

Validación de Modelos

SISTEMAS DE CONTROL DE GENERACIÓN PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE SALVAJINA

Parte II: Control de excitación



RESUMEN

En este artículo se presenta la validación de los modelos del sistema de excitación y del generador de la hidroeléctrica Salvajina, para estudios dinámicos del sistema de potencia; se presenta el modelado del generador sincrónico en vacío incluyendo el efecto de la saturación y con la señal de corriente de campo saturada como una salida del modelo. La validación se realiza comparando los resultados de pruebas (oscilogramas) con los de simulación, para el generador en vacío en pequeña y gran señal. Finalmente se presenta la simulación de una prueba que involucra toda la unidad de generación funcionando en línea, en la que se integran los modelos del regulador de velocidad, la turbina hidráulica con su tubería de presión y el sistema de excitación.

PALABRAS CLAVES

Validación, simulación, modelos, sistema de control de excitación.

ABSTRACT

This paper presents the validation of excitation system and generator models for power systems dynamic studies, for the hydroelectric station

• **ANDRÉS JULIÁN SAAVEDRA**, M.Sc.
Ingeniero Electricista.
Universidad del Valle

• **JOSÉ MIGUEL RAMÍREZ S.**, Ph.D.
Profesor Titular
Universidad del Valle

• **HERNANDO VÁSQUEZ P.**, M.Sc.
Profesor Titular
Universidad del Valle

Grupo de Investigación en control industrial, GICI

66

• Recibido : Diciembre 2002
• Aceptado: Septiembre 2003

of Salvajina; a no load generator model is used which explicitly gives the saturated field current. The validation is made comparing no-load small and large signal response curves, with simulations results; finally on-line simulation results are presented which include governor, hydraulic turbine and the excitation control system.

KEYWORDS

Validation, simulation, models, excitation control system

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se valida el sistema de control de excitación. La validación se realiza de nuevo comparando los oscilogramas de pruebas de puesta en marcha con la simulación de las mismas. Para la validación se escogió la unidad de generación número 1 de Salvajina, puesto que es la central con mayor documentación de registros y oscilogramas reales de pruebas de puesta en marcha.

El modelo obtenido para el sistema de excitación considera las dinámicas de amplificación y estabilización; también se consideran las no-linealidades de saturación internas de los componentes electrónicos y del puente rectificador controlado; por otro lado, el regulador de tensión es más exigido durante la operación del generador en vacío; por lo anterior, los modelos se validan utilizando pruebas de pequeña y gran señal en vacío; sin embargo, en gran señal es importante considerar la pérdida de ganancia del generador por saturación, lo que afecta el voltaje en terminales; adicionalmente, debe considerarse la saturación para la corriente de excitación puesto que afecta el límite máximo de la tensión de excitación. En la sección siguiente se presentará el desarrollo del modelo del generador bajo estas consideraciones; luego, se presentarán los resultados de validación en pequeña y gran señal. Posteriormente se simula la unidad completa funcionando en línea integrándose los modelos del regulador de velocidad, la turbina hidráulica con su tubería de presión y el sistema de excitación; la comparación de los oscilogramas con los resultados de simulación confirman la validez de los modelos para ser utilizados en estudios dinámicos de sistemas de potencia.

La definición de variables y parámetros se presenta en el anexo.

2. MODELO DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACIÓN

2.1 Modelo del sistema de excitación

Los sistemas de excitación en la central hidroeléctrica de Salvajina fueron fabricados por *Toshiba Corporation*

y son del tipo autoexcitado directo [3], en el cual la potencia de excitación se toma de los terminales del generador a través de un transformador, el cual se conecta a un puente rectificador controlado que maneja directamente la corriente de excitación. El modelo de los sistemas de excitación en Salvajina se presenta en la figura 1 y corresponde con el modelo propuesto en el último estándar realizado por IEEE [2], en donde se clasifica como ST1A. La parametrización del modelo se realizó a partir de pruebas realizadas a los elementos del sistema de excitación en planta.

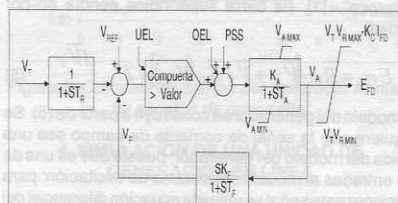


Figura 1. Modelo de los sistemas de excitación en la central de Salvajina

2.2 Obtención del modelo del generador en vacío

Los generadores en la central de Salvajina fueron construidos por *Toshiba Corporation* y son máquinas sincrónicas, trifásicas, de disposición vertical y rotor de polos salientes. Las características del generador a modelar se listan en el anexo b.

El modelo que representa un generador sincrónico funcionando en vacío se obtiene a partir de la ecuación diferencial del voltaje de campo, la cual describe su comportamiento dinámico en este régimen:

$$E_{FD} = R_{FD} I_{FD} + \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

El voltaje de salida del generador está dado por:

$$V_T = K_T \phi \quad (2)$$

El voltaje en terminales también está en función no lineal a la corriente de campo debido a la saturación magnética, por lo tanto esta corriente se puede escribir en función del voltaje como sigue:

$$I_{FD} = \frac{V_T}{R_s} + V_T S_E(V_T) \quad (3)$$

La representación de la saturación en estudios dinámicos no está estandarizada. En este caso se

selecciona la función exponencial:

$$S_E(V_T) = A e^{BV_T} \quad (4)$$

De las cuatro ecuaciones anteriores se escribe la relación entre el voltaje en terminales del generador V_T y el voltaje de campo EFD con la máquina en vacío; la normalización de esta ecuación se realiza con las bases establecidas para el sistema de excitación, este sistema en por unidad se conoce como sistema "no recíproco" [1], (la barra superíndice denota en por unidad):

$$\bar{E}_{FD} = \bar{R}_{FD} [\bar{V}_T + \bar{V}_T \bar{S}_E(\bar{V}_T)] + T_{do} \frac{d\bar{V}_T}{dt} \quad (5)$$

El modelo del generador se construye a partir de (5). Se requiere que la señal de corriente de campo sea una salida del modelo del generador, puesto que es una de las entradas al modelo del sistema de excitación; para adicionar esta señal se utiliza la ecuación diferencial del campo del generador normalizada, en función de la corriente de campo y el voltaje en terminales:

$$\bar{E}_{FD} = \bar{I}_{FD} \bar{R}_{FD} + T_{do} \frac{d\bar{V}_T}{dt} \quad (6)$$

Reemplazando (6) en (5) se deduce la expresión que define la señal de corriente de campo IFD en el modelo del generador.

$$\bar{I}_{FD} = \bar{V}_T + \bar{V}_T \bar{S}_E(\bar{V}_T) \quad (7)$$

En la ecuación (7), la corriente de campo está afectada por la saturación, tal y como ocurre en la realidad, por lo tanto esta característica hace al modelo más representativo para el régimen sin carga de la máquina.

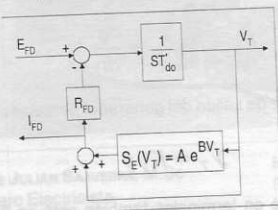


Figura 2. Modelo del generador sincrónico en vacío

En la figura 2, se presenta el modelo del generador para funcionamiento en vacío incluyendo el efecto de saturación y la señal de corriente de campo como una salida adicional; este modelo se propuso para validar el modelo del sistema de excitación de Salvajina en lazo cerrado. El cálculo de sus parámetros se presenta en [5].

3. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

El primer paso para validar el modelo es la selección de la prueba a simular, se escoge la prueba Inicial Response Test [4] que consiste en aplicar un escalón en la referencia del regulador de tensión produciendo un cambio del voltaje en terminales con el generador sin carga. El cambio de voltaje se ajusta con un potenciómetro conectado en serie con el potenciómetro de referencia y un contactor que permite la entrada y salida del potenciómetro, generando el escalón.

Para la simulación se seleccionó una prueba en pequeña señal buscando validar las dinámicas más importantes del modelo en estado estable y otra prueba en gran señal, para validar las no linealidades del modelo y su representación en estado transitorio.

La validación del modelo del sistema de control de excitación consistió en comparar oscilogramas registrados durante las pruebas de puesta en marcha de la central, con resultados de simulación de las mismas pruebas. La simulación se realizó utilizando el paquete Simulink de Matlab.

3.1 Validación en pequeña señal del modelo del sistema de control de excitación

El escalón aplicado en pequeña señal genera un cambio del voltaje en terminales del 5%; En las figuras siguientes se presentan los oscilogramas y resultados de simulación del voltaje de campo y el voltaje en terminales.

La comparación de la figura 3, muestra que el modelo representa adecuadamente las dinámicas del sistema de control de excitación, validando su uso en estudios dinámicos del sistema de potencia.

La mayor diferencia en la señal de voltaje de campo se debe a su alta sensibilidad frente al error del lazo de control, puesto que se encuentra después del bloque del regulador de tensión, el cual típicamente posee una alta ganancia (KA), ver figura 1.

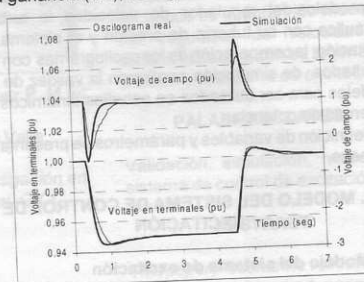


Figura 3. Voltaje de campo y en terminales del generador frente a un escalón de pequeña señal

En el transitorio de bajada del voltaje en terminales se observa una mayor diferencia entre el oscilograma real y la simulación en comparación con el transitorio de subida; esto se debe a que el oscilograma real del voltaje en terminales exhibe dinámicas diferentes en los transitorios; esta diferencia es producida por el fenómeno no modelado de histéresis, el cual hace que la magnetización del generador sea diferente a la desmagnetización.

3.2 Validación en gran señal del modelo del sistema de control de excitación

El escalón aplicado en gran señal genera un cambio del voltaje en terminales del 20%; en la figura siguiente se presentan los oscilogramas y resultados de simulación del voltaje de campo y el voltaje en terminales del generador.

Las curvas de la figura 4 muestran que el modelo es una representación muy aproximada de las no linealidades de saturación del sistema de control de excitación, en particular la saturación del actuador y del generador, por lo tanto este modelo puede ser utilizado en análisis transitorio de sistemas de potencia.

En los dos transitorios de la señal de voltaje de campo se observa que la dinámica de la simulación es levemente más rápida que la del oscilograma real, es decir que el modelo no considera una dinámica rápida que si está presente en el equipo físico.

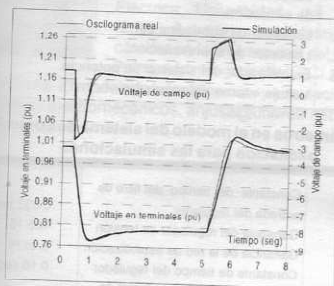


Figura 4. Voltaje de campo y en terminales del generador frente a un escalón de gran señal

En el intervalo de 5 a 6 segundos el sistema de control queda en lazo abierto puesto que la salida del regulador se satura; en este segundo, la dinámica equivalente no lineal generador-actuador, es un poco más lenta en el modelo propuesto, lo que señala una diferencia en la constante de tiempo saturada del devanado de campo del modelo del generador.

Las curvas de corriente de campo, ver figura 5, muestran como se logra una representación adecuada del

campo del generador, esta comparación valida la representación del modelo del generador con la señal de corriente de campo afectada por la saturación.

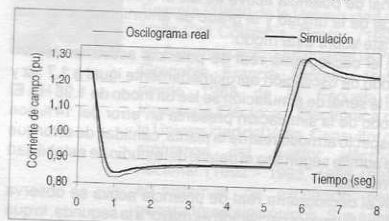


Figura 5. Corriente de campo del generador frente a un escalón de gran señal

4. SIMULACIÓN DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN EN LÍNEA

Para confirmar la validez del modelo del sistema de control de velocidad (regulador y turbina) y del modelo del sistema de excitación, se seleccionó una prueba en la que actúa toda la unidad generadora conectada a la red. En esta simulación se utilizan los modelos del regulador de velocidad, la turbina hidráulica y el sistema de excitación presentados a lo largo de este artículo y los modelos del generador, el transformador y la red eléctrica preestablecidos en el software de simulación. Esta prueba se consideró un estudio de estabilidad de la central hidroeléctrica.

La prueba seleccionada se denomina Indicial Response Test (OCL) y consiste en aplicar un escalón en el voltaje de referencia del sistema de excitación, generando un cambio en la potencia reactiva que está entregando la máquina; este escalón genera una perturbación en la potencia activa, produciendo la oscilación que se analiza.

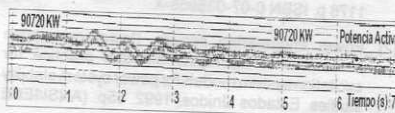


Figura 6. Oscilograma real de potencia activa

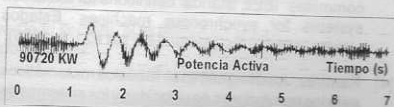


Figura 7. Señal de potencia activa (Simulación)

En las figuras 6 y 7 se muestra el oscilograma real y la simulación de potencia activa respectivamente. En la señal de potencia activa se lee el modo de oscilación local de la unidad y el grado de amortiguamiento que existe sobre este modo.

En el oscilograma real de potencia activa, se lee un modo de oscilación aproximadamente igual a 1.7 Hz y en la señal de simulación se lee un modo de 1.98 Hz. El modo de la simulación presenta un error del 14% con respecto al modo real de la planta, cantidad de error que se admite según sea el detalle del estudio de estabilidad a realizar.

En el oscilograma real de potencia activa se observa como la tercera oscilación es mayor a la segunda, lo que permite pensar en la aparición de un pequeño disturbio o la excitación de un modo, de los cuales se desconoce su naturaleza. Sin embargo se observa un número similar de oscilaciones en ambas señales.

5. CONCLUSIONES

Se obtuvo un modelo del generador sincrónico para el régimen de vacío teniendo en cuenta el efecto de la saturación magnética, además se le adicionó la señal de corriente de campo afectada por este mismo fenómeno, como una salida del modelo.

Se simularon pruebas de pequeña y gran señal que permitieron validar la representación de las dinámicas más importantes y las no-linealidades del modelo del sistema de control de excitación.

Finalmente se realizó un estudio de estabilidad de una unidad de generación en la central Salvajina al simular y analizar una prueba que involucro los sistemas de control de generación con la máquina en línea.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kundur, Prabha Shankar. Power system stability and control. United States: Mc Graw Hill, 1994. 1176 p. ISBN 0-07-035958-X.
- [2] Power engineering society. Power generation committee. IEEE Recommended practice for excitation system models for power system stability studies. Estados Unidos, 1992. 55p. (ANSI/IEEE std 421.5-1992).
- [3] Power engineering society. Power generation committee. IEEE Standar definitions for excitation systems for synchronous machines. Estados Unidos, 1985. 21p. (ANSI/IEEE std 421.1 -1986).
- [4] Ramírez, José Miguel. Et al. Modelos matemáticos para los reguladores de velocidad y los sistemas de excitación de la planta Salvajina: Energía y Computación. Vol IX, No. 2, segundo semestre del 2000; p. 69-75.

- [5] Saavedra, A.J. Modelado para estudios de estabilidad de los sistemas de control de velocidad y excitación de la central Salvajina. Tesis de maestría. Universidad del Valle. 135 p.

7. ANEXO

A Nomenclatura para el modelo del sistema de control de excitación (Sistema de excitación y generador)

VT	Voltaje en terminales de la máquina sincrónica.
EFD	Voltaje de campo del generador.
IFD	Corriente de campo del generador.
RFD	Resistencia del devanado de campo del generador.
Rg	Pendiente de la línea de entrehierro de la curva de saturación con en vacío.
SE	Saturación magnética.
A y B	Puntos seleccionados de la operación del generador en vacío.
f	Flujo magnético en los polos de la máquina.
KT	Constante que depende de la configuración del devanado del estator.
T'do	Constante de tiempo transitoria en circuito abierto, en segundos.
VREF	Voltaje de referencia del regulador de voltaje.
VF	Salida de la red de estabilización del sistema de excitación.
UEL	Limitador de subexcitación.
OEL	Limitador de sobreexcitación.
PSS	Estabilizador del sistema de potencia.
VA	Voltaje interno del regulador.

Parámetros en el modelo del sistema de control de excitación para las simulaciones

TR	Constante de tiempo del filtro de entrada del regulador	0.032 seg
KA	Ganancia del regulador de tensión	165.15
KF	Ganancia de la red de estabilización	0.0175
TA	Constante de tiempo del regulador	0.16 seg
TF	Constante de tiempo de la red de estabilización	0.86 seg
VA MAX	Límite máximo del voltaje interno del regulador	4.78 pu
VA MIN	Límite mínimo del voltaje interno del regulador	4.51 pu
VR MAX	Factor del límite máximo del voltaje de salida del regulador	3.37 pu
VR MIN	Factor del límite mínimo del voltaje de salida del regulador	- 2.98 pu
KC	Factor de reducción del voltaje de campo por las conmutaciones	

Continuación

T'd0	del puente rectificador	0.123
	Constante de tiempo transitoria en circuito abierto	7 seg
A	Punto de la curva de saturación	0.6082'10-5
B	Punto de la curva de saturación	9.83951
RFD	Resistencia del devanado de campo	0.9009 pu

B. Características del generador de la central hidroeléctrica de Salvajina

Potencia nominal	100000 KVA
Frecuencia nominal	60 Hz
Número de polos	40
Velocidad	180 rpm
Factor de potencia	0.9 en atraso
Voltaje nominal	13800 V
Corriente nominal	4184 A
Excitación	300 V
Régimen de funcionamiento	Continuo
Clase de aislamiento	B

AUTORES



ANDRÉS JULIÁN SAAVEDRA MONTES. Ingeniero Electricista, Universidad del Valle (1998). Magister en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica, Universidad del Valle (2002). Actualmente profesor hora cátedra en la Universidad del Valle, Palmira. Investigador del GICI. Áreas de interés: El modelado, identificación y simulación de sistemas electromecánicos. anjusa@uniweb.net.co.



JOSÉ MIGUEL RAMÍREZ SCARPETTA. Ingeniero Electricista (1986), Magister en sistemas de Generación de Energía (1989) de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Doctor (1998) en Automática-Productiva del INPG, Grenoble, Francia. Profesor titular desde 1988 de la Escuela en Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Consultor de empresas del sector eléctrico nacional (1992 - 1993, 1998, 1999) en sistemas de excitación para generadores sincrónicos. Sus áreas de investigación incluyen el control óptimo y no-lineal, con aplicación a sistemas electromecánicos. jomiram@eiee.univalle.edu.co



HERNANDO VÁSQUEZ PALACIOS. Ingeniero Electricista (1975) de la Universidad del Valle, Magister en Ingeniería Eléctrica del Technische Universität Braunschweig (1982), Alemania. Profesor (actualmente titular) de la Escuela en Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Investigador del GICI. Áreas de interés: electrónica de potencia y regulación de voltaje en generadores sincrónicos. vasquez@eiee.univalle.edu.co

¿Cómo pretendes que otro guarde tu secreto, si tú mismo no lo has sabido guardar?

La Rochefoucauld