



Generación de un modelo digital en el ATP a partir de un archivo de datos del PSSE para estudios de barridos de frecuencia

R. Bianchi Lastra*

J. L. Aguero*

M. B. Barbieri*

*** IITREE-LAT, Facultad de Ingeniería - UNLP**

RESUMEN

En este trabajo se describe un programa implementado con el lenguaje IPLAN del PSS/E que, a partir de los datos del sistema contenidos en un archivo de flujo de cargas del PSS/E, genera un modelo digital de la red eléctrica en el formato que requiere el programa para análisis de transitorios electromagnéticos ATP.

El modelo ATP creado es monofásico e incluye todos los elementos de la red presentes en el archivo PSS/E, y es adecuado solamente para análisis de barridos de frecuencia ó flujos de armónicas, con el objetivo de detectar frecuencias de resonancia en distintos puntos de la red, ó para estudios de autoexcitación y/o de interacción torsional debido a la ocurrencia del fenómeno de resonancia subsincrónica.

Se presenta un caso de uso de este programa en la red eléctrica del Sistema Argentino de Interconexión (SADI).

PALABRAS CLAVE

ATP, EMTP, Barrido en Frecuencia, Resonancia Subsincrónica..

1. INTRODUCCIÓN

Como parte de lo estudios que generalmente se realizan sobre la red eléctrica, es habitual recurrir a la técnica de ‘barridos de frecuencia’ a fin de detectar y analizar diversos fenómenos que pueden ocurrir durante la operación de la misma, como por ejemplo, sobretensiones y/o sobrecorrientes originadas por resonancias y flujos de armónicas, como así también para el análisis del fenómeno de resonancia subsincrónica.

Dado que en general el barrido en frecuencia se hace en el rango de frecuencias relativamente bajas, es necesario representar una gran porción de la red eléctrica a estudiar, o recurrir a equivalentes. La construcción del modelo digital se complica además cuando es necesario analizar distintas variantes y escenarios.

A fin de facilitar esta tarea, se ha desarrollado un programa denominado ‘PSSE2ATP’, e implementado con el lenguaje IPLAN del PSS/E que, a partir de los datos del sistema contenidos en un archivo de flujo de cargas del PSS/E, genera un modelo digital de la red eléctrica en el formato que requiere el programa para análisis de transitorios electromagnéticos ATP.



**Décimo Quinto Encuentro Regional
Ibero-americano del CIGRÉ
Foz de Iguazú-PR, Brasil
19 al 23 de mayo de 2013**



El modelo ATP creado es monofásico e incluye todos los elementos de la red presentes en el archivo PSS/E, siendo adecuado solamente para análisis de barridos de frecuencia ó flujos de armónicas de secuencia directa, con el objetivo de detectar frecuencias de resonancia en distintos puntos de la red, ó para estudios de autoexcitación y/o de interacción torsional debido a la ocurrencia del fenómeno de resonancia subsincrónica.

En este trabajo técnico se hace una descripción del programa, y se presenta los resultados obtenidos de la aplicación del mismo, para un caso de estudio del fenómeno de resonancia subsincrónica.

2. MODELO DIGITAL

Para poder realizar con el programa ATP los análisis de barrido de frecuencia (FREQUENCY SCAN), el programa PSSE2ATP lee los parámetros de cada uno de los elementos del flujo de carga del PSSE, y genera un archivo de texto con los datos leídos convertidos al formato requerido por el programa ATP, y referenciados a un único nivel de tensión:

La forma en que se representa cada elemento se detalla resumidamente a continuación:

- Líneas/Cables:** Las líneas y cables de la red eléctrica se representa en todos los niveles de tensión mediante modelos con parámetros distribuidos, aunque no dependientes de la frecuencia.
- Cargas:** Las cargas se consideran como impedancias $R+j\omega L$, con R y L constantes con la frecuencia. El modelo puede hacerse como una conexión RL serie, paralelo ó una combinación de ambas.
- Generadores:** Las unidades generadoras se representan por medio de sus equivalentes Thévenin, con sus reactancias subtransitorias de eje directo.
- Transformadores:** Los transformadores se representan por sus resistencias y reactancias equivalentes de secuencia directa.
- Compensación Shunt/Serie:** Se representa la totalidad de la compensaciones serie y/o shunt en servicio, como capacitores y/o inductancias concentradas.

El archivo generado se incorpora al ATP como una librería, omitiéndose en el mismo el modelo del generador en análisis, ya que éste se representa con más detalles por separado en el ATP.

Es de destacar que, dado que todos los datos del archivo para el ATP están referenciados a un único nivel de tensión, los transformadores se pueden representar con su impedancia serie, evitándose así el uso del modelo de transformador, con lo que se elude el límite que impone el ATP a la cantidad de transformadores a incluir en el modelo. El modelo digital obtenido, incluye todos los componentes del sistema.

El rango de frecuencia de validez del modelo queda limitado en función de la dependencia de los parámetros con la frecuencia. Así, para frecuencias muy elevadas, el modelo pierde validez.

Sin embargo, es de hacer notar que, si bien es posible contemplar la variación de los parámetros con la frecuencia en el modelo, es difícil de obtener la información necesaria para cada uno de los elementos, como por ejemplo, de los transformadores.

3. EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA PSSE2ATP

El programa PSSE2ATP desarrollado se aplicará para analizar el efecto que tiene la instalación de una nueva compensación serie en el nivel de 500 kV del SADI, en la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de resonancia subsincrónica en unidades turbo vapor existentes en las inmediaciones de la línea a compensar.

3. 1. Conceptos introductorios sobre la Resonancia Subsincrónica.

La Resonancia Subsincrónica es una condición de operación del sistema eléctrico de potencia en la cual la red eléctrica intercambia energía con alguna unidad generadora, en alguna de las frecuencias naturales del sistema completo que se encuentran por debajo de la frecuencia sincrónica del sistema eléctrico de potencia (Refs. [1]–[4]).

La introducción de capacitores serie en las líneas de transmisión se ha convertido en la principal causa de existencia de frecuencias eléctricas resonantes subsincrónicas en un sistema eléctrico de potencia. Por su parte cada unidad generadora posee características particulares de resonancias mecánicas.

En un sistema de transmisión de potencia compensado con capacitores serie, la componente transitoria de la corriente debida a una falla es también una componente oscilante, cuya frecuencia es igual a la frecuencia *natural* (f_n) de un circuito equivalente RLC como se describe en la Figura 1.

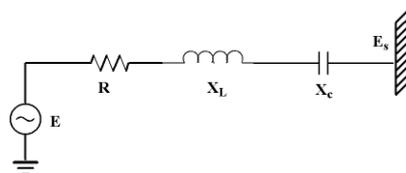


Figura 1. Sistema radial con compensación serie.

La frecuencia *natural* del sistema mostrado en la Figura 1 se calcula como:

$$\omega_n (\text{rad / s}) = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad ; \quad f_n (\text{Hz}) = f_0 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

Por lo tanto, la corriente que circula por el sistema tiene dos componentes: una componente a la frecuencia fundamental (50 Hz) y otra componente que depende completamente de los componentes de la red.

Las componentes de corriente de frecuencia f_n que circulan en el estator del generador sincrónico inducen componentes de corriente en el rotor de frecuencias $(f_0 + f_n)$ y $(f_0 - f_n)$. Las frecuencias $(f_0 - f_n)$ se conocen como frecuencias subsincrónicas. Las frecuencias subsincrónicas producen torques en el eje del rotor del sistema turbina-generador que hacen que el rotor oscile a las frecuencias subsincrónicas.

Si la frecuencia de los torques subsincrónicos inducidos en el rotor coincide con una de las frecuencias de los modos torsionales del eje, el eje oscilará a esta frecuencia, en algunos casos con amplitud significativa. Esto se conoce como “*Resonancia Subsincrónica*”, y puede causar fatiga en el eje del rotor y posibles daños o fallas.

En los sistemas eléctricos reales, la dependencia con la frecuencia de la impedancia efectiva del sistema es compleja, y es necesaria la utilización de programas de cálculo para la determinación de dicha impedancia.

Los sistemas de transmisión con compensación shunt tienen normalmente frecuencias naturales por encima de la frecuencia fundamental del sistema, es decir en el rango de frecuencias supersincrónicas. Por lo tanto, en el caso de la compensación shunt la resonancia subsincrónica no presenta un problema.

De entre todas las posibles condiciones que comprenden las definiciones mencionadas, existen tres de especial interés que pueden llegar a afectar seriamente el funcionamiento del sistema y, en particular, el comportamiento e integridad de las unidades generadoras involucradas. Estas condiciones constituyen los problemas que son conocidos por las siguientes denominaciones:

- Autoexcitación.
- Interacción torsional.

- Torques transitorios.

El alcance del presente artículo técnico corresponde al estudio del efecto de autoexcitación y al efecto de interacción torsional solamente.

3. 1. 1. Autoexcitación

En la Figura 2 se muestra un circuito simplificado equivalente de una máquina sincrónica útil para la explicación de los efectos subsincrónicos. En este gráfico, la máquina sincrónica se ha representado por un circuito similar al utilizado para los motores y generadores de inducción.

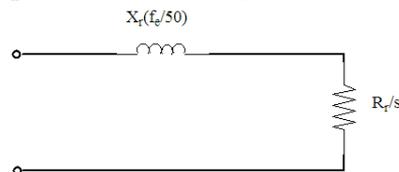


Figura 2. Circuito simplificado equivalente de la máquina sincrónica aplicable al estudio de las resonancias subsincrónicas.

El generador de inducción se representa mediante un generador de tensión en serie con la siguiente impedancia dependiente de la frecuencia:

$$Z_g(fe) = \frac{R_r}{s} + jX_r \left(\frac{fe}{50} \right)$$

Donde:

f_e (Hz) Frecuencia eléctrica subsincrónica de barrido.

R_r (Ω) Resistencia efectiva del generador.

X_r (Ω) Reactancia efectiva del generador.

s (pu) Deslizamiento respecto del campo rotatorio subsincrónico $s = \frac{f_e - 50}{f_e}$

La presencia de corrientes subsincrónicas (de frecuencia f_e) en los arrollamientos del estator del generador sincrónico produce una componente de fuerza magnetomotriz, cuya velocidad de rotación es superada por la velocidad sincrónica del rotor.

En estas condiciones, superpuestas a las fuerzas magnetomotrizes sincrónicas de frecuencia nominal, se generan asincrónicamente fems de frecuencia complementaria ($50-f_e$). Al mismo tiempo, el deslizamiento negativo del rotor produce un valor negativo de la resistencia del circuito equivalente del generador de inducción. En definitiva, el rotor se comporta como el de una máquina de inducción girando a una velocidad inferior a la nominal.

El circuito equivalente de la red y el generador de inducción se muestra en la Figura 3.

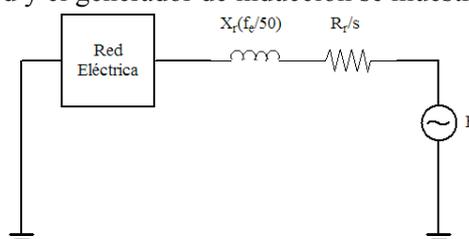


Figura 3 Circuito equivalente del generador de inducción y la red eléctrica

El fenómeno de autoexcitación existirá, y las corrientes subsincrónicas resultarán sostenidas, si se dan las dos siguientes condiciones (Refs. [3]–[6]):

1. El circuito serie constituido por el circuito equivalente del generador de inducción y la red equivalente externa resulte resonante a la frecuencia f_e , menor de 50 Hz (frecuencia resonante subsincrónica), siendo cero la reactancia serie equivalente.
2. La resistencia del mismo circuito serie equivalente, computada a la misma frecuencia subsincrónica f_e , resulte negativa. Esto es que el valor de la resistencia positiva de la red externa sea menor que el valor absoluto de la resistencia negativa del circuito equivalente del generador de inducción.

A modo de síntesis, existe un fenómeno de autoexcitación cuando:

$$X(f_e) = 0 \text{ y } R(f_e) \leq 0$$

La magnitud de la resistencia negativa es una medida de la tasa de crecimiento de las oscilaciones eléctricas.

Como se puede observar, la autoexcitación es un fenómeno puramente eléctrico que no depende de las características torsionales mecánicas definidas por las masas rotantes del sistema turbina-generador.

3. 1. 2. Interacción torsional (TI)

El efecto de interacción torsional es un fenómeno doblemente resonante en el que el sistema eléctrico impone la frecuencia natural (f_e) de la corriente subsincrónica y los sistemas de ejes de las respectivas unidades generadoras determinan las frecuencias naturales de sus oscilaciones torsionales (f_m). Si ambas frecuencias son complementarias ($f_m = 50 - f_e$) se produce el fenómeno de interacción torsional que puede ser peligroso si el amortiguamiento es bajo o negativo.

Las corrientes subsincrónicas en el estator del generador origina un torque oscilatorio sobre el rotor de frecuencia complementaria $f_m = 50 - f_e$ superpuesto al torque unidireccional correspondiente a la generación sincrónica.

A su vez, el rotor del generador genera una fem en el estator de frecuencia eléctrica $f'e = 50 - f'm$ (subsincrónica) y $f'e = 50 + f'm$ (supersincrónica) al oscilar mecánicamente alrededor de su velocidad de sincronismo con frecuencia ($f'm$).

Precisamente, la fem de frecuencia subsincrónica en el estator $f'e$ resulta igual a f_e lo que significa que tenderá a sostener a las corrientes resonantes de la red, produciéndose entonces el fenómeno denominado Interacción Torsional.

Para detectar la aparición y sostenimiento del efecto de interacción torsional deben darse simultáneamente las siguientes condiciones (Refs. [3]–[6]):

1. La frecuencia natural de la corriente subsincrónica determinada por la conexión serie de los circuitos equivalentes de la red y del generador resulte complementaria a una de las frecuencias torsionales naturales del sistema mecánico rotante.
2. Resulte negativo o cero el amortiguamiento total D_t del modo de oscilación en el sistema mecánico rotante dado por la superposición del amortiguamiento mecánico inherente D_m (siempre positivo) y del amortiguamiento aparente provisto por el sistema eléctrico D_e (de signo aleatorio).

Para cada modo de oscilación, el amortiguamiento aparente se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$D_e(f_e) = -\frac{f_e}{2f_m} \frac{R}{R^2 + X^2}$$

Donde:

D_e (pu) : Amortiguamiento mecánico aparente.

R (pu), X (pu) : Resistencia y reactancia netas del sistema vistas desde el neutro del generador.

f_m (Hz) : Frecuencia natural torsional del eje.

El amortiguamiento total correspondiente al modo bajo análisis resulta de adicionar a De el amortiguamiento mecánico modal D_m , que se obtiene a partir de los datos suministrados por el fabricante de la turbina y el generador.

A modo de síntesis, la interacción torsional se manifiesta cuando:

$$X(fe) = 0 \quad \text{y} \quad D_t = D_m + D_e \leq 0$$

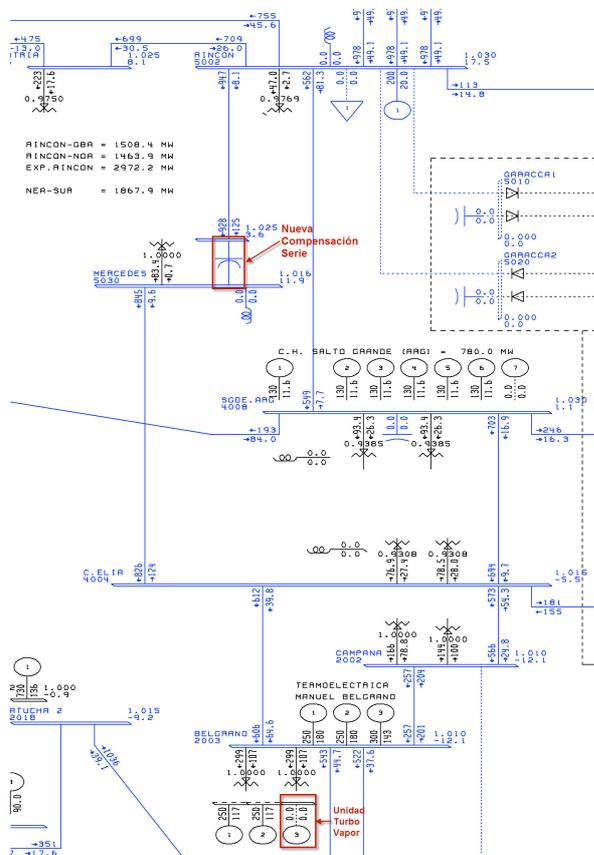
3.2. Metodología

La metodología seguida para la realización de los estudios de autoexcitación y de interacción torsional se basa en la Técnica de Barrido en Frecuencia, la cual se implementada en el programa Alternative Transients Program (ATP).

Para el análisis de autoexcitación, se conecta una fuente de corriente de 1 A, y de frecuencia variable en un rango entre 1 y 50 Hz con intervalos de 0.1 Hz y se calculan los valores de la reactancia y de la resistencia del circuito serie.

La existencia de las oscilaciones autoexcitadas se verifica observando para las frecuencias en que la reactancia resulta nula, el signo del valor de la resistencia correspondiente.

Para el análisis de Interacción Torsional también se utilizó la misma técnica de barrido en frecuencia para obtener la reactancia neta equivalente del sistema red-generador. Determinados los ceros de la reactancia (condición de resonancia) se observa si la frecuencia correspondiente resultaba igual o muy próxima a la frecuencia complementaria de alguno de los modos naturales de oscilación del sistema mecánico. En caso afirmativo se verifica el signo de la suma del amortiguamiento mecánico modal y del amortiguamiento aparente del sistema eléctrico.



3.3. Resultados

La Figura 4 muestra una sección de la red en análisis, con la ubicación de la nueva compensación serie y de la unidad turbo vapor.

La Figura 5 muestra la comparación de los resultados obtenidos para tres de los escenarios analizados:

- Caso base, sin compensación serie.
- Con compensación serie y máxima transmisión Este-Oeste por la interconexión NOA-NEA
- Con compensación serie y máxima transmisión Oeste-Este por la misma interconexión.

En la figura se muestran, por separado, las componentes resistiva e inductiva de la impedancia vista desde la barra en análisis, correspondiente al punto de conexión de la Central Belgrano I (ET 500 kV Belgrano).

Se observa que en todos los casos la resistencia es siempre positiva, y que la reactancia no se anula en el rango de frecuencia analizado, por lo que no

es de esperar problemas de autoexcitación ó interacción torsional.

Figura 4. Detalle de la red en análisis

Los mínimos relativos en la respuesta en frecuencia de

la reactancia están aproximadamente en las frecuencias de 8,6 Hz, 11,6 Hz y 30,5 Hz para el caso sin compensación serie.

Se observa que la incorporación de la nueva compensación serie tiene el efecto de mover el último de los mínimos a una frecuencia de aproximadamente 27,5 Hz.

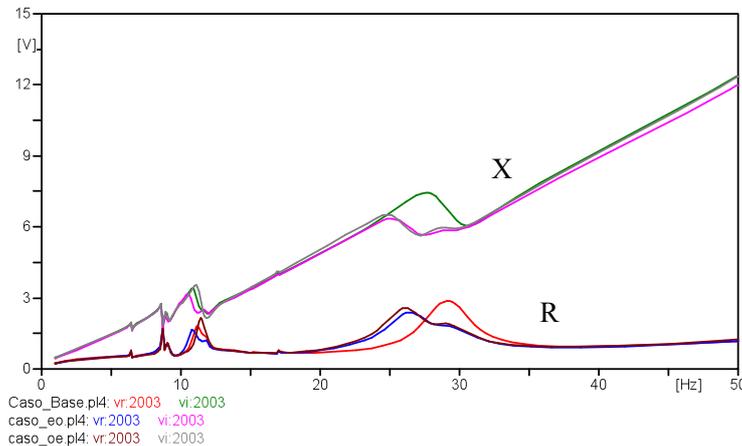


Figura 5. Barrido de frecuencia en barra de 500 kV de ET Belgrano. Comparación de resultados. vr: parte real y vi: parte imaginaria de $Z(f)$

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un programa que permite reutilizar la valiosa información disponible en los archivos de flujo de cargas del programa PSSE, convirtiéndola al formato requerido por el programa ATP, sin recurrirse al uso de equivalentes de red.

Si bien el modelo obtenido es monofásico y sólo puede utilizarse para estudios de fenómenos de secuencia directa, hay varias situaciones en donde éste es suficiente, como por ejemplo el caso de evaluación de la factibilidad de ocurrencia del fenómeno de resonancia subsincrónica.

El programa permite en forma rápida y sencilla la construcción de un modelo digital de la red para diversas topologías y escenarios de generación y demanda.

5. REFERENCIAS

- [1] IEEE SSR Working Group, «Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations», *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-104, 1985, pp. 1326–1334.
- [2] P.M. Anderson, B.L. Agrawal, y J.E.V. Ness, *Subsynchronous Resonance in Power Systems*, John Wiley and Sons, feb. 1999.
- [3] L.A. Kilgore, D.G. Ramey, y M.C. Hall, «Simplified transmission and generation system analysis procedures for subsynchronous resonance problems», *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 96, 1977, pp. 1840–1846.
- [4] B.L. Agrawal y R.G. Farmer, «Use of Frequency Scanning Techniques for Subsynchronous Resonance Analysis», *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-98, 1979, pp. 341–349.
- [5] J. Nizovoy y J.L. Alonso, «Estudios de Resonancia Subsincrónica en Argentina para la Central Termoeléctrica Bahía Blanca», *IPST 1997, International Conference on Power Systems Transients*, Seattle, Washington: jun. 1997, pp. 237–242.
- [6] M. El-Marsafawy, «Use of frequency-scan techniques for subsynchronous-resonance analysis of a practical series-capacitor compensated AC network», *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, vol. 130, 1983, pp. 28–40.