



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

CONVERSIÓN DE FILTRO DE ARMÓNICOS A BANCO DE CAPACITORES EN EL CER DE SAN LORENZO

Ing. Gustavo Adolfo Aguayo Rojas

Administración Nacional de Electricidad

Paraguay

RESUMEN

El presente trabajo detalla el proceso de conversión de uno de los filtros del CER de San Lorenzo a banco de capacitores, llevado a cabo a partir de la avería de uno de los reactores del filtro, acaecida a fines de febrero del año 2008.

En razón de la inexistencia de un reactor de repuesto, y dada la urgencia operativa por restablecer la máxima salida capacitiva de tal compensador, se analizó la posibilidad de conversión de dicho filtro a banco de capacitores. Para ello, se recurrió a la simulación digital utilizándose el paquete de Sistemas de Potencia del software Matlab, para analizar la factibilidad de la conversión desde los aspectos de desempeño transitorio y armónico.

Las simulaciones digitales arrojaron como resultado que la transformación sería factible, siempre y cuando se utilizaran reactores auxiliares como limitadores de inrush en serie con el banco de capacitores. También se dejó entrever la conveniencia de la implementación del cierre sincronizado del interruptor de potencia del banco.

En este artículo se presentan los principales resultados de las simulaciones realizadas por medio de Matlab y se muestran algunas de las mediciones de campo registradas con posterioridad a la conversión. Además, se describe el proceso experimental de implementación del cierre sincronizado en uno de los filtros de armónicos de manera a su futura aplicación en el banco de capacitores, actualmente en desarrollo.

PALABRAS CLAVES

CER – capacitores – filtros – armónicos – transitorios – inrush – cierre sincronizado

1 INTRODUCCIÓN

El CER (Compensador Estático de Reactivos) de la estación San Lorenzo tiene por función principal la regulación continua y dinámica de tensión del anillo de 66 kV del SIN (Sistema Interconectado Nacional) que sirve al área metropolitana del Gran Asunción. Para este fin, este Compensador posee un rango continuamente variable de -80 a +150 MVar, siendo que para la absorción de reactivos el equipo dispone de dos TCRs (*Thyristor Controlled Reactors*), que al operar en los secundarios de un transformador reductor 66/6.5/6.5 kV dispuestos en delta y estrella respectivamente, en conjunto conforman un convertidor de 12 pulsos capaz de inyectar 80 MVar inductivos. Operando en paralelo con los TCRs se encuentra un filtro amortiguado sintonizado a la 11^a armónica, encargado de absorber las corrientes de elevado orden armónico que pudieran ser generadas por los TCRs. A la frecuencia fundamental este filtro también inyecta 25 MVar capacitivos. El resto de la potencia capacitiva es generada por otros 5 filtros de 25 MVar cada uno sintonizados a la 3^a armónica, conmutados por interruptores de potencia. En la figura 1 se muestra el diagrama unifilar del CER de San Lorenzo junto con las cuatro líneas de 66 kV que confluyen en dicha estación.

Desde su puesta en servicio, en el año 1985, este CER ha experimentado una gran variedad de fallas de aislación en los distintos equipos de potencia que conforman los filtros, como ser transformadores de corrientes, reactores lineales, interruptores de potencia. Los orígenes de estas averías se habrían debido en su mayoría a sobretensiones de maniobra durante la apertura de los filtros capacitivos, ocasionadas por el *restrike* (re-encendido del arco) en los interruptores de potencia [1].

A partir de la identificación del origen del problema, hace unos 10 años atrás se ha procedido al reemplazo de todos los interruptores de potencia originales de 72.5 kV por otros de 145 kV, de muy baja probabilidad de re-encendido, lo cual, junto con la instalación de descargadores de óxido de zinc en la entrada de los filtros, permitió que las fallas de aislación en los equipos de potencia prácticamente se extinguieran. Tal es así que tras la adopción de estas medidas paliativas solamente se había vuelto a observar la avería de dos reactores lineales, en los años 2002 y 2005 respectivamente, cuyas causales habían sido atribuibles más bien a la degradación progresiva que habrían venido sufriendo estos equipos a lo largo de los años a causa de las sobretensiones de apertura por *restrike* antes mencionadas.

Sin embargo, a fines de febrero del 2008, se produjo la avería del reactor de la fase S del filtro 5, el cual había sido puesto en servicio tan solo 10 años atrás, tras una falla catastrófica del equipo original. Por ello, dada la relativamente poca antigüedad de este reactor, tras la última falla experimentada se procedió a una exhaustiva medición de todos los capacitores y reactores del filtro, encontrándose que los mismos habían sufrido una moderada variación en sus parámetros nominales, probablemente a causa de la edad -en el caso de los capacitores-, de la temperatura, entre otros factores, lo que habría provocado que el filtro se sintonizara casi exactamente a 150 Hz. Esta cuasi perfecta sintonía a la 3^a armónica bien pudo haber sobrecargado los elementos del filtro, contribuyendo para la falla de aislación del reactor. Esto sin descartar del todo la posibilidad de nuevas ocurrencias de *restrike*.

Tras la avería del reactor de la fase S del filtro 5, ante la falta de un equipo de repuesto, y en virtud del pronunciado déficit de reactivos por el cual se hallaba atravesando el SIN en esos momentos, se intentó primeramente la pronta reparación del equipo, la cual resultó infructuosa sin embargo, por lo que inmediatamente a seguir se barajó la posibilidad de conversión del filtro de armónicos a banco de capacitores.

Para anticipar la factibilidad de la transformación propuesta, se recurrió previamente a la simulación digital de las distintas alternativas a través del paquete de sistemas de potencia del software Matlab, lo cual se describe en la sección 2 de este artículo, mientras que en el siguiente apartado se presentan algunos de los principales resultados de campo que demuestran el desempeño de la solución adoptada. En la sección 4 se discute una alternativa de optimización del desempeño transitorio del filtro devenido en banco de capacitores, consistente en la futura implementación de un esquema de cierre sincronizado del interruptor. Finalmente se esbozan las principales conclusiones.

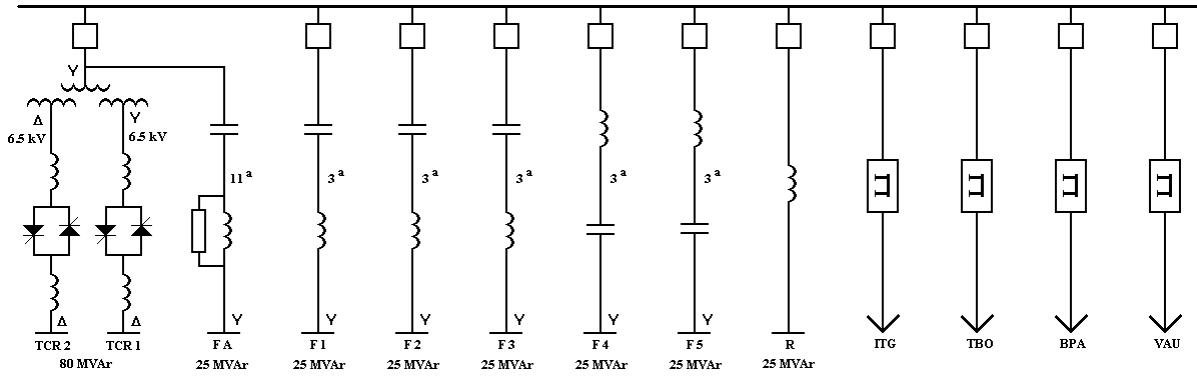


Figura 1: Diagrama unifilar del CER junto con las 4 líneas de 66 kV de la estación San Lorenzo

2 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

A partir de la imposibilidad de reparación del reactor averiado, como mencionado antes, se pasó a analizar por medio del Matlab otras alternativas de restauración total de los reactivos capacitivos del CER, las cuales son descritas a seguir:

2.1 Eliminación Total de los Reactores Lineales

En algunos casos particulares en los que los bancos de capacitores se hallan operando individualmente y/o que presentan una relativamente elevada inductancia parásita inherente a la topología de las barras, puede ser factible la operación de un banco de capacitores sin la adición de ningún tipo de impedancia adicional. Uno de los factores determinantes a la hora de evaluar la posibilidad de conexión directa de un banco de capacitores a una red de alta tensión lo constituye su desempeño transitorio, en particular los transitorios de energización o inrush, así como los de apertura.

Con el objeto de analizar la factibilidad del completo bypass de los reactores, el filtro 5 detallado en la Fig. 2a, así como el resto del sistema mostrado en la Fig. 1 fueron pormenorizadamente modelados utilizándose el paquete de sistemas de potencia de Matlab, y a seguir el desempeño del sistema fue analizado desde el punto de vista transitorio, según lo descrito más abajo.

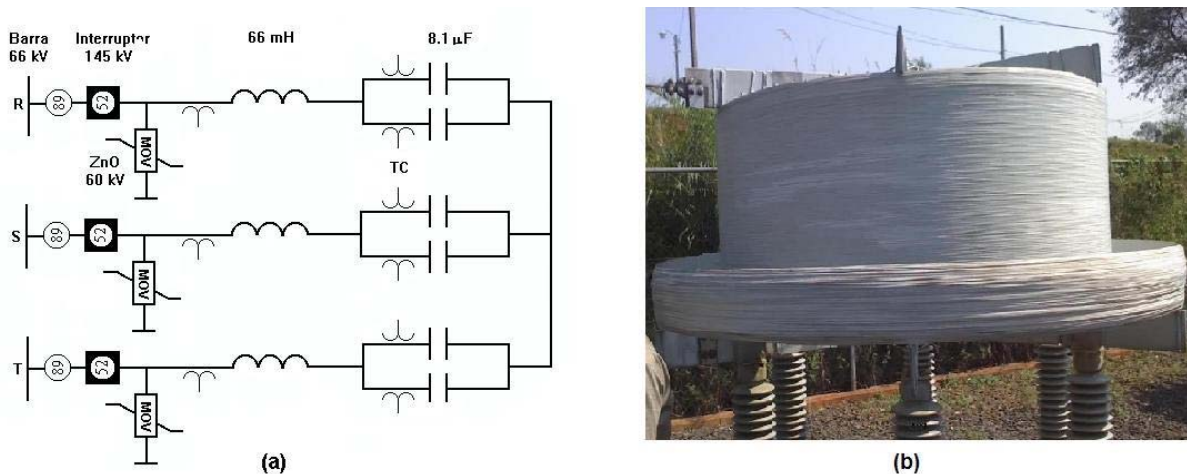


Figura 2: (a) Diagrama de potencia del filtro 5; (b) Imagen del reactor lineal del filtro de 3ª armónica

2.1.1 Análisis Transitorio sin Reactor Lineal

Para simular la eliminación del reactor nominal del filtro 5 -de 66 mH-, éste fue reemplazado por un reactor de 35 μ H, estimado a partir de [2], el cual representa la inductancia parásita desde el punto de conexión de los capacitores hasta las barras de 66 kV. A continuación, el modelo fue sometido a una serie de energizaciones en las condiciones más adversas desde el punto de vista transitorio, y los valores más críticos en términos de sobretensiones y sobrecorrientes sobre los principales equipos involucrados, en este caso los bancos de capacitores y los interruptores de potencia, han sido comparados con las solicitaciones máximas permitidas por las normas internacionales para este tipo de equipos. Abajo se resumen algunos de estos límites máximos establecidos:

Bancos de Capacitores: según la norma IEC 60871-1 [3], el valor de pico de la corriente de inrush debe ser como máximo igual a 100 veces el valor de la corriente rms del banco ($I_{pico} \leq 100 I_{rms}$), mientras que el valor máximo de la sobretensión transitoria no debe sobrepasar los 2.84 veces la nominal, por no más de medio ciclo ($V_{pico} \leq 2.84 PU$).

Interruptores: en la tabla 1 se muestran los valores límites dictados por los standards IEC [4] e IEEE [5], con relación a las solicitaciones máximas recomendadas para energizaciones del tipo back-to-back, es decir, al energizarse un capacitor en paralelo con uno o más capacitores ya en servicio.

Norma	Imáx [kA pico]	f [Hz]	I x f [A/s] x 10 ⁷
IEEE C37.06 general	-	-	2.0
IEEE C37.06 definido	16	4250	6.8
IEC 62271-100	20	4250	8.5

Tabla 1: Límites de inrush para interruptores durante la energización de bancos de capacitores

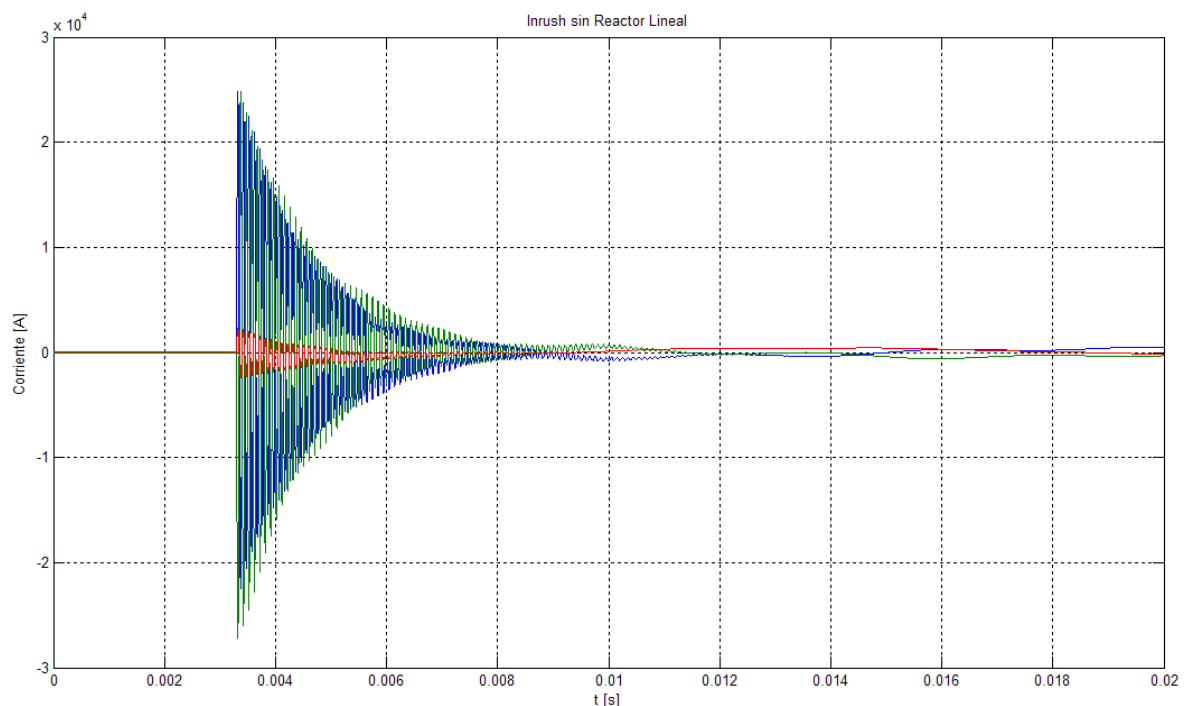


Figura 3: Corrientes simuladas del Inrush en el banco de capacitores sin los reactores de 66 mH

En la Fig. 3 se muestra el resultado de la simulación del cierre del banco de capacitores -sin reactores físicos-, energizado en la condición más severa posible, o sea, cuando la tensión V_{R-S} es máxima y con los otros 5 filtros ya en servicio. Del análisis del gráfico se observa que la corriente de pico alcanza unos 28 kA, y la frecuencia máxima es de en torno de 10 kHz, durante el primer semiciclo de la fundamental. Comparándose estos datos con los límites establecidos por las normas se evidencia que tales valores de inrush se encuentran fuera de los rangos permisibles, tanto para los bancos de capacitores como para el interruptor de potencia. En otras palabras, no habría sido factible el bypass directo de los reactores del filtro 5. (Observación: la corriente rms del banco de capacitores es de aproximadamente 200 A, por lo que $I_{pico} = 28 \text{ kA} > 100 * 200 = 20 \text{ kA}$)

2.2 Eliminación Parcial de los Reactores Lineales

Vista la imposibilidad de la directa eliminación de los reactores lineales de los filtros, se investigó en la literatura cuáles eran los valores de las inductancias limitadoras de inrush más comúnmente empleados, y se observó que este rango se encontraba en muchos casos entre algunos cientos de microHenries a algunos miliHenries. De la comparación de esos valores con los de los reactores auxiliares de ajuste de taps que por lo general acompañan a todos los reactores de núcleo de aire para posibilitar el ajuste fino de sintonía, se vislumbró que estos equipos -que nunca se han averiado en los reactores del CER-, tal vez podrían ser utilizados como inductancias limitadoras del inrush en el filtro 5. Para corroborar esto, se analizó en Matlab el desempeño transitorio y armónico del capacitor en serie con un reactor de 3.6 mH, que es el valor máximo proporcionado por los reactores auxiliares de ajuste de taps, (denominados en Ande como “anillos de Saturno” - ver Fig. 2b).

2.2.1 Análisis Transitorio con Reactor Auxiliar de Taps

En la Fig. 4 se exhibe el resultado de la simulación de una maniobra de cierre del capacitor en serie con la inductancia auxiliar, estando los demás filtros capacitivos también en servicio. Como se observa en el gráfico, las corrientes de pico alcanzan un valor máximo de alrededor de 2.7 kA aproximadamente, con una frecuencia máxima de unos 500 Hz. Cotejándose estos valores con los de la Fig. 3 y con los límites establecidos por las normas se observa que el capacitor, en serie con la inductancia de 3.6 mH, presenta un desempeño aceptable desde el punto de vista transitorio.

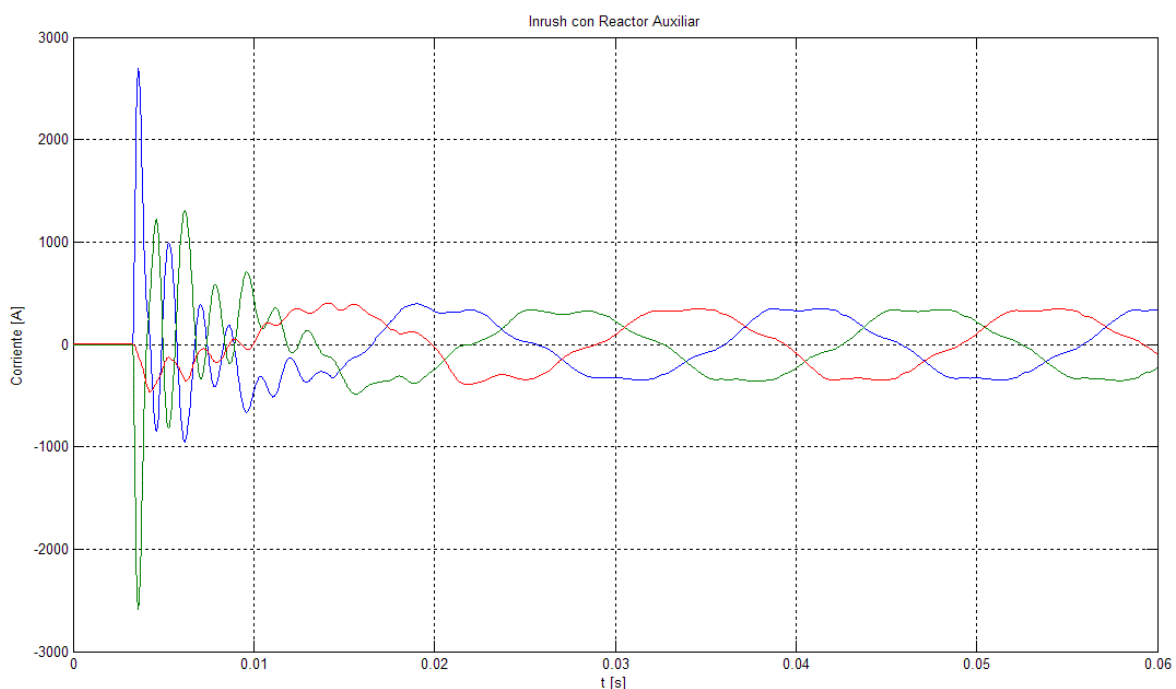


Figura 4: Corrientes simuladas del Inrush en el banco de capacitores con reactor auxiliar de 3.6 mH

2.2.2 Análisis Armónico con Reactor Auxiliar de Taps

Como se halla bien documentada en la literatura, la operación en paralelo de filtros y bancos de capacitores por lo general no es recomendable [6], ya que en ciertos casos la operación en conjunto de estos equipos tiende a desplazar la impedancia armónica equivalente hacia puntos de órdenes armónicas características, como la 5ª o 7ª, lo cual puede exacerbar la distorsión armónica del sistema.

Para evaluar la influencia del filtro convertido en capacitor al operar en conjunto con los otros 5 filtros, al modelo detallado de la Fig. 1 le fue adicionado un convertidor de 6 pulsos operando en la barra de 66 kV a través de un transformador 66/6 kV, y la carga y ángulo de disparo de este rectificador fueron ajustados de tal manera a reproducir de manera cercana los niveles de armónicos “ambientales” existentes en el CER de San Lorenzo, recabados a partir de mediciones de rutina. A seguir fueron simulados los niveles de distorsión armónica THD (*Total Harmonics Distortion*) de tensión para distintas condiciones operativas, que contemplaban la entrada y salida de cada uno de los filtros para varios escenarios de carga en el sistema: leve, media y alta. Los resultados así obtenidos fueron comparados luego con los recomendados por la norma de Armónicos IEEE Std 519 [7], la cual establece básicamente que para niveles de tensión superior a 69 kV e inferior a 121 kV, la distorsión total THD debe ser como máximo 5.0 %, mientras que la contribución de los armónicos individuales no debe sobrepasar los 3.0 % en ningún caso. En la Fig. 5 se grafican los resultados más significativos de estas simulaciones.

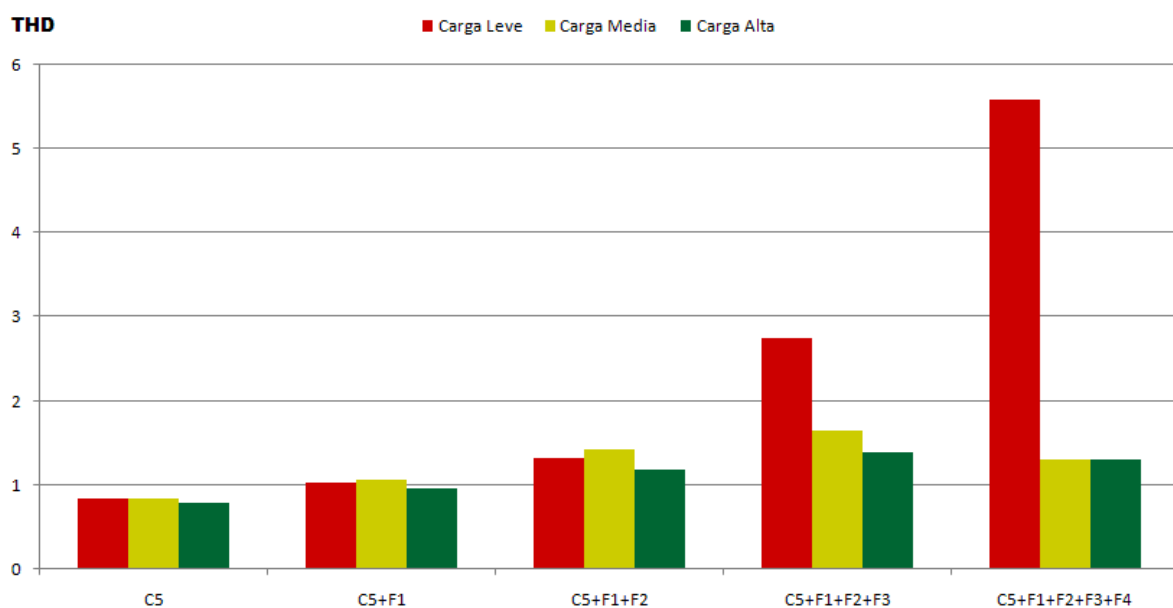


Figura 5: THD de tensión 66 kV al operar el capacitor más los filtros en carga leve, media y alta

De la Fig. 5 se desprende que para los escenarios de carga media y alta en el sistema las distorsiones armónicas no son significativas, y que los filtros (F1 al F4) pueden coexistir perfectamente con el capacitor (C5), ya que el THD de tensión se sitúa en torno a 1 %, alcanzando un pico de no más de 1.65 %. Sin embargo, para el caso de carga leve el panorama cambia sustancialmente, notándose que la distorsión armónica se dispara a medida que se van incluyendo más filtros en paralelo con el capacitor, llegándose a alcanzar un pico de THD igual a 5.58 % en el caso extremo de operación de todos los elementos capacitivos. Esto es debido a que, al operar todos los filtros en conjunto con el capacitor, uno de los picos de la impedancia armónica equivalente se sitúa exactamente en la 5ª armónica, provocando una resonancia paralela en el sistema. Esto se grafica en la Fig. 6, la cual muestra la impedancia armónica con los puntos de resonancia para el caso en que todos elementos capacitivos estuvieran operando durante un período de carga muy baja en el sistema. También se muestran los armónicos individuales de tensión para este caso.

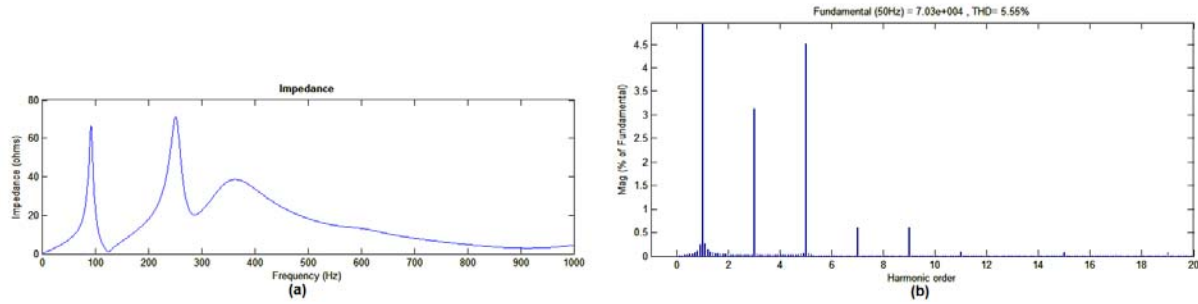


Figura 6: Todos los filtros en servicio en carga leve: a) Impedancia Armónica; b) Espectro armónico

Ahora bien, a pesar de que la distorsión armónica bajo las citadas circunstancias sería superior a lo estipulado por el IEEE Std 519, es importante señalar que esta no es una condición operativa normal en el sistema, ya que al operar en carga leve lo usual es que la mayoría de los filtros estén desconectados, puesto que los reactivos requeridos por el sistema en ese tipo de situaciones suelen ser más bien inductivos antes que capacitivos. En otras palabras, al convertir el filtro a banco de capacitores, tampoco en carga leve debería existir ningún inconveniente en términos de armónicos durante condiciones operativas reales.

3 PUESTA EN SERVICIO

Una vez corroborada la factibilidad de la transformación del filtro a capacitor en los aspectos operativos de los regímenes permanente, transitorio, y armónico, tras ser efectuado el bypass de los reactores principales, el banco de capacitores en serie con los reactores auxiliares de 3.6 mH fue puesto nuevamente en servicio el 14 de marzo del 2008.

3.1 Transitorios de Energización de Campo

La Fig. 7 muestra el inrush de la primera energización del capacitor, en la cual se observa que los valores de pico alcanzaron unos 2.54 kA, con una frecuencia cercana a los 700 Hz, valores bastante similares a los anticipados por medio de las simulaciones digitales (ver Fig. 4).

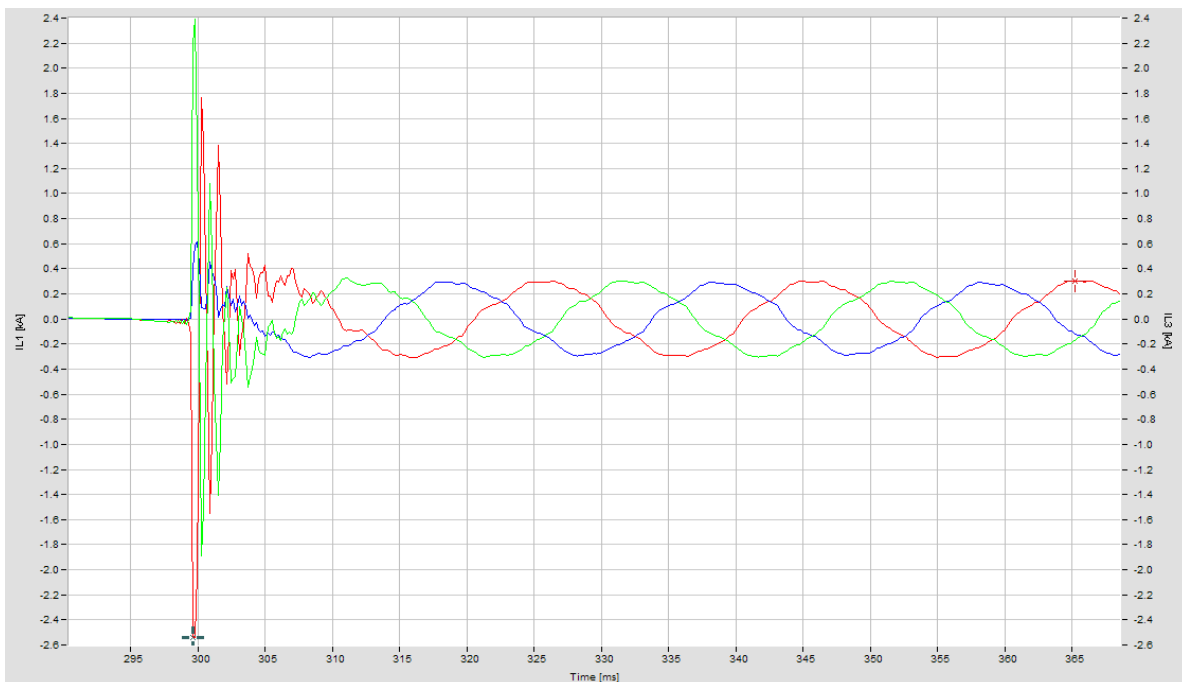


Figura 7: Corrientes medidas del Inrush en el banco de capacitores con reactor auxiliar de 3.6 mH

3.2 Monitoreo de Armónicos

A partir de la puesta en servicio del banco de capacitores, se efectuaron mediciones de armónicas durante períodos de tiempo relativamente largos, de manera a monitorear su desempeño bajo distintas condiciones operativas. En la Fig. 8 se muestra uno de los resultados de tales mediciones, registradas en el período del 29/05/08 al 10/06/08, lapso durante el cual la carga en el sistema se mantuvo relativamente baja, como consecuencia del clima invernal reinante en esa época. Como se evidencia en el gráfico, aún bajo esas condiciones el sistema no presentó ningún inconveniente en su desempeño armónico, manteniéndose el THD por debajo de los 1.65 %. Esto debido a que con carga baja en el sistema la cantidad de filtros en operación simultánea es también reducida, no existiendo por ello peligro de resonancia armónica, como se anticipara a través de las simulaciones.

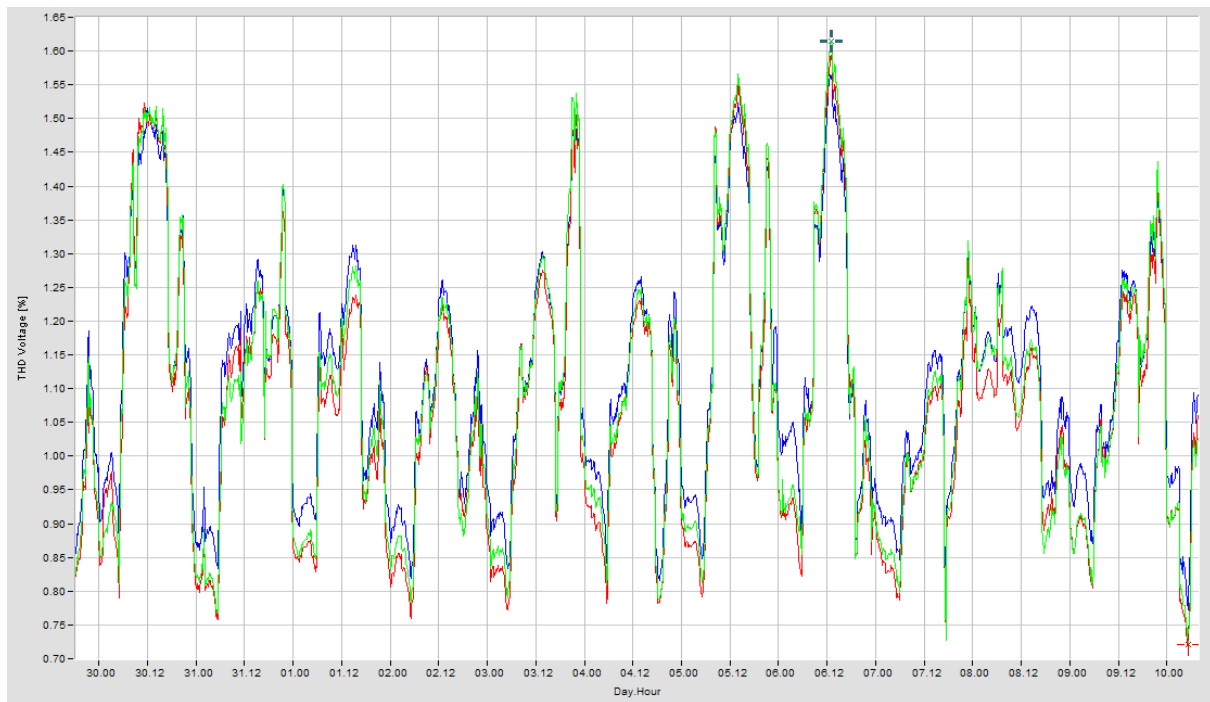


Figura 8: THD de tensión 66 kV en el CER en época de carga leve - período del 29/05/08 al 10/06/08

4 CIERRE SINCRONIZADO

Por más de que la incorporación de reactores limitadores del inrush permite el control efectivo de los transitorios locales asociados a la maniobra de bancos de capacitores, aún así en ocasiones pueden presentarse algunos efectos remotos indeseables durante las operaciones de cierre y/o apertura. Estos fenómenos, que se encuentran claramente tipificados en la literatura [8], pueden consistir por ejemplo en la magnificación remota de tensión en bancos de capacitores operando en un nivel de tensión inferior, o la aparición de sobretensiones de fase en transformadores operando en vacío, entre otros. Por esta y otras razones es que es deseable siempre minimizar al máximo los transitorios de maniobra, y para el caso de bancos de capacitores una de las opciones disponibles para tal efecto suele ser la utilización del cierre sincronizado del interruptor de potencia [9].

Para los bancos de capacitores o filtros con el neutro aislado operando a 50 Hz, los instantes de cierre de cada una de las fases del interruptor deben ser, según la teoría:

- Los polos de las fases R y S deben cerrar cuando la tensión V_{R-S} cruza por cero.
- El polo de la fase T debe cerrar 90° eléctricos después, es decir con un atraso de 5 ms.

4.1.1 Simulación Digital del Cierre Sincronizado

El cierre del interruptor del capacitor, en serie con el reactor auxiliar de 3.6 mH, fue simulado en Matlab siguiéndose la secuencia de conmutación arriba descrita, y sus resultados se muestran en la Fig. 9, en la cual se percibe que los sobrepicos tanto de tensión como de corriente prácticamente desaparecerían con el cierre controlado. (Comparar las figuras 4 y 7 con la 9b).

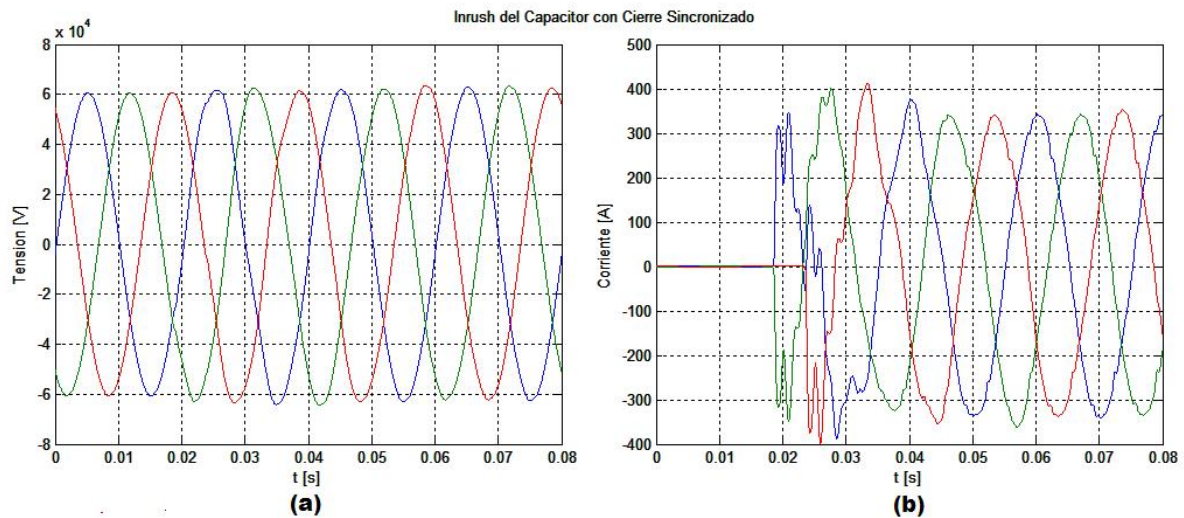


Figura 9: Simulación del Inrush del capacitor con cierre sincronizado: a) Tensiones; b) Corrientes

4.1.2 Implementación Experimental

Dadas las evidentes ventajas otorgadas por el cierre sincronizado, se ha hecho un esfuerzo por implementarlo en el nuevo banco de capacitores, a pesar de que en la práctica se ha tropezado con algunas dificultades debido a que todos los interruptores de los filtros del CER son de mando tripolar, lo que implica que la operación del polo de la fase T debe ser atrasada mecánicamente 5 milisegundos con relación a los otros 2 polos, que por su vez deben ser sincronizados eléctricamente para cerrar durante el cruce por cero de la tensión V_{R-S} .

Con respecto al sincronismo eléctrico para el comando de los polos de las fases R y S, éste ha sido diseñado a partir de un sencillo sincronizador de cierre implementado a base de un microcontrolador digital, el cual, al recibir una orden de cierre emitida por el sistema de control del CER, espera por un cruce por cero de la tensión V_{R-N} , momento a partir del cual introduce un tiempo de espera fijo tras lo cual activa un relé de estado sólido (*SSR – Solid State Relay*), que emite un pulso de comando al interruptor de tal manera a que el instante de cierre efectivo de los polos R y S se produzca exactamente cuando la tensión V_{R-S} esté cruzando por cero. El tiempo de espera por su vez es ajustable libremente en un rango de 0 a 20 ms, por medio de un puerto de comunicación RS-232 que se conecta con una laptop. En la Fig. 10a se muestra el diagrama de bloques del sincronizador de cierre diseñado.

En cuanto al escalonamiento mecánico del interruptor del capacitor 5 -de tipo Siemens 3AP1-, se realizó un primer intento por ajustarlo sin llegarse a alcanzar los 5 milisegundos de atraso sin embargo. Entonces, se optó por intentar la implementación de tal discordancia de polos en el interruptor ABB LTB 145 D1 del filtro 4, el cual según el fabricante, sería más adecuado para maniobras de cierre controlado. De ese modo, por medio del ajuste de las bielas de transmisión del interruptor se consiguió el atraso del polo de la fase T, como requerido, lo cual junto con el ajuste del tiempo de espera del sincronizador antes detallado, posibilitó la optimización del inrush del filtro 4, cuya operación real se ejemplifica en el oscilograma de la Fig. 10b. Ahora bien, para que este esquema de cierre controlado pueda ser replicado de forma permanente en el banco de capacitores todavía deben ser levantadas algunas limitaciones técnicas en cuanto al escalonamiento mecánico del interruptor, lo cual sigue en andamio actualmente.

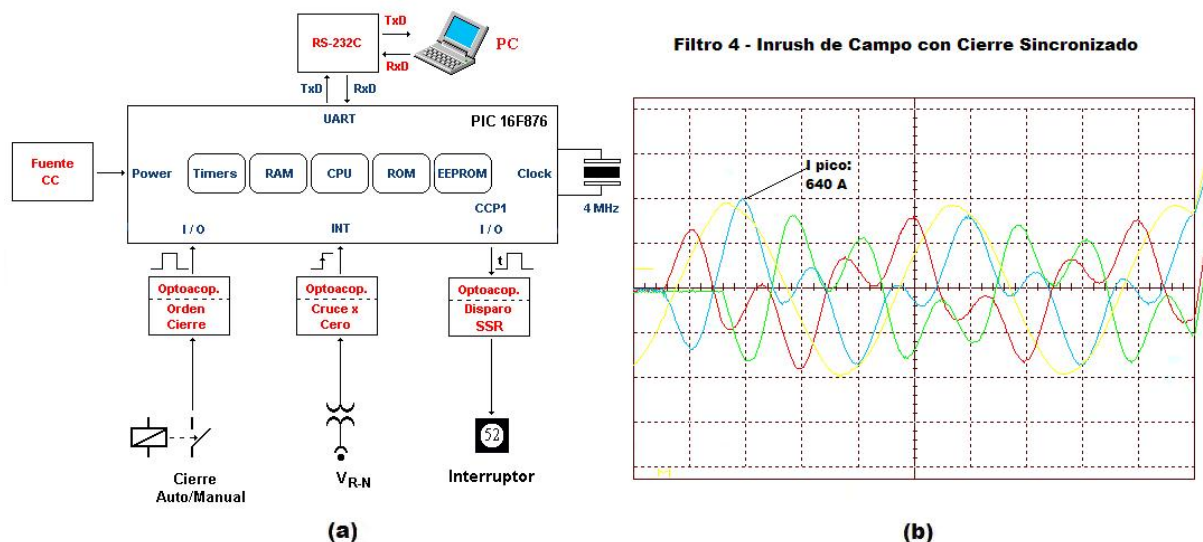


Figura 10: a) Diagrama de bloques del Sincronizador de cierre; b) Inrush sincronizado del filtro 4

5 CONCLUSIONES

- Desde el punto de vista transitorio, habría sido inviable la directa eliminación de los reactores lineales del filtro 5, a causa del excesivo inrush en los capacitores y en el interruptor.
- Sin embargo, ha quedado demostrada la factibilidad del bypass de los reactores principales, utilizándose los reactores auxiliares de taps que los acompañan, de manera a limitar de forma segura los niveles de inrush resultantes.
- Si bien que la operación conjunta en carga leve de todos los filtros en paralelo con el capacitor podría teóricamente acarrear un riesgo de resonancia armónica, en la práctica esta posibilidad está casi descartada, puesto que en épocas de carga baja el sistema nunca requiere del aporte reactivo de la totalidad de los filtros. Esto ha quedado corroborado a través de las mediciones.
- Han quedado sentadas las bases para la implementación del cierre sincronizado del capacitor.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Duré A., Aguayo G., Sosa L.; “CER – Filtros en Derivación – Fallas de Aislación de Equipamientos de Potencia”, III SESEP – Cigré, 1998
- [2] IEEE Std C37.012 – IEEE Application Guide for Capacitive Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis
- [3] IEC 60871-1. Shunt Capacitors for AC Power Systems having a Rated Voltage above 1 kV. Part 1
- [4] IEC 62271-100 – High Voltage Alternating-Current Circuit Breakers
- [5] IEEE Std C37.06 – AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Basis
- [6] Northeast Power Systems Inc., “Do not mix Standard Shunt Capacitors Banks with Harmonic Filter Banks”, <http://www.nepsi.com/donotmix.htm#>
- [7] IEEE Std 519 – IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- [8] IEEE Std 1036 – IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors
- [9] Alexander R., “Synchronous Closing Control for Shunt Capacitor Banks”, IEEE-PAS 104, 1985