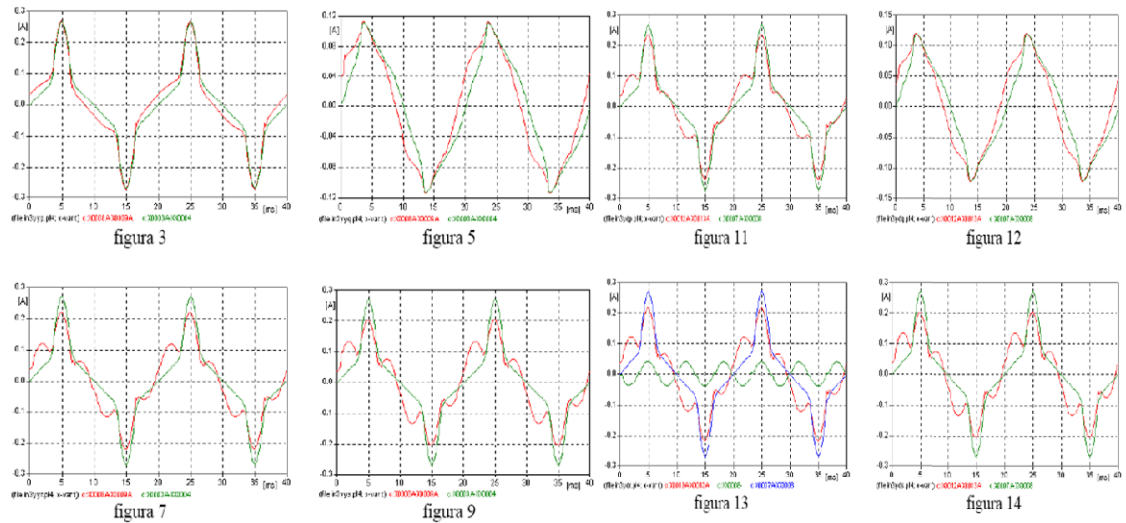


Figura N° 3.24.- Corrientes de inserción para diversos tipos de conexión en transformador de 315 KVA

A continuación haremos la explicación resumida de cada una de las figuras:

Caso 3.- La corriente de neutro muestra sólo (prácticamente) tercera armónica (homopolar).

Caso 5.- Se nota similitud con los casos en que los flujos están vinculados, en efecto el arrollamiento D cumple esa función.

Caso 7.- La corriente de neutro muestra solo(prácticamente) tercera armónica.

Caso 9.- En la corriente de vacío se observan dos picos, que se justifican por la conexión D del arrollamiento que presenta dos ramas del transformador en cada línea, observándose sucesivamente el pico que corresponde a una rama, y el de la otra. Esta forma de la corriente es muy distinta de las que se han obtenido con conexiones Y, que mostraban sólo un pico, eventualmente con dos pequeños picos laterales.

Casos 11 y 12.- Estos dos últimos casos presentan una corriente igual a la del caso anterior, es decir con lado excitación conectado en D, la corriente de vacío es independiente de la vinculación de flujos, al menos con la magnitud de los parámetros con que se trabaja, y de la conexión de los

secundarios y o d.

Desarrollaremos en forma sistemática las inserciones de los distintos casos y que antes fueron analizados en su corriente de vacío.

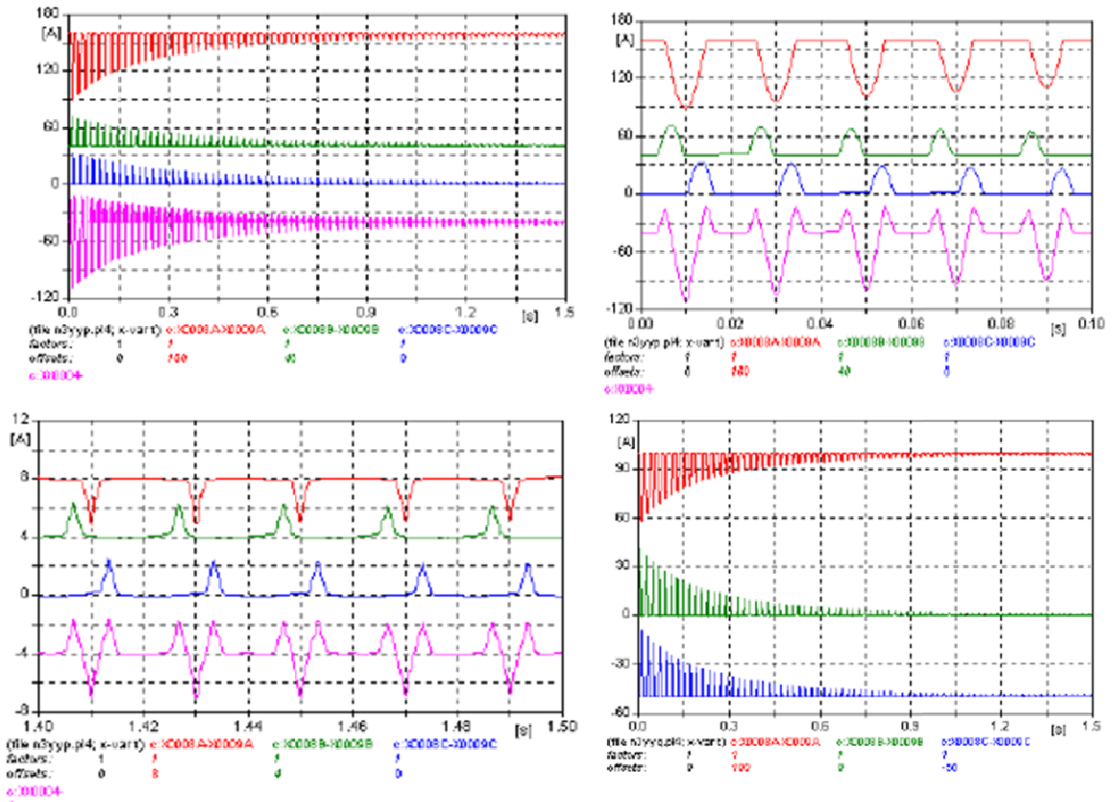


Figura N° 3.25.- corrientes de inserción en transformador de 35 Kva.

Del estudio realizado se observa la ventaja de poder obtener por medio de los cálculos de dimensionamiento del transformador (TRADIM), los datos que ATP requiere, y no siempre disponibles a través de los protocolos de ensayo.

Con estos se puede preparar el modelo adecuado y realizar con el ATP el cálculo de las corrientes de vacío y de inserción teniendo en cuenta los distintos tipos de conexión, (pudiendo comparar estos resultados con los obtenidos mediante cálculos, más simples, independientes del tipo de conexión), el modelo puede incorporarse a configuraciones de red más complicadas donde influyen otros elementos.

Para distintos casos de conexión y para flujos vinculados o no vinculados, se observan las diferentes magnitudes y formas de la corriente magnetizante. Sin tener en cuenta la magnetización residual del núcleo, para la inserción, se observa la influencia que tiene el tipo de conexión en la corriente de pico, el pasaje de la tensión por el valor máximo, la incidencia de que el transformador esté en vacío o con carga inductiva en la duración del transitorio, etc. Con esta metodología, quien utiliza los transformadores podrá comprobar cómo se comportan en su instalación, además conocer parámetros que habitualmente (todavía) no suministra quien los construye; también brinda a quien tiene la responsabilidad de realizar el proyecto de las protecciones, información que permite una mejor utilización y ajuste de las mismas.