

Implementación de los Compensadores Estáticos de Limpio y San Lorenzo, con sus respectivos sistemas de control en ATPDraw

Rodrigo Sebastián Frigola Sertich, Robson Almir de Oliveira, Alfredo Javier Mezger Szostak

UNIOESTE/ITAIPU

Brasil/Paraguay

RESUMEN

El uso de compensadores estáticos de reactivos (CER) es clave para aumentar la capacidad de transferencia de potencia en sistemas de transmisión y mejorar de la estabilidad de tensión del sistema eléctrico de potencia, de forma que la operación del sistema sea más confiable y segura.

Los CER de Limpio y San Lorenzo son dos de los principales elementos responsables por el control de tensión del sistema eléctrico paraguayo, teniendo potencia nominales de $-150/+250\text{Mvar}$ y $-80/+150\text{Mvar}$ respectivamente.

Los estudios electromagnéticos actuales realizados en Itaipu con ATP representan los CER como elementos pasivos (capacitores y reactores), sin considerar el sistema de control.

Para que los resultados de las simulaciones de transitorios electromagnéticos sean más próximos a la realidad, es necesario que estos dos elementos sean representados de la forma más detallada posible, de forma a asegurar estudios más precisos.

En este trabajo se ha realizado el modelado detallado de los subsistemas constituyentes de los CER de Limpio y San Lorenzo: el TSC (capacitor conmutado por tiristores), el TCR (reactor controlado por tiristores), filtros, unidad de sincronía y el sistema de control. Los modelos fueron desarrollados en el programa ATP, utilizando el pre-procesador ATPDraw. El sistema de control de ambos compensadores fue implementado utilizando los recursos del lenguaje MODELS para ATP.

Se muestran resultados obtenidos, considerando la conexión de los modelos de CER al sistema eléctrico paraguayo, para simulaciones de varios eventos como: escalones (*steps*) de tensión de referencia y cortocircuitos monofásicos en el sistema.

PALABRAS CLAVES

CER, SVC, MODELO DE COMPENSADOR ESTÁTICO, SISTEMA DE CONTROL, ATPDraw, MODELS.

1. INTRODUCCIÓN

Los compensadores estáticos de reactivos (CER) de las subestaciones de Limpio y San Lorenzo poseen la finalidad de regular la tensión del área metropolitana de la ciudad de Asunción en condiciones normales y ante contingencias en el sistema interconectado nacional paraguayo (SIN).

Para estudios electromagnéticos detallados la representación de CER como elementos pasivos fijos (capacitores y reactores) no representa de forma fiel el comportamiento dinámico del mismo, por lo que es necesario utilizar modelos más precisos que reflejen la acción de los controladores. El *Alternative Transients Program* (ATP) es uno de los programas más utilizados para simulación de transitorios de sistemas de energía eléctrica, ofrece representación precisa de elementos de sistemas de potencia y capacidad de simular, en simultáneo, los sistemas de control mediante el uso del lenguaje MODELS.

Este trabajo presenta el modelaje de los CER de Limpio y San Lorenzo en ATPDraw con sus sistemas de control. Los modelos incluyen la representación detallada de unidades TSC (capacitor conmutado por tiristores), TCR (reactor controlado por tiristores) y filtros, además del sistema de control en lazo cerrado, en el cual se encuentran el controlador de tensión, los circuitos de medición, de sincronía, y de pulsos de disparo de TSC/TCR.

Para validar los modelos desarrollados en ATP los resultados de las simulaciones son comparados con las respuestas transitorias obtenidas del programa *Análise de Transitórios Eletromecânicos* (Anatem) en el cual ya se encuentran modelados estos dos CER con sus sistemas de control. Los resultados seleccionados son presentados en este trabajo.

2. MODELAJE DE LOS CER DE LIMPIO Y SAN LORENZO

2.1 Compensador Estático de Reactivos de Limpio

El CER analizado en esta sección está instalado en la subestación de Limpio 220kV, y posee la finalidad de regular la tensión del área metropolitana de Asunción. Para ello posee un rango variable de -150Mvar inductivo y de +250Mvar capacitivo. Para la absorción de reactivos dispone de dos TCR, y para la generación de reactivos de dos TSC. También posee tres filtros de armónicas (fijos) cuya principal función es minimizar la distorsión armónica generada por los TCR. Estos elementos encuentran se conectados al nivel de tensión de 11,8kV, y están acoplados al nivel de 220kV por medio de un transformador de 250MVA [1]. El diagrama unifilar del CER de Limpio con su sistema de control está ilustrado en la Figura 1 [3].

2.1.1 Sistema de potencia del CER de Limpio

Los dispositivos de potencia como los TSC, TCR y filtros armónicos son modelados por ramas de componentes lineares del ATP, como reactores y capacitores en conjunto con válvulas tiristorizadas, representadas por pares de tiristores conectados en antiparalelo. Los circuitos *snubber* son modelados por elementos RC en paralelo a los tiristores. El transformador reductor es modelado por un transformador saturable de dos arrollamientos.

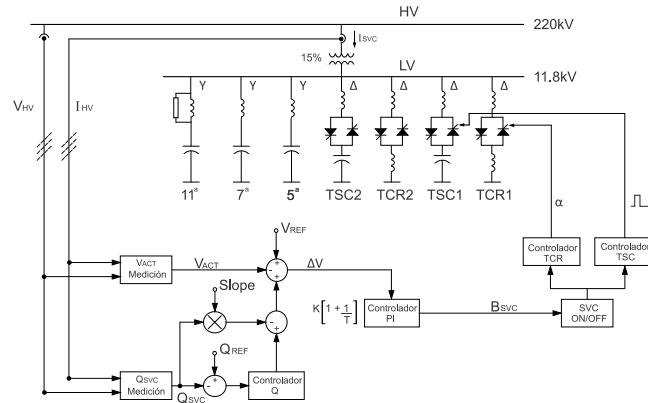


Figura 1: Diagrama unifilar del CER de Limpio con su sistema de control en lazo cerrado

2.1.2 Sistema de control del CER de Limpio

El sistema de control consiste en varios módulos implementados totalmente en el lenguaje MODELS. Incluye circuitos de medición, controlador de tensión, circuitos de sincronía y generadores de pulsos de disparo [2]. Es posible para el usuario modificar los parámetros del sistema de control como la inclinación (*Slope*), tensión de referencia, potencia reactiva de referencia, constante de tiempo del controlador y el modo de control utilizado. Caso necesario realizar modificaciones en la estructura de control, es relativamente simple alterar las líneas de comando en MODELS.

El sistema de control implementado permite dos modos de operación: control de tensión (VCM) y control de potencia reactiva (QCM), así como también cuenta con estrategias de conexión de TSC para minimizar transitorios, y estrategias de operación en caso de estado de subtensión.

Básicamente, en el modo VCM el controlador regula la tensión trifásica media del lado de alta tensión (V_{HV}) al compararla con el valor de tensión referencia deseado (V_{REF}) y corregido por el ajuste de la inclinación (*Slope*) del CER. La señal de error generada es dirigida a un controlador proporcional-integral (PI), cuya salida corresponde al valor de la potencia reactiva necesaria para corregir el error de tensión, esta señal es dirigida los controladores de los TSC y TCR [3]. En el modo QCM, es originada una señal de corrección aplicada constantemente a la referencia de tensión (V_{REF}), hasta que la potencia reactiva de salida del CER sea igual a un valor ajustado en la referencia de potencia reactiva (Q_{REF}) [4].

El controlador del TCR convierte la señal de susceptancia en tres ángulos de disparo α para los tiristores. Antes de realizarse este proceso de conversión existe un paso intermedio que consiste en la linearizar la señal de susceptancia, implementado por medio de aproximación polinomial de una curva de 20 puntos. El instante exacto de aplicación de los pulsos de disparos para los tiristores es determinado por un PLL (*Phase-Locked Loop*), que envía una señal de referencia sincronizada con la tensión de línea del lado de baja tensión del CER.

El controlador del TSC convierte la señal susceptancia en órdenes de encendido/apagado de los TSC. La conexión es realizada siguiendo un esquema que asegura un transitorio minimizado, en otras palabras, cuando la tensión sobre los tiristores es nula.

Los circuitos de medición son implementados por medidores trifásicos de tensión y corriente, además de funciones de transferencia de primera orden para representar la dinámica del proceso de conversión analógico para digital, filtrado y condicionamiento de señal.

2.2 Compensador Estático de Reactivos de San Lorenzo

El CER de San Lorenzo 66kV se encuentra en operación desde el año 1985, para atender los requisitos de la ANDE de proveer un nivel constante de tensión de 66kV. Posee un rango variable de -80Mvar inductivo y de +150Mvar capacitivo. Dispone de dos TCR capaces de absorber 80Mvar, que operan en el los secundarios de un transformador reductor 66/6,5/6,5 kV. Adicionalmente, existe un reactor en derivación maniobrable de 25Mvar en el lado de 66kv como soporte extra de reactivos para los TCR. En paralelo a los TCR se encuentra un filtro fijo de 25Mvar sintonizado a la 11^a armónica, y cinco filtros de 25Mvar maniobrables por interruptores de potencia sintonizados a la 3^a armónica [5]. El diagrama unifilar está representado en la Figura 2.

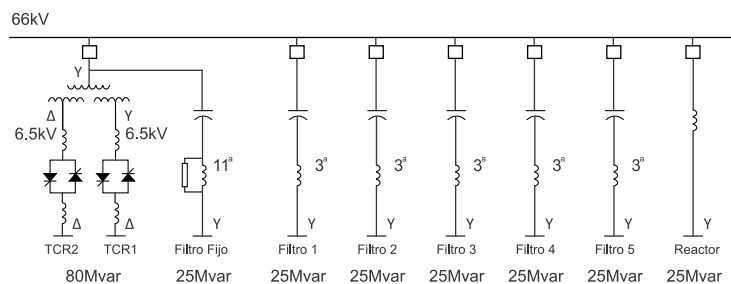


Figura 2: Diagrama unifilar del CER de San Lorenzo

2.2.1 Sistema de potencia del CER de San Lorenzo

Los filtros armónicos y TCR son modelados por ramas de componentes lineales del ATP como reactor y capacitor en conjunto con válvulas tiristorizadas, representadas por pares de tiristores conectados en antiparalelo. Los circuitos *snubber* son modelados por elementos RC en paralelo a los tiristores. El transformador reductor es modelado por un transformador saturable de tres arrollamientos.

2.2.2 Sistema de control del CER de San Lorenzo

Para representar el sistema de control en lazo cerrado fue utilizado un modelo adecuado para programas de estabilidad transitoria [6]. Este sistema es implementado en el lenguaje MODELS e incluye circuitos de medición, controlador de tensión, circuitos de sincronía y generadores de pulsos de disparo [2]. La lógica de conexión y desconexión de capacitores se realiza de acuerdo con el nivel de tensión actual en la barra de 66kV. El sistema de control está mostrado en la Figura 3 [7].

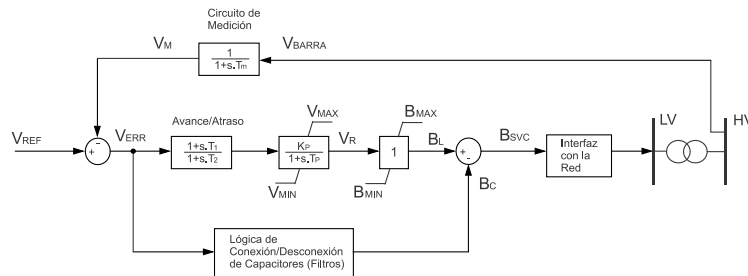


Figura 3: Sistema de control de lazo cerrado del CER de San Lorenzo

El sistema de control implementado permite el modo de operación de control de tensión además de estrategias de operación en casos de subtensión. En este modelo, básicamente, la señal de diferencia entre la tensión actual de la barra de 66kV (V_{HV}) y la tensión de referencia (V_{REF}) pasa primeramente por un controlador de avance/atraso para proveer de márgenes de fase y ganancia adecuados para luego ser direccionado a un controlador proporcional-integral (PI) que calcula la señal de susceptancia necesaria por el CER de forma a anular el desvío de tensión [6]. Los circuitos implementados de medición, de sincronía y el controlador TCR son idénticos a los del CER de Limpio.

3. SIMULACIONES Y RESULTADOS

El principal objetivo de las simulaciones es verificar el comportamiento dinámico del CER implementado con su sistema de control cuando sujeto a distintos tipos de disturbios. Para este fin son comparados los resultados obtenidos en ATP con los resultados obtenidos en el programa Anatem bajo las mismas condiciones de operación. En este último programa ya se encuentran modelados los CER de Limpio y San Lorenzo con sus respectivos sistemas de control.

El sistema eléctrico de potencia de la ANDE (SIN) utilizado es un modelo equivalente reducido en el cual están consideradas 10 barras y contempladas todas las líneas de transmisión de 220kV con sus parámetros nominales [8]. Para facilitar el análisis las simulaciones son realizadas con un único CER conectado al modelo reducido del SIN y mostrados los resultados más representativos.

3.1 Simulación del CER de Limpio

3.1.1 Simulación de escalón de tensión de 7%

Para verificar la operación dinámica del controlador, es aplicado un escalón de 7% en la referencia de tensión. Las figuras 4 y 5 muestran la tensión (V_{HV}) y la potencia reactiva de salida del CER (Q_{HV}). El tiempo de respuesta para que la tensión (V_{HV}) alcance 90% del valor final en régimen permanente es aproximadamente de 45 ms en ATP y de 50 ms en Anatem. La potencia reactiva de salida posee una variación aproximada de 81Mvar en ATP y 87Mvar en Anatem. Como esperado, en ambas simulaciones únicamente un TSC fue conectado para atender a la demanda de reactivos.

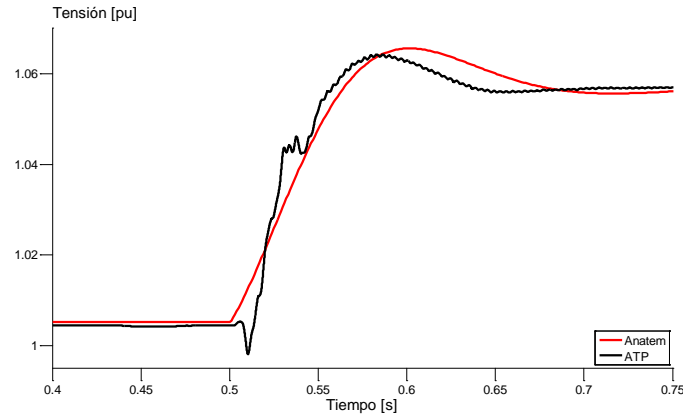


Figura 4: Módulo de la tensión trifásica media de alta tensión

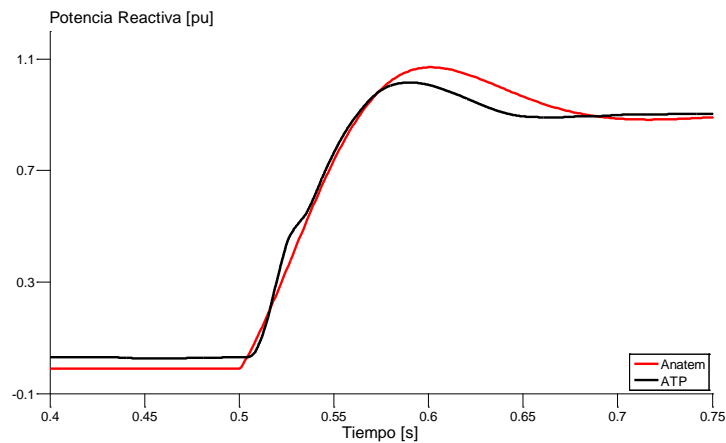


Figura 5: Valor de la potencia reactiva trifásica de salida del CER

3.1.2 Simulación de cortocircuito monofásico

Con el objetivo de mostrar el comportamiento del CER ante la aparición de fuertes disturbios en la red es simulada una falla monofásica en la subestación de Carayao con duración de 200ms. En las Figuras 6 y 7 están mostradas la tensión (V_{HV}) y la potencia reactiva de salida del CER (Q_{HV}). Como la tensión media trifásica cae por debajo del nivel de 0,5pu la estrategia de subtensión no es sensibilizada. De modo que, durante el tiempo en que la falla no es removida, el CER eleva la generación de potencia reactiva hasta alcanzar aproximadamente un pico de 130Mvar en los programas ATP y Anatem. Como esperado, todas las unidades TSC fueron conectadas para hacer frente a la caída de la tensión. Una vez removida la falla, la tensión experimenta una sobretensión transitoria debido a la inserción de ambos TSC, por lo que el CER desconecta los capacitores de forma a reducir la generación de reactivos hasta alcanzar nuevamente el punto de operación previo a la perturbación. Es verificado un *overshoot* de 10% de la tensión media trifásica en la simulación de ATP y de 6% en Anatem.

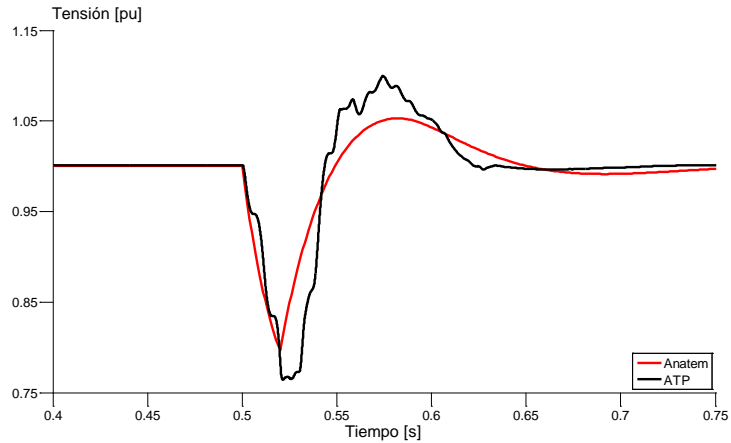


Figura 6: Módulo de la tensión trifásica media de alta tensión

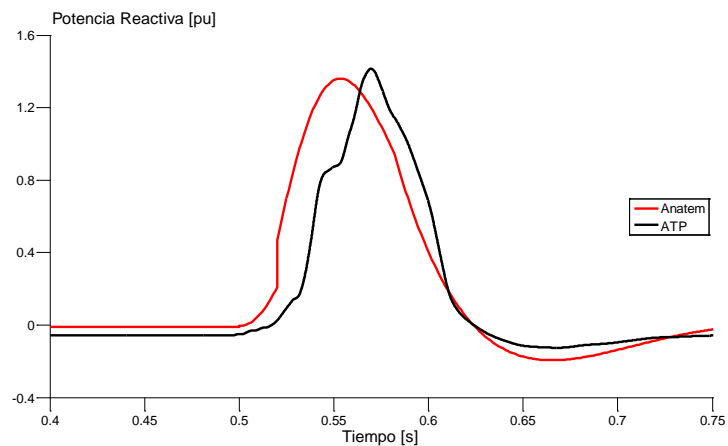


Figura 7: Valor de la potencia reactiva trifásica de salida del CER

Vale destacar que los resultados arrojados por el modelo en ATP son coherentes y satisfactorios, visto la existencia de restricciones inherentes entre los programas utilizados para la comparación, entre los cuales pueden ser citados pasos de integración diferentes y las simplificaciones realizadas por el programa Anatem en los modelos de dispositivos de potencia en general.

3.2 Resultados de la simulación del CER de San Lorenzo

Para mostrar la operación dinámica del CER ante contingencias en el SIN, es simulada una falla monofásica en la subestación de Carayao, de duración de 400ms. En la Figura 8 está ilustrada la potencia reactiva de salida del CER (Q_{HV}). Se puede observar una generación próxima 1,4pu y 1,5 pu para las simulaciones en ATP y Anatem respectivamente, en los instantes en que la falla aún no ha sido removida. Es registrado un

máximo de 2,0pu de potencia reactiva inmediatamente después de que la falla es removida en ambos programas.

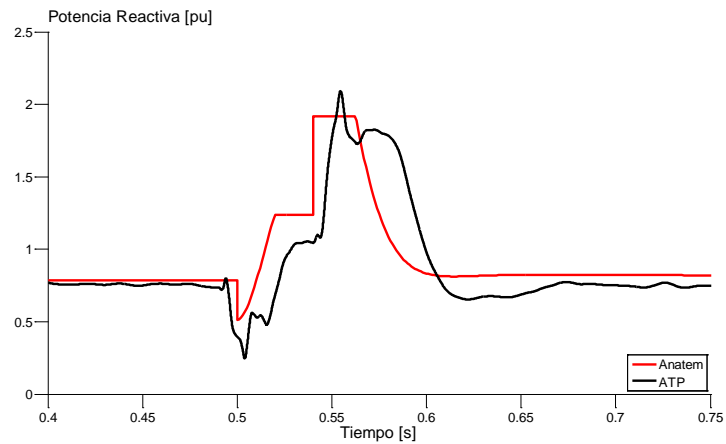


Figura 8: Valor de la potencia reactiva trifásica de salida del CER

Debe ser resaltado que las respuestas obtenidas en ATP son coherentes y satisfactorias, debido a las diferencias intrínsecas entre los programas ATP y Anatem, como pasos de integración y simplificaciones realizadas en Anatem en el modelado de dispositivos de potencia.

4. CONCLUSIÓN

Los recursos gráficos del ATPDraw y facilidades de programación del lenguaje MODELS han permitido el desarrollo de una representación realista de los CER de Limpio y San Lorenzo con sus sistemas de control.

Fueron realizadas simulaciones, con la intención de validar los modelos, de las cuales fueron seleccionados los resultados que exigían a los CER variar su punto de operación ampliamente. Las pequeñas diferencias entre las respuestas arrojadas por los programas utilizados son coherentes y esperadas debido a las diferencias intrínsecas entre los programas ATP y Anatem.

Los modelos implementados son satisfactorios y servirán para que la realización de estudios de transitorios electromagnéticos con ATP representen de la forma más fiel el comportamiento de los CER y lograr así que las simulaciones sean más precisas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Static Var Compensator Limpio, SIEMENS, Alemania, Abril 2002, páginas 1-78.
- [2] Lefebvre, S.; Gerin-Lajoie, L., “A static compensator model for the EMTP“, IEEE Transactions on Power Systems, vol.7, no.2, páginas 477-486, Mayo 1992.
- [3] Bergmann, K.; Friedrich, B.G.; Stump, K.; Elliott, W.H., “Digital simulation, transient network analyzer and field tests of the closed loop control of the Eddy County SVC“, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.8, no.4, páginas 1867-1873, Octubre 1993.
- [4] Closed Loop Control Manual, SIEMENS T&D, Alemania, Febrero 2003, páginas 1-37.
- [5] Aguayo, G., “Conversión de filtro armónicos a banco de capacitores en el CER de San Lorenzo“, VIII Seminario del Sector Eléctrico Paraguayo – CIGRÉ, Octubre 2008.
- [6] “Static VAr compensator models for power flow and dynamic performance simulation“, IEEE Transactions on Power Systems, vol.9, no.1, páginas 229-240, Febrero 1994.
- [7] Kundur, P. *Power System Stability and Control*. Nueva York, McGraw-Hill, 1994.
- [8] Aguayo, G.; Escudero, F.; Fernández, U.; Ramos, R.; Klaus, M.; Lottes, J.; “Comisionamiento del CER de Limpio 220kV-Comparación entre resultados de campo y TNA“, Seminario del Sector Eléctrico Paraguayo – CIGRÉ, 2004.