
INTEGRACIÓN DE EQUIPOS STATCOM Y SVC AL SISTEMA INTERCONECTADO CENTRAL CHILENO

P. JORQUERA*
Transelec S.A.
Chile

G. OLGUÍN
Transelec S.A.
Chile

A. ALEGRÍA
Transelec S.A.
Chile

***Resumen** –El presente artículo describe el contexto general del Proyecto STATCOM/SVC de las subestaciones Cerro Navia y Polpaico del Sistema Interconectado Central (SIC) de Chile. Se detallan algunos de los estudios específicos llevados a cabo para asegurar una integración confiable y segura de los equipos STATCOM y SVC.*

Palabras clave: STATCOM, SVC, RTDS, Estudios Eléctricos, Integración de equipos FACTS

1 INTRODUCCIÓN

El abastecimiento eléctrico de Chile se realiza mediante 4 sistemas interconectados independientes entre sí. El Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) cubre el territorio comprendido entre las ciudades de Arica y Antofagasta con cerca de un 28,06% de la capacidad instalada en el país; el Sistema Interconectado Central (SIC) se extiende entre las localidades de Taltal y Chiloé con aproximadamente un 71,03% de la capacidad instalada en el país. Existen además dos sistemas de menor tamaño en el extremo sur del país. El Sistema de Aysén atiende el consumo de la Región XI con un 0,29% de la capacidad; y el Sistema de Magallanes, que abastece la Región XII con un 0,62% de la capacidad instalada en el país. La Fig. 1-(a) ilustra las zonas de abastecimiento de cada sistema interconectado y la Fig. 1-(b) muestra el Sistema de Transmisión Troncal (STT) del SIC. Por su tamaño, el SIC es el principal sistema eléctrico del país, entregando suministro eléctrico a más del 90% de la población del país.

La coordinación de la operación del SIC está a cargo del Centro de Despacho Económico de Carga del SIC (CDEC-SIC). Este organismo tiene por objetivo coordinar la operación de las centrales generadoras y las líneas de transmisión con el objeto de lograr la operación económica del sistema eléctrico.

Transelec es la principal empresa transmisora en Chile, posee y opera activos de transmisión en el SIC y SING en niveles de tensión desde 154kV a 500kV.

Pese a la crisis económica mundial que se desató en años recientes y al terremoto y maremoto que afectó parte de Chile el 27 de Febrero de 2010, el crecimiento económico de Chile no se ha visto significativamente afectado y ya se vislumbran signos sólidos de recuperación. Junto con la reactivación económica, el crecimiento de la demanda eléctrica se ha recuperado y pareciera comenzar a estabilizarse.

El crecimiento de la demanda eléctrica ha motivado la iniciativa privada por el desarrollo de proyectos de generación eléctrica térmica, hidráulica y de Energías Renovables No Convencionales (ERNC), tales como eólica, geotérmica y mini hidráulica. Sin embargo, la expansión del sistema de transmisión, necesaria para evacuar y transportar los nuevos bloques potencia eléctrica, no ha mostrado el mismo dinamismo producto de la creciente dificultad para construir líneas y subestaciones y se prevé que las expansiones necesarias no llegarán a tiempo para satisfacer las necesidades de transporte desde los nuevos centros de generación.

Este eventual retraso en la disponibilidad de activos de transmisión ha puesto una fuerte presión sobre las empresas de transmisión quienes deben buscar nuevas formas de aprovechar al máximo las instalaciones existentes.

El SIC cuenta con un Sistema Troncal de Transmisión en 500kV y 220kV ilustrado en la Fig. 1-(b) que debe permitir transferencias Sur-Norte y Norte-Sur según se trate de hidrologías húmedas o secas.

*pjorquera@transelec.cl



Fig. 1-(a) Zonas abastecidas por los sistemas interconectados

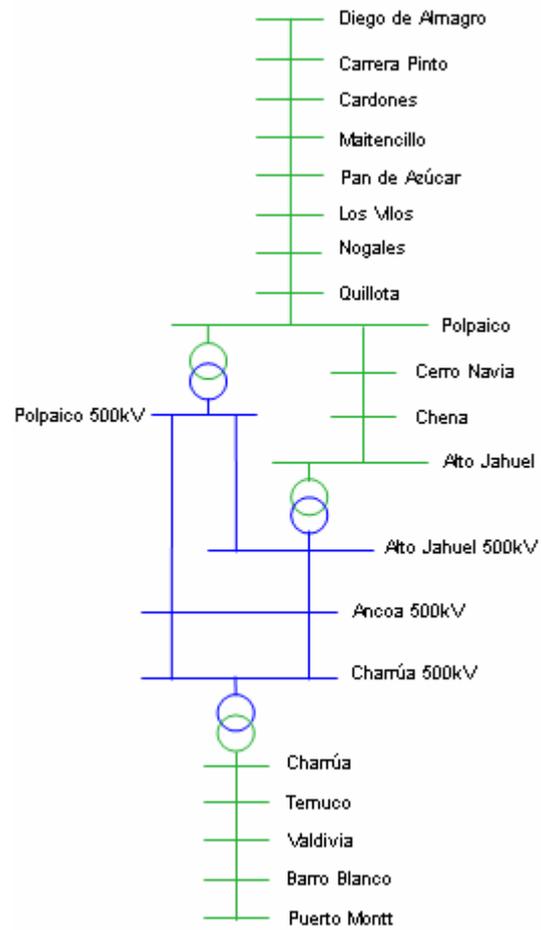


Fig.1-(b) Detalle del Sistema de Transmisión Troncal del SIC

Actualmente el corredor de 500kV en los tramos Ancoa-Alto Jahuel y Ancoa-Polpaico, tiene un límite sistémico de transferencia de aproximadamente 1400 MW.

Una de las causas de esta limitación de transporte es el déficit de compensación dinámica de reactivos necesario para afrontar contingencias simples, en particular fallas balanceadas y desbalanceadas en líneas y barras de sistema 500 y 220kV.

Las subestaciones Cerro Navia y Polpaico están ubicadas en Santiago de Chile, en donde se concentra la mayor parte del consumo del SIC y constituyen puntos adecuados para implementar compensaciones dinámicas de reactivos que permitan levantar los actuales límites del sistema de 500kV.

Luego de llevarse a cabo extensos estudios de Pre-factibilidad, se decidió la instalación de un STATCOM (Static Synchronous Compensator) de 140/-65 MVar en Cerro Navia y un SVC (Static VAR Compensator) de 100/-65 MVar en Polpaico los que en conjunto permitirían aumentar la transferencia máxima a 1600 MW en el corredor de 500kV Ancoa-Alto Jahuel y Ancoa-Polpaico.

El STATCOM que será instalado en la subestación Cerro Navia será el equipo de este tipo más grande instalado en un sistema de transmisión hasta la fecha.

Transelec con el apoyo de consultores y el propio proveedor de los equipos lideró el desarrollo de una serie de estudios que tienen por objetivo asegurar la adecuada y segura integración del SVC y STATCOM al Sistema Interconectado Central. Este artículo describe los elementos relevantes de dichos estudios.

2 ESTUDIOS DE PREFACTIBILIDAD

En este estudio se analizó la factibilidad técnico económica de aumentar la transferencia por el corredor de 500kV desde 1400 MW al máximo económico inmediatamente factible. Se analizaron diferentes escenarios de estudio y diversas soluciones de compensación dinámica de reactivos. En los casos de estudio, se ajustó la transferencia por el sistema de 500kV al máximo económico factible que resultó ser 1600MW. Para todos los

casos de estudio se consideraron condiciones pesimistas relativas a soporte de tensión por parte de centrales cercanas a Santiago.

Con los escenarios base establecidos se simuló una serie de contingencias a fin de comprobar la estabilidad del sistema y la respuesta preliminar de los dispositivos STATCOM y SVC. Las simulaciones fueron llevadas a cabo usando el software DigSilent y la base de datos completa del SIC. La contingencia más severa para el sistema se empleó para determinar, en cada uno de los casos, las capacidades de los equipos de compensación dinámica de reactivos.

El estudio finalmente estableció las capacidades y especificaciones básicas de los equipos STATCOM y SVC que hacían estable el sistema ante la contingencia y escenario más desfavorable.

2.1 Descripción básica del proyecto y de los dispositivos de compensación dinámica de reactivos

La Fig. 2 muestra un detalle del sector del SIC relevante al proyecto. Se muestran las barras en donde se instalarán los equipos STATCOM y SVC y el corredor de 500kV que se verá beneficiado por el aumento de las transferencias.

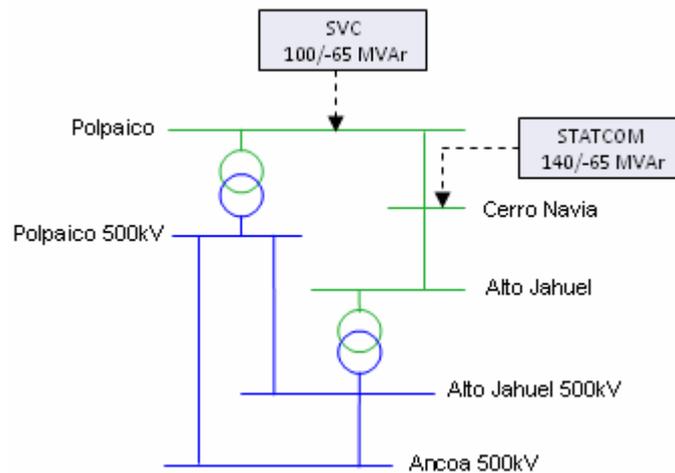


Fig. 2. Ubicación de los equipos STATCOM y SVC en el STT

Las características básicas de los equipos STATCOM y SVC se muestran a continuación:

TABLA I. CARACTERÍSTICAS STATCOM DE CERRO NAVIA

STATCOM	
Capacidad nominal	140/-65 MVar
Pendiente	0-3% (capacitiva) 0-1,6% (inductiva)
Transformador	140 MVA, 220/34 kV YNd11
Capacidad fuente VSC	102,5 MVar
Filtros de armónicas	12,5 MVar (5.5 x 50 Hz) 10 MVar (12 x 50 Hz) 15 MVar (33 x 50 Hz)

TABLA II. CARACTERÍSTICAS SVC DE POLPAICO

SVC	
Capacidad nominal	100/-65 MVar
Pendiente	0-15% (capacitiva) 0-10% (inductiva)
Transformador	100 MVA, 220/19 kV YNd11
TCR	192 MVar
Filtros de armónicas	83 MVar (4.95 x 50 Hz) 46 MVar (6.95 x 50 Hz)

Con el objeto de proveer un soporte dinámico de reactivos ante contingencias, los equipos consideran la implementación de funciones de control y ajustes para operar la mayor parte del tiempo en torno a los 0 MVar (*idle*). De este modo ante una contingencia en el sistema de 500kV o 220kV ambos equipos dispondrán de reserva reactiva para entregar soporte dinámico al sistema. Con esto se levantan las restricciones sistémicas del corredor de 500kV para aumentar la transferencia hasta 1600 MW.

La utilización de los equipos STATCOM y SVC, además de permitir una mejor explotación del corredor de 500kV, permite postergar la inversión necesaria para la construcción de una nueva línea de transmisión.

3 ESTUDIOS DE DISEÑO E INTEGRACIÓN

Estos estudios fueron especificados para ser desarrollados por el proveedor de los equipos con estrecha colaboración de especialistas de Transelec. Los estudios tienen por objeto el diseño específico de los equipos a modo de garantizar una integración segura de los mismos al SIC. Los estudios permiten disminuir la incertidumbre sobre el comportamiento de los equipos una vez que sean puestos en servicio.

Los análisis necesarios consideran tres tipos de estudios: estudio de estabilidad transitoria, estudio de desempeño dinámico y prueba de los controladores en un simulador digital de tiempo real, RTDS.

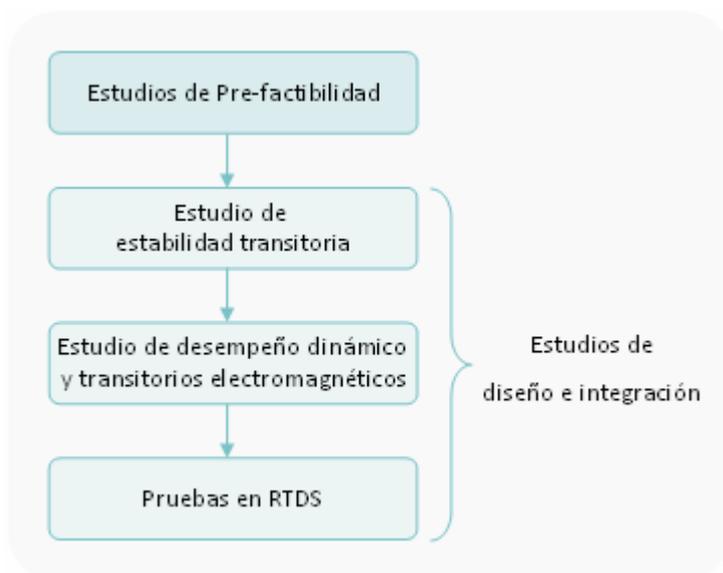


Fig. 3. Estudios necesarios para el diseño e integración de los equipos

A lo largo de esta sección se describen en forma cualitativa los estudios que se llevaron a cabo para este proyecto en particular.

3.1 Estudio de estabilidad transitoria

Este estudio verifica la estabilidad del SIC bajo diferentes condiciones de operación y contingencias. El estudio es una extensión de los análisis de Pre-factibilidad pero tiene por objetivo observar el desempeño del STATCOM y SVC ante contingencias exigentes y definir así funciones de control específicas para mejorar la seguridad del SIC. Se analizaron 3 escenarios, los cuales son descritos a continuación:

1. Año 2011: Máximo flujo por el sistema 500kV
2. Año 2011: Mínimo flujo por el sistema de 500kV
3. Año 2012: Máximo flujo por el sistema de 500kV

El escenario para el año 2012 se incluye debido a que ese año el corredor de 500kV sufre un importante cambio de configuración el cual está ilustrado en la Fig. 4. Se puede apreciar que para el año 2012 el corredor de 500kV tendrá dos líneas por cada tramo, aumentando la robustez del sistema de 500kV y del SIC en general.

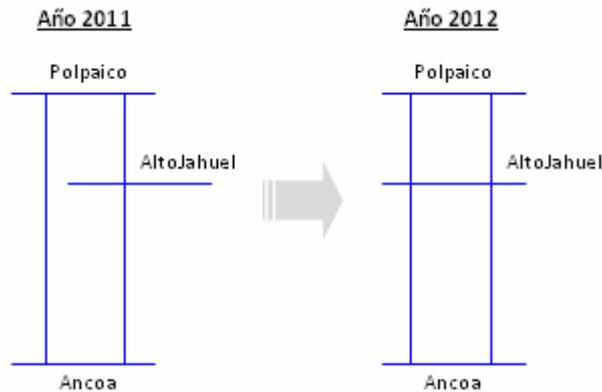


Fig. 4. Cambio de configuración corredor 500kV

Los casos de estudio y contingencias simuladas constituyen escenarios con alta exigencia para los equipos STATCOM y SVC. En particular se crearon escenarios con mínimo soporte de reactivos al dejar fuera de servicio centrales cercanas a Santiago para casos de máximo flujo por el sistema de 500 kV.

El caso de estudio de mínimo flujo por el sistema de 500kV fue pensado para evaluar la estabilidad de tensión en el sistema de 500kV. El corredor de 500 kV posee líneas de transmisión de longitudes relevantes, por lo que en la operación con una condición de bajo flujo de potencia existe una gran cantidad de potencia reactiva aportada por las líneas, lo que eleva las tensiones del sistema de 500 kV con todas las complicaciones que esto genera.

El estudio de estabilidad transitoria fue llevado a cabo usando el software PSS/E. Las bases de datos PSS/E contienen la información estática de la red (parámetros de líneas, transformadores, máquinas, demanda, etc.) y la información necesaria para simular la respuesta dinámica del sistema (reguladores de velocidad, control de excitación, PSS, control de los SVC, modelo dinámico de carga, esquema de desprendimiento de carga, etc.).

Las contingencias estudiadas incluyeron fallas en líneas de transmisión, pérdida de generación y salida intempestiva de los equipos STATCOM y SVC. Las consignas de operación de los equipos STATCOM y SVC fueron ajustadas de manera tal que bajo operación normal del sistema los equipos operaran en torno a 0 MVar.

El estudio muestra que para todas las contingencias estudiadas, el sistema provisto de compensación dinámica de reactivos resulta estable para una transferencia de 1600 MW en el corredor de 500kV desde Ancoa hacia el Norte. Adicionalmente el estudio permitió identificar estrategias, parámetros y ajustes preliminares para los controladores de ambos equipos.

3.2 Estudio de desempeño dinámico y transitorios electromagnéticos

Este estudio tiene por objetivo diseñar y analizar el comportamiento del control de los equipos STATCOM y SVC ante maniobras y transitorios cercanos. Para ello se reduce la red eléctrica a un número limitado de nodos y se modelan los controladores de ambos equipos en detalle. Los transitorios pueden ser originados por fallas, maniobras de energización de transformadores, de líneas, de bancos de condensadores, etc. Los estudios de transitorios electromagnéticos son llevados a cabo en programas computacionales que resuelven la red de forma completa, utilizando pasos de integración sumamente pequeños (50 μ s o menos). Para probar la robustez del controlador se simulan escenarios con bajo nivel de cortocircuito y condiciones de operación que puedan provocar problemas de resonancia [1]. Con esto se logra exponer al control de los dispositivos a escenarios complejos de manejar, permitiendo detectar y corregir posibles problemas que pueda presentar el ajuste del control. En la etapa siguiente de los estudios de diseño e integración (Pruebas en RTDS) se prueba el control real (dispositivos físicos) del STATCOM y el SVC.

3.3 Pruebas en simulador digital en tiempo real (RTDS)

Completados los estudios anteriores, los controladores son programados con las funciones de control y parámetros preliminares. En las pruebas en RTDS se somete a prueba el control real (dispositivos físicos) de

los equipos STATCOM y SVC. Las pruebas permiten comprobar todas las secuencias y funciones de los controladores en un ambiente de tiempo real y de interacción con un modelo equivalente digital de la red eléctrica.

Como los equipos se encontrarán eléctricamente cerca el uno del otro (~30 km), es relevante probar ambos controladores en forma simultánea con el fin de reducir todo riesgo de interacción desfavorable entre los equipos.

Para el desarrollo de los estudios se diseñó un modelo reducido del SIC el cual fue cargado en el RTDS y se conectaron a éste los controladores físicos de los equipos SVC y STATCOM. De este modo, los controladores interactúan con el modelo del SIC en RTDS permitiendo un estudio detallado de un gran número de contingencias y maniobras que son simuladas en el RTDS.

3.3.1 Modelo empleado para las pruebas en RTDS

Como se trata de simulaciones que involucran transitorios electromagnéticos, se empleó un equivalente reducido del SIC tal como se muestra en la Fig. 4. Estos transitorios son de muy corta duración por lo que las máquinas y su dinámica electromecánica no son consideradas en el modelo de la red.

El objetivo del modelo desarrollado fue representar en mayor detalle la zona cercana a los equipos STATCOM y SVC, incluyendo el sistema de 500kV para tener una aproximación al sistema real. La energización del modelo se realiza desde dos puntos, el equivalente en Quillota 220kV y Ancoa 500kV.

Este modelo fue implementado por el fabricante de los equipos en RSCAD para luego ser compilado y enviado al RTDS. Dado lo extenso del modelo de red, se utilizaron dos cubículos de RTDS; uno para representar el sistema de 220kV y otro para representar el sistema de 500kV. La unión de los modelos es realizada en la subestación Alto Jahuel mediante el modelo del transformador 500/220 kV.

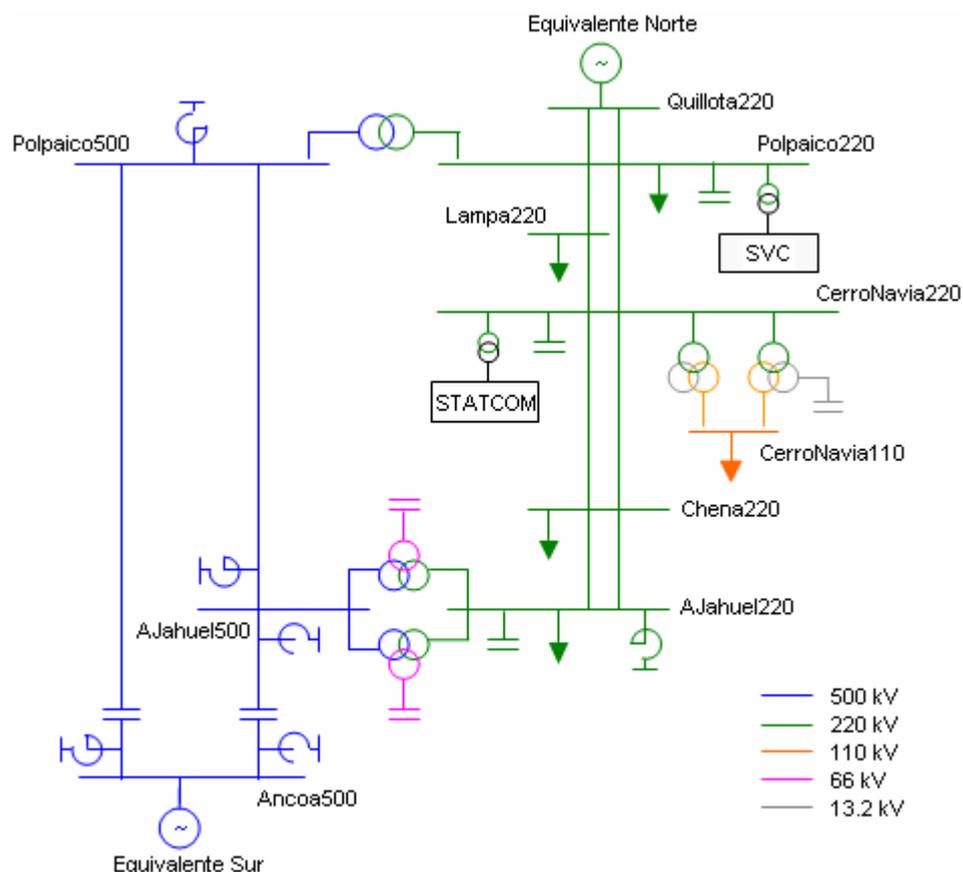


Fig. 5. Equivalente del SIC empleado para pruebas en RTDS

La conexión física del RTDS a los controladores se ilustra en la Fig. 6. Las salidas análogas de los dos módulos de RTDS son enviadas a las tarjetas de salidas. Como el RTDS entrega señales de 0-5 V, las señales son amplificadas para entregar los rangos correctos a las Tarjetas de Entrada y Salida de los sistemas de

control de los equipos. Estas señales son enviadas al sistema de control de cada equipo. El sistema de control se encarga de enviar las señales de control respectivas a la Unidad de Control de Válvulas (VCU) del STATCOM y del SVC. De las VCU de cada equipo saldrán los pulsos de disparo para las válvulas. En el caso del STATCOM pulsos para las válvulas de IGBT y para el SVC los pulsos para las válvulas de tiristores del Reactor Controlado por Tiristores (TCR).

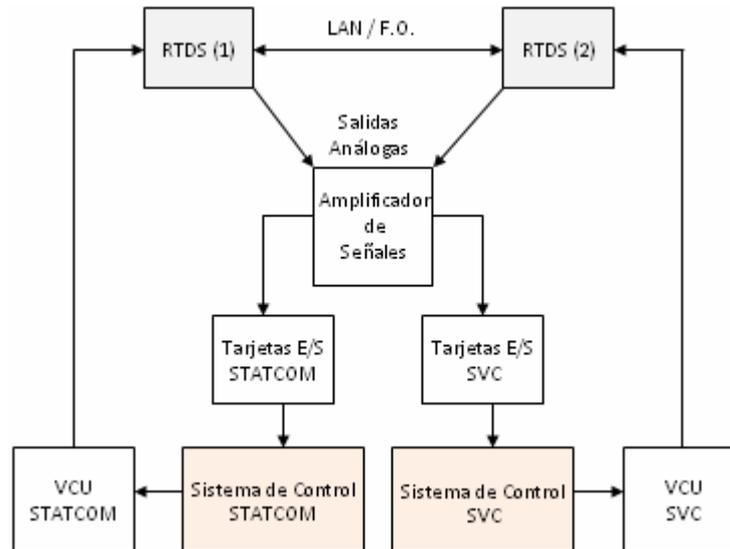


Fig. 6. Diagrama simplificado conexión controladores al RTDS

3.3.2 Aspectos relevantes del sistema de control

Los sistemas de control del STATCOM y del SVC están formados por un computador industrial dotado de tarjetas electrónicas y racks de entrada y salida conectados vía buses de campo estándar. Transformadores de corriente y transformadores de potencial entregan las variables de la red al sistema de control de cada equipo. Estas variables son empleadas en los algoritmos de control respectivos. Tanto el STATCOM como el SVC poseen modo de control automático y modo de control manual.

Diversas estrategias y funciones de control fueron incorporadas en cada dispositivo. Ambos equipos cuentan con estrategias de bajo voltaje para prevenir sobretensiones. Si la tensión del sistema cae en forma muy pronunciada, los equipos ajustan su salida de manera tal que cuando la tensión se recupere no existan sobretensiones importantes. Esta función es de especial importancia cuando ocurre una falla en el sistema; en dicha situación, la tensión cae a valores sumamente bajos, por lo que los equipos STATCOM y SVC generalmente operarían en modo full capacitivo produciéndose una importante sobretensión al despejar la falla.

Como el objetivo principal de los equipos es soporte dinámico de reactivos y no soporte estacionario de tensión, se implementaron funciones de control que permiten optimizar el margen de reactivos para el STATCOM y el SVC. Tanto el STATCOM como el SVC pueden variar levemente su consigna de tensión con el fin de mantener un margen relevante de potencia reactiva. Además, el SVC posee control de la conexión de un banco de condensadores de 100 MVar que será instalado en la misma subestación Polpaico. Para prevenir oscilaciones en la salida de potencia reactiva del SVC, se incorporó una estrategia de control que permite el ajuste de la ganancia del regulador de tensión. Esta función de control es de suma utilidad en condiciones de operación débil (baja razón de cortocircuito) y durante contingencias en el sistema que puedan excitar oscilaciones en la salida de potencia reactiva del SVC [2].

3.3.3 Descripción de las pruebas y resultados obtenidos

Uno de los objetivos de las pruebas en RTDS es comprobar que no existen resonancias, comportamiento erróneo o fenómenos de interacción negativa entre los dos equipos. Los reguladores de ambos equipos han sido ajustados para que no provoquen oscilaciones ni elevados overshoots. Adicionalmente, las pruebas en RTDS permiten probar las secuencias de partida/parada y la respuesta de los controladores a diversas contingencias en el sistema eléctrico.

Diferentes pruebas y contingencias fueron simuladas para evaluar el comportamiento del control de los equipos STATCOM y SVC. Las pruebas realizadas incluyeron secuencias de partida/parada de los equipos, revisión de las funciones de control y análisis de contingencias. El resultado de las pruebas mostró que ninguna de las contingencias y pruebas analizadas entrega indicios de inestabilidad u oscilaciones no sostenidas.

Se comprobó en las pruebas que el STATCOM posee un menor tiempo de respuesta que el SVC, por lo que reacciona más rápido ante un cambio de tensión. Sin embargo, ambos equipos se adaptan a las variaciones de la tensión de sus respectivas barras de control y estabilizan la tensión en el tiempo requerido.

Para ambos equipos, la elección de la pendiente en el rango de 1.5 - 3% demostró ser suficiente. Para el caso de las consignas de tensión, estas deben ser elegidas de manera tal que los equipos en régimen permanente operen en torno a los 0 MVar de salida. Con esto se asegurará la disponibilidad del soporte dinámico de reactivos de ambos equipos ante contingencias.

4 CONCLUSIONES

Transelec, empresa transmisora que opera en los Sistemas Interconectados de Chile, está empeñada en maximizar el uso de la infraestructura eléctrica de transmisión existente incorporando para ello los últimos avances de la tecnología de transmisión, en particular Sistemas de Transmisión Flexibles AC (FACTS). La incorporación de tecnología FACTS permitirá incrementar la capacidad de transporte por el sistema de alta tensión, en particular 220kV y 500kV, manteniendo niveles aceptables de seguridad estática y transitoria.

En este artículo se han descrito los estudios realizados para asegurar la integración segura de dos dispositivos FACTS, un SVC y un STATCOM, al Sistema Interconectado Central. Estos nuevos equipos permitirán incrementar las transferencias por el corredor de 500kV en 200MW manteniendo la seguridad del suministro ante condiciones estables y de contingencia.

La cercanía eléctrica de los equipos STATCOM y SVC planteaba interrogantes sobre si se podrían presentar problemas de interacción desfavorable entre los equipos. Luego de llevar a cabo los estudios de estabilidad transitoria y en particular después de las pruebas en RTDS se verificó el buen comportamiento de ambos dispositivos FACTS. Un punto relevante a destacar es que no se presentan problemas de interacción entre el STATCOM y el SVC aún cuando estos dispositivos operan con la misma pendiente. Esto se debe a que el STATCOM ajusta su salida mucho más rápido (posee menor tiempo de respuesta) que el SVC [1] [2].

El objetivo principal de los equipos STATCOM y SVC es entregar soporte dinámico de reactivos durante contingencias en el sistema ante elevadas transferencias desde Ancoa al norte. Para ello, las consignas de tensión deben ser elegidas de manera tal que los equipos operen en régimen permanente con un margen adecuado de MVar. Con esto se asegurará la disponibilidad del soporte dinámico de reactivos de ambos equipos ante contingencias.

Con los estudios detallados en el presente artículo se continúa avanzando en la integración confiable y segura de los equipos STATCOM y SVC al Sistema Interconectado Central chileno. La puesta en servicio se ha programado para el primer trimestre del año 2011.

5 REFERENCIAS

[1] Cigré Working Group 14.19, *Static Synchronous Compensator (STATCOM)*

[2] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, *Thyristor-Based FACTS Controllers For Electrical Transmission Systems*