



APLICACIONES INDUSTRIALES

Una solución integral para los problemas de suministro eléctrico de Antillana de Acero

An integral solution for the electricity supply problems of Antillana de Acero

Orlys Ernesto Torres Breffe^{1,*}; Julio Espinosa Domínguez¹; César Revuelta Capablanca³; Alexis Leandro Rodríguez Benítez²

¹Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana. Cuba

²Empresa de Mantenimiento a Grupos Electrógenos Fuel, La Habana, Cuba

³Empresa Metalúrgica José Martí, La Habana, Cuba

*Autor de correspondencia: otorres@electrica.cujae.edu.cu

Recibido: 3 de septiembre de 2019 Aprobado: 29 de enero de 2020

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional 

RESUMEN/ ABSTRACT

Las acerías con hornos de arco eléctrico, como la empresa José Martí comúnmente conocida como Antillana de Acero; son industrias que emplean el calor producido por un cortocircuito controlado para la obtención del acero. Estas acerías necesitan de una tensión estable y elevada para poder fundir de forma eficiente y al mismo tiempo, son un consumidor poderoso de potencia activa para el Sistema Electroenergético Nacional. El objetivo de este trabajo, fue la realización de un estudio de las condiciones de la empresa Antillana de Acero, donde se expusieron las principales causas que afectan su productividad y las afectaciones que ocasionan estas a nuestro SEN. Se estudiaron tres variantes, como solución a estos problemas y se seleccionó una de ellas desde un punto de vista técnico, teniendo como enfoque aumentar la productividad de esta empresa a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones.

Palabras clave: Antillana de Acero; armónicos; BESS; horno de arco eléctrico.

Steel mills with electric arc furnaces, such as the José Martí company commonly known as Antillana de Acero; they are industries that use the heat produced by a controlled short circuit to obtain the steel. These steel mills need a stable and high voltage to be able to melt efficiently and at the same time, they are a powerful consumer of active power for the National Electroenergetic System. The objective of this work was the realization of a study of the conditions of the Antillana de Acero company, where the main causes that affect their productivity and the effects that these cause to our SEN were exposed. Three variants were studied, as a solution to these problems and one of them was selected from a technical point of view, with the focus of increasing the productivity of this company from the results obtained in the simulations.

Key words: Antillana de Acero; BESS; electric arc furnace; harmonics.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las acerías juegan un papel fundamental en la producción y elaboración de acero a partir de chatarra o de hierro. El acero producido en estas empresas siderometalúrgicas es de vital importancia para la fabricación de materiales para la construcción y de otros bienes en cualquier nación. La empresa siderúrgica José Martí, conocida comúnmente como Antillana de Acero, radicada en el municipio del cotorro en la Habana, es la empresa siderúrgica más grande de Cuba y además, una de las cargas consumidoras más grandes del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Uno de los elementos fundamentales en Antillana de Acero es el horno principal de arco eléctrico, el cual es un sistema que emplea el calor producido por los cortocircuitos controlados en su interior, con el objetivo de fundir chatarras y producir aceros de alta aleación [1].

Cómo citar este artículo:

Orlys Ernesto Torres Breffe; *et al.* Una solución integral para los problemas de suministro eléctrico de Antillana de Acero. 2020, vol. 41, n.2, mayo/agosto. ISSN: 1815-5901

Sitio de la revista: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>

El arco eléctrico, genera picos de corrientes con magnitudes muy elevadas las cuales contienen armónicos superiores a la fundamental. Estos picos de corrientes, producto de los cortocircuitos, producen un elevado consumo de potencia activa y reactiva al sistema eléctrico que lo alimenta. La elevada potencia reactiva producida, y el elevado contenido de corrientes armónicas, deteriora la señal de tensión en la barra fundamental de 38 kV en Antillana de Acero lo cual afecta la calidad de la fundición. La elevada potencia activa que necesitan para desarrollar el cortocircuito, provoca en el (SEN) oscilaciones importantes de frecuencia que no siempre son toleradas por este. En ocasiones, el SEN obliga a que esta industria consuma en forma de rampas o con escalones de consumos en ascenso y descenso de potencia activa que finalmente afectan la eficiencia del horno de arco eléctrico. Para mejorar la eficiencia del horno de arco eléctrico, se pueden instalar filtros pasivos los cuales resuelven el problema de los armónicos, la instalación de Controladores Estáticos de Reactivos (SVCs) que mejoran la caída de la tensión o la instalación de Sistemas de Almacenamiento de Energía por Baterías (BESS), los cuales resolverían el problema de los armónicos, la estabilización de la tensión y la reducción de las oscilaciones de la frecuencia con un solo dispositivo.

El Horno de Arco Eléctrico (HAE)

Los hornos de arco eléctrico, aprovechan las temperaturas que producen las corrientes de cortocircuitos controlados para fundir chatarras metálicas. Las corrientes de cortocircuitos, se mantienen constantes a través del accionamiento que controla la cercanía de los electrodos a las chatarras [2].

Al acercarse los electrodos a la chatarra se producen arcos eléctricos, los cuales se desean que sean homogéneos (figura 1); es decir, que tengan magnitudes constantes, lo cual no ocurre así todo el tiempo [3]. En los primeros instantes, los electrodos no se acercan o descienden hacia la chatarra de manera uniforme, por lo que alguna fase debe separarse, mientras que otra debe continuar descendiendo. Esto hace que el cortocircuito se produzca de forma asimétrica.

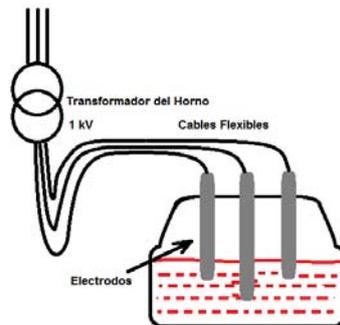


Fig. 1. Los electrodos en la chatarra de un horno de arco eléctrico.

Los primeros instantes de la fundición son los más severos en cuanto a la producción de armónicos, desequilibrios de las corrientes e inestabilidad de la tensión, luego el proceso es más controlado. Finalmente, cuando el arco eléctrico se establece, este no produce tantos armónicos, ni desequilibrios de las corrientes en las fases (figura 2).

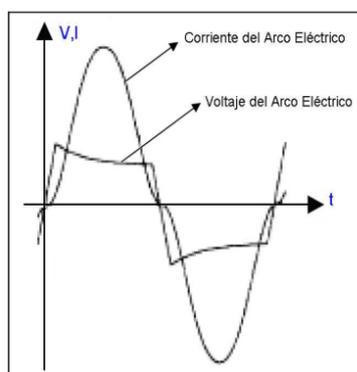


Fig. 2. Forma de onda genérica de la tensión y la corriente durante el arco eléctrico establecido [1].

Las elevadas corrientes producidas por los continuos cortocircuitos, provocan un crecimiento importante de las potencias activas y reactivas en todas las fases del circuito. Este proceso de fundición de un conjunto de chatarras se les llama coladas y se repiten varias en un proceso de fundición (figura 3).

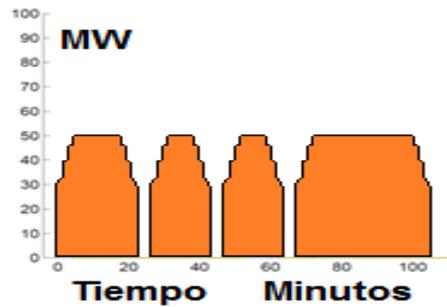


Fig. 3. Forma de onda de la potencia activa durante las coladas de un horno de arco eléctrico [1].

Los crecimientos de las potencias activas y reactivas, en conjunto con las componentes armónicas producidas por las elevadas corrientes; son las causas fundamentales que provocan que las fundiciones no se hagan con la mayor eficiencia. La eficiencia de la fundición está relacionada con su duración; es decir, si el proceso de licuado del metal se hace más extenso, aumenta el consumo de potencia del SEN, y por consiguiente el costo de la fundición.

Por otro lado, en términos de eficiencia, se encuentran los gastos que incurren en la realización de la fundición. El control de la corriente del arco eléctrico, obliga a variar continuamente los TAPS de los reactores y transformadores. Las corrientes durante arcos eléctricos poco establecidos, pueden incidir directamente en los ladrillos refractarios provocando su destrucción prematura.

Problemas eléctricos en Antillana de Acero y las soluciones más actualizadas

El esquema eléctrico de la Antillana de Acero es de forma simplificada como se muestra en la figura 4.

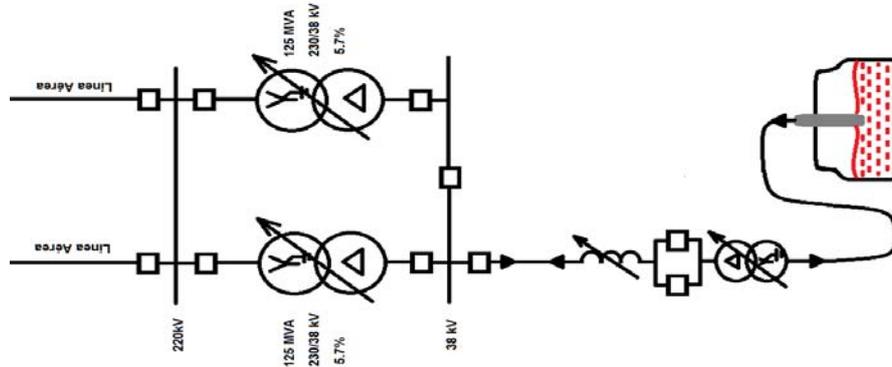


Fig. 4. Esquema eléctrico simplificado de Antillana de Acero.

Para las industrias del acero, la eficiencia del proceso de fundición del horno de arco eléctrico se resume a estabilizar la tensión en la barra principal (38kV) del horno y con ello hacer una fundición eficiente y rápida. Como medidas para lograr la estabilización de la tensión se pueden mencionar las siguientes [3]:

1. Incrementar la potencia de cortocircuito en la barra principal de la acería.
2. Eliminación o compensación de los armónicos que producen flicker.
3. Compensación de los elevados picos de potencia reactivas que se producen en el proceso de fundición.

En Antillana de Acero, la potencia de cortocircuito se ha incrementado notablemente, al aumentar la potencia de los transformadores principales a 125 MVA con respecto a los 60 MVA que poseían con anterioridad. Adicionalmente, los transformadores instalados presentan una baja reactancia (5.76%), contribuyendo así a la disminución de la caída de tensión en la barra principal de la acería. Al elevar la potencia de cortocircuito, se reduce la reactancia del sistema que alimenta a la industria donde está conectado el horno y por tanto, los armónicos encontrarán un camino menos resistivo hacia el (SEN).

La instalación de filtros pasivos, permitiría la reducción de los armónicos al sintonizarse a la frecuencia de estos, además de que compensarían la forma estática de la potencia reactiva. Pero dicha instalación, solo produciría una determinada cantidad de potencia reactiva al no poder adaptarse los filtros a los cambios de potencia reactiva que el horno de arco eléctrico produce. La amplia utilización de SVCs (Static Var Compensator) en las acerías, favorecen el filtrado de los armónicos producidos en el momento de la fundición, así como la compensación de forma dinámica de la potencia reactiva con lo cual se mejora la tensión en la barra principal, pudiéndose realizar una fundición más rápida y eficaz. Los sistemas SVCs, entregan la potencia reactiva que demandan los sistemas de potencia a los cuales están conectados, tanto los reactivos capacitivos como los inductivos. En comparación con los filtros pasivos simples, estos son más favorables para suplir la potencia reactiva oscilante producida por los hornos de arco eléctrico. Otros de los dispositivos de compensación dinámica de reactivo es el STATCOM (Static Synchronous Compensator), que utiliza dispositivos de electrónica de potencia como los IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) o los GTOs (gate turn off thyristor), [4]. El STATCOM tiene ventajas con respecto a los SVCs, debido a que el control de la potencia reactiva que pueden ofrecer es menos dependiente de los niveles de tensión.

Los problemas que Antillana provoca para el Sistema Electroenergético Nacional (SEN)

Los picos de potencia activa que se producen durante el proceso de fundición, no debieran ser un problema para Antillana de Acero porque es un proceso transitorio normal de estas industrias, pero la alta demanda de potencia activa produce oscilaciones peligrosas a la frecuencia del sistema, y en numerosas ocasiones, estas no pueden ser toleradas por el SEN. Para resolver esto, el SEN obliga a la acería a reducir estos picos, obligándola a trabajar de manera escalonada o en rampa.

La entrada en rampa de la fundición, se logra incrementando la reactancia del horno y reduciendo las corrientes producidas por el arco eléctrico. Esto hace ineficiente el proceso de fundición, al reducir la vida útil de los ladrillos refractarios y los electrodos, propiciando el alargamiento de las coladas en el horno con el incremento notable en el consumo de energía. Ni los filtros pasivos, ni el SVC, ni los más modernos STATCOMs, logran reducir los picos de potencia activa producidos en el proceso de fundición, pero los sistemas BESS si pueden hacerlo y adicionalmente permiten estabilizar la tensión en la barra principal de la industria.

La implementación de un sistema BESS, al parecer sería la solución para Antillana en comparación con las anteriores soluciones propuestas. No se ha encontrado referencias de la utilización de sistemas BESS para lograr estos objetivos, las utilidades están dirigidas a estabilizar los sistemas con fuertes penetraciones de fuentes de energía renovables [5], y en el caso de los hornos de arco eléctrico, a la mitigación de flicker.

Los filtros pasivos de armónicos

Los filtros pasivos no son la única solución para reducir o eliminar los armónicos. Otra forma de impedir la circulación de armónicos, es la cancelación mediante las conexiones de los transformadores, y en este sentido la conexión delta – estrella es ampliamente conocida como la que corta el paso de las corrientes de armónicos de orden 3 y sus múltiplos [3]. Los filtros pasivos de armónicos existen de diferentes tipos y formas de conexión (figura 5).

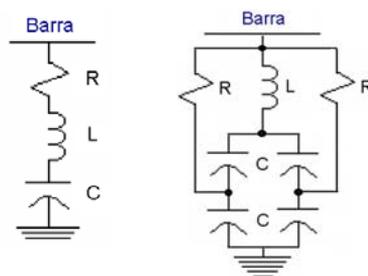


Fig. 5. Esquemas simplificados de los diferentes filtros de armónicos [1].

El concepto fundamental de filtro, está basado en la reducción de su impedancia para que la corriente de cualquier orden o rango de armónicos encuentre un camino de menor impedancia, y que por tanto circule por el filtro de retorno hacia la fuente que lo produce y no por el sistema de potencia [1].

Los filtros pasivos se conforman de resistencias, inductancias y capacitancias. Estos filtros logran reducir su impedancia utilizando el concepto de resonancia [1, 6]. La impedancia del filtro, en condiciones de 60 Hz es de gran valor y por tanto, la corriente fundamental no circula por él. Cuando aparece la corriente a la frecuencia de resonancia, la impedancia se reduce considerablemente. La impedancia no se puede reducir a cero, porque en los reactores y capacitores existen resistencias que no se cancelan en el proceso de la resonancia.

El SVC (Static Var Compensator)

Los compensadores estáticos de reactivos (SVCs), son sistemas que permiten entregar de forma controlada y continua la potencia reactiva que necesita el sistema de potencia donde están conectados. Adicionalmente sirven como filtros de armónicos de determinadas frecuencias.

Los SVCs pueden estar conformados por condensadores conmutados por tiristores (TSC) y las bobinas conmutadas (TSR) o controladas (TCR) por tiristores los cuales incluyen la electrónica de potencia, además de filtros pasivos de armónicos (figura 6). En el caso de los hornos de arco eléctrico, como la potencia reactiva no es fija sino variable y con elevado contenido de armónico estos SVCs representan una solución muy aplicada internacionalmente [3].

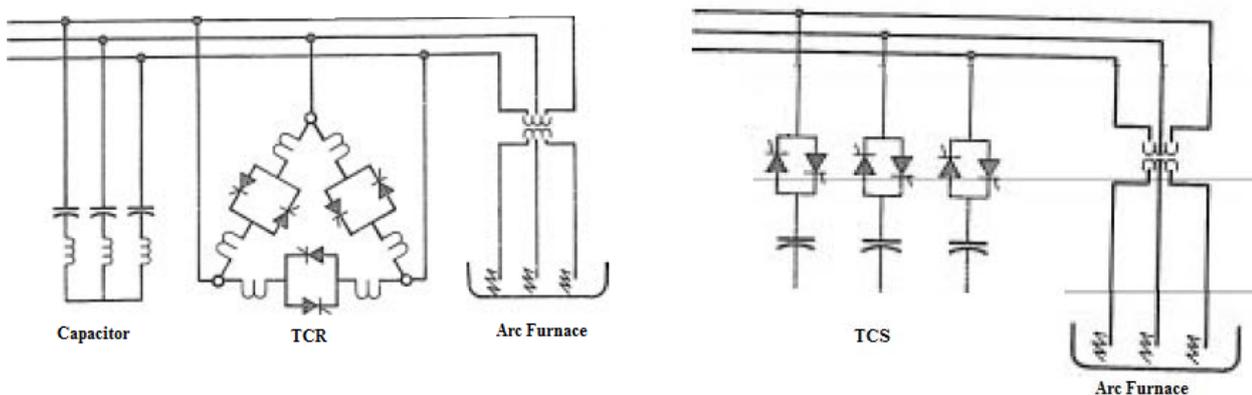


Fig. 6. Esquemas de SVCs formados por TCR – TCS y filtros pasivos [3].

Los sistemas de almacenamiento de energía por Baterías (BESS)

Los sistemas de almacenamiento de energía por baterías son uno de muchos tipos de sistemas de almacenamiento existentes hoy día (figura 7), [7, 8]. El uso fundamental de los sistemas de almacenamiento, es almacenar energía durante los horarios donde la generación es eficiente para generarla cuando la generación es más costosa [6]. Otra aplicación importante, es el uso de estos sistemas para favorecer la estabilidad del sistema de potencia [4, 8], conjunto a las Fuentes Renovables de Energía (FRE) [9].

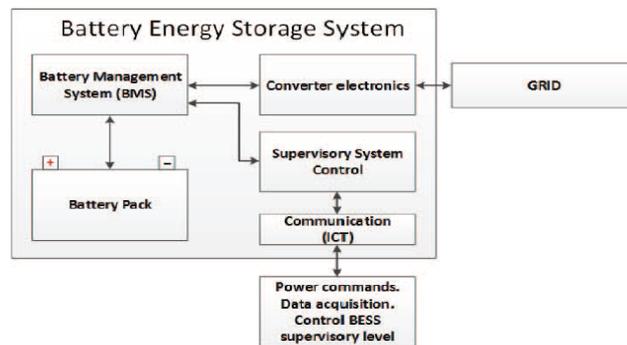


Fig. 7. Esquema simplificado de un sistema de almacenamiento de baterías [5].

Los sistemas BESS, pueden entregar la potencia cuando exista déficit de generación, así como pueden consumir energía en caso de un exceso de generación. Esto lo deben hacer siempre los sistemas de potencia con sus unidades de generación, pero no siempre pueden lograrlo con la rapidez que se necesita. Las baterías que se emplean en estos sistemas de almacenamiento son muchas, algunas conocidas como Redox, otras de Iones de Litio y hasta Super Capacitores se pueden emplear según sea la aplicación de los sistemas de almacenamiento BESS [5, 10].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilizando la simulación matemática con el empleo de datos reales de los circuitos de la Empresa Antillana de Aceros, se obtienen los resultados que se mostrarán en este documento que permiten la obtención de resultados fiables y reales para su aplicación en la empresa.

Como primera parte se hizo la simulación sin ninguna de las variantes de solución. Luego a partir de esta, que es la peor variante, se representarán los resultados con el funcionamiento de los filtros de armónicos, la instalación de un SVC y el sistema BESS.

Simulación de una cesta de fundición

Cuando se simuló la forma de una onda de corriente armónica típica de un horno de arco eléctrico sin filtro se observó que la tensión en la barra principal del horno disminuyó considerablemente (figura 8). Al simular el comportamiento con dos transformadores de 125 MVA en paralelo, la deformación de la onda de tensión no es tan grave, cayendo a valores de 37,52 kV con una caída de tensión de 0,48 kV constituyendo un 1,26% de la tensión nominal.

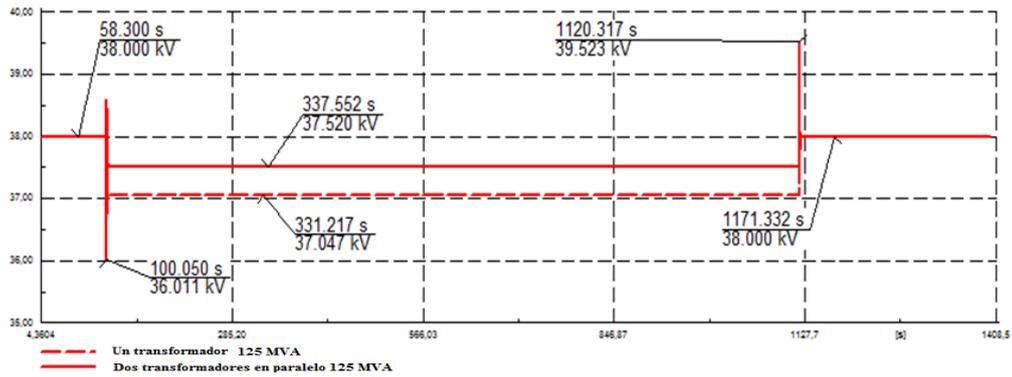


Fig. 8. Comportamiento de la tensión secuencia positiva sin instalar los filtros, ni SVC, ni BESS.

Los resultados anteriores muestran que en el proceso de fundición del horno para una colada de 50 MW con un factor de potencia de 0.7 y un tiempo de duración de 17 minutos, las caídas de tensiones están resueltas con el cambio del nuevo transformador de 125 MVA.

El arco eléctrico que es creado dentro del horno presenta un carácter altamente inestable, esta característica provoca que la onda de corriente que demanda el horno presente mucha contaminación de armónicos. Este comportamiento es reflejado en la forma de onda de la tensión en la barra principal, (figura 9). En la figura 9, se observa la distorsión de la onda de la corriente por fase y el alto contenido de armónicos, destacándose los de 2do y 4to orden. Los armónicos de 2do orden se encuentran alrededor del 7,7%, mientras que los del 4to están por el 3%.

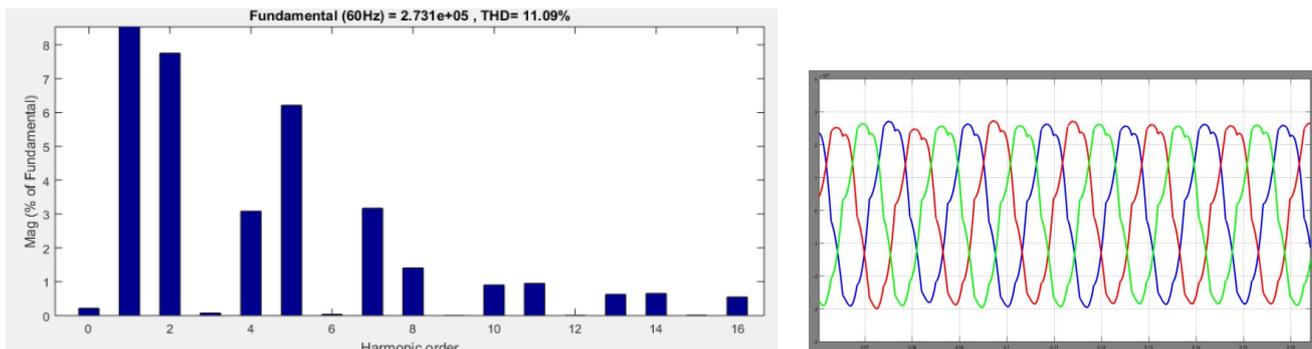


Fig. 9. Forma de onda de las corrientes por las fases sin instalar los filtros.

Simulación de una cesta de fundición con Filtros pasivos

Al realizar la simulación utilizando los filtros de armónicos a instalar en la barra principal, se logra reducir la caída de tensión en la barra de 38 kV, evidenciando la acción de los filtros (figura 10). Con la instalación de los filtros pasivos, la tensión se incrementa comparada con la tensión existente antes de la fundición, pero esto se puede resolver cambiando la posición del tap de los transformadores. Este incremento de la tensión está dado por los capacitores fijos que presentan dichos filtros, los cuales inyectan potencia reactiva capacitiva al SEN y a la propia Antillana de Acero.

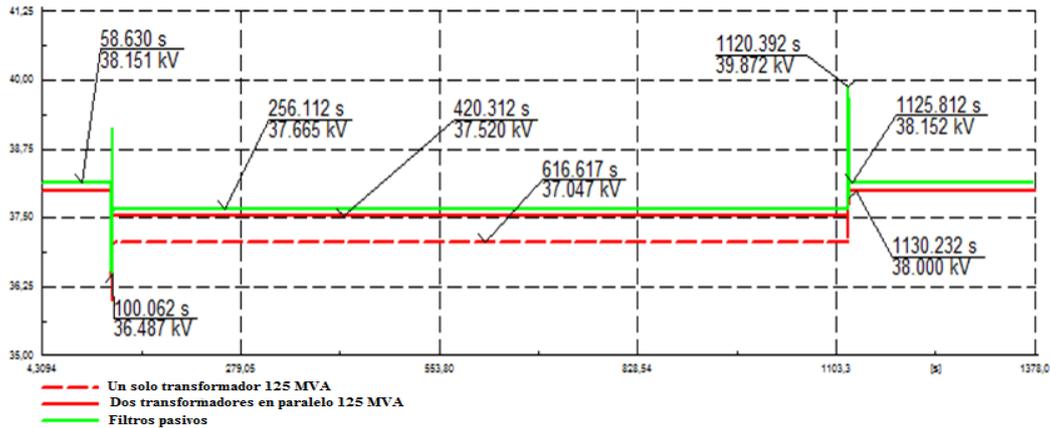


Fig. 10. Comportamiento de la tensión con la instalación de los filtros.

La utilización de los filtros pasivos y los dos transformadores de 125 MVA en paralelo, muestran que el comportamiento de la tensión cae a 37,665 kV ocasionando una caída de tensión de 0,335 kV que constituye un 0,88% de los 38,5kV que se espera que existan en la barra principal.

El contenido de armónicos de la corriente que se demanda del SEN se disminuyó considerablemente después de utilizar los filtros pasivos de 2do, 3ro y 4to orden. Estos filtros facilitan un camino de baja impedancia a la frecuencia armónica a la que fueron sintonizados, evitando que la mayor parte de la corriente armónica circule al SEN (figura 11).

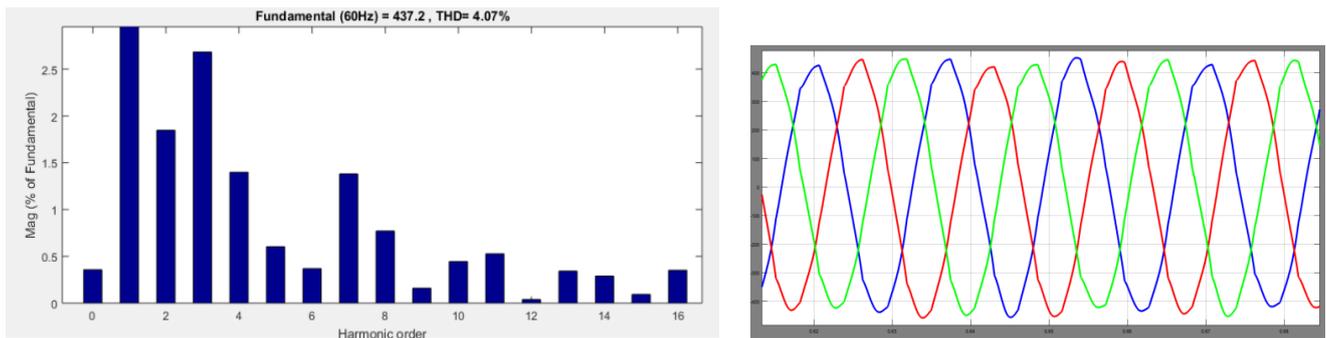


Fig. 11. Forma de onda de las corrientes por las fases con la instalación de los filtros.

La distorsión de la onda de la corriente que se demanda del SEN se eliminó considerablemente con la aplicación de los filtros pasivos y por su parte también el THD ha disminuido drásticamente desde un 11,09% a 4,07%. Los filtros no solo permiten mejorar o reducir el nivel de armónicos, sino mejorar el perfil de tensión en la barra durante la cesta de fundición.

Simulación de una cesta de fundición con un SVC

Al simular el proceso de fundición del horno de arco eléctrico de Antillana de Acero utilizando el SVC instalado en la barra principal del horno, se observa como la tensión en esta barra mejoró su comportamiento (figura 12). En la figura 12, se observa que la tensión es prácticamente invariable durante el proceso de fundición y antes de él, manteniéndose la tensión constante e igual a la tensión nominal de la barra principal, por lo que se puede decir que no existe caída de tensión. Esto es gracias al SVC que constantemente entrega la potencia reactiva que necesita el horno en la magnitud exacta que se necesita.

Sin lugar a dudas cuando la potencia de cortocircuito de la barra principal de una acería es baja, los SVC son una solución mucho más eficaz que el empleo de los filtros pasivos; pero el costo de su inversión no se justificaría cuando la potencia de cortocircuito de la barra principal es tan elevada, como es el caso de Antillana de Acero.

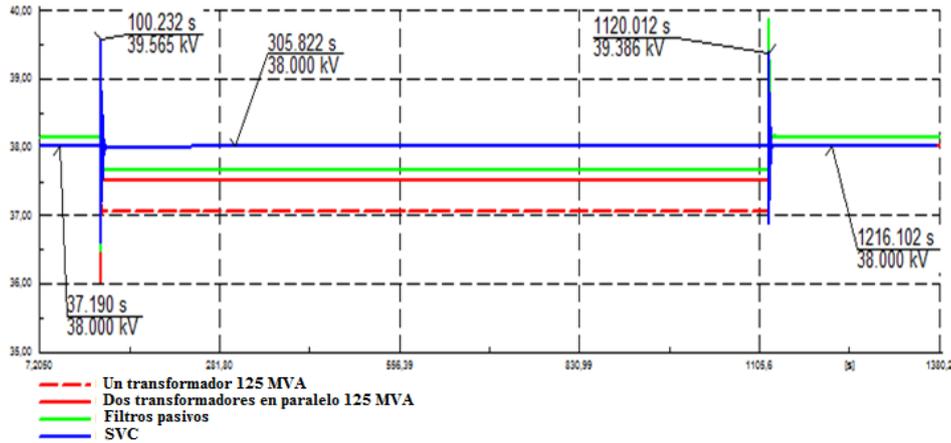


Fig. 12. Comportamiento de la tensión de un horno de arco eléctrico con el empleo de un SVC.

Se observan ciertos transitorios severos en el principio de la fundición y al final de la misma. Estos transitorios no son peligrosos por su tiempo sino por la magnitudes de las tensiones durante los mismos. Las sobre tensiones más severas se observar del orden de 39.6 kV lo representan un 4% de la tensión nominal de la barra de 38 kV. En un tiempo tan rápido estas sobre tensiones no representan ningun efecto negativo para el aislamiento. Como la barra es en delta, su aislamiento tendría que ser de todas formas reforzados para soportar tensiones de fase a tierra debidas a cortocircuitos de fase a tierra.

Simulación de una cesta de fundición con un sistema BESS

Los altos consumos de potencia activa y reactiva que demanda el horno de arco eléctrico tienen un gran efecto en nuestro SEN, debido fundamentalmente a la falta de regulación primaria en este. El horno no puede alcanzar su máxima potencia de manera inmediata, pues este lo logra de manera escalonada. Esto es una dificultad para la acería, al alargarse el tiempo de las coladas reflejándose en una disminución de la productividad y de la eficiencia, incrementándose el consumo de energía eléctrica y electrodos. Para resolver este problema se propuso el uso de las baterías de almacenamiento de energía (BESS), que gracias a sus características y propiedades pueden adaptarse a este tipo de situación. En el caso de Antillana se implementaría las baterías para ayudar al SEN durante la fundición del HAE. El sistema de almacenamiento de batería no tendrá como función suministrar la energía, sino suavizar la entrada y salida de los picos de potencia activa y reactiva producidos por el HAE. La idea es que las baterías entreguen toda la energía almacenada muy rápidamente cuando el horno empiece a fundir, y durante la parada de este las baterías serian cargadas nuevamente para el próximo arranque (figura 13).

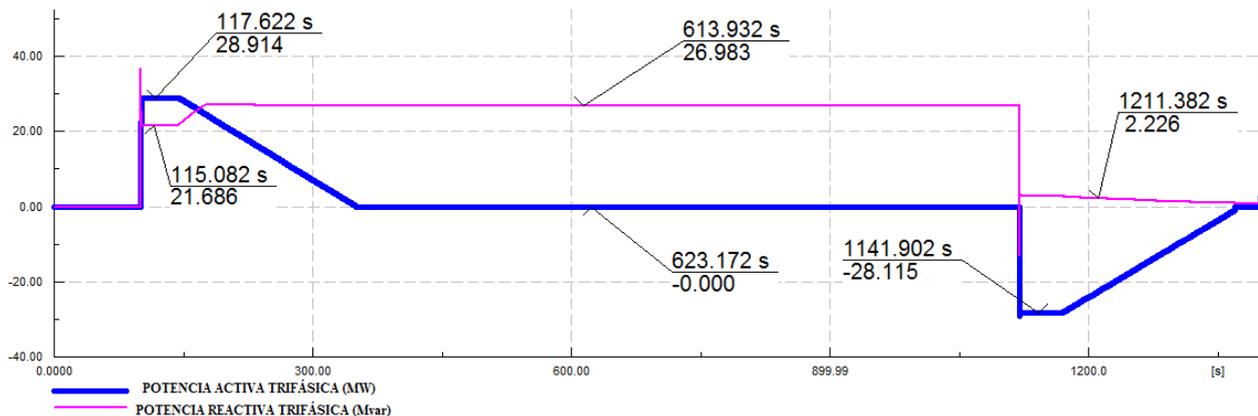


Fig. 13. Entrega de la energía por parte del sistema BESS para Antillana de Acero.

Al empezar el proceso de fundición el HAE demanda unos 50 MW; el sistema de batería entrega rápidamente su energía suministrando unos 28 MW constante de potencia activa por un corto periodo de tiempo, para luego ir disminuyendo su potencia en forma de rampa hasta descargarse, este proceso de descarga dura de 3 a 5 minutos. El nuevo sistema BESS reduce la demanda de potencia activa al SEN y se amortigua la entrada del horno, evitando que la frecuencia caiga a valores no permisibles.

Con la finalización de la fundición de una cesta y junto con la parada del horno se pone a cargar el sistema de baterías comenzando con un consumo de 28 MW constante, para luego ir disminuyendo su demanda en forma de rampa. Este comportamiento ayuda al SEN amortiguando la salida del horno y evitando que la frecuencia aumente a valores no permitidos.

Cuando se simuló el comportamiento del SEN con el funcionamiento de las baterías de almacenamiento de energía (figura 14), se puede observar el gran efecto que tienen estas. Cuando el HAE comienza el proceso de fundición, la demanda que se le hace al SEN es de 21 MW. Este resultado era el esperado al utilizar el sistema BESS, donde la demanda del horno de arco eléctrico se comparte entre el SEN y el sistema de batería.

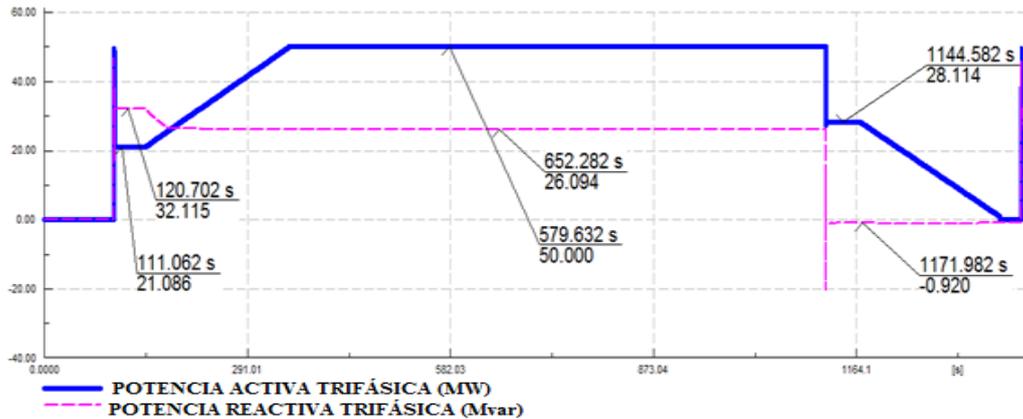


Fig. 14. Comportamiento del SEN con el funcionamiento del sistema BESS.

Con estos resultados, la rampa que antes hacía el HAE para iniciar su proceso de fundición ahora es realizada por el sistema de almacenamiento de energía. El efecto del sistema de baterías de almacenamiento de energía en la frecuencia del SEN, es otro de los resultados de las simulaciones (figura 15).

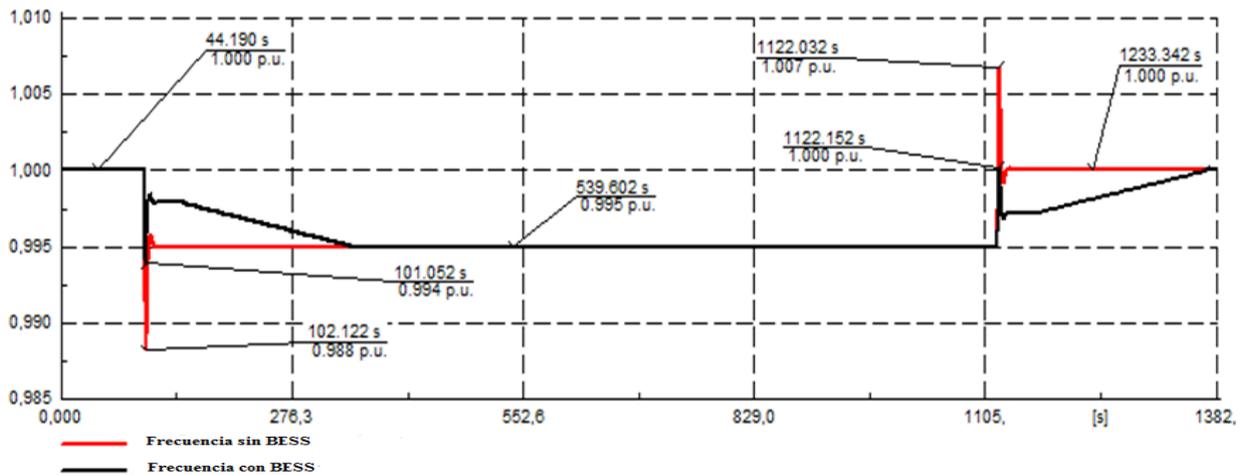


Fig. 15. Simulación del comportamiento de la frecuencia del SEN con y sin BESS.

Cuando no se utiliza el sistema BESS el sistema experimenta una caída de la frecuencia a un 0,988 pu lo que equivale a 59,28 Hz, lo cual puede ser muy peligroso y provocar disparos por frecuencia en varias zonas del país. Luego la frecuencia se estabiliza en los 0,995pu que equivale a 59,7 Hz. Aunque no se simuló, la frecuencia no quedará allí sino que el control secundario del sistema la llevará a estar cerca de los 60 Hz un poco después. Al terminar la fundición, la frecuencia se eleva transitoriamente a 1,007 pu lo cual equivale a 60,42 Hz, valor por encima de las normas establecidas (59,7 Hz – 60,2 Hz). Con el BESS la frecuencia solo cae transitoriamente a 0,994 pu que equivale a 59,64Hz y no existen transitorios de incremento por encima de los 60 Hz. Estos resultados demuestran que sin lugar a dudas el sistema BESS es favorable para la estabilidad de la frecuencia del SEN; y para Antillana de Acero sería la solución más efectiva.

CONCLUSIONES

El uso de filtros pasivos resuelve el problema de los armónicos que distorsionan la forma de onda de la corriente y la tensión, además de reducir la demanda de potencia reactiva al SEN y mejorar en alguna medida la caída de tensión en la barra principal del HAE.

La variante del SVC es la más efectiva para hornos de arcos eléctricos en todo el mundo. Cuando la barra tiene una elevada potencia de cortocircuito como es el caso de Antillana de Acero, la solución no resulta económicamente factible si se le compara con los filtros pasivos, unido a los dos transformadores de alta potencia y baja impedancia.

Luego de las simulaciones podemos concluir que la solución más eficiente e integral sería la implementación de un sistema de baterías BESS. Para dar un margen de confiabilidad, se implementaría el sistema BESS junto a los filtros pasivos para asegurar el filtrado de las corrientes armónicas, en conjunto con los dos transformadores de 125 MVA de baja impedancia, conectados en paralelo.

REFERENCIAS

- [1]. NOVOA, Raúl Santiago Villafuerte. “Modelación, Simulación y Determinación de Índices de Distorsión Armónica y efecto flicker, en el Sistema Nacional de Transmisión, causados por la Conexión de Hornos de Arco Eléctricos, Aplicado al caso de Novacero S.A”. Tesis de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2008. [Consultado febrero-mayo de 2018]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/699/1/CD-1644%282008-08-05-09-38-56%29.pdf>
- [2]. VILLA, Gabriel Ricardo Estrada. “Evaluación del modelo de Arco Eléctrico para estimar Niveles de Flicker”. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia 2014. [Consultado el: 24 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/47412/1/7112004.2014.pdf>
- [3]. J.E.Miller, Timothy. “*Reactive Power Control in Electric Systems*”. New York. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. Printed in the United States of America, 1982. [Consultado: 14 de abril de 2018]. Disponible en: https://kupdf.net/download/t-j-e-miller-reactive-power-control-in-electric-systems_59f3ecc4e2b6f5d4776dfda7_pdf ; ISBN 0-471-86933-3.
- [4]. CALDERÓN Johnier José, et al. “Revisión Bibliográfica del Estado del Arte de los Compensadores Estáticos (SVC)”. Revista Investigaciones Aplicadas. 2012, v. 6, n.1, p. 26-35. [Consultado: marzo de 2018]. Disponible en: <https://revistas.upb.edu.co/index.php/investigacionesaplicadas/article/download/1167/1479> ; ISSN 2011-0413
- [5]. R. Hidalgo-León, et al. “*A survey of battery energy storage system (BESS), applications and environmental impacts in power systems*”. In: 2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM): 2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM) [online]. 2017, s. 1–6. ISBN null. Dostupné z: doi:10.1109/ETCM.2017.8247485. [Consultado en: mayo de 2018]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8247485/>
- [6]. De La Rosa, Francisco C. “*Harmonic and Power System*”. Taylor & Francis Group, LLC. 2006. p.190. [Consultado mayo de 2018]. Disponible en: <http://prof.usb.ve/bueno/Libros/%20Harmonics%20and%20Power%20Systems%20%28Electric%20Power%20Engineering%29%20%20.pdf> ; ISBN 0-8493-3016-5.
- [7]. M. T. Lawder, et al. “*Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications*”. Proceedings of the IEEE [online]. 2014, 102(6), 1014–1030. ISSN 1558-2256. Dostupné z: doi:10.1109/JPROC.2014.2317451. [Consultado en: junio de 2019]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6811152/>
- [8]. X. LI a S. WANG. “*A review on energy management, operation control and application methods for grid battery energy storage systems*”. CSEE Journal of Power and Energy Systems [online]. 2019, 1–15. ISSN 2096-0042. Dostupné z: doi:10.17775/CSEEJPES.2019.00160. [Consultado en: septiembre de 2019]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8735431/>
- [9]. ANH Thi Nguyen Surachai Chaitusaney. “*Optimum schedule and size of BESS in the low voltage network with high penetration of solar rooftops to maintain voltages within acceptable limit*”. 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). [Consultado en: julio de 2019]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8096206>. DOI: 10.1109/ECTICon.2017.8096206 ; ISBN: 978-1-5386-0449-6.
- [10]. HOLGER C. Hesse, et al. “*Lithium-Ion Battery Storage for the Grid-A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids*”. Energies 2017, v. 10, n. 12, p. 42. [Consultado en: julio de 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/321735081_Lithium-Ion_Battery_Storage_for_the_Grid-A_Review_of_Stationary_Battery_Storage_System_Design_Tailored_for_Applications_in_Modern_Power_Grids. ; DOI:10.3390/en10122107.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES:

Orlys Ernesto Torres Breffe <https://orcid.org/0000-0001-7781-2611>

Diseño de la investigación, recolección de los datos, modelación matemática. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Cesar Revuelta Capablanca <https://orcid.org/0000-0003-0925-777X>

Diseño de la investigación, recolección de los datos. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Julio Espinosa Domínguez <https://orcid.org/0000-0001-8822-2617>

Diseño de la investigación, recolección de los datos, modelación matemática. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Alexis Leandro Ródriguez Benitez <https://orcid.org/0000-0002-1840-800X>

Diseño de la investigación, recolección de los datos, modelación matemática. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.