

Análisis del Desempeño de Operación del Relevador de Distancia ante el Impacto de Dispositivos FACTS

L. A. Trujillo

A. Conde

Autores Invitados

Universidad Autónoma de Nuevo León, México

Resumen-- En el presente trabajo se analiza el impacto de Dispositivos FACTS como el dispositivo STATCOM y el UPFC en la operación del relevador de distancia, se presentan consideraciones de diseño del relevador de distancia para obtener características híbridas que permitan mejorar el desempeño funcional del relevador. En resultados de simulaciones digitales se observa una mayor tolerancia al error introducido en la impedancia medida por dispositivos FACTS. Finalmente se analizó la operación del relevador propuesto en condiciones de laboratorio con señales provenientes de un prototipo de STATCOM, el relevador fue programado en una tarjeta DSP-RT obteniendo resultados satisfactorios.

Palabras Claves-- Dispositivos FACTS, relevador de distancia, características híbridas.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a que los sistemas eléctricos de potencia actuales son operados en condiciones de cargabilidad mas severas, se han realizado investigaciones para la incorporación de equipos en base a electrónica de potencia que optimizan la transmisión de energía, los Flexible A.C. Transmission Systems - FACTS son un conjunto de dispositivos que realizan diferentes funciones de optimización de energía, como el Unified Power Flow Controller - UPFC que mejora la capacidad de transferencia de energía y la estabilidad del sistema de potencia y el Static Synchronous Compensator -STATCOM que regula la tensión en un bus determinado.

La tecnología FACTS provee la posibilidad de: (i) controlar el flujo de potencia y dirigirlo por rutas específicas, (ii) incrementar la capacidad de las líneas de transmisión de forma segura, (iii) reducir la potencia reactiva circulante. Sin embargo, el uso de estos dispositivos introduce una dinámica en los parámetros de los elementos pasivos de la línea de transmisión, impactando a los sistemas de protección y control del sistema. El cambio en la impedancia de la línea, ángulo de fase, magnitud de voltaje, corrientes de carga y transitorios electromagnéticos inducidos por la falla son ejemplo de ello [1].

También se puede presentar problemas de estabilidad del sistema de potencia, ya que debido a la presencia de dispositivos FACTS, las líneas de transmisión son llevadas a su límite de cargabilidad, y al presentarse un cambio en la topología del sistema (pérdida de un enlace importante) puede ocasionar que el sistema tienda a la inestabilidad de ángulo de rotor.

El desempeño de la protección de distancia se ve afectado por distintos factores, el error en la impedancia medida debido a la impedancia serie de la falla, la impedancia paralelo de las cargas, la impedancia inyectada por acoplamiento magnético mutuo de conductores cercanos, donde estas impedancias pueden causar un error considerable, especialmente en segundas y terceras zonas[2]. Otra fuente de error en la medición de impedancia es debido a los dispositivos FACTS, donde el relevador ve este dispositivo como una fuente intermedia y por lo tanto la impedancia vista por el relevador se ve amplificada debido a la aportación del dispositivo FACTS presentando un error en la medición de la impedancia aparente.

En el presente trabajo se analiza el error en la impedancia aparente medida por un relevador de distancia cuando son utilizados dispositivos FACTS. La compensación se obtiene mediante modificaciones de diseño de la característica de operación del relevador permitiendo mejorar el desempeño de la protección.

2. ESTRUCTURA FUNCIONAL

El relevador de distancia basa su principio de operación en la verificación de umbrales de las señales de comparación, formadas de las señales eléctricas provenientes de los transformadores de instrumento, y de la confirmación de la condición de disparo mediante retardos intencionales.

2.1. Esquemas de Comparación

Los órganos de medición son los encargados de convertir las señales eléctricas en señales de comparación y son de vital importancia en los relevadores de protección, ya que a partir de las señales eléctricas provenientes de los transformadores

de instrumento se define la característica de operación del relevador, la cual establecerá la capacidad de detección de falla y seguridad para tolerar condiciones normales del sistema [3].

La verificación de la condición de operación la realiza en el comparador de fase o comparador de amplitud [3]. Las señales de entrada de los órganos de medición en una forma general toman la siguiente forma:

$$\begin{aligned} S_1 \text{ ó } S_O &= k_1 \angle \alpha_1 \cdot V_r \angle 0^\circ + Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r \\ S_2 \text{ ó } S_R &= k_2 \angle \alpha_2 \cdot V_r \angle 0^\circ + Z_{R2} \angle \theta_2 \cdot I_r \angle -\phi_r \end{aligned} \quad (1)$$

donde S_1 y S_2 son las señales de entrada para un comparador de fase, S_O y S_R son las señales de entrada para un comparador de amplitud., k_1, k_2 son constantes de diseño, Z_{R1} es la impedancia replica de la línea y Z_{R2} es la impedancia que en producto con la I_r resulta en un voltaje de polarización e I_r y V_r son las señales eléctricas de entrada las cuales se actualizan en dependencia de la frecuencia de muestreo y el desplazamiento de la ventana de datos.

En la Fig. 1 se muestran los dos tipos de comparadores que se utilizan en el diseño del relevador de distancia, el comparador de amplitud es un dispositivo cuya operación es determinada por la comparación de las dos señales S_O y S_R (señal de operación y polarización), cuando se cumpla la siguiente relación $|S_O| > |S_R|$ el relevador entrará en operación, y el límite de operación esta establecido por $|S_O| = |S_R|$. El comparador de fase realiza una comparación de las señales de operación S_1 y polarización S_2 ($\beta = \arg.(S_1/S_2)$). Cuando β se encuentre dentro de los límites de β_1 y β_2 ($-\beta_1 < \beta < \beta_2$), el relevador entrará en operación.

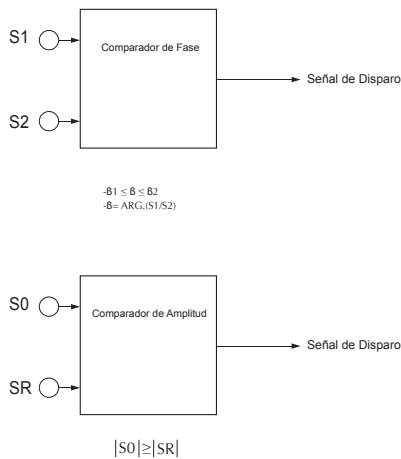


Figura 1: Representación esquemática del comparador de fase y el comparador de amplitud.

En el comparador de amplitud (ver Fig. 2) se ignora el ángulo de fase de las señales y, únicamente con la relación de la magnitud de las señales de operación S_O y restricción (S_R) se realiza la comparación de las señales para determinar la condición de operación.

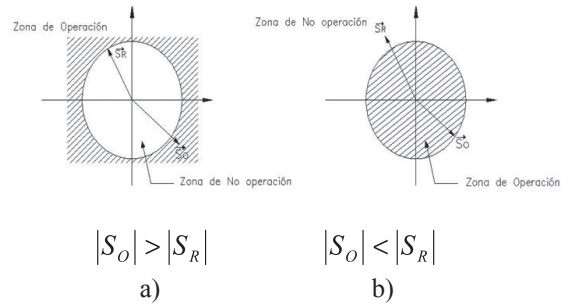


Figura 2: Condición de operación para un esquema de comparación de amplitud. a) Órgano de máxima, b) Órgano de mínima.

El comparador de fase responde al desfaseamiento del ángulo β entre las señales de entrada (S_1 y S_2); cuando S_1 este en adelanto con respecto a S_2 se tendrán valores positivos de β .

La operación del relevador es independiente de las amplitudes de S_1 y S_2 , esto quiere decir que se ignora el valor de las amplitudes y se considera únicamente el ángulo de fase. La zona de operación es la comprendida entre ambos segmentos de recta que representan las señales de S_1 y S_2 (ver Fig. 3).

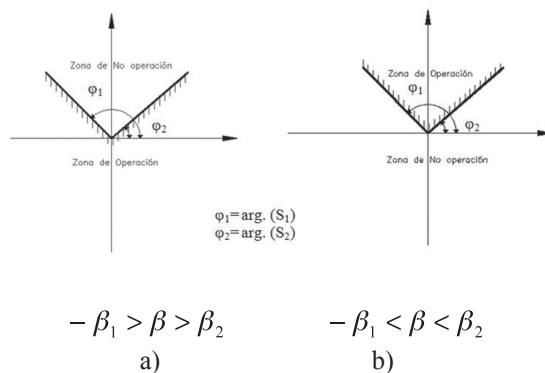


Figura 3: Condición de operación para un esquema de comparación de fase. a) Órgano de máxima, b) Órgano de mínima.

Los límites angulares β_1 y β_2 del comparador de fase se conocen como ángulos coincidentes, donde el límite de operación es $\beta_1 = \beta_2$.

2.2. Diseño de Características de Operación

Las características de operación es la forma de representación gráfica de cada relevador de distancia (ver Fig. 5). Para cada relevador de distancia se tienen diferentes constantes de diseño para definir las características de operación [Mho, Mho desplazado, impedancia, impedancia-ángulo, direccional]. También se pueden formar características con la combinación de dos o más comparadores (características híbridas), como la tipo cuadrilateral, multilateral, elíptica, etc.

Tanto para el comparador de fase como el comparador de amplitud, se tiene la siguiente relación al realizar la comparación de las dos señales de operación y polarización, donde $k=(S_1/S_2)$ ó (S_0/S_R) :

$$\frac{Zr-a}{Zr-b} = k \quad (2)$$

donde:

$$a = -(Z_{R1} \angle \theta_1) / (k_1 \angle \alpha_1) \quad b = -(Z_{R2} \angle \theta_2) / (k_2 \angle \alpha_2)$$

donde k es un número complejo, así como a y b , y Zr es la impedancia vista por el relevador. En la Fig. 4 se puede observar como es posible formar las características de operación como la tipo Mho en base a las constantes de diseño estableciendo el lugar geométrico de la comparación de las señales de operación y polarización.

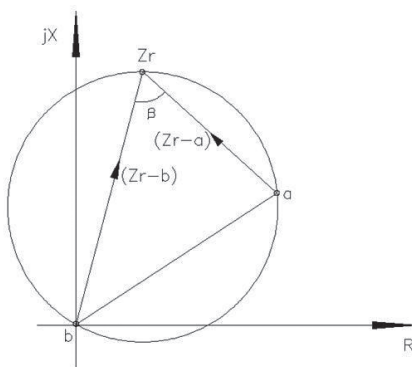


Figura 4: Lugar geométrico de la comparación de las señales de operación y polarización $k = (Zr-a)/(Zr-b)$.

Con el algoritmo desarrollado es posible crear características de operación tipo híbridas con el uso de varios comparadores de fase y así crear características que puedan ser tolerables a los problemas que se presentan de detección de la falla y a disparos por incremento de carga en relevadores de distancia (ver Fig. 6).

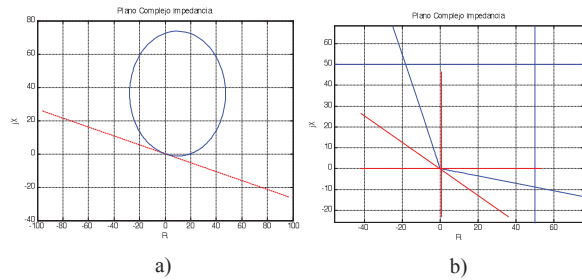


Figura 5: Características de operación del relevador de distancia. a) Característica tipo Mho b) Característica tipo cuadrilateral utilizando 3 comparadores de fase, un comparador tipo direccional, y dos tipo reactancia.

El diseño de características híbridas con diversos comparadores presenta cierta desventaja cuando se utiliza un relevador analógico ya que el diseño de la característica híbrida es más complicado debido a la utilización de los elementos mecánicos. En los relevadores digitales es posible realizar el diseño de características híbridas a nivel de Firmware, sin embargo es necesario evaluar el esfuerzo computacional ya que se puede ver amplificado cuando se presente una falla trifásica, ya que se ejecutarán los 6 algoritmos del relevador de distancia que representan los 3 relevadores de fase y los 3 relevadores de tierra.

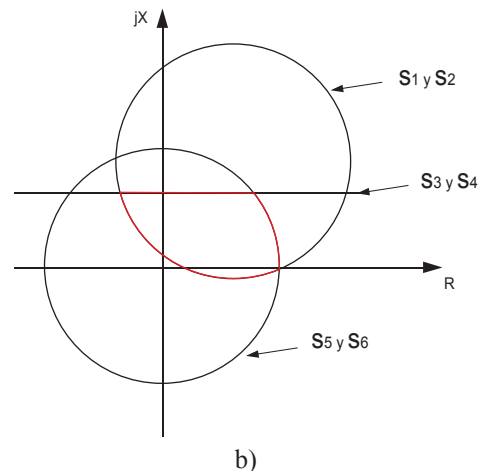
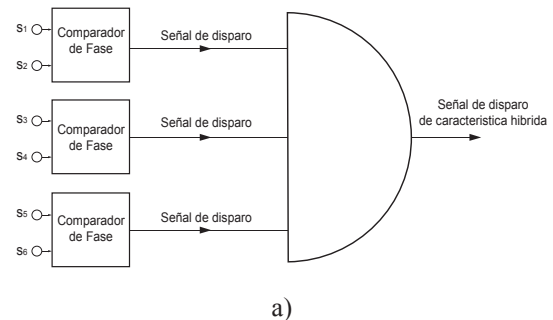


Figura 6: Característica de operación híbrida utilizando 3 comparadores de fase. a) Estructura lógica de la característica híbrida. b) Característica híbrida (línea) marcada) formada por 3 comparadores.

2.3. Decisión de disparo

Ante una condición de falla que sea altamente irregular debido al error introducido por el procesamiento digital de las señales de entrada y por la propia evaluación del evento eléctrico, ya sea falla u oscilación de potencia (ver Fig. 7), el relevador debe de tomar un criterio de decisión para la operación y ejecución de la apertura de interruptores, con esto se pretende tener un grado de mitigación del error introducido en la etapa de pre-filtrado al confirmar mediante el número de muestras de entrada la operación del relevador (filtrado digital de las señales de entrada).

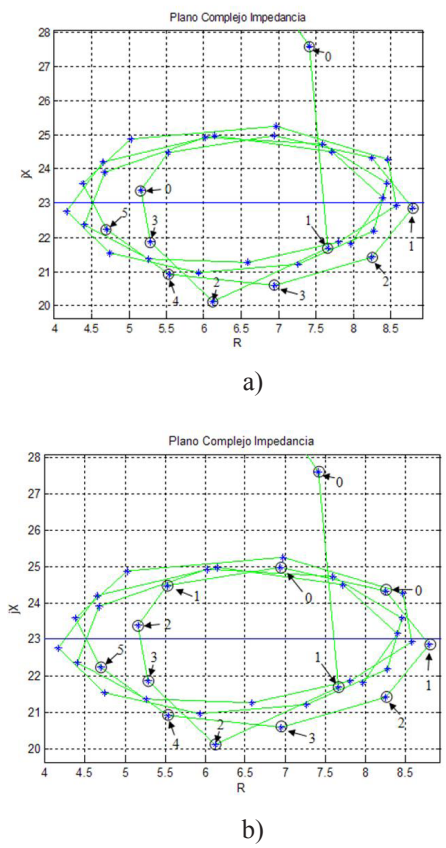


Figura 7: Decisión de disparo para una trayectoria de impedancia de un evento de falla. a) Modo RESET. b) Modo DECREMENTAL.

Se presentan dos criterios para la condición de decisión de disparo del relevador, el modo reset y el modo decremental.

1. En el modo RESET si una cantidad definida de muestras han entrado a la característica de operación y esa cantidad de muestras que entran es igual o mayor a la definida, el relevador mandará el disparo, pero si la cantidad de muestras que entran no superan la cantidad de muestras definidas y estas salen de la característica, el contador es reinicializado

hasta que vuelvan a entrar muestras a la característica de operación.

2. El modo DECREMENTAL consiste en que después de que las muestras penetran en la característica, cada muestra que salga de la zona de operación, se decrementará el contador. Se tiene entonces una memoria de la penetración previa de la impedancia aparente. De igual manera que el modo RESET si una cantidad de muestras definida penetra en la zona de operación el relevador mandará el disparo.

El criterio de decisión de disparo es importante en la operación del relevador ante condiciones de oscilación de potencia donde la trayectoria de impedancia aparente que penetra en la característica de operación puede salir, este criterio ayuda a discriminar junto con el esquema 78 entre una oscilación de potencia y una falla evitando así una operación incorrecta del relevador.

En la Fig. 8 se presenta el diagrama funcional de un relevador de distancia, donde el primer paso es definir el tipo de característica de operación a evaluar seleccionando las constantes de diseño adecuadas para el tipo de característica, este proceso es realizado fuera de operación OFF- LINE y es definido por el fabricante; en la siguiente etapa se adquieren las señales eléctricas provenientes de los transformadores de instrumento (Voltaje y corriente), resultado del procesamiento digital de las señales se obtienen los fasores para cada muestra de entrada; a partir de estas señales se forman las señales de comparación y se determina la condición de operación, y por último se selecciona el criterio de decisión de disparo.

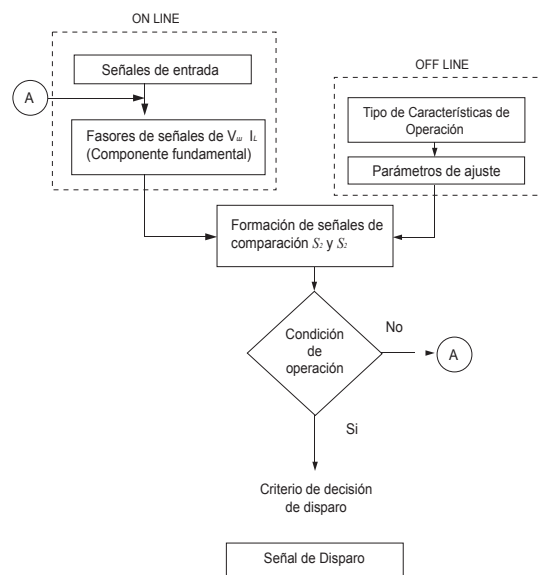


Figura 8: Diagrama funcional de un relevador de distancia.

3. ERROR EN LA MEDICIÓN DE LA IMPEDANCIA APARENTE

3.1. Error por efecto de la Resistencia de Falla

Un error importante que se presenta en la determinación de la impedancia aparente es el efecto por resistencia de falla, la impedancia medida por el relevador de distancia esta en función de la distancia de la ubicación del relevador hasta la falla, donde la impedancia aparente comprende la impedancia de la línea entre el relevador y la resistencia de falla. Al tener el efecto de la resistencia de falla se presenta un error en la medición de la impedancia debido a la corriente de carga que fluye a través del relevador y no a través de la falla (ver Fig. 9), así como también el efecto de la corriente de falla desde una fuente que se encuentra mas allá de la falla y que no es vista por el relevador [2].

También se presentan otros errores en la medición de la impedancia aparente, como el efecto de inducción mutua entre conductores, estos errores no son evaluados en este trabajo. Debido a que no es posible determinar la magnitud del error de la resistencia de falla debido a que se presenta como un error en la medición de la impedancia aparente de tipo transitorio en el instante en que ocurre la falla, esto dificulta la estimación de la magnitud del error en la medición de la impedancia aparente.

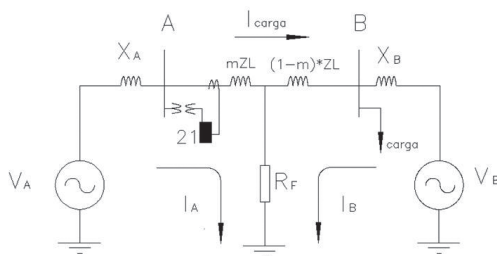


Figura 9: Error en la medición debido a la resistencia de falla.

La impedancia vista por el relé mostrado en la Fig. 9 es la siguiente:

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = mZ_L + \frac{I_B}{I_A} \cdot R_F \quad (3)$$

donde la relación $\frac{I_B}{I_A}$ es el factor de amplificación del error debido a la aportación de la fuente que se encuentra más allá de la falla [2,4].

En la Fig. 10 se puede observar el error introducido en la impedancia aparente utilizando

una característica tipo mho ajustada al 80% de la impedancia de la línea (ajuste de zonal), en la Tabla 1 se muestran los datos del sistema donde utilizando el sistema de la Fig. 9 se varía la ubicación de la falla a lo largo de la línea. En la Fig. 10 se observa que conforme la falla se acerca al extremo receptor de la línea el factor de amplificación del error será mayor debido a la aportación de la fuente receptora V_B , presentando subalcance a la segunda zona de protección. Por lo tanto, la Fig. 10 representa un subalcance a la segunda zona de protección, lo cual esta condición representa un problema de detección de la ubicación de la falla.

Tabla 1: Datos del sistema a evaluar.

Datos del sistema	Caso 1
Resistencia de Falla	$R_f=2 \Omega$
Impedancia de la línea	$Z_L=56.64/_86.33^\circ \Omega$
Reactancia de la fuente VA	$X_A=j*45$
Reactancia de la fuente VB	$X_B=j*0.07$
Voltaje de la fuente VA	$V_A=230KV / _25^\circ$
Voltaje de la fuente VB	$V_B=230KV / _0^\circ$

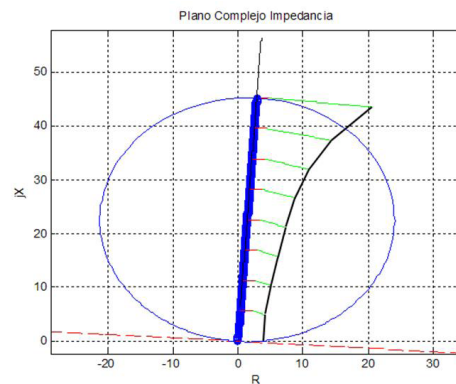


Figura 10: Error en la medición debido a la resistencia de falla ante una característica tipo MHO.

3.2. Error por efecto de Dispositivos FACTS

Además de los errores que se mencionaron anteriormente, el relevador de distancia presenta errores apreciables ante la inclusión de los dispositivos FACTS al sistema de potencia; ya que estos dispositivos varían la impedancia de la línea para aumentar su capacidad de transmisión de energía [5]. Por lo tanto cuando ocurre una falla en la zona protegida, el relevador verá la impedancia de la línea más la impedancia del dispositivo (dependiendo de la ubicación del dispositivo, si se encuentra dentro o

fuera del lazo de falla), por lo tanto se presenta un error en la medición [6].

En la Fig. 10 se muestra el sistema a evaluar donde el UPFC se encuentra ubicado al 50% de la línea. El dispositivo UPFC consta de un elemento serie y un elemento shunt, donde el elemento serie mantiene una determinada transmisión de potencia en la línea y el elemento shunt mantiene regulada la tensión de la línea, de acuerdo a las condiciones de la Tabla 2 se evalúa la aportación de la corriente de falla del dispositivo UPFC en el instante en que ocurre la falla, para evaluar la magnitud del error en la medición de la impedancia aparente vista por el relevador de distancia.

Tabla 2: Condiciones iniciales del sistema maquina-barra infinita incluyendo un UPFC en el sistema.

Condiciones iniciales	(P.U.)
Carga	PL=0.3 QL= 0.125
Impedancia de la línea	ZL=0.03/_86
Impedancia de la línea 2-3	XtE=0.5*ZL
Impedancia de la línea 4-1	XBv=(m-0.5)*ZL
Resistencia de Falla	Rf=0.005
Reactancia de elemento shunt	XE = 0.005
Reactancia de elemento serie	XB = 0.005
Reactancia síncrona en eje q	Xq = 0.30
Reactancia síncrona en eje d	Xd = 0.32
Reactancia transitoria en eje d	Xpd=0.120
Reactancia transitoria en eje q	Xpq = 0.30
Constante de inercia	H = 3.5;
Factor de amortiguamiento	D = 0
Constante de tiempo de circuito abierto en eje d	Tpd0 = 4.50
Constantes del sistema de excitación	Ka = 25 Ta = 0.05
Capacitancia del condensador de enlace	Cdc = 2.0
Control proporcional-integral de Vcd	Kp = 1 Ti=0.1
Voltaje en nodo 2	V2=1.0484 + j*0.0575
Voltaje en nodo 3	V3=1.0337 + j*0.0517
Voltaje en la fuente shunt	VE=1.0294 + j*0.0515
Voltaje en la fuente serie	VB=0.0327 + j*0.0489
Voltaje en el nodo 1	V1=1.0

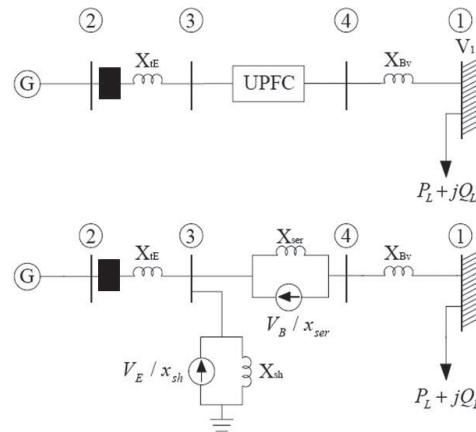


Figura 11: Sistema de 4 nodos, donde se ubica el UPFC al 50% de la línea de transmisión.

3.2.1. Evaluación del Impacto del UPFC

Se utilizó el modelo del UPFC en un sistema máquina-barra infinita (ver Fig. 11) utilizando un modelo de tercer orden, con excitador sencillo y un UPFC, incluyendo la dinámica de Vcd, utilizando un control proporcional integrador para controlar el voltaje Vcd.

En la Tabla 2 se muestran los datos del sistema de la Fig. 11, la falla ocurre en el nodo 1, donde se varía el tramo de impedancia de la línea X_{Bv} en función de la ubicación de la falla (entre 60% y 80%) para observar el impacto del dispositivo en la impedancia vista por el relevador.

En la Fig. 12 se observa el impacto del UPFC en la impedancia medida por el relevador desde el bus 2 y cuando la falla ocurre al 80% de la línea la zona 1 debe de detectar la falla ya que se encuentra dentro de su zona de protección, debido a la inclusión del UPFC en el sistema de potencia el relevador ve un error en la impedancia aparente medida de acuerdo a la ecuación (4), presentando subalcance a la segunda zona de protección.

$$Z_r = 0.5 * Z_L + \frac{I_{shunt}}{I_{relevador}} \left(m1 - \overset{Z_{FACTS}}{\underbrace{0.5}} \right) Z_L + \frac{I_{serie}}{I_{relevador}} R_f \quad (4)$$

Donde I_{shunt} es la aportación del elemento shunt del UPFC y la I_{serie} es la aportación del elemento serie, Z_{FACTS} es la ubicación del dispositivo en la línea y $m1$ es la ubicación de la falla.

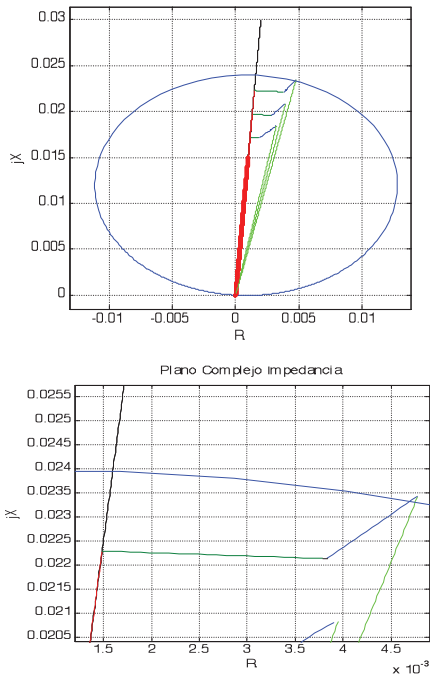


Figura 12: a) Error en la medición debido al impacto del UPFC así como el efecto de la resistencia de falla ante una característica tipo MHO. b) Acercamiento de a).

Tabla 3: Condiciones iniciales del sistema maquina-barra infinita incluyendo un STATCOM en el sistema.

Condiciones iniciales	(P.U.)
Carga	PL=0.3 QL= 0.125
Impedancia de la línea 2-3	xlb=(m1-0.5)*0.035
Reactancia de transformador de acoplamiento del STATCOM	xe= 0.010
Impedancia de la línea 1-2	xtl= 0.017
Resistencia de Falla	Rf=0.005
Reactancia transitoria en eje d	xpd= 0.025
Reactancia transitoria en eje q	xpq= 0.020
Reactancia síncrona en eje d	xd= 0.065
Reactancia síncrona en eje q	xq= 0.055
Angulo de fase del STATCOM (rad)	psi= 0.034
Constante de tiempo en circuito abierto eje d	tpd0= 6.0
Constante de tiempo en circuito abierto eje q	tpq0= 0.535
Ganancia del sistema de excitación	ka= 50
Constante de tiempo del sistema de excitación	ta= 0.02
Condición inicial de la relación de modulación de amplitud	m0 = 1.013
Valor de capacitancia del STATCOM	Cdc= 1.0
Constante de Inercia	H = 6.4
Factor de amortiguamiento	D = 2

Voltaje nodo 3	V3 = 1
Voltaje del nodo donde está conectado el StatCom	V2 = 1.013
Angulo delta inicial del generador (rad)	del0= 0.134
Voltaje transitorio de eje d inicial	epd0= 0.011
Voltaje transitorio de eje q inicial	epq0= 1.054
Condición inicial del voltaje del capacitor del STATCOM	vcd0= 1.0
Voltaje de campo inicial	efd0 = 1.060

3.2.2. Evaluación del Impacto del STATCOM

En esta sección se evalúa el impacto del STATCOM en la operación del relevador de distancia donde se utiliza el sistema máquina-barra infinita. En la Tabla 3 se presentan los datos del sistema de la Fig. 13.

La falla ocurre en el nodo 3 donde se varía de igual manera la impedancia de la línea X_{lb} en función de la ubicación de la falla (entre 60% y 80%) para observar el impacto del dispositivo en la medición de la impedancia aparente vista por el relevador. La impedancia vista por el relevador es:

$$Z_r = 0.5 * Z_L + \frac{I_{LS}}{I_{relevador}} (m1 - \underbrace{0.5}_{Z_{FACTS}}) Z_L + \frac{I_{LB}}{I_{relevador}} R_f \quad (5)$$

donde I_{LS} es la corriente que aporta el STATCOM, $I_{relevador}$ es la corriente que ve el relevador (i_{iL}), y la i_{LB} es la corriente en el segundo tramo de la línea.

Como se observa en la Fig. 14, conforme se varía la posición de la falla se presenta una mayor aportación de corriente, por lo tanto el factor de amplificación debido al impacto del dispositivo o la relación $I_{LS}/I_{relevador}$ se ve amplificado. La impedancia vista por el relé dada la ecuación (5), cuando la falla ocurre al 80% de la línea, es incrementada; se presenta un subalcanse a la segunda zona de protección operando el relevador de forma incorrecta.

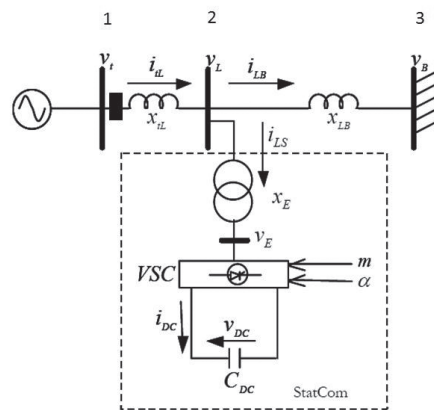


Figura 13: Sistema de 3 nodos, donde se ubica el STATCOM al 50% de la línea de transmisión.

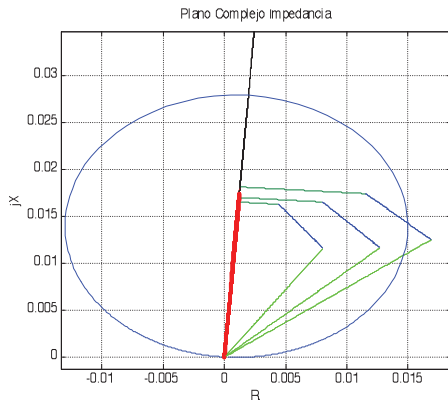


Figura 14: Error en la medición debido al impacto del STATCOM así como el efecto de la resistencia de falla ante una característica tipo MHO.

3.3. Evaluación del Impacto de un prototipo de STATCOM

En esta sección se evalúa la operación del relevador de distancia en laboratorio utilizando el prototipo STATCOM ante una falla en la fase A cuando se ubica en el sistema que se muestra en la Fig. 15.

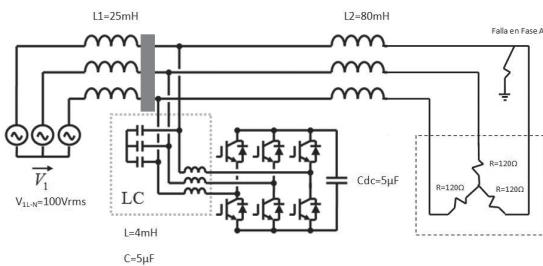


Figura 15: Prototipo del Sistema de Laboratorio.

En la Fig. 16 se puede observar en la impedancia medida sin FACTS, cuando el dispositivo no se encuentra en operación la falla es detectada por el relevador utilizando una característica cuadrilateral. Cuando el dispositivo FACTS (STATCOM) se encuentra en operación, la trayectoria de impedancia aparente vista por el relevador presenta un error, donde este error es visto como un incremento en la impedancia debido a la aportación del STATCOM ante la falla, por lo tanto se presenta el problema de detección de la falla.

En la Fig. 16 se observan las trayectorias de impedancia aparente con dispositivo FACTS y sin dispositivo FACTS donde es apreciable que se presenta un error en la medición debido a la inclusión del dispositivo en el sistema; una posible solución a este problema es el uso de características híbridas para que el relevador sea más tolerante ante el error

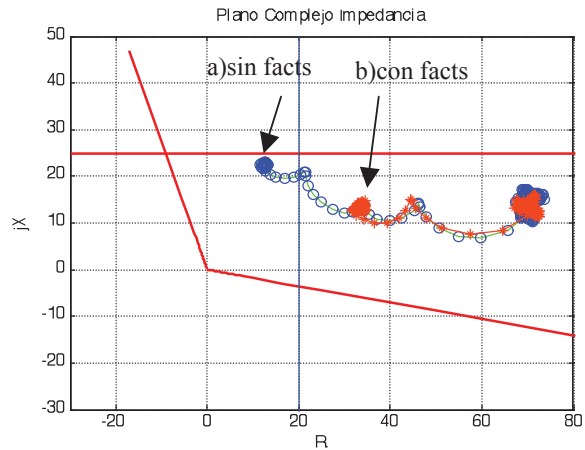


Figura 16: a) Trayectoria de impedancia aparente vista por el relevador durante la falla cuando el STATCOM no se encuentra en operación. b) Trayectoria de impedancia aparente vista por el relevador cuando el STATCOM se encuentra en operación.

introducido, también con el uso de características híbridas dinámicas, es posible compensar el error tanto del dispositivo FACTS como el error por efecto de la resistencia de falla como se muestra en la Fig. 17, por lo que la modificación en el diseño del relevador es necesaria para minimizar el error ante el impacto de los dispositivos FACTS.

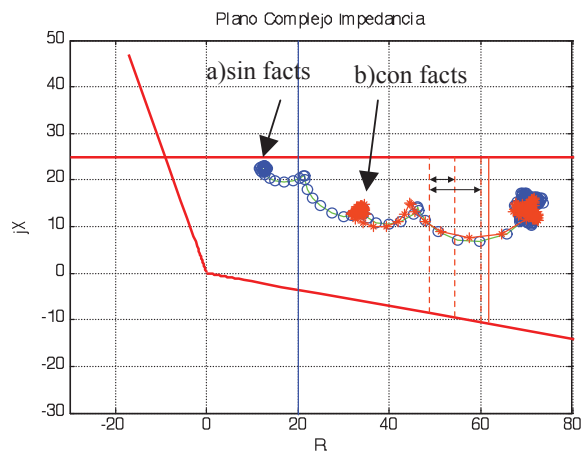


Figura 17: Ajuste dinámico de la característica cuadrilateral para la compensación del error introducido por dispositivos FACTS (Prueba STATCOM).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La evaluación del impacto de FACTS en la medición de la impedancia aparente vista por el relevador es de importancia debido a su contribución a la falla, y a que su tiempo de respuesta ($\frac{1}{2}$ ciclo utilizando un control proporcional integrador) coincide con el tiempo de operación del relevador presentándose un error en la medición de impedancia. Por lo tanto, el relevador de distancia se ve afectado

en su operación al ver una impedancia aparente mayor a la cual se encuentra ajustado durante la condición de falla, por consiguiente el error introducido por dispositivos FACTS, así como el efecto de resistencia de falla, ocasiona un mal desempeño en la operación del relevador de distancia.

Una posible solución a este problema es el diseño de características híbridas que sean tolerables al impacto de los dispositivos FACTS en la impedancia aparente medida por el relevador; otra alternativa es incorporar canales de comunicación de tal forma que el relevador vea el estado de operación del dispositivo y así ajustar su característica de operación para las condiciones de operación del sistema de potencia. Otra alternativa más para la solución a este problema es el realizar la compensación de la característica ante el incremento de carga y que se ajuste automáticamente, realizando este cambio en el diseño del relevador, este será más tolerable ante el error introducido por dispositivos FACTS.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H.F. Wang, X.Y. Zhou, "The Impact of STATCOM on Distance Relay", 15th PSCC, Liege, 22-26 August 2005.
- [2] A. R. Van C. Warrington, "Protective Relays their theory and practice", volume two, Chapman and Hall London, England.
- [3] V Cook, "Analysis of Distance Protection", RSP Wales, England.
- [4] Gerhard Ziegler, "Numerical Distance Protection Principles and Applications", Siemens AG, Berlin and Munich.
- [5] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", IEEE Press.
- [6] Sankara Subramanian, Anthony Perks, Sarath B. Tennakoon, "Protection Issues associated with the proliferation of static synchronous compensator(STATCOM) type FACTS devices in power systems", pp. 846-850.
- [7] P.K. Dash, A.K. Pradhan, Ganapati Panda, "Adaptive Relay Setting for Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume 15 Issue: 1, Jan 2000 Page(s): 38-43.
- [8] T. Singh Sidhu, R.K. Varma, P.K. Gangadharan, "Performance of Distance Relays on shunt-FACTS compensated transmission lines", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, No. 3, July 2005, pp. 1837-1845.
- [9] Julio C. Rosas-Caro, Juan M. Ramírez, Pedro M. García Vite, Antonio Valderrábano, Nojja V. Vanegas, "Control de acondicionadores de potencia y dispositivos FACTS", CIIE 2008, Páginas: 1-7.
- [10] Julio C. Rosas-Caro, Juan M. Ramírez, Pedro M. García Vite, "Aplicaciones de dispositivos FACTS y acondicionadores de potencia", CIIE 2008, Páginas: 1-7



Luis Alonso Trujillo Guajardo.- Nació en Monterrey, Nuevo León, México, en 1984. Se graduó de Ingeniero Mecánico Electricista en la Universidad Autónoma de Nuevo León en el 2005 y

obtuvo el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con orientación en sistemas eléctricos de potencia en agosto del 2008 en el Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Actualmente es estudiante de Doctorado en Ingeniería Eléctrica en el Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, y labora en una empresa del ramo de mantenimiento de motores eléctricos industriales Grupo Marro de México como consultor.



Arturo Conde Enríquez.- Nació en Naucálpán de Juárez, Edo. de México, México, en 1971. Se graduó de Ingeniero Mecánico Electricista en la Universidad Veracruzana en 1993. Obtuvo la Maestría en Ciencias de la

Ingeniería Eléctrica y el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma de Nuevo León en 1996 y 2002 respectivamente. Profesor Investigador del Programa de Postgrado en Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.