

**APLICACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE TRANSITORIOS
ELECTROMAGNÉTICOS A LA ESPECIFICACIÓN
DE EQUIPOS**

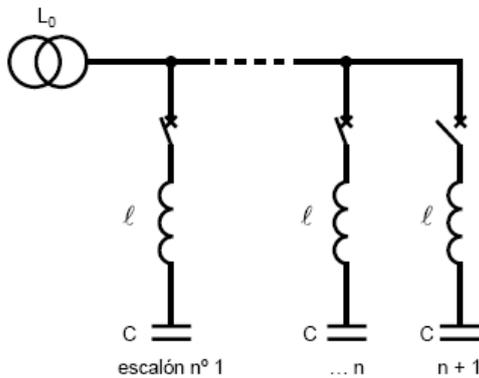
PARTE 3

MANIOBRA DE CONDENSADORES

INTRODUCCIÓN

Una de las aplicaciones típicas de los estudios de transitorios electromagnéticos es el dimensionado y verificación de equipos para soportar adecuadamente las maniobras de bancos de condensadores en Estaciones de Trasmisión o Distribución.

Los bancos de condensadores se instalan normalmente en escalones (“pasos”), dimensionados para evitar someter al sistema a saltos de tensión excesivos toda vez que se conectan o desconectan:



La maniobra se hace típicamente con disyuntores expresamente diseñados para tal fin. Cada banco de condensadores suele estar equipado con una inductancia en serie con el capacitor (el llamado “reactor de choque”), a efectos de controlar adecuadamente la corriente de energización de cada banco.

Los estudios de transitorios electromagnéticos principales involucrados en el diseño de este tipo de instalaciones son los siguientes:

- Energización del primer paso.
- Energización “back to back”
- Cortocircuitos cercanos
- Apertura del banco

MODELO DEL SISTEMA

Los modelos del sistema que se usan habitualmente son los modelos típicos para estudio de sobretensiones de maniobra.

Se modelan los principales elementos del sistema cercanos al banco (transformadores, cables, líneas), en tanto que los elementos más lejanos (típicamente: 2 barras atrás del banco de condensadores) se representan con equivalentes Thévenin.

Si bien (dada la frecuencia de los fenómenos involucrados) no es necesario incluir un modelo preciso de las conexiones internas al banco, se suele representar al menos la inductancia de estas conexiones con modelos de parámetros concentrados.

Esto se debe a que los reactores de choque suelen tener valores de inductancia del orden de algunas decenas de μH , por lo que la inductancia propia de las conexiones (con valor típico del orden de $1\mu\text{H}/\text{m}$) puede influir en el diseño.

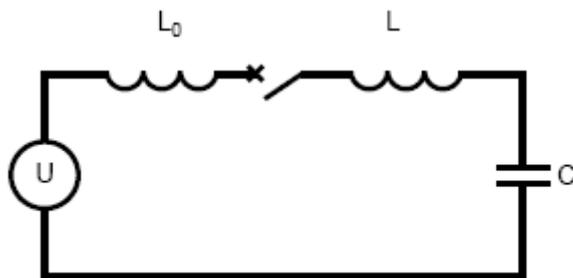
Los bancos propiamente dichos se modelan con elementos de parámetros concentrados.

Comentario

En algunos casos especiales (p.ej: cuando los capacitores forman parte de filtros de armónicas de diseño especial, en que aparecen reactores serie de inductancia mucho mayor que los reactores de choque) los cortocircuitos cercanos provocan sobretensiones internas de frentes muy rápidos. En estos estudios especiales los modelos a adoptar son más bien los típicos de estudios de sobretensiones de rayo: no es necesario modelar más que los elementos de la red bien cercanos al banco, y es necesario modelar con precisión las conexiones internas del banco.

ENERGIZACION DEL PRIMER PASO

La maniobra de energización del primer paso se puede esquematizar mediante el siguiente circuito simplificado:



Normalmente $L \ll L_0$, por lo que a efectos de un cálculo simplificado se puede despreciar el reactor de choque L.

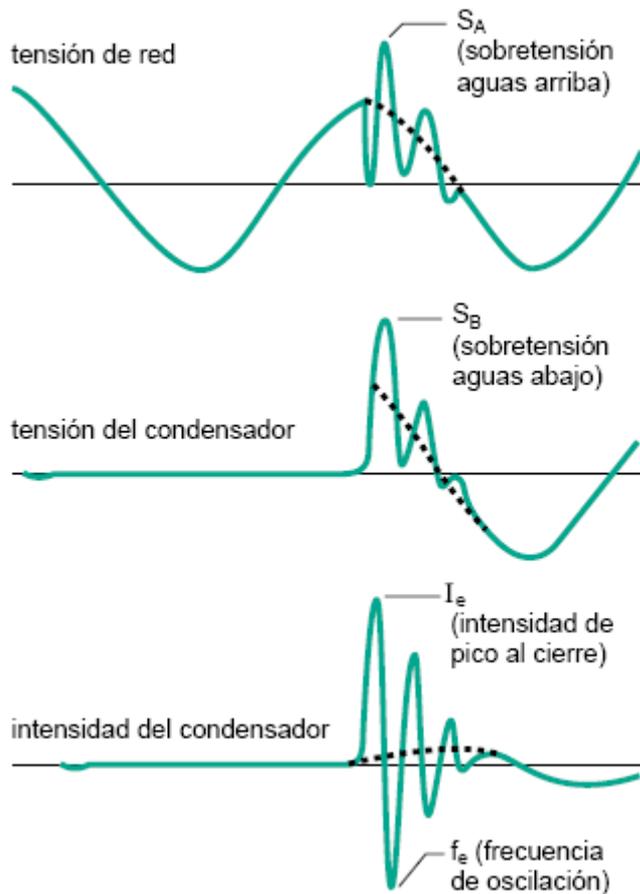
Los bancos de condensadores se deben energizar estando prácticamente descargados.

Las Normas IEC, por ejemplo, establecen que para garantizar el diseño de los capacitores es necesario que nunca se energicen con una tensión “atrapada” superior al 10 % de la nominal del capacitor.

Normalmente los capacitores tienen incorporadas resistencias internas que permiten asegurar la descarga del banco en intervalos del orden de los 5 a 10 minutos.

Si asumimos que el capacitor está inicialmente totalmente descargado, el cierre del disyuntor impone un cortocircuito al sistema, dado que la tensión inicial en bornes del capacitor debe ser igual antes e inmediatamente después de la maniobra.

En los instantes posteriores, la tensión del capacitor tiende a igualarse con la de la red, produciéndose en el proceso un “overshoot” de tensión en el punto de conexión.



Resolviendo en el instante inicial el circuito descrito, se obtiene que la correspondiente corriente de “inrush” tiene un valor de pico que vale:

$$I_e = U (2/3.C/L_0)^{1/2} \text{ con una frecuencia } f_e = 1/(2\pi (L_0C)^{1/2})$$

Una expresión alternativa útil del valor de pico de la corriente de energización es:

$$I_e = I_C \sqrt{2} (S_{cc}/Q)^{1/2}, \text{ siendo } I_C \text{ la corriente nominal del banco, } Q \text{ la potencia nominal del banco, y } S_{cc} \text{ la potencia de cortocircuito de la red en el punto de conexión}$$

Si se desprecian las amortiguaciones, el “overshoot” de tensión teórico es igual al valor de pico de la tensión de fuente.

En la figura de más arriba: $S_A = S_B = 2$ p.u de la tensión de pico de fuente.

La corriente de “inrush” es, como veremos más adelante, un parámetro de diseño para el disyuntor y para el propio banco de condensadores cuando el banco incluye un sólo paso.

Cuando el banco es de múltiples pasos, las energizaciones “back to back” que describiremos a continuación suelen ser más exigentes desde el punto de vista de la corriente de energización.

Las sobretensión de energización del banco aislado es un parámetro de diseño de toda la instalación, dado que los equipos deben ser diseñados para soportar esa sobretensión de maniobra.

Normalmente las sobretensiones se calculan en las simulaciones suponiendo sobretensiones de fuente muy altas al momento del cierre. Un escenario de diseño típico es suponer una falta fase-tierra preexistente al momento de la energización.

ENERGIZACION “BACK TO BACK”

El caso crítico a considerar es la energización del último paso en un banco de múltiples pasos.

Al igual que en el caso de energización de un banco aislado, las condiciones de continuidad de tensión en el banco que se energiza imponen en el primer instante un cortocircuito en la red.

Ahora no sólo la red externa aporta corriente de cortocircuito a la corriente de energización, sino que también los bancos ya energizados descargan inicialmente sobre el cortocircuito.

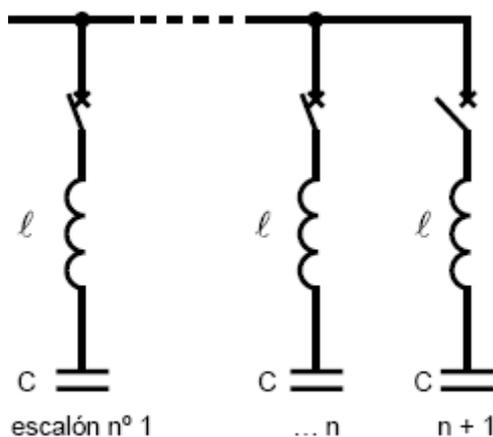
Es de esperar, por lo tanto, que la corriente de “inrush” generada sea superior a la obtenida en el caso de energización de un banco aislado.

Por el contrario, dada la presencia de los capacitores energizados que tienden a “aguantar” la tensión de la red, es de esperar que las sobretensiones de energizaciones sean menores a las del caso de banco aislado.

El fenómeno se puede analizar simplifcadamente considerando exclusivamente la influencia de los pasos conectados, sin considerar la red externa.

Esta simplificación se basa en que (como veremos a continuación) la frecuencia de la corriente de descarga de los pasos cargados es habitualmente mucho mayor que la frecuencia de la corriente de cortocircuito que aporta la red, por lo que los picos de ambos aportes de corriente nunca se superponen.

El circuito simplificado a analizar al energizar el paso “n+1” es:

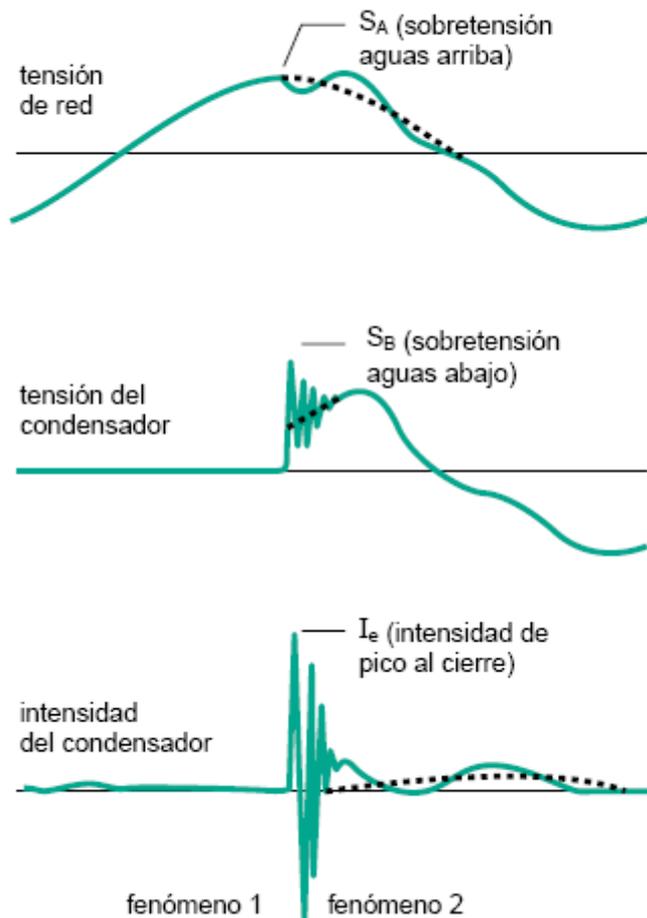


Resolviendo este circuito en el instante inicial resulta:

$$I_e = U (2/3.C/ \ell)^{1/2} . n / (n+1) \quad f_e = 1/(2\pi (\ell C)^{1/2})$$

Como se mencionó más arriba, es inmediato que $f_e \gg 1/ (2\pi (L_0C)^{1/2})$, dado que habitualmente $L_0 \gg \ell$

Un andamio típico de las tensiones y corrientes de energización es el siguiente:



En la gráfica de corriente se identifica como “fenómeno 1” la descarga de los pasos cargados sobre el paso que se energiza, y como “fenómeno 2” el aporte de corriente de cortocircuito de la red.

Obviamente, la separación en el tiempo de ambos fenómenos ya no es tan cierta para valores relativamente altos de la inductancia del reactor de choque y de la potencia de cortocircuito en el punto de conexión.

Como ya se ha dicho, la corriente de energización “back to back” es un parámetro de diseño para los disyuntores y los propios bancos de condensadores.

La comparación de las corrientes transitorias obtenidas en estos estudios con las corrientes soportadas por los equipos impone, asimismo, criterios adicionales para seleccionar el valor adecuado de inductancia para el reactor de choque,

CORTOCIRCUITOS CERCANOS

En caso de producirse cortocircuitos cercanos al banco, se produce la descarga de todos los pasos sobre la falta.

Las corrientes producidas (corrientes de “outrush”) tienen un comportamiento cualitativo similar al de las corrientes de energización “back to back” descritas anteriormente.

El cálculo de estas corrientes de “outrush” permite verificar el impacto de los bancos de capacitores sobre otras instalaciones que comparten la misma barra.

Por ejemplo: si existe una línea de Distribución conectada a la misma barra que el banco de capacitores, toda vez que se produzca una falta cercana en esa línea circulará por sus equipos de maniobra una corriente de “outrush” superpuesta a la corriente de falta, por lo que es necesario verificar que los equipos la soportan.

Estos estudios, asimismo, permiten verificar el diseño de los propios equipos de maniobra de cada paso.

A esos efectos, es necesario simular faltas en puntos seleccionados de uno de los pasos, con todos los demás en servicio.

Por ejemplo:

-el peor caso de corriente transitoria para el disyuntor del paso suele encontrarse simulando una falta en bornes del disyuntor

-el peor caso de corriente transitoria por el reactor de choque suele encontrarse simulando una falta en bornes del reactor de choque.

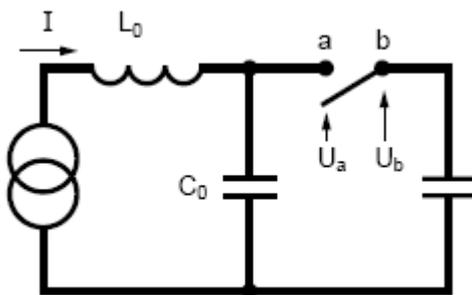
La comparación de las corrientes transitorias obtenidas en estos estudios con las corrientes soportadas por los equipos permite, asimismo, seleccionar el valor adecuado de inductancia para el reactor de choque,

APERTURA DEL PASO

La desconexión de condensadores es una maniobra exigente para el propio disyuntor, de ahí que los disyuntores de maniobra de capacitores deben ser especificados explícitamente para poder realizar esta maniobra.

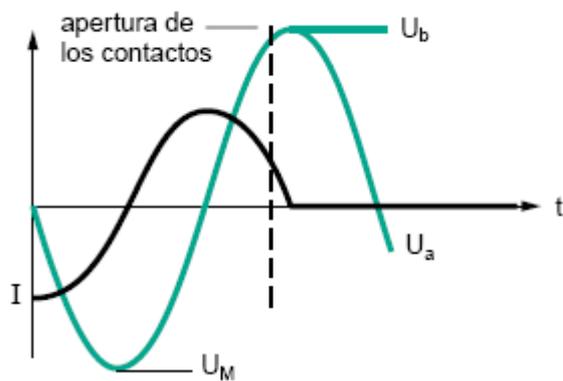
Esta maniobra ya fue descrita en el Capítulo en que se analizó la TTR de disyuntores, y sus principales características se repiten a continuación:

Las exigencias a las cuáles queda sometido el disyuntor durante la maniobra pueden describirse cualitativamente así:

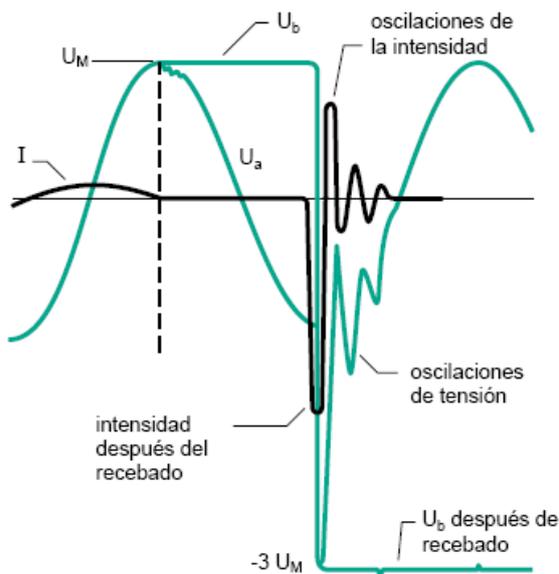
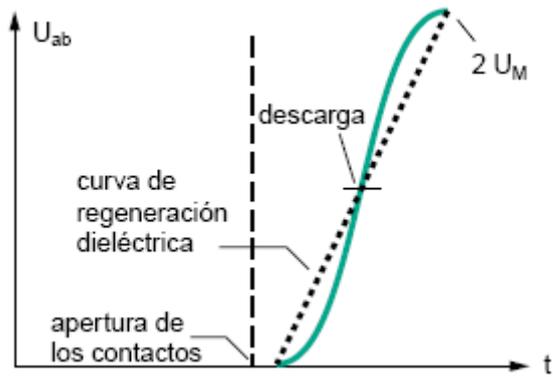


Cuando el disyuntor abre, en el capacitor queda “atrapada” en los primeros instantes una tensión constante igual al valor de la tensión antes de la apertura U_b . Dado que, como sabemos, los disyuntores cortan idealmente la corriente cuando ésta pasa por cero, se deduce que $U_b \approx$ Valor de pico de la tensión de la fuente; dado que si la carga es puramente capacitiva el cero de corriente se da al máximo de tensión.

Medio ciclo después la tensión de la fuente toma su máximo de polaridad opuesta, sometiendo al disyuntor a una tensión entre bornes (Tensión transitoria de restablecimiento, “TRT”) del orden del doble de la tensión de preapertura.



La velocidad de recuperación del dieléctrico entre contactos abiertos debe ser lo suficientemente alta, por lo tanto, como para evitar que en ese instante se produzca un recibado. Este eventual recibado sometería al resto de la Estación y al propio banco a sobretensiones y sobrecorrientes de muy alto valor:



La maniobra se suele simular en condiciones muy exigentes de alta tensión de fuente antes de la apertura.

Un escenario típico es, por ejemplo, simular la desconexión durante un evento de rechazo de carga en la barra en que está conectada el banco, o mientras ocurre una falta fase-tierra en el sistema.

CARACTERÍSTICAS DE LAS SIMULACIONES

Las maniobras de energización se suelen simular en forma estadística (100 energizaciones en distintos puntos de la onda de tensión, p.ej) , a efectos de detectar las peores casos.

Análogamente, también se suele hacer un “barrido” de la onda de tensión en los estudios de cortocircuitos cercanos. En este caso, suele ser suficiente con recorrer en un estudio sistemático (a intervalos iguales) unos 20 puntos en un ciclo de tensión.

APLICACIÓN DE LOS ESTUDIOS A LA ESPECIFICACIÓN DE EQUIPOS

Los estudios descritos permiten definir o verificar diferentes características de los equipos de maniobra involucrados:

1) Nivel de aislación de los equipos de estación

El nivel de aislación a las sobretensiones de maniobra (BSL) de la estación se debe comparar contra las sobretensiones obtenidas en el estudio de energización de primer paso del banco.

Dado que habitualmente las Normas definen un BSL sólo para las instalaciones de EAT (300 kV o más), para instalaciones de tensión más baja se debe comparar el resultado obtenido con el valor de pico del nivel de aislación a frecuencia industrial , o con el nivel de aislación de impulso de rayo, corregidos de acuerdo a lo indicado en la Norma IEC 60071-2.

2) Disyuntor de cada paso del banco

-El valor de pico de la TTR obtenida en el estudio de apertura se compara contra el especificado por las Normas IEC. (Ver Norma IEC 62271-100).

-El valor de pico y la frecuencia de la corriente de “inrush” obtenidos en los estudios de energización se comparan contra los especificados por las Normas IEC. (Ver Norma IEC 62271-100).

Lo habitual es que la energización “back to back” proporcione el mayor valor de pico. A los efectos de la comparación con los valores IEC se suele tomar la mayor corriente y la mayor frecuencia, aunque ambas no correspondan al mismo tipo de maniobra.

-El valor de pico de la corriente de “outrush” obtenida de los estudios de cortocircuitos cercanos se compara contra el poder de cierre del disyuntor especificado por las Normas IEC. (Ver Norma IEC 62271-100).

Comentario

Se observa que , a los efectos de la especificación, se hace un tratamiento distinto del valor de corriente de “outrush” respecto al de la corriente de “inrush”.

La diferencia se explica porque se asume que la corriente de “inrush” se dará en forma frecuente (los bancos de condensadores pueden maniobrase varias veces al día), en tanto que la de “outrush” (originada por un cortocircuito) no.

Los valores de corriente de “inrush” especificados por las Normas IEC están pensados no sólo para ser soportados propiamente por el disyuntor desde el punto de vista térmico y mecánico, sino también para contemplar el desgaste de los contactos del disyuntor frente a una maniobra frecuente.

3)Otros disyuntores de la estación

-El valor de pico de la corriente de “outrush” obtenida de los estudios de cortocircuitos cercanos se compara contra el poder de cierre del disyuntor especificado por las Normas IEC. (Ver Norma IEC 62271-100).

Comentario

La corriente de “outrush” no se tiene en cuenta para otros equipos de estación (seccionadores, transformadores de corriente) para los que habitualmente se especifica una corriente nominal de cortocircuito.

Esto se debe a que se entiende que una corriente de tan poca duración no afecta el diseño de estos equipos.

4)Condensadores

-El valor de pico de la corriente de “inrush” obtenido en el estudio de energización “back to back” se compara contra 100 veces la corriente nominal del condensador, de acuerdo a lo especificado por las Normas IEC. (Ver Norma IEC 60871-1).

-El valor de pico de la corriente de “outrush” obtenida de los estudios de cortocircuitos cercanos se compara contra valores especificados por las Normas IEEE (Ver Norma IEEE-1036).

Comentarios

-Al igual que lo comentado para los disyuntores de los pasos, los valores límites distintos de corrientes de “inrush” y “outrush” se explican por la distinta frecuencia con la que se da una energización rutinaria y un cortocircuito.

-Si se desea aplicar los valores límites de corriente de “outrush” especificados por las Normas IEEE, se debe asegurarse previamente que el condensador (aparte de estar diseñado según Normas IEC) también respeta las especificaciones de las Normas IEEE.

5)Reactores de choque

-La inductancia del reactor de choque se selecciona para que los valores de pico de las corrientes de “inrush” y “outrush” sea el adecuado en relación a los valores límite ya descritos para disyuntores y condensadores.

-La corriente transitoria nominal del reactor y su frecuencia asociada (corriente nominal de “inrush” según Norma IEC 60076-6) se elige en función de la corriente de “outrush” (valor de pico y frecuencia) máxima obtenida en los estudios de cortocircuitos cercanos.

6)Otros equipos

-Es posible simular un reencendido durante la maniobra de apertura y verificar si los equipos de la estación tienen un BIL adecuado para soportarlo.

En caso que se desee hacer esta simulación, se debe recordar que (dadas las altas frecuencias que aparecen durante el reencendido) el modelado de los componentes del sistema debe ser el adecuado para un estudio de sobretensiones de rayo.

Si el disyuntor está especificado adecuadamente, esta situación sólo podría darse en circunstancias excepcionales (p.ej: una fase que no abre (polo “preso”) si la red es de neutro no rígido a tierra), y aun así lo habitual es que el BIL de los equipos sea suficiente para soportarlo.

-Cuando aparecen corrientes de “outrush” por los transformadores de corriente, los equipos conectados a sus secundarios pueden quedar sometidos a sobretensiones importantes.

Esto se da exclusivamente en aquellos equipos secundarios (relés, medidores) que presentan altas cargas secundarias y con factor de potencia muy bajo; situación que no suele darse en los equipos secundarios modernos.

En efecto: la tensión en un equipo secundario que puede modelarse por una inductancia L vale $V=L\omega I_s$, en que I_s es la corriente secundaria y ω la frecuencia de la corriente de “outrush”, que suele ser del orden de algunos kHz. La sobretensión se da, por lo tanto, a causa de altos valores de L , I_s y/o ω .

Se hace notar al respecto que (a diferencia de lo que ocurre con las corrientes de cortocircuito habituales) los núcleos de los transformadores de corriente no saturan frente a estas altas frecuencias, por lo que la corriente I_s es proporcional a la corriente de “outrush” primaria.

Este tipo de estudios requieren un modelado muy preciso de los transformadores de corriente. En caso de detectarse que se podrían violar los niveles de aislación de los equipos secundarios, se recomienda instalar descargadores en el devanado secundario para controlar la sobretensión.