

Una alternativa para la
**reducción del flicker y
compensación reactiva en
plantas siderúrgicas**
empleando filtros activos en media
tensión



Filtros activos en media tensión como alternativa al uso de SVC para el mejoramiento de la calidad de energía en plantas siderúrgicas

Active Filters in Medium Voltage as an Alternative to the Use of SVC for the Improvement of Energy Quality in Steel Plants

RESUMEN

En las plantas siderúrgicas, es necesario contar con equipos que puedan fundir los metales empleando grandes corrientes (hornos de arco). Al generar cortocircuitos consecutivos para fundir el metal, los hornos de arco introducen problemas de calidad de energía a las otras áreas que forman parte del proceso como las plantas de laminación, de oxígeno, de acería, de hierro, fajas y muelles. Durante su trabajo de fundición y refinado, originan problemas de desbalance de fases, fluctuaciones de tensión, flicker, transitorios de maniobra y generación de armónicos. El proceso productivo en este tipo de plantas también hace necesario compensar el factor de potencia en la barra principal y en cada subplanta.

Las soluciones tradicionales han sido el uso de bancos de compensación reactiva y filtros pasivos en media tensión, teniendo el mayor inconveniente en no poder controlar la generación del flicker por la operación de los hornos de arco. Con el desarrollo de la electrónica de potencia, se cuenta con el equipo SVC (static var compensator), el cual es implementado en muchas plantas siderúrgicas. Sin embargo, si bien esta solución es efectiva, también es costosa y ocupa mucho espacio.

Este trabajo muestra una alternativa para la reducción del flicker y la compensación reactiva que puede implementarse en plantas siderúrgicas, empleando filtros activos en media tensión.

Se procesaron los datos de mediciones de calidad de energía y parámetros eléctricos de una planta siderúrgica en el Perú por 120 días, obtenidos del sistema de gestión y monitoreo de energía y de la instalación de analizadores de redes. Se ha modelado el sistema en el software ETAP, se ha dimensionado el SVC y la solución con filtros activos en media tensión (realizando el análisis comparativo correspondiente). Se muestra la ingeniería básica de esta solución, demostrando que la solución con filtros activos en media tensión es una alternativa eficiente

desde el punto de vista técnico y económico para aplicaciones en plantas siderúrgicas.

ABSTRACT

Steel plants need to have metal melting equipment that use high electrical current (arc furnaces). When generating consecutive short circuits to melt the metal, arc furnaces make other production areas such as rolling mills, oxygen mills, steel mills, iron shafts and docks have energy quality-related issues. Among the problems that may arise during melting and refining processes are phase imbalance, voltage fluctuations, flickering, transients and harmonics. In this type of plant production processes demand to balance the power factor between the main bus bar and every sub-plant.

Among the common solutions are reactive power compensation and passive filtering in medium voltage, being the flicker control a major inconvenience when operating arc furnaces. With the development of power electronics, SVC (Static Var Compensator) has been implemented in many steel plants. While this solution is effective, it is expensive and takes up space to get installed.

This article proposes an alternative to flicker reduction and reactive compensation that can be implemented in steel plants with the use of active filters in medium voltage.

The data of energy quality measurements and electrical parameters of a steel plant in Peru were processed for 120 days. The information was collected from an energy management and monitoring system and network analyzers. The electrical system was modeled in the ETAP software, the SVC was measured and active filters in medium voltage were used under proper comparative analysis. Active filters in medium voltage are technically and economically efficient to use in steel plants.



Palabras Claves

SVC (compensador estático de potencia reactiva), filtros activos, hornos de arco, flicker, armónicos.

Key words

SVC (static var compensator), active filters, arc furnaces, flicker, harmonics.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria siderúrgica es una de las más importantes del proceso productivo del país, no solo por la necesidad de producción de hierro y aleaciones para la construcción, sino también por el alto consumo de energía de las plantas. En su actividad se originan varios problemas desde el punto de vista eléctrico como variación de tensión, déficit de potencia reactiva y *flicker*. Una planta siderúrgica cuenta con diferentes subplantas como son: laminación, hornos, área de fundición, puente grúas y acería. Siendo los equipos principales los hornos de arco para la fundición de hierro y la elaboración de acero. Estos hornos de arco operan como cortocircuitos trifásicos desbalanceados de gran potencia y se representan como grandes cargas no lineales y de comportamiento no característico. Debido a las elevadas demandas de potencia que intervienen en la fundición de metal, se ocasionan problemas al sistema eléctrico que afectan la calidad de energía tales como: fluctuaciones de tensión, desbalances de carga y distorsiones de forma de onda.

El proceso productivo en este tipo de plantas también hace necesario compensar el factor de potencia en la barra principal y en cada subplanta. Las soluciones tradicionales han sido el uso de bancos de compensación reactiva y filtros pasivos en media tensión, teniendo el mayor inconveniente de no poder controlar la generación del *flicker* por la operación de los hornos de arco. Por este motivo, se tenía que buscar soluciones alternativas, en un primer momento a través de inductancias y capacitancias series, siendo ineficiente debido a la variación dinámica de la carga. A ello se le suma que las normas y recomendaciones establecían límites para la generación de *flicker* que eran superados por cualquier operación en este tipo de plantas. Con el desarrollo de la electrónica de potencia, se propusieron los primeros modelos de SVC, los cuales vienen siendo implementados en muchas plantas que procesan el acero. Esto se evidencia en los artículos técnicos de Yvan Ponce [1], Eduardo Illanes [2] (quien muestra el performance de los SVC light) y Daniel Sullivan [3].

Debido a la necesidad de utilizar hornos de arco para la fundición de acero, es importante contar con equipos que controlen la tensión y reduzcan el efecto del *flicker*. Actualmente, se propone al SVC como la principal solución empleada, debido a su rápida respuesta. Sin embargo, se debe de considerar a los filtros activos como una gran alternativa pues ofrece beneficios similares. En este sentido, es importante establecer las ventajas de usar una solución respecto a la otra.

FUNDAMENTOS

El SVC ofrece una respuesta rápida en el control de la tensión mediante la compensación de potencia reactiva utilizando tiristores de conmutación de alta velocidad, como lo muestran N. E. Deryuzhkova, V. A. Solovyev y A. V. Kupova [4] en su control inteligente del SVC para su aplicación en hornos de arco.

En [5], S. I. Deaconu, M. Topor, G. N. Popa y I. Popa, analizan las condiciones de funcionamiento de un horno de arco eléctrico con el fin de evaluar la mejor opción para solucionar el problema del consumo de energía. Evalúan además el rendimiento de los equipos, prueban diferentes puntos de ajustes para los hornos

de arco. Concluyen que la solución de compensación de energía reactiva con SVC es buena, pero también tiene los costos más altos.

En [6], se analiza la interacción entre los SVC y los filtros pasivos en una planta que cuenta con hornos de arco, realizando mediciones en campo y concluyendo que cuando operan los filtros pasivos la distorsión armónica de tensión en el sistema es dos veces más pequeña que cuando se desconectan.

Los filtros activos de potencia se ofrecen también como soluciones a los problemas de calidad de energía en baja tensión, entre sus funciones encontramos la mitigación de armónicos, compensación de potencia reactiva, control de factor de potencia, regulación de la tensión y reducción del Flicker.

En un principio los filtros activos eran aplicados a sistemas de 3 hilos basando su funcionamiento en la teoría de potencia instantánea p-q publicada por H. Akagi, Y. Kanazawa y A. Nabae [7]. Años más tarde, en Sudamérica, los investigadores M. Áreles y E. Watanabe desarrollaron la estructura de control de 3 hilos a 4 hilos. [8].

Los filtros activos son una tecnología que comenzó con sus primeros prototipos a nivel investigación la década de los 80's [7], [9]. La evolución tecnológica ha logrado que actualmente sean equipos muy empleados en baja tensión en sistemas comerciales, industriales y mineros. Estos equipos son fabricados para baja tensión, sin embargo, al conectarlos a un transformador elevador podemos llevar sus potencialidades a media tensión.

En [10] J. Dolezal, A. G. Castillo, J. Tlustý y V. Valouch, desarrollan topologías y control de filtros activos para la mitigación del *flicker*, en arreglos serie y paralelo, mostrando las características operativas básicas de los parámetros de un sistema de distribución de energía real con un horno de arco y SVC. El artículo promueve la instalación de un filtro activo para la mitigación de la fluctuación de voltaje, concluyendo que la acción combinada de filtros activos y SVC son beneficiosos para el sistema. De igual manera, M. Takeda, K. Ikeda, A. Teramoto y T. Aritsuka [11] muestran las ventajas de los filtros activos para suprimir el flicker en comparación con el reactor controlado por tiristores (TCR) tipo SVC.

Otra aplicación interesante de la acción conjunta del SVC con los filtros activos es mostrada por H. Kojima, K. Matsui y K. Tsuboi [12]. Este artículo está orientado a la acción del filtro activo para mitigar los órdenes armónicos producidos por los SVC, empleando un inversor tipo NPC-PWM. En [13], se emplea una configuración en delta de un TCR y un filtro activo enseriados por fase, mostrando sus ventajas y potencialidades.

En Perú se tienen dos industrias siderúrgicas que trabajan en la fundición de acero: la Empresa Siderúrgica del Perú y Aceros Arequipa, donde solo en la segunda ha sido instalado un equipo SVC de 170 MVar para solucionar los problemas mencionados anteriormente.

El presente trabajo propone la implementación de filtros activos aplicados en media tensión, con el fin de reducir el *flicker* y controlar la tensión en una planta siderúrgica del Perú tomando como base a M. Takeda [11]; mostrando sus ventajas técnicas y económicas frente a una solución con SVC.

METODOLOGÍA

Diseño de un SVC (Compensador estático de var) para horno de arco

A. Principio de funcionamiento de un SVC

El SVC se encuentra constituido por un transformador de acoplamiento, válvulas de tiristores, capacitores y reactores. Los cuales al agruparse forman sus partes constitutivas: un bloque capacitivo fijo (FC) y capacitores conmutados por tiristores (TCR)

o reactores controlados por tiristores (TCR). La mayoría de los SVC implementados posee TCR [14], [15] y [16].

En esta parte del artículo, pondremos énfasis en el principio de funcionamiento de un SVC tipo FC/TCR.

La figura 1 muestra el principio de operación del SVC (FC/TCR). El objetivo en este esquema es mantener en un rango aceptable la tensión de la barra A. El FC entrega potencia reactiva capacitiva constante y el TCR consume una potencia reactiva inductiva variable mediante el control de los ángulos de disparo de los tiristores, los cuales se modifican de acuerdo a la necesidad de la red.

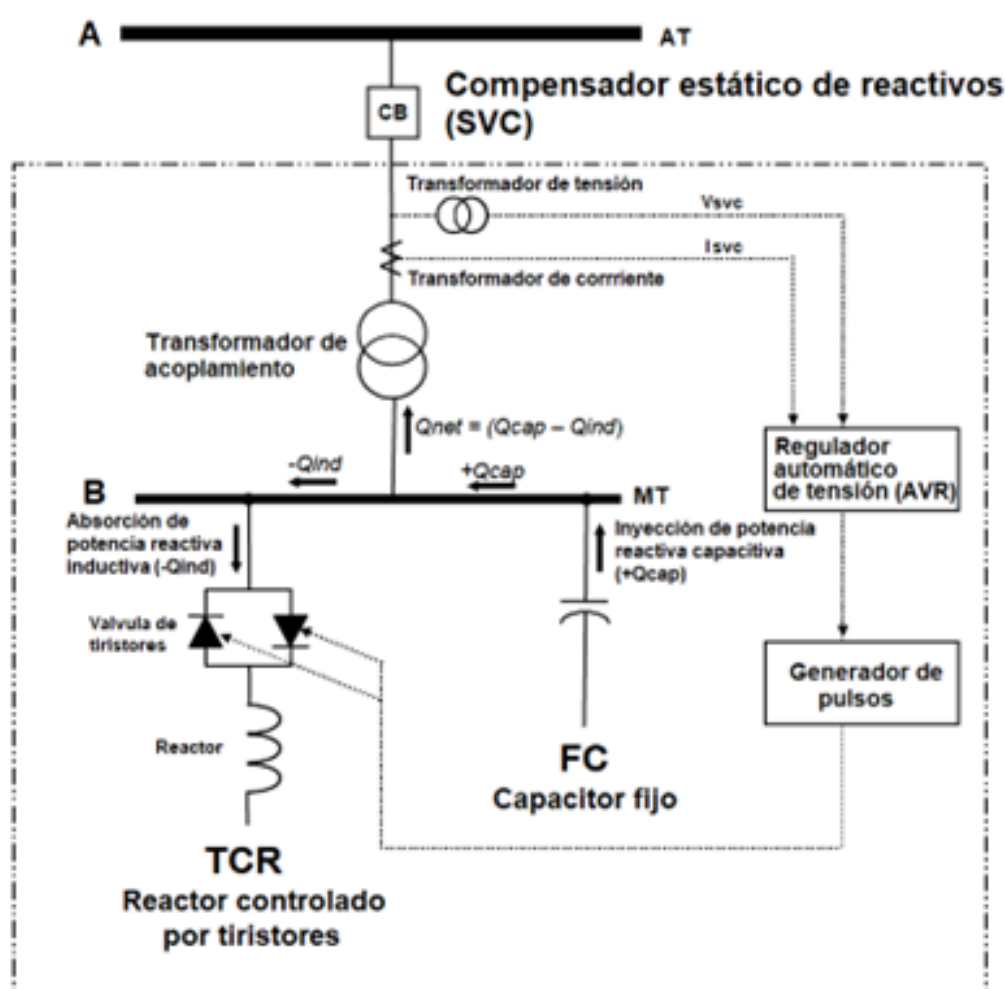


Figura 1. Principio de operación SVC (FC/TCR).

Fuente: [3].

El esquema mostrado en la figura 2 nos permitirá analizar el comportamiento del SVC para el control de tensión y la corrección del factor de potencia.

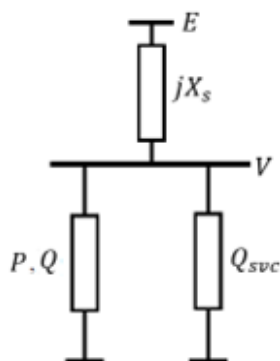


Figura 2. Diagrama de impedancia de un sistema con SVC.

Fuente: Elaboración propia.

La caída de tensión puede expresarse como:

$$\Delta V = E - V = jX_s \left[\frac{P - j(Q - Q_{svc})}{V} \right] \dots (1)$$

Trabajando la expresión en función de los módulos tenemos:

$$E^2 = \left[V + \frac{X_s(Q - Q_{svc})}{V} \right]^2 + \left[\frac{X_s P}{V} \right]^2 \dots (2)$$

Para controlar la tensión, se requiere un valor de Q_{svc} que haga que $E=V$ y, para controlar el factor de potencia, es necesario que $Q_{svc} = Q$. Entonces, podemos concluir que no es posible controlar el factor de potencia y la tensión al mismo tiempo.

B. Dimensionamiento de un SVC para una planta siderúrgica

La figura 3 muestra el diagrama unifilar de la planta siderúrgica a analizar. Esta planta es alimentada desde una barra de 138 kV, a través de dos transformadores de 45/60MVA alimenta a las barras principales del proceso (barra norte y barra sur) en 13.8kV. Conectado a la barra norte se cuenta con un horno eléctrico de 40 MVA, un horno cuchara de 8MVA, una subplanta de fundición, fajas y muelles. Asociados a la barra sur se tienen las subplantas de laminación, hierro y acero.

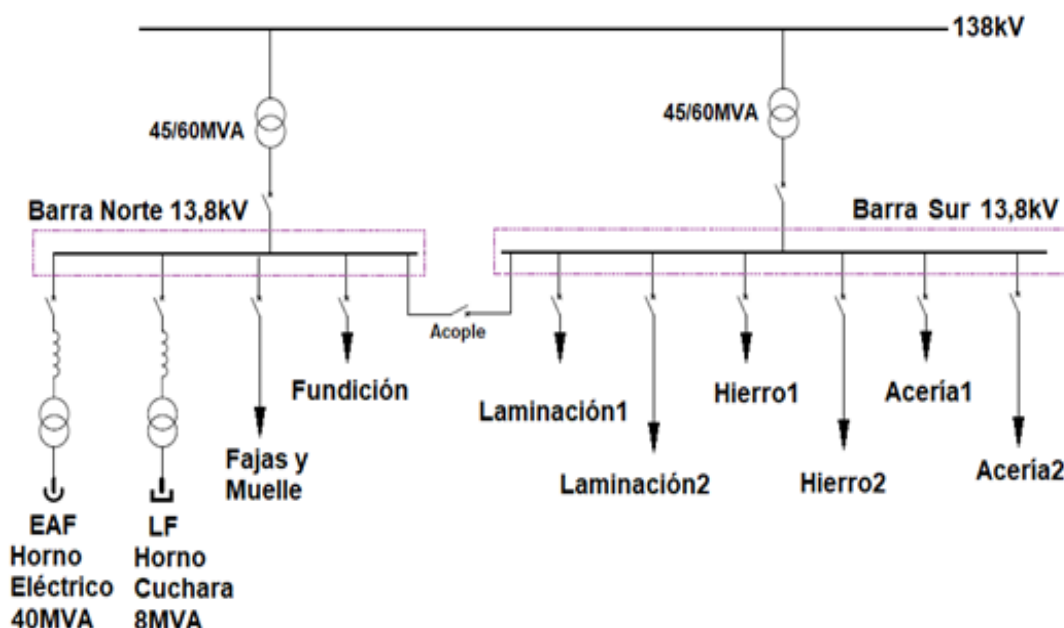


Figura 3. Diagrama unifilar de la planta siderúrgica.

Fuente: Elaboración propia.

Se ha modelado el sistema de potencia en el software ETAP, tal como se muestra en la figura 4. Se han analizado diferentes

escenarios de funcionamiento de la planta para dimensionar el SVC y sus componentes.

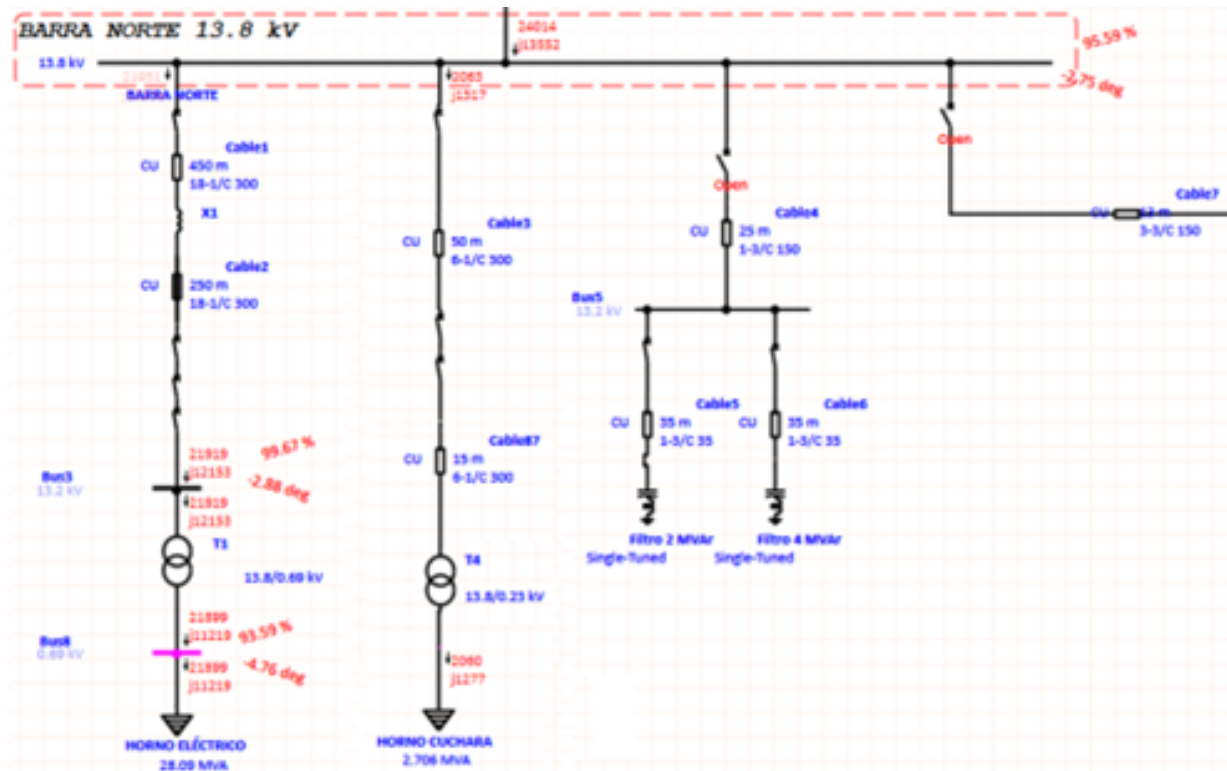


Figura 4. Modelamiento del sistema eléctrico en el software ETAP.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 5 muestra el esquema equivalente del circuito a analizar para el cálculo de la impedancia total del sistema. Este análisis

se hace considerando la recomendación IEEE 1453 [17] y la base normativa de la IEC 61000-3-7 [18].

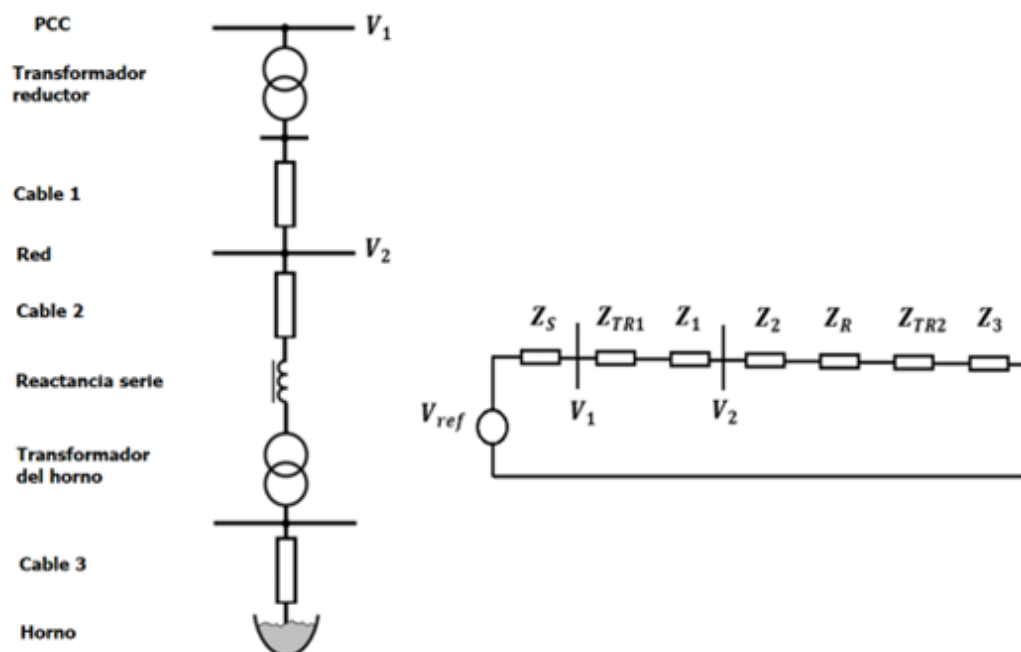


Figura 5. Esquema equivalente para el cálculo de la impedancia total del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

V_{ref} : Tensión referencial, equivalente Thévenin.

V_1 : Tensión en el punto 1, lado de alta tensión del transformador reductor (138 kV).

V_2 : Tensión en el punto 2, lado de baja tensión del transformador reductor (13.8 kV).

Z_S : Impedancia equivalente Thévenin del sistema.

Z_{TR1} : Impedancia del transformador reductor.

Z_I : Impedancia del conductor 1, llegada a barra 13.8 kV.

Z_R : Impedancia de la reactancia serie por dimensionar, en nivel 13.8 kV.

Z_2 : Impedancia del conductor 2, llegada al transformador del horno.

Z_{TR2} : Impedancia del transformador del horno.

Z_3 : Impedancia de las conexiones del horno en baja tensión.

El cálculo de los parámetros reflejados correspondientes a la red se muestra a continuación:

$$Z_S = \frac{V_S^2}{S_{cc}}$$

$$Z_{TR1} = vtr\ 1\%_{sc} * \frac{V_S^2}{S_{tr1cc}}$$

$$Z_1 = z_1 * \left(\frac{V_S}{V_1}\right)^2$$

$$Z_2 = z_2 * \left(\frac{V_S}{V_2}\right)^2$$

$$Z_R = z_r * \left(\frac{V_S}{V_r}\right)^2$$

$$Z_{TR2} = vtr\ 2\%_{sc} * \frac{V_S^2}{S_{tr2cc}}$$

$$Z_3 = z_3 * \left(\frac{V_S}{V_3}\right)^2$$

Los valores obtenidos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1

Resultado de los cálculos de impedancia en cada parte del sistema

Valor de impedancia reflejado a 138 kV		
ZS	12.24	Ohm
ZTR1	37.83	Ohm
Z1	0.72	Ohm
Z2	2.28	Ohm
ZR	0.00	Ohm
ZTR2	28.84	Ohm
Z3	1.63	Ohm
ZTOT	83.54	Ohm

Fuente: Elaboración propia.

La tensión en las barras se calcula del siguiente modo:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{ref} * \frac{(Z_{TR1} + Z_1 + Z_2 + Z_R + Z_{TR2} + Z_3)}{Z_{TOT}} \\ V_1 &= 79,7 * \frac{(37,84 + 0,72 + 2,28 + 0 + 28,84 + 1,63)}{83,54} = 68,0V \\ V_2 &= V_{ref} * \frac{(Z_2 + Z_R + Z_{TR2} + Z_3)}{Z_{TOT}} \\ V_2 &= 79,7 * \frac{(2,28 + 0 + 28,84 + 1,63)}{83,54} = 31,2V \end{aligned}$$

Las máximas variaciones de tensión en los puntos 1 y 2 se calculan con las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{(V_{ref} - V_1)}{V_{ref}} = \frac{(79,7 - 68,0)}{79,7} = 0,146 \\ d_2 &= \frac{(V_{ref} - V_2)}{V_{ref}} = \frac{(79,7 - 31,2)}{79,7} = 0,61 \end{aligned}$$

En el punto 1, la variación de tensión se encuentra alrededor de 0.146, mientras que, en el punto 2, la variación de tensión se encuentra alrededor de 0.61.

El flicker de corta duración (Pst) se puede calcular de:

$$P_{st} = k * d$$

De donde:

d : Máxima variación de tensión en el punto de análisis.

$k = \left(\frac{F}{d_{P_{st}=1}}\right)$: Valor resultado del cociente del factor de forma de la fluctuación de tensión y la variación de tensión para Pst = 1, en este caso usaremos el valor calculado ($k = 18.3$).

El resultado de P_{st} en el punto 1, entonces:

$$P_{st1} = (k) * d_1 = 18,3 * 0,146 = 2,68$$

C. Cálculo de componentes del SVC

El SVC puede reducir el *flicker* hasta en un factor de 2 (la mitad), factor necesario para reducir el Pst a niveles inferiores a 1.

El dimensionamiento del SVC se calcula por dos métodos:

C.1 Dimensionamiento del SVC a partir del límite expresado en Pst

Como límite de Pst tenemos 1:

$$Pst_{ref} = 1$$

Factor de reducción del *flicker* R_{Pst} :

$$R_{Pst} = \frac{Pst}{Pst_{ref}} = 2.68$$

La potencia del SVC se calcula con la fórmula:

$$Q_{SVC Pst} = (R_{Pst} - 1) * \frac{S_f}{\cos \phi_f}$$

De donde:

$$Q_{SVC Pst} = 89.67 \text{ MVar}$$

C.2 Dimensionamiento del SVC a partir del límite expresado en ΔV_{10}

Como límite de ΔV_{10} tenemos 0,32, correspondiente al límite de molestia.

$$\Delta V_{10 ref} = 0.32$$

Factor de reducción del *flicker* $R_{\Delta V_{10}}$:

$$R_{\Delta V_{10}} = \frac{\Delta V_{10}}{\Delta V_{10 ref}} = \frac{2.68}{0.32} = 8.38$$

La potencia del SVC se calcula con:

$$Q_{SVC \Delta V_{10}} = C * S_{ccf}$$

C es un coeficiente que depende de R, toma un valor entre 0(para $R_{\Delta V_{10}} = 0$) y alrededor de 0,7(para $R_{\Delta V_{10}}$ elevados). En este caso tomaremos un valor válido de 0,35, lo que da:

$$Q_{SVC \Delta V_{10}} = 0.35 * S_{ccf}$$

Lo que da:

$$Q_{SVC \Delta V_{10}} = 82,32 \text{ MVar}$$

Matemáticamente, se necesita una SVC de alrededor de 80 MVar para reducir el *flicker*.

D. Modelamiento del SVC

A continuación, se muestran los resultados de diseño de 80 MVar de TCR. Pudiendo operar el sistema sin reactancia, pero es importante tenerla bajo condiciones de contingencia.

Revisando los diferentes escenarios de operación, la variación de tensión esperada, variación de la potencia de consumo de los hornos, una posible ampliación de carga, el espectro armónico de corriente medido en la barra norte y la regulación de potencia reactiva necesaria, tenemos la configuración del SVC mostrada en la tabla 2.

Tabla 2

Potencia de diseño de los componentes del SVC

Componente	Potencia
TCR	80 MVar
Filtro pasivo 2th	26 MVar
Filtro pasivo 3th	27 MVar
Filtro pasivo 4th	18 MVar

Fuente: Elaboración propia.

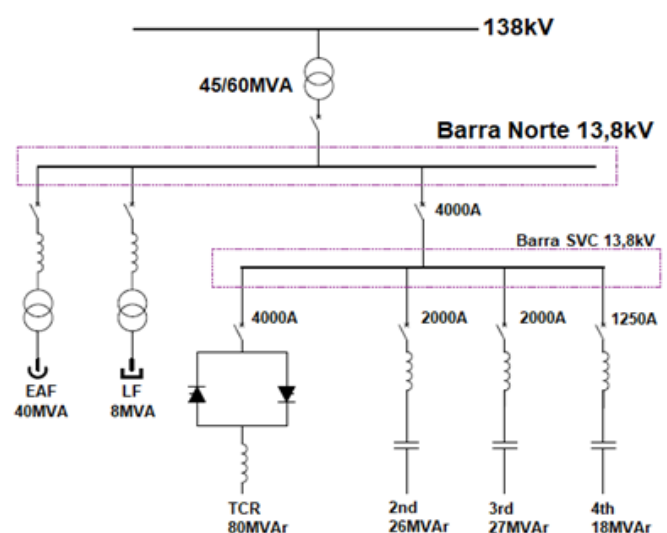


Figura 6. Esquema equivalente del SVC a colocarse en la barra norte 13,8kV.

Fuente: Elaboración propia.

TCR

Tiene una potencia de 80 MVar inductivos y está formada por reactores y las válvulas del TCR. Cada una de las fases tienen dos reactores, en caso se produzca una falla de cortocircuito en una de las bobinas del reactor del TCR, la corriente de falla será limitada por la otra bobina del reactor de la misma fase.

Cálculo de la inductancia del TCR:

$$Q_L = 80 \text{ MVar}$$

$$V = 13.8 \text{ kV}$$

$$Q_{L_{fase}} = 26.667 \text{ MVar}$$

$$L = \frac{V^2}{2\pi f x Q_L}$$

$$L = \frac{13.8 \text{ kV}^2}{2\pi 60 \times 80 \text{ MVar}}$$

$$L = 6.31 \text{ mH}$$

Por lo tanto, se va a requerir para el TCR La figura 7 muestra el esquema trifilar del SVC y la figura 8 muestra el plano de planta del SVC, donde se puede observar las dimensiones consideradas para el emplazamiento del SVC y sus componentes (50 x 30 metros).

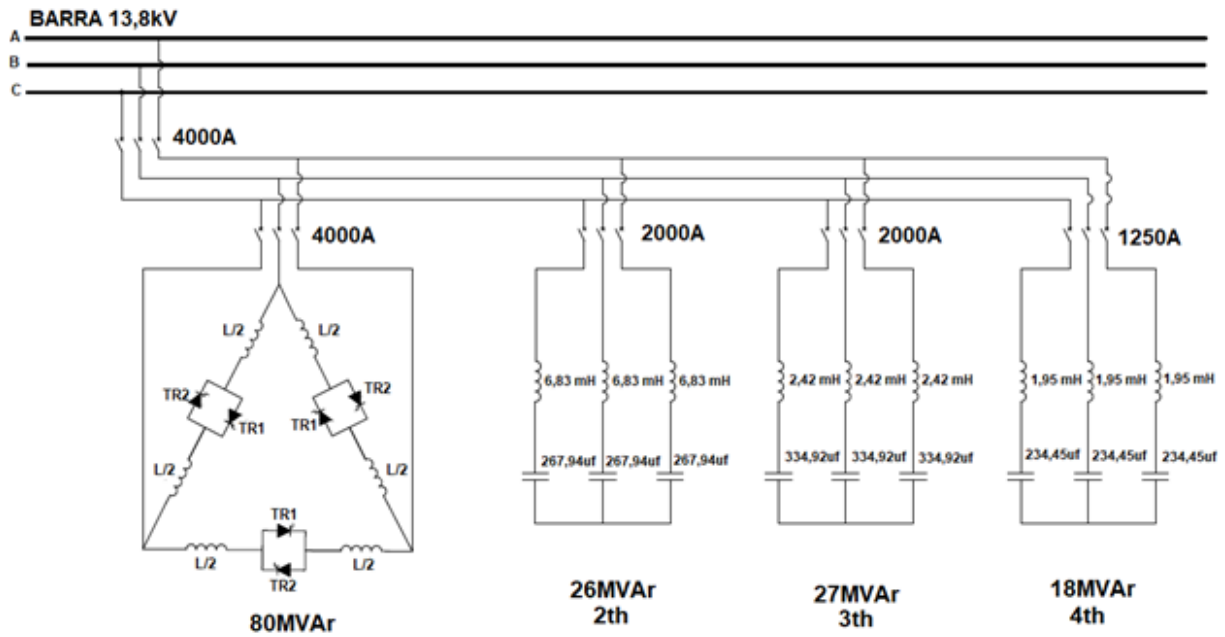


Figura 7. Esquema trifilar del SVC.

Fuente: Elaboración propia.

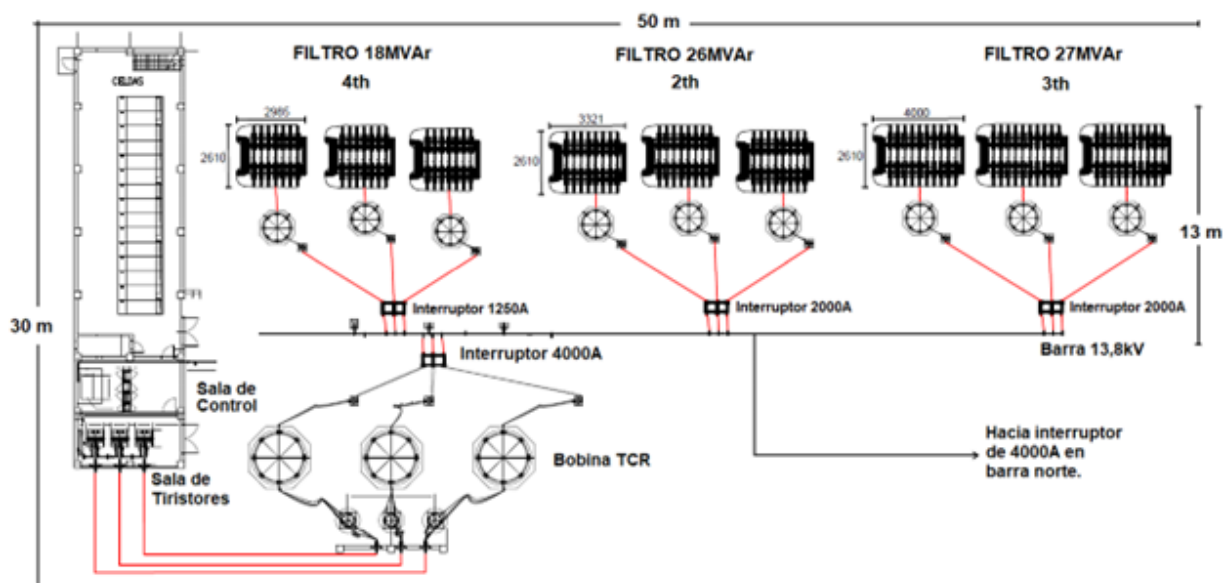


Figura 8. Plano de planta del SVC.

Fuente: Elaboración propia.

Diseño de un filtro activo en MT para de horno de arco

A. Principio de funcionamiento de un filtro activo

La figura 9 muestra el principio de funcionamiento de un filtro activo. Su sistema de control mide la forma de onda de la carga distorsionada, separando la corriente activa, corriente reactiva

y corriente armónica. El filtro activo compensa las corrientes armónicas y/o reactivas en el sistema. En las aplicaciones para media tensión, se colocan filtros activos en paralelo (un maestro y varios esclavos) y mediante un transformador elevador se llevan las ventajas del filtro activo a la media tensión. Aunque su función principal es el control de armónicos y factor de potencia, estos equipos también pueden realizar el balance de fases y reducir el flicker.



Figura 9. Principio de funcionamiento de un filtro activo.

Fuente: [19].

B. Dimensionamiento de filtro activo MT para la planta siderúrgica

B.1 Determinación de la corriente armónica a compensar

La principal carga armónica a compensar es la que entrega el horno, se toma el espectro armónico por fase y se obtiene la

corriente armónica equivalente para el diseño de los equipos de filtrado, tal como lo muestra la figura 10.

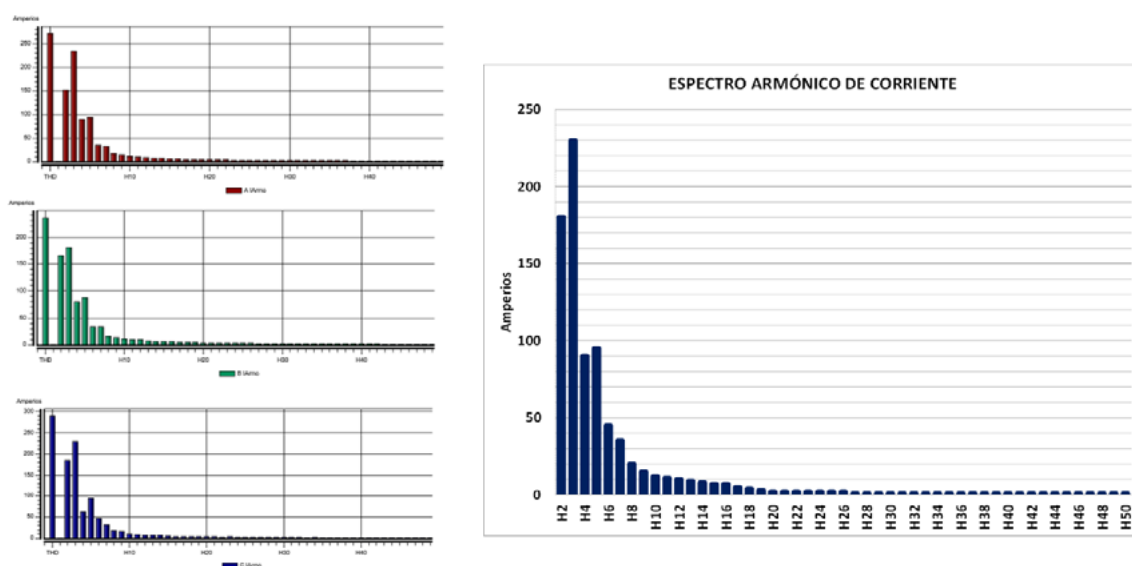


Figura 10. Corrientes armónicas por fase medidas en el sistema.

Fuente: Elaboración propia.

Dado el comportamiento dinámico de la carga, se seleccionó los casos de máxima corriente armónica, con ello se obtiene el espectro armónico equivalente para poder seleccionar el amperaje del filtro activo en media tensión.

Podemos observar que se requiere filtrar principalmente hasta el orden 5. Con esto la corriente del filtro activo sería:

$$I_{rms} = \sqrt{I_{2h}^2 + I_{3h}^2 + I_{4h}^2 + I_{5h}^2 + I_{6h}^2 + \dots + I_{nh}^2}$$

$$I_{rms} = 320 A$$

Por lo que se necesitan 320 A armónicos aplicados en 13.8 kV.

Como los filtros activos son equipos de baja tensión de 300 A de capacidad, se debe tener en cuenta la relación de transformación de 13.8kV/0.48 kV= 28.75, por lo que se requiere 31 equipos solo para compensar los armónicos, además de un transformador elevador.

B.2 Determinación de la corriente reactiva a compensar

El diagrama de carga promedio medido en la barra norte es mostrado en la figura 11, en el análisis se toma en cuenta la información de los medidores ION instalados en la subestación eléctrica principal en un periodo de 120 días.

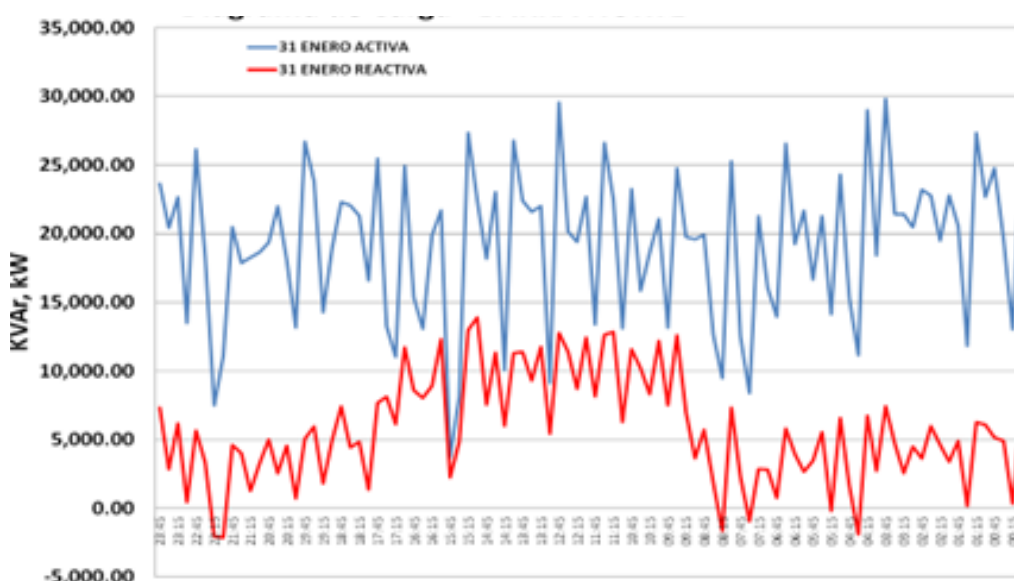


Figura 11. Diagrama de carga medido en la barra norte 13,8kV.

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis correspondiente tenemos:

Se tomaron registros con analizadores de redes en intervalos de 1 min debido a la gran variación de carga de los hornos de arco. Sin embargo, la facturación de energía eléctrica se desarrolla en intervalos de 15 minutos, por lo tanto, para el análisis también se toma en cuenta este intervalo de tiempo. La potencia activa máxima registradas es de picos de 30 MW.

El factor de potencia total de la planta en promedio es 0.9324. Se identificó que las cargas asociadas a la barra norte tienen un factor de potencia que oscila entre 0.70 y 0.80.

La figura 12 muestra la potencia reactiva dinámica a compensar y se puede concluir que la máxima potencia reactiva requerida por el sistema se encuentra entre 7 MVAR (fdp = 0.96) y 8 MVAR (fdp = 0.97).

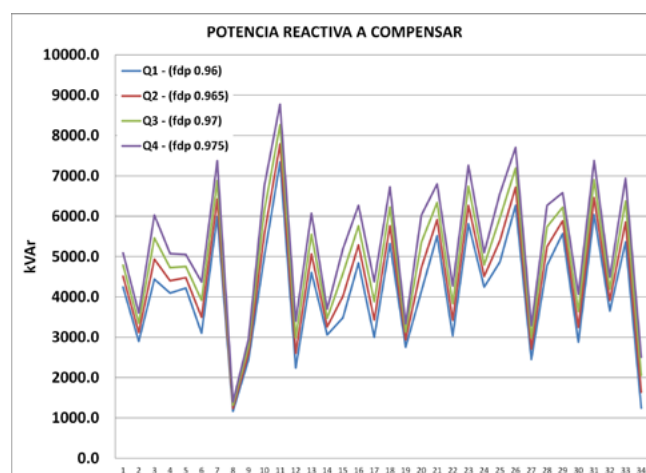


Figura 12. Potencia reactiva dinámica a compensar en el sistema.

Fuente: Elaboración propia.

C. Cálculo de componentes del sistema de filtrado

Considerando los 7.2 MVar, tendríamos:

$$I_R = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot V_N}$$

$$I_R = \frac{7.2 \text{ MVar}}{\sqrt{3} \times 13.8 \text{ kV}}$$

$$I_R = 301.23 \text{ A}$$

Como los filtros activos son equipos de baja tensión de 300 A de capacidad, se debe tener en cuenta la relación de transformación de 13.8 kV/0.48 kV = 28.75, por lo que se requiere 29 equipos solo para compensar la potencia reactiva, además de un transformador elevador.

Considerando la solución mixta para un sistema de filtros activos que realice los dos trabajos, compensar el factor de potencia y los armónicos tenemos:

$$I_F = \sqrt{I_{arm}^2 + I_R^2}$$

$$I_F = \sqrt{(28.75 \times 320)^2 + (28.75 \times 301)^2}$$

$$I_F = 12634.9 \text{ A}$$

Como cada unidad es de 300 A, entonces se necesitarían 12634.9/300 = 42 unidades.

D. Modelamiento del filtro activo MT

El costo de un filtro activo de 300 A es alrededor de 40 000 USD por unidad, entonces el monto por la implementación de la solución estaría alrededor de los 2 600 000 USD. Sería la mejor solución técnica aplicada al sistema. El esquema eléctrico de la solución y sus dimensiones se muestran en la figura 13.

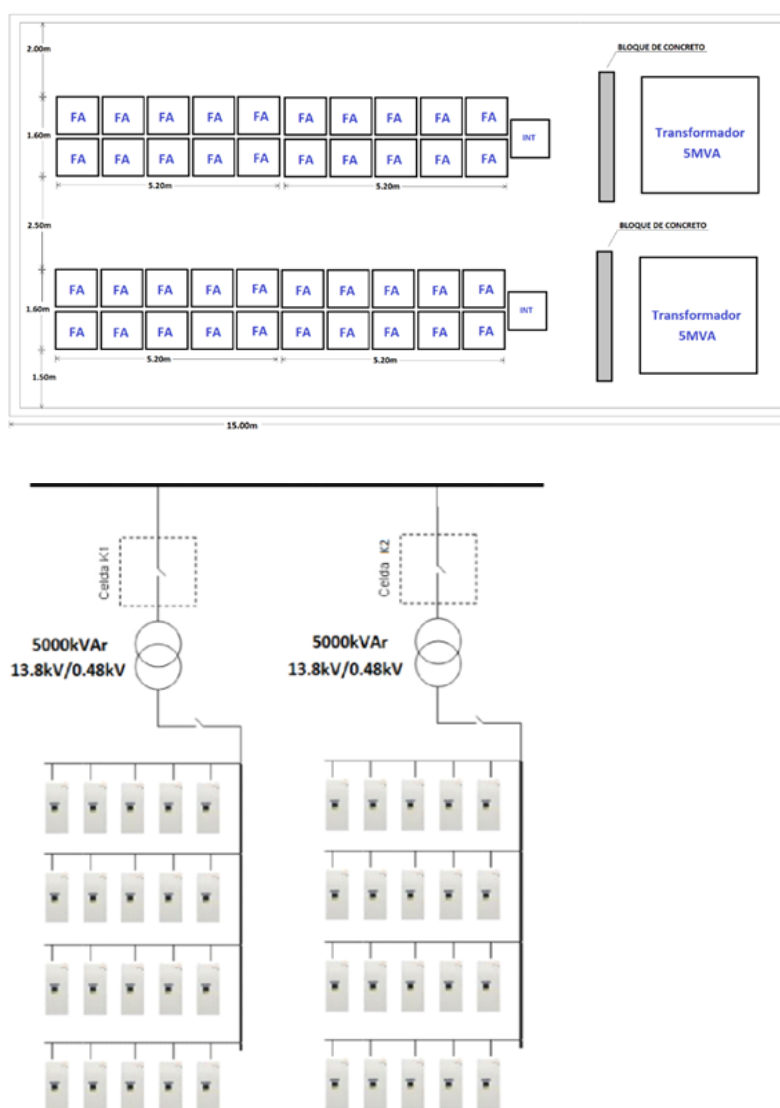


Figura 13. Plano de planta y de distribución de equipos en el sistema filtro activo en MT.

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 3 muestra los resultados comparativos de las soluciones:

Tabla 3
Cuadro comparativo de las soluciones

Concepto	SVC	Filtro activo en MT
Tiempo de implementación en meses	24	12
Dimensiones (m ²)	1500	500
Equipos	TCR, filtros pasivos, sala de control, sala de tiristores, celdas de media tensión.	2 transformadores, 40 filtros activos BT, celdas de media tensión y tableros de baja tensión.
Costo de implementación MM\$	4,1	2,6

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- El presente trabajo muestra que la solución de filtro activo en MT es una alternativa para el control de la variación de tensión, potencia reactiva, armónicos y flicker generados por hornos de arco que tiene ventajas competitivas sobre la solución con SVC.
- Tanto el filtro activo en MT como el SVC emplean electrónica de potencia, la diferencia, desde el punto de vista de la calidad de energía, es que el TCR del SVC genera armónicos (lo que obliga a implementar en la misma solución filtros pasivos para reducirlos). Por otro lado, la solución alternativa con filtros activos en MT tiene como parte de su misión (de acuerdo con la programación de los equipos) generar armónicos con polaridad contraria a los que están presentes en el sistema de potencia.
- Un filtro activo en MT ocupa un menor espacio que un SVC y tiene menor costo de implementación.
- La implementación del SVC o del filtro activo MT permitirá reducir el tiempo de procesamiento del acero y, por lo tanto, aumentará la productividad. También reducirá las interrupciones, tendrá un efecto positivo considerable sobre el consumo de electrodos, las pérdidas de calor y la vida útil del revestimiento interior del horno. A medida que mejore la calidad de la energía de la red aumentará la vida útil de los equipos en la planta.

REFERENCIAS

- [1] Ponce Trillo, Y. (2010). *Reducción de perturbaciones en la red eléctrica de una planta Siderúrgica con Horno Eléctrico de arco a través de la instalación de un SVC* [Informe de suficiencia para optar el título de ingeniero, Universidad Nacional de Ingeniería].
- [2] Illanes Chacón, E. (2014). *Compensación reactiva en hornos de arco eléctrico mediante el uso de SVC Light* [Informe de suficiencia para optar el título de ingeniero, Universidad Nacional de Ingeniería].
- [3] Sullivan, D. (2006). *Improvements in Voltage Control and Dynamic Performance of Power Transmission Systems Using Static VAR Compensators (SVC)* [Tesis de maestría, Universidad de Pittsburgh].
- [4] Deryuzhkova, N., Solovyev, V., y Kupova, A. (2019). *Intelligent Control System for Static Var Compensator of Arc Furnace* [Conferencia]. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Rusia.
- [5] Deaconu, S., Topor, M., Popa, G., Popa, I. (2009). *Comprehensive Analysis for Modernization of 100 t Electric Arc Furnace for Steel Production* [Conferencia]. 2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Houston, Texas, Estados Unidos.
- [6] Jagiela, K. Gala, M., Kopinski, M. y Rak, J. (2018). *Influence of Harmonic Filters on the Operation of AC Arc Furnace Power Installation* [Conferencia]. 2018 Conference on Electrotechnology: Processes, Models, Control and Computer Science (EPMCCS), Kielce.
- [7] Akagi, H., Kanazawa, Y., y Nabae, A. (1983). Generalized theory of the Instantaneous reactive power in three-phase circuits. En *Proc. Int. Power Electronics Conf.*, 1983 (pp. 1375-1386).
- [8] Watanabe, E., y Aredes, M. (1995). New control algorithms for series and shunt three-phase four-wire active power filters. *IEEE Transactions on Power delivery*, 10(3), 1649-1656.
- [9] Akagi, H., Kanazawa, Y., y Nabae, A. (1984). Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on industry applications*, (3), 625-630.
- [10] Dolezal, J., Castillo, A. G., Tlustý, J., y Valouch, V. (diciembre de 2000). Topologies and control of active filters for flicker compensation. En *ISIE'2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, (1), (pp. 90-95). IEEE.
- [11] Takeda, M., Ikeda, K., Teramoto, A., & Aritsuka, T. (1988, April). Harmonic current and reactive power compensation with an active filter. En *PESC'88*

Record., 19th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (pp. 1174-1179). IEEE.

- [12] Kojima, H., Matsui, K. y Tsuboi, K. (2004). *Static Var compensator having active filter function for lower order harmonics. 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2004, Busan, Corea del Sur.*
- [13] Wang, L., Lao, K., Lam, C., y Wong, M. (2017). *Delta-connected static var compensator (SVC) based hybrid active power filter (SVC-HAPF) and its control method* [Conferencia]. IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing.
- [14] Mohan Mathur, y R. Varma, R. (2002). *Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems*. IEEE Press and Wiley & Sons, Inc.
- [15] Miller, T. (1982). *Reactive Power Control In Electrical Systems*. Wiley & Sons, Inc.
- [16] Hingorani, N., y Gyugyi, L. (1999). *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. Wiley – IEEE Press.
- [17] IEEE 1453 -2015. *Recommended Practice for the Analysis of Fluctuating Installations on Power Systems*.
- [18] IEC 61000-3-7-2008. *Limits - Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems*.
- [19] Peña Huaranga, O. (2007). Estudio y simulación de los filtros pasivos, activos e híbridos de potencia, para el mejoramiento de la calidad de energía. En *Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica - SICEL*, 4. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/SICEL/article/view/694>

ACERCA DEL AUTOR

M.Sc. Oscar Julian Peña Huaranga

Candidato a doctor en Ciencias con mención en Energética por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Máster en Gestión de las Energías Renovables por la Universidad de Barcelona (UNIBA). Maestro en Ciencias con Mención en Sistemas de Potencia, por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Ingeniero electricista por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Docente en la maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa UNSA y del programa de pre-Maestría en Sistemas de Potencia de la Universidad Nacional de Ingeniería. Actualmente es gerente de la empresa Power & Technology Systems (PTSYS).

@ oscar.pena.h@uni.pe

@ oscar@ptsys.com.pe

BSc. Jordy Daniel Abanto Cueva

Bachiller en Ciencias con mención en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Ingeniería. Con experiencia en la elaboración de estudios eléctricos; solución a problemas de calidad de energía en plantas industriales, mineras y comerciales, implementación de filtros activos, compensación reactiva en media y baja tensión. Actualmente, labora como ingeniero de servicios en PTSYS SAC.

@ jabantoc@uni.pe

@ Jordy.abanto@ptsys.com.pe

Recibido: 01-07-22
Revisado: 04-08-22
Aceptado: 16-08-22



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.