

Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

Vol. 16 (1)

Ene/Jul 2006

CONTENIDO

Artículos

1. La compensación serie controlada y el relé de impedancia..... 15-26
Araya, Eddie.
2. Estudio de los factores que afectan la hidrólisis enzimática y el proceso fermentativo para la producción de alcohol a partir de papa (*Solanum tuberosum*) 27-37
Molina, Manuel; González, Jorge.
3. Reducción de la radiación electromagnética en las líneas de alta tensión 39-49
Araya, Eddie.
4. Gravity signatures of the Gibraltar Strait 51-58
Bakkali, Saad; Amrani, Mahacine.
5. Influencia de la distancia epicentral sobre los factores de reducción por ductilidad 59-79
Vielma, Juan Carlos; Lobo, William; Rivero, Pedro.
6. Diseño no lineal del AVR de un generador sincrónico 81-93
Araya, Eddie.
7. Despacho óptimo de MVAR en sistemas de potencia 95-104
Acuña, Marco; Araya, Eddie.
8. El concepto de calidad: un marco conceptual 105-119
Herrera, Rodolfo.

Nota técnica

9. Aspectos teóricos y aplicaciones de la operación unitaria de cristalización 121-131
Aguilar, Noé; Román, Carlos.

Normas

Normas para la presentación de artículos a la Revista Ingeniería..... 133-138



EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

<http://www.revistaingenieria.inii.ucr.ac.cr>
www.ucr.ac.cr
ISSN 1409-2441

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

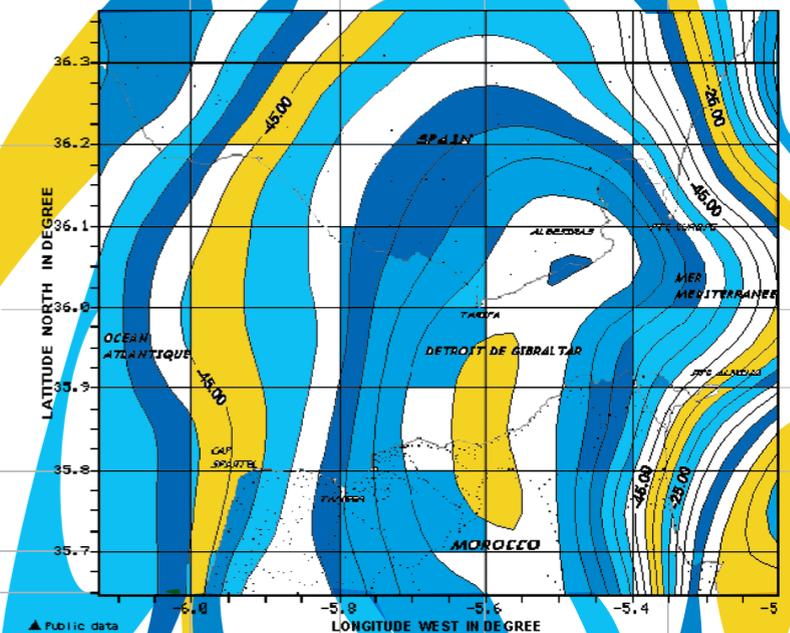
ENERO/JULIO 2006 - VOLUMEN 16 - Número (1)

Número (1)

Enero / Julio 2006

Volumen 16

REVISTA INGENIERÍA



LA COMPENSACIÓN SERIE CONTROLADA Y EL RELÉ DE IMPEDANCIA

Eddie A. Araya Padilla

Resumen

Los nuevos desarrollos de la electrónica de potencia conocidos como *sistemas flexibles* de transporte en corriente alterna (FACTS: "Flexible A.C. Transmission Systems"), han dado origen a diversas investigaciones y aplicaciones industriales. Entre estos dispositivos se encuentra el capacitor en serie controlado por tiristores (TCSC: "Thyristor Controlled Series Capacitor"), recientemente utilizado para amortiguar las oscilaciones de potencia (OP).

Para amortiguar las OP, el TCSC modula la reactancia inductiva de la línea de transmisión, a través de una señal de control. Esta modulación modifica los parámetros del relé de impedancia, afectando su normal funcionamiento. Para evaluar este efecto, se analizan las consecuencias del TCSC sobre el relé de impedancia, cuando la reactancia de la línea es desbalanceada, tomando o no en cuenta la transposición.

Los resultados muestran cómo la compensación serie controlada modifica la operación confiable del relé de impedancia.

Palabras clave: FACTS, TCSC, relé de impedancia, oscilaciones de potencia, estabilidad de sistemas de potencia

Abstract

The new developments of the electronics of well-known like FACTS ("Flexible A.C. Transmission Systems"), they have given origin to diverse investigations and industrial applications. Between these devices the TCSC (Thyristor Controlled Capacitor Series), recently utilized to damping power oscillations.

To damping power oscillations the TCSC modulate the inductive reactance of the transmission line, through a sign of control. This modulation modifies the parameters of the impedance relay, affecting their normal operation. In order to evaluate this effect, are analyzed the consequences of the TCSC on the impedance relay, when the reactance of the line is unsymmetrical, taking or not the transposition.

The outputs show controlled series like the compensation it modify the reliable operation of the impedance relay.

Key words: FACTS, TCSC, impedance relays, power oscillations, power system stability.

Recibido: 05 de abril del 2005 • **Aprobado:** 03 de marzo del 2006

1. INTRODUCCIÓN

En los sistemas eléctricos de potencia, se requiere mantener la frecuencia y la tensión de la red dentro de límites aceptables de operación, suministrando continuamente la energía que los usuarios demandan.

Para resolver este problema, se han propuesto dos soluciones conceptualmente independientes:

en el caso de amortiguar las OP, se utilizan entre otros dispositivos el TCSC, el cual modifica la reactancia inductiva de la línea de transmisión mediante su modulación, por otro lado, para resolver la operación errónea del relé de impedancia, ha sido una práctica común bloquear las protecciones ante las OP y activarlas cuando se presentan grandes perturbaciones generadas por altas corrientes de falla (Murillo, 1999) y (GEC ALSTHOM T&D, 1995).

En este último caso, las protecciones de tipo numérico o digitales tienen la función de bloqueo o disparo incorporados, siendo el dispositivo ABB REL-511 el más completo para esta función, luego le sigue el SIEMENS 7SA51 y el menos versátil, el SEL-321. Todos estos dispositivos tienen el inconveniente de usar ajustes fijos basados en la razón de cambio de la impedancia.

Con el propósito de analizar en forma conjunta ambas soluciones, este trabajo está organizado en secciones. La sección 2 proporciona el funcionamiento normal del relé de impedancia. La sección 3 contiene información sobre la compensación serie ideal controlada. El efecto del TCSC sobre el relé de impedancia se muestra en la sección 4. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones alcanzadas con esta investigación.

2. OPERACIÓN NORMAL DEL RELÉ DE IMPEDANCIA

El relé de impedancia opera sobre la base de una relación tensión – corriente, la cual indica la distancia a que ha ocurrido la falla. En el caso de

una falla 3φ en un punto x de la línea, la ecuación (1) muestra que la relación tensión – corriente es proporcional a la impedancia entre el relé y el punto de falla.

$$\frac{\bar{V}}{\bar{I}} = \lambda \bar{Z} \tag{1}$$

El relé está diseñado para operar si la relación $|\bar{V}|/|\bar{I}|$ es demasiado pequeña, es decir, cuando ocurre una falla, la tensión disminuye y la corriente aumenta. La región de operación del relé, está definida para cualquier valor complejo de $|\bar{V}|/|\bar{I}|$ que se encuentre dentro de un radio C del origen del plano complejo.

La Figura 1 muestra varios resultados posibles de acuerdo con el punto de falla. Estas condiciones describen lo siguiente:

- a. Falla sobre la línea localizada a un 60 % (disparo).
- b. Falla sobre la línea localizada a un 80 % (disparo marginal).

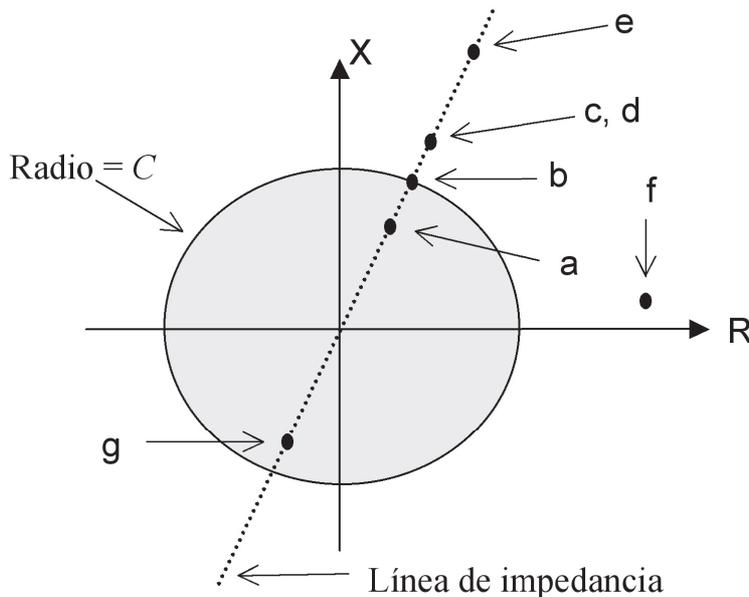


Figura 1. Zonas de operación del relé.
Fuente: (El autor).

- c. Falla sobre la línea localizada a un 100 %.
- d. Falla sobre el sistema más allá de la línea protegida.
- e. Falla sobre el sistema mucho más allá de la línea protegida.
- f. Condición típica de operación.
- g. Falla sobre la línea localizada a la izquierda del relé (disparo).

De esta forma, el relé de impedancia se bloquea ante las oscilaciones de potencia, mediante una zona de protección mayor al círculo de radio C . Esto hace que la perturbación sea censada con un tiempo $\Delta\tau$ antes de que se accione el relé. Sin embargo, cuando la línea de transmisión posee una compensación serie ideal o controlada, la operación del relé de impedancia se modifica.

La zona de operación del relé se desplaza del origen, si el relé de impedancia protege una línea de gran longitud, tal como se muestra en la Figura 2.

En este caso, la zona protegida está definida por la ecuación (2):

$$[X - A]^2 + [Y - B]^2 = C^2 \tag{2}$$

la cual representa un círculo de radio C , centrado en (A, B) , donde los parámetros de la ecuación son:

$$A = \frac{m^2}{m^2 - 1} R_L \quad , \quad C^2 = \frac{m^2}{(m^2 - 1)^2} (R_L^2 + X_L^2)$$

$$B = \frac{m^2}{m^2 - 1} X_L \quad , \quad m = \frac{|\bar{E}_a|}{|\bar{E}_b|} > 1 \quad \text{y} \quad \bar{Z}_a \ll \bar{Z}_L$$

3. COMPENSACIÓN SERIE IDEAL CONTROLADA

3.1 Compensación serie ideal

La Figura 3 muestra un compensador serie ideal, representado por una fuente de tensión controlada \bar{V}_C , conectado en el punto medio de una línea de transmisión corta.

Si la tensión está en cuadratura en relación con la corriente de línea, la fuente de tensión \bar{V}_C puede verse, a partir de sus terminales, como una reactancia capacitiva o inductiva equivalente.

Considerando para esta configuración que $|\bar{V}_S| = |\bar{V}_R| = V$, la corriente y la potencia transmitida por la línea están dados por:

$$I = \frac{2 \cdot V}{X_L \cdot (1 - k)} \text{sen} \frac{\delta}{2} \tag{3}$$

$$P = \frac{V^2}{X_L \cdot (1 - k)} \text{sen} \delta \tag{4}$$

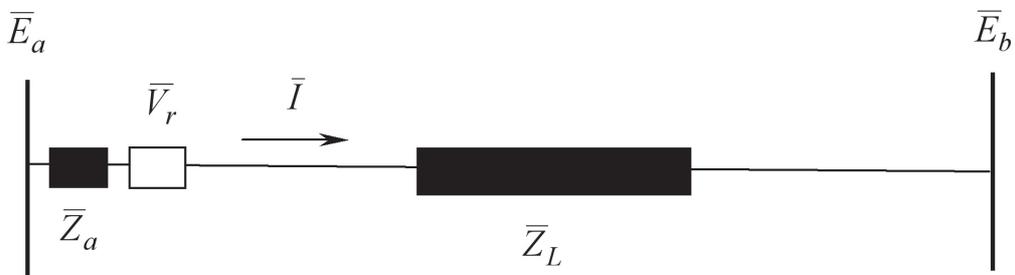


Figura 2. Línea de gran longitud.
Fuente: (El autor).

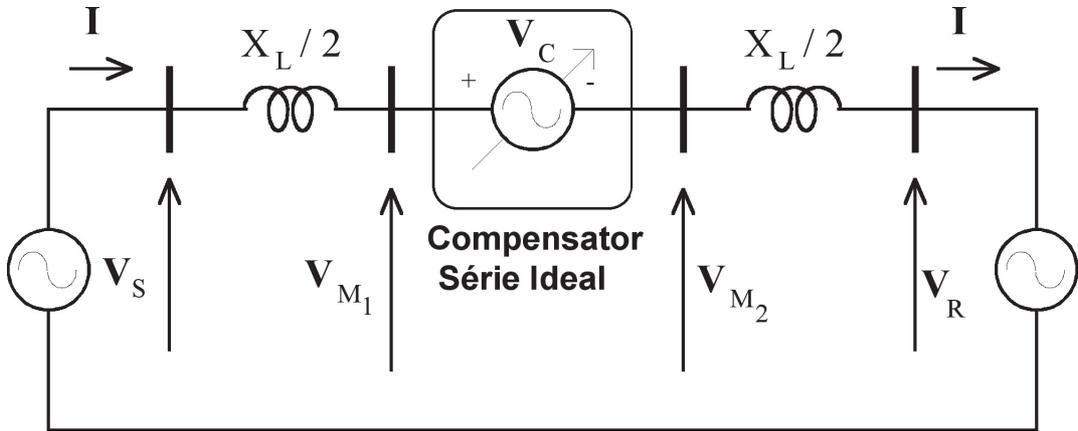


Figura 3. Compensador serie ideal, en el punto medio de una línea de transmisión corta longitud.
Fuente: (El autor).

De esta forma, la corriente y la potencia transmitida pueden incrementarse si el factor de compensación serie, k , varía entre los límites $0 < k > 1$.

Por otro lado, el compensador serie ideal introduce una reactancia capacitiva X_C en (3) y (4), que modifica los parámetros de sintonización del relé de impedancia. En este caso, en la ecuación (2) la constante A no cambia, pero B y C se modifican como:

$$B = \frac{m^2}{m^2 - 1} X_L (1 - k) \tag{5}$$

$$C^2 = \frac{m^2}{(m^2 - 1)} (R_L^2 + X_L^2 (1 - k)^2) \tag{6}$$

No obstante, el relé opera satisfactoriamente si se consideran estos cambios.

3.2 Efecto de la compensación serie ideal sobre la impedancia de la línea

Para investigar el efecto de la compensación serie ideal, sobre los factores de desbalance de la línea de transmisión, se asume que el conjunto

de capacitores están balanceados, y que los conductores son transpuestos en varias formas. Entonces, las consecuencias sobre los factores de des-balance de secuencia negativa y cero pueden calcularse.

3.2.1 Impedancia desbalanceada de la línea.

La impedancia de una línea de transmisión depende del arreglo y distribución de los conductores, así como las características de la tierra como un medio conductor. Si se utiliza la línea de transmisión mostrada en la Figura 4, se puede deducir una expresión para su impedancia a partir de las relaciones entre las tensiones y las corrientes.

Para la configuración de la Figura 4, la ecuación matricial es:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{au} & z_{av} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bu} & z_{bv} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cu} & z_{cv} \\ z_{ua} & z_{ub} & z_{uc} & z_{uu} & z_{uv} \\ z_{va} & z_{vb} & z_{vc} & z_{vu} & z_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \\ \bar{I}_u \\ \bar{I}_v \end{bmatrix} \tag{7}$$

Manipulando la ecuación (7) y calculando las impedancias por unidad de longitud, para

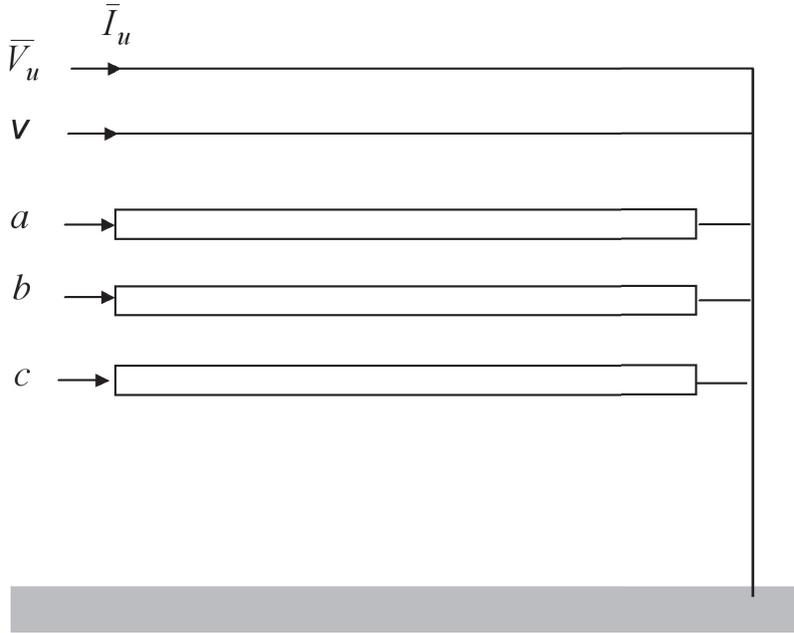


Figura 4. Definición de las corrientes y tensiones de los conductores.

Fuente: (El autor).

una línea de longitud l , se puede escribir la impedancia total de la línea como:

$$\bar{V}_{abc} = \bar{Z}_{abc} \bar{I}_{abc} \quad (8)$$

3.2.2 Transposiciones

Si la línea está dividida en tres secciones con diferentes longitudes f ($i = 1, 2, 3$), entonces, la línea no se transpone completamente.

Designada la impedancia en la matriz acorde a su posición y no a su fase, se pueden analizar los siguientes casos.

1. Caso (a) sin transposición

En este caso se tiene que:

$$\bar{Z}_{abc} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{ac} \\ \bar{Z}_{ba} & \bar{Z}_{bb} & \bar{Z}_{bc} \\ \bar{Z}_{ca} & \bar{Z}_{cb} & \bar{Z}_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \bar{Z}_{12} & \bar{Z}_{13} \\ \bar{Z}_{21} & \bar{Z}_{22} & \bar{Z}_{23} \\ \bar{Z}_{31} & \bar{Z}_{32} & \bar{Z}_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

donde los subíndices numéricos se refieren a la posición de los conductores asignados para cada fase.

2. Caso (b) transposición completa

Para esta configuración se determina que:

$$\bar{Z}_{abc} = f_1 \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \bar{Z}_{12} & \bar{Z}_{13} \\ \bar{Z}_{21} & \bar{Z}_{22} & \bar{Z}_{23} \\ \bar{Z}_{31} & \bar{Z}_{32} & \bar{Z}_{33} \end{bmatrix} + f_2 \begin{bmatrix} \bar{Z}_{22} & \bar{Z}_{23} & \bar{Z}_{21} \\ \bar{Z}_{32} & \bar{Z}_{33} & \bar{Z}_{31} \\ \bar{Z}_{12} & \bar{Z}_{13} & \bar{Z}_{11} \end{bmatrix} + f_3 \begin{bmatrix} \bar{Z}_{33} & \bar{Z}_{31} & \bar{Z}_{32} \\ \bar{Z}_{13} & \bar{Z}_{11} & \bar{Z}_{12} \\ \bar{Z}_{23} & \bar{Z}_{21} & \bar{Z}_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Si $f_1 = f_2 = f_3$, los términos fuera de la diagonal principal de la ecuación (10) se cancelan mutuamente. Como resultado, las redes de secuencia positiva, negativa y cero se desacoplan completamente.

3. Caso (c) transposición parcial

Para determinar la transposición parcial se puede escribir la matriz de impedancia como:

$$\bar{Z}_{abc} = f_1 \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \bar{Z}_{12} & \bar{Z}_{13} \\ \bar{Z}_{21} & \bar{Z}_{22} & \bar{Z}_{23} \\ \bar{Z}_{31} & \bar{Z}_{32} & \bar{Z}_{33} \end{bmatrix} + f_2 \begin{bmatrix} \bar{Z}_{22} & \bar{Z}_{23} & \bar{Z}_{21} \\ \bar{Z}_{32} & \bar{Z}_{33} & \bar{Z}_{31} \\ \bar{Z}_{12} & \bar{Z}_{13} & \bar{Z}_{11} \end{bmatrix} \quad (11)$$

En esta circunstancia no es posible desacoplar las redes de secuencia positiva, negativa y cero.

3.2.3 Componentes simétricas aplicadas a la transposición.

El estudio de condiciones desbalanceadas se efectúa mediante el marco de referencia de las componentes simétricas. En este aspecto, el interés es determinar las corrientes de secuencia negativa y cero que se generan por impedancias desbalanceadas. Primero, recordemos que la matriz de transformación de componentes simétricas es:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Si se multiplica previamente (6) por \bar{A}^{-1} , se obtiene:

$$\bar{V}_{012} = \bar{Z}_{012} \bar{I}_{012} \quad (13)$$

donde $\bar{Z}_{012} = \bar{A}^{-1} \bar{Z}_{abc} \bar{A}_{012}$

Para medir el grado de desbalance se debe resolver la ecuación (13) para las corrientes. Desarrollando la operación tenemos que:

$$\bar{I}_{012} = \bar{Y}_{012} \bar{V}_{012} \quad (14)$$

Ahora bien, en régimen permanente las tensiones aplicadas en los sistemas de potencia son solamente tensiones de secuencia positiva, de modo que la ecuación (12) se representa como:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{a0} \\ \bar{I}_{a1} \\ \bar{I}_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{00} & \bar{Y}_{01} & \bar{Y}_{02} \\ \bar{Y}_{10} & \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} \\ \bar{Y}_{20} & \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{V}_{a1} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{01} \\ \bar{Y}_{11} \\ \bar{Y}_{21} \end{bmatrix} \bar{V}_{a1} \quad (15)$$

Por lo tanto, la cantidad de corriente de secuencia negativa y cero que fluye en una línea de transmisión para la condición de una falla 3ϕ en el extremo receptor, puede determinarse por los elementos de la matriz de admitancia \bar{Y}_{01} y \bar{Y}_{21} , respectivamente. En particular, podemos definir los siguientes factores de desbalance (GEC ALSTHOM T&D, 1995) como:

factor de desbalance de secuencia cero

$$\bar{F}_0 = \frac{\bar{I}_{a0}}{\bar{I}_{a1}} = \frac{\bar{Y}_{01}}{\bar{Y}_{11}}$$

factor de desbalance de secuencia negativa

$$\bar{F}_2 = \frac{\bar{I}_{a2}}{\bar{I}_{a1}} = \frac{\bar{Y}_{21}}{\bar{Y}_{11}}$$

El efecto de la compensación serie reduce los términos diagonales de la matriz de impedancia \bar{Z}_{abc} , a la vez que también se disminuyen los elementos diagonales de la matriz de impedancia \bar{Z}_{012} . Esto significa que los términos fuera de la diagonal, los cuales son indicativos del desbalance, son más grandes comparados con los términos diagonales. Por tanto, existe la posibilidad de que la compensación serie pueda aumentar el desbalance más de lo tolerado.

3.2.4 El efecto de la compensación serie ideal

Para estudiar el efecto de la compensación serie ideal sobre los factores de desbalance,

se debe efectuar un análisis de sensibilidad, considerando diferentes opciones de conexión, tal como se muestra en las Figuras 5a, 5b, 5c y 5d.

2. Para el caso (b), la línea está completamente transpuesta con los capacitores cerca del centro de la línea, tal que la reactancia serie afectaría solamente la matriz de impedancia \bar{Z}_{cab} .

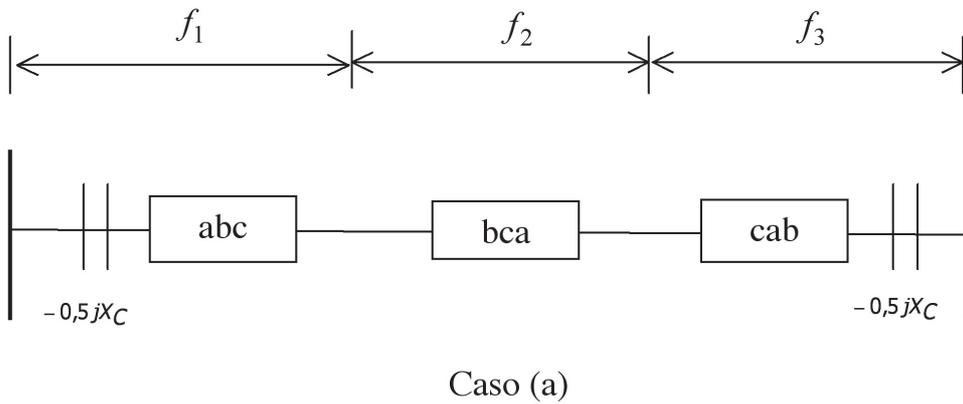


Figura 5a. Compensación serie en los extremos de la línea transpuesta.

Fuente: (El autor).

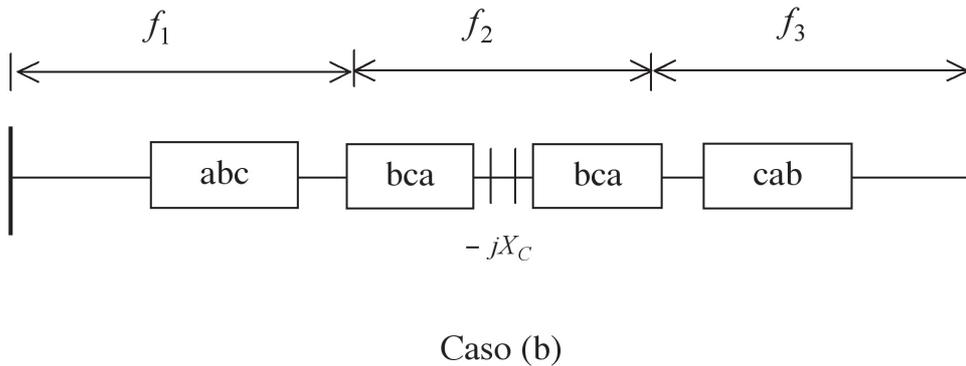
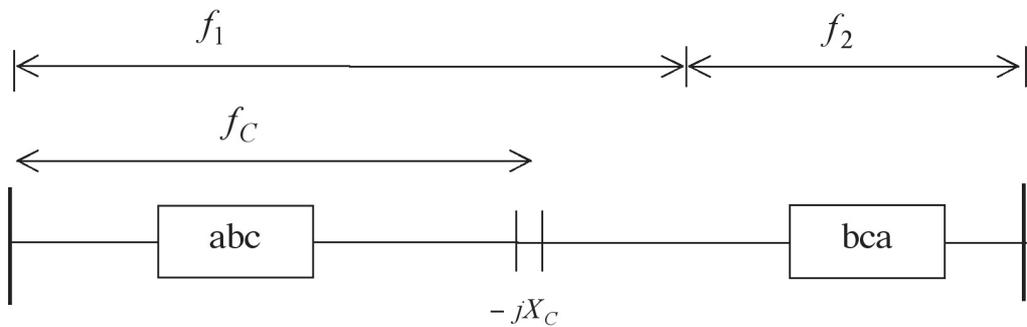


Figura 5b. Compensación serie en el centro de la línea transpuesta.

Fuente: (El autor).

1. Para el caso (a), la línea está completamente transpuesta con los capacitores en los extremos de la línea, tal que la reactancia serie afectaría solamente las matrices de impedancia \bar{Z}_{abc} y \bar{Z}_{cab} .

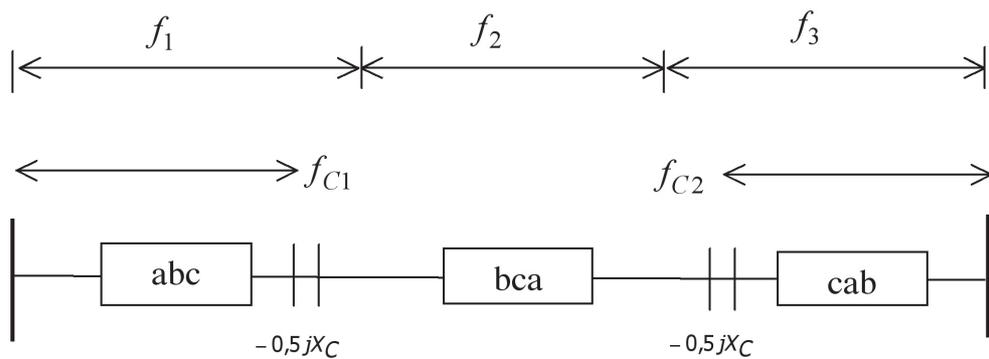
3. Para el caso (c), la línea está parcialmente transpuesta con los capacitores localizados a una distancia f_C del extremo emisor de la línea, tal que la reactancia serie afectaría la matriz de impedancia \bar{Z}_{abc} cuando $f_C < f_1$, o \bar{Z}_{cab} cuando



Caso (c)

Figura 5c. Compensación serie en el centro de la línea con una transposición incompleta.

Fuente: (El autor).



Caso (d)

Figura 5d. Compensación serie en dos puntos de la línea transpuesta.

Fuente: (El autor).

$f_C < f_1$. En ambos casos se obtiene el mismo resultado.

- Finalmente para el caso (d), la compensación serie se localiza en dos sitios diferentes. Uno a una distancia f_{C1} del extremo emisor, y el otro a una distancia f_{C2} del extremo receptor de la línea. Si $f_{C1} < f_1$ y $f_{C2} < f_3$, entonces esta compensación es exactamente igual al caso (a).

Sin embargo, si $f_{C1} > f_1$ y $f_{C2} > f_3$, entonces este arreglo es exactamente igual al caso (b). Los otros casos son posibles, pero ellos conducen a resultados similares. Por lo tanto, el caso (d) puede ignorarse como caso práctico.

Si se efectúan los cálculos para una configuración típica de una línea de transmisión de 250 kV, los resultados muestran el efecto de la compensación

serie sobre los factores de desbalance para toda la línea. Primero como un caso base, el Cuadro 1 muestra los factores de desbalance para los casos (a), (b) y (c), cuando la línea está sin compensar.

Cuadro 1. Factores de desbalance para una línea transpuesta, pero no compensada.

Caso No	f_1	f_2	f_3	F_0 en (%)	F_2 en (%)
x	1,0	-	-	1,3749	9,5730
b	0,333	0,333	0,333	0,00012	0,00095
c	0,500	0,500	-	0,5948	4,7492

Fuente: (El autor).

En el Cuadro 1 el caso (x) corresponde a la línea sin transponer y se utiliza para comparación. La transposición parcial reduce los factores de desbalance significativamente, como lo muestra el caso (c). La transposición completa de la línea presenta factores de desbalance muy bajos, como se muestra para el caso (b).

Para una compensación máxima del 70 % (Mrakutulam, 1992) en donde los valores entre paréntesis corresponden al grado de compensación de cada fracción de la línea, el Cuadro 2 presenta los siguientes resultados.

Cuadro 2. Factores de desbalance para una línea transpuesta, con una compensación del 70 %.

Caso No	f_1	f_2	f_3	F_0 en (%)	F_2 en (%)
x	1,0 (70)	-	-	1,0378	62,1371
a	0,333 (35)	0,333 (0)	0,333 (35)	0,0291	0,1241
b	0,333 (0)	0,333 (70)	0,333 (0)	0,0579	0,2483
c	0,500 (70)	0,500 (0)	-	0,7331	10,7893

Fuente: (El autor).

A partir de estos resultados, se pueden rescatar las siguientes observaciones.

1. Para una línea sin transponer, tal como en el caso (x), los factores de desbalance son altos, especialmente el desbalance de secuencia negativa.
2. Para una línea parcialmente transpuesta, tal como en el caso (c), se obtienen factores de desbalance relativamente altos, especialmente para corrientes de secuencia negativa.
3. Para líneas completamente transpuestas se tienen factores de desbalance muy bajos si la compensación está localizada en una o dos secciones de la línea.

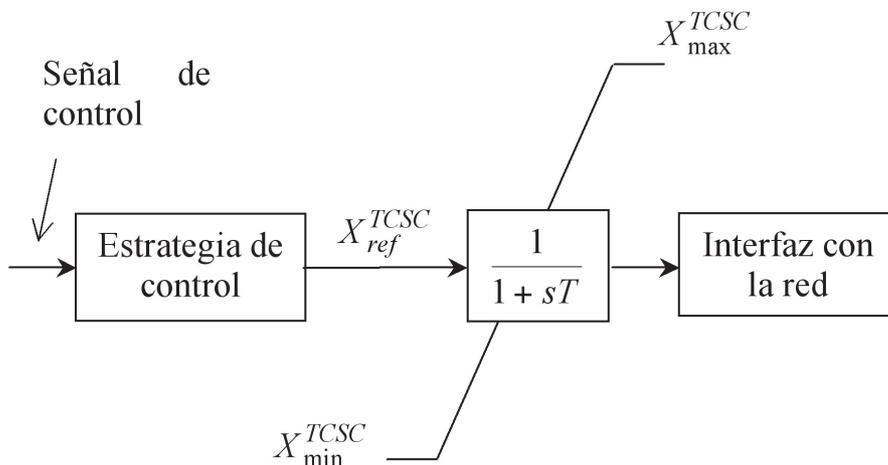


Figura 6. Control de amortiguamiento del TCSC.

Fuente: (El autor).

De estas observaciones se establece que si la línea se compensa de acuerdo a los casos (a) y (b) del Cuadro 2, los factores F_0 y F_2 son apreciablemente bajos.

3.3 Compensación serie controlada

Con el propósito de regular el flujo de potencia y amortiguar las OP, varios sistemas reales actualmente tienen en operación al TCSC (Urbanek et al, 1993). Siendo el modelo básico del controlador, el que se muestra en la Figura 6.

El TCSC está constituido por un reactor controlado por tiristores, conectado en paralelo con un capacitor fijo. En régimen permanente, el valor equivalente del capacitor puede regularse continuamente a través del control de los ángulos de encendido de los tiristores, tal como se muestra en la Figura 7.

A partir del esquema de la Figura 7, la reactancia efectiva del TCSC es:

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_{CR}(\alpha)}{X_{CR}(\alpha) - X_C} \quad (16)$$

donde:

$$X_{CR}(\alpha) = \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \text{sen}\alpha} X_R \quad (17)$$

De esta forma, el TCSC puede aumentar el amortiguamiento de las OP, mediante la modulación de la reactancia efectiva $X_{TCSC}(\alpha)$.

Para apreciar el efecto de $X_{TCSC}(\alpha)$ sobre las OP en una línea de enlace, en la Figura 8 se muestra el comportamiento típico del TCSC (Gama, et al, 1998). Para una contingencia dada, la acción del TCSC amortigua las OP (línea sólida). En su defecto, cuando el TCSC no opera, las OP no se amortiguan (línea a trazos).

Con este análisis se manifiesta cómo la reactancia inductiva $X_{TCSC}(\alpha)$, altera la impedancia total de la línea y hace que se modifiquen los parámetros con que fue sintonizado el relé de impedancia.

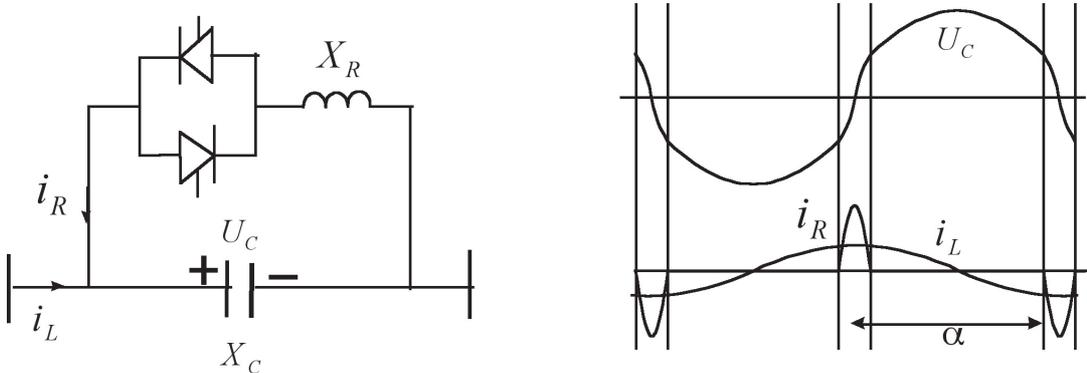


Figura 7. Circuito del TCSC y las formas de onda de tensión y corriente.

Fuente: (El autor).

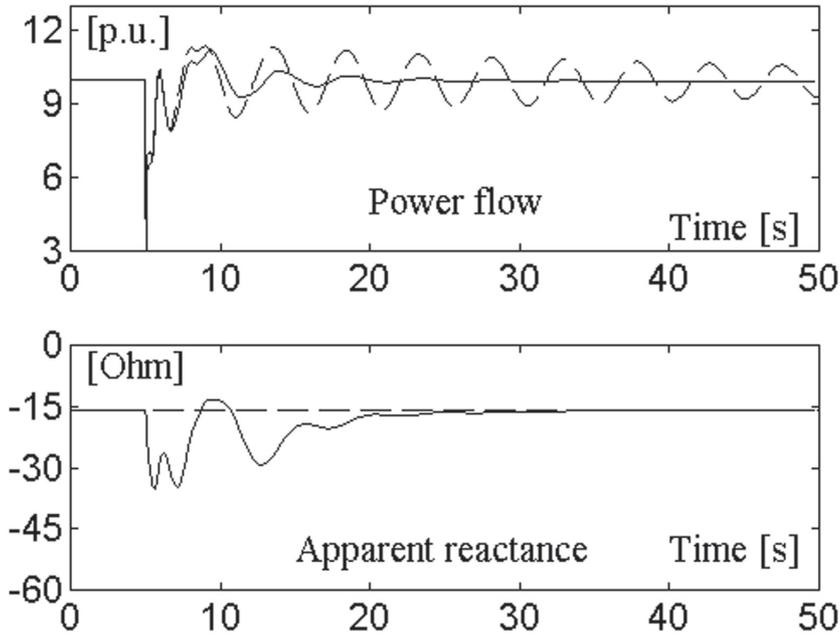


Figura 8. Variación de la potencia activa en la línea y la reactancia efectiva del TCSC.

Fuente: (Gama et al, 1998)

4. EFECTO DEL TCSC SOBRE EL RELÉ DE IMPEDANCIA

Al introducirse el TCSC en la línea de transmisión, la reactancia inductiva $X_{TCSC} (\alpha)$ modifica los parámetros B y C con que fue sintonizado el relé de impedancia. En este caso, al operar el TCSC se produce una variación de la reactancia capacitiva, ΔX_C , de modo que:

- El centro del círculo que define la zona protegida se desplaza hacia el origen en una cantidad.

$$\Delta B = -\frac{m^2}{m^2 - 1} \Delta X_C \quad (18)$$

con un cambio porcentual de

$$\frac{\Delta B}{B} = -\frac{\Delta X_C}{X_L - X_C} \quad (19)$$

- El radio del círculo que define la zona protegida se modifica en una cantidad.

$$\Delta C = -\frac{m}{m^2 - 1} \left(1 - \frac{\Omega}{2} + \frac{3\Omega^2}{8} + K \right) \Delta X_C \quad (20)$$

con un cambio porcentual de

$$\frac{\Delta C}{C} = -\left(\frac{\Omega}{R_L} - \frac{\Omega^2}{R_L} + \frac{\Omega^3}{R_L^2} + K \right) \Delta X_C \quad (21)$$

donde $\Omega = \frac{R_L}{X_L - X_C}$

En consecuencia, el efecto en conjunto de las ecuaciones (18) y (20) altera las características operativas del relé.

CONCLUSIONES

1. La compensación serie controlada, TCSC, altera la impedancia en serie de la línea y modifica los parámetros naturales de la misma.
2. La compensación serie controlada, TCSC, incrementa el desbalance de las impedancias de secuencia cero y negativa de la línea.
3. La compensación serie controlada, TCSC, altera la sintonización del relé de impedancia y por tanto, su desempeño ante una falla.

NOMENCLATURA

$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$	Operador fasorial
X_L	Reactancia inductiva de la línea
X_C	Reactancia capacitiva del compensador ideal
$k = X_C / X_L$	Factor de compensación serie
X_{CR}	Reactancia controlable del reactor
\bar{Z}	Impedancia total de la línea
λ	Fracción de la línea entre el relé y el punto de falla
FACTS	Flexible A.C. Transmission Systems
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
OP	Oscilaciones de potencia

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gama, C. & Noroozian, M. (1998). *Brazilian North-South Interconnection – Application of Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC) to Damp Inter-Area Oscillation Mode*. Paris: Cigré.

GEC ALSTHOM T&D. (1995). Protective relay: application guide. *GEC ALSTHOM T&D, March*, 80-95.

Murillo, P. (1999). *Oscilaciones de potencia y efecto en las protecciones de líneas de transmisión*. Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Mechraoui, A. & Thomas, D. (1995). A new blocking principle with phase earth fault detection during fast power swings distance protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3 (10), 1242-1248.

Marakutulam, D. (1992). Proceedings: FACTS Conference 1- The Future in High-Voltage Transmission. En *EPRI: Electric Power Research Institute, EPRI Report TR-100504*, 80-90.

Urbanek, J., Piwko, R., Larsen, E., Damsky, B. L., Furumasu, B. & Mittelstadt, W. (1993). Thyristor Controlled Series Compensator Prototype Installation at the Slatt 500 kV Substation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(8), 1460-1469.

Trudnowski, D., Donnelly, M. & Hauer, J. (1996). Estimating damping effectiveness of BPA's Thyristor-Controlled series capacitor by applying time and frequency domain methods to measured response. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2(11), 761-766.

SOBRE EL AUTOR

Eddie A. Araya Padilla

Profesor Asociado Departamento de Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica

Teléfono: (506) 207-3868

Correo electrónico: earaya@eie.ucr.ac.cr