



Utilización de dispositivos FACTS en acerías para mejorar su comportamiento técnico económico

Antonio Baltasar
Moisés Barreto

Annavell Herrera
Zaid Garcia

Recibido: Octubre del 2008
Aprobado: Diciembre del 2008

Resumen/ Abstract

Acerías de forma general y Hornos de Arco Eléctrico en particular son cargas de gran impacto para los sistemas de potencia ya que introducen, con mucha frecuencia, perturbaciones en la red de distribución alrededor de la planta. Estas perturbaciones se originan por el hecho de que no se pueden compensar instantáneamente las variaciones extremadamente rápidas de la potencia reactiva en cada una de las fases del horno de arco. Las variaciones de la potencia reactiva, muy acentuadas en el inicio del proceso de fusión originan fluctuaciones de voltaje que limitan el suministro de potencia activa al horno de arco y a otras cargas que puedan estar conectadas a esa barra.

Palabras claves: armónicos, compensación estática de voltaje, Flicker, Horno de arco eléctrico.

Steelworks in general and electric arc furnaces (EAF) in particular, are compelling loads to Power System as they frequently introduce disturbances in the distribution network near the facility. These disturbances appear because it is not possible to compensate instantaneously the extremely rapid variations of reactive power in each phase of the EAF. Reactive power variations, particularly acute at the beginning of the melting process, cause voltage fluctuations that constrain active power supply to the EAF and to other loads that could be connected at the same bus bar. This paper describes two different technologies like Static Var Compensator (SVC) and SVC Light to solve these problems.

Key words : electric arc furnace, static voltage compensation, harmonics, flicker

INTRODUCCIÓN

La importancia de los Hornos de Arco Eléctricos (HAE) en la fabricación de acero basado en fusión de chatarra ha aumentado en todo el mundo. Las características de un HAE, como

carga de una red de suministro, son alto consumo de potencia reactiva en la etapa de fusión, generación de armónicos y fuerte asimetría de carga en las tres fases [1].

Como resultado, a menos que se corrijan, perturbaciones en forma de corrientes y tensiones más o menos asimétricas se inyectan en el sistema de suministro, y una vez ahí, transmitidas a través de la red a otras plantas vecinas. Una de las perturbaciones más difíciles de soportar es el parpadeo originado en las bombillas de iluminación, el llamado "Flicker" que provoca una sensación bastante incómoda en el ojo humano. Los armónicos y las asimetrías entre fases originan pérdidas adicionales en la red y disturbios en equipos rotatorios vecinos.

Con el aumento de los tamaños de los HAE, la solución de estos problemas se vuelve cada vez más importante.

Durante muchos años se han utilizados Compensadores Estáticos de Voltaje (CEV) con HAEs para aumentar la producción de los mismos, reducir sus costos de producción y mejorar la calidad de la potencia.

Con el acceso a semiconductores controlables para aplicaciones de potencia, Convertidores de Fuente de Tensión (CFT) de varios MVA han pasado a ser una realidad. El concepto del SVC Light integra la tecnología del CFT con la tecnología de los IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistors) aporta mejoras desde el punto de vista de calidad de suministro y reducción de Flicker.

Materiales y Métodos

A. Impacto en la red de un horno por arco eléctrico

Tal como se menciona, el HAE, como carga en una red se caracteriza por [1][4]:

1. Consumo aleatorio y elevado de potencia reactiva.
2. Fuerte generación de armónicos.
3. Carga asimétrica de las tres fases.

B. Consumo de potencia reactiva

El diagrama de carga de un HAE puede verse en la figura 1.

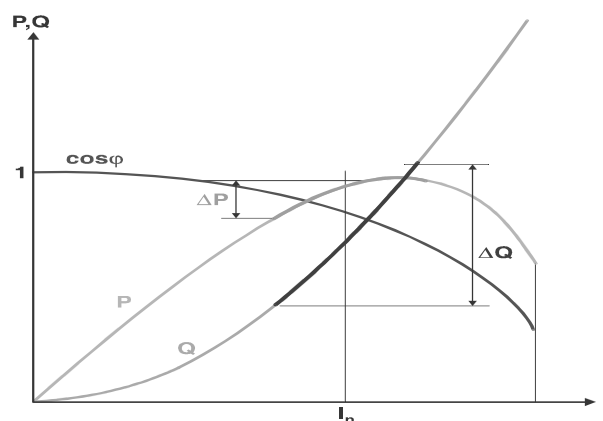


Fig. 1. Curvas características de carga de un HAE.

En esta figura puede verse que cerca del intervalo de operación, ΔQ es mucho mayor que el correspondiente ΔP . Cuando la red de suministro no está diseñada para suministrar potencia reactiva con variaciones tan violentas, la tensión en la barra que alimenta el HAE tiene fuertes variaciones de tensión.

C. Flicker

Se define el flicker (parpadeo) como la percepción de variación de luminosidad de una lámpara debido a la variación de la tensión en la red, provocada a su vez por la variación repetitiva de la potencia consumida por receptores cuya demanda de potencia no es constante en el tiempo: hornos de arco, máquinas de soldadura por resistencia, compresores, etc.

El nivel de flicker depende de la amplitud, frecuencia y duración de la fluctuación de la tensión. La frecuencia de parpadeo es apreciable por el sistema humano ojo-cerebro cuando está comprendida en un rango de frecuencias que se extiende desde 0.5 Hz hasta aproximadamente 25 Hz, con una sensibilidad que es función de la frecuencia y que presenta un máximo alrededor de los 10 Hz.

El flicker es expresado por medio del Nivel de Severidad de Flicker, Pst lo que expresa directamente el grado de irritación siendo Pst=1 el valor límite de la perturbación.

La curva límite de valores de flicker de acuerdo a la IEC (figura 2) enseña los valores máximos permitidos de las variaciones de tensión como una función de la frecuencia dentro del espectro del flicker para la curva límite del Pst=1.

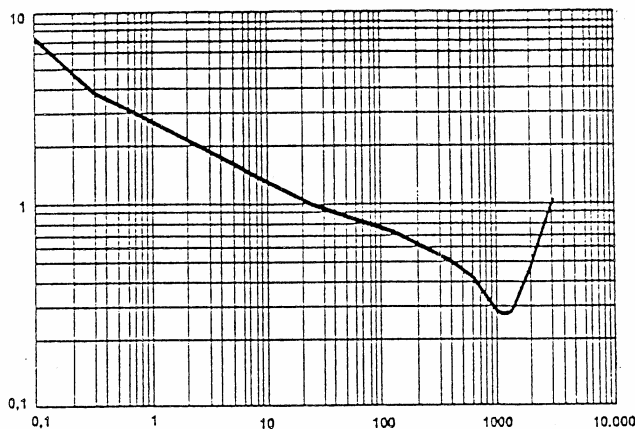


Fig. 2. Curva límite del Flicker.

D. Tensión de la barra alimentando el horno

Uno de los aspectos principales del efecto de las acerías en los sistemas eléctricos de potencia y sobretodo en los sistemas débiles es la depresión del voltaje en el proceso de fundición [1][3][4]. Esto se debe a una absorción súbita de potencia reactiva (figura 3).

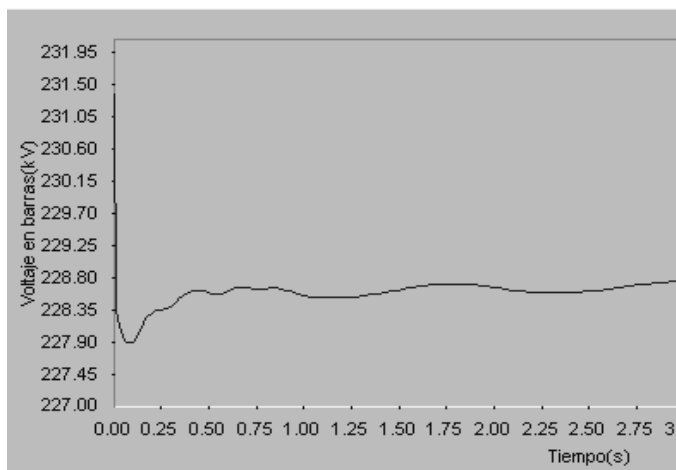


Fig. 3. Depresión de voltaje por el comienzo del proceso de fusión en un HAE sin compensación.

Compensando la potencia reactiva absorbida por el HAE, la tensión de la barra que alimenta el horno va a permanecer estable y va a verificarse también un aumento de valor RMS. Este aumento de la tensión y la estabilización tiene como consecuencia un aumento de suministro de potencia activa al horno. Este aumento de suministro de potencia activa al horno se revierte en la obtención de más acero por unidad de

tiempo o la misma cantidad de acero en un tiempo más corto. De todas formas esto se traduce en un aumento de productividad y una reducción de los costos de producción. Una tensión estable corresponde a un tiempo de fusión más corto y a una reducción de factores que tienen mucho peso en los costos de producción. Esos son los casos del consumo de energía por tonelada de acero producida, consumo de electrodos por tonelada de acero y consumo de refractario.

E. Armónicos

Los hornos de arco eléctrico pueden ser de corriente alterna (CA) o directa (CD). En el primer caso un transformador alimenta tres electrodos que producen un arco eléctrico de corriente alterna en la cuba, mientras que el segundo caso, se emplean rectificadores (generalmente de 12 pulsos) para producir un arco eléctrico de corriente directa en la cuba. En este caso se producen armónicos por las variaciones aleatorias de los instantes de establecimiento del arco, los cuales se combinan con los producidos por las características altamente no lineales de la impedancia del arco. Adicionalmente, las fluctuaciones de tensión debidas a las variaciones rápidas de la longitud del arco, producen frecuencias entre 0.1 – 30 Hz a cada lado de los armónicos característicos.

Efecto que es más acentuado en el período de fusión, debido al movimiento errático de la chatarra y la interacción electromagnética entre los arcos de diferentes electrodos.

Durante el proceso de refinado, el arco es más estable, aunque todavía existe alguna modulación de su longitud por las ondulaciones que se presentan en la superficie del metal fundido. Estos armónicos, si no se instalan filtros, serán directamente inyectados en el sistema de suministro de potencia.

F. Desequilibrio de fases

Los electrodos de un HAE CA son controlados monofásicamente y los arcos que se establecen entre los electrodos cambian de un momento a otro tanto en lo que respecta a la corriente como la tensión del arco. El arco se enciende y se apaga de una forma completamente aleatoria lo que resulta en una carga altamente asimétrica entre las fases. Esta asimetría se transmite a la red de suministro en forma de un sistema de corrientes de secuencia negativa que van sobrecargar determinados tipos de cargas.

G. Mejoramiento de la calidad de la potencia en el punto de conexión del horno

Para suministrar continuamente la potencia reactiva a un HAE, la cual varía rápidamente, se necesitan equipos de compensación de reactivo igualmente rápidos [1][2][4]. Con el desarrollo y uso de la tecnología FACTS, en especial los SVC y los SVC Light se obtienen grandes beneficios en la calidad de la potencia que permiten:

Mantener un factor de potencia elevado y estable en el punto de conexión común independientemente de las variaciones de la potencia reactiva de los hornos.

Reducir el Flicker en el punto de conexión común para valores aceptables.

Filtrar los armónicos y eliminar los desequilibrios originados por las tres fases del horno. (figura 4)

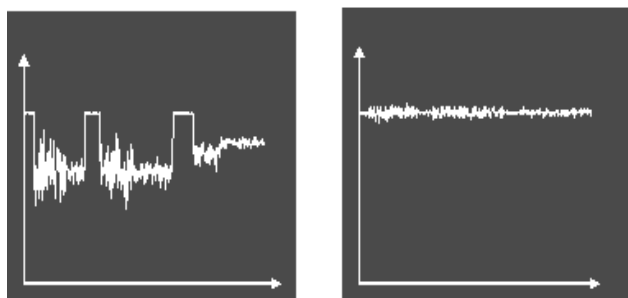


Fig. 4. Voltaje vs. Tiempo. a) Sin la instalación de un CEV b) Con la instalación de un CEV.

La decisión sobre qué equipo se va a instalar depende de la gravedad de cada caso. El SVC Light es un equipo superior si la razón es un problema grave de flicker. Para casos con exigencias de reducción de flicker más moderadas, el SVC convencional es una solución técnica con una efectividad muy buena.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

H. Impacto de un equipo de compensación de reactivo en un HAE

En una acería en Italia hay un CEV operando desde el año 2002. El CEV se ha instalado para reducir el flicker generado por el HAE. La instalación del CEV ha sido una parte de un proyecto más amplio en que se ha aumentado la potencia del HAE de 55 MVA a 75/85 MVA. En la misma barra hay también un horno cuchara de 32 MVA para la operación del afino. El CEV reemplazó otro equipo muy antiguo de tipo reactor saturado. Además de eso, se ha instalado

también un reactor en serie con el horno para mejorar la estabilidad del arco. El CEV está conectado a una barra de 21 kV, tiene un rango de variación de 0-90 Mvar y está formado por un Reactor Controlado por Tiristores (RCT) y tres filtros de armónicos en un total de 90 Mvar.

El CEV contiene los equipos siguientes (figura 5)

- Un (RCT) Reactor Controlado por Tiristores de 90 Mvar.
- Un filtro de 2º armónico de 30 Mvar.
- Un filtro de 3º armónico de 30 Mvar.
- Un filtro de 4º armónico de 30 Mvar.

Cambiando el ángulo de disparo del RCT, el valor RMS de la corriente que pasa por el RCT puede controlarse de una forma continua desde el valor cero hasta el valor determinado por la reactancia del reactor. Los armónicos generados son absorbidos por el filtro que son una parte del CEV. El RCT junto con los filtros de armónicos forma un CEV con un rango de variación capacitivo de 0 a 90 Mvar

El CEV ha sido diseñado para permitir el desempeño siguiente en el punto de conexión común a 220 kV con todos los hornos en operación:

- Factor de potencia, $FP \geq 0,95$
- Tensión de flicker, plazo corto, $Pst95 \leq 1,5$
- Distorsión armónica total, distorsión de tensión, $THD \leq 1,5\%$

El CEV no solamente reduce las variaciones de voltaje en el PCC, sino que también aporta un aumento significativo del valor RMS del voltaje de la barra de alimentación del horno lo cual origina:

- Tiempos de fusión más cortos.
- Menor consumo específico de electrodos.
- Menores pérdidas de energía.
- Menor consumo de refractario.

En esta acería se han obtenido los siguientes resultados:

- Aumento de potencia suministrada al horno 6-7%
- Ahorro de electrodos 2-3 %
- Ahorro de energía 2-3 %

I. El caso de un productor de acero en Suecia

Uddeholm Tooling es un productor de acero en Suecia con un proceso basado en fusión de chatarra en un HAE y un horno cuchara para el afino. El HAE tiene una potencia de 31,5 MVA con una capacidad temporal de sobrecarga de

20%. El horno cuchara tiene una potencia de 6 MVA con 30% de capacidad de sobrecarga. Los hornos son alimentados por una red de 132 kV a través de un voltaje intermedio de 10,5 kV (figura 6).

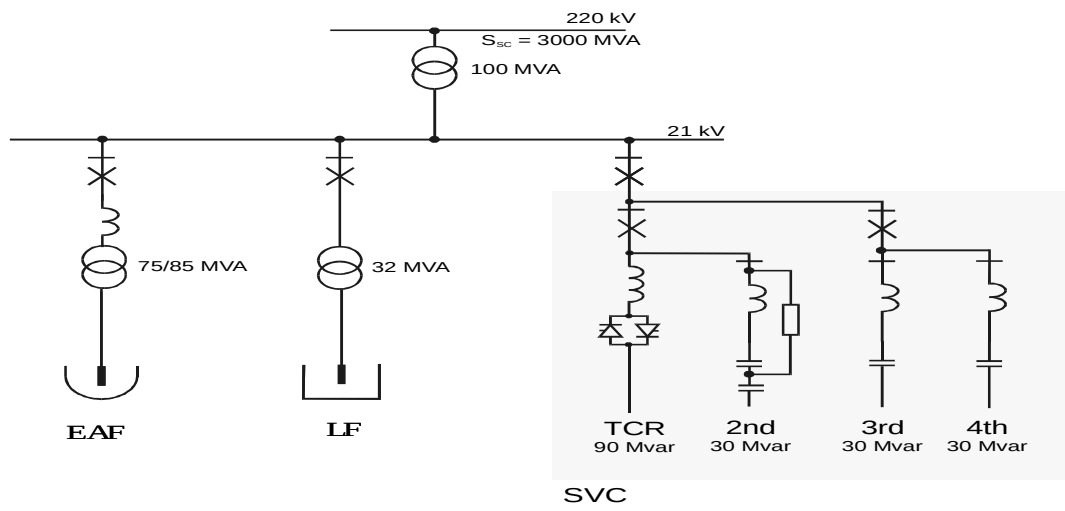


Fig. 5. Diagrama unifilar de los hornos con el CEV.

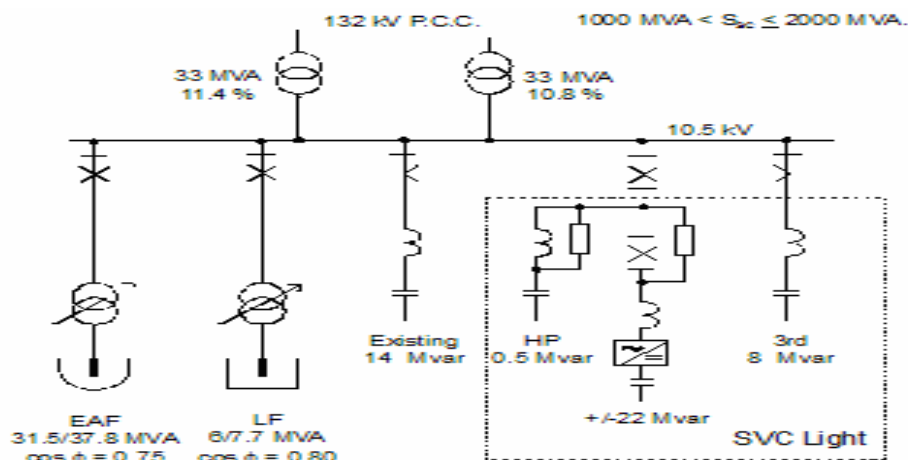


Fig. 6. Diagrama Unifilar de la red alimentando el HEA y la compensación dinámica.

La red es débil con baja potencia de cortocircuito, aproximadamente 1000 MVA, potencia bastante baja para permitir la operación de los hornos y mantener una calidad de potencia aceptable desde el punto de vista de la red.

El SVC Light tiene una potencia de 0 – 44 Mvar, o sea generación de potencia reactiva. Ese rango dinámico se consigue con un CFT de 22 Mvar en paralelo con filtros en un total de 22 Mvar. Este equipo se ha instalado con el objetivo primario de reducir el Flicker generado por los hornos e inyectado en la red de alimentación.

J. Mediciones de Flicker

Se han hecho mediciones en la planta para evaluar el desempeño del SVC Light, principalmente en lo que respecta reducción del flicker. Los resultados obtenidos mostraron una considerable reducción del flicker con la operación del SVC Light. La figura 7 muestra los resultados.

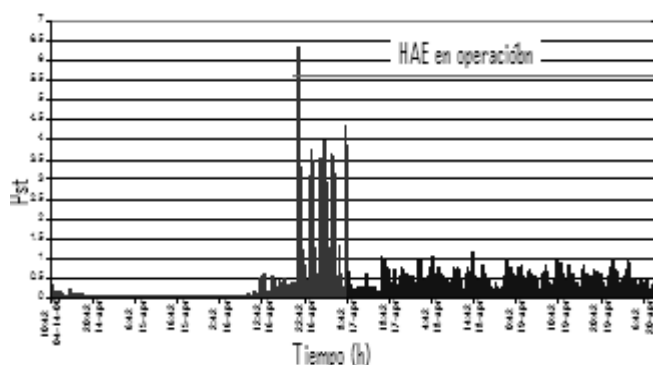


Fig. 7. Flicker generado sin y con el SVC Light.

K. Beneficios de la conexión del SVC LIGHT en cuanto al aumento de la producción

Además de la reducción del flicker, desde la conexión del SVC Light, se han producido beneficios que se traducen en un aumento de la producción de la planta, así como una disminución de los costos de producción. La siguiente tabla ofrece datos que corroboran la afirmación anterior.

Tabla 1. Beneficios obtenidos por la conexión del SVC Light.

Datos Técnicos	
Potencia Nominal del Horno	31,5/37,8 MVA
Voltaje Nominal	10,5 kV
Potencia Nominal del Horno Cuchara	6/7,7 MVA
Beneficios del SVC	
Factor de reducción del Flicker	3,5 aprox
Nivel de Flicker logrado en el PCC	Pst(95%)=1
Factor de Potencia del PCC	PF≥0,95
Incremento de la productividad	4 Ton/h
Disminución del consumo específico de electrodos	0.2 kg/ton
Disminución del consumo específico de energía	25kWh/ton

L. El caso Avesta Sheffield

Desde 1985, en la planta de 40 MVA para la fundición y refinado de la chatarra, Avesta Sheffield en Suecia, está operando un equipo de compensación de reactivo CEV de la firma ABB. Este equipo abarca desde 10 Mvar inductivo hasta 50 capacitivo, y tiene como propósito estabilizar la tensión en la barra del horno principalmente durante el proceso de fusión, de ese modo se logran un número importante de beneficios para el productor de acero:

- Un aumento de la potencia de cortocircuito disponible lo que se traduce en un menor tiempo de fusión y por tanto una mayor productividad.
- Una disminución del consumo específico de electrodos debido a arcos más estables.
- Una disminución del consumo específico de energía debido a menores pérdidas por fundición.
- Una disminución de las pérdidas de planta debido a la disminución del flujo de reactivo.

La disminución del consumo específico de electrodo así como el de energía junto con la más favorable factura de electricidad se traduce en una considerable reducción de los costos específicos de operación del proceso del HAE.

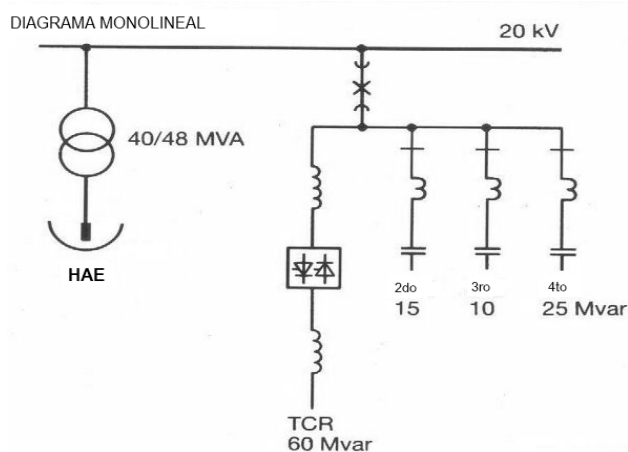


Fig. 8. Diagrama monolineal del horno y el SVC.

Desde el punto de vista puramente técnico el CEV también mejora la operación del horno: Disminuyendo las fluctuaciones de voltaje en el horno y en la red de potencia. Minimizando la distorsión armónica en el horno y en la red de potencia. Minimizando el voltaje de secuencia negativa en la planta así como en la red eléctrica. Mejorando el factor de potencia. Ver tabla 2.

Tabla 2. Beneficios obtenidos por la conexión del SVC.

Datos Técnicos	
Potencia Nominal del Horno	40/48 MVA
Tensión en la barra del alimentación del HAE	20 kV
Rango Nominal del SVC	60 Mvar
Beneficios del SVC	
Mejoramiento del Voltaje	12%
Aumento de la Potencia de fundición disponible	20,00%
Factor de Potencia en el PCC	PF $\geq$ 0,99
Incremento de Producción	10,00%
Disminución del consumo específico de electrodos	0,4 kg/ton
Disminución del consumo específico de energía	15 kWh/ton

CONCLUSIONES

La conexión de equipos de compensación de reactivo en industrias de fundición por arco eléctrico representan grandes beneficios tanto técnicos como económicos y además de esto presenta ventajas tanto para el productor como para el sistema eléctrico que alimenta la planta.

Desde el punto de vista del Sistema las ventajas que presenta se pueden resumir en estabilización del voltaje, reducción de las armónicas y balanceo de la carga, lo que se refleja como:

- Minimización de los disturbios por parpadeo de las luces ("flicker") en sus propias subestaciones y en las de los clientes cercanos.
- Reducción de las armónicas introducidas a la red de transmisión.
- Minimización de las operaciones erróneas de los dispositivos de protección.
- Control del voltaje en un tiempo del orden de 2 a 3 ciclos, lo que amortigua excelentemente las oscilaciones súbitas del voltaje por operación del horno.
- Cargas balanceadas por fases en la transmisión.

Desde el punto de vista del productor los beneficios son:

- Menores tiempos de fusión.
- Incremento de la producción de acero.
- Corrientes de arco más balanceadas.
- Extensión de la vida de los electrodos.
- Reducción del consumo de refractarios.
- Reducción de las pérdidas de energía y de los insumos energéticos.
- Mejor utilización del suministro de potencia activa.
- Eliminación de las penalizaciones tarifarias por factor de potencia.
- Mitigación de los transientes por el transformador del horno, alargando su vida útil.

REFERENCIAS

- [1] Silva, A. : "Calidad de Potencia Eléctrica en una Acería" EIC (Energía, Industria y Construcción), Peru 2007.
- [2] T. Petersson : *Reactive Power Compensation*, ABB Power Systems.
- [3] *There are better ways in FACTS*, ABB AB, FACTS Division, 2008.
- [4] *Static var compensators*. Cigré Task Force 38-01-02, 1986.

AUTORES

Antonio Baltasar Calmo e Silva.

Master en Ingeniería Electrotécnica, Electrónica y Telecomunicaciones por el Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal. Master en Ingeniería Electrotécnica, Sistemas de Potencia por la Escuela Real de Ingeniería de Estocolmo. Consultor Junior en The International Development Group AB en Estocolmo. Ha sido Gerente de ventas y Marketing de ABB en diferentes países. Actualmente se desempeña como Gerente Regional de Ventas y Marketing, Compensación de Potencia Reactiva, para América Latina en ABB AB, Power Systems, División FACTS.

e-mail: antonio.silva@se.abb.com

Moisés Barreto Banderas.

Ingeniero Electricista

Labora en el Ministerio Industria Eléctrica, en la Dirección de Desarrollo Eléctrico ocupa la responsabilidad de Director Desarrollo Perspectivo del SEN.

e-mail: mbarreto@inel.une.cu

Annavell Herrera Díaz

Ing. Electricista, especialista del Departamento de Desarrollo Perspectivo del SEN, INEL, Unión Eléctrica.

e-mail: annavell@inel.une.cu

Zaid Garcia Sánchez

Ingeniero Electricista, Máster en Ciencias, Profesor Asistente, Centro de Estudios Electroenergéticos (CEE), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. Colabora con la Unión Eléctrica desde el año 2006.

e-mail: zaid@uclv.edu.cu