



UNDÉCIMO ENCUENTRO REGIONAL
IBEROAMERICANO DEL CIGRÉ – XI ERIAC

COMITÉ NACIONAL PARAGUAYO DEL CIGRE
22 al 26 de mayo 2005 – Hernandarias – Paraguay

"CONEXIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES EN REDES DE AT. METODOLOGIA DE ESTUDIO.
DISEÑO Y VERIFICACIÓN DEL EQUIPAMIENTO".

Raúl E Bianchi Lastra (*) - María B. Barbieri (*) – Patricia L. Arnera (*)
IITREE- UNLP

Argentina

Resumen -En este trabajo se describe una metodología para la realización de los estudios de transitorios electromagnéticos ante la conexión de compensación capacitiva en derivación con el fin de determinar las solicitaciones sobre instalaciones existentes y verificar el correcto diseño del banco de capacitores. Se contemplan estudios de energización y desenergización de los bancos de compensación, falla cercana a la ET donde se conecta el banco y posible presencia de ferorrresonancia. Se definen el alcance y las metodologías de los estudios necesarios y se presentan los modelos adecuados para cada caso. Se enumeran las normas internacionales que fijan las pautas técnicas en esta materia y se puntualizan los problemas más frecuente o típicos que aparecen en este tipo de estudios.

Palabras clave: Capacitores shunt. Compensación Transitorios electromagnéticos .

1 INTRODUCCIÓN

Los estudios eléctricos de la inserción y desconexión de bancos de capacitores deben abordarse mediante una herramienta apta para simulación de fenómenos electromagnéticos, como por ejemplo el ATP o EMTP.

Los modelos necesarios dependen del fenómeno particular que se quiera analizar. Los datos de la instalación existente deben ser conocidos y las características de los bancos deben corresponder a un diseño eléctrico previo donde se hayan considerado el tipo de banco, cantidad de módulos, MVAR de cada uno, tipo de conexión etc.

El objeto de los estudios es verificar el correcto diseño y reformular algún cambio en la instalación existente así como definir equipamiento de maniobra especial si fuera necesario.

El objetivo de este artículo es brindar un resumen de los principales aspectos considerados.

2 DATOS DE LOS MODELOS DIGITALES NECESARIOS PARA LOS ESTUDIOS

2.1 Banco de capacitores

Para sistemas de AT y MT, en general se adopta una conexión simple estrella con neutro aislado ó a tierra, mientras que en BT es más común la conexión triángulo. En cualquiera de los casos, el banco de capacitores se representa con capacidades concentradas equivalentes por fase, cuyo valor en μF se determina en función de la tensión nominal del banco y sus MVARs nominales. Este dato, si bien parece trivial, es importante de destacar dado que es posible que la tensión nominal del banco no coincida con la tensión nominal del sistema donde se conectará, debido a condiciones especiales de operación de la red.

2.2 Interruptores

El interruptor se representa con un interruptor ideal, con impedancia nula cuando está cerrado, e infinita cuando está abierto. Los estudios de energización o desenergización de bancos de capacitores son en general determinísticos, considerándose el instante de cierre o apertura tal que genera la peor solicitación. En ciertos casos de energización, como cuando quiere determinarse las sobretensiones en puntos remotos, el estudio debe ser estadístico, incluyéndose en las simulaciones la naturaleza aleatoria del instante de cierre de los polos del interruptor. En caso de utilizarse interruptores con sincronización del instante de cierre y/o apertura, los transitorios resultarán menores a aquellos obtenidos con el uso de interruptores convencionales, y este es otro caso donde la simulación de las maniobras requiere de un modelo de interruptor más detallado, que considere también la naturaleza

(*)Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos. FI-UNLP- 48 y 116 (B1900 AMF) La Plata. Argentina. -rbianchi@iitree-unlp.org.ar

aleatoria del instante de cierre de cada polo y de la discrepancia entre los mismos. Otro aspecto de importancia es conocer las características de los interruptores aledaños al banco, principalmente los de línea vinculados a la barra donde se conectará la compensación, ya que pueden verse sometidos a solicitaciones superiores a las del propio banco, sin ser interruptores destinados para tal fin.

2.3 Cables y líneas de transmisión.

Los bancos pueden estar directamente conectados en barras, o vinculados a las mismas mediante cables o líneas. A su vez pueden existir líneas aéreas conectadas a la misma barra que el banco, y en ambos casos es necesario representarlas.

En general las líneas o cables se representan con el modelo de Clarke, con parámetros distribuidos independientes con la frecuencia. Los datos de interés son la resistencia, inductancia y capacidad de secuencia directa y homopolar. Cuando se requiera considerar la variación de los parámetros con la frecuencia, se deben utilizar modelos como el de JMartí del ATP, siendo en este caso los datos necesarios las características geométricas de la línea o cable, y la resistividad del terreno. En general la variación de los parámetros con la frecuencia (efecto pelicular) es sólo significativa para la secuencia homopolar. El efecto en la secuencia directa puede ser despreciado hasta transitorios del orden de 10 kHz.

2.4 Transformadores.

Para los transformadores se utiliza el modelo estándar del ATP (conocido como STC, *Standard Transformer Component*), que lo representa mediante el circuito equivalente. El modelo BCTRAN no se recomienda cuando se esperan transitorios de mediana o alta frecuencia. Los datos de los transformadores que deben conocerse son los nominales y los presentados en los protocolos de ensayos: reactancia de cortocircuito, resistencias, pérdidas, etc. En lo que respecta a la saturación del circuito magnético, sólo será necesario tenerla en cuenta para los estudios de ferromagnetismo. Como en general no se dispone de información de la variación de los parámetros del transformador con la frecuencia, a fin de contemplar el amortiguamiento pueden adoptarse algunas hipótesis, como la variación de la resistencia con el cuadrado de la frecuencia, o con algún exponente diferente, según sea la frecuencia del transitorio.

2.5 Descargadores

Se debe conocer el tipo de descargadores (CSi o OZn) instalados en el sistema en el nivel de tensión donde se instalarán los bancos, la tensión nominal de los mismos y la característica tensión-corriente dada por el fabricante o adoptada de algún catálogo. Para el caso del estudio de sobretensiones de tiempo de frente abrupto debidas, por ejemplo, al reencendido del arco por el interruptor, es importante incluir el modelado de los cables de conexión del descargador, tanto a tierra como con la fase. Esto suele hacerse mediante la conexión en serie con el descargador de una inductancia de valor

igual a $1\mu\text{H}$ por cada metro de longitud del conexionado.

3 SOLICITACIONES ADMISIBLES.

El estudio de los transitorios producidos por la maniobra de bancos de capacitores tiene el objetivo final de verificar que las solicitaciones sobre los diversos elementos de la red involucrados no excedan a la admisible por los mismos, y en caso de que esto suceda, adoptar las medidas correctivas necesarias. En lo que respecta a las sobretensiones, las mismas no deben superar los niveles de aislación a impulso y de maniobra del equipamiento. En cuanto a las sobrecorrientes, a continuación se detallan algunos límites que no deben ser sobrepasados.

3.1 Capacitores:

De acuerdo con la norma IEC [1], en ningún caso el valor *cresta* de la corriente por el capacitor debe ser superior a 100 veces el valor *eficaz* de la corriente nominal del banco. Las normas establecen varios límites para las sobretensiones admisibles, los cuales se resumen en el ítem 8 de este trabajo.

3.2 Interruptor:

Un dato importante a considerar a la hora de diseñar el o los bancos de capacitores, es el de la corriente nominal del interruptor para maniobra de un banco simple, como así también de dos o más en paralelo. En el caso de un banco simple, la norma IEC [2] establece un valor de referencia de 400 A para los ensayos cualquiera sea la tensión nominal del interruptor, mientras que la norma ANSI [3] fija valores de entre 315 y 500 A según la tensión nominal. Esto define un límite en los MVARs que un interruptor puede maniobrar en cada nivel de tensión. En el caso de conexión de dos o más bancos en paralelo (conocida como conexión "Back-to-back"), existen también diferentes valores de referencia para la amplitud y frecuencia de la corriente, como así también para el producto entre ambos valores, según la norma de aplicación (IEC o ANSI). En los interruptores utilizados para la conexión en paralelo de bancos, un dato importante es el producto de la amplitud y frecuencia (I_{xf}) admisible de la corriente en el interruptor. Esto es porque, en el cierre, siempre se produce el arco antes del contacto metálico de los contactos del interruptor (denominado "prearco"). En los interruptores de pequeño volumen de aceite, la presión interna debido a la burbuja producida por el arco es proporcional a la derivada de la corriente (que a su vez es proporcional al producto amplitud-frecuencia), y en caso de ser excesiva, puede producir la explosión de la cámara de interrupción. En los interruptores de SF₆, aire o vacío, dada la compresibilidad del medio extintor el efecto no es tan severo, pero igualmente ven afectada su vida útil, o reducido el periodo de mantenimiento, debido a este fenómeno. Para interruptores específicamente dedicados a la operación de bancos en paralelo ("Back-to-Back"), la Norma ANSI-C37-06-1997 establece un límite para la amplitud y frecuencia de la corriente por el interruptor, según la tensión nominal del mismo. Por

ejemplo para un interruptor de 145 kV, la amplitud y frecuencia máxima admisible de la corriente es de 16 kA y 4250 Hz respectivamente. Esta norma también indica valores límites para el producto de la amplitud y frecuencia (I_{xf}), siendo el mismo de 2×10^7 para interruptores de uso general, y 6.8×10^7 para interruptores dedicados. En este sentido la Norma IEC [2]. sugiere como límites de 20 kA y 4250 Hz para la amplitud y frecuencia respectivamente, independientemente de la tensión nominal del interruptor, aunque explícitamente no indica límites para el producto entre ambas variables. Los resultados de los estudios se deben comparar con estos valores límites indicados por las normas, a fin de determinar la necesidad o no de instalar elementos limitadores adicionales.

3.3 Transformadores de potencia.

Es posible que el banco de capacitores esté instalado en el terciario de un transformador de la ET. En este caso, dado que la maniobra del banco suele hacerse diariamente, la corriente de conexión producirá a lo largo del tiempo repetidos esfuerzos electromecánicos sobre el arrollamiento terciario, y tal vez esto no fué considerado en el diseño del transformador. La capacidad del transformador de soportar estas solicitaciones a lo largo de su vida útil depende fuertemente del tipo constructivo y diseño de cada transformador en particular, y es información difícil de obtener en la práctica.

3.4 Descargadores de OZn.

Un dato de importancia es la capacidad energética de los descargadores de OZn. Si bien el fabricante indica un valor en los folletos técnicos, éste generalmente es válido para corrientes de poca amplitud y larga duración. La capacidad energética es inferior para corrientes de relativa gran amplitud y corta duración, como las causadas por los transitorios generados en la maniobra del banco de capacitores. Esta información no se incluye generalmente en los folletos técnicos del fabricante.

3.5 Cargas en los secundarios de los transformadores de corriente:

De existir cargas inductivas en el secundario de los transformadores de corriente, como relés y elementos de medición, las mismas deben soportar las sobretensiones originadas por la circulación de corrientes de alta frecuencia.

4 TRANSITORIO DEBIDO A LA ENERGIZACIÓN.

La maniobra de energización de los bancos de capacitores produce transitorios de tensión y de corriente. Es de interés determinar la magnitud de las solicitaciones de tensión tanto en la estación donde se energiza el banco, como así también en puntos remotos, debido a los fenómenos de propagación de las ondas de tensión, que pueden ocasionar sobretensiones de consideración en puntos alejados, como por ejemplo en el extremo remoto de una línea abierta o terminada con

un transformador en vacío. Estas sobretensiones pueden ser tanto entre fase y tierra, como entre fases del equipamiento. Es de destacar que, para el equipamiento correspondiente a un nivel de tensión de por ejemplo 132 kV o menor, no existen procedimientos en las normas de ensayo para verificar el nivel de aislación a sobretensiones de maniobras, dado que para este nivel de tensión son más severas las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas. Los transitorios de corriente durante la energización son generalmente de consideración sólo cuando se energizan dos o más bancos en paralelo, pues para la energización del primer banco la corriente resulta suficientemente limitada por la impedancia del sistema. Las solicitaciones son claramente diferentes según se energiza un banco simple, ó dos ó más en paralelo.

4.1 Energización de un banco simple.

Para un banco determinado, la amplitud y frecuencia de la corriente de conexión dependen principalmente de la potencia de cortocircuito en la barra donde se energiza el banco, y pueden ser estimados con las siguientes fórmulas, extraídas de las normas IEC [1]. y [2]. Estas fórmulas son aproximadas y asumen que las tres fases cierran simultáneamente, y que no hay carga previa atrapada en los capacitores.

$$i_c = U_{ef} \times \sqrt{\frac{2C}{3L_{cc}}} \Rightarrow i_c \approx I_n \times \sqrt{\frac{2S}{Q}} \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C \times L_{cc}}} \quad (2)$$

Donde: i_c : Corriente cresta de energización del banco, I_n : Corriente nominal del banco, U_{ef} : Tensión eficaz máxima de línea, L_{cc} : Inductancia equivalente de la red. S : Potencia de cortocircuito en el punto de conexión del banco, C : Capacidad del banco, Q : Potencia nominal del banco, f : Frecuencia de la corriente.

La frecuencia de oscilación en la energización resulta generalmente entre 250 a 900 Hz.

En el caso de energización de un banco simple, la amplitud y frecuencia de la corriente de conexión son normalmente limitadas por la impedancia del sistema, y no representan en general una solicitación de relevancia. Una excepción es cuando el banco se encuentra instalado en el terciario de un transformador, donde deberá analizarse los efectos electrodinámicos de la corriente de conexión en el arrollamiento. En lo que respecta al transitorio de tensión, asumiendo que los capacitores del banco a conectar no tienen carga atrapada, y dado que la tensión en bornes de los mismos no puede variar instantáneamente, al momento de la energización la tensión de la barra caerá abruptamente a cero en el primer instante, e inmediatamente seguirá el proceso de carga de los capacitores desde el sistema mediante una oscilación de baja frecuencia, determinada de acuerdo con (2).

La abrupta caída a cero inicial puede interpretarse como la aplicación de un escalón de tensión de amplitud 1 p.u. que se propagará por las líneas de transmisión conectadas a la barra, reflejándose y refractándose en los puntos de discontinuidad, pudiendo generar

solicitaciones significativas en puntos remotos. Otro aspecto a considerar es la posibilidad de una o más reigniciones de la corriente de *prearco* por el interruptor, dado que las sobretensiones de alta frecuencia producidas en estas circunstancias pueden representar una sollicitación severa para los arrollamientos de los transformadores.

4.1.1 Sobretensiones en puntos remotos.

La energización de un banco simple tiene dos componentes: **una onda de tensión** de tiempo de frente abrupto que se propaga por el sistema, y **una oscilación** de tensión de baja frecuencia (250 a 900 Hz) debido a la carga del capacitor a través de la inductancia del sistema. Un caso particular ocurre cuando el tiempo de viaje en una línea conectada a la barra donde se energiza el banco (con el extremo remoto abierto o con un transformador en vacío), coincide con un cuarto del período de la oscilación de baja frecuencia, situación para la cual, en el extremo de la línea, se sumarán la onda reflejada y la oscilación de baja frecuencia. La longitud de la línea para la cual se da esta situación se denomina 'longitud crítica'.

El análisis en este sentido es suponer la línea en circuito abierto y del lado de la fuente (capacitor) en cortocircuito, entonces la peor situación es cuando se excita la línea con un tren de pulsos cuyo período ($T_1=1/f$) es 4 veces el tiempo de viaje. T_1 es el período del transitorio de energización del banco.

La longitud crítica de la línea es tal que:

$$\frac{T_1}{4} = \frac{1}{4f} = \tau \Rightarrow l_c = \tau \cdot v$$

donde: v : Velocidad de propagación [km/s], l_c : Longitud crítica en [km], τ : Tiempo de viaje de la línea [s].

Como la frecuencia de oscilación en la energización es entre 250 a 900 Hz, y considerando la velocidad de propagación del orden de 300000 km/s, las longitudes críticas de las líneas estarán entre 300 km y 83 km respectivamente.

La condición más severa es cuando la línea tiene el extremo abierto o con transformador en vacío, dado que en dicho punto la onda duplicará aproximadamente su magnitud. Con la superposición del tren de pulsos la tensión puede llegar a valores del orden de 4 veces p.u. [4].

En estas circunstancias, la energización del banco de compensación puede originar sobretensiones en el extremo remoto de la línea, mayores que cuando se energiza la línea misma. A fin de analizar la influencia de la conexión del banco, en las sobretensiones producidas en el extremo remoto de la línea, se propone la simulación de los siguientes dos casos comparativos: a) Energización de la línea (de longitud crítica), sin los bancos energizados. b) Energización del banco de capacitores, estando la línea de longitud crítica ya energizada y con su extremo remoto abierto. Las sobretensiones resultantes serán sensiblemente dependientes de los instantes de cierre con respecto a la onda de tensión y de la discrepancia entre polos y esto debe ser considerado en los estudios, siendo necesaria la

simulación de muchas energizaciones variándose estos parámetros en forma aleatoria, y evaluándose los resultados en forma estadística.

Se deberán considerar además los descargadores (de CSi u OZn) en el extremo remoto. Estos generalmente pondrán un límite a la sobretensión fase-tierra, pero pueden no ser efectivos para la sobretensión entre fases originada por la conexión del banco. Los resultados de ambas simulaciones se compararán para obtener alguna conclusión que indique situaciones más críticas que las energizaciones habituales de la línea. Es importante destacar que la energización de los bancos suele ser de frecuencia diaria, situación que suele no darse en la energización de líneas.

4.1.2 Magnificación de la tensión.

Con el incremento de la utilización de bancos de compensación en los sistemas de transmisión, distribución e industriales, ha tomado vigencia el fenómeno denominado de 'Magnificación de la tensión' cuyas consecuencias pueden ser fallas en las instalaciones del consumidor industrial, como así también problemas en dispositivos electrónicos de control industrial. La particularidad de éste fenómeno es que causa y efecto pueden encontrarse 'geográficamente' muy distantes. Es decir, debido a la maniobra del banco de capacitores que se realiza en las instalaciones del distribuidor, se produce una falla en una planta industrial que puede estar distante del banco energizado. La Fig. 1 muestra un circuito simplificado de la red, que permite la descripción del fenómeno. Se pueden distinguir en dicha figura dos lazos de oscilación, aunque en la práctica pueden existir más, con el consecuente aumento de la complejidad del problema. El lazo primario está formado por la inductancia del sistema y del transformador de Alta/Media tensión y la capacidad del banco a energizar (L_1 y C_1 respectivamente). El lazo secundario se forma con las inductancias de cables y del o los transformadores de Media/Baja tensión y sus bancos de compensación (L_2 y C_2 respectivamente). Es posible que la industria tenga varios módulos de compensación (más de 10), con lo cual C_2 puede variar en un amplio margen. El transitorio de conexión del banco de capacitores excita los modos de oscilación natural tanto del lazo primario como del secundario. Si las frecuencias de oscilación de ambos lazos (f_1 y f_2) están próximas entre sí, se produce un efecto de sintonía que resulta en sobretensiones en barras donde está instalado el capacitor C_2 . Estas sobretensiones pueden ser superiores del lado de baja que el de alta tensión, dando origen al término '*Magnificación de la tensión*'.

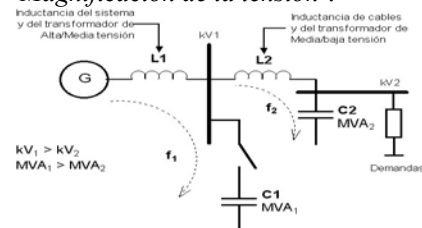


Fig. 1. Magnificación de la tensión.

La frecuencia del lazo primario (f_1), varía con la cantidad de transformadores en paralelo en la estación, y en menor medida con la potencia de cortocircuito en alta tensión. La correspondiente al lazo secundario (f_2) dependerá de la cantidad de módulos de compensación que estén en servicio, al momento de energización de C1. Los peores transitorios debido a la magnificación de la tensión, ocurren cuando se dan las siguientes condiciones:

El **tamaño del banco** de capacitores maniobrado debe ser significativamente mayor (>10 veces) que el instalado en el nivel de baja tensión. **Las frecuencias f_1 y f_2** deben ser similares y debe existir un **escaso amortiguamiento** en la red de baja tensión.

Sobretensiones de hasta 4 pu son posibles, dentro de un amplio margen de tamaño de capacitores. Si bien los circuitos de baja tensión soportan proporcionalmente altas sobretensiones (los circuitos de 380 V son probados a 1000 V), pueden existir equipos electrónicos sensibles y/o con dispositivos de protección no lineales (similares a los descargadores de Ozon) que pueden ver sobrepasada su capacidad energética.

4.2 Energización de bancos en paralelo

Las sobretensiones en barra, que se producen por la conexión de un banco en paralelo con otros ya energizados, son menores que las originadas por la energización del primer banco. Las sobretensiones en puntos remotos también serán por lo tanto menores.

El aspecto más importante a considerar en esta maniobra es el relacionado con las sobrecorrientes que se originan entre ambos bancos, ya que el transitorio de descarga del o los bancos en servicio sobre el que se ha conectado, sólo queda limitado por la inductancia entre ambos circuitos.

Si la inductancia es la conformada solamente por las inductancias parásitas de los cables de conexión, barras, etc., se pueden producir elevadas sobrecorrientes y posibles daños al equipamiento.

La simulación de la conexión de los bancos en paralelo se realiza en forma determinística, considerando la peor condición que es cuando los dos primeros polos del interruptor cierran en el instante donde es máxima la tensión entre fases, en el caso de bancos conectados en estrella con neutro aislado.

En caso de que se excedan los valores admisibles en algún equipamiento (capacitor, interruptor, etc.), se deberán instalar inductancias en serie con cada banco de capacitores, con el objetivo de limitar la corriente de conexión back-to-back.

El cálculo de la inductancia limitadora se puede realizar en forma preliminar con fórmulas aproximadas sugeridas en las normas de capacitores e interruptores, las cuales asumen que la energización es simétrica (las tres fases se energizan en el mismo instante).

Luego, mediante simulaciones numéricas, pueden verificarse los cálculos preliminares y ajustarse los valores de diseño si fuese necesario. Es de destacar que en la realidad los tres polos no cierran simultáneamente, y en tal caso las amplitudes de las corrientes pueden ser

algo mayores que las calculadas con las fórmulas básicas.

En general, será necesario instalar una inductancia en serie en cada módulo del banco de capacitores en las siguientes situaciones: **La corriente cresta** de conexión por cualquiera de los bancos de capacitores involucrados, es mayor a 100 veces la corriente **eficaz** nominal del banco de capacitores (Norma IEC 60871), **la corriente, frecuencia, y/o producto de corriente-frecuencia por el interruptor** supera los límites establecidos por las normas de referencia. (difieren según sean Normas ANSI 37.06 o IEC 62271).

4.2.1 Ecuaciones Básicas

El criterio adoptado aquí para dimensionar la inductancia es el de limitar la amplitud, frecuencia y producto $I \times f$ de la corriente, resultante de la conexión en paralelo de n bancos, pero pueden existir otras situaciones donde los valores sean peores, como por ejemplo, ante la ocurrencia de una falla cercana a la estación.

La ecuación que da el valor cresta y frecuencia de corriente que circula por el banco a energizar cuando ya hay n bancos en servicio es:

$$i_c = \frac{n}{n+1} \times U_{ef} \times \sqrt{\frac{2C}{3L_p}}, \quad f = \frac{1}{2\pi \sqrt{C \times L_p}}$$

Donde: **I_c** : Corriente cresta por último banco cuando ya hay n en servicio, **n** : Número de bancos en servicio, **U_{ef}** : Tensión eficaz máxima de línea. **L_p** : Inductancia parásita del circuito entre los bancos, **C** : Capacidad del banco, **f** : Frecuencia de la corriente.

De lo anterior se deduce que: $I_c \times f = \frac{n}{n+1} \times \frac{U_{ef} \sqrt{2/3}}{2\pi L_p}$

Es decir, el producto de la corriente cresta por la frecuencia es independiente de la capacidad del banco, y sólo depende del nivel de tensión, de la inductancia entre bancos y del número de bancos a conectar en paralelo.

Dado un producto $I_c \times f$ límite, se deduce el valor necesario de la inductancia limitadora por fase (L_s) con

la siguiente expresión: $L_s = \frac{n}{n+1} \times \frac{U_{ef} \sqrt{2/3}}{2\pi \times I_c \times f}$

Esto limitará el producto $I \times f$ al valor deseado, pero no cada valor individual (I , f), por lo que restará verificar que la amplitud y frecuencia de la corriente sean de acuerdo con lo admitido.

Si la energización no es simétrica, se pueden obtener valores de corrientes superiores a las calculadas con estas fórmulas. Por ejemplo, cuando el tercer polo del interruptor cierra en el instante donde la corriente por ambos polos ya energizados pasa por cero, entonces se obtiene la máxima sobrecorriente en una de las fases ya energizada, dado que la carga atrapada en el capacitor de dicha fase estará en su máximo y será de polaridad opuesta a la tensión aplicada.

5 TRANSITORIO DEBIDO A LA DESENERGIZA-CIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES.

5.1 Desconexión sin reencendidos

La desenergización del banco con un interruptor ideal sin reencendidos, no produce transitorios de tensión que sean de consideración para la aislación del sistema. Sin embargo, en un interruptor real no puede garantizarse una probabilidad nula de ocurrencia de reencendidos del arco, aún en aquellos específicamente destinados a la operación de bancos de capacitores. De hecho, la norma IEC ha abandonado la clasificación de 'libre de reencendidos' para un interruptor, contemplando en la actualidad tres categorías, que en el mejor de los casos considera que el interruptor tiene muy baja probabilidad de reencendido, pero no nula.

5.2 Reencendidos durante la desconexión del banco

Dado que la operación de los bancos de capacitores se realiza en general con frecuencia diaria, entonces no es de descartar la posibilidad de reencendido del arco por el interruptor, luego de la interrupción de la corriente.

La desconexión de un banco de capacitores con neutro aislado produce tensiones de restablecimiento entre contactos del interruptor mayores que si el neutro estuviera conectado a tierra. Esto aumenta la probabilidad de reencendidos en el interruptor.

La única forma de evitar los reencendidos es utilizando un interruptor con apertura controlada, haciendo que el instante de interrupción de la corriente esté suficientemente alejado del instante de separación mecánica de los contactos, con lo cual la separación entre los mismos será suficiente como para evitar la ocurrencia de un reencendido.

El estudio de las sobretensiones producidas por el reencendido del arco durante la apertura es en general determinístico, es decir, se asume que esto ocurre cuando es máxima la tensión entre contactos del interruptor.

Para un banco con neutro aislado, y suponiendo un solo reencendido, teóricamente la máxima tensión resultante es de 5.67 p.u. fase a tierra, pero puede ser aún superior en caso de varios reencendidos.

La instalación de descargadores de óxido de zinc en bornes del banco, si bien no evita la ocurrencia del primer reencendido, es efectiva para limitar las sobretensiones y evitar reencendidos adicionales del arco en el interruptor.

Sin embargo, esto puede representar una gran sollicitación térmica para el descargador.

La corriente que circulará será generalmente de mayor amplitud y menor duración que aquella aplicada al descargador durante los ensayos que determinan su capacidad energética, indicada en los folletos técnicos del mismo. Esto implica que la capacidad energética efectiva es menor en estas circunstancias, y deberá utilizarse un margen de seguridad, o algún procedimiento para determinar si se excede lo admisible por el descargador.

En la [5], se presenta una guía para la selección del descargador de OZn para la protección de bancos de capacitores.

6 FALLA CERCANA.

La instalación de bancos de capacitores trae diversos problemas en los sistemas de transmisión, principalmente en lo que respecta a los transitorios de tensión y/o corriente que se producen durante su operación, tal como se ha descripto hasta aquí.

Sin embargo, hay otros aspectos que deben ser considerados, no relacionados con la operación misma del banco, sino con la posibilidad de ocurrencia de fallas en barras, ó en un punto de la línea cercano a la estación donde se encuentran instalados bancos de capacitores.

6.1 Descarga del banco de capacitores sobre la falla.

En caso de ocurrencia de una falla en un punto cercano al banco de capacitores, los mismos se descargarán sobre la falla, lo cual no sólo incrementa la corriente de cortocircuito, sino que es posible la circulación de corrientes transitorias similares o aún mayores a las que ocurren cuando se conectan bancos en paralelo. Esto puede ser una sollicitación severa para los capacitores y/o los equipos instalados en el circuito.

Otro punto a considerar es que, si el interruptor de línea cierra sobre una falla pre-existente, circularán por el mismo corrientes de pre-arco de alta frecuencia, debiendo verificarse que no se supere aquella admitida por el interruptor.

Las amplitudes, frecuencias, situaciones más severas dependerán de si el banco tiene neutro aislado o conectado a tierra. En el primer caso sólo son de consideración las fallas bifásicas o trifásicas, mientras que en el segundo, cualquier tipo de falla puede dar lugar a transitorios de consideración.

6.2 Despeje de una falla cercana a un banco de capacitores.

Otra instancia a considerar, es cuando se despeja una falla cercana al banco de capacitores. En este caso, debe prestarse atención a la tensión transitoria de restablecimiento (TTR) entre contactos del interruptor cuando despeja la falla.

El banco de capacitores incrementa la capacidad del lado fuente del interruptor, haciendo que la TTR adopte una forma (1-coseno), es decir, la TTR crecerá más lentamente que en el caso donde la impedancia de la fuente sea inductiva, pero será de mayor amplitud. Dado que la TTR crecerá lentamente, esto da la oportunidad al interruptor de interrumpir la corriente con un tiempo de arco muy pequeño. Luego de esto, es posible que ocurra una reignición de la corriente, si la separación entre contacto no es suficiente para soportar la TTR. Si la reignición ocurre, entonces circulará una corriente de elevada amplitud y frecuencia, que puede sollicitar excesivamente a la cámara de interrupción.

7 FERRORESONANCIA

Para que ocurra ferromresonancia, es necesario que existan en la red inductancias no lineales (por ejemplo, el circuito magnético del transformador) y capacidades,

acompañadas estos elementos por bajas pérdidas en el circuito. En un circuito que contiene estos elementos, es factible la ocurrencia de ferorrresonancia si existe más de una solución del estado estacionario para el mismo conjunto de parámetros del sistema, siendo posible que alguna perturbación o cambio en el circuito produzca que el sistema pase de un estado 'normal' a otro ferorrresonante, con elevadas sobretensiones y corrientes. En general, es difícil de predecir la ocurrencia del mismo mediante simulaciones digitales, es común que primero ocurra en el sistema real, y luego se verifique por estudios y simulaciones digitales. Esto se debe fundamentalmente a que no se dispone de los datos necesarios, por ejemplo, las curvas de magnetización de los transformadores sólo se obtienen por ensayo hasta un valor limitado de tensión, generalmente 1,1 p.u., pero es necesario conocerla más allá de éste valor a fin de considerar la inductancia saturada del circuito magnético, la cual es fundamental en el fenómeno. El fenómeno de ferorrresonancia desaparece ante la presencia de carga activa, aún en el caso que esta carga sea de valor relativamente pequeño respecto de la carga nominal. En el caso de conexión de bancos de capacitores en el secundario o terciario de transformadores se recomienda para evitar la ferorrresonancia **no dejar conectado el transformador con el banco de capacitores y sin la carga del secundario**, y ante la operación de **desenergización** del transformador, es conveniente **desconectar primero el banco** de capacitores y luego la carga.

8 REFERENCIA A ALGUNOS PUNTOS DE LAS NORMAS CON RESPECTO AL DISEÑO DEL EQUIPAMIENTO.

8.1 Norma IEC 60871 -1 Capacitores Shunt

Las **sobrecorrientes transitorias** (valor cresta) debido a la maniobra del banco deben ser limitadas a 100 In (In valor eficaz). Cláusula 32.2.

Los niveles de tensión de frecuencia industrial soportados por el banco de capacitores (Tabla 6 de la NORMA): es: 1.0 pu en forma continua, 1.1 pu. 8hs cada 24hs, 1.15 pu. 30 minutos cada 24hs, 1.20 pu 5 minutos. La amplitud de las sobretensiones que pueden ser toleradas sin deterioro significativo depende de la duración de las mismas.

Los valores superiores a 1.15 pu no deben ocurrir más de 200 veces en la vida del capacitor.

La **sobretensión de maniobra** luego de la energización del banco no debe superar **2.84** veces la **tensión nominal** aplicada por un máximo de 1/2 ciclo. (Cláusula 19.2.).

El banco de capacitores deberá poder funcionar permanentemente con una valor de corriente de **1.3 veces** el valor de la corriente a tensión sinusoidal nominal y a frecuencia nominal excluyendo el transitorio. Dependiendo del valor real de la capacidad (que puede llegar a ser 1.15 de la capacidad nominal), **la corriente podrá alcanzar** un valor de **$1.3 \times 1.15 = 1.5$ In**. Estos factores de sobrecorriente pretenden tener en cuenta el efecto combinado de las armónicas y de la sobretensión de hasta 1.1 Un. (Cláusula 20.)

Los dispositivos de maniobra y de protección del banco deben estar diseñados **para soportar** permanentemente una corriente de **1.3 In**. Como el valor de la capacidad puede diferir del nominal hasta 1.15 Cn, el valor de la corriente puede llegar a 1.5 In. (Cláusula 33.1).

8.2 Normas de interruptores

En la Tabla 1 se resumen los límites establecidos en las dos normas internacionales de interruptores respecto de las corrientes de energización y de interrupción.

9 CONCLUSIONES

Los tipos de estudios de fenómenos electromagnéticos propuestos en este trabajo para el caso de la conexión en AT de bancos capacitivos de compensación en derivación, son:

- **Energización del primer banco**, generalmente son de mayor importancia las sobretensiones que las sobrecorrientes generadas, pueden haber sobretensiones importantes en extremos de línea con longitud cercana a la crítica, o debido al fenómeno de magnificación de la tensión.
- **Energización de bancos en paralelo** en este caso son de mayor importancia las sobrecorrientes y no las sobretensiones. Se debe evaluar la necesidad de agregar inductancias limitadoras adicionales a las parásitas para disminuir el fenómeno y llevarlos a valores compatibles con la corriente máxima transitoria de los bancos y la de los interruptores.
- **Desenergización de los bancos**, las simulaciones de desenergización considerando los reencendidos permite evaluar las sobretensiones máximas esperables y la solicitaciones a las que estarán sometidos los bancos y los descargadores y demás equipamiento aledaño.
- Las simulaciones **de Falla cercana** tienen por objeto evaluar las máximas corrientes esperables en los interruptores de las líneas cercanas al banco que podrían cerrar sobre falla, debiendo evaluarse la sobrecorriente, su frecuencia y el producto I_{xf} al cual será sometido el interruptor de línea. Esta falla es de baja probabilidad, con lo cual si alguna vez ocurre no significa que el interruptor no la soportaría, sino que el interruptor estará sometido a una solicitación especial y requerirá un mantenimiento especial.
- Debido a la falta de datos reales y al fenómeno en si, es muy difícil lograr simulaciones del **fenómeno de ferorrresonancia** que lleguen a reflejar situaciones reales. En este sentido, se recomienda ciertas normas operativas que tienden a disminuir o hacer desaparecer el fenómeno.
- Luego de haber evaluado las solicitaciones mediante las simulaciones respectivas, se tienen argumentos para decidir la instalación de un interruptor con control de cierre y apertura para el bancos de capacitores.

TABLA 1. LÍMITES DE LAS NORMAS RESPECTO DE LAS CORRIENTES CAPACITIVA DE INTERRUPTORES EN LA DESENERGIZACIÓN Y EN LA ENERGIZACIÓN

Norma	DESENERGIZACION	ENERGIZACIÓN Back To Back		
	I_{sb} de interrupción [A eficaz]	Límite I_{xf} (A/s) $\times 10^7$	I_{max} energización [kAcresta]	f [Hz]
ANSI o general		2,0		
ANSI dedicado	315 ($U_n=145kV$) 400 ($U_n=170\dots245kV$) 500 $U_n=$ 362...800kV	6,8	16	4250
IEC 62271	400 (cualquier U_n)	8,5	20	4250

10 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

- [1] Norma IEC 60871-1, "Shunt Capacitors for A.C. Power Systems Having a Rated Voltage Above 1kV. Part 1: General - Performance, testing and rating - Safety Requirements - Guide for installation and operation"
- [2] Norma IEC 62271-100 "High Voltage alternating-current circuit breakers"
- [3] Norma ANSI C37.06-1997, "AC High-Voltage Circuit Breakers rated on a Symmetrical Current Basis - Preferred Ratings and Related Required Capabilities".
- [4] "Shunt Capacitor Bank Switching. Stresses and Test Method. First Part." ELECTRA N°182. February 1999.
- [5] "Guidelines for Selection of Surge arresters for Shunt Capacitor Banks", L. Stenström and M. Mobedjina. WG 11 of SC 33. Electra No. 159, Apr/95
- [6] Norma ANSI C37.012-1970, "AC High-Voltage Circuit Breakers rated on a Symmetrical Current Basis - Application Guide For Capacitance Current Switching".
- [7] Report by Working Group 3.4.17 of The IEEE Surge Protective Device Committee. "Impact of Shunt Capacitor Banks on Substation Surge Environment and Surge Arrester Application. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 11. N°4. October 1996.