

Estudios para la Determinación del Reactor de Amortiguamiento en Bancos de Capacitores a 230 kV. Aplicación a la Subestación Las Esclusas

L. Dután

CELEC EP - Transelectric
E-mail: luis.dutan@celec.gob.ec

Resumen

El objeto de este documento es presentar los criterios actuales para el dimensionamiento de la inductancia de amortiguamiento en bancos de capacitores. En base a la última clasificación de interruptores y a los nuevos valores límites cuando maniobran corrientes transitorias capacitivas, establecidos en la norma IEEE Std. C37.06-2009, generalmente resulta innecesario el uso de la inductancia de amortiguamiento. Estos criterios son aplicados a los bancos de capacitores (2x60 MVAR) que serán implementados en la subestación Las Esclusas a nivel de 230 kV. Los resultados indican que no es necesario la inclusión de inductancias de amortiguamiento debido a que todos los interruptores conectados a la barra de 230 kV son de tecnología SF₆, Clase C1.

Palabras clave— Inductancias de amortiguamiento, Bancos de Capacitores, Inrush, Outrush, Interruptor, ATP.

Abstract

The purpose of this document is to present the actual criteria for sizing the capacitor bank's damping inductance. Based on the latest classification of switches and new limit values when maneuvering capacitive transient currents established in the IEEE Std. C37.06-2009, it is usually unnecessary to use damping inductance. These criteria are applied to the capacitor banks (2x60 MVAR) that will be implemented in Las Esclusas substation at 230 kV. The results show that it is not necessary to include damping inductances.

Index terms— Transient Limit Inductor, Capacitor Bank, Inrush, Outrush, Circuit Breaker, ATP.

Recibido: 21-10-2015, Aprobado tras revisión: 24-12-2015.

Forma sugerida de citación: Dután, L (2016). "Estudios para la determinación del reactor de amortiguamiento en bancos de capacitores a 230 kV. Aplicación a la subestación Las Esclusas". Revista Técnica "energía". N° 12, Pp. 121-131.

ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

En un sistema eléctrico de potencia (SEP), el uso de bancos de capacitores para suministrar potencia reactiva a la red eléctrica en zonas donde existen problemas de bajos voltajes ha sido lo más empleado por su bajo costo y facilidad de implementación ante otras alternativas. Actualmente, en el Sistema Nacional de Transmisión del Ecuador (SNT) se han instalado bancos de capacitores a un nivel de voltaje de 69 kV y 138 kV. El Plan de Expansión de la Transmisión (PET) 2013-2022 indica la necesidad de instalar 120 MVar a nivel de 230 kV en la subestación Las Esclusas mediante dos bancos de 60 MVar cada uno.

Generalmente, los bancos de capacitores en subestaciones del SNT va acompañado de la instalación en serie de inductancias de amortiguamiento de 1mH para bancos en 69 kV y 1.5 mH para bancos en 138 kV. Con la necesidad de compensación capacitiva en 230 kV, se requirió determinar el valor de la inductancia de amortiguamiento a este nivel de voltaje. Los resultados iniciales de los estudios sugerían altos valores de esta inductancia, llegando hasta 3.5 mH, que implica un equipo de gran volumen. Esto provoca un problema, pues la subestación Las Esclusas carece de espacio físico destinado para bancos de capacitores por lo que es necesario que los diseños contemplen una reducción de la longitud y del ancho de sus bahías al máximo posible. Este problema particular, conjuntamente con la necesidad de encontrar un valor adecuado de la inductancia de amortiguamiento en 230 kV, llevó a realizar investigaciones sobre el estado actual en lo que respecta a la implementación de bancos de capacitores; el resultado sugiere que los criterios de valoración de la inductancia de amortiguamiento sean revisados y cambiados según las últimas actualizaciones de IEEE e IEC para interruptores.

De acuerdo a la norma IEEE Std. C37.012-2005, existen dos fenómenos de gran interés provocados por la presencia de bancos de capacitores: la energización de los bancos de capacitores, especialmente la energización de un segundo banco cuando el primero está ya en operación, fenómeno conocido en inglés como *back-to-back*, en donde se desarrollan corrientes transitorias de energización de alta magnitud y alta frecuencia conocidas como corrientes *inrush* y fallas dentro de una subestación (que contiene bancos de capacitores) que provocan la descarga del banco por medio de corrientes transitorias

de alta magnitud y alta frecuencia conocidas como corrientes *outrush*. Las corrientes *inrush* y *outrush* pueden llevar al desgaste prematuro de los contactos del interruptor que lo atraviesan. Por tal motivo, las normas de interruptores IEEE C37.06-1999 e IEC 62271-100 2005 imponen valores límites máximos al producto del valor pico de la corriente transitoria (*inrush* u *outrush*) por su frecuencia de oscilación, $I_{pmax} \times f_{osc}$. Estos valores se establecieron para interruptores de propósito general y propósito definido cuyo medio aislante interno es aceite, pero su aplicación se extendió a todo tipo de interruptores cualquiera sea el medio aislante interno usado.

Inicialmente, el control de la magnitud y frecuencia de oscilación de la corriente transitoria de energización, para cumplir con el límite señalado en las normas de interruptores especialmente para eventos *back-to-back*, se realizó mediante una inductancia de amortiguamiento (en inglés se conoce como *Transients Limit Inductor* – (TLI)) por fase colocada en serie con los bancos de capacitores, pero los valores de esta inductancia llegaban a ser muy altos lo que podía convertir al conjunto *bancos de capacitores-TLI* en un filtro de armónicas. Una primera solución fue la implementación de resistencias de preinserción, posteriormente el uso de cierre sincronizado permitió obtener resultados similares a los ofrecidos por las resistencias de preinserción a un menor costo y sin la necesidad de mantenimiento continuo y especializado que demanda la resistencia de preinserción, y es lo que se ha venido usando ampliamente. No obstante, el problema se mantenía para el fenómeno *outrush* para el cual ni las resistencias de preinserción ni el mando sincronizado lo mitigan. Por tal motivo, se volvió al uso de la TLI; el problema radica en que su valor (para cumplir con los límites establecidos en las normas) es demasiado alto, retornando nuevamente la posibilidad que el conjunto *bancos de capacitores-TLI* se vuelva un filtro de armónicas. Las mismas ideas que se tenían para controlar las corrientes *inrush* se aplicaron para las corrientes *outrush*.

Para dar solución a este conflicto, IEEE formó un comité técnico que analizó la necesidad y valoración de la inductancia de amortiguamiento. El resultado se plasmó en el documento *IEEE Technical Report PES-TR16 2014*, en el que se presentan nuevos criterios para la selección de la inductancia de amortiguamiento en base a la última actualización de la norma sobre interruptores IEEE Std. C37.06-2009. Según esta norma, para interruptores en SF₆ de clases C1 y C2 que estén

sometidos a corrientes transitorias capacitivas, el único límite a ser observado es el valor pico máximo de esta corriente el cual debe ser menor o igual que el valor pico máximo de corriente de diseño del interruptor ($2,6 \times I_{rms_cc}$) y que la frecuencia de oscilación transitoria no debe ser tomada en cuenta ya que este tipo de interruptores tienen muy poca sensibilidad a la alta frecuencia. Solo en el caso de que se supere el valor de corriente máxima de diseño del interruptor en SF₆ de clase C1 o C2 sería necesario la instalación de la inductancia de amortiguamiento.

Con base en el *IEEE Technical Report PES-TR16 2014* y su usando un cálculo analítico aproximado, respaldado con simulaciones precisas realizadas en el software *Alternative Transients Program (ATP)*, se determinó que para los bancos de capacitores a ser instalados en la subestación Las Esclusas, a nivel de 230 kV, no es necesario implementar inductancias de amortiguamiento en serie con los bancos de capacitores debido a que los interruptores de líneas de transmisión, transformador y bahía de acoplamiento conectados a la barra de 230 kV son de tecnología SF₆, Clase C1, y el valor de la corriente capacitiva de descarga de los bancos que atraviesan estos interruptores durante una falla interna en la subestación llega hasta los 35.8 kA pico, muy por debajo del máximo valor pico de diseño (89 kA) que es capaz de soportar el interruptor.

En este trabajo se presenta una breve explicación teórica de la energización de bancos de capacitores, se indican los nuevos límites establecidos en el reporte técnico de la IEEE, se realizan cálculos analíticos aproximados y simulaciones precisas para la valoración de la TLI, se señalan los análisis adicionales necesarios cuando no se usa la TLI y, finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones.

2. ENERGIZACIÓN Y DESCARGA DE BANCOS DE CAPACITORES Y MÉTODOS DE CONTROL

La conexión de bancos de capacitores genera corrientes transitorias de energización (*inrush*) de gran magnitud y alta frecuencia, especialmente en eventos *back-to-back (b-t-b)*. Una parte de la energía de esta corriente es disipada en el circuito, mientras que otra parte afecta al interruptor que lo atraviesa provocando erosión de los contactos, calentamiento de gases de arco y ondas de choque. Las ondas de choque, al parecer, están determinadas por la variación de la corriente en el tiempo (di/dt)

que está relacionada directamente con el producto $I_{pmax} \times f_{osc}$ [1]. En interruptores en aceite estas ondas de choque pueden llegar a ser altamente destructivas y pueden provocar la soldadura de los contactos quedando el interruptor incapaz de poder realizar la apertura.

Para evitar el daño de los interruptores usados a nivel de transmisión, cualquiera sea su medio de aislamiento interno, las normas ANSI C37.06-1999 [2] e IEC 62271-100 2005 [3] establecen límites al valor pico y frecuencia de oscilación de las corrientes transitorias de energización o descarga provocadas por bancos de capacitores. Según la norma ANSI C37.06-1999, para interruptores de propósito general el límite máximo es de 20 kAkHz, mientras que para interruptores de propósito definido el valor máximo es de 68 kAkHz ($I_{pmax} = 16$ kA y $f_{oscmax} = 4250$ Hz). En cambio, la norma IEC 62271-100 2005 acepta un valor máximo de 85 kAkHz ($I_{pmax} = 20$ kA y $f_{oscmax} = 4250$ Hz). Esta generalización, basada en interruptores en aceite, se la realizó sin tener en cuenta que existe un umbral de energía por debajo del cual la corriente transitoria debido a bancos de capacitores no provoca daños a los interruptores en aceite y, además, que las ondas de choque tienen un efecto casi nulo en interruptores de aire, vacío o SF₆, los cuales tienen otro tipo de limitaciones. Esto provocó que se instale innecesariamente TLI en serie con los bancos de capacitores en subestaciones que poseen interruptores en SF₆, mientras que para aquellos que tienen interruptores en aceite el valor de esta inductancia resulta sobredimensionado. Además, para interruptores en SF₆ estas inductancias son contraproducentes, pues incrementan la magnitud y tasa de subida del Voltaje de Recuperación Transitoria (en inglés *Transient Recovery Voltage – TRV*), lo que puede conducir a reencendidos de arco.

2.1. Energización de Bancos de Capacitores

La conexión de bancos de capacitores sucede casi a diario por las necesidades de potencia reactiva del sistema y provoca corrientes de energización que atraviesan los contactos del interruptor. Tal como se presenta en la Fig. 1, cuando se energiza el primer banco de capacitores la corriente *inrush* está limitada por la inductancia (impedancia) equivalente del sistema (L_s), la inductancia de la porción de barra (LB_1) e inductancias parásitas ($L_{p_{b1}}$) conformadas por el conductor de conexión desde el banco de capacitores a la barra, inductancia propia del banco de capacitores e inductancia de la conexión del neutro de los bancos hacia la malla

de tierra. Para la energización del primer banco LB_1 y $L_{p_{b1}}$ son de valor muy bajo con respecto a la inductancia equivalente del sistema por lo que se las puede despreciar. Con base en lo anterior, el valor pico de la corriente transitoria de energización y su frecuencia de oscilación son de valores bajos. Una estimación se puede obtener usando (1) y (2).

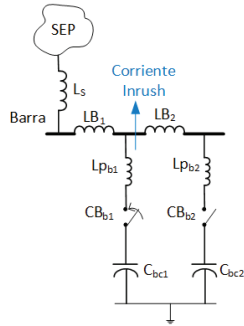


Figura 1: Energización del primer banco de capacitores

$$i_p = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{rms_ll} \cdot \sqrt{\frac{C_{bc1}}{L_S}} \quad (1)$$

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{(L_S + LB_1 + L_{p_{b1}}) \cdot C_{bc1}}} \quad (2)$$

La frecuencia de oscilación, generalmente, está por debajo de 1 kHz. La energización del primer banco no produce ningún problema para los interruptores.

Cuando se energiza el segundo banco de capacitores, con el primero ya en operación (*b-t-b*), tal como se muestra en la Fig. 2, la única inductancia que “mira” el banco que se energiza es aquella compuesta por el tramo de barra (LB_2) y las que corresponden a los conductores de conexión de los dos bancos con la barra ($L_{p_{b1}}$ y $L_{p_{b2}}$). El equivalente de estas tres inductancias (L_{eqv}) es un valor muy bajo, del orden de las decenas de μH . Por tal motivo, la magnitud de la corriente *inrush* y su frecuencia de oscilación son elevadas, llegando hasta las decenas de kA y kHz, respectivamente. La estimación de sus valores se puede obtener mediante (3) y (4)

$$i_p = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{rms_ll} \cdot \sqrt{\frac{C_{eqv}}{L_{eqv}}} \quad (3)$$

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{eqv} \cdot C_{eqv}}} \quad (4)$$

donde C_{eqv} se obtiene de:

$$X_{C_{eqv}} = X_{C_{bc1}} \parallel X_{C_{bc2}} \quad (5)$$

y L_{eqv} se obtiene de:

$$X_{L_{eqv}} = (X_{LB_2} + X_{L_{p_{b2}}}) \parallel X_{L_{p_{b1}}} \quad (6)$$

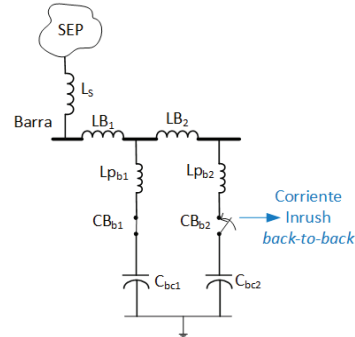


Figura 2: Energización del segundo banco de capacitores (back-to-back)

Por otro lado, fallas a pocos metros de un interruptor, como se muestra en la Fig. 3, se conocen como fallas terminales y son las que mayor exigencia de soportabilidad de corriente demandan del interruptor, provocan que los bancos de capacitores se descarguen sobre la falla mediante corrientes de gran magnitud y alta frecuencia, conocidas como corrientes *outrush*. Su valor pico y la frecuencia de oscilación pueden ser obtenidos mediante (3), (4) y (5), mientras que para L_{eqv} se debe modificar (6) agregando el efecto de la inductancia de los conductores desde la barra hasta el lugar de la falla. El valor pico de esta corriente puede llegar a ser igual o mayor al esperado durante una energización *back-to-back* no controlado [4] y atravesará el interruptor del banco de capacitores y el interruptor del elemento (bahía de línea o transformador) donde se ha producido la falla. Este tipo de evento tiene una muy baja probabilidad de ocurrencia.

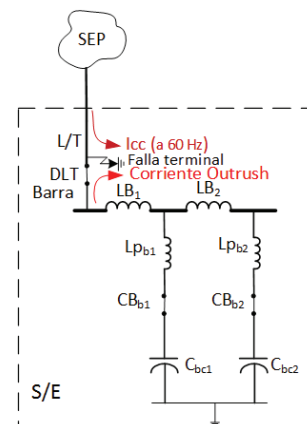


Figura 3: Falla terminal que provoca corrientes outrush

La característica principal de esta corriente es que el transitorio de alta frecuencia dura menos que $\frac{1}{4}$ de ciclo de la onda transitoria (corriente de falla) a frecuencia fundamental, tal como se muestra en la Fig. 4.; es decir, el tiempo del transitorio es menor al tiempo en que la corriente de cortocircuito de 60 Hz llega a su primer pico.

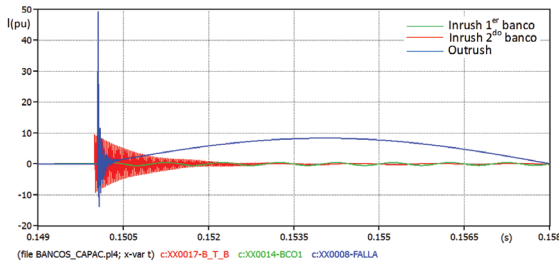


Figura 4: Formas y magnitudes relativas de corrientes inrush y outrush

Para controlar la magnitud y frecuencia de oscilación de la corriente *inrush* en eventos *b-t-b*, inicialmente se optó por colocar inductancias de amortiguamiento en serie con el banco de capacitores, tal como se presenta en la Fig. 5.

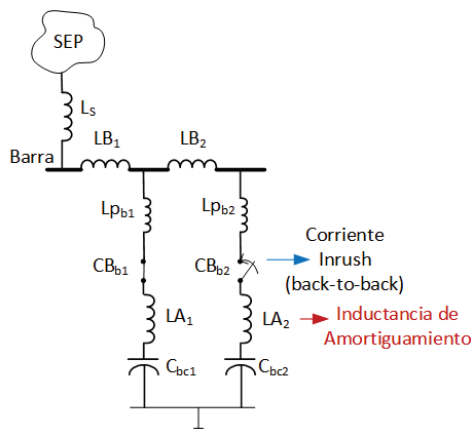


Figura 5: Adición de inductancias de amortiguamiento

Esto implica que a (6) se agregue el valor de la inductancia de amortiguamiento y, por lo tanto, L_{eqv} sea mayor, lo que da lugar a que el valor pico de la corriente transitoria (3) y su frecuencia de oscilación (4) disminuya. Incrementar el valor de TLI permite llegar a valores $I_{pmax} \times f_{osc}$ menores o iguales a los límites permitidos por las normas ANSI C37.06-1999 e IEC 62271-100 2005. En la Fig. 6 se muestran los resultados de la corriente de energización *b-t-b* sin TLI y con TLI de valores x y $4x$ en *por unidad* (*p.u.*) Al inicio el problema fue resuelto, pero para bancos de mayor capacidad era necesario inductancias de mayor valor.

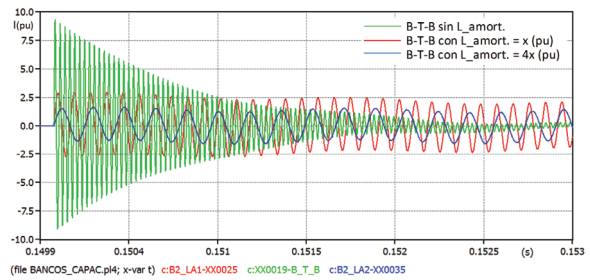


Figura 6: Efecto de la inductancia de amortiguamiento en corrientes de energización back-to-back

La solución actual es contar con interruptores monopolares de cierre sincronizado (mando sincronizado). Según [5], el mayor valor pico de la corriente transitoria de energización se origina cuando el cierre del interruptor del banco ocurre en el momento que la onda de voltaje está en su pico máximo. El mando sincronizado provocará el cierre del interruptor cuando la onda de voltaje de cada fase haga su cruce por cero. Esto implica una afectación directa al valor del voltaje de (3). Usando esta tecnología, las corrientes de energización disminuyeron drásticamente tal como se presenta en la Fig. 7 donde se muestran las corrientes transitorias usando TLI de valores x y $4x$ en *p.u.* y el cierre sincronizado sin TLI.

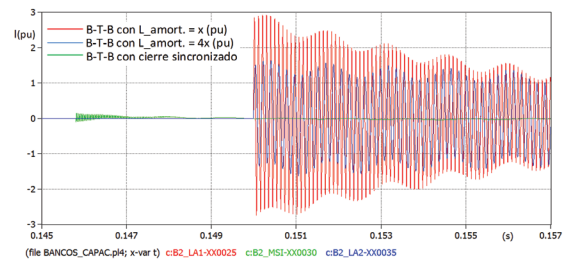


Figura 7: Corrientes de energización en eventos b-t-b usando TLI y cierre sincronizado

Implementar mando sincronizado e inductancia de amortiguamiento para eventos de energización es innecesario ya que no existe una reducción significativa del valor pico de la corriente, tal como se muestra en la Fig. 8 donde se observa la corriente *inrush* usando únicamente mando sincronizado y la corriente *inrush* usando mando sincronizado y TLI. Resulta obvio que una inductancia de amortiguamiento no puede ser respaldo de un mando sincronizado pues, para obtener los mismos resultados, su valor debe ser muy alto.

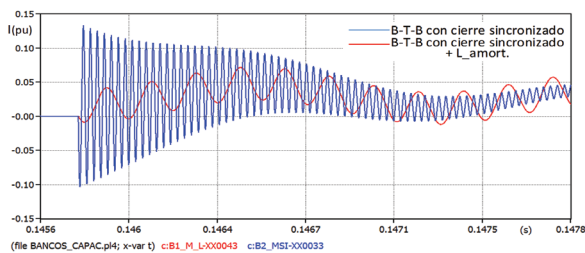


Figura 8: Corrientes en eventos b-t-b usando cierre sincronizado y cierre sincronizado más TLI

Si bien las corrientes de energización de bancos de capacitores fueron controladas, el problema se mantenía para corrientes *outrush*. El único elemento capaz de controlar esta corriente transitoria es la inductancia de amortiguamiento. En la Fig. 9 se observan corrientes *outrush* sin TLI y con TLI de valores x , $4x$ y $12x$ en p.u.; mientras mayor es el valor de la TLI, los picos de la corriente transitoria de descarga del banco y su frecuencia de oscilación disminuyen, permitiendo cumplir con los requerimientos $I_{pmax} \times f_{osc}$ pero con el riesgo de que el conjunto *banco de capacitores-TLI* se vuelva un filtro de armónicos.

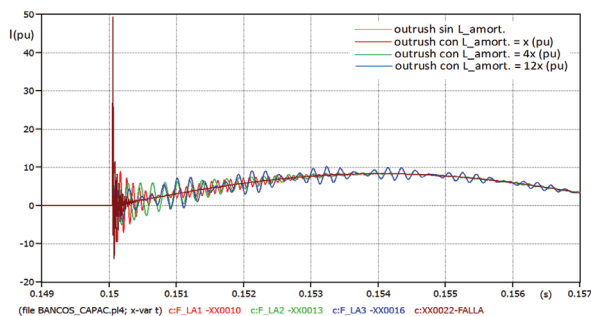


Figura 9: Corrientes *outrush* sin TLI y con distintos valores de TLI (en p.u.)

Se han realizado esfuerzos tanto en el diseño de conexión de bancos de capacitores como en la determinación de la TLI [6] y [7], para minimizar estos problemas.

En el año 2009 se dispone la última actualización de la norma IEEE Std. C37.06, donde se adopta de IEC 62271-100 2005 la clasificación de interruptores que maniobran corrientes capacitivas y se agrega el criterio de que los interruptores en SF₆ tienen muy poca sensibilidad a altas frecuencias. A su vez, IEC adopta este avance respecto a altas frecuencias. Las dos normas estén armonizadas y ofrecen un solo límite al manejo de corrientes capacitivas para interruptores en SF₆ de clase C1 y C2, dado por el valor pico máximo de corriente de diseño del interruptor ($2,6 \times I_{rms_cc}$).

3. NUEVOS CRITERIOS EN LA DETERMINACIÓN DE LA REACTANCIA DE AMORTIGUAMIENTO

La revisión de la norma de interruptores C37.06-2009 introduce una nueva clasificación de interruptores que maniobran corrientes capacitivas [8]. Estos son:

- Clase C1: Interruptor con baja probabilidad de reencendido de arco.
- Clase C2: Interruptor con muy baja probabilidad de reencendido de arco.
- Clase C0: Interruptor con una probabilidad no especificada de reencendido de arco.

La clase C0, según [8], fue establecida para representar los históricos interruptores de “propósito general” para el cual ninguna prueba de maniobra de corrientes capacitivas fue necesario; si fuera probado, entonces se permitiría un reencendido por interrupción. Las pruebas para la clase C2 resultan en un interruptor con una probabilidad de reencendido alrededor del 10% de la probabilidad de un interruptor clase C1. El concepto de baja o muy baja probabilidad es introducido para reconocer que un interruptor “libre de reencendido” es prácticamente imposible.

En cuanto al uso de interruptores según su clase, [9] sugiere lo siguiente: Interruptores de clase C1 son recomendados para maniobras poco frecuentes de líneas de transmisión y cables, mientras que interruptores de clase C2 son recomendados para maniobras de bancos de capacitores y maniobras frecuentes de líneas de transmisión y cables. Interruptores clase C0 (de propósito general) se emplean en la interrupción de diferentes tipos de corrientes de operación (corrientes de carga, corrientes de transformadores en vacío, corrientes “*charging*” de líneas y cables), así como para corrientes de cortocircuito; además, los interruptores de propósito general están destinados para usarse en sistemas con neutro aislado o sistemas con compensación de falla a tierra, también son capaces de interrumpir en fallas a tierra.

La norma C37.06-2009 establece los siguientes límites para interruptores expuestos a corrientes transitorias capacitivas de bancos de capacitores cercanos durante condiciones de falla:

- Interruptores clase C0: La magnitud de la corriente transitoria no deberá exceder el menor valor de $1,41 \times I_{rms_cc}$ o 50 kA. Además, el producto del valor pico de la corriente transitoria por su frecuencia de oscilación no deberá exceder los 20 kAkHz.
- Interruptores clase C1 y C2: El fabricante deberá indicar el valor pico y frecuencia de la corriente *inrush* con los cuales el interruptor mantiene su clasificación C1 o C2. Además, para interruptores C1 y C2 expuestos a corrientes *outrush*, el valor pico de la corriente transitoria no deberá exceder la capacidad de diseño de soportabilidad de corriente del interruptor (generalmente $2,6 \times I_{rms_cc}$). Este evento es poco común por lo que el interruptor debe soportar esta solicitud dos veces en su tiempo de vida útil sin que sea necesario realizar el mantenimiento de los contactos.

Los resultados del comité de la IEEE que se exponen en el documento *IEEE Technical Report PES-TR16* de Noviembre de 2014 [1], establecen límites dado por (7).

$$I \times f = k \quad (7)$$

donde k es una constante diferente para cada tipo de tecnología de interrupción (y diferente para cada diseño de interruptor).

- Interruptores en aceite: $k = 85$ kAkHz.
- Interruptores en SF₆: $k = 2500$ kAkHz

De acuerdo a estos límites, es posible calcular una mínima inductancia requerida que se obtiene mediante (8):

$$L_{min} = \frac{V_{pico}}{2\pi k} \quad (8)$$

Se observa que la mínima inductancia requerida es independiente de C , lo que implica que existe un umbral de energía por debajo del cual no existe daño por ondas de choque [1].

Para interruptores en SF₆, si se toma el reencendido *outrush* como criterio de valoración de la TLI, entonces el límite máximo de corriente transitoria debe ser solamente la mitad de la capacidad *outrush* por falla, es decir, $1,3 \times I_{rms_cc}$ [1].

4. APLICACIÓN A LA SUBESTACIÓN LAS ESCLUSAS

Según el Plan de Expansión de la Transmisión 2013-2022 es necesario la instalación, a nivel de 230 kV, de dos bancos de capacitores de 60 MVar cada uno. El diagrama unifilar para el año 2022 de la barra de 230 kV y de la ubicación asignada a la bahía de conexión de los bancos de capacitores se presenta en la Fig. 10. Para energización de los bancos de capacitores se contará con cierre sincronizado por lo que no se realiza el análisis para eventos *inrush*. Los estudios son orientados a determinar la necesidad o no de inductancias de amortiguamiento en eventos *outrush*.

De la Fig. 10, se observa que las corrientes más altas durante un evento *outrush* se producirán debido a fallas en la cercanía de los interruptores DLT2 y DT2 (línea y transformador) que están adyacentes a la posición de los bancos de capacitores (esto implica menor inductancia entre los bancos y el lugar de la falla en posiciones de líneas y transformador) y en los interruptores DBC, DBC1 y DBC2, propios de los bancos de capacitores. El análisis se enfoca en el interruptor de línea DLT2 que se toma como representativo de interruptores de línea y transformadores conectados a la barra de 230 kV.

4.1. Interruptores actuales de líneas de transmisión conectadas a la barra de 230 kV

Actualmente, todas las líneas de transmisión y transformadores conectados a la barra de 230 kV poseen interruptores en SF₆ clase C1 fabricados bajo la norma IEC 62271-100 2005; su capacidad de interrupción de corriente de cortocircuito es de 40 kA rms y corriente máxima de diseño de 100 kA pico.

4.2. Modelamiento de Bancos de Capacitores

Según [1] el valor de la inductancia propia de bancos de capacitores a nivel de 230 kV se puede asumir de 1.0 μH por cada unidad capacitiva y 0,4 μH/ft para hilos conductores que conectan el neutro con la malla de tierra. En [10] se sugiere que las pérdidas en bancos de capacitores de papel impregnado con aceite mineral se puede aproximar entre 2.0 a 2.5 W/kVar.

4.3. Valores de inductancias de conexiones y barra

Los valores de las inductancias de conexión de conductores desde los bancos hacia la barra y la inductancia de la barra misma se obtuvieron mediante las características eléctricas de los conductores (AAC 1033 MCM) y su disposición geométrica; estos datos fueron ingresados en el módulo LCC del software ATP para obtener los valores de las inductancias que se presentan en la Fig. 10. Una buena aproximación resulta si se usa el valor de $0.98 \mu\text{H/m}$.

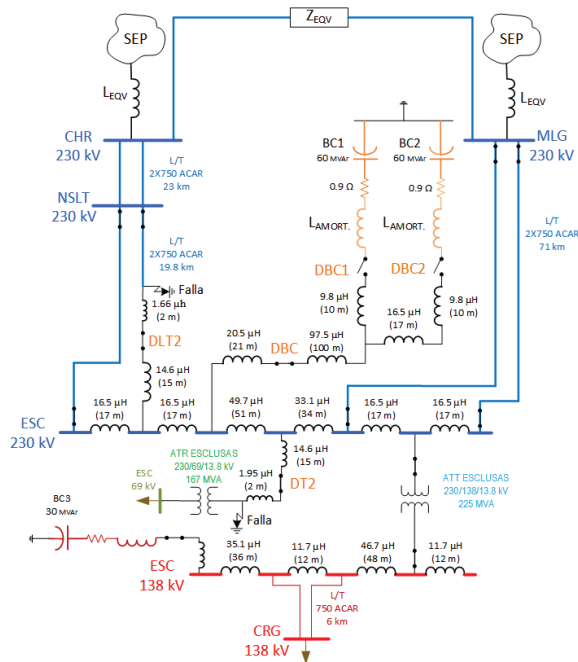


Figura 10: Diagrama unifilar de conexión de bancos de capacitores a la barra de 230 kV de la subestación Las Esclusas

4.4. Solución analítica aproximada y simulaciones

Una solución analítica aproximada se puede obtener si se desprecia las resistencias del circuito para el cálculo de la corriente *outrush*. Entonces, para usar (3) y (4) es necesario resolver el circuito de la Fig. 11.

La inductancia total hasta la falla resulta de $165,6 \mu\text{H}$ y la capacitancia total es de $6,02 \mu\text{F}$. Con estos valores se obtiene lo siguiente:

$$I_{pmax} = 35,8 \text{ kA}$$

$$f_{osc} = 5,04 \text{ kHz}$$

$$I_{pmax} \times f_{osc} = 180,5 \text{ kAkHz}$$

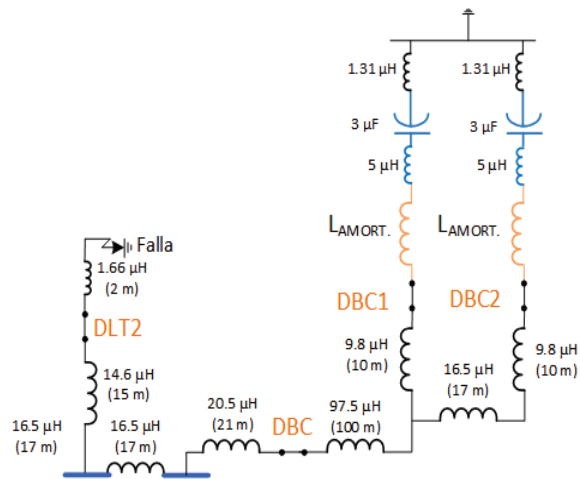


Figura 11: Diagrama unifilar necesario para calcular la corriente outrush desde los bancos de capacitores hacia la falla

La mínima inductancia requerida según (8) es de $11,955 \mu\text{H}$ debido a que el interruptor DLT2 es de tecnología SF_6 y de clase C1.

Para subestaciones del SNT, las especificaciones técnicas a nivel de 230 kV solicitan que la corriente de cortocircuito *rms* de interruptores en SF_6 sea mayor que 31.5 kA (los fabricantes ofrecen valores de 40, 50 y 63 kA). Si se usa el límite inferior solicitado en las especificaciones técnicas, se tiene que el valor pico máximo de diseño del interruptor, que se convierte en el límite que determinará si es necesario o no el uso de la TLI, es:

$$I_{lim_max} = 2,6 \times 31,5 \text{ kA} = 81,9 \text{ kA.}$$

El valor pico máximo calculado (35,8 kA) está por debajo del límite que implícitamente se solicita en las especificaciones técnicas (81,9 kA) para todo los interruptores conectados a la barra de 230 kV que son de tecnología SF_6 , clase C1. Esto indica que no es necesario la instalación de inductancias de amortiguamiento en serie con los bancos de capacitores.

La corriente de descarga *outrush* calculada se muestra en la Fig. 12, mientras que la corriente total calculada (*outrush* + I_{cc_rms}) se presenta en la Fig. 13.

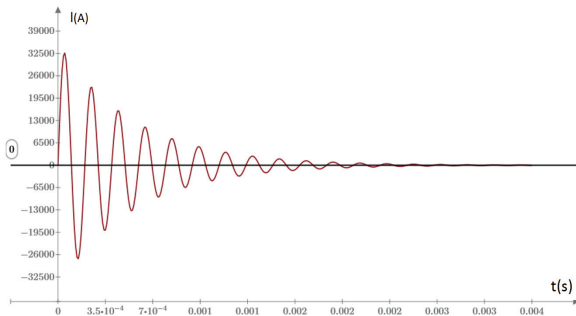


Figura 12: Corriente calculada *outrush* desde bancos de capacitores hacia una falla terminal en el interruptor DLT2

Se realizaron simulaciones en ATP incluyendo la parte resistiva del circuito y la dependencia de la frecuencia de las líneas de transmisión que salen de la barra de 230 kV de la subestación Las Esclusas. Los resultados se presentan en la Fig. 14, donde el valor del pico máximo se encuentra en la parte negativa.

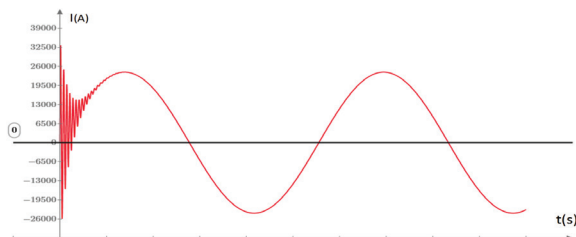


Figura 13: Corriente total calculada de falla terminal en el interruptor DLT2

Si los interruptores de las líneas de transmisión fueran de clase C0, entonces el producto Ixf excede los 20 kA \cdot Hz, por lo que se vuelve necesario el uso de inductancias de amortiguamiento. En la Tabla 1 se presentan resultados para algunos valores de esta inductancia obtenidos mediante cálculo aproximado y en la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos mediante simulaciones.

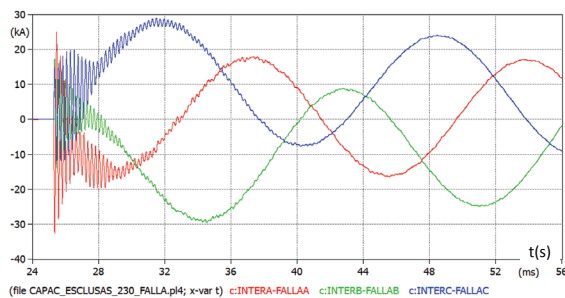


Figura 14: Corriente total simulada de falla terminal en el interruptor DLT2 para fases a, b y c

Tabla 1: Valor de TLI obtenido mediante cálculo aproximado

| CÁLCULO ANALÍTICO DE INDUCTANCIA DE AMORTIGUAMIENTO * | | | | |
|---|---------------------------|-------------------|-------------|-------|
| CLASE DE INTERRUPTOR | C0 | | | |
| | Valor de inductancia (mH) | I pico máximo (A) | f osc. (Hz) | I x f |
| Sin inductancia | 35 800 | 5 042 | 181E+6 | |
| 0,5 | 22 567 | 3 178 | 72E+6 | |
| 1,5 | 15 215 | 2 143 | 33E+6 | |
| 2,5 | 12 239 | 1 724 | 21E+6 | |
| 2,7 | 11 828 | 1 666 | 20E+6 | |

* Los resultados se basan en aproximaciones del circuito.

Tabla 2: Valor de TLI obtenido mediante simulaciones

| VALOR DE INDUCTANCIA DE AMORTIGUAMIENTO MEDIANTE SIMULACIONES EN ATP | | | | |
|--|---------------------------|-------------------|-------------|-------|
| CLASE DE INTERRUPTOR | C0 | | | |
| | Valor de inductancia (mH) | I pico máximo (A) | f osc. (Hz) | I x f |
| Sin inductancia | 32 675 | 4 367 | 143E+6 | |
| 0,5 | 22 422 | 3 003 | 67E+6 | |
| 1,5 | 16 800 | 2 079 | 35E+6 | |
| 2,5 | 14 819 | 1 748 | 26E+6 | |
| 3 | 13 671 | 1 450 | 20E+6 | |

En la Fig. 15 se observa cómo actúan diversos valores de TLI en la disminución del valor pico y frecuencia de oscilación de la corriente *outrush*.

Los resultados de las simulaciones y de cálculos aproximados son parecidos, lo que indica que, para una estimación inicial del valor de TLI se puede usar (3) y (4) pero el valor de construcción debe ser obtenido mediante simulaciones en programas del tipo ATP.

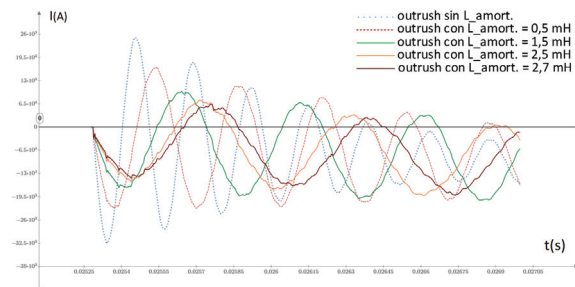


Figura 15: Corrientes *outrush* calculadas para diferentes valores de TLI

En la Fig. 16 se presenta la corriente *outrush* de fase a usando una TLI de valor 3 mH, se observa que el valor pico máximo en la primera oscilación ha disminuido considerablemente permitiendo estar por debajo del límite de 20kA \cdot Hz para interruptores clase C0.

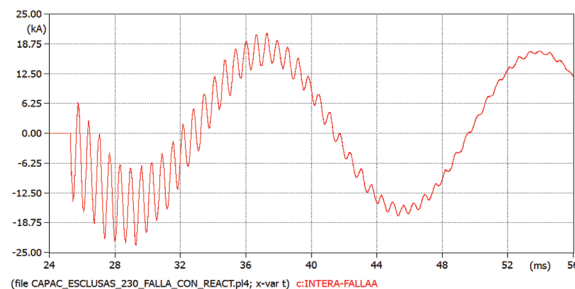


Figura 16: Corriente *outrush* simulada usando una TLI de 3 mH

5. ESTUDIOS ADICIONALES

Con los nuevos límites establecidos en la norma C37.06-2009 generalmente ya no es necesario el uso de reactancias de amortiguamiento siempre y cuando los interruptores de las líneas de transmisión que se conectan a la barra donde están conectados los bancos sean de tecnología en SF₆ y clase C1. Entonces, al no implementar las TLI, es necesario que se analicen otros temas que podrían ratificar o rectificar esta no necesidad [1]. Los análisis son:

a) Incremento transitorio del potencial de la puesta a tierra.

En bancos de capacitores con conexión en *Y aterrada*, las corrientes *inrush* y *outrush* fluyen hacia la malla de tierra provocando una elevación transitoria de su potencial. Un diseño adecuado y adecuadas prácticas de aterramiento pueden mitigar excesivos aumentos el potencial de tierra. Juntar todos los neutros de bancos de capacitores y luego aterrarlos en un único punto de la malla sirve para mitigar el incremento del potencial por *inrush*, pero no funciona para *outrush* que es un evento infrecuente. También puede incrementarse los voltajes de tierras remotas de redes de bajo voltaje para lo cual es necesario instalar descargadores de bajo voltaje entre el equipo y la conexión a tierra. En caso de no poder implementar las soluciones anteriores es necesario usar inductancias de amortiguamiento para lo cual estudios detallados determinarán el valor pico de corriente y frecuencia que provoquen un aceptable incremento transitorio de las puesta a tierra locales y remotas.

b) Acoplamiento con sistemas de control

Corrientes *inrush* y *outrush* de gran magnitud y alta frecuencia provocan inducción en cables de circuitos de control. El uso de cables apantallados y una trayectoria que no atraviese los puntos de conexión de los neutros de los bancos de capacitores y el punto único de conexión a tierra minimizará esta inducción.

c) Voltaje Secundario de los transformadores de corriente

Se debe usar descargadores en cada devanado secundarios de los transformadores de corriente (TC) y desde el punto neutro de los TC a la tierra local. Los descargadores deberán ser instalados lo más cerca posible a los devanados secundarios de los TC.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la armonización actual de las normas IEC e IEEE para interruptores que maniobran corrientes capacitivas no es necesario la inclusión de reactancias de amortiguamiento en serie con los bancos de capacitores (2x60 MVar) que serán instalados en la subestación Las Esclusas a nivel de 230 kV debido a que los interruptores de las líneas de transmisión conectadas a la barra de 230 kV son de tecnología en SF₆, clase C1, y el valor de la corriente capacitiva de descarga de los bancos que atraviesan estos interruptores durante una falla terminal llega hasta los 35.8 kA pico, muy por debajo del límite de 89 kA. Si la clase de aquellos interruptores hubiese sido C0, entonces se necesitaría instalar inductancias de amortiguamiento de 3 mH.

Para controlar las corrientes *inrush* el cierre sincronizado es la mejor opción, pero no se debe pensar que las inductancias de amortiguamiento están diseñadas para producir los mismos resultados que el cierre sincronizado. Si por alguna razón un banco no puede contar con su mando sincronizado deberá ser el primero en ser conectado ya que la impedancia del sistema limitaría la *inrush*. Si se requiere incrementar la confiabilidad, se recomienda adquirir una tarjeta adicional que sea el respaldo de cualquier mando sincronizado.

El cálculo analítico para determinar el valor de la inductancia de amortiguamiento, en caso de que sea requerida, da una buena aproximación; sin embargo, simulaciones detalladas en programas del tipo EMTP son necesarias para determinar el valor preciso.

En subestaciones del SNT donde se tiene planificado la instalación de bancos de capacitores a niveles de voltaje de 138 kV y 69 kV y que están en etapa de diseño, se recomienda actualizar los estudios de valoración de la inductancia de amortiguamiento. Presumiblemente, en base a este trabajo y a su respaldo teórico, ya no sería necesario este equipamiento siempre y cuando los interruptores sean de clase C1 o C2 y aislante interno en SF₆. Eso representa un ahorro económico.

Actualmente, el diseño de subestaciones se orienta a su compactación debido a problemas ambientales y de adquisición de terrenos. El prescindir de las inductancias de amortiguamiento permitiría un ahorro de espacio ya que altos valores de esta inductancia corresponde a elementos de gran volumen.

Si la inductancia de amortiguamiento ya no es requerida, se recomienda llevar a cabo análisis adicionales de los potenciales de tierra, inducción en circuitos de control, protección contra sobrevoltajes en los secundarios de los transformadores de corriente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Transient Limiting Inductor Applications in Shunt Capacitor Banks, Technical Report PES-TR16, November, 2014.
- [2] ANSI Standard C37.06 AC High-Voltage Circuit Breakers rated on a Symmetrical Current Basis – Preferred Ratings and Related Required Capabilities, December 1999.
- [3] IEC High Voltage Alternating Current Circuit Breakers, 2001.
- [4] AREVA, Introduction to Switching of Shunt Capacitor Banks, Tech News, 2007.
- [5] ABB, Controlled Switching – Buyer’s and Application Guide, 2013.
- [6] M. Alawie, Y. Fillion and A. Coutu, “Impact of high voltage shunt capacitor banks on general purpose circuit Breaker” International Conference on Power Systems Transients (IPST 2011), Delft, Netherlands.
- [7] M. Alawie, Y. Fillion and L. Gérin-Lajoie, “Recommended Configuration for High Voltage Shunt Capacitor Bank”, International Conference on Power Systems Transients (IPST 2013), Vancouver, Canadá.
- [8] IEEE Standard for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis – Preferred Ratings and Related Required Capabilities for Voltages Above 1000 V, IEEE Std. C37.06-2009, November 2009.
- [9] Siemens, Power Engineering Guide, Edition 7, 2012, pp 96.
- [10] S. Frontin, et. al., “Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas”, Brasília : Teixeira, 2013, pp 643.



Luis Manuel Dután Amay.

Nació en la ciudad de Azogues, provincia de Cañar, en 1978. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional donde también ha cursado estudios de Maestría en Ingeniería Eléctrica. Desde el 2009 es colaborador de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP - Unidad de Negocio Transelectric, en el departamento de Planificación y, actualmente, en la Subgerencia de Proyectos de Expansión – Área de Diseño de Subestaciones. Su campo de investigación se encuentra relacionado con transitorios electromagnéticos y diseño eléctrico y coordinación de aislamiento de líneas de transmisión y subestaciones.