

Comité de Estudio C2 - Operación y Control de Sistemas

**SISTEMAS DE EXCITACIÓN. EXCITATRIZ ROTANTE VERSUS ESTÁTICA.
COMPARACIÓN PARÁMETROS DE DESEMPEÑO**

J.L. AGÜERO*
IITREE-FI-UNLP
Argentina

M.C. BEROQUI
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Resumen - La rapidez de respuesta de un Sistema de Excitación de un generador está relacionada con la estabilidad angular del sistema eléctrico ante cortocircuitos que producen reducción significativa de la tensión en bornes de generadores cercanos a la falla.

Esto es, si ante un cortocircuito un generador no recupera rápidamente su tensión, entonces deberá aumentar su ángulo para transmitir la misma potencia eléctrica, disminuyendo así su margen de estabilidad angular.

En este trabajo se realiza una comparación del comportamiento dinámico de dos tipos de Sistemas de Excitación, uno Estático y otro con Excitatriz Rotante.

Para el Sistema de Excitación Estático analizado la tensión de campo del generador es provista por un rectificador controlado el cual es alimentado por la tensión de bornes de máquina a través de un transformador de excitación.

Para el Sistema de Excitación con Excitatriz Rotante analizado la tensión de campo del generador es provista por un rectificador alimentado por una excitatriz rotante, cuya tensión de excitación es provista por una fuente independiente que no es afectada por los transitorios en el sistema.

Para ambos tipos de Sistemas de Excitación se presentan simulaciones del comportamiento dinámico frente a cambios en la referencia de tensión, estando el generador en vacío y en carga.

Se presentan los parámetros de desempeño típicos de un Sistema de Excitación recomendados por IEEE y los requeridos en Argentina en el Procedimiento Técnico N° 4 de CAMMESA tanto para el generador en vacío y como en carga como así también los requeridos en Chile en su Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio Técnico.

Para ambos tipos de Sistemas de Excitación se presentan simulaciones del comportamiento temporal ante cortocircuitos que producen una reducción significativa de la tensión en bornes del generador, estando el mismo conectado a un sistema con alta o baja potencia de cortocircuito y con distintas combinaciones de carga local.

Se presenta un análisis comparativo del desempeño de ambos tipos de Sistemas de Excitación.

Se obtienen conclusiones respecto de la mejor aptitud de uno u otro Sistema de Excitación, en determinadas configuraciones y ante determinadas fallas.

Palabras clave: Sistemas de Excitación - Estabilidad angular - Normativa Técnica

1. INTRODUCCIÓN

En un sistema eléctrico resulta de suma importancia la rapidez de respuesta de los Sistemas de Excitación para recuperar la tensión de los respectivos generadores con posterioridad a fallas que deprimen la tensión.

La rápida recuperación de la tensión después de la falla colabora a mejorar la estabilidad del sistema eléctrico.

Este trabajo compara el comportamiento dinámico de dos tipos de Sistemas de Excitación, uno Estático y otro con Excitatriz Rotante.

En el Sistema de Excitación Estático analizado la tensión de campo del generador es provista por un rectificador controlado el cual es alimentado por la tensión de bornes de máquina a través de un transformador de excitación.

En el Sistema de Excitación con excitatriz rotante analizado la tensión de campo del generador es provista por un rectificador alimentado por una excitatriz rotante, cuya tensión de excitación es provista por una fuente independiente que no es afectada por los transitorios en el sistema eléctrico.

La estructura de los Sistemas de Excitación utilizados se ha extraído de **Ref. [1]**.

Este trabajo fue motivado por la revisión que se realiza en Chile cada 4 años de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS), ver **Ref. [4]** habida cuenta del desempeño de las excitatrices rotantes en pruebas de vacío.

Para ambos tipos de Sistema de Excitación analizados se presentan simulaciones realizadas con el programa SIMULINK de MatLab.

Se realizan simulaciones del comportamiento en vacío (FSNL) ante cambios en la referencia de tensión. El comportamiento de la tensión de bornes del generador es comparado con los requisitos establecidos en Argentina por CAMMESA en **Ref. [2]**.

También se presentan simulaciones del comportamiento en carga (On Load) frente a cortocircuitos cercanos que deprimen la tensión del generador. En estos casos, la falla se produce en bornes del generador y en bornes del lado alta tensión del transformador que conecta el generador al sistema eléctrico.

Se comparan los desempeños de los Sistemas de Excitación utilizados con los requisitos establecidos en Argentina por CAMMESA en **Ref. [2]** para depresiones de la tensión del generador.

Por último, se presentan las conclusiones del trabajo realizado.

2. MODELOS UTILIZADOS

En **Figura 1** se muestra un esquema conceptual de un Sistema de Excitación Estática. El Regulador Automático de Tensión (RAT) controla el ángulo de disparo de los elementos de conmutación para generar la Tensión de Campo del generador. El rectificador controlado está alimentado por la tensión del generador.

En **Figura 2** se muestra un esquema conceptual de un Sistema de Excitación con Excitatriz Rotante. La Tensión de Campo del generador es obtenida de la rectificación de onda completa de la tensión trifásica de una máquina excitatriz. A su vez, la Tensión de Campo de la excitatriz es obtenida de una rectificación controlada de la tensión generada por un generador piloto, por ejemplo de un PGM. El Regulador Automático de Tensión (RAT) controla el ángulo de disparo de los elementos de conmutación del rectificador controlado.

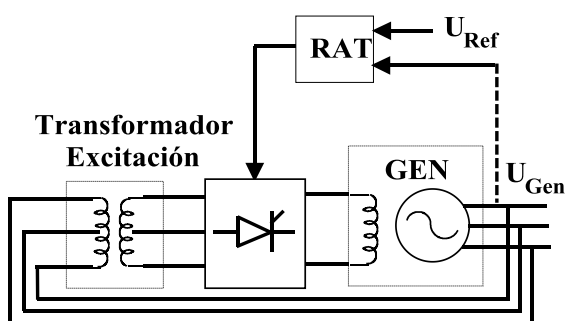


Figura 1. Sistema de Excitación Estática.

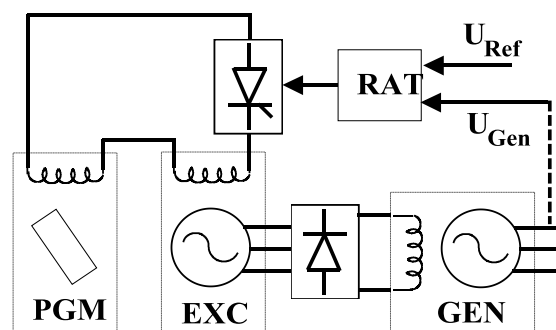


Figura 2. Sistema de Excitación con Excitatriz Rotante.

En **Figura 3** se muestra el modelo del Sistema de Excitación Estático denominado ST1A, el cual es tipificado por IEEE en **Ref. [1]**. Este modelo es utilizado para los casos donde la tensión de excitación es provista por un transformador de excitación conectado en bornes de máquina. Para los análisis realizados se utilizaron los ajustes del Sistema de Excitación ST1A indicados en **TABLA 1**.

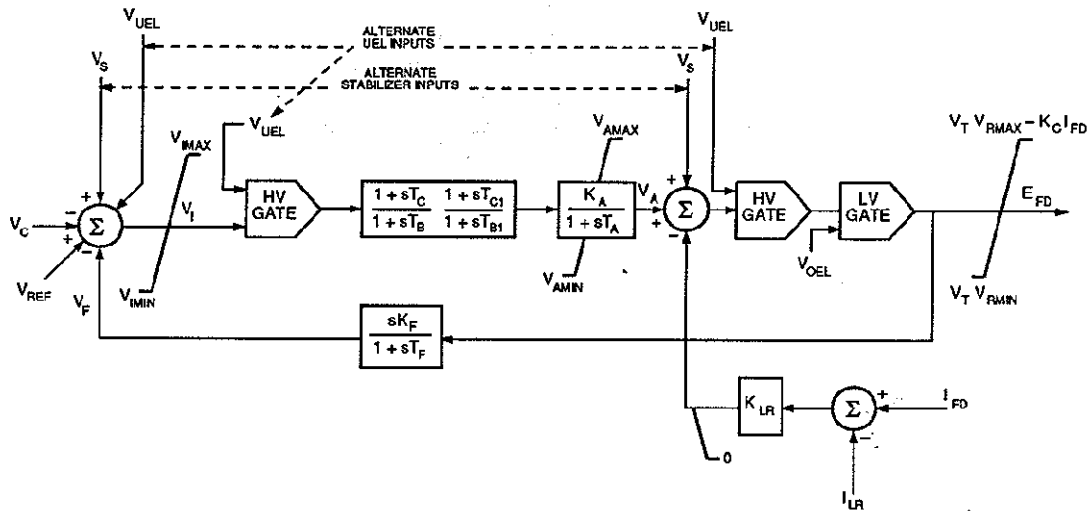


Figura 3. Sistema de Excitación ST1A.

TABLA 1: AJUSTES MODELO ST1A.

$V_{I_{max}}$	$V_{I_{min}}$	T_C	T_B	T_{C1}	T_{B1}	K_A	T_A	$V_{A_{max}}$	$V_{A_{min}}$	$V_{R_{max}}$	$V_{R_{min}}$	K_{LR}	K_F	T_F
+1	-1	2	100	1	1	4200	0.002	+9	-8,42	+9	-8,42	0	0	1

En **Figura 4** se muestra el Sistema de Excitación con Excitatriz Rotante denominado AC5A, el cual es tipificado por IEEE en **Ref. [1]**. Para los análisis realizados se utilizaron 2 conjuntos de ajustes del Sistema de Excitación AC5A indicados en **TABLA 2**, y denominados AC5A rápido y AC5A lento respectivamente.

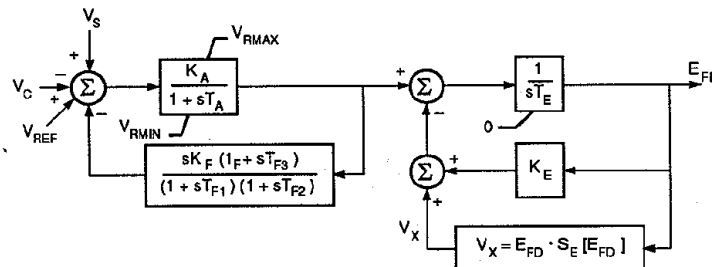


Figura 4. Sistema de Excitación con Excitatriz Rotante AC5A.

TABLA 2: AJUSTES MODELO AC5A RÁPIDO/LENTO.

$V_{R_{max}}$	$V_{R_{min}}$	K_A	T_A	K_F	T_{F1}	T_{F2}	T_{F3}	T_E	K_E	A_{Ex}	B_{Ex}
+10	-10	250/50	0.2	0.3/0.1	10/5	0	0	0.7	1	0.1	0.03

Los datos del modelo ST1A, de la máquina síncrona y del transformador de unidad corresponden a un generador instalado en el sistema eléctrico argentino (SADI). El generador es de 20 kV y 319 MVA y opera con una turbina de 280 MW. Para todos los casos analizados, la turbina es reemplazada por una potencia mecánica constante de 0 pu cuando el generador está en vacío y de 0.8 pu (255 MW) en base generador (319 MVA) cuando el generador está en carga. El generador dispone de un transformador elevador de 350 MVA y 20/510 ± 5x1 % kV. La barra de alta tensión del transformador elevador está conectada a:

- Una línea de transmisión hasta una barra infinita, siendo la línea caracterizada por su impedancia serie (0.0030+0.01i) en MBASE = 100 MVA.
- Una carga que es utilizada para simular fallas.

Además, a la barra del generador se puede conectar:

- Una carga tipo motor de inducción.

El esquema simplificado del sistema eléctrico utilizado se muestra en **Figura 5**.

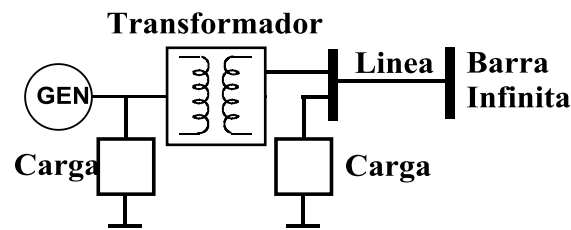


Figura 5. Sistema Eléctrico.

3. PRUEBAS REALIZADAS

Se realizaron pruebas con el generador en vacío (FSNL) y en carga (On Load), ver **Ref. [2,3]**.

3.1 Pruebas con generador en Vacío

Los parámetros de desempeño del Sistema de Excitación con el generador en vacío se indican en **Figura 6**, ver **Ref. [1]**. En Argentina, los parámetros de desempeño de la respuesta en vacío del Sistema de Excitación ante cambios tipo escalón de pequeña amplitud operando en régimen lineal están especificados en el Procedimiento Técnico N° 4 (PT4) de CAMMESA, bajo el título “Desempeño de la regulación de tensión en vacío”, ver **Ref. [2]**. Estos parámetros son:

- Tiempo de crecimiento del 10% al 90%: Menor a 300 milisegundos.
- Tiempo de establecimiento en banda del 5%: Menor a 1,5 segundos.
- Sobreoscilación. Inferior al 15%:

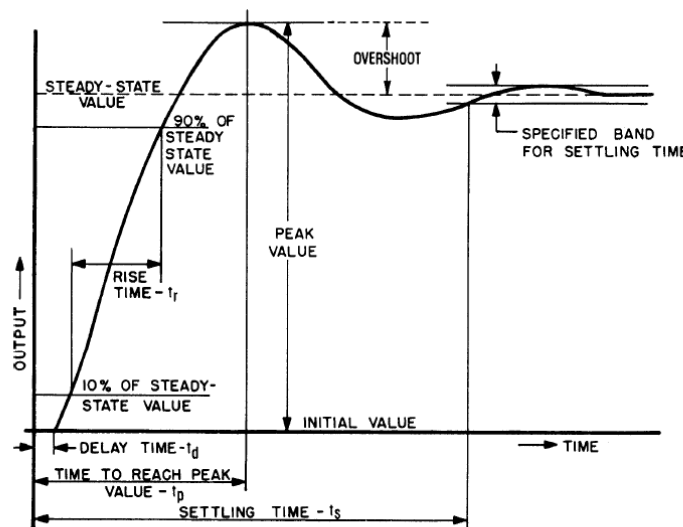


Figura 6. Respuesta al escalón. Parámetros de desempeño del Sistema de Excitación. Generador en vacío

En **TABLA 3** están indicados en los valores de los parámetros de desempeño obtenidos, y la **Figura 7** muestra el comportamiento de los 3 Sistemas de Excitación.

TABLA 3: PARÁMETROS DESEMPEÑO DE SISTEMAS EXCITACIÓN CON UNIDAD EN VACIO.

	AC5A rápido	AC5A lento	ST1A	Normado PT N° 4
T Establecimiento (s)	3,26	3,90	1,23	1,5
T Crecimiento (s)	0,97	2,83	0,25	0,3
Sobreoscilación (%)	19	5,8	6,9	15

El Sistema de Excitación Estática ST1A es el único que puede cumplir con los parámetros de desempeño, y en **TABLA 3** se observa que efectivamente los cumple.

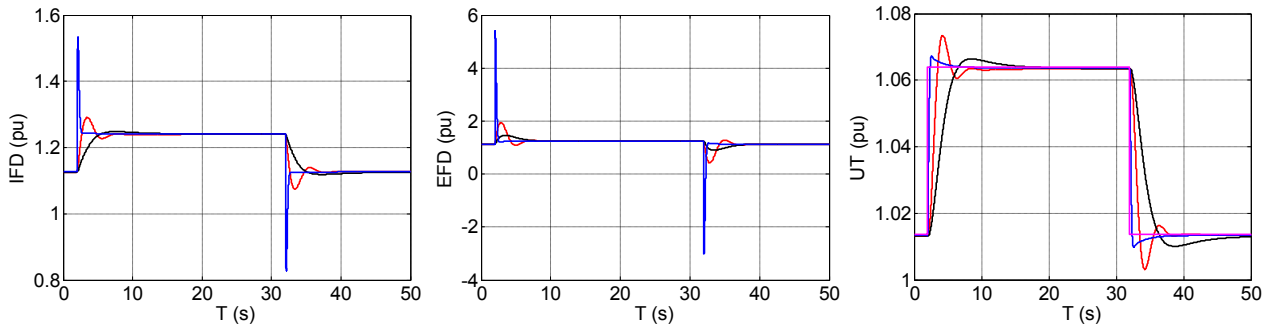


Figura 7. Respuesta al escalón en vacío (FSNL).

Modelos AC5A rápido (rojo), AC5A lento (negro) y EST1A (azul). Referencia de Tensión (magenta).

3.2 Pruebas con generador en Carga

La importancia de la rapidez de respuesta de un Sistema de Excitación de un generador está relacionada con la estabilidad angular del sistema eléctrico ante cortocircuitos que producen reducción significativa de la tensión en bornes de generadores cercanos a la falla. Por ello, no aporta información adicional realizar pruebas de cambio de referencia tipo escalón cuando el generador está en carga.

Para estas pruebas no se utilizó Estabilizador de Potencia (PSS) por no resultar necesario dado el amortiguamiento presente en la Potencia Activa.

Tampoco se consideró la acción del Limitador de Máxima Corriente de Campo Instantáneo debido a que la medición de esta corriente es filtrada con un filtro pasa-bajos del orden de 0.5 a 1 segundo. Por lo tanto, este Limitador que normalmente se encuentra ajustado a más 4 pu, no actuaría ante las variaciones rápidas que se producen en los casos analizados.

En la primera y segunda prueba con el generador en carga se conecta durante 200 milisegundos una carga reactiva inductiva correspondiente a una falla en barra de 500 kV del transformador, una con impedancia de falla y otra franca, 10E3 MVar y 1E6 MVar respectivamente. Para los 3 tipos de Sistemas de Excitación, las **Figuras 8 y 9** muestran respectivamente los resultados de la primera y segunda prueba: Tensión Terminal del generador (UT), Corriente de Campo (IFD), Tensión de Campo (EFD), Potencia Reactiva del generador (Q), Potencia Activa del generador (P) y Tensión barra 500 kV (U500).

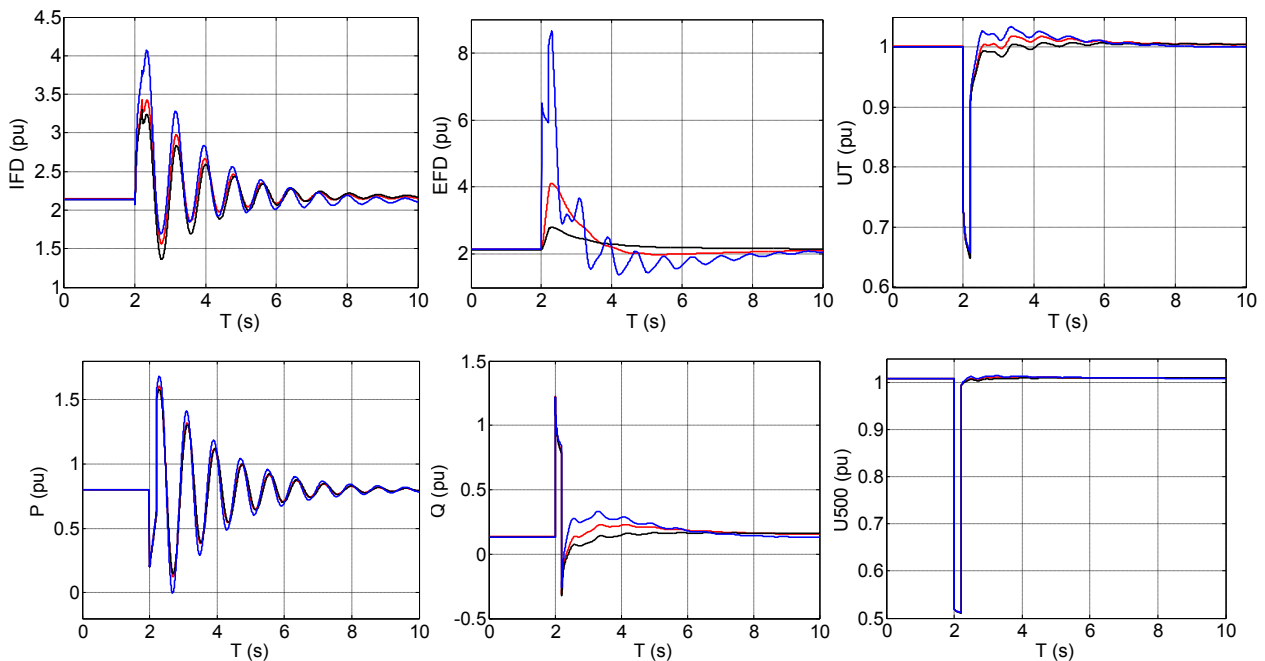


Figura 8. Conexión +10E3 MVar durante 0.2 segundos en barra 500 kV del transformado.

Modelos AC5A rápido (rojo), AC5A lento (negro) y EST1A (azul).

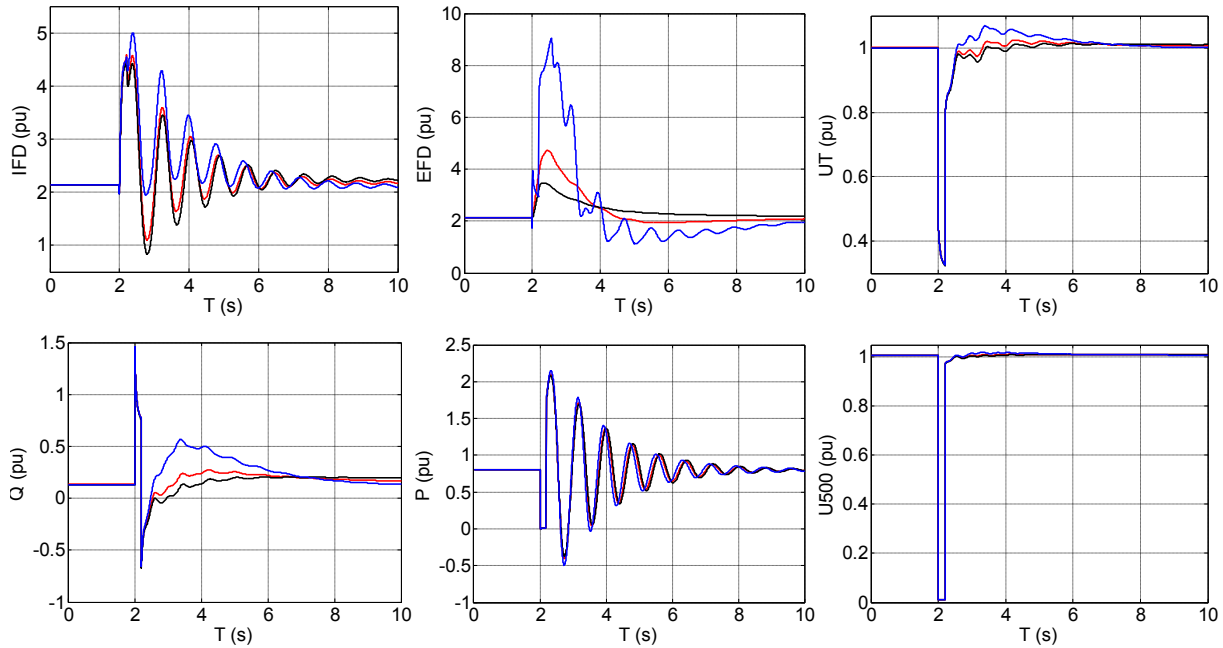


Figura 9. Conexión +10E6 MVAR durante 0.2 segundos en barra 500 kV del transformado. Modelos AC5A rápido (rojo), AC5A lento (negro) y EST1A (azul).

Sea la falla leve (**Figura 8**) o severa (**Figura 9**) en la barra de 500 kV del transformador se observa que los desempeños postfalla de la tensión en los 3 Sistemas de Excitación no tienen diferencias significativas. Este comportamiento de la tensión difiere de lo que ocurre en vacío donde el desempeño de los Sistemas de Excitación es bastante diferente.

En la tercera prueba se conecta en barras de generación una carga tipo motor de inducción que consume 285.1 MVA a tensión nominal ($P = 255.9$ MW y $Q = 141.7$ MVar).

En la misma barra de generación se conecta durante 200 milisegundos una carga inductiva de 3 pu en MBASE, o sea de 957 MVar.

Para los 3 tipos de Sistemas de Excitación, la **Figura 10** muestra: Tensión Terminal del generador (UT), Corriente de Campo (IFD), Tensión de Campo (EFD), Potencia Reactiva del generador (Q), Potencia Activa del generador (P) y Tensión barra 500 kV (U500).

Adicionalmente, la **Figura 10** también muestra las siguientes variables del motor: Potencia Reactiva (QM), Potencia Activa (PM) y velocidad (WM).

Se observa que los desempeños postfalla de los 3 Sistemas de Excitación no tienen diferencias significativas. Otra vez, este comportamiento en carga difiere de lo que ocurre en vacío donde el desempeño de los Sistemas de Excitación es bastante diferente.

Como se observa en el último caso analizado con falla en bornes del generador, ver **Figura 10**, durante la falla la Tensión de Campo (EFD) se deprime en el Sistema con Excitación Estática y crece en el sistema con excitatriz rotante. O sea que durante la falla tiene mejor desempeño el Sistema de Excitación con Excitatriz Rotante.

Sin embargo, luego de liberada la falla, el Sistema con Excitación Estática recupera su capacidad de sobreexcitación y restablece rápidamente la tensión del generador.

Por otra parte, el Sistema con Excitación con Excitatriz Rotante también recupera rápidamente la tensión luego de liberada la falla.

Cabe destacar que el Procedimiento Técnico N° 4 (PT4) de CAMMESA, bajo el título “Desempeño de la regulación de tensión en carga”, ver **Ref. [2]**, establece que:

- El gradiente de aumento de tensión ante fallas severas deberá ser tal que la excitación alcance el techo antes de 10 msec para una depresión de la tensión terminal del 50%, con el generador a plena carga y factor de potencia nominal.

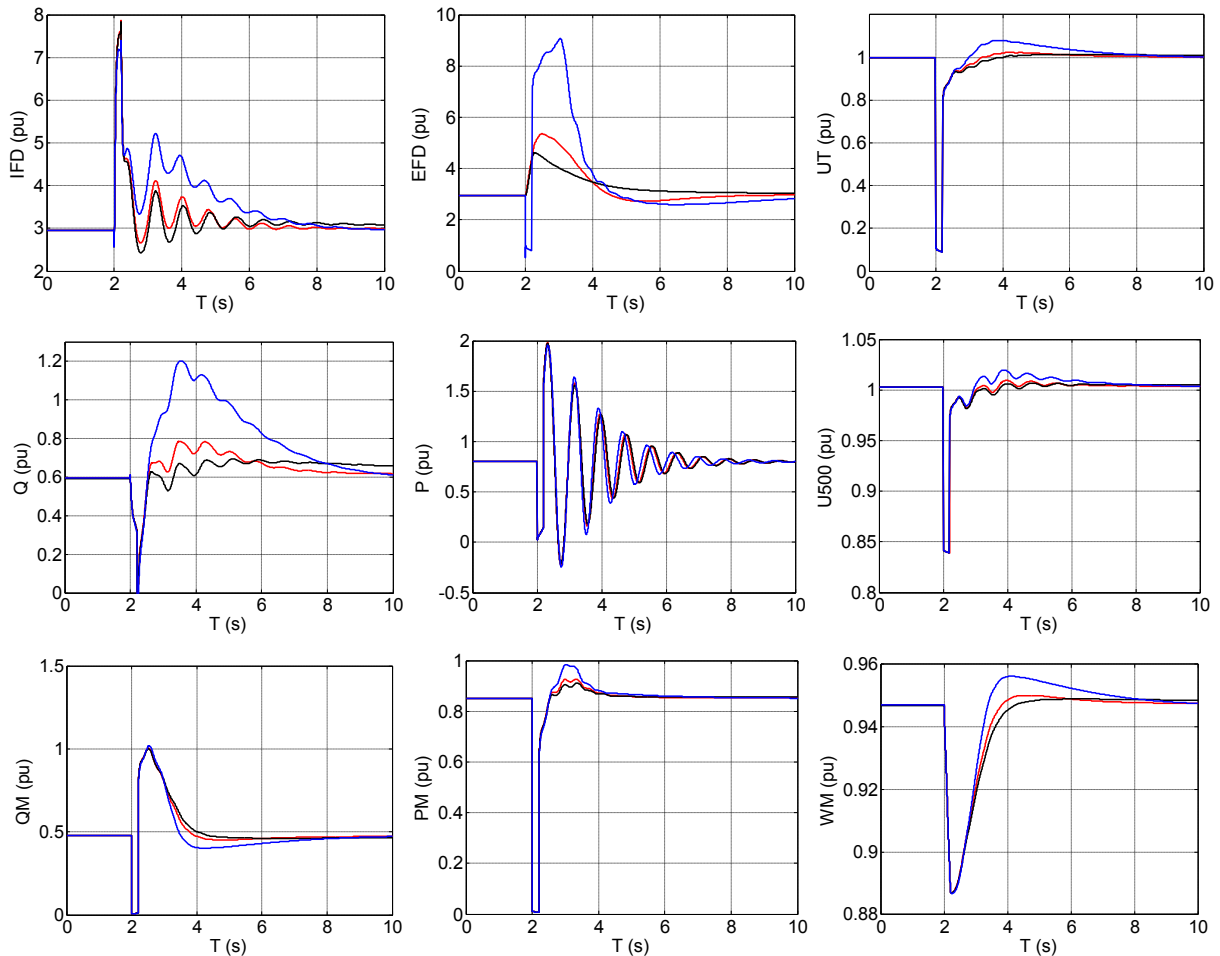


Figura 10. Conexión de 957 MVar en barra generador (UT). Carga tipo motores inducción en barra Generador. Modelos AC5A rápido (rojo), AC5A lento (negro) y EST1A (azul).

4. CONCLUSIONES

- Se analizó por simulaciones el comportamiento dinámico de 3 Sistemas de Excitación, uno Estático y otros dos con Excitatriz Rotante con distintos ajustes.
- En vacío (FSNL) el comportamiento de la tensión del generador es muy diferente entre sí para los 3 Sistemas de Excitación analizados. Solo el Sistema de Excitación Estática cumple con los parámetros establecidos para Argentina y Chile.
- En carga (On Load) el comportamiento de la tensión del generador ante distintas fallas es similar para los 3 Sistemas de Excitación analizados.
- En carga (On Load) solo el Sistema de Excitación Estática cumple con el gradiente de aumento de la tensión durante fallas.
- Los requisitos de comportamiento para Sistemas de Excitación establecidos en Argentina y Chile, tanto en vacío como en carga, solo pueden ser cumplidos por Sistema de Excitación Estática y, por ende, solo deberían ser requeridos para este tipo de Sistemas de Excitación.
- A pesar de no cumplir con los requerimientos establecidos en Argentina y Chile, los Sistemas de Excitación con Excitatriz Rotante presentan un comportamiento totalmente equivalente a los Sistema de Excitación Estática en lo atinente a la recuperación de la tensión postfalla. Por consiguiente, ambos Sistemas de Excitación colaboran en forma apropiada a la estabilidad angular del sistema eléctrico ante fallas.

Adicionalmente, puede citarse que en el Procedimiento Técnico N° 4, ver **Ref. [2]**, el apartado 2.3.1 REQUISITOS PARTICULARES Y GENERALES indica que:

- Cuando los estudios y evaluaciones que fundamenten que un diseño que no cumpla íntegramente con lo definido en los Requisitos Particulares no afecta la calidad, la capacidad del Sistema de Transporte, o la seguridad del sistema; CAMMESA deberá analizar los estudios, y podrá aceptar la solución propuesta, siempre que las condiciones y escenarios sean adecuados, y los resultados demuestren claramente la efectividad de la solución propuesta.

Al respecto puede decirse que los Sistemas de Excitación con Excitatriz Rotante presentados **“no cumplen íntegramente con lo definido en los Requisitos Particulares”** pero **“ha sido demostrada claramente su efectividad”** en la recuperación de la tensión después de una falla que es uno de los objetivos primordiales de un Sistema de Excitación.

5. CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992). ISBN 0-7381-4786-9 SH95364.
- [2] Procedimiento Técnico N° 4. Ingreso de nuevos Grandes Usuarios Mayores, Distribuidores, Generadores, Autogeneradores y Cogeneradores al MEM. CAMMESA.
- [3] IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems. IEEE Std 421.2-1990. ISBN 1-55937-053-X.
- [4] Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio. Chile. 2009.