

**B4 – Alta tensión en Corriente Continua y Electrónica de Potencia**

**MODELADO Y VERIFICACIÓN POR ENSAYOS EN CAMPO DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVO (SVC) DE  $\pm 250$  Mvar**

**F. ISSOURIBEHERE\***  
IITREE-FI-UNLP  
Argentina

**P. ISSOURIBEHERE**  
IITREE-FI-UNLP  
Argentina

**J. C. BARBERO**  
IITREE-FI-UNLP  
Argentina

**F. SCARAFONI**  
Argentina

**G. CAMPOMAR**  
Argentina

***Resumen** – Este trabajo presenta el desarrollo de un modelo completo de un SVC de  $\pm 250$  Mvar instalado en una importante Acería de la República Argentina. El modelo incluye cada uno de los distintos componentes del SVC (filtros de armónicas, reactor controlado por tiristores (TCR) y sistema de control) y es particularmente útil para analizar y ponderar los siguientes aspectos del SVC instalado: el comportamiento dinámico y la velocidad de respuesta, los inconvenientes asociados a la pérdida de pulsos de disparo en los tiristores (solicitaciones a las que se encuentran sometidos los diversos componentes del SVC), las corrientes circulantes en cada uno de los componentes de los filtros de armónicas y de los reactores que conforman el TCR, la mejora en la compensación del Flicker producido por los hornos de arco y su desempeño en diferentes condiciones de operación de los hornos de arco eléctrico.*

*Para validar el desempeño del modelo, se compararon mediciones realizadas en la Acería con los resultados obtenidos con el modelo, en condiciones de operación similares. En todos los casos se observa una buena concordancia entre las mediciones y los resultados de las simulaciones, ya sea en la forma de onda de tensiones y corrientes, como en sus niveles y en el desfase relativo entre ellas. En este trabajo se documentan los principales resultados obtenidos.*

**Palabras clave:** CONTROL DE TENSIÓN, ENSAYOS, FILTROS DE ARMÓNICAS, FLICKER, SVC, TCR.

## **1 INTRODUCCIÓN**

La función principal de los Compensadores Estáticos de Reactivo (SVC) en los sistemas eléctricos de potencia es el control de la tensión. Sus principales aplicaciones son la reducción de las sobretensiones temporarias, la mejora de la capacidad de transmisión en estado estacionario, la mejora de los márgenes de estabilidad transitoria, el amortiguamiento de las oscilaciones de potencia, la compensación de cargas desbalanceadas y la reducción de las variaciones rápidas de tensión (control de Flicker). El SVC es el compensador de Flicker más utilizado hasta la actualidad, y existen varios casos de aplicación en Argentina. A solicitud de una importante acería de la República Argentina, el IITREE de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata desarrolló un modelo simplificado de Compensador Estático de Reactivo (Static Var Compensator SVC) de  $\pm 250$  Mvar. El propósito de dicho modelo es el de predecir eventuales condiciones anómalas de funcionamiento y cuantificar las solicitaciones a las que se encuentran sometidos los diversos componentes del mismo.

El suministro a la planta se realiza desde el SADI en 220 kV desde la línea doble terna Rosario Oeste – Ramallo. La potencia de cortocircuito en el Punto de Acoplamiento Común (PAC) de la Planta, tomando como información la guía de referencia de Transener, es de 3970 MVA y va a incrementarse hasta

\* F. Issouribehere, IITREE-FI-UNLP, calle 48 y 116, B1900AMF, La Plata, Argentina – fernandoi@iitree-unlp.org.ar

4064 MVA en el año 2021. En la Fig. 1 se presenta un diagrama unifilar de la alimentación eléctrica de la acería, con las especificaciones de los principales equipos que componen a la planta industrial.

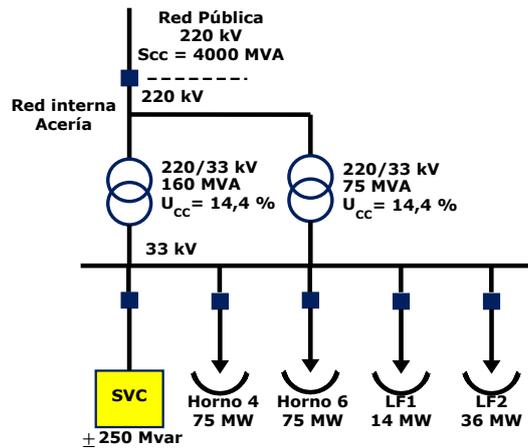


Fig. 1. Esquema unifilar del sistema de alimentación de la acería y sus principales componentes

## 2 DESCRIPCIÓN DEL COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVO (SVC)

En la Fig. 2 se presenta el esquema unifilar del SVC de  $\pm 250$  Mvar, objeto del modelado.

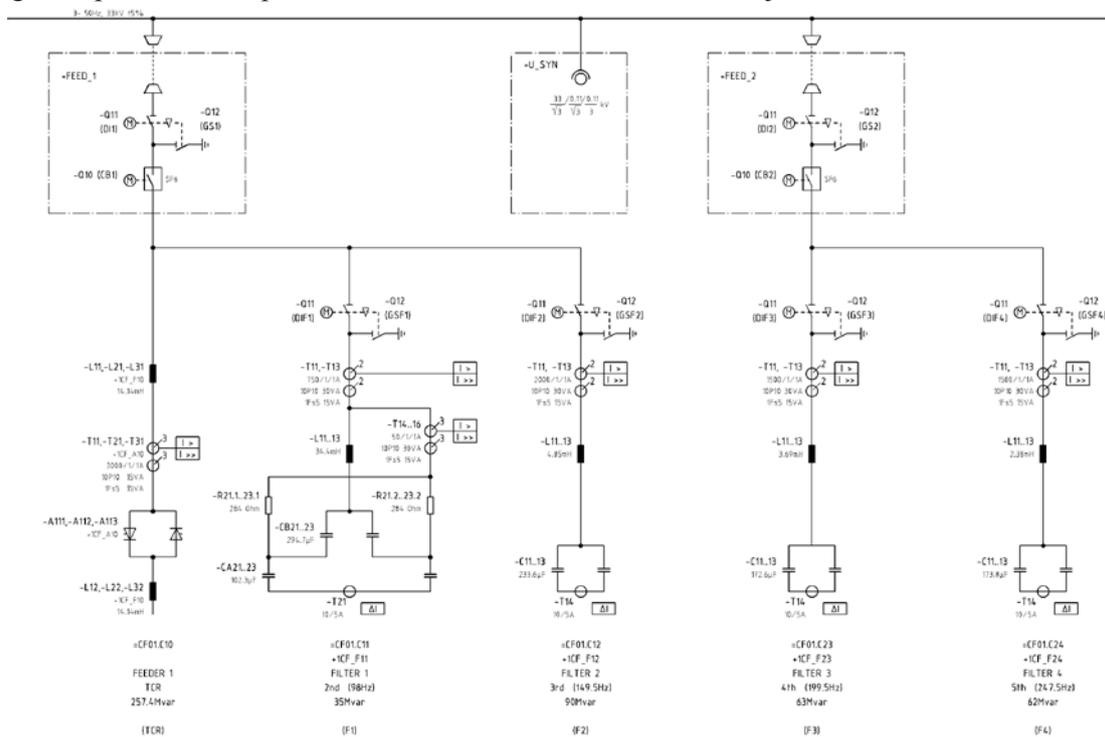


Fig. 2. Diagrama unifilar del SVC de  $\pm 250$  Mvar.

El SVC está compuesto por un Reactor Controlado por Tiristores (TCR) y cuatro filtros de armónicas. El primer bloque de filtros está compuesto por filtros sintonizados de 4<sup>ta</sup> y 5<sup>ta</sup> armónica, de potencias 63 Mvar y 62 Mvar respectivamente. Dichos filtros disponen de un seccionador e interruptor de cabecera y seccionadores individuales, por lo que pueden operarse individualmente.

El segundo bloque de filtros está compuesto por filtros sintonizados de 2<sup>da</sup> y 3<sup>ra</sup> armónica, de potencias 35 Mvar y 90 Mvar respectivamente. Dichos filtros disponen de un seccionador e interruptor de cabecera compartido con el TCR y adicionalmente seccionadores individuales, por lo que pueden operarse individualmente.

En la operación normal primero se ponen en servicio los filtros de 4<sup>ta</sup> y 5<sup>ta</sup> armónica y luego se ponen en servicio los filtros de 2<sup>da</sup> y 3<sup>ra</sup> armónica en conjunto con el TCR.

### 3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SVC

Como se observa en la Fig.2, el SVC está compuesto básicamente por filtros de armónicas y un reactor controlado por tiristores (TCR). Los filtros de armónicas cumplen la doble función de proporcionar potencia reactiva capacitiva a la frecuencia industrial y filtrar las armónicas generadas por el reactor controlado por tiristores. El TCR actúa como una suceptancia variable. Las variaciones del ángulo de disparo modifican la suceptancia y consecuentemente la componente fundamental de la corriente, lo que lleva a la variación de la potencia reactiva absorbida por el reactor, ya que la tensión alterna aplicada es relativamente constante.

El efecto de aumentar el ángulo de disparo es el de reducir la componente fundamental de la corriente. Esto es equivalente a un aumento de la inductancia del reactor, lo que reduce su potencia reactiva. El rango de control de los ángulos de disparo se extiende desde 90° a 180°. Un ángulo de disparo de 90° resulta en la conducción plena en el tiristor con un ciclo completo de corriente sinusoidal circulando por el TCR. Sin embargo, a medida que el ángulo de disparo se incrementa por encima de los 90°, la corriente se hace no sinusoidal y se generan armónicas. Si los dos tiristores se disparan simétricamente en los semiciclos positivos y negativos se producirán sólo armónicas impares. Este principio de control se denomina control de fase.

La suceptancia de TCR en función del ángulo de disparo puede expresarse como:

$$B_{TCR}(\alpha) = B_{\max} \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \text{sen}(2\alpha) \right) \quad \text{Con: } B_{\max} = 1/\omega L$$

Por lo tanto, la expresión de la componente fundamental de la corriente del TCR puede expresarse de la siguiente forma:

$$I_1(\alpha) = UB_{TCR}(\alpha) \quad \text{o} \quad I_1(\alpha) = \frac{U}{\omega L} \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \text{sen}(2\alpha) \right)$$

La variación en por unidad del valor de  $B_{TCR}$  con el ángulo de disparo se muestra en la Fig. 3. El valor en por unidad de  $B_{TCR}$  es obtenido con respecto al valor máximo  $B_{\max}$  como cantidad base.

El valor eficaz de la n-esima armónica se expresa en función del ángulo de disparo, y puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$I_n(\alpha) = \frac{U}{\omega L} \frac{2}{\pi} \left[ -2 \frac{\cos \alpha}{n} \text{sen}(n\alpha) + \frac{\text{sen}(n-1)\alpha}{n-1} + \frac{\text{sen}(n+1)\alpha}{n+1} \right]$$

Con  $n = 2k \pm 1$  con  $k = 1, 2, 3$ . La variación de amplitud de las diferentes armónicas en función del ángulo de disparo se muestra en la Fig. 4.

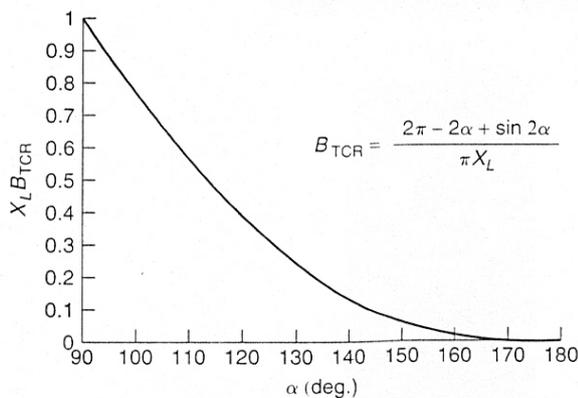


Fig. 3. Variación de la suceptancia del TCR en función del ángulo de disparo.

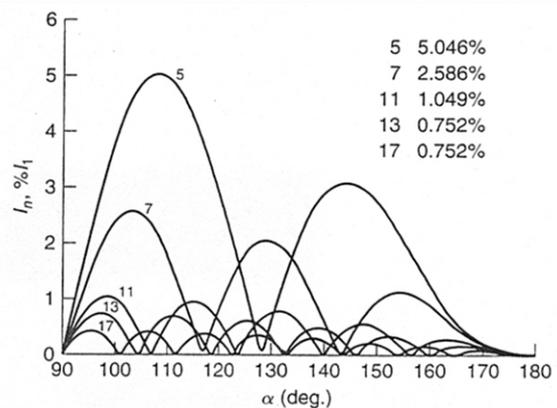


Fig. 4. Armónicas en la corriente del TCR.

#### 4 MODELO DEL SVC EN MATLAB/SIMULINK

El modelo completo del SVC, junto con el sistema de potencia y la carga se muestra en la Fig. 5.

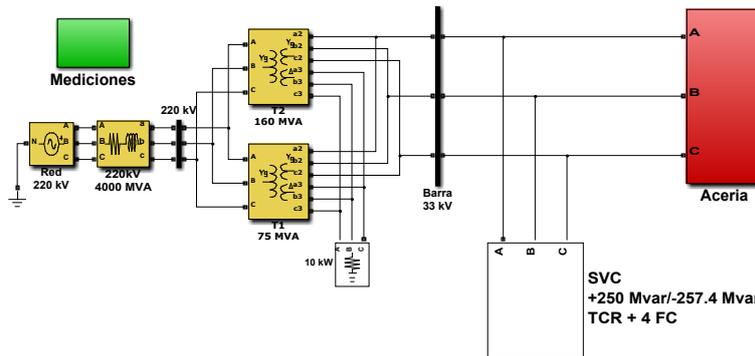


Fig. 5. Modelo SIMULINK completo del SVC, con el sistema de potencia y la acería.

La red de alimentación de 220 kV se modela con un equivalente de Thèvenin, con una potencia de cortocircuito de 4000 MVA. Dicho valor puede ser modificado en el bloque que simula la impedancia de la red. La alimentación de la acería se realiza con dos transformadores, de 75 y 160 MVA respectivamente. El SVC está compuesto por un rector controlado por tiristores (TCR) trifásico y cuatro ramas de filtros de armónicas que proporcionan la compensación de potencia reactiva necesaria para los hornos y atenúan las armónicas generadas por el TCR. La implementación en SIMULINK de cada uno de los componentes del SVC se presenta en la Fig. 6 a la Fig. 9.

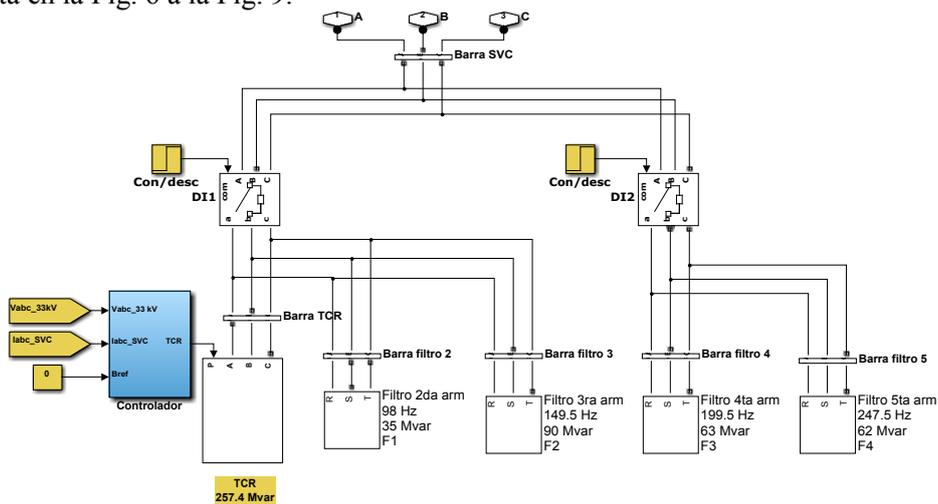


Fig. 6. Modelo SIMULINK del SVC.

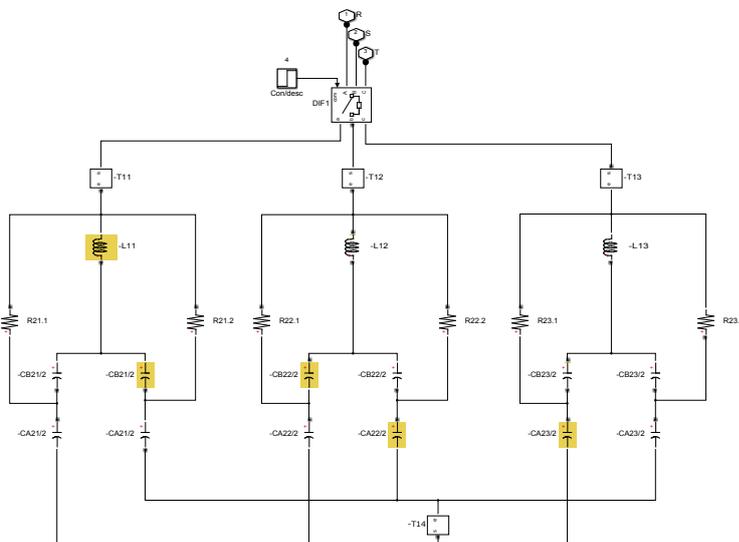


Fig. 7. Modelo de filtro de 2<sup>da</sup> armónica.

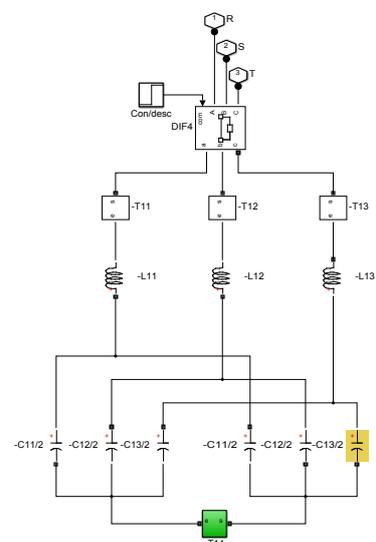


Fig. 8. Modelo de filtros de 3<sup>ra</sup>, 4<sup>ta</sup> y 5<sup>ta</sup>.

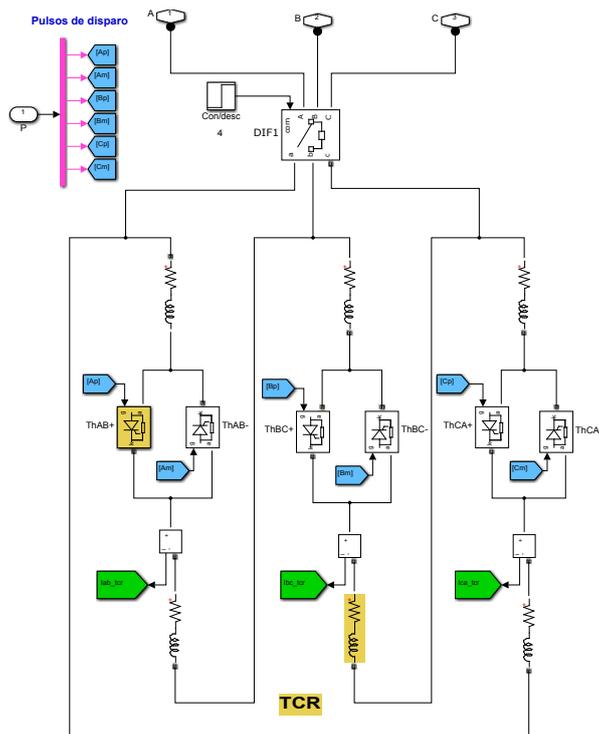


Fig. 9. Modelo SIMULINK del Reactor Controlado por Tiristor (TCR) del SVC.

El TCR se implementa de acuerdo al esquema unifilar suministrado por el fabricante, con dos inductores de 14,4 mH por fase, con núcleo en aire y factor de mérito  $Q = \omega L/R$  de 100.

Para el sistema de control del TCR se implementa un esquema de control tradicional, del tipo regulador con integrador con realimentación con pendiente de corriente. Dicho sistema de control tiene como entradas las tensiones de la barra de 33 kV, que son las que se desean controlar y las corrientes que toma el SVC, que a través de la pendiente de corriente, se realimentan en el punto de suma del regulador de tensión. En la Fig. 10 a la Fig. 12 se presentan los modelos SIMULINK de los principales bloques que conforman el control del TCR.

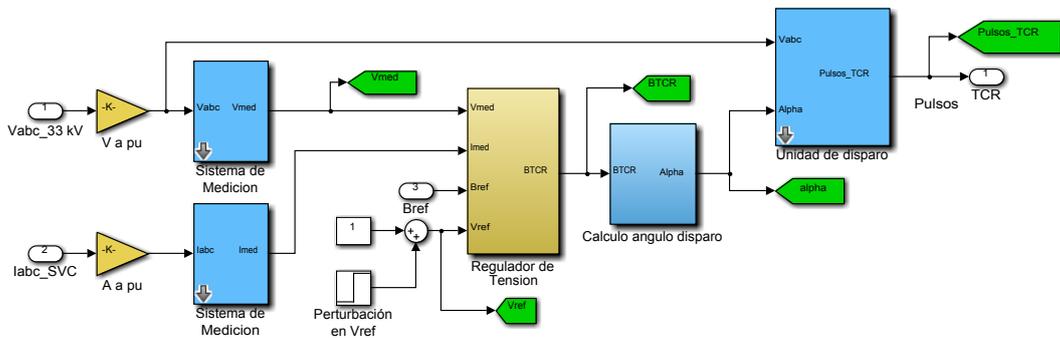


Fig. 10. Modelo SIMULINK del controlador del TRC.

En la Fig. 11 se presenta el detalle del bloque Regulador de Tensión de la Fig. 10. El mismo implementa un controlador del tipo regulador con integrador con realimentación con pendiente de corriente. En la Fig. 12 se presenta el modelo del bloque que calcula el ángulo de disparo de los tiristores en función de la susceptancia requerida.

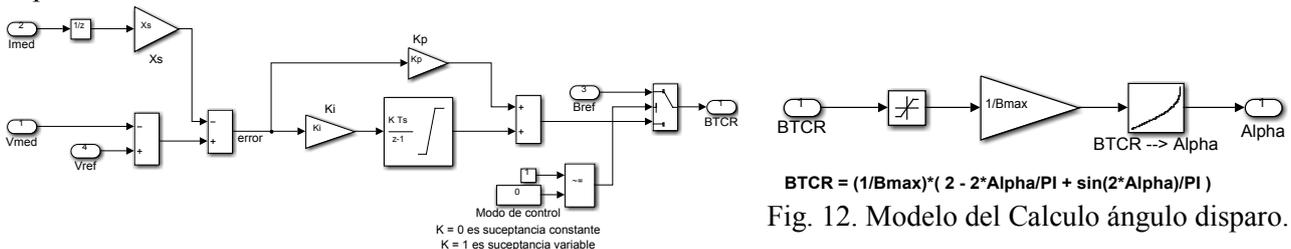
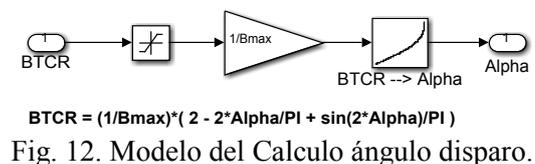


Fig. 11. Modelo del Regulador de tensión.



$BTCR = (1/Bmax) * (2 * 2^{Alpha/PI} + \sin(2 * Alpha/PI))$   
Fig. 12. Modelo del Calculo ángulo disparo.

## 5 COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO DEL SVC CON MEDICIONES REALIZADAS EN LA ACERÍA

Para verificar el modelo, se realizó la comparación del desempeño del modelo del SVC de  $\pm 250$  Mvar respecto de mediciones realizadas en la planta.

Como información de referencia se dispone de capturas de pantalla obtenidas sobre registros de campo realizados con un osciloscopio Tektronix 3034B de cuatro canales. Por este motivo la comparación entre mediciones y simulaciones se hace visualmente.

### 5.1 Operación del modelo de SVC ante la operación bifásica del horno de arco

Para las tensiones de línea se han utilizado siempre los canales 1 a 3 del osciloscopio, con la siguiente codificación de colores:

- Amarillo:  $U_{L12}$  con factor de escala  $1 \text{ V} = 7 \text{ kV}$  y escala en osciloscopio:  $2\text{V/div}$ .
- Celeste:  $U_{L23}$  con factor de escala  $1 \text{ V} = 7 \text{ kV}$  y escala en osciloscopio:  $2\text{V/div}$ .
- Violeta:  $U_{L31}$  con factor de escala  $1 \text{ V} = 7 \text{ kV}$  y escala en osciloscopio:  $2\text{V/div}$ .

Para la corriente en las ramas del TCR y para la corriente en el horno se utilizó la siguiente codificación:

- Verde:  $I_{st12}$  o  $I_{st23}$  o  $I_{st31}$  con factor de escala  $6,2 \text{ V} = 3 \text{ kA}$  y escala en osciloscopio:  $2\text{V/div}$ .
- Verde:  $I_r$  o  $I_s$  o  $I_t$  con factor de escala  $0,8 \text{ V} = 1 \text{ kA}$  y escala en osciloscopio:  $2\text{V/div}$ .

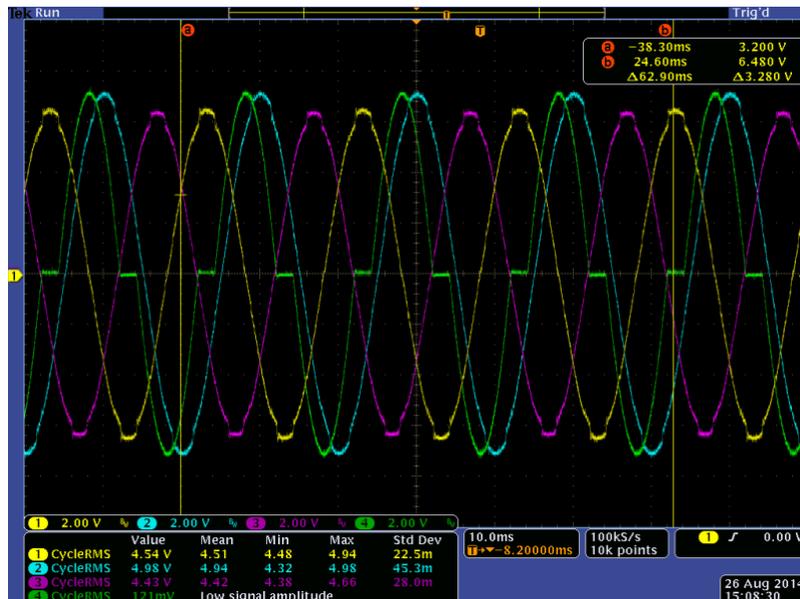


Fig. 13. Tensiones en 33 kV (amarillo, celeste y violeta) y corriente  $I_{st12}$  (verde) en el TCR. Medición.

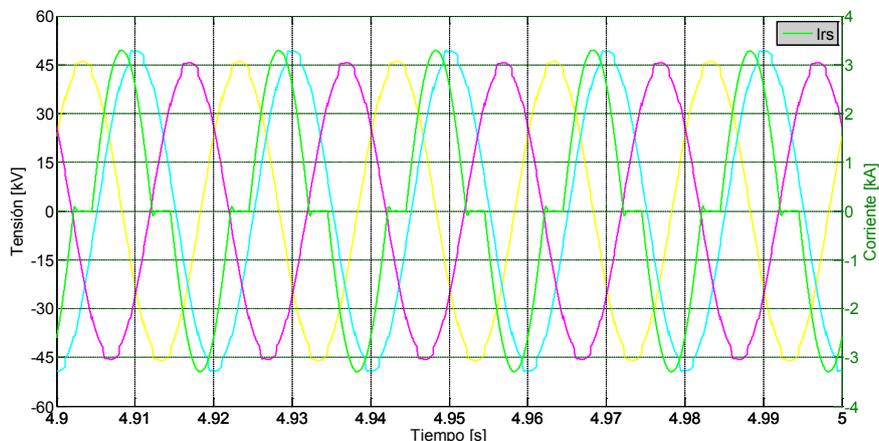


Fig. 14. Tensiones en 33 kV (amarillo, celeste y violeta) y corriente  $I_{st12}$  (verde) en el TCR. Simulación.

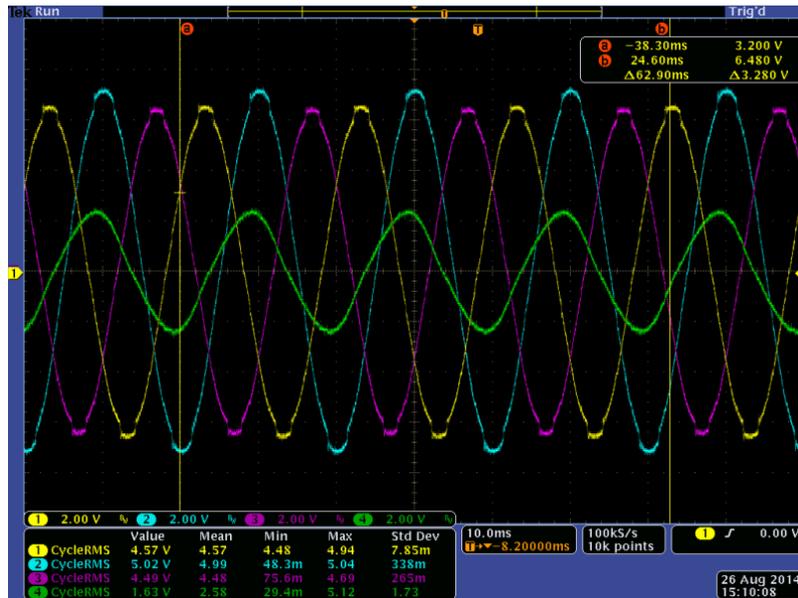


Fig. 15. Tensiones en 33 kV (amarillo, celeste y violeta) y corriente  $I_r$  (verde) en el horno. Medición.

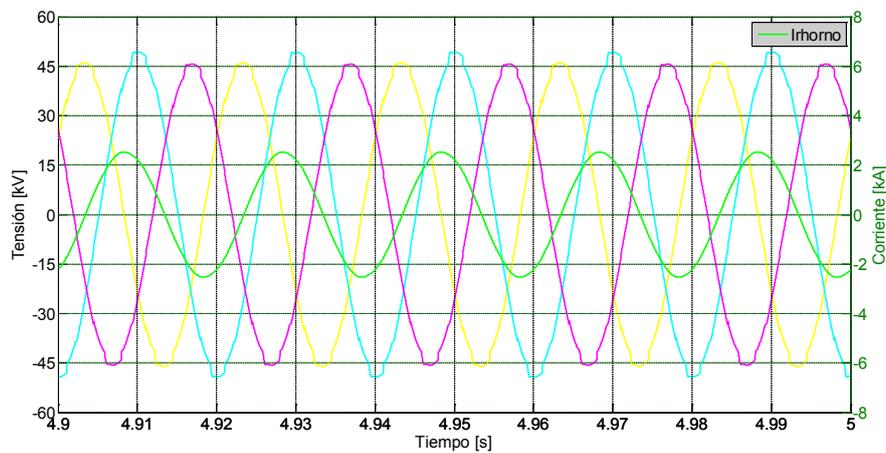


Fig. 16. Tensiones en 33 kV (amarillo, celeste y violeta) y corriente  $I_r$  (verde) en el horno. Simulación.

## 5.2 Operación del modelo de SVC ante la ausencia del filtro de 35 Mvar



Fig. 17. Tensiones en 33 kV (amarillo, celeste y violeta) y corriente  $I_{st23}$  (verde) en el TCR. Medición.

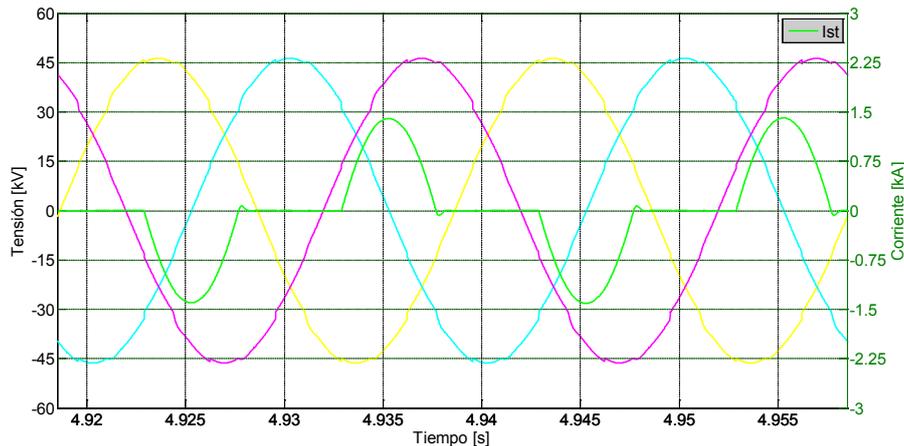


Fig. 18. Tensiones en 33 kV (amarillo, celeste y violeta) y corriente  $I_{st23}$  (verde) en el TCR. Simulación.

## 6 CONCLUSIONES

El modelo simplificado de SVC incluye cada uno de los distintos componentes del mismo (filtros de armónicas, reactor controlado por tiristores (TCR) y sistema de control) y es particularmente útil para analizar y ponderar los siguientes aspectos del SVC instalado:

- El comportamiento dinámico y la velocidad de respuesta.
- Los inconvenientes asociados a la pérdida de pulsos de disparo en los tiristores (solicitaciones a las que se encuentran sometidos los diversos componentes del SVC).
- Las corrientes circulantes en cada uno de los componentes de los filtros de armónicas y de los reactores que conforman el TCR.
- La mejora en la compensación del Flicker producido por los hornos de arco.
- El comportamiento del SVC ante la operación bifásica de los hornos de arco por rotura de los electrodos, situación de operación no muy frecuente pero posible.
- Los transitorios de conexión y desconexión de los filtros de armónicas y evaluar el desempeño del SVC en diferentes condiciones de operación de los hornos.

Para validar el desempeño del modelo, se compararon mediciones realizadas en la Acería con los resultados obtenidos con el modelo, en condiciones de operación similares. En todos los casos se observa una buena concordancia entre las mediciones y los resultados de las simulaciones, ya sea en la forma de onda de tensiones y corrientes, como en sus niveles y en el desfase relativo entre ellas.

Para realizar un modelo detallado del compensador de  $\pm 250$  Mvar es necesario realizar un conjunto de mediciones y ensayos que permitan registrar, a la tasa de muestreo adecuada, el conjunto de variables mínimo que permita obtener tanto la filosofía del sistema de control (control conjunto o individual por fase) como los parámetros del mismo. Dichas mediciones resultarían muy importantes también para analizar y caracterizar el comportamiento de los hornos en sus distintas condiciones de operación (arranque, fundición y afino).

## 7 REFERENCIAS

- [1] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma: "Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems". IEEE Press, New York. 2002. ISBN- 0-471-20643-1.
- [2] N. G. Hingorani and L. Gyugyi: "Understanding FACTS", IEEE Press, New York. 1999. ISBN 0-7803-3455-8.