



DISEÑO DE UN STATCOM PARA LA MITIGACIÓN DEL FLICKER PRODUCIDO POR HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO

F. Issouribehere*

J. L. Agüero*

P. E. Battaiotto**

*** IITREE-LAT FI-UNLP (Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos
Eléctricos-Laboratorio de Alta Tensión. Universidad Nacional de La Plata)**

**** LEICI FI-UNLP (Laboratorio de Electrónica Industrial, Control e Instrumentación)**

RESUMEN

Este artículo describe los aspectos de Calidad de Servicio, y las mediciones realizadas en el Punto de Acoplamiento Común (PAC) donde se encuentra conectado un Horno de Arco Eléctrico. El análisis detallado de las mediciones indica que los niveles de Flicker en el Punto de Suministro de la Acería se encuentran por encima de los niveles establecidos en las normativas Argentina e Internacional. Sobre la base de las mediciones se estima el Factor de Compensación de Flicker (FI) necesario para la determinación del porte de un compensador de potencia reactiva adecuado.

Las rápidas variaciones de las corrientes del horno de arco requieren una velocidad de respuesta extremadamente grande por parte del compensador. Esto, asociado a los niveles de Flicker registrados, determina la necesidad de utilizar un compensador tipo STATCOM.

En este trabajo se presentan los principios de funcionamiento básicos del STATCOM y se detallada la estrategia de control implementada para la mitigación de las fluctuaciones de tensión. Se realiza una descripción detallada de los diversos bloques que conforman el sistema de control.

Se implementa el modelo completo del STATCOM en el Programa SIMULINK de MATLAB. Este modelo incluye el detalle de los componentes de potencia y del sistema de control.

Sobre la base de las mediciones de corriente realizadas se verifica el comportamiento del STATCOM vinculado a la barra de la Acería.

PALABRAS-CLAVE

Hornos de Arco Eléctrico. Flicker. Armónicas. Calidad de Servicio. SVC. STATCOM

1. INTRODUCCIÓN

Los hornos de arco eléctrico pueden resultar serias cargas perturbadoras en los sistemas eléctricos. La modulación de amplitud de la tensión de alimentación en niveles del orden del 0.3 % pueden provocar problemas de parpadeo o Flicker en las lámparas de filamento. Estas perturbaciones son particularmente molestas para los seres humanos cuando se encuentran en el rango de frecuencias entre 3 y 10 Hz.

Un horno de arco eléctrico de 2.5 MW de potencia y 8 toneladas de acero por colada es conectado al sistema de Distribución en 13.2 kV. El IITREE realizó mediciones de Calidad de Servicio con el fin de evaluar los niveles de emisión del horno de arco como usuario perturbador. El análisis de las mediciones indica que los niveles de Flicker se encuentran por encima de los niveles establecidos en las normas.

La manera más eficaz de controlar las fluctuaciones de tensión y limitar el nivel de Flicker, es compensar las variaciones de la potencia reactiva consumida por la carga.

En este trabajo se describe en detalle la estrategia de control implementada para compensar las fluctuaciones de tensión, se implementa dicho sistema de control sobre la base de la Teoría d-q y se realiza un modelo matemático del compensador. Se demuestra mediante simulaciones digitales y resultados experimentales la habilidad del STATCOM para mitigar las fluctuaciones de tensión.

2. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

La Figura 1 muestra un diagrama unifilar de la red de alimentación del horno de arco eléctrico.

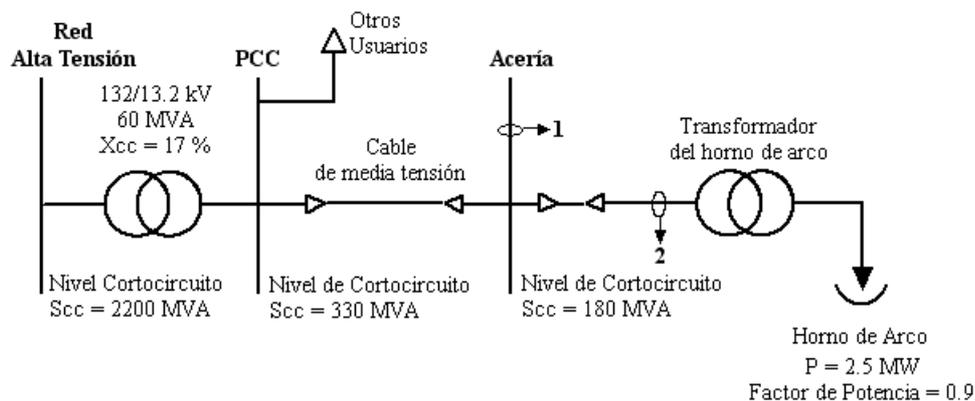


Figura 1—Diagrama unifilar de la red y puntos de medición.

La acería se encuentra alimentada desde la red pública en 13.2 kV. Los puntos numerados como 1 (alimentación de la acería) y 2 (primario del transformador del horno de arco) en la Figura 1 indican los puntos de medición de corrientes y tensiones trifásicas y Flicker.

3. MEDICIONES DE CALIDAD DE SERVICIO EN LA ACERÍA

El horno de arco eléctrico consiste en un crisol o cuerpo de placa de acero forrado con material refractario. Los hornos de arco eléctrico funcionan con tres electrodos de grafito sostenidos por un soporte móvil, lo que permite que sean bajados e izados para controlar el arco eléctrico. Luego que el horno se encuentra cargado con chatarra, el proceso de fundición comienza bajando los electrodos hasta establecer arcos eléctricos con la chatarra metálica. El calor generado por los tres arcos eléctricos provee la energía necesaria para la fundición del metal.

Existen diferentes fases en la operación de los hornos de arco eléctrico. En términos de flicker, cada fase presenta un impacto diferente sobre el sistema de potencia. Las fases son:

- Arranque
- Fundición
- Afino

Desde el punto de vista del Flicker, los períodos más críticos son el Arranque y luego la Fundición, que ocurren cada vez que se adiciona una nueva cesta de chatarra. Estos períodos están caracterizados por grandes variaciones aleatorias en la potencia reactiva requerida por el horno de arco.

Debido a las variaciones aleatorias de la longitud de los arcos eléctricos existen variaciones aleatorias en la corriente tomada por el horno, lo que causa variaciones de tensión proporcionales a la impedancia del sistema aguas arriba del horno. Dada la naturaleza errática del arco eléctrico, es esencial la presencia de un compensador estático tipo STATCOM, capaz de mantener el factor de potencia relativamente constante, y por lo tanto estabilizar la tensión de la red durante la obtención del producto completo. La estabilidad de la tensión permite reducir el impacto sobre los usuarios de la red y aumenta la potencia disponible para fundir la chatarra durante el proceso completo de obtención de acero, haciendo que el horno opere de una manera más eficiente.

Los resultados obtenidos de las mediciones normalizadas de armónicas se presentan en la Figura 2 y la Figura 3. Los niveles de distorsión de tensión y corriente medidos se comparan con los límites impuestos por [1], [2] y [3] en la Tabla I y Tabla II respectivamente.

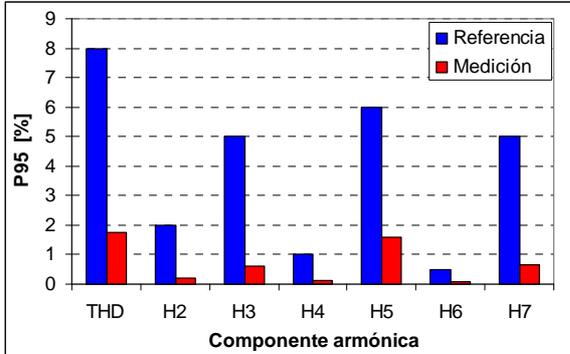


Figura 2—Esquema de la red y puntos de medición.

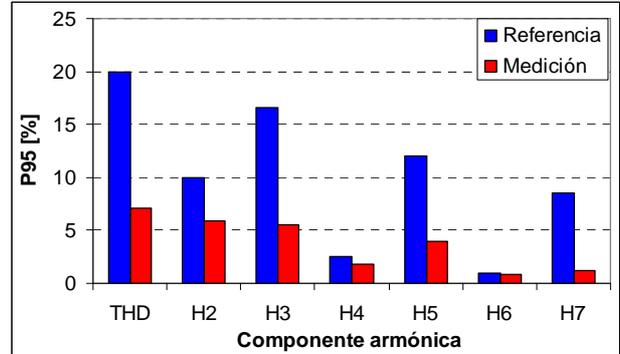


Figura 3—Esquema de la red y puntos de medición.

Tabla I. Tensiones armónicas medidas y niveles de referencia.

	THD	H2	H3	H4	H5	H6	H7
Límites ENRE	8	2	5	1	6	0.5	5
Medio	1.01	0.11	0.47	0.05	0.80	0.03	0.34
P95	1.74	0.19	0.61	0.11	1.61	0.07	0.64
Máximo	2.14	0.36	0.78	0.19	1.97	0.13	0.97

Tabla II. Corrientes armónicas medidas y niveles de referencia.

	THD	H2	H3	H4	H5	H6	H7
Límites ENRE	20	10	16.6	2.5	12	1	8.5
Límites IEEE	12	2.5	10	2.5	10	2.5	10
Medio	22.13	1.73	1.87	0.53	1.45	0.25	0.45
P95	49.36	5.85	5.47	1.76	3.92	0.82	1.26
Máximo	59.04	11.97	9.11	3.23	5.79	1.62	2.01

Los niveles de distorsión armónica de tensión y de corriente se encuentran por debajo de los límites impuestos por la normativa de aplicación en la República Argentina.

Los resultados obtenidos de las mediciones de Flicker se presentan en la Figura 4 y la Figura 5.

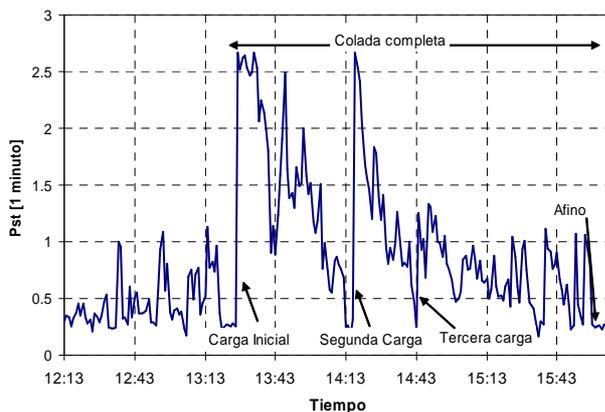


Figura 4—Medición de Flicker durante la colada.

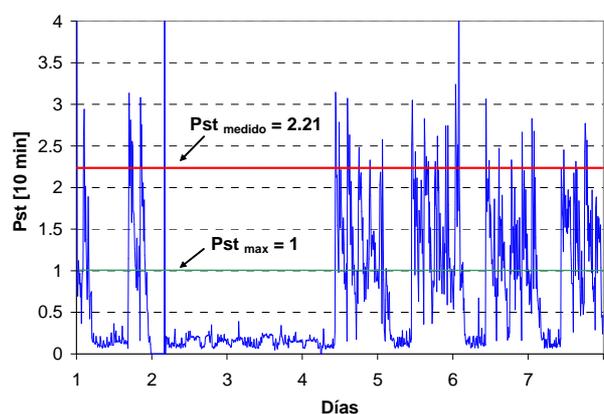


Figura 5—Medición Normalizada de Flicker.

La medición no-normalizada de Flicker (con intervalo de actualización de 1 minuto) tuvo por objeto caracterizar la severidad del Flicker en las diferentes fases de funcionamiento del horno de arco.

De los resultados obtenidos en la medición normalizada, se observa que el valor $P_{ST95\%} = 2.21$ se encuentra por encima del límite impuesto por las Normas Nacionales e Internacionales.

2.1 Cálculo del Factor de Compensación de Flicker (FI)

A partir de la relación entre la potencia aparente del horno y la potencia de cortocircuito en barras de la subestación de la acería, es posible obtener a partir de la Res. 99/97 [2] del ENRE el máximo Flicker que puede ser emitido por la acería.

$$S_L = \frac{2.5 \times 10^6}{0.85} = 2.95 \text{ MVA}$$

$$K_2 = \frac{S_L}{S_{sc}} = \frac{2.95 \times 10^6}{180 \times 10^6} = 0.016 \quad \Rightarrow \quad P_{ST\acute{m}ite} \leq 0.58$$

De acuerdo con este valor es posible estimar el **Factor de Compensación de Flicker (FI)**:

$$FI = \frac{P_{streal}}{P_{st\acute{m}ite}} = \frac{2.2}{0.58} = 3.8$$

Este factor es de fundamental importancia para la determinación del porte del compensador de Flicker.

2.2 Determinación del porte de compensación de Flicker (FI)

Para la compensación del Flicker producido por los hornos de arco, es fundamental la capacidad de compensar desbalance y la velocidad de respuesta del compensador. En la Tabla III se describen las fórmulas aproximadas para el cálculo del porte de un SVC y un STATCOM.

Tabla III. Determinación del porte del compensador de Flicker.

Compensador	Porte
SVC	$Q_{SVC} = \frac{[(FI - 1)S_h]}{0.75} = \frac{3.4}{0.75} \approx 4.5 \text{ MVAR}$
STATCOM	$Q_{STATCOM} = 0.54\sqrt{FI}S_h = 0.54(\sqrt{3.8})3.4 \approx 4 \text{ MVAR}$

Donde:

$FI < 2$ Es el factor de compensación de Flicker de un SVC.

$1 < FI < 6$ Es el factor de compensación de Flicker de un STATCOM.

$S_{hcc} = 5.6 \text{ MVA}$ es la potencia de cortocircuito del horno de arco bajo estudio.

$S_h = 0.6 \cdot S_{ch} = 3.4 \text{ MVA}$ es un factor derivado de la potencia de cortocircuito del horno de arco.

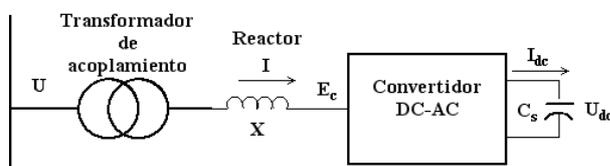
Es importante destacar que el factor de compensación de Flicker máximo esperable por un compensador tipo SVC es $FI = 2$, mientras que de las mediciones realizadas se obtuvo un valor de Flicker $P_{st95\%} = 2.21$, por lo tanto la utilización de un SVC en esta instalación no resultaría adecuada para cumplir con las normativas vigentes, que imponen un valor máximo de $P_{st} = 1$.

El elevado factor de compensación de Flicker ($1 < FI < 6$) junto con la elevada velocidad de respuesta justifican la selección del STATCOM como dispositivo ideal para la compensación del flicker producido por los hornos de arco eléctrico.

4. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL STATCOM

El STATCOM es un dispositivo shunt de compensación de potencia reactiva, que es capaz de generar o absorber potencia reactiva, y en el cual la salida puede ser variada para controlar los parámetros específicos de un sistema eléctrico de potencia. El comportamiento de un STATCOM es equivalente al de una fuente de tensión (VSC) con una reactancia en sus bornes, y cuya magnitud puede ser controlada muy rápidamente. Esto es inherentemente distinto al comportamiento de un SVC, que es equivalente a una susceptancia en derivación cuya magnitud depende de la tensión del sistema en el punto de conexión.

Un diagrama simple de un compensador shunt tipo STATCOM para intercambiar potencia reactiva con el sistema de potencia se muestra en la Figura 6, junto con un diagrama fasorial de operación.



$$P_{STATCOM} = \frac{U \cdot E_c}{X} \sin(\delta)$$

$$Q_{STATCOM} = \frac{U}{X} (U - E_c \cdot \cos(\delta))$$

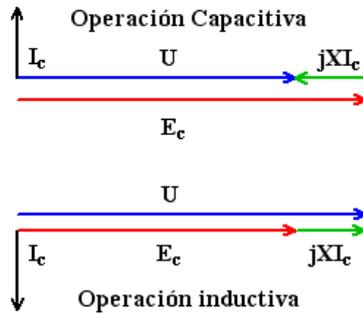


Figura 6–Diagrama esquemático del STATCOM y diagramas fasoriales de operación.

Si la amplitud E_c del fasor de tensión de salida se aumenta por encima de la amplitud U del fasor de tensión del sistema, entonces el fasor de corriente adelanta al fasor de tensión y la corriente fluye desde el convertidor hacia el sistema de alterna, y el convertidor entrega potencia reactiva (capacitiva) al sistema. Si la amplitud E_c del fasor de tensión de salida se disminuye por debajo de la amplitud U del fasor de tensión del sistema, entonces la corriente reactiva fluye desde el sistema de alterna hacia el convertidor, y el convertidor absorbe potencia reactiva (inductiva) desde el sistema.

5. ESTRATEGIA DE CONTROL DEL STATCOM

Como se muestra en la Figura 7, el sistema de potencia en el punto de conexión de la carga perturbadora esta caracterizado por su tensión de vacío E_s y su impedancia Z_s . En el punto de acoplamiento común (PCC), la tensión es U , y la carga consume una potencia activa P y una potencia reactiva Q .

La tensión en el PCC está dada por:

$$\dot{U} = \dot{E}_s - R_s \dot{I}_s - L_s \frac{d\dot{I}_s}{dt}$$

La corriente por la impedancia de la red es:

$$\dot{I}_s = \dot{I}_f + \dot{I}_c$$

La caída de tensión en la impedancia de la red es:

$$\Delta \dot{U} = \dot{E}_s - \dot{U} = R_s \dot{I}_s + L_s \frac{d\dot{I}_s}{dt}$$

Si se expresa en forma polar y se hace $\omega t = 0$ es:

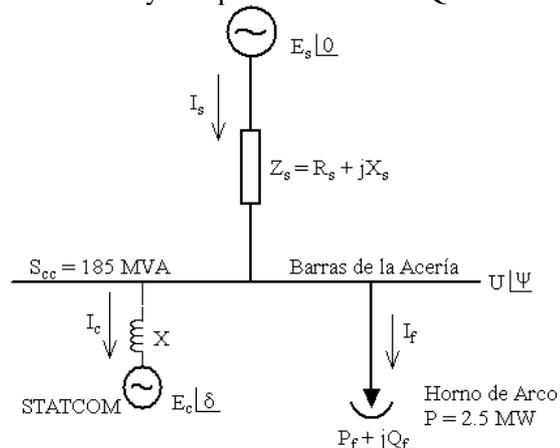


Figura 7–Esquema unifilar de la red y la acería.

$$U_d + jU_q = E_{sd} - (R_s + j\omega L_s)(I_{sd} + jI_{sq}) - L_s \frac{d}{dt} [I_{sd} + jI_{sq}]$$

Si se separa la parte real y la imaginaria de la ecuación se obtiene:

$$U_d = E_{sd} - R_s I_{sd} + X_s I_{sq} - L_s \frac{dI_{sd}}{dt} \quad U_q = -R_s I_{sq} - X_s I_{sd} - L_s \frac{dI_{sq}}{dt}$$

La parte real y la imaginaria de la caída de tensión en la impedancia de la red pueden escribirse como:

$$\Delta U_d = R_s I_{sd} - X_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt}$$

$$\Delta U_q = R_s I_{sq} + X_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt}$$

El diagrama fasorial que representa la caída de tensión, se muestra en la Figura 8.

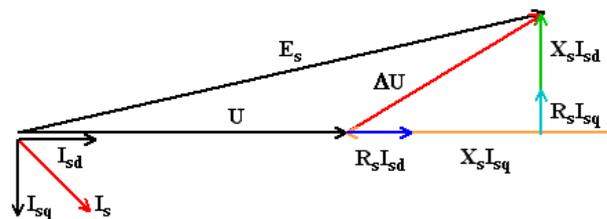


Figura 8–Diagrama fasorial de las tensiones.

La caída de tensión en la impedancia de la red, causada por las variaciones de potencia activa y reactiva del horno de arco, puede ser compensada haciendo que la corriente reactiva que circula por la impedancia de la red sea nula. Esto se logra haciendo que la corriente de referencia del sistema de control del compensador I_{cqRef} sea igual a $-I_{fq}$, es decir igual a la corriente reactiva del horno pero cambiada de signo.

Con $I_{sq} = 0$, las caídas de tensión en la impedancia de la red se reducen a:

$$\Delta U_d = R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt}$$

$$\Delta U_q = X_s I_{sd}$$

El nuevo diagrama fasorial que representa la caída de tensión se muestra en la Figura 9.

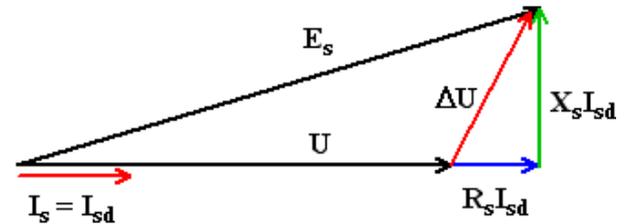


Figura 9–Nuevo diagrama fasorial de las tensiones.

Como se observa en la Figura 9, la compensación de la corriente reactiva del horno de arco reduce la magnitud de la caída de tensión ΔU . Dado que las fluctuaciones de tensión debidas a las variaciones de la potencia activa del horno de arco se encuentran aún presentes, en el segundo paso se trata de compensar la caída de tensión debida a la fluctuación de potencia activa inyectando una corriente adicional $(R_s/X_s)I_{sd}$ a la referencia del sistema de control del compensador, esto es inyectando una potencia reactiva capacitiva para compensar la caída de tensión restante.

La referencia de corriente reactiva del STATCOM es:

$$I_{cqref} = -I_{fq} + (R_s / X_s) I_{fd}$$

Como $I_{cd} \cong 0$, entonces $I_{sd} \cong I_{fd}$ entonces resulta:

$$I_{sq} = (R_s / X_s) I_{sd}$$

Las caídas de tensión en la red se reducen a:

$$\Delta U_d = L_s \frac{dI_{sd}}{dt} \quad \Delta U_q = X_s \left(1 + \frac{R_s^2}{X_s^2} \right) I_{sd} + \frac{R_s}{\omega} \frac{dI_{sd}}{dt}$$

El diagrama fasorial luego de la compensación de las fluctuaciones de tensión debidas a la variación de potencia activa se muestra en la Figura 10. El STATCOM compensa totalmente la potencia reactiva absorbida por el horno de arco, y entrega potencia reactiva capacitiva adicional para reducir la fluctuación de tensión debida a las variaciones de la potencia activa absorbida por el horno.

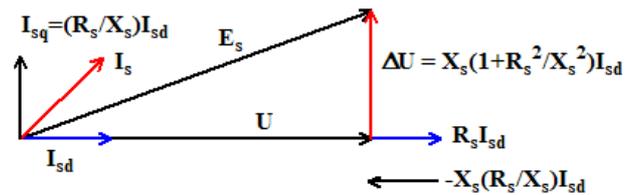


Figura 10–Diagrama fasorial final de las tensiones.

6. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DEL STATCOM

El convertidor DC-AC que se muestra en la Figura 6 es un inversor sincrónico PWM conectado a un capacitor. La implementación del sistema de control del inversor está basada en la Teoría d-q. Las ecuaciones de tensión del convertidor transformadas del sistema de referencia estacionario a-b-c al sistema de referencia sincrónico d-q son:

$$E_{cd} = \omega.LI_{cq} + U - \Delta E_{cd}$$

$$E_{cq} = -\omega.LI_{cd} - \Delta E_{cq}$$

$$\Delta E_{cq} = k_p(I_{cqref} - I_{cq}) + k_i \int (I_{cqref} - I_{cq}) dt$$

$$\Delta E_{cd} = k_p(I_{cdref} - I_{cd}) + k_i \int (I_{cdref} - I_{cd}) dt$$

Las referencias de corriente están dadas por:

$$I_{cqref} = -I_{fq} + (R_s / X_s) I_{fd}$$

$$I_{cdref} = k_p (U_{dcref} - U_{dc}) + k_i \int (U_{dcref} - U_{dc}) dt - I_{fd}$$

- La referencia de corriente I_{cqRef} se obtiene según la estrategia de control previamente desarrollada.
- La referencia de corriente I_{cdRef} se obtiene comparando la referencia de tensión para el capacitor U_{dcRef} con el valor actual de la tensión en el capacitor a través de un controlador PI.

Si el sistema de referencia d-q se mantiene en fase con las tensiones de la barra de conexión del compensador a través de un Lazo de Enganche de fase (PLL), se obtiene $U_d = U$ y $U_q = 0$, y las potencias activas y reactivas inyectadas al sistema por el inversor pueden ser expresadas como:

$$p = \frac{3}{2}(U_d.I_{cd} + U_q.I_{cq}) = \frac{3}{2}U_d.I_{cd} \qquad q = \frac{3}{2}(U_q.I_{cd} - U_d.I_{cq}) = -\frac{3}{2}U_d.I_{cq}$$

Las corrientes I_{cd} e I_{cq} determinan los valores instantáneos de la potencia activa y reactiva producida por el compensador. El diagrama en bloques del sistema de control completo se muestra en la Figura 11.

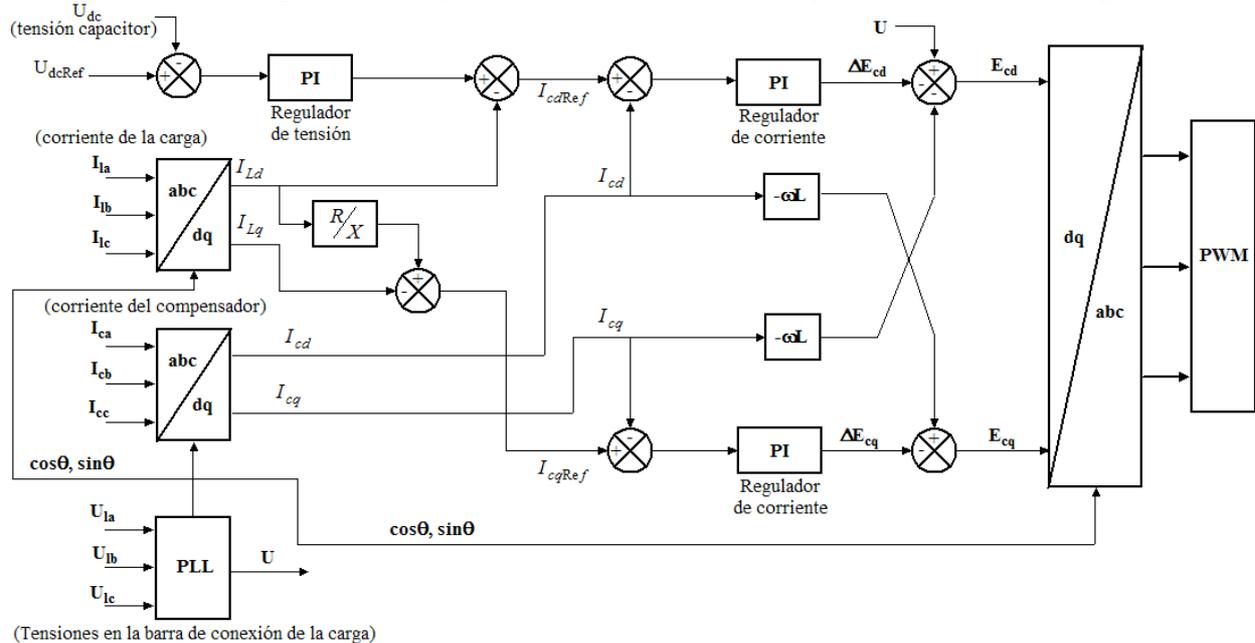


Figura 11–Diagrama en bloques del sistema de control completo del STATCOM.

6. OPERACIÓN DEL STATCOM CON EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

Se realizó el modelo completo del STATCOM ± 4 MVar junto con el sistema de potencia y la carga en el programa SIMULINK de MATLAB. El STATCOM esta compuesto por un inversor de tres niveles con IGBT como semiconductores de potencia, dos capacitores de 5000 μ F cada uno y el sistema de control. El horno de arco eléctrico se simula mediante generadores de corriente que inyectan las corrientes registradas durante los diversos períodos de funcionamiento.

6.1 Operación del STATCOM en el período de Arranque

La tensión de la barra de conexión del STATCOM y su espectro se muestran en las Figura 12 y 13.

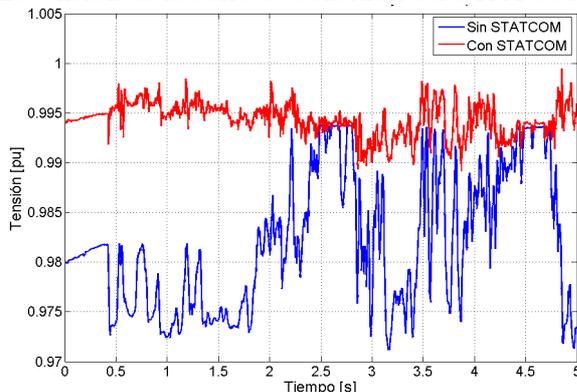


Figura 12–Tensión en la barra con y sin STATCOM.

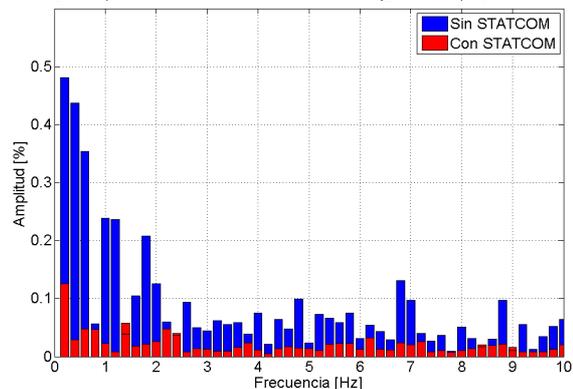


Figura 13–Espectro de tensión con y sin STATCOM.

6.2 Operación del STATCOM en el período de Fundición

La tensión de la barra de conexión del STATCOM y su espectro se muestran en las Figura 14 y 15.

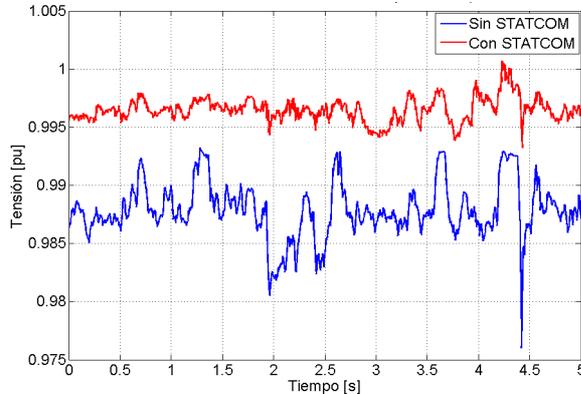


Figura 14–Tensión en la barra con y sin STATCOM.

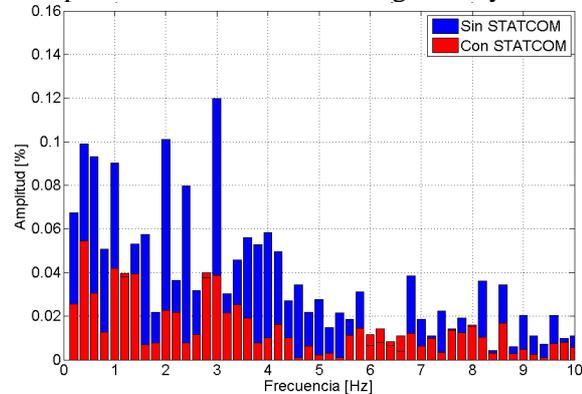


Figura 15–Espectro de tensión con y sin STATCOM.

Con los resultados de la tensión en la barra con y sin STATCOM se realizaron mediciones del $P_{ST95\%}$ con un instrumento normalizado IEC 60878. La medición en una colada completa se muestra en la Figura 16.

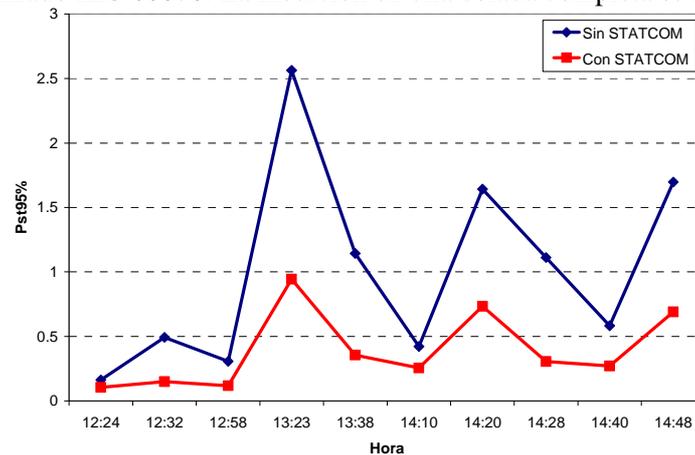


Figura 16–Medición normalizada de Flicker sin y con STATCOM.

De los resultados obtenidos se observa que el valor del $P_{ST95\%}$ se encuentra siempre por debajo de 1.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado una estrategia de control para compensar las fluctuaciones de tensión producidas por las variaciones de la corriente de la carga. La implementación del control se basa en la teoría d-q.

Se ha obtenido un modelo completo de un STATCOM para la compensación de Flicker en hornos de arco eléctrico en el entorno de MATLAB/Simulink.

Los resultados de las simulaciones y las posteriores mediciones experimentales del Flicker han demostrado una eficiente mitigación del Flicker causado por el horno de arco.

8. REFERENCIAS

- [1] “Resolución ENRE 184/00: “Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico. Etapa 2”.
- [2] Resolución ENRE 99/97: “Base Metodológica Para el Control de la Emisión de Perturbaciones”.
- [3] IEEE Std. 519-1992. “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”.