

# Dispositivos para el mejoramiento de la calidad de la energía eléctrica: STATCON y DVR

## STATCON and DVR devices to improve electric energy quality

Mago\*, Maria; Chourio, Rafael; Villegas, Angel y Guillén, Francisco.

Área de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería,  
Universidad de Carabobo. Valencia. Venezuela

\*mmago@uc.edu.ve

Recibido: 06-02-2007

Revisado: 31-01-2008

### Resumen

*La mayor parte de las perturbaciones que se producen en las redes eléctricas consisten en breves caídas de tensión, la inmensa mayoría de las cuales se deben a los cortocircuitos en algún punto de la red que afectan una sola fase. La respuesta a este problema es el restaurador dinámico de tensión o DVR, el cual detectará y compensará instantáneamente las caídas de tensión, de forma que no se notará que ha sucedido. Existe también el compensador sincrónico estático o STATCON que inyecta energía reactiva a la red para mantener el voltaje nominal y además ayuda a reducir las pérdidas del sistema eléctrico. Ambos dispositivos son ampliamente recomendados como herramientas para el mejoramiento de la calidad de energía al momento de alimentar cargas sensibles a transitorios de tensión.*

**Palabras clave:** Restaurador, compensador, calidad, energía, perturbación.

### Abstract

*Most of the disturbances that take place in the mains consist of brief falls of tension, where the immense majority of the same ones must to the short circuits in some point of the network which they affect a single phase. The answer to this problem is the Dynamic Voltage Restorer or DVR, which will instantaneously detect and compensate the tension falls, so that it will not notice that it has happened. The Static Synchronous Compensator or STATCON also exists that injects reactive energy to the network to maintain the voltage nominal and in addition aid to reduce the losses of the electrical systems. Both devices widely are recommended like tools for the improvement of the quality of energy at the time of feeding sensible loads transitory on tension.*

**Key words:** Restorer, compensator, quality, energy, perturbation.

### 1 Introducción

Los sistemas de transmisión y distribución de las empresas eléctricas han comenzado un período de cambio, debido principalmente a la aplicación de la electrónica de potencia, microprocesadores y comunicación en general. Esto los ha llevado a una operación más segura, controlable y eficiente, que conducen al desarrollo de "Sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna" (FACTS) (Tremont, 2003). Estos sistemas se caracterizan por tener la capacidad de transferir energía entre un elemento almacenamiento y el sistema de transmisión de potencia (Halpin, 1996). El surgimiento de este tipo de tecnologías ha sido motivado principalmente por la aparición de cargas y dispositivos elec-

trónicos sensibles a desviaciones transitorias ocurridas en el sistema de distribución de energía.

La Fig. 1 muestra algunos de los dispositivos utilizados para el mejoramiento de la calidad de energía en la actualidad (IEEE, 2005). Entre los dispositivos que abarcan al conjunto de equipos con capacidad de controlar el flujo de potencia empleando dispositivos semiconductores de potencia para controlar el flujo en los sistemas de C.A. tenemos al Statcon y a los Restauradores Dinámicos de Voltaje (DVR).

### 2 El condensador estático básico.

Un condensador estático es un dispositivo compuesto

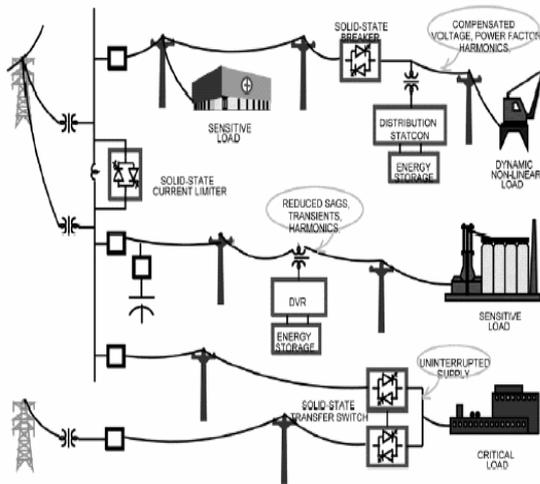


Fig. 1. Dispositivos para el mejoramiento de la calidad de energía en mediana tensión

Principalmente de dos componentes: un convertidor AC-DC y otro DC-AC (ver Fig. 2). El convertidor AC-DC empleado puede ser del tipo 6,12, o 24 pulsos según los niveles de armónicos deseados. La conversión DC-AC es efectuada mediante un inversor modulador por PWM debido a su baja producción de armónicos sobre el lado AC y por su habilidad de generar diferentes formas de onda para aplicaciones como la cancelación de armónicos (Halpin, 1996).

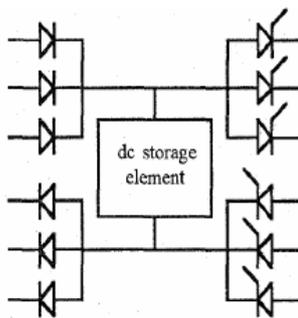


Fig. 2. Estructura básica de un condensador estático

En los sistemas de distribución se consideran dos variantes del este arreglo básico, esto da origen a los dispositivos conocidos como Condensador Estático de Distribución (conexión paralela) y Restaurador Dinámico de Voltaje (conexión serie).

### 3 ¿Qué es el STATCON?

El Condensador de Distribución Estático conocido también como STATCON o DSC es un dispositivo que inyecta energía reactiva a la red de distribución en la cual está conectado. En su forma más simple el DSC inyecta un voltaje en fase con la red previendo de esta forma regulación

del voltaje y la potencia reactiva. Su operación se fundamenta en que al controlar el flujo de potencia reactiva ayuda a reducir las corrientes de línea y por consiguiente las pérdidas totales del sistema. Simula condiciones reales de operación utilizando algoritmos matemáticos, mejorando la magnitud del voltaje además del margen de estabilidad, pero no ayuda a corregir desequilibrios reales del sistema. Debido a que este dispositivo genera una forma de onda sincrónica, es capaz de generar continuamente compensación variable capacitiva o reactiva hasta un nivel de potencia igual a la nominal del inversor. La Fig. 3 muestra la conexión de un STATCON a la red de distribución.

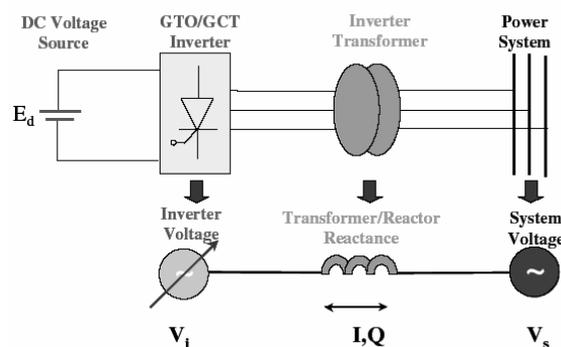


Fig. 3. Diagrama de un STATCON

El principal objetivo de un Statcon en un sistema de potencia es incrementar la capacidad de transmisión de potencia de una red de transmisión dada (desde los generadores hasta la carga), recordando que estos compensadores no pueden generar ni absorber potencia activa y el sistema de transmisión resulta afectado por el control de voltaje. Para esto, el STATCON utiliza el conversor de voltaje SVC (*static var compensator*) como componente electrónico básico en el que se convierte el voltaje DC de un punto al voltaje trifásico con el rendimiento, amplitud, frecuencia y fase requerida.

#### 3.1 Características del STATCON.

Si se controla un compensador estático para regular el voltaje terminal, este puede aumentar la estabilidad transitoria, manteniendo el voltaje de transmisión (en algún punto intermedio apropiado) frente al incremento del flujo de potencia que aparece inmediatamente después que se elimina una falla.

La Fig. 4 es la curva de inyección de corriente reactiva de un STATCON. La corriente  $I_{STATCON}$  es perpendicular al voltaje de suministro ( $V_{UTILITY}$ ). Ya que la magnitud del voltaje del convertidor ( $V_i$ ) es controlable, es posible controlar también la potencia reactiva  $Q$  entregada o sumida de la red (Grünbaum, 2001). La operación básica del STATCON indica que si  $V_i > V_{UTILITY}$ , el dispositivo entrega potencia al sistema. Por el contrario si  $V_{UTILITY} > V_i$  el

STATCON consume reactivo.

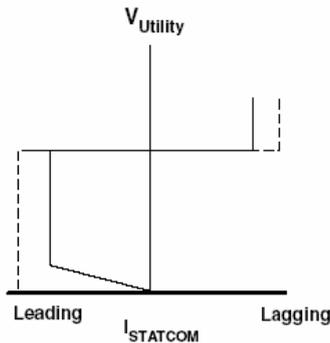


Fig. 4. Característica de operación del STATCON

La conexión a la red de distribución se hace mediante transformadores de distribución ordinarios permitiendo la utilización de estos dispositivos en diferentes niveles de voltajes.

Debido a que el STATCON controla en forma independiente el intercambio de potencia activa y reactiva también permite la amortiguación de las oscilaciones de potencia.

La topología utilizada en el dispositivo está diseñada principalmente para eliminar bajas de tensión debidas a fallas en alimentadores cercanos, reconfiguraciones de las redes de distribución y arranque de motores.

### 3.2 Campos de aplicación.

Las aplicaciones más comunes para los STATCON pueden agruparse en (Suresh, 2002):

- **Reducción del nivel de armónicos.** El DSC o STATCON puede ser utilizado para reducir armónicos en la línea de distribución. Esto se debe a que el uso de inversores con modulación de ancho de pulso de alta frecuencia generalmente basados en IGBTs para sintetizar la señal necesaria, le permite al dispositivo inyectar formas de onda complejas para cancelar los armónicos de voltaje generados por las cargas no lineales (IEEE, 2005). Para esto, el STATCON puede comparar la forma de onda de la línea contra una señal AC de referencia para producir una compensación de armónicos correcta.
- **Corrección del factor de potencia.** Mediante el ajuste de la inyección de reactivo el dispositivo logra mejorar el factor de potencia al poder actuar como un banco de condensadores ajustable.
- **Estabilización del voltaje, mejoramiento de la estabilidad frente a transitorios y control de fluctuaciones.** Los STATCONs permiten reducir el impacto de algunos transitorios de voltaje al mantener su salida estable durante el tiempo que pueda durar la perturbación. Mediante la utilización de un sistema de almacenamiento de energía en forma de voltaje DC y utilizando un interruptor o breaker

de rápida acción conocido como breaker de estado sólido (SSB) es posible suministrar voltaje pleno a las cargas críticas de una instalación aún durante la operación del breaker del propio alimentador donde está instalado el STATCON. En este tipo de aplicaciones, el SSB aísla al STATCON y a su carga quedando esta alimentada enteramente del DSC mientras se despeja la falla. La cantidad de carga que puede ser soportada es determinada por la capacidad en MVA de los inversores del STATCON y por el tiempo durante el cual la carga será mantenida por el sistema de almacenamiento de energía.

- **Incremento de la transferencia de potencia.** El incremento del voltaje por encima de su valor nominal aumenta la potencia transmitida, esto se logra mediante la reducción de la corriente en la línea.
- **Balanceo temporal de voltaje entre las fases.** Aún cuando el STATCON es seriamente afectado por los desbalances permanentes de tensión, puede contribuir al mantenimiento del balance de sistema de forma temporal.
- **Reducción del flicker.** Esta es una aplicación muy típica de estos dispositivos y se fundamenta en el *ride through* de las perturbaciones del voltaje.
- Amortiguación de las oscilaciones de potencia.

### 3.3 Ventajas y desventajas.

#### 3.3.1 Ventajas

- No requieren de componentes inductivos o capacitivos grandes para proveer de potencia reactiva a las líneas de transmisión. Esto resulta en espacios físicos menores que los utilizados con tecnologías como compensadores estáticos de energía reactiva VAR (SVC).
- EL STATCON tiene una capacidad simétrica con respecto a la potencia reactiva inductiva y capacitiva, que en ambos casos es del 50% cada una en forma idéntica.
- Un mismo STATCON puede ser adaptado a diferentes voltajes de distribución.
- El riesgo de condiciones resonantes es muy pequeño a diferencia de los bancos de condensadores u otros medios de corrección de factor de potencia.
- Pueden ser reubicados debido a su notoria independencia de la red de distribución en la que se conectan.
- Pueden operar en dos modos: Control de Corriente y Control de Voltaje. El primero de estos modos le permite operar como regulador de carga, trabajando como filtro activo, corrector de factor de potencia e incluso balancear la carga. Al efectuar control del voltaje, protege contra las perturbaciones, sags, swells, desbalance e incluso breves interrupciones.
- Pueden controlar tanto potencia reactiva como activa.
- Permiten un mejoramiento general de la eficiencia del sistema.
- Son equipos construidos de fábrica de forma modular, esto reduce el trabajo en el campo al momento de su instalación.

- Utilizan convertidores electrónicos encapsulados, lo cual reduce el impacto de l medio ambiente sobre el equipo.

### 3.3.2 Limitaciones

- El sumamente sensible a los desbalances de voltaje. Pequeños desbalances producen corrientes grandes en el compensador.
- Es una solución costosa en algunos casos frente a tecnologías como los SVC así que su uso requiere de un estudio que incluya un análisis del impacto económico.

## 4 ¿Qué debe contener un estudio de estabilidad de voltaje?

- Establecimiento de operación caso base.
- Selección de una lista de contingencias para entregar un voltaje estable al sistema bajo un parámetro de medición definido.
- Margen de estabilidad para sistemas balanceados y contingencias.
- Criterio de estabilidad.
- Plan y aprobación que satisfaga el criterio de operación.

### 4.1 Consideraciones generales para los estudios de estabilidad de voltaje.

- Planeación de cargas con potencia constante en todos los nodos
- Especificar la potencia activa en todos los generadores
- Limitar la potencia reactiva en todos los generadores
- La posición del tap es nominal para todos los transformadores
- La conmutación del Statcon del sistema es instantáneo

## 5 ¿Qué es un DVR?

El Restaurador Dinámico de Voltaje (DVR) es un dispositivo conectado en serie con las líneas de alimentación que se utiliza para la compensación de voltaje en cargas sensibles a perturbaciones en la red de potencia; los DVR's ofrecen protección contra Sags, Swells y distorsiones de la forma de onda de voltaje. Funcionalmente, los Restauradores Dinámicos de Voltaje se basan en un inversor de voltaje basado en modulación de ancho de pulso (VSIPWM) que es capaz de generar o absorber potencia real o activa independientemente de las condiciones del voltaje de AC presente en su salida; para ello, inyecta niveles de voltaje AC en serie y en sincronismo con las tensiones de alimentación provenientes de la red de distribución (Vilathgarmuwa y col.).

### 5.1. Características del DVR

El circuito de potencia de un DVR se muestra en la Fig. 5 (Grünbaum, 2001).

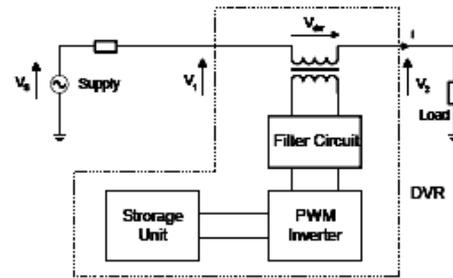


Fig. 5. Diagrama de un DVR

En la Fig. 5 se puede observar que, en general, los DVRs constan de un transformador de inyección conectado en serie con la línea de distribución, un puente inversor de voltaje PWM conectado al secundario del transformador de inyección a través de un circuito de filtrado y un dispositivo de almacenamiento de energía conectado en el enlace DC del inversor. El transformador de inyección es un transformador trifásico conectado a la línea de distribución en configuración delta/abierto (permitiendo secuencias de voltaje positivas y negativas) ó estrella/abierto (de forma de permitir secuencias de voltaje positivas, negativas y cero), donde el lado de alta tensión se halla conectado a las líneas de distribución y el lado de baja tensión se encuentra conectado a la salida del circuito de filtrado. Tal circuito de filtrado consta de filtros pasivos que se utilizan para filtrar los armónicos de alta frecuencia introducidos las frecuencias de trabajo de inversor, pudiendo ser colocados en el lado de alta tensión o de baja tensión de acuerdo a la conveniencia del diseño de los circuitos y algoritmos de control y del propio circuito de filtrado. El circuito inversor se compone de un puente de dispositivos semiconductores (GTO's, IGBT's) cuya modulación de los instantes de encendido y apagado genera la tensión que se inyecta a la línea de distribución para compensar en la carga las variaciones de amplitud, fase y frecuencia que se pudieran presentar en la alimentación; la técnica de modulación utilizada se basa en la modulación de ancho de pulso, entendiéndose que la fidelidad del voltaje de salida depende del comportamiento dinámico del esquema de control del PWM. Finalmente, la unidad de almacenamiento de energía se encarga de proveer la energía suministrada a la carga en el momento de ocurrir una perturbación en la red de alimentación, pudiendo utilizarse baterías, circuitos compensadores (flywheels), condensadores o almacenadotes de energía super magnéticos (SMES) para proveer compensación de potencia real, la cual es esencial cuando ocurren Sags de duración prolongada.

### 5.2 Funcionamiento de los DVR's

En caso de una perturbación de tensión en la red de alimentación eléctrica, el convertidor electrónico de potencia (inversor) inyecta el voltaje apropiado que se requiere

para compensar tal perturbación, tal como se ve en la Fig. 6 -b (Nielsen and col., 2005) donde  $\underline{U}_{pre\_sag}$  es el voltaje en la red de alimentación antes de la ocurrencia del sag,  $\underline{U}_{sag}$  es el voltaje que se presenta en la red en el momento de aparición del sag y  $\underline{U}_{missing}$  es el voltaje que debe ser compensado por el restaurador dinámico de voltaje (DVR). Por lo general, los sags de voltaje son causados por fallas en las líneas de transmisión o distribución, tal como se muestra en la Fig. 6-a. Durante la ocurrencia del sag el voltaje en el punto de acoplamiento común (PCC) la magnitud y fase del voltaje  $\underline{U}_{sag}$  quedan determinadas por las impedancias de la línea que falla y la impedancia de la fuente (Lasseter y col., 1997):

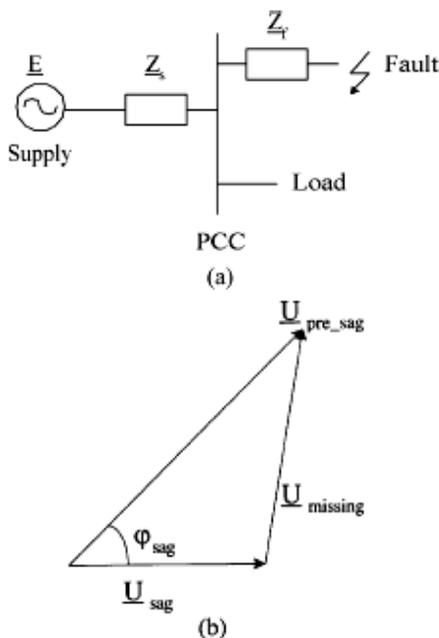


Fig. 6. Origen de los sags de voltaje (Nielsen and col., 2005).

$$\underline{U}_{sag} = \underline{E} \cdot \frac{\underline{Z}_f}{\underline{Z}_f + \underline{Z}_g} \tag{1}$$

donde  $\underline{U}_{sag}$  es el voltaje durante el sag en el PCC,  $\underline{E}$  es el voltaje suministrado por la fuente,  $\underline{Z}_s$  es la impedancia de la fuente de tensión (generalmente la del transformador de distribución) y  $\underline{Z}_f$  es la impedancia de la línea que falla. Como se observa, para mantener la fase y la magnitud del voltaje aplicado a la carga antes del sag se debe compensar el voltaje aplicado por el DVR tanto en magnitud como en fase. Debido a esto, la técnica de control adoptada va a depender de la sensibilidad de la carga a ser protegida con respecto a variaciones de magnitud y fase (Ramasamy y col., 2005). El control in-phase boosting puede aplicarse a

cargas relativamente insensibles a pequeñas variaciones en la fase de la tensión aplicada; utilizando este método de control el DVR inyecta una tensión en fase con la tensión presente anterior a la ocurrencia del sag, con lo cual se aumenta la cantidad de potencia activa que requiere suministrar el DVR además de introducir un pequeño cambio de fase visible desde el punto de vista de la carga. El tipo de control pre-sag compensation busca compensar la fase del voltaje visto por la carga, de forma tal que disminuye la cantidad de potencia activa que debe inyectar el DVR y es capaz de compensar cambios de magnitud y fase durante la ocurrencia de un sag. Existe también una tercera técnica de control conocida como energy optimization, donde además de mantener la magnitud y fase de la tensión desde el punto de vista de la carga, emplea algoritmos de control que permiten minimizar la cantidad de energía activa que inyecta el DVR, con lo cual se obtienen unidades de almacenamiento de energía con elementos más pequeños, baratos y de mayor tiempo de autonomía.

6 DVR versus STATCON.

La Tabla 1 muestra una comparación entre algunas características resaltantes de ambos dispositivos.

Tabla 1. Comparación entre DVR y STATCON

STATCON Se conecta en paralelo	DVR Se conecta en serie
Capacidad de respuesta 2.5 - 5 ms	Capacidad de respuesta de 0.5 a 2.5 ms.
Puede entregar potencia y reactiva para compensar las fluctuaciones	Entrega potencia activa y reactiva de acuerdo a la topología y al sistema de control
Compensa solamente magnitud de voltaje	Puede compensar tanto magnitud como fase de acuerdo al esquema de control
Permite mejorar la calidad de potencia tanta aguas arriba (la red) como hacia abajo (las cargas)	Al conectarse en serie, sólo puede afectar a los dispositivos colocados luego de su punto de instalación.
Trabaja inyectando corriente modificando el flujo de potencia reactiva	Opera mediante la variación de tensión cambiando la impedancia total vista desde el alimentador
El rango de control depende de la impedancia de la línea	Su rango de operación depende de su capacidad de generar tensión.

Para establecer una comparación entre el DVR y el STATCON ante un mismo tipo de falla se toma el ejemplo descrito en (Lasseter y col., 1997), en el cual el sistema de la Fig. 7 es sometido a una falla en el alimentador 2 que

produce la aparición del voltaje mostrado en la Fig. 8 en la salida del transformador A.

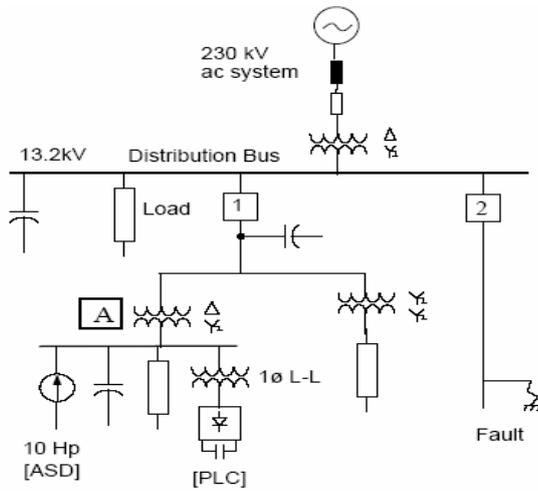


Fig. 7. Sistema Trifásico en falla (Lasseter y col., 1997).

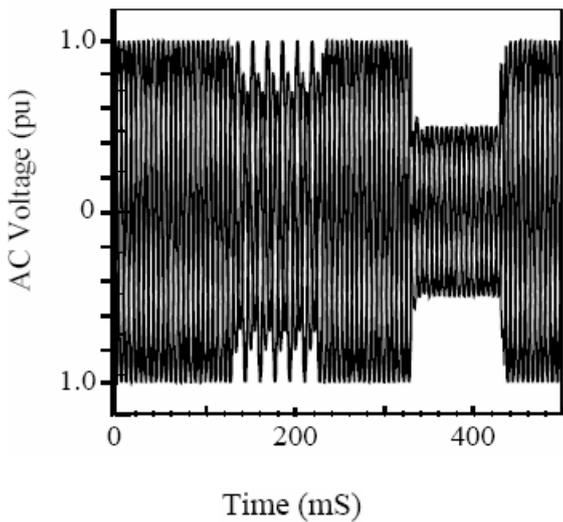


Fig. 8. Variación del voltaje en el transformador A debido a la falla del alimentador 2 (Lasseter y col., 1997).

Ante esta falla las respuestas de ambos dispositivos se indican en las Figs. 9 y 10.

Esta simulación indica con claridad que ambos dispositivos pudieron solventar la falla en el sistema pero de la observación de las gráficas resulta evidente que sus respuestas son diferentes. El DVR presenta variaciones menores en el voltaje AC que se reflejan con claridad en el rectificador monofásico que alimenta a la carga sensible (un PLC) indicando que para esta falla particular, bajo las condiciones simuladas el STATCON exhibe una respuesta

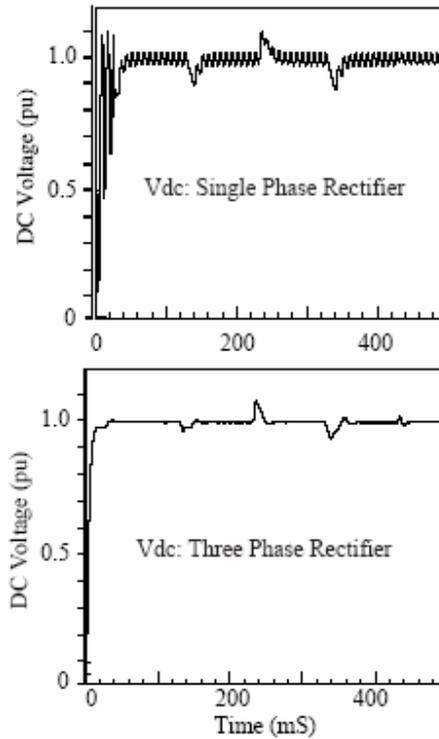


Fig. 9. Respuesta del DVR ante la falla. Arriba voltaje AC en pu. Abajo voltaje del rectificador que alimenta a la carga crítica (Lasseter y col., 1997).

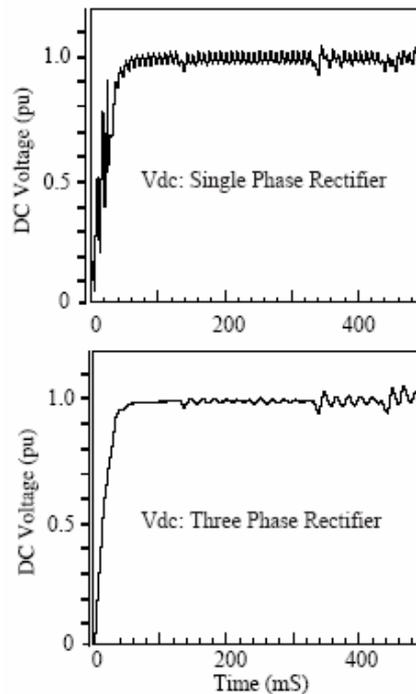


Fig. 10. Respuesta del STATCON ante la falla. Arriba voltaje AC en pu. Abajo voltaje del rectificador que alimenta a la carga crítica (Lasseter y col., 1997).

mas plana frente a la disminución del voltaje de alimentación (Lasseter y col., 1997).

## 7 Conclusiones.

Los dispositivos de calidad de energía eléctrica con funciones DVR no están destinados a sustituir a los sistemas de alimentación sin interrupciones, aún cuando pueden cumplir funciones de UPS si les incluye una fuente de almacenamiento de energía (baterías). Sin embargo, ofrecen una excelente protección contra las perturbaciones de la red eléctrica, son robustos, fiables y de respuesta muy rápida y prácticamente no necesitan mantenimiento (Halpin, 1996). Por otro lado, al no necesitar en algunos casos del almacenamiento de energía permitiendo reducir los costos. Dado que es posible construirlos para potencias relativamente altas, pueden utilizarse en todos los ramos de la industria, no sólo en las líneas de producción sino en fábricas enteras, además de que no interfieren con los ajustes de protección existentes, limitando las corrientes de falla cuando se producen perturbaciones en puntos posteriores de la línea. Es posible, por tanto, instalarlos sin necesidad de modificar los equipos existentes. Su instalación y selección requiere de un estudio de impacto y beneficios. El análisis de la simulación efectuada (Lasseter y col., 1997) muestra que no es posible determinar de manera clara cual de los dos dispositivos: STATCON o DVR será el mejor para todas las aplicaciones y que la selección dependerá de las características propias de la instalación.

## Referencias.

ABB Inc., Electric Systems Consulting Dakotas Wind

Transmission Study, pp. 21.

Daehler P y Affolter R, 2000, Requirements and solutions for dynamic voltage restores, IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting, Singapore.

Grünbaum R, 2001, Improving the efficiency and quality of AC transmission systems, Joint World Bank / ABB Power Systems Paper.

Halpin SM, 1996, Application of double-layer capacitor technology to static condensers for distribution system voltage control, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 11, No 4.

IEEE, 2005, IEEE Recommended practice for powering and grounding electronic equipment, IEEE Standard 1100-2005.

Lasseter R y Hochgraf C, 1997, Unbundling power quality services: technical issues, Proceedings, 30th Annual Hawaii International Conference on System Sciences.

Nielsen J y Blaabjerg F, 2005, A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers, IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol 41, No 5, pp 1272-1280.

Ramasamy A, Iyer R, Ramachandaramuthy V y Mukerjee M, 2005, Dynamic voltage restorer for voltage sag compensation, IEEE PEDS, pp 1289-1294.

Suresh K, 2002, A state of the art STATCON for instantaneous VAR compensation and harmonic suppression to enhance power quality.

Tremont N, 2003, Sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna, Universidad de los Andes.

Vilathgarmuwa M, Perera R y Choi S, Storage energy optimized dynamic voltage rest

