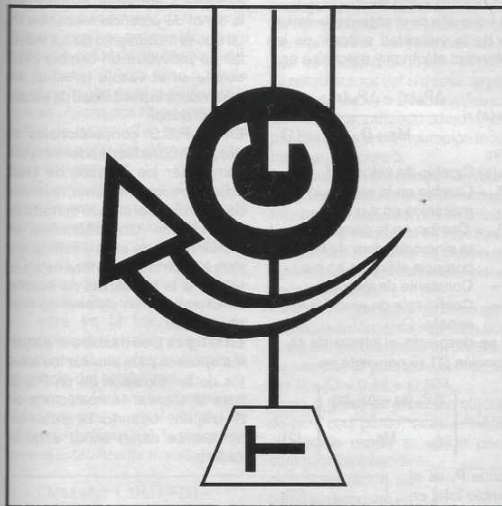


Estabilizador del sistema de potencia

Potencia acelerante como señal de entrada



□ Alfonso Alzate Gómez, M.Sc.
Ingeniero Electricista
Profesor Titular
Universidad Tecnológica
de Pereira
Pereira - Colombia

RESUMEN

El uso de la potencia acelerante como señal de entrada al estabilizador del sistema de potencia presenta algunas ventajas importantes; sin embargo, la medida de la potencia mecánica es el mayor problema para su implementación. Para superar esa limitación se usa la velocidad o la frecuencia para simular los efectos

de la potencia mecánica. Se presentan en este artículo los criterios de diseño utilizados para un estabilizador del sistema de potencia que usa la potencia acelerante como señal de entrada obteniendo la componente de potencia mecánica a través de la medida de velocidad y se valida su uso mediante la simulación de un sistema real.

ABSTRACT

The use of accelerating power as the input signal to a power system stabilizer (PSS) presents some important advantages. However, the measurement of mechanical power is the main difficulty in its implementation. To overcome that limitation, velocity or frequency values are used to simulate the effects of mechanical power. This article presents the design criteria of a PSS which uses both the accelerating power as the input signal and velocity measurements to obtain a mechanical power component. A simulation of a real system applying this scheme is also presented

1. INTRODUCCION

El estabilizador del sistema de potencia (P.S.S.) es utilizado como control suplementario al sistema de excitación para amortiguar los efectos de las oscilaciones que se presentan cuando se producen per-

39

turbaciones en el sistema. Para tal efecto el P.S.S. es el elemento encargado de actuar a través del sistema de excitación produciendo una señal de torque eléctrico en fase con la velocidad. Las señales usadas como entrada a los estabilizadores pueden ser velocidad, frecuencia, potencia eléctrica, potencia acelerante o combinadas, presentando cada una de ellas ventajas y desventajas para los diferentes modos de oscilación.

En [1] se muestran las ventajas y desventajas que el uso de la potencia eléctrica trae, asumiendo constante la potencia mecánica. Allí se demuestra que cuando la carga varía, la ausencia de la potencia mecánica hace que todo el cambio sea visto por el control como un cambio de la potencia acelerante, lo que provoca cambios indeseables en la excitación y la potencia reactiva, haciendo necesario desconectar el P.S.S. Esta es la razón por la cual el P.S.S., de la central tomada como ejemplo, permanece desconectado.

El uso de la potencia acelerante como señal de entrada al P.S.S. permite eliminar los problemas presentados cuando se usa la velocidad o la potencia eléctrica como señal de entrada para atenuar los efectos del modo de oscilación local del sistema, ya que requiere del sensado de la potencia eléctrica y de la potencia mecánica para aplicarse en forma combinada. Mediante la muestra de la señal de potencia eléctrica se reducen los efectos del ruido y de las oscilaciones torsionales y con la muestra de la potencia mecánica se disminuyen las oscilaciones indeseables que aparecen cuando se produce un cambio en las condiciones de carga. Para el caso a analizar se utiliza un P.S.S. donde la señal de potencia mecánica es simulada mediante un muestra de la velocidad [2], permitiendo superar las

limitaciones planteadas en [3].

Para la implementación física del P.S.S. se superan muchas de las dificultades planteadas para la medida de la potencia mecánica, ya que la velocidad puede obtenerse mediante una ubicación no crítica del sensor o mediante su sensado en forma indirecta a través de una señal eléctrica.

2. PRINCIPIOS BASICOS

En la figura 1 se muestran las diferentes señales que pueden aplicarse a la entrada del P.S.S. y las relaciones básicas entre ellas.

La ecuación para obtener la derivada de la velocidad a partir de las potencias eléctrica y mecánica es:

$$\Delta w(s) = \frac{\Delta P_m(s) - \Delta P_{es}(s)}{Ms + D} \quad (1)$$

Con:

$\Delta w(s)$ Cambio de velocidad.

ΔP_m = Cambio en la potencia mecánica en p.u.

ΔP_{es} = Cambio en la componente sincronizadora de la potencia eléctrica en p.u.

M = Constante de inercia.

D = Coeficiente de amortiguamiento.

Si se desprecia el efecto de D , la ecuación (1) se convierte en

$$\Delta w(s) = \left[\frac{\Delta P_m(s) - \Delta P_{es}(s)}{Ms} \right] \quad (2)$$

Donde P_{es} es el cambio total en la potencia eléctrica.

Si se hace constante la potencia mecánica ($P_m(s) = 0$, válvulas sin moverse) el cambio en la velocidad puede derivarse sólo a partir de la potencia eléctrica y es la si-

tuación que corresponde al caso analizado en [1].

La más importante ventaja del uso de la potencia eléctrica como señal de entrada al estabilizador en vez de la velocidad es el alto grado de atenuación de los modos de oscilación torsional en el eje. Sin embargo, donde exista una acción sustancial del gobernador, operación de válvulas, control de la generación manual o automático, una señal estabilizadora tomada sólo desde la potencia eléctrica puede presentar oscilaciones de voltaje fuertes, tal como se muestra en [1].

El objetivo, entonces, es introducir la señal de potencia mecánica P_m tal que el movimiento de las válvulas no provoque un cambio indeseable en el voltaje terminal, sin reintroducir la posibilidad de excitación torsional.

En los P.S.S. convencionales se requieren de redes de adelanto para compensar los retrasos de fase, asociados con el sistema, resultando en un control de lazo cerrado de fase mínima. Una alternativa es añadir redes de atraso suficientes para que el retraso de fase neto sea -360° a la frecuencia de interés, resultando en un sistema de fase no mínima.

En la figura 2 se muestra el esquema aplicado para simular los efectos de la utilización de un P.S.S. para la Central Hidroeléctrica de Salvajina, usando la potencia acelerante como señal estabilizadora.

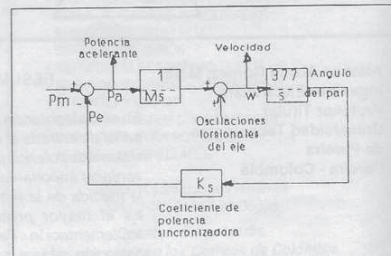


Figura 1. Señales aplicadas a la entrada del P.S.S.

Se toma la medida de la potencia mecánica a partir de una señal eléctrica (medida en forma indirecta de la velocidad) a través de un filtro y:

$$P'_M = \frac{P_M}{(1+sT)} = \frac{P_E + MsW}{(1+sT)} \quad (3)$$

$$P'_A = P'_M - P_E \approx P_M - P_E \quad (4)$$

Ya que no existen componentes importantes de alta frecuencia para P_M .

La señal de velocidad es aplicada a través de un circuito de restablecimiento con constante de tiempo T . Sin embargo no es recomendable aplicar la señal de potencia eléctrica en forma directa, sino a través de otro circuito de reposición por lo que se utilizan dos filtros con constante de tiempo T_w uno para la señal de potencia eléctrica y otro para la velocidad.

Se observa que cuando $F(s) = 1$ el estabilizador se convierte en uno convencional de velocidad. Sin la componente de potencia mecánica ($F(s) = 0$), se convierte en uno convencional que usa la señal de potencia eléctrica. Puesto que el filtro no está en la trayectoria de estabilización (a través de la potencia eléctrica), su efecto no limita la ganancia del estabilizador.

Cuando se incluye la compensación deseada mediante la red de adelanto de fase $Q(s)$, la expresión para el estabilizador toma la forma:

$$V_s = [(Ms\Delta W(s) + \Delta P_s(s)F(s) - \Delta P_s(s)] K_s Q(s) \quad (5)$$

Las características del filtro pasabaja $F(s)$ son dadas por las exigencias que se tengan respecto a las oscilaciones torsionales del eje para garantizar su adecuada atenuación, a la vez que tenga una banda pasante lo suficientemente ancha que permita seguir los cambios de la potencia mecánica.

Las exigencias para el transductor de velocidad son menores que las

requeridas para un estabilizador convencional usando la velocidad porque la componente de velocidad es filtrada por la función $F(s)$.

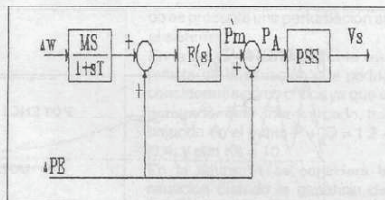


Figura 2. P.S.S. propuesto.

3. P.S.S. DISEÑO

Para modelar el sistema se tomó la configuración básica de una máquina sincrónica conectada a un barraje infinito, a través de una línea de transmisión [1].

El estabilizador del sistema de potencia de la Central Hidroeléctrica de Salvajina, utilizado como ejemplo, presenta la configuración mostrada en la figura 3.

La simulación del comportamiento del sistema, tal como existe actualmente, bajo variación en un 5% de la potencia mecánica es mostrada en la figura 4, donde se observan las oscilaciones presentadas por el voltaje terminal.

Esta respuesta tiene un buen grado de precisión, si se compara con la del sistema obtenida en pruebas de campo. El punto de operación fue $P + jQ = 0.42 + j0.504$.

Dado el grado de precisión obtenido para este punto, se asume que el modelo usado es válido para cualquier otra condición de operación, tal como se demostró en [1].

El P.S.S. diseñado se obtuvo utilizando los criterios planteados en [1], dando como resultado el mostrado en la figura 5. La componente de régimen permanente para la potencia es removida mediante un filtro pasa alto (was-hout) con una

constante de tiempo de 2 segundos, y para la velocidad con un filtro similar más otro adicional con constante de tiempo de 5 segundos.

Dadas las características de fase mínima del sistema tomado como ejemplo, se encontró que sólo es necesaria una red ($Q(s)$) de adelanto-atraso para compensar el retraso producido por el conjunto generador, sistema de excitación, sistema de potencia.

Como la componente de la potencia mecánica varía en forma relativamente lenta, la señal generada para simularla debe filtrarse fuertemente, mediante el filtro $F(s)$ en el camino de la señal de velocidad. Puesto que la característica de interacción torsional de la potencia y la velocidad divergen a una razón de 40 dB/década, con una ganancia equivalente en el modo de oscilación local, el filtro requerido para la señal de potencia mecánica simulada deberá tener una característica de atraso de segundo orden

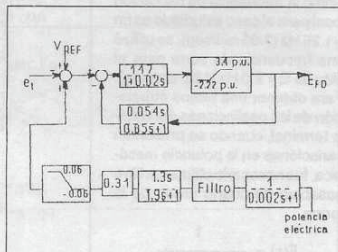


Figura 3. P.S.S. y sistema de excitación de la central de Salvajina.

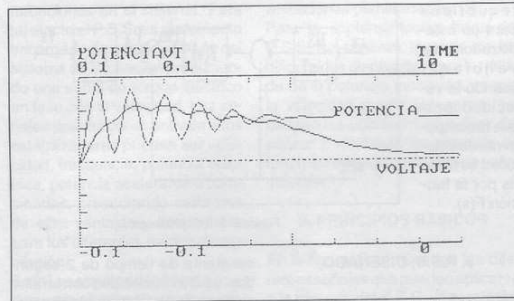


Figura 4. Respuesta del sistema con el P.S.S. existente, cuando $\Delta P_m = 5\%$.

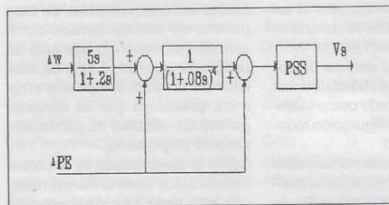


Figura 5. Configuración del P.S.S. diseñado.

[4], para que la acción combinada potencia-velocidad tenga las mismas ventajas que las asociadas con la potencia acelerante.

El filtro torsional se usa con una frecuencia de corte cercana a la del modo de oscilación local para atenuar la magnitud de la interacción torsional al mismo nivel que el obtenido con la señal de potencia eléctrica únicamente.

Como la frecuencia de oscilación local para el caso estudiado es $f_m = 1.25$ Hz (7.85 rad/seg), se utilizó una frecuencia de corte para el filtro de $f_c = 2.0$ Hz (12.5 rad/seg). Para obtener una buena atenuación de las oscilaciones del voltaje terminal, cuando se presentan variaciones en la potencia mecánica, fue necesario utilizar un filtro pasabajo de cuarto orden de la forma

$$F(s) = \frac{1}{(1 + 0.08s)^4}$$

4. RESULTADOS

4.1. Efectos de la variación de P_m . Con base en los datos obtenidos para el P.S.S. de la figura 5, se realizaron

pruebas de simulación para verificar la validez del diseño. En la figura 6 se muestra la respuesta del sistema cuando se presenta una variación del 5% en la potencia mecánica para el punto de operación $P + jQ = 0.402 + j0.504$, usando el P.S.S. diseñado con una ganancia de 3 ($K_s = 3$).

Parámetro	Actual	Modificado
Potencia máxima	0.096	0.091
Tiempo oscilación	6.5 sg	3.3 sg
Voltaje máximo	0.064	0.035
Tiempo oscilación	12 sg	4.7 sg

Si se comparan los resultados de la figura 4 con los de la 6, se encuentra que el tiempo de oscilación del voltaje y la potencia son menores usando el P.S.S. diseñado. Así mismo decrece la amplitud de las oscilaciones.

El punto de operación escogido inicialmente es $P + jQ = 0.402 + j0.504$, que fue el utilizado durante las pruebas de la central; sin embargo, es importante conocer como se comporta el sistema con el P.S.S. diseñado cuando se incrementa la carga del generador.

En la figura 7 se muestra la respuesta del sistema cuando se trabaja en el punto $P + jQ = 0.9 + j0.4$ con la misma ganancia para el P.S.S. ($K_s = 3$).

	$K_s=3$	$K_s=10$
Potencia máxima	0.088	0.094
Tiempo oscilación	3.3 sg	3.84 sg
Voltaje máximo	0.0418	0.048
Tiempo oscilación	3.3 sg	4.3

Se observa que se reduce la magnitud de la potencia y su tiempo de

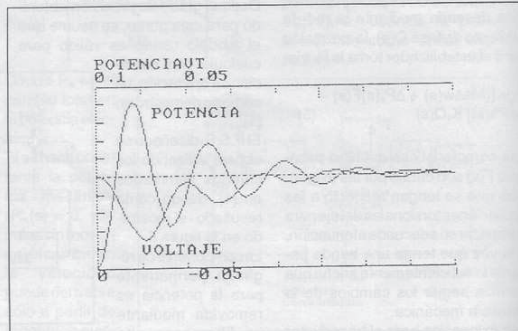


Figura 6. Respuesta para $\Delta P_m = 5\%$.

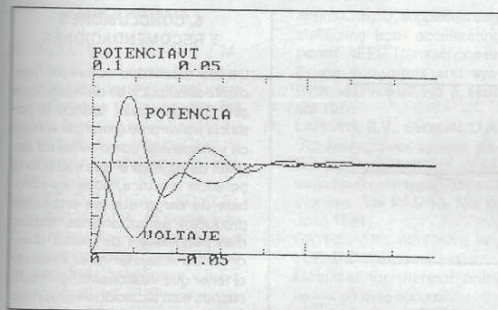


Figura 7. Respuesta para variación de $\Delta P_m = 5\%$ en el punto $0.9 + j0.4$.

oscilación. Aunque la primera oscilación de voltaje es mayor, las siguientes presentan una magnitud mucho menor y además se reduce el tiempo de oscilación del voltaje. Para este caso se tiene que al incrementarse la carga del generador el sistema sigue siendo estable.

Para el punto $P + jQ = 1.2 + j0.4$ se trabaja con el generador sobrecargado encontrándose la respuesta mostrada en la figura 8. De ella se observa que:

	$K_s=3$	$K_s=10$
Potencia máxima	0.0897	0.097
Tiempo oscilación	3.66 sg	5.68
Voltaje máximo	0.054	0.061
Tiempo oscilación	3.85 sg	6.1

Si se comparan estos resultados con los de la figura 4, se encuentra que aun bajo estas condiciones de operación la respuesta obtenida con el P.S.S. diseñado es superior que cuando se usa el que actualmente posee la central.

4.2. Variación de la ganancia

La ganancia del estabilizador permite obtener un valor en el cual el amortiguamiento del modo de oscilación de interés, en este caso el local, sea satisfactorio sin comprometer la estabilidad de otros modos de oscilación y sin que cause am-

plificación excesiva del ruido.

En la figura 9 se muestra la respuesta del sistema, obtenida para el punto de operación $P + jQ = 0.42 + j0.504$ y con ganancia $K_s = 10$. Se observa que para este valor de la ganancia el sistema tiene un comportamiento más oscilatorio, lo cual hace de la ganancia el parámetro de más cuidado para el ajuste del P.S.S.

Para este caso el limitador a la salida del P.S.S. no ha actuado, lo cual indica que no se han sobrepasado los niveles máximos establecidos para su segura operación $(-0.06, 0.06)$. Este limitador es usado para restringir los niveles de fluctuación del voltaje terminal cuan-

do se presente una perturbación en el sistema.

En la figura 10 se muestra la respuesta de la situación que podría considerarse como crítica ya que el generador está sobrecargado, trabajando en el punto $P + jQ = 1.2 + j0.4$, y con $K_s = 10$.

En la figura 11 se considera la situación cuando la ganancia del P.S.S. es nula ($K_s=0$), lo cual es equivalente a desconectarlo cuando se presenta una variación de la potencia mecánica del 5% en el punto de operación $P + jQ = 0.42 + j0.504$.

Del resultado obtenido se deduce la necesidad de usar un P.S.S. como el diseñado en el presente trabajo para esta central, si en ella se presentan variaciones de la potencia mecánica.

Se realizó además una simulación del sistema utilizando no la potencia acelerante sino su integral tal como se plantea en [2].

Para evitar el tener que derivar la señal de velocidad, usando los mismos parámetros para cada uno de los componentes del P.S.S. La respuesta obtenida, aunque con menores niveles de oscilación de voltaje con respecto al sistema actual, presentó un tiempo de oscilación relativamente largo (mayor de 20 segundos) por lo que se descartó su aplicación para este caso.

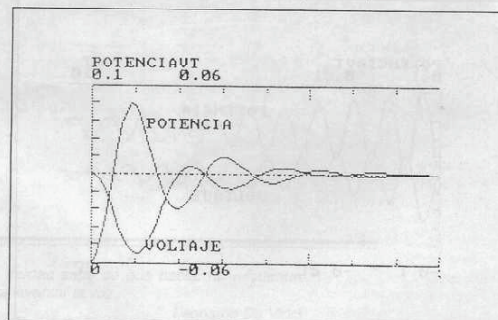


Figura 8. Respuesta para variación de $\Delta P_m = 5\%$ en el punto $1.2 + j0.4$.

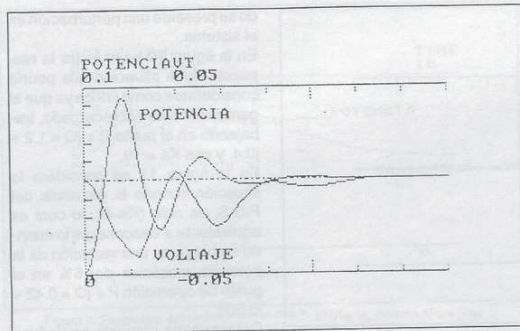


Figura 9. Respuesta cuando $\Delta P_m = 5\%$ y la ganancia es $K_s = 10$

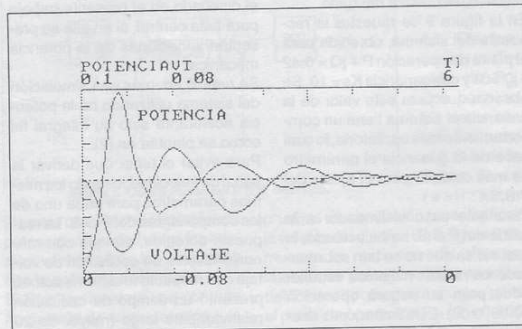


Figura 10. Respuesta para variación de ΔP_m en 5%.

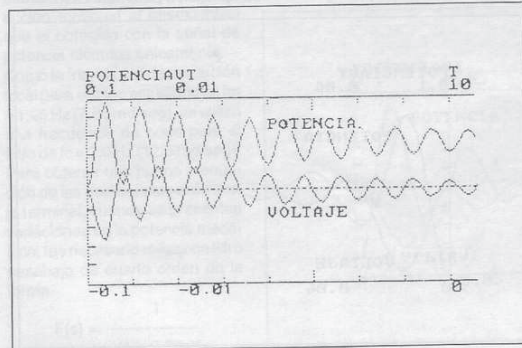


Figura 11. Respuesta cuando $\Delta P_m = 5\%$ y $K_s = 0$.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos mediante simulación se demostró que el P.S.S. diseñado, usando la potencia acelerante (potencia eléctrica y mecánica) como señal de entrada es superior al que usa sólo la potencia eléctrica, pues los cambios de carga que se presentan producen perturbaciones mucho más pequeñas y de menor duración en el voltaje terminal, evitando el tener que desconectar el P.S.S. cuando esta situación se presente. El P.S.S. puede permanecer conectado para amortiguar las oscilaciones que se presentan ya sea por variaciones en la referencia o en la carga.

La simulación de la potencia mecánica mediante la velocidad o su equivalente hace que su medida real no sea difícil, aparte de que la localización del transductor de velocidad no es crítica.

Se demostró el buen comportamiento del P.S.S. con la ganancia de ajuste $K_s = 3$, para diferentes puntos de operación del sistema, mostrando buena respuesta sobre un amplio rango de carga del generador.

Los criterios de diseño definidos en [1] fueron comprobados una vez más al ser aplicados al P.S.S. definido en el presente trabajo.

Cuando se realicen las pruebas de ajuste del P.S.S. se recomienda hacerlo en un punto donde la estabilidad dinámica del sistema sea crítica, ya que la máquina trabajará usualmente en un punto de operación inferior, donde se garantiza su efectividad.

Se recomienda en el estudio, para la Central, la instalación de un P.S.S. tomando como base los criterios dados en el presente trabajo, ya sea tratando de complementar el existente o construirlo nuevamente en su totalidad utilizando técnicas digitales.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ALZATE, A., RAMIREZ, J. M., "Análisis del modo de oscilación local de un generador síncrono y su compensación mediante un estabilizador del sistema de potencia. Caso de estudio: Central Hidroeléctrica de Salvajina".
- [2] LEE D.C., BEAULIEU R.E., SERVICE J.R., "A power system stabilizer using good and electrical power inputs - Design and field experience". IEEE transactions on Power apparatus and systems, vol PAS-100, No. 9, sep 1981.
- [3] DE MELLO, F.P., HANNETT L.N., UNDRILL J.M. "Practical approaches to supplementary stabilizing from accelerating power". IEEE Transactions on Power apparatus and systems, vol PAS-97, No. 5, sept/oct. 1978.
- [4] LANGEN, C.V., SWANN, D.A. "Applying power system stabilizers Parts I, II, III". IEEE trans on Power apparatus and systems, Vol PAS-10, No. 6, June 1981.
- [5] BAYNE, J.P., WATSON, W., LEE, D.C. "A power system stabilizer for thermal units based on derivation of accelerating power" IEEE trans on P.A.S., vol PAS- 96, nov/dec 1977.
- [6] BOLLINGER, K.E., y otros, "accelerating power versus electrical power as input signals to power system stabilizers". I.E.E.E. Trans on Energy conversion, vol 6, No. 4, dec. 1991

AUTOR

Alfonso Alzate Gómez
Ingeniero electricista de la Universidad Tecnológica de Pereira; magister en sistemas de generación de la Universidad del Valle; área de especialización en diseño y control de máquinas eléctricas; profesor en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira, de Colombia.

Quién en verdad sabe de que habla, no encuentra razón para levantar la voz.

Leonardo Da Vinci

45