

UBICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS FACTS EN SISTEMAS MULTIMÁQUINA UTILIZANDO ANÁLISIS MODAL

RESUMEN

Se presenta una metodología para la ubicación de sistemas de transmisión flexibles FACT'S en un sistema multimáquina, utilizando el análisis modal y el modelo linealizado para análisis de pequeñas perturbaciones.

PALABRAS CLAVES: FACST SVC, estabilidad

ABSTRACT

A methodology is presented for the location of systems of flexible transmission FACT'S in a system multimachine, using the modal analysis and the pattern linealizado for analysis of small interferences.

KEY WORDS: FACTS, SVC, stability

ALFONSO ALZATE G

Profesor Titular.
alalzate@utp.edu.co
Universidad Tecnológica de Pereira

JOHN ASDRÚBAL HERRERA V

Profesor Facultad de Tecnología
Universidad Tecnológica de Pereira.
asdru@utp.edu.co.

3 INTRODUCCIÓN

La estabilidad de pequeña señal es la habilidad del sistema de potencia de mantener el sincronismo cuando se somete a pequeñas perturbaciones. Por consiguiente, una perturbación es considerada pequeña si las ecuaciones que describen la respuesta resultante del sistema pueden linealizarse para propósitos de análisis.

La inestabilidad puede resultar de dos formas:

- A. Incremento estacionario del ángulo del rotor debido a la pérdida del torque de sincronización.
- B. Oscilaciones crecientes del rotor debido a pérdida de suficiente torque amortiguador.

Una de las razones para la aplicación de los controladores FACTS en los sistemas eléctricos de potencia se basa en el mejoramiento de la estabilidad (dinámica y transitoria) del sistema.

Para los sistemas de potencia convencionales, la topología del sistema se asume que es invariante. El análisis de estabilidad de pequeña señal (estabilidad dinámica) se realiza utilizando las ecuaciones de estado linealizadas del sistema. Los valores propios de la matriz de estado del sistema determinan las características de estabilidad de pequeña señal [8]. Sin embargo, cuando un sistema incluye dispositivos FACTS, la matriz de estado del sistema llega a ser dependiente del tiempo. En este caso, el estudio de estabilidad es más complejo y el análisis matemático es más riguroso.

En algunos estudios [5] - [6], se ha encontrado que la interacción de elementos FACTS en un sistema de potencia introduce modos de oscilación adicionales con

coeficientes de amortiguamiento relativamente bajos. Algunos modos (valores propios) del sistema pueden también ser afectados por el ángulo de disparo de los tiristores (por ejemplo en los SVCs).

1. MODELOS UTILIZADOS

1.1 Modelamiento del generador sincrónico

Las expresiones que describen el comportamiento de la máquina síncrona y el regulador de tensión son un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales, con coeficientes dependientes del tiempo, como el caso del generador síncrono en que las inductancias propias y mutuas tanto del rotor como de el estator dependen de la posición angular del rotor. Para evitar la complejidad en el manejo de estas ecuaciones, se usa la transformación de PARK, en donde los voltajes, corrientes, y enlaces de flujo se expresan en términos de sus componentes longitudinal, transversal y cero, mediante la proyección de las variables originales en los ejes directo, en cuadratura y cero (dirección axial de la máquina). Esta transformación permite eliminar la dependencia de las inductancias y flujos con la posición angular del rotor.

Este trabajo utiliza el modelo de dos ejes para la máquina síncrona y para el regulador automático de voltaje el modelo IEEE tipo I, El comportamiento de un sistema dinámico, tal como un sistema de potencia, puede describirse mediante un conjunto de n ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden, de la siguiente forma:

$$\dot{x} = (x, u)$$

Y un conjunto de ecuaciones algebraicas para el estator y la red.

$$0 = g(x, y)$$

1. 2 Modelo IEEE tipo I

En este modelo no son tenidos en cuenta los efectos subtransitorios de la máquina síncrona [8], Las variables que representan este modelo son:

- $X_1 = (\delta, \omega, E'_q, E'_d)^t$ variables del generador.
- $X_2 = (E'_{fd}, V_R, R_f)^t$ variables del regulador.
- $X_3 = (I_d, I_q)^t$ variables algebraicas del generador.

1.1 Ecuaciones diferenciales

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_s$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{TM_i}{M_i} - \left[\frac{E'_{qi} \cdot x'_{di} \cdot I_{di}}{M_i} \right] \cdot I_{qi} - \left[\frac{E'_{di} + x'_{qi} \cdot I_{qi}}{M_i} \right] \cdot I_{di} - D_i \cdot \left[\frac{\omega_i - \omega_s}{M_i} \right]$$

$$\frac{dE'_{qi}}{dt} = -\frac{E'_{qi}}{T'_{d0i}} \left[\frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}} \right] \cdot I_{di} + \frac{E_{fdi}}{T'_{d0i}}$$

$$\frac{dE'_{di}}{dt} = -\frac{E'_{di}}{T'_{q0i}} \left[\frac{x_{qi} - x'_{qi}}{T'_{q0i}} \right] \cdot I_{qi}$$

$$\frac{dE_{fdi}}{dt} = -\frac{k_{Ei} + S_E(E_{fdi})}{T_{Ei}} \cdot E_{fdi} + \frac{V_{Ri}}{T_{Ei}}$$

$$\frac{dV_{Ri}}{dt} = -\frac{V_{Ri}}{T_{Ai}} + \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} \cdot R_{fi} - \frac{K_{Ai} \cdot K_{fi}}{T_{Ai} \cdot T_{fi}} \cdot E_{fdi} + \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} \cdot (V_{refi} - V_i)$$

$$\frac{dR_{fi}}{dt} = -\frac{R_{fi}}{T_{fi}} + \frac{K_{fi}}{T_{fi}^2} \cdot E_{fdi}$$

1.2 Ecuaciones algebraicas del estator.

Las ecuaciones algebraicas del estator en forma polar, se obtienen directamente del circuito equivalente dinámico de la figura 1, ecuaciones que también forman parte del modelo A. La diferencia entre lo que se llama en este trabajo modelo A y B está en que el primero es un modelo más detallado que incluye un número mayor de variables de estado, mientras que el B es un modelo simplificado [8].

Del modelo del circuito de dos ejes para la máquina síncrona se tiene:

$$0 = E'_d - V_i \cdot \text{sen}(\delta_i - \theta_i) - R_{s_i} \cdot I_{di} + x'_{q_i} \cdot I_{qi}$$

$$0 = E'_q - V_i \cdot \text{cos}(\delta_i - \theta_i) - x'_{d_i} \cdot I_{di} - R_{s_i} \cdot I_{qi}$$

$i = 1, \dots, m$

1.3 Ecuaciones de la red

Las ecuaciones de la red se pueden expresar ya sea mediante la forma de balance de potencia o de corriente. La figura 1 muestra la interconexión del circuito de la máquina síncrona con el resto de la red, estas ecuaciones son comunes tanto para el modelo A como para el modelo B

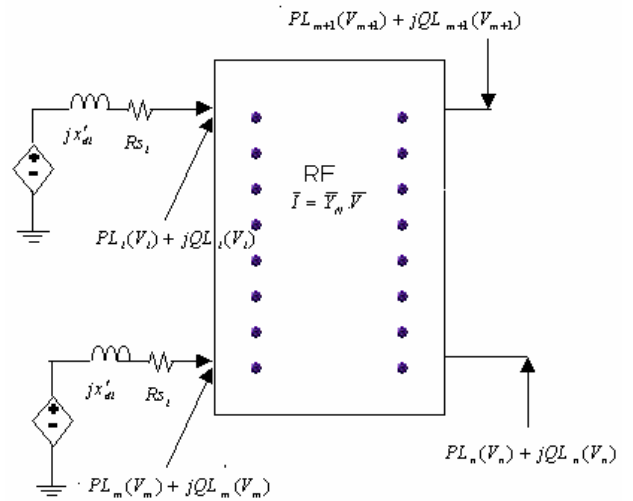


Figura 1. Interconexión del circuito de la máquina síncrona con el resto de red. (1.4)

3.1.1 Ecuaciones de las barras generadoras.

$$V_i \cdot e^{j\theta_i} (I_{di} - jI_{qi}) \cdot e^{-j(\delta_i - \frac{\pi}{2})} + P_{li}(V_i) + jQ_{li}(V_i)$$

$$= \sum_{k=1}^n V_i \cdot V_k \cdot Y_{ik} \cdot e^{j(\theta_i - \theta_k - \theta_{ik})}$$

$i = 1, \dots, m$

Separando las ecuaciones en parte real e imaginaria se obtiene:

Ecuaciones de red para los buses generadores, $i = 1, \dots, m$

$$0 = I_{di} \cdot V_i \cdot \text{sen}(\delta_i - \theta_i) + I_{qi} \cdot V_i \cdot \text{cos}(\delta_i - \theta_i) + P_{li}(V_i)$$

$$- \sum_{k=1}^n V_i \cdot V_k \cdot Y_{ik} \cdot \text{cos}(\theta_i - \theta_k - \theta_{ik})$$

$$0 = I_{di} \cdot V_i \cdot \text{cos}(\delta_i - \theta_i) - I_{qi} \cdot V_i \cdot \text{sen}(\delta_i - \theta_i) + Q_{li}(V_i)$$

$$- \sum_{k=1}^n V_i \cdot V_k \cdot Y_{ik} \cdot \text{sen}(\theta_i - \theta_k - \theta_{ik})$$

(1.9)

1.3.2 Ecuaciones para las barras de carga.

$$P_{li}(V_i) + jQ_{li}(V_i) = \sum_{k=1}^n V_i \cdot V_k \cdot Y_{ik} \cdot e^{j(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})}$$

$$i = m + 1, \dots, n.$$

Separando la ecuación anterior en parte real e imaginaria se obtiene:

Ecuaciones de red para los buses de carga,

$$i = m + 1, \dots, n$$

$$0 = P_{li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i \cdot V_k \cdot Y_{ik} \cdot \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})$$

$$0 = Q_{li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i \cdot V_k \cdot Y_{ik} \cdot \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})$$

Llevando el sistema a la forma

$$\Delta \dot{x}_i = A_{1i} \Delta x_i + B_{1i} \Delta l g_i + B_{2i} \Delta V g_i + E_i \Delta U_i \quad i=1, \dots, m$$

Para el sistema de m máquinas, la ecuación anterior puede expresarse en forma matricial como:

$$\Delta \dot{X} = A_1 \Delta X + B_1 \Delta l g + B_2 \Delta V g + E_1 \Delta U$$

Donde A_1, B_1, B_2, E_1 , son bloques de matrices diagonales [8]. Esto permite hacer un análisis de la componente amortiguadora y sincronizadora y determinar en que barra debemos ubicar el SVC para contrarrestar los efectos de la inestabilidad

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_i & \Delta \omega_i & \Delta \dot{E}'_{qi} & \Delta \dot{E}'_{di} & \Delta \dot{E}_{fdi} & \Delta \dot{V}_{Ri} & \Delta \dot{R}_{Fi} \end{bmatrix}$$

2. MODELO DEL SVC

La Figura 2 muestra el diagrama simplificado de bloques del sistema de control del SVC, el cual es comúnmente utilizado en estudios de estabilidad transitoria. En el diagrama no se incluyen el modelo del filtro, ya que su constante de tiempo es muy pequeña considerando las frecuencias de oscilación típicas en problemas de sincronismo. Cuando el sistema se vuelve inestable la señal de error ΔV_x debe ser cero para mantener el mismo valor de susceptancia; de esta forma controlando el ángulo de disparo, se controla la corriente del SVC y se mantiene la estabilidad del sistema.

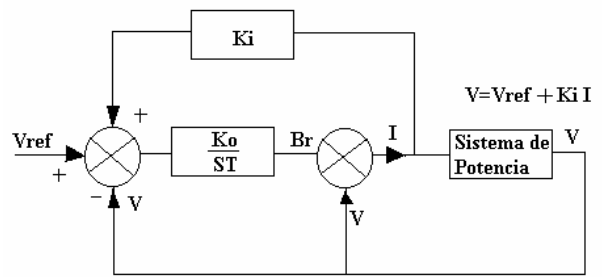


Figura 2. Modelo del SVC utilizado

3. SISTEMA DE PRUEBA

Se realiza una aplicación del método propuesto en un sistema como el mostrado en la figura 3 con 5 nodos, de los cuales el 3, 4 y 5 son de carga, el nodo 2 es PV y el nodo 1, el de referencia.

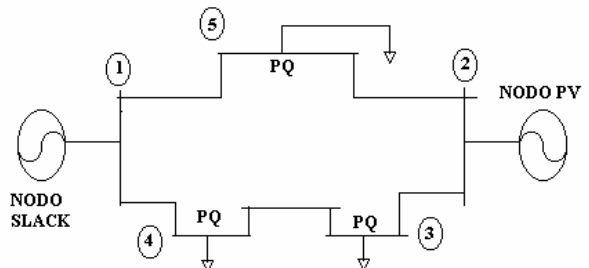


Figura 3. Sistema de prueba

4 DATOS DEL SISTEMA EN P.U

```
Nbarras=5;
n=5;
gen=2;
Nlineas=5;
tol=0.001;
nodoInicial=[1 2 3 4 5];
nodoFinal=[2 3 4 5 1];
r=[ 0.01 0.02 0.04 0.04 0.02];
x=[ 0.06 0.06 0.06 0.08 0.04];
y=[0.005 0.005 0.005 0.005 0.005];
ysh=[ 0+0.0050i 0+0.0050i
0+0.0050i 0+0.0050i 0+0.0050i];
p=[ 0 0.6 -0.4 -0.4 -0.2];
q=[ 0 0 -0.3992 -0.1
-0.1];
```

5. DATOS UTILIZADOS PARA EL SVC

```
Xc = 2; % Valor original
X_L = 0.9;
Xsl = 2;
Xc = Reactancia del capacitor fijo
```

```

X_L = Reactancia del inductor
Xsl = Rango de control

angulo=(pi/2):(pi/180):pi;
Xv(t) = [ (pi*X_L) / (2*(pi-
angulo(t)) + sin(2*angulo(t))) ];
SuscXv(t) = 1 / Xv(t);
QSVC(t) = (Vt(SVC)*Vt(SVC)/Xv(t)) -
( Vt(SVC)*Vt(SVC)/Xc );
Ysvc(t) = (1/Xc)-(1/Xv(t));
    
```

```

-18.7862
-18.9197
-8.9477
-6.2346
-5.1714
-4.0399 + 0.6386i
3.0399 - 0.4563i
-2.0729
-0.4482
-0.8421 + 0.1040i
-0.8421 - 0.1040i
-0.7439
    
```

6 DATOS UTILIZADOS EN LOS MODELOS DE LAS MÁQUINAS Y REGULADOS

```

Rs = [0.00028 0.00028];
Xd = [1.10 1.10];
Xq = [0.80 0.80];
Xpd = [0.18 0.18];
Xpq = [0.25 0.25];
Tpd = [4.0 4.0];
Tpq = [0.50 0.50];
H= [3.27 3.27];
DD = [1.00 1.00];
Ka = [10.0 10.0];
ta = [0.05 0.05];
Kf = [0.03 0.03];
tf = [1 1];
KE = [1 1];
tE = [0.35 0.35];
    
```

se implementó el sistema inicialmente con los siguientes valores Propios correspondientes a la matriz de estados del sistema

```

-54.6615
-53.0476
-18.8353
-18.9848
-9.2495
-6.6791
-4.6577
-3.6018
-2.4077
-2.0197
-0.8229 + 0.1676i
-0.8229 - 0.1676i
-0.7324 + 0.0754i
-0.7324 - 0.0754i
    
```

los valores anteriores muestran parte real negativa en todas las variables de estado lo que significa que el sistema es completamente estable. El programa implementado para el análisis de la estabilidad permite volver el sistema inestable voluntariamente y para este caso se hizo aumentando la potencia en el nodo 3 con pequeños incrementos hasta obtener los siguientes valores propios dela matriz de estados del sistema.

```

-54.6852
-52.6918
    
```

Aquí se observa que existe un valor propio con parte real positiva, determinar cual es la variable que tiene más influencia sobre este valor permite conocer cual es el nodo donde debe ir el SVC. En la tabla 1 se muestran los factores de participación asociados a los valores propios obtenidos.

Autovalor	Nodo generador	Variable de estado	FP críticos
-4.6852 +5.4671i	1	$\dot{\delta} \dot{\omega}$	0.6, 1.0
-2.6918	1	$\dot{\delta} \dot{\omega}$	0.4, 0.56
-8.7862 - 3.2812i	1	$\dot{\delta} \dot{\omega}$	0.28, 0.14
-8.9197	1	$\dot{E}_{fd} \dot{V}_R$	0.86, 1.0
-8.9477	1	$\dot{E}'_q \dot{R}_F$	0.45, 0.56
-6.2346 + 2.349i	1	$\dot{E}_{fd} \dot{V}_R$	0.26, 0.88
-5.1714	1	\dot{R}_F	0.98, 0.12
-4.0399 + 0.6386i	2	$\dot{E}'_q \dot{R}_F$	0.26, 0.15
3.0399 - 0.4563i	2	$\dot{\delta} \dot{\omega}$	1.0, 0.56
-2.0729	2	\dot{R}_F	0.45, 0.25
-0.4482	2	$\dot{E}_{fd} \dot{V}_R$	0.35, 0.45
-0.8421 + 0.1040i	2	\dot{E}'_d	0.77, 0.37
-0.8421 - 0.1040i	2	$\dot{\delta} \dot{\omega}$	1.0, 0.98
-0.7439	2	$\dot{\delta} \dot{\omega}$	0.1, 0.2

Tabla No 1: autovalores y valores críticos de los factores de participación para un estado del sistema

La tabla muestra que la componente amortiguadora y la sincronizadora de la máquina ubicada en el barraje 2 tienen gran influencia en el valor propio cuya parte real es positiva (3.0399 - 0.4563i), esto da la pauta para ubicar el SVC en dicha barra y así entregar la componente adicional para reubicar el polo.

Finalmente utilizando el modelo del SVC utilizado en [9] mediante iteraciones sucesivas se varía el ángulo de disparo del SVC hasta lograr reubicar el polo.

Se obtuvieron para un ángulo de 105 grados los siguientes valores propios del :

-41.1376
 -39.7030
 -12.3362 + 9.7954i
 -12.3362 - 9.7954i
 -11.7741 + 6.0052i
 -11.7741 - 6.0052i
 -6.9672
 -6.1187
 -0.72 14 + 0.7525i
 -3.2703
 -0.3548 + 0.4227i
 -0.3548 - 0.4227i
 -0.2433
 -0.1094

Los cuales muestran que mediante el uso del S.V.C se hizo más estable el sistema, al eliminar el efecto del valor propio positivo.

7 CONCLUSIONES

Los sistemas FACTS son una gran alternativa para resolver problemas de estabilidad del sistema así como también para resolver el problema de capacidad de transmisión.

Existen muchas metodologías para solucionar el complejo problema de estabilidad de pequeña señal, presentando en el presente trabajo una basada en métodos heurísticos.

Ante problemas presentados por la inclusión de dispositivos FACTS en el sistema eléctrico como el fenómeno de armónicos y modos de oscilación adicionales, se deduce la necesidad de implementar sistemas y métodos de control inteligentes. Aquí existe un campo de acción amplio para disciplinas matemáticas como los algoritmos genéticos, redes neuronales, lógica difusa, etc, y el avance en la electrónica de potencia para solucionar los problemas resultantes.

El software empleado en este artículo representa un avance en el estudio de los dispositivos FACTS en sistemas multimáquinas y abre las puertas para que se implementen otros dispositivos de la misma familia y se hagan otro tipo de estudios.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abdel-Aty Edris. Controllable Var Compensator: A Potential Solution to Loadability Problem of Low Capacity Power Systems. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 2 No. 3, Agosto 1987.
- [2] E. Z. Zhou. Application of Static Var compensator to Increase Power System Damping. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8 No. 2, Mayo 1993.
- [3] ALZATE G. ALFONSO. Dinámica de Sistemas Eléctricos: Estabilidad y Control. Maestría en Ingeniería Eléctrica, 2000.
- [4] MILLER, T.J. Reactive control in electric power systems. John Wiley, 1982.
- [5] Yousing Tang, A. P. Sakis Meliopoulos. Power System Small Signal Stability Analysis with FACTS Elements. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12 No. 3, Julio 1997.
- [6] Leonard J. Bohmann, Robert H. Lasseter. Stability and Harmonics in Thyristor Controlled Reactors. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5 No. 2, Abril 1990.
- [7] Eugenio Betancur E., Idi A. Isaac, Hugo A. Cardona, Jorge W. González. Simposio de Transmisión y Distribución de energía Eléctrica. CIDET. Barranquilla, mayo 2002.
- [8] Peter W. Sauer. Power Sysytem Dynamics and Stabiliti, ed Prentice Hall, diciembre 2000
- [9] Zeno T Faur, Effect of FACTS devices on Static Voltaje Collapse, a thesis presented to the university of Waterloo 1996.