

Planta de Aluminio. Modelo de Carga para Estudios de Estabilidad.

J.L. Agüero.
IITREE-LAT
Facultad Ingeniería. UNLP
La Plata. Bs. As. Argentina

M. Beroqui
IITREE-LAT - P. P. CIC
Facultad Ingeniería. UNLP
La Plata. Bs. As. Argentina

S. Achilles
IITREE-LAT
Faculta Ingeniería. UNLP
La Plata. Bs. As. Argentina

O. Cosatti
TRANSPA S.A.
Trelew. Chubut. Argentina

Resumen: El “Sistema Eléctrico Patagónico Interconectado” (SEPI) es un sistema eléctrico que abarca la región sur de la Argentina, con el 60% de su carga constituida por una planta de producción de aluminio mediante electrólisis, con dos series de 200 cubas y 160 MW cada una. Los estudios de estabilidad, dinámica y transitoria, de este sistema, para las situaciones actual y futura, con ampliación de demanda y generación en la planta de aluminio y en el resto del SEPI, requieren un adecuado modelado de esta particular carga. Se describen los ensayos y las simulaciones realizadas para obtener el modelo de carga correspondiente al proceso electrolítico de producción de aluminio. Se caracterizan estadísticamente las variaciones de esta carga, con el propósito de estimar los requerimientos de reserva rotante en el sistema. Se ensayan y analizan mecanismos de reducción rápida de esta carga, como elemento de control en el sistema.

Palabras Claves: Modelo de Carga. Estabilidad Transitoria y Dinámica. Reserva Rotante. Lastrado de Carga.

I. INTRODUCCIÓN

La República Argentina posee dos sistemas eléctricos desvinculados entre sí, el de mayor porte denominado Sistema Argentino de Interconexión (SADI), ubicado en el centro y norte del país, con interconexiones a países vecinos, Uruguay y Brasil; y el de menor porte denominado Sistema Eléctrico Interconectado Patagónico (SEPI), que abarca la región patagónica al sur del país.

El SEPI es relativamente pequeño, su carga pico es de aproximadamente 600 MW, posee una central hidráulica de 470 MW, que se conecta a través de una doble terna de 330 kV de 550 Km, con una planta productora de aluminio por electrólisis.

El resto del sistema, vinculado por un autotransformador de 330/132 kV y 60 MVA, tiene un desarrollo de aproximadamente 1300 Km en líneas de 132 kV, con carga y generación distribuida, en configuración radial, estando una importante proporción de esta demanda constituida por motores en yacimientos de hidrocarburos.

La planta de aluminio está constituida por dos series de 200 cubas electrolíticas cada una, y posee generación a gas

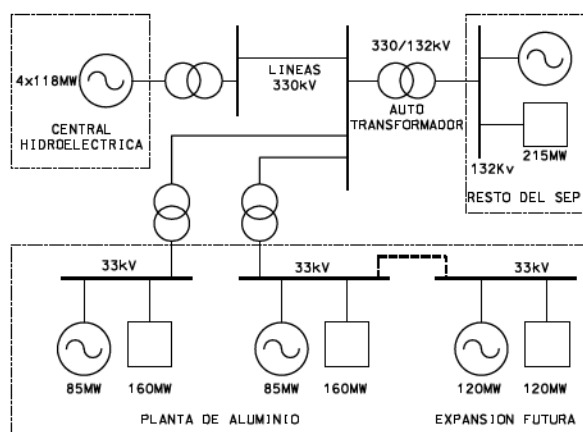


Fig. 1: Esquema unifilar simplificado del SEPI.

En Fig. 1 se muestra un esquema unifilar simplificado del Sistema Eléctrico Patagónico Interconectado (SEPI), mostrando la situación actual de la planta de aluminio y su futura ampliación.

Se han indicado los valores de demanda de las series electrolíticas, y las potencias instaladas de generadores en la planta de aluminio y en la central hidráulica.

Sobre el SEPI se deben realizar estudios de estabilidad para la situación actual, para la salida por mantenimiento programado de la central hidráulica, y para situaciones futuras que contemplan, la ampliación de generación y demanda de la planta de aluminio, y la ampliación de la red de 132 kV y de su generación.

Además del correcto modelado de los Generadores, y Sistemas de Control Automático de Tensión y de Velocidad (Refs. [1], [2], y [3]), resulta importante conocer en forma precisa el comportamiento dinámico de la serie de cubas electrolíticas, ya que la planta de aluminio, con sus dos series actuales de 160 MW cada una y la próxima entrada en servicio de una tercera, constituyen, para el SEPI donde están conectadas, aproximadamente el 60 % de la carga.

Por lo tanto, cualquier estudio dinámico del SEPI debe contemplar las características particulares de esta carga.

El objeto de este trabajo es dar cuenta de los ensayos y mediciones realizados sobre una de las dos series de la

comportamiento estadístico de la carga, con el objeto de ponderar la reserva de potencia rotante necesaria en el sistema eléctrico para atender las variaciones de esta demanda.

IV. MODELO DE LA CARGA

A partir de los esquemas de control suministrado por el fabricante, más las actualizaciones producidas por personal de la planta de aluminio, se propuso un modelo de la carga. Se modeló cada parte del sistema y se las simuló utilizando el programa TUTSIM. Se ingresó a los modelos con los registros de las variables adquiridas en los ensayos como entrada, obteniéndose registros simulados de las salidas de cada parte del modelo. Estos últimos registros fueron comparados con aquellos adquiridos, ajustándose los modelos correspondientes para obtener una buena concordancia entre las variables medidas y las simuladas. Una vez obtenido cada parte del modelo, se realizó la simulación completa del mismo, excitándolo con la tensión de la barra de 33 kV (Vac) medida y la maniobra realizada durante el ensayo correspondiente. Con este procedimiento se obtuvo un buen comportamiento del modelo para todos los ensayos realizados.

En Fig. 3 se muestra la parte del modelo correspondiente a la serie de cubas, y en Fig. 4 su comportamiento.

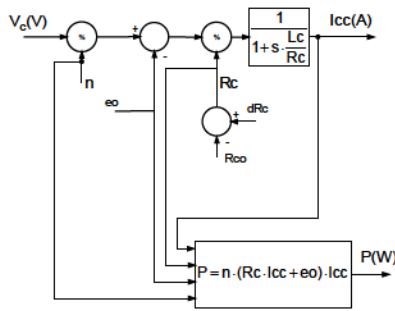


Fig. 3: Modelo de la serie de cubas.

Donde:

- V_c = Tensión continua de los grupos rectificadores.
- n = Número de cubas en serie.
- e_0 = Fuerza electromotriz en una cuba.
- R_{c0} = Resistencia equivalente de una cuba.
- dR_c = Incremento de resistencia por efecto anódico.
- L_c = Inductancia equivalente de una cuba.
- I_{cc} = Corriente continua en las cubas electrolíticas.
- P = Potencia activa consumida por la carga.

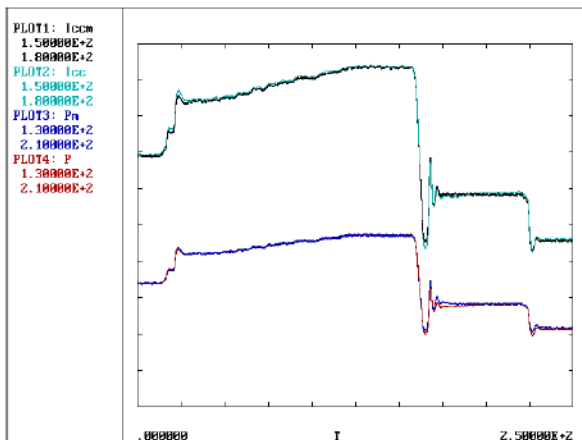


Fig. 4: Corrientes y potencias medidas (I_{ccm} y P_m) y simuladas (I_{cc} y P).

En Fig. 5 se muestra la parte del modelo correspondiente a los Lazo de Control de Serie y Lazo de Control de Semigrupo, este último teniendo en cuenta el efecto total de los ocho lazos de control individuales. En Fig. 6 se muestra el comportamiento de esta parte del modelo.

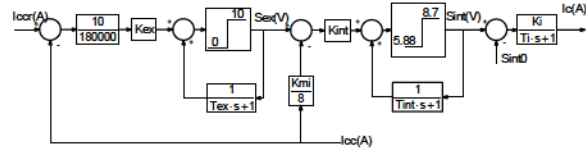


Fig. 5: Modelo de los Lazo de Control de Serie, y equivalente de los ocho del Lazo de Control de semigrupo.

Donde:

- I_{ccr} = Referencia de la corriente continua de la serie de cubas.
- Sex = Salida del Lazo de Control de Serie. Referencia de corriente continua de los semigrupos.
- I_{cc} = Corriente continua de la serie de cubas.
- $Sint$ = Salida del Lazo de Control de semigrupo equivalente.
- I_c = Corriente de Control de los reactores saturables.

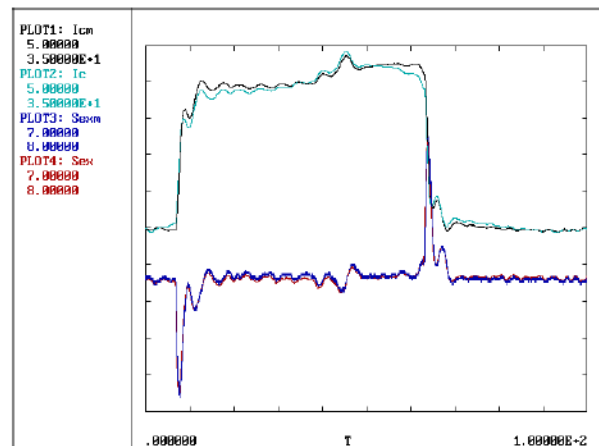


Fig. 6: Salida Lazo de Control de Serie y Corriente de Control de Reactores Saturables medidas (Sex_m e I_{cm}) y simuladas (Sex e I_c).

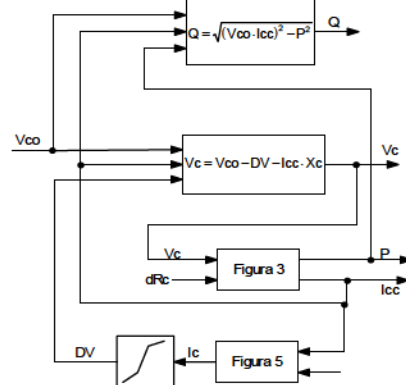


Fig. 7: Modelo de los grupos rectificadores, del reactor saturable, y del transformador de rectificación.

Donde:

- V_{c0} = Tensión en vacío entregada por el rectificador.
- Q = Potencia eléctrica reactiva de la carga.
- V_c = Tensión continua de los grupos rectificadores.
- P = Potencia eléctrica activa de la carga.
- I_{cc} = Corriente continua de la serie de cubas.
- dR_c = Incremento de resistencia por efecto anódico.
- DV = Caída de tensión equivalente en reactores saturables.
- I_c = Corriente de Control de los reactores saturables.

En Fig. 7 se muestra la parte del modelo correspondiente a los grupos rectificadores, al reactor saturable, y al transformador de rectificación, mientras en Fig. 8 se muestra el comportamiento de este modelo.

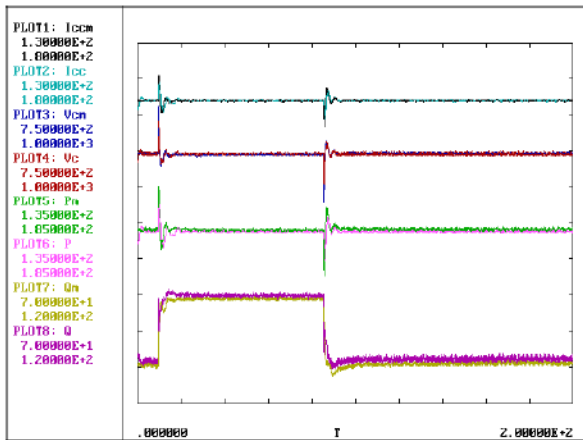


Fig. 8: Potencias activas y reactivas, corriente y tensión de serie medidas (Pm, Qm, Iccm y Vcm) y simuladas (P, Q, Icc y Vc).

En Fig. 9 se muestra la parte del modelo correspondiente a los autotransformadores con Taps bajo carga, mientras que en Fig. 10 se muestra su comportamiento.

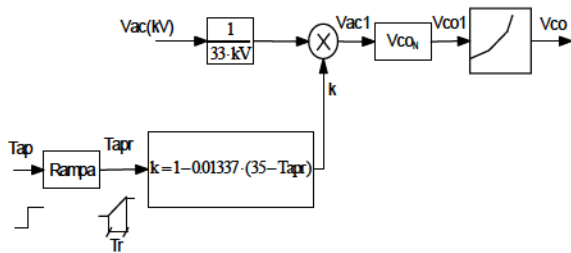


Fig. 9: Modelo del autotransformador.

Donde:

- Vc0 = Tensión entregada por el autotransformador.
- Vac = Tensión de la barra de 33 kV.
- Tap = Posición del Tap.

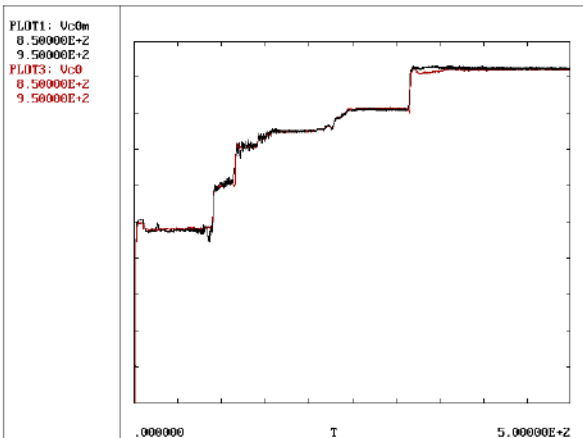


Fig. 10: Autotransformador Tensión medida (Vc0m) y simulada (Vc0).

Como se puede observar, cada una de las partes del modelo de la carga reproduce más que aceptablemente a la misma. Con la finalidad de contemplar en los estudios dinámicos del SEPI todos los efectos que esta carga particular introduce, este modelo de carga fue desarrollado como modelo de

usuario para el programa de análisis de estabilidad PSS de PTI Inc.

V. COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO

El sistema de control de las series de cubas electrolíticas trata de mantener constante la corriente que circula por las cubas, lo que hace que un efecto anódico en una o más de las cubas, modelado como un incremento de resistencia de las mismas, se traduzca en un cambio en la potencia activa demandada. La ocurrencia y amplitud de estos efectos anódicos determina los requerimientos de reserva de potencia rotante en el sistema eléctrico, para obtener una buena calidad en la frecuencia. Por tal motivo resulta fundamental determinar el comportamiento estadístico de esta carga, que representa cerca de un 60% de la demanda total.

A partir de registros de potencia activa demandadas por cada una de las series de cubas electrolíticas, tomados durante una semana, se realizó un filtrado de promedio móvil, eliminando las variaciones muy lentas de la carga, quedando solamente las variaciones alrededor de cero de la potencia de ambas series (P1 y P2) y de su suma (P3). Estos registros fueron agrupados por día (del día uno al día cinco).

Estos registros fueron comparados con 25 niveles de potencia (LL) desde -5 MW hasta 20 MW, computándose el tiempo en que cada potencia es superior a cada nivel, y el número de veces que cruzó cada nivel. A partir de estos datos se calcularon las siguientes curvas probabilísticas:

- Escalando el tiempo que permanece por encima de cada nivel con el tiempo total (1 día), se obtiene la curva de probabilidad acumulada. Esta curva se interpreta como la proporción del tiempo total que la variable estadística permanece por encima de cada nivel.
- Diferenciando la curva anterior con respecto a los niveles, se obtiene la curva de densidad de probabilidad. Esta curva se interpreta como la probabilidad de que la variable estadística tome un valor comprendido entre un nivel y el siguiente.
- Diferenciando el número de veces que la variable estadística cruza cada nivel, con respecto a los niveles, se obtiene el número de perturbaciones, cuyo valor está comprendido entre un nivel y el siguiente.
- Realizando el cociente entre la densidad de probabilidad y el número de perturbaciones, se obtiene la duración o periodo promedio de las perturbaciones cuya amplitud está comprendida entre un nivel y el siguiente.

De los análisis realizados surge que las características resultan semejantes para cada día.

En la Fig. 11 se muestran los resultados gráficos del análisis estadístico de las variaciones de potencia de la carga, en función de la variable LLP correspondiente al centro del intervalo de potencia correspondiente.

De los análisis realizados surge que:

- Las perturbaciones más probables son las de pequeña amplitud (± 1 MW).
- Las perturbaciones más probables, de interés a los efectos de estimar la reserva rotante necesaria, resultan de hasta 5 MW con duración promedio entre 1 y 2 minutos, aunque existen perturbaciones de menor probabilidad de hasta 12 MW con duración promedio de 30 segundos.

- La amplitud máxima de las perturbaciones de cada serie es prácticamente igual a la correspondiente a la suma de ambas series. Por lo tanto, el requerimiento de reserva de potencia para atender estas variaciones no resulta sensible a la cantidad de series actualmente instaladas, e incluso puede inferirse que lo propio ocurrirá cuando se instale una tercer serie.

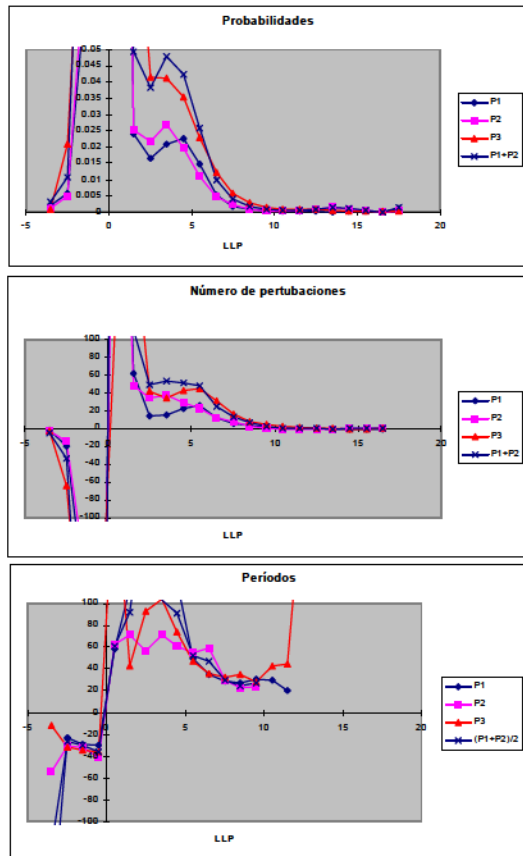


Fig. 11: Densidad de probabilidad, número de perturbaciones y periodos medios diarios para: serie 1 (P1), serie 2 (P2), y suma de ambas series (P3).

VI. MECANISMOS DE LASTRADO DE CARGA

Para los estudios a realizar con vistas a lograr una buena calidad en la frecuencia, interesa conocer los mecanismos disponibles para reducir rápidamente la demanda, en particular en la planta de aluminio por ser la mayor carga del SEPI.

A tal fin se realizaron ensayos de: salida de servicio de uno de los cuatro grupos rectificadores y reducción automática de carga, sobre una de las dos series de cubas electrolíticas. Adicionalmente estos ensayos sirvieron para validar el modelo de carga propuesto.

Salida de servicio de uno de los cuatro grupos rectificadores.

El sistema de rectificación está compuesto por cuatro grupos rectificadores, alimentados cada uno de ellos desde barras de 33 kV, con un autotransformador y un transformador de rectificación.

Este sistema de rectificación es capaz de funcionar con tres grupos solamente, teniendo una protección que lo saca de servicio cuando quedan solo dos grupos. Cada grupo además tiene una protección que lo desconecta por sobrecarga.

En Fig. 12 se muestra el registro del ensayo de salida de un grupo rectificador.

Inicialmente, al salir el grupo, disminuye la corriente continua de la serie (I_{cc}) y la potencia activa demandada (P), retomando rápidamente su valor inicial por la acción del sistema de control realizada sobre los tres grupos en servicio, los cuales absorben la potencia que entregaba el grupo saliente.

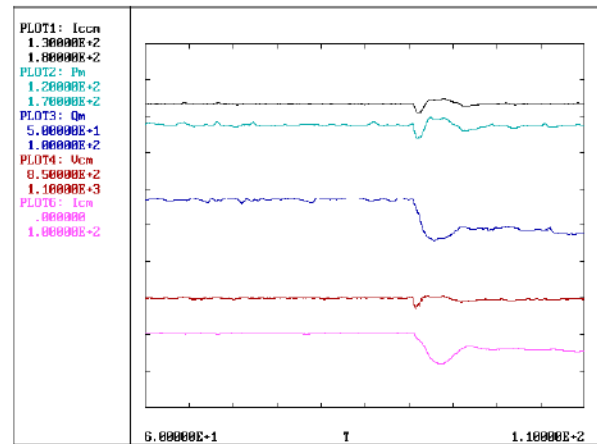


Fig. 12: Ensayo de salida de grupo. Corriente y Tensión de la serie (I_{ccm} y V_{cm}), Potencia Activa y Reactiva de la carga (P_m y Q_m), y Corriente de Control Reactor Saturable de un semigrupo delta (I_{cm}).

Se nota además que el control de los reactores saturables, de los grupos en servicio, permanecen dentro de su zona de trabajo.

Esta maniobra no es efectiva como mecanismo de reducción de carga, y puede generar una sobrecarga peligrosa para los grupos que quedan en servicio.

Reducción automática de carga.

Ante la salida de un grupo generador de la planta de aluminio, o si la frecuencia cae por debajo de un valor preestablecido, se activa un mecanismo de bajada automática de carga en una o ambas series, según lo predisponga el operador de la planta.

Este mecanismo de bajada automática de carga consiste en cambiar la referencia de la corriente continua (I_{ccr}) de la serie a un valor preestablecido.

En Fig. 13 se muestra el registro del ensayo de bajada automática de carga.

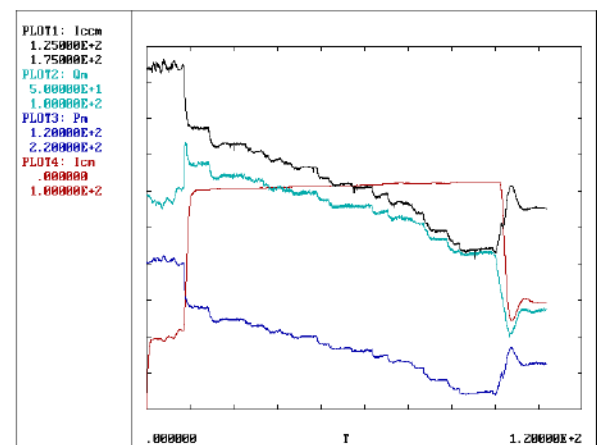


Fig. 13: Ensayo de bajada automática de carga. Corriente de la serie (I_{ccm}), Potencia activa de la carga (P_m), y corriente de control de reactor saturable de un semigrupo delta (I_{cm}).

Al producirse la brusca disminución de referencia de corriente, el control de los reactores saturables alcanza su máximo. Esto produce una rápida disminución inicial de corriente y consecuentemente de potencia. Debido a que la corriente de la serie permanece aun por encima de su valor de referencia, el control de los reactores saturables permanece en el máximo. Esto desencadena en los distintos grupos, la reducción de taps que no se producen simultáneamente en los distintos grupos, dando como resultado que la corriente continua (I_{cc}) continúe bajando en forma de rampa escalonada, hasta alcanzar la referencia preestablecida.

La amplitud del escalón inicial en la corriente de la serie, y por consiguiente en la potencia activa demanda, no depende del valor de la corriente de referencia, ni de la corriente continua inicial (siempre que se cumpla que la diferencia entre ambas sea superior a 10 kA), y por ende de la potencia activa inicial.

En cambio, la amplitud de dicho escalón inicial si depende de la variación disponible de la corriente de control de los reactores saturables. Dado el nivel normal de operación de la corriente de control, su rango de variación disponible es suficiente para causar un escalón inicial de aproximadamente 12 MW, en las bajadas automáticas de carga.

La pendiente promedio de la rampa de bajada de potencia, de aproximadamente 18 MW/min, también será la misma, independiente de la corriente continua inicial y del valor ajustado para su referencia, ya que depende del tiempo de cambio de los taps del autotransformador. Por consiguiente, la duración de la rampa será dependiente de la diferencia entre la corriente continua inicial y de su referencia.

Esta maniobra de reducción automática de carga constituye un eficiente mecanismo de lastrado de carga, dado que los 12 MW de valor inicial de reducción de potencia activa demandada representa aproximadamente un 6% de la carga total del SEPI.

Para una mayor selectividad, deberían ajustarse escalonadamente las bajadas automáticas de las series (las dos actuales y la futura), con las caídas de frecuencia del SEPI.

Adicionalmente, debería implementarse un mecanismo de detención de la bajada automática de carga, cambiando el valor de la referencia al valor actual de la corriente de serie, a partir de que la frecuencia alcance los 51 Hz.

VII. ESTUDIOS EN CURSO

La calidad de la Regulación Primaria de Frecuencia (RPF), está normada por la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A. (CAMMESA) que es la Autoridad de Aplicación, y por ende determina, a través de Procedimientos Técnicos, las normas de ampliación, mantenimiento y operación del sistema eléctrico Argentino. Este organismo, para habilitar a un generador para que aporte a la RPF, establece un conjunto de requisitos entre los que se encuentran la presentación de modelos de los lazos de regulación de velocidad avalados por ensayos.

En este caso particular, y a los efectos de obtener una buena calidad en la RPF en el Sistema Eléctrico Patagónico Interconectado (SEPI), se están realizando un conjunto de estudios.

Estos estudios comienzan con obtener los modelos aptos para realizar análisis de estabilidad sobre el SEPI. En esta etapa del estudio se encuadran las actividades que

permitieron obtener el modelo de carga de la planta de aluminio.

Posteriormente se realizarán simulaciones del comportamiento de la RPF en el SEPI, en distintos escenarios.

Estos escenarios contemplan la situación actual, la próxima salida de servicio de la central hidroeléctrica y la consecuente ampliación de generación instalada en la planta de aluminio, y situaciones futuras con la incorporación de una tercer serie de cubas electrolíticas, y ampliaciones de la red de transporte, de la generación instalada y de la demanda.

Para las simulaciones a realizar sobre los anteriores escenarios se han definido perturbaciones típicas en el SEPI que, entre otras, incluyen a:

- Efectos anódicos en las series de cubas electrolíticas.
- Maniobras de bancos de capacitores sobre barras de 33 kV en la planta de aluminio.
- Maniobra de reactores sobre líneas de 330 kV.
- Fallas con actuación de protecciones que parten en dos islas (norte y sur) al SEPI. La isla norte está conformada por la central hidráulica, la planta de aluminio, y cargas residenciales e industriales.
- Maniobras de conexión y desconexión de líneas de 330 kV.
- Toma de carga en la planta de aluminio.

En alguno de los casos se incluyen estudios de estabilidad transitoria y dinámica.

También se estudia la inclusión de recursos estabilizantes, tales como estabilizadores de potencia en generadores, para acotar las oscilaciones electromecánicas a valores razonables.

VIII. CONCLUSIONES

Se ha presentado el modelo de carga correspondiente a una serie de cubas electrolíticas para la producción de aluminio. La buena concordancia de este modelo con la realidad se ha avalado mediante ensayos. Este modelo es apto para estudios de pequeña y de gran señal.

Además se ha analizado el comportamiento estadístico de esta carga a los efectos de estimar la reserva rotante necesaria para obtener una buena calidad en la Regulación Primaria de Frecuencia en el SEPI.

También se han analizado y verificado por ensayos los mecanismos de reducción de carga disponibles.

Por último, se han enumerado los estudios actualmente en curso sobre el Sistema Eléctrico Inteconectado Patagónico (SEPI).

IX. REFERENCIAS

- [1] IEEE Std. 421.5-1992. "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies".
- [2] IEEE Working Group Report. "Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies". IEEE Trans., Vol. PWR-7, No. 1, pp. 167-179, February 1992..
- [3] IEEE Std. 1110-1991. "Guide for Synchronous Generator Modeling Practices in Stability Analyses".

**VIII ENCUENTRO REGIONAL
LATINOAMERICANO
DE LA CIGRE**

**CIUDAD DEL ESTE – PARAGUAY
30 de mayo al 03 de junio de 1999**

“PLANTA DE ALUMINIO. MODELO DE CARGA PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD”

RESUMEN

El Sistema Eléctrico Patagónico Interconectado (SEPI) es un sistema eléctrico que abarca la región sur de la Argentina, con el 60% de su carga constituida por una planta de producción de aluminio mediante electrólisis, con dos series de 200 cubas y 170 MW cada una. Los estudios de estabilidad, dinámica y transitoria, de este sistema, para las situaciones actual y futura, con ampliación de demanda y generación en la planta de aluminio y en el resto del SEPI, requieren un adecuado modelado de esta particular carga. Se describen los ensayos y las simulaciones realizadas para obtener el modelo de carga correspondiente al proceso electrolítico de producción de aluminio. Se caracterizan estadísticamente las variaciones de esta carga, con el propósito de estimar los requerimientos de reserva rotante en el sistema. Se ensayan y analizan mecanismos de reducción rápida de esta carga, como elemento de control en el sistema.

AUTORES

Ing. Jorge Luis Agüero. IITREE-LAT. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata.

Ing. Mario Beroqui. Prof. Ppal. CIC. IITREE-LAT. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata.

Ing. Sebastián Achilles. IITREE-LAT. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata.

Ing. Oscar Cosatti. TRANSPA S.A.

COMITÉ 38 – Análisis y Técnicas de Sistemas Eléctricos de Potencia.