



UNNDÉCIMO ENCUENTRO REGIONAL
IBEROAMERICANO DEL CIGRÉ – XI ERIAC

COMITÉ NACIONAL PARAGUAYO DEL CIGRÉ
22 al 26 de mayo 2005 – Hernandarias – Paraguay

COMPENSADORES SINCRÓNICOS DE ET EZEIZA:
MODELOS DE LOS LAZOS DE CONTROL

JORGE LUIS AGÜERO
IITREE-LAT
Facultad Ingeniería. UNLP
La Plata. Pcia. Bs. As. Argentina

MARIO CÉSAR BEROQUI
IITREE-LAT. P. Ppal. CIC
Facultad Ingeniería. UNLP
La Plata. Pcia. Bs. As. Argentina

FERNANDO TORRENTS
Dto. Ingeniería de Operación
TRANSENER SA
Buenos Aires. Argentina

Resumen – Se presentan los modelos de los lazos de control de 6 Compensadores Sincrónicos (CCSS) de +125/-120 MVar cada uno, ubicados en la SE Ezeiza de 500 kV del Sistema Argentino de Interconexión (SADI). La ubicación eléctrica de los 6 CCSS es de suma importancia para el control de tensión. Cada uno de los CCSS tiene un lazo de control de automático de tensión (RAT), que controla la tensión de bornes. El RAT posee: Limitadores de Máxima Excitación (OEL), Limitador de Mínima Excitación (UEL) y Limitador V/Hz. La referencia de tensión del RAT es suministrada por un lazo de control de potencia reactiva (CQ). La referencia de potencia reactiva de cada CQ es provista por un único lazo de control de tensión o Control Conjunto de Tensión en 500 kV (CCT). Se presentan los modelos de cada uno de los lazos de control. También se presentan los ensayos realizados para verificar la estructura de los modelos y sus ajustes.

Palabras clave: Control Automático de Tensión - Control de Potencia Reactiva - Control Conjunto de Tensión – Limitadores – Ensayos - Modelos

1 INTRODUCCIÓN

Se realizaron varios ensayos durante la puesta en marcha de un nuevo sistema de control para los CCSS de la SE Ezeiza. Estos ensayos permitieron validar los distintos modelos y ajustes de parámetros de los lazos de control involucrados. Los CCSS son General Electric, tipo 3901/01/660, de 13.8 kV y +125/-120 MVar nominales de capacidad de potencia reactiva. El sistema de control de excitación fue reemplazado por un control tipo Unitrol F de ABB. El nuevo sistema de control de excitación tiene un RAT con limitadores de: Sobre-Excitación (OEL) de actuación temporizada e instantánea, Sub-Excitación (UEL) y V/Hz. El RAT tiene compensación para controlar una tensión distinta de la tensión terminal. La referencia de tensión del RAT es provista por el CQ

que asegura que la potencia reactiva de cada CCSS sea la misma a largo plazo. La referencia de potencia reactiva de cada CQ es provista por un CCT en 500 kV. En Fig. 1 y Fig. 2 se muestran esquemas de bloques de los CCSS con los distintos lazos de control y las relaciones entre los mismos y las variables eléctricas de la red. En Fig. 1 se muestra un diagrama de bloques esquemático de la planta de potencia compuesta por los 6 CCSS conectados al sistema eléctrico. El bloque CCT genera la referencia (QT Ref) para los 6 CQ, a partir de la tensión controlada de 500 kV (U 500kV) y su referencia (U Ref 500kV). A cada CCSS ingresa además la tensión controlada de 500 kV (U 500kV) y la corriente estatórica o terminal (IT) que proviene del sistema eléctrico. En Fig. 2 se muestra el detalle del bloque CS 1 de Fig. 1 que contiene el diagrama esquemático del CS y sus controles asociados. Este bloque es igual para cada uno de los 6 CCSS. El bloque CQ genera la referencia de la tensión controlada (U Ref) para el RAT a partir de la referencia de potencia reactiva (QT Ref) y de la potencia reactiva (QT) suministrada por el CS. Los bloques RAT, Limitadores y Rectificador generan la tensión de campo (EFD) a partir de la referencia de la tensión controlada (U Ref) y de la tensión de barras de 500 kV (U 500kV).

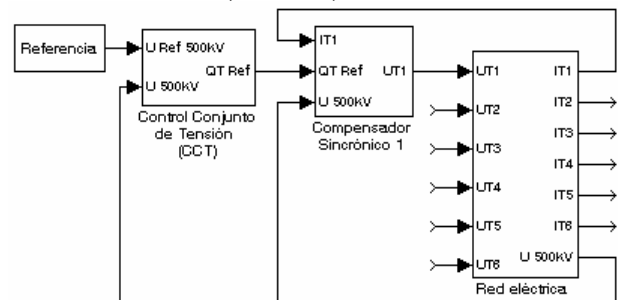


Fig. 1. Compensadores Sincrónicos (CCSS) y red de potencia.

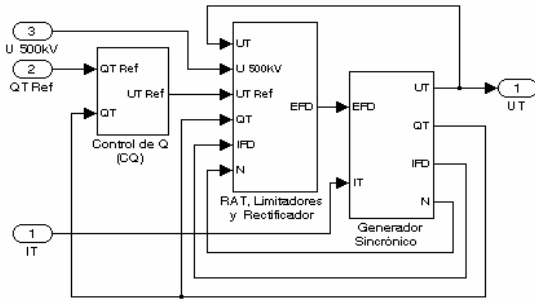


Fig. 2. Un Compensador Sincrónico (CS) y sus controles asociados.

También ingresan la potencia reactiva (QT), la velocidad (N) y la corriente de campo (IFD) para los Limitadores y para otras funciones. Finalmente, en Fig. 2 se muestra el bloque Generador Sincrónico (GS) al que ingresan la tensión de campo (EFD) y la corriente terminal (IT). Las salidas del GS son la tensión terminal (UT), la potencia reactiva (QT), la corriente de campo (IFD) y la velocidad (N).

2 LAZOS DE CONTROL

Los distintos modelos fueron relevados de información suministrada por el fabricante. Las variables de los modelos están expresadas en por unidad (pu):

- Tensión terminal (UT) → 1 pu = 13.8 kV
- Corriente terminal (IT) → 1 pu = 5.23 kA
- Potencia reactiva (QT) → 1 pu = 125 MVar
- Tensión de campo (EFD) → 1 pu = 129.5 V
- Corriente de campo (IFD) → 1 pu = 1600 A

2.1 Control Conjunto de Tensión (CCT)

En Fig. 3 se muestra un diagrama de bloques del CCT. El CCT está implementado en un PLC aparte del Unitrol F. Su salida (QT Ref) es enviada mediante un lazo de corriente de 4/20 mA a cada CQ. El CCT es un control P+I. La referencia de tensión (U Ref 500kV) es pasada por limitadores de máximo y mínimo valor. La referencia limitada es pasada por un rampeador de pendiente fija, cuya salida es la referencia para el control P+I. La tensión controlada (U 500kV) es medida por un transductor de constante de tiempo Tt. Luego es pasada por limitadores de máximo y mínimo valor. La tensión limitada es restada de la referencia para conformar el error del control P+I. Este error es ingresado al control P+I cuya transferencia es:

$$\frac{QT Ref}{Error} = KP * \left(1 + \frac{1}{Tn * s} \right) \quad (1)$$

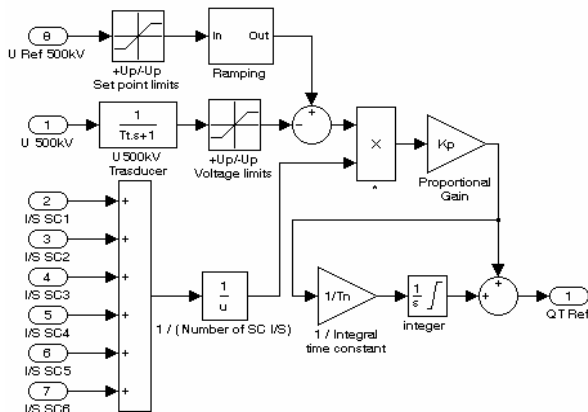


Fig. 3. Control Conjunto de Tensión (CCT).

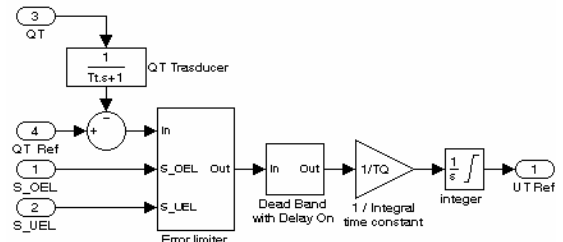


Fig. 4. Control potencia reactiva (CQ).

Kp es inversamente proporcional al número de CCSS E/S. La salida está limitada a +1/-0.96 pu (+125/-120 MVar).

2.2 Control de Potencia Reactiva (CQ)

En Fig. 4 se muestra un diagrama de bloques del CQ. El CQ es individual para cada CS y está implementado dentro del Unitrol F. El CQ es un control tipo I con ganancia 1/TQ. Su salida (UT Ref) está limitada a +1.1/+0.9 pu y es la referencia para el RAT. La referencia para el CQ (QT Ref) es provista por el CCT. La potencia reactiva controlada (QT) es medida por un transductor de constante de tiempo Tt. Esta QT medida es restada de la referencia para conformar el error. El error es pasado por limitadores de máximo y mínimo valor. Cuando un Limitador de Sobre y Sub Excitación (OEL y UEL) del RAT actúa genera una señal lógica (S_OEL y S_UEL, Fig. 5). Así, el error tiene un límite superior o inferior igual a 0 cuando S_OEL o S_UEL están actuados respectivamente. Luego, el error es pasado por una Banda Muerta con retardo ON para conformar el error que ingresa al control I.

2.3 Regulador Automático de Tensión (RAT)

La Fig. 5 muestra un diagrama de bloques del Regulador Automático de Tensión (RAT) y sus Limitadores junto con el Rectificador. La salida del AVR (AVR out) es generada con el error limitado (E_Lim) con la siguiente transferencia:

$$\frac{AVR out}{E_Lim} = KP * \frac{TLead2*s+1}{TLag2*s+1} * \frac{TLead1*s+1}{TLag1*s+1} \quad (2)$$

Las constantes de tiempo para cada uno de los Lead Lag son seleccionadas por señales lógicas (LL1 and LL2) generadas por el bloque Limitadores (ver Fig. 5). La salida del RAT (AVR Out) es limitada por un límite superior (+Up) y otro límite inferior (-Up).

2.4 Limitadores del Regulador de Tensión

La Fig. 6 muestra un detalle del bloque Limitadores de la Fig. 5.

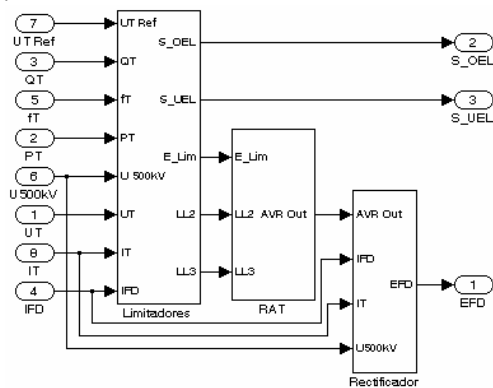


Fig. 5. Regulador Automático de Tensión (RAT).

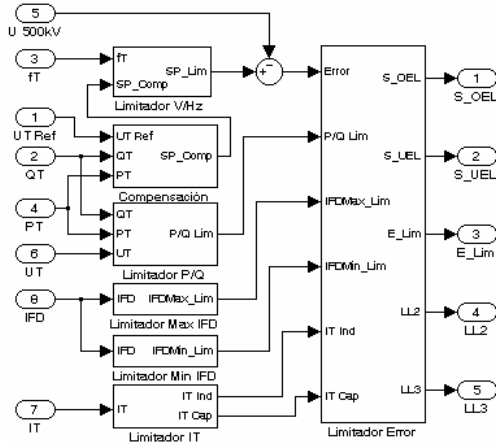


Fig. 6. Limitadores. Diagrama de bloques

Los limitadores son:

- Limitador V/Hz
- Limitador P/Q (UEL)
- Limitador IFD Máxima (OEL)
- Limitador IFD Mínima (UEL)
- Limitador IT: IT Máxima Inductiva (OEL) y IT Máxima Capacitiva (UEL)

También se muestran los bloques:

- Compensación
- Limitador Error

Todas las variables físicas que ingresan a los Limitadores corresponden a las variables de salida de los respectivos transductores de medición.

2.4.1 Compensación

Este bloque modifica la referencia de tensión (UT Ref). Así es posible controlar una tensión distinta de la tensión terminal. La salida es la referencia compensada (SP_Comp) dado por la siguiente expresión:

$$SP_Comp = UT_Ref + KIA * PT + KIR * QT \quad (3)$$

Siendo: PT la potencia activa, QT la potencia reactiva, y KIA y KIR las respectivas "ganancias". Estas "ganancias" tienen en cuenta la caída de tensión entre la tensión que mide el RAT y la tensión que se desea controlar.

2.4.2 Limitador V/Hz

Este limitador puede modificar la referencia compensada (SP_Comp), generando una referencia limitada (SP_Lim) igual a:

$$\text{If } KVHZ * (fT - 1) + U_fn < SP_Lim, \text{ then:} \quad (4.a)$$

$$SP_Lim = SP_Compn$$

$$\text{If } KVHZ * (fT - 1) + U_fn > SP_Lim, \text{ then:} \quad (4.b)$$

$$SP_Lim = KVHZ * (fT - 1) + U_fn$$

Siendo: fT la velocidad de la máquina síncrona, KVHZ la pendiente de la recta V/Hz y U_fn la tensión máxima a frecuencia nominal.

Este limitador tiene un "retardo on" para actuar. Cuando este limitador actúa cambia la salida desde SP_Comp hasta SP_Lim en forma de rampa. Además, cuando el limitador está actuado hay un límite máximo absoluto (U_Max) para la salida SP_Lim. La reposición de la salida desde SP_Lim a SP_Comp es instantánea.

2.4.3 Limitador P/Q

La salida (P/Q_Lim) de este limitador es:

$$P/Q_Lim = KPQ * \left[QT - \frac{QT - SP}{s + Tsp} \right] \quad (5)$$

$$QT_SP = F(|PT|) * UT^2$$

siendo $F(|PT|)$ una tabla cuya entrada es $|PT|$

Siendo: $|PT|$ el modulo de la potencia activa, QT la potencia reactiva, QT_SP la referencia de potencia reactiva, UT la tensión terminal, Tsp la constante de tiempo de un filtro de primer orden para la referencia de potencia reactiva y KPQ la ganancia proporcional del limitador. La tabla $F(|PT|)$ determina un lugar geométrico en el plano P/Q para potencia reactiva capacitiva. Por consiguiente, este limitador P/Q_Lim es un limitador de Sub-Excitación (UEL).

2.4.4 Limitador IFD Máxima

Este limitador tiene dos funciones asociadas: Limitador de IFD Máxima (instantánea) y Limitador de IFD Térmica (Temporizada). Cada una de las dos funciones tiene asociada una referencia de IFD: IFD Max para el Limitador de IFD máxima instantánea e IFD Th para el Limitador de IFD máxima térmica. Cuando no está actuado el Limitador de IFD Térmica, la salida del limitador es:

$$IFDMax_Lim = KP * (IFDMax - IFD) \quad (6)$$

Siendo KP la ganancia proporcional. De esta forma, la salida IFDMax_Lim es negativa (limitador activo) toda vez que la IFD supera la referencia (IFDMax).

El Limitador de IFD Térmica actúa cuando la IFD supera la referencia (IFDTh) por un tiempo mayor que Th, siendo Th:

$$Th = \frac{EMaxF}{KH * (IFDTh - IFD)^2} \quad (7)$$

Donde: EmaxF es equivalente a la energía en el bobinado de campo y KH es la constante de tiempo de calentamiento. Cuando está actuado el Limitador de IFD Térmica, la salida del limitador es:

$$IFDMax_Lim = KP * \frac{(IFDTh - IFD)}{Ta * s + 1} \quad (8)$$

Siendo KP la ganancia proporcional y Ta la constante de tiempo del filtro de primer orden para transición suave. Para liberar El Limitador de IFD Térmica es necesario que la IFD sea inferior a la referencia (IFD Th) por un tiempo mayor que Tc.

$$Tc = \frac{EMaxF}{KC * (IFD - IFDTh)^2} \quad (9)$$

Siendo: KC la constante de tiempo de enfriamiento. Por consiguiente, este es un limitador de Sobre-Excitación (OEL).

2.4.5 Limitador IFD Mínima

Este limitador tiene la siguiente transferencia:

$$IFDMin_Lim = KP * (IFDMin - IFD) \quad (10)$$

Siendo KP la ganancia proporcional e IFDMin la referencia de la mínima IFD. De esta forma, la salida IFDMin_Lim es positiva (limitador activo) toda vez que la IFD disminuye por debajo de la referencia (IFDMin). Por consiguiente, este es un limitador de Sub-Excitación (UEL).

2.4.6 Limitador IT Máxima

Este limitador tiene dos funciones asociadas: máxima IT Inductiva (ITInd) y máxima IT Capacitiva (ITCap). El

primero determina un valor máximo de la corriente terminal inductiva, siendo entonces un limitador de Sobre-Excitación (OEL). El segundo determina un valor máximo de la corriente terminal capacitiva, siendo entonces un limitador de Sub-Excitación (UEL). Ambos limitadores operan de forma similar al Limitador de IFD Térmica anteriormente descrito y no están operativos en los RAT.

2.4.7 Limitador Error

A este bloque ingresa el error (Error) conformado por la diferencia entre la referencia limitada (Lim_SP) y la tensión medida (U 500kV). También ingresan las salidas de todos los limitadores. Todos las salidas de los OEL (IFDMin_Lim and ITInd) y el error (Error) ingresan a un selector de mínimo valor. La salida de este selector y todas las salidas de los UEL (IFDMin_Lim, P/Q_Lim and ITCap) ingresan a un selector de máximo valor. La salida de este selector es el error limitado (E_Lim) de este bloque. Este error limitado (E_Lim) es el error que ingresa al RAT. La señal lógica S_OEL conmuta a On cuando actúa un OEL. La señal lógica S_UEL conmuta a On cuando actúa un UEL. Cada salida de los limitadores, OEL o UEL, selecciona uno de tres juegos de constantes de tiempo para los Lead Lag del RAT (LL1 and LL2).

2.4.8 Rectificador Controlado

La excitación del CS es estática. La alimentación del rectificador controlado es tomada de un transformador de servicios auxiliares conectado a la barra de 500 kV. La transferencia del rectificador es:

$$EFD = \frac{AVR_{out} * U_{500kV}}{Tr * s + 1} - KD * IFD \quad (11)$$

Siendo: Tr la constante de tiempo del rectificador y KD la resistencia de alimentación equivalente del rectificador.

3 ENSAYOS

Se realizaron ensayos [1 a 3] con el objeto de validar los modelos del RAT, CQ y CCT. Estos ensayos se simularon previamente con los modelos relevados de información suministrada por el fabricante.

Los ensayos resultaron particularmente críticos porque se debieron realizar con todos los CCSS E/S. Si no se indica otra condición, las simulaciones están realizadas a lazo abierto, ingresando con las variables medidas a los respectivos modelos.

3.1 Regulador Automático de Tensión

Se realizaron varios ensayos sobre el RAT, con el CQ Control F/S. Estos ensayos se hicieron para verificar los modelos de: RAT, Rectificador y Máquina Síncrona.

En Fig. 7 se muestra la simulación de un ensayo de techo positivo de la excitación. Para este ensayo se sumó un pulso de +0.15 pu de amplitud con 0.2 s de duración a la referencia de tensión (UT Ref). Se muestra la salida del RAT medida y simulada (AVR Out) y la tensión de campo medida (EFD), en conjunto con las respectivas simulaciones con: el modelo del Rectificador solamente y con el modelo del RAT + Rectificador.

En Fig. 8 se muestra la simulación de un ensayo de techo negativo de la excitación. Para este ensayo se sumó un pulso de -0.20 pu de amplitud con 0.2 s de duración a la referencia de tensión (UT Ref). Se muestra la salida del RAT medida y simulada (AVR Out) y la tensión de

campo medida (EFD), en conjunto con las respectivas simulaciones con: el modelo del Rectificador solamente y con el modelo del RAT + Rectificador.

En Fig. 9(a y b) se muestra la simulación de un ensayo de pequeña señal. Para este ensayo se sumó un pulso de +0.10 pu de amplitud con 0.8 s de duración a la referencia de tensión (UT Ref). Se muestra la salida del RAT medida y simulada (AVR Out), la tensión de campo (EFD) medida y simulada, la corriente de campo (IFD) medida y simulada y la tensión terminal (UT) medida y simulada. *Las simulaciones están realizadas ingresando solamente con el pulso perturbador (simulación de lazo cerrado) a los respectivos modelos.*

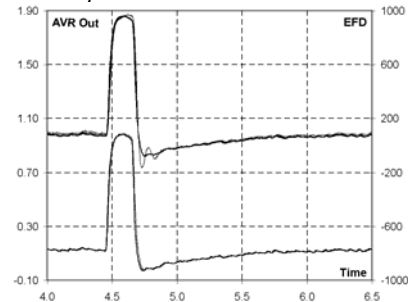


Fig. 7. RAT. Ensayo techo positivo.

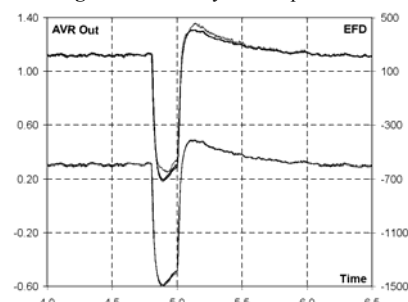


Fig. 8. RAT. Ensayo techo negativo.

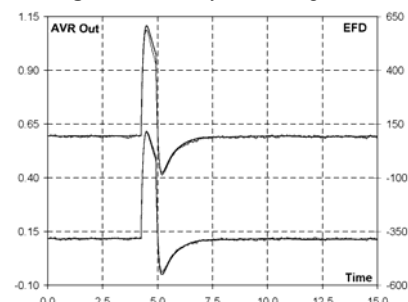


Fig. 9(a). RAT. Ensayo pequeña señal.

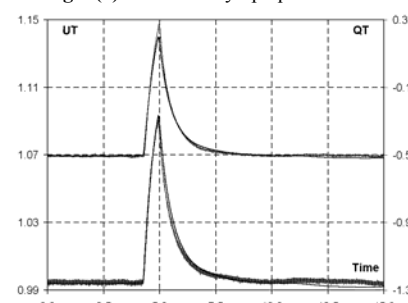


Fig. 9(b). RAT. Ensayo pequeña señal.

3.2 Limitadores

Los Limitadores ensayados fueron: V/Hz, P/Q, Max IFD y Min IFD. Los ensayos se hicieron con el CQ F/S.

En Fig. 10 (a y b) se muestra la simulación de un ensayo del Limitador V/Hz. Para este ensayo se sumó un pulso de +0.05 pu de amplitud con 20 s de duración a la referencia de tensión (UT Ref). Se muestra la salida del Limitador V/Hz (SP_Lim) medida y simulada y la salida del RAT (AVR Out) medida y simulada.

En Fig. 11(a y b) se muestra la simulación de un ensayo del Limitador P/Q. Para este ensayo se sumó un pulso de -0.05 pu de amplitud con 20 s de duración a la referencia de tensión (UT SP). Se muestra la salida del Limitador P/Q (PQ_Lim) medida y simulada y la salida del RAT (AVR Out) medida y simulada.

En Fig. 12(a y b) se muestra la simulación de un ensayo del Limitador Max IFD. Para este ensayo se sumó un pulso de +0.05 pu de amplitud con 20 s de duración a la referencia de tensión (UT SP). Se muestra la salida del Limitador Max IFD (IFDMax_Lim) medida y simulada y la salida del RAT (AVR Out) medida y simulada.

En Fig. 13(a y b) se muestra la simulación de un ensayo del Limitador Min IFD. Para este ensayo se sumó un pulso de -0.05 pu de amplitud con 20 s de duración a la referencia de tensión (UT SP). Se muestra la salida del Limitador Min IFD (IFDMin_Lim) medida y simulada y la salida del RAT (AVR Out) medida y simulada.

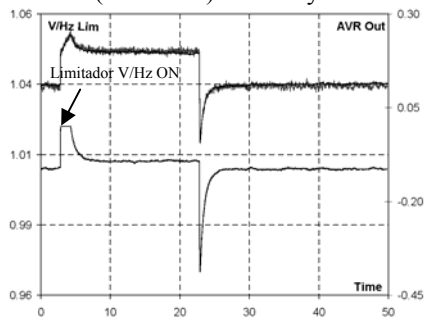


Fig. 10(a). RAT. Ensayo Limitador V/Hz.

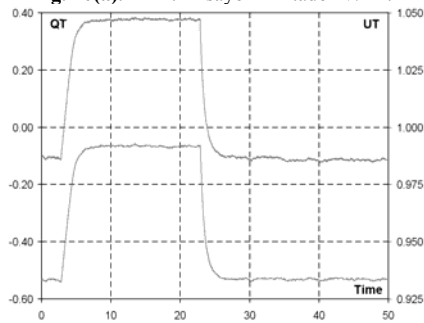


Fig. 10(b). RAT. Ensayo Limitador V/Hz.

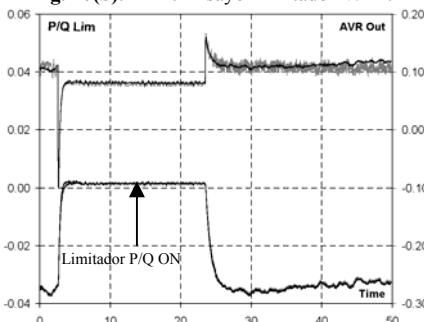


Fig. 11(a). RAT. Ensayo Limitador P/Q.

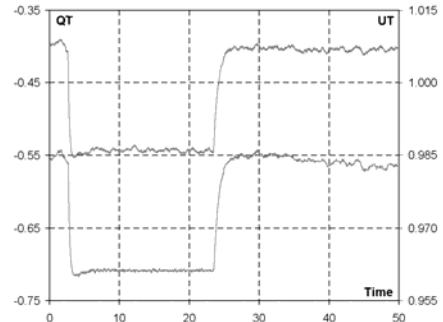


Fig. 11(b). RAT. Ensayo Limitador P/Q.

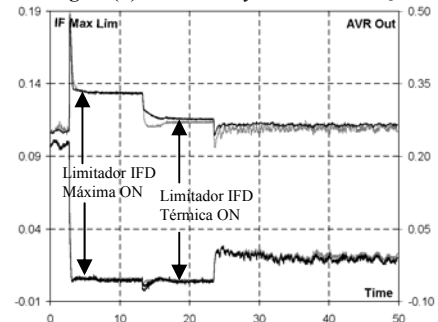


Fig. 12(a). RAT. Ensayo Limitador IFD Máxima.

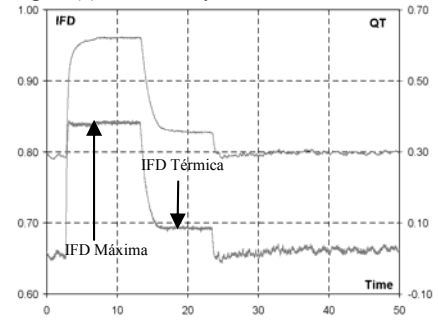


Fig. 12(b). RAT. Ensayo Limitador IFD Máxima.

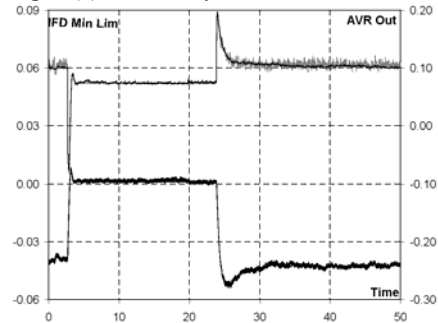


Fig. 13(a). RAT. Ensayo Limitador IFD Mínima.

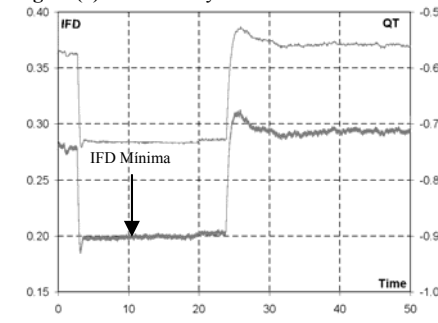


Fig. 13(b). RAT. Ensayo Limitador IFD Mínima.

3.3 Control de Potencia Reactiva

Estos ensayos se hicieron con el CQ E/S para verificar los modelos de: CQ, RAT, Rectificador, Limitadores y máquina sincrónica.

En Fig. 14 se muestra la simulación de un ensayo del CQ. Para este ensayo se sumó un pulso de -0.2 pu de amplitud con 20 s de duración a la referencia del CQ (QT Ref). Se muestra la referencia del CQ con el pulso sumado (QT Ref) medida y la salida del CQ (UT Ref) medido y simulado.

En Fig. 15 se muestra la simulación de un ensayo del CQ con actuación del Limitador P/Q. Para este ensayo se sumó un pulso de -0.2 pu de amplitud con 20 s de duración a la referencia del CQ (QT Ref). Se muestra la referencia del CQ con el pulso sumado (QT Ref) mediada y la salida del CQ (UT Ref) medido y simulado. Se observa que la salida del CQ (UT Ref) no responde al pulso sumado debido a la actuación del Limitador P/Q. Esto se debe a la anulación del error ingresado al control I del CQ (señal lógica S_UEL).

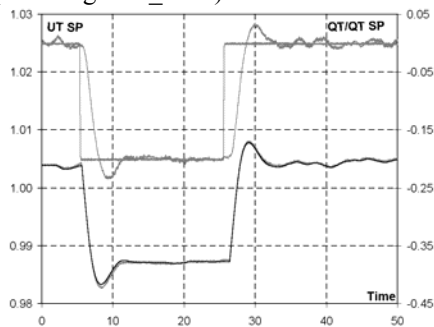


Fig. 14. CQ. Ensayo pequeña señal.

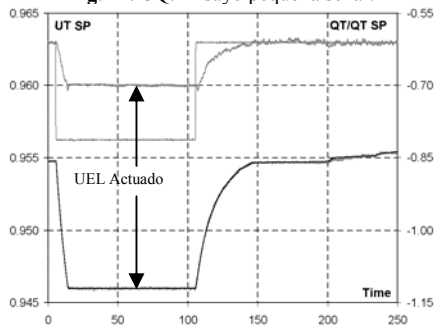


Fig. 15. CQ. Ensayo pequeña señal con actuación UEL.

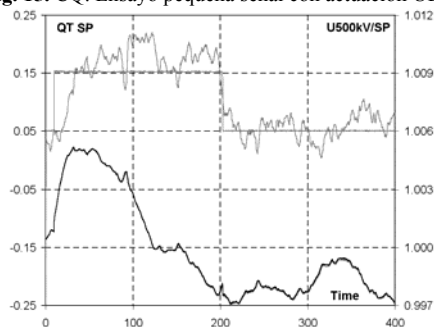


Fig. 16. CCT. Ensayo pequeña señal.

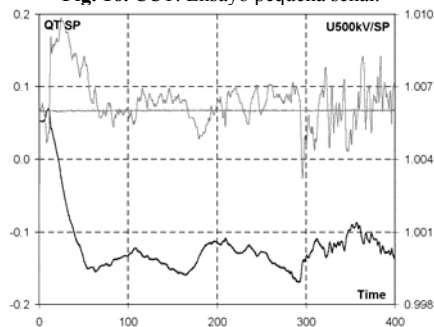


Fig. 17. CCT. F/S reactor shunt 150 MVar.

3.4 Control Conjunto de Tensión

Se realizaron varios ensayos sobre el CCT, con los 6 CCSS E/S. Estos ensayos se hicieron para verificar el modelo del CCT.

En Fig. 16 se muestra la simulación de un ensayo del CCT. Para este ensayo se sumó un pulso de $+0.003$ pu de amplitud con 200 s de duración a la referencia del CCT (U Ref 500kV). Se muestra la referencia del CCT con el pulso sumado (U Ref 500kV) medida y la salida del CCT (QT Ref) medida y simulada.

En Fig. 17 se muestra la simulación de un ensayo del CCT. Para este ensayo se desconectó un reactor shunt de 150 MVar ubicado en ET Henderson. Se muestra la tensión en barras de 500 kV (U 500kV) medida y la salida del CCT (QT Ref) medida y simulada.

4 CONCLUSIONES

A partir de los trabajos realizados se extraen las siguientes conclusiones:

- En general, los modelos suministrados por el fabricante son correctos.
- Estos modelos, con las correspondientes correcciones, han sido verificados mediante ensayos.
- Todos estos modelos fueron incorporados a la Base de Datos del sistema eléctrico Argentino.

Los modelos del CCT, del CQ, del RAT y sus Limitadores fueron desarrollados como modelos de usuario para el programa PSS/E utilizado para estudios dinámicos.

5 REFERENCIAS

- [1] *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, IEEE Standard 421.5, 1992.
- [2] *Guide for Synchronous Generator Modeling Practices in Stability Analyses*, IEEE Standard 1110, 1991.
- [3] *IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems*, IEEE Standard. 421.2, 1990.

