

Cómo especificar o adquirir un Filtro Activo

Pedro Esteban, Santiago Barcón y Luis Carlos Villarreal

Muchas instalaciones hoy en día están expuestas a una gran cantidad de problemas de calidad de energía y desafíos para cumplir con el Código de Red y requerimientos de eficiencia energética, esto es debido a que no están diseñadas para soportar cargas y generadores no lineales, no balanceados y variables que conforman un gran porcentaje de los sistemas eléctricos de potencia modernos.

Estos problemas y desafíos se originan en equipos como variadores de velocidad (VSD por sus siglas en inglés), máquinas de soldadura, transformadores, hornos eléctricos, sistemas de iluminación, sistemas de UPS de doble conversión, cargas altamente dinámicas, cargas monofásicas, cargadores de baterías, generadores a base de combustibles fósiles y fuentes de generación renovables, por mencionar algunos. Eventos como la entrada y salida de capacitores (de bancos de capacitores o filtros pasivos de armónicos existentes), operaciones de re-cierre automático de líneas de transmisión o distribución o el arranque de grandes motores también contribuye a estos problemas y desafíos.

Los filtros activos (FA) son una de las tecnologías en la electrónica de potencia que más rápido ha crecido para resolver los problemas de Calidad de Energía, cumplir con el Código de Red y con los requerimientos de eficiencia energética para una amplia gama de segmentos y aplicaciones. Los FA modernos pueden ser controlados para actuar como generadores de corriente o de voltaje. Estos

pueden conectarse en paralelo o en serie con el sistema eléctrico de potencia. El FA conectado en paralelo se le llama FA en derivación o FA alimentados por corriente y estos son los más ampliamente utilizados en la actualidad. Los FA conectados en serie también son llamados FA alimentados por voltaje. La fuente de conversión de voltaje (VSC) basada en el FA en derivación es por mucho el tipo más común debido a su bien conocida topología, costos razonables y un procedimiento de instalación muy sencillo.

1. Filtros activos en derivación

Soluciones convencionales como los bancos de capacitores, bancos de reactores en derivación y filtros pasivos de armónicos, que consisten en componentes inductivos, capacitivos y resistivos, no siempre responden correctamente a las dinámicas requeridas por los sistemas eléctricos de potencia modernos. Aunque simples en construcción y dependiendo de la aplicación, algunas veces son altamente rentables, estos cuentan con varias deficiencias.

Los FA en derivación fueron desarrollados y comercializados como una solución económica para lidiar con todas estas deficiencias, ofreciendo un desempeño independiente a las propiedades del sistema eléctrico de potencia mientras les permite cumplir con los requerimientos en tiempo real de las cargas y generadores modernos.

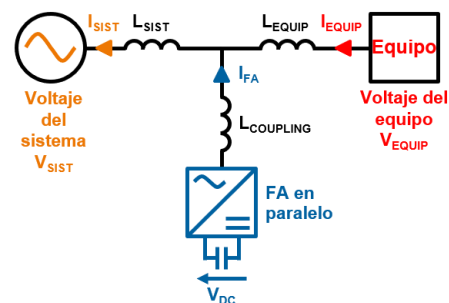


Fig. 1: Diagrama esquemático básico de un FA en derivación o paralelo.

Los FA en derivación son dispositivos que se comportan como una fuente de corriente controlada mientras proveen una forma de onda de corriente en tiempo real. Están equipados con un elemento de almacenaje de energía, transistores IGBT y un sistema de control, que permiten al dispositivo inyectar la corriente requerida al sistema eléctrico de potencia. Pueden ser instalados en cualquier punto del sistema (alto o bajo voltaje) en paralelo al equipo que causa problemas o necesita cumplir con determinados requerimientos. Su operación es independiente de la impedancia de la red, forma de la curva de corriente a ser compensada y la calidad del voltaje suministrado.

A través de los años, el diseño de los FA en derivación ha sido hecho a la medida para entregar funcionalidades específicas. Les permite compensar distorsiones de corriente como las corrientes armónicas, bajo factor de potencia, desbalances de voltaje y altas corrientes por el neutro en conductores. También son utilizados para compensar distorsiones de voltaje como armónicos de voltaje, fluctuaciones de voltaje, variaciones de voltaje y desbalances de voltaje.

Las soluciones de FA personalizadas que pueden encontrarse hoy en día en el mercado incluyen filtros activos de armónicos (AHF por sus siglas en inglés), generadores estáticos de potencia reactiva o generadores estáticos de VAR's (SVG por sus siglas en inglés), balanceador de carga activa (ALB por sus siglas en inglés) y dos tipos de diseños especiales, compensadores var híbridos (HVC) y convertidor de frecuencia de bajos armónicos o controladores de bajos armónicos (LHD).

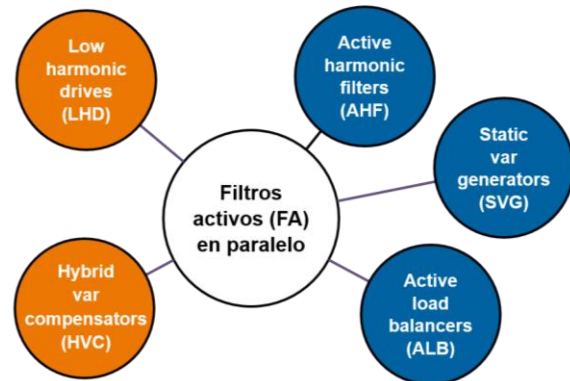


Fig. 2: Tipos de FA en derivación

2. Especificando o comprando un filtro activo en derivación

Hay diversos factores que deben de considerarse cuidadosamente al especificar o comprar un FA en derivación para una aplicación de bajo o alto voltaje. Los siguientes factores son algunos de los más importantes.

2.1 Funciones

En principio, un FA en derivación puede corregir una amplia variedad de problemas de calidad de energía como distorsión de armónicos (de cualquier secuencia de fase), frecuencia fundamental de potencia reactiva (factor de desplazamiento no unitario), componentes de secuencia fundamental negativa (componentes con desbalance), componentes de secuencia fundamental cero (corriente de línea neutra) y fluctuaciones de voltaje.

Un FA en derivación puede también ayudar al cumplimiento del Código de Red al proveer ciertos servicios auxiliares de red como control de potencia reactiva, control de factor de potencia y rápida inyección de corriente reactiva.

Es tentador considerar que todos los diversos problemas de calidad de energía y código de red pueden ser resueltos simplemente

al agregar funciones de control al sistema de control y al inversor del FA en derivación. Sin embargo, cada acción correctiva contribuye al valor voltio-amperio del inversor y por lo tanto al costo del dispositivo. Las fluctuaciones de voltaje y las compensaciones de desbalance también tienen implicaciones con el almacenamiento de energía en el lado de corriente continua o corriente directa (CC) ya que la energía representada por picos que fluye en la potencia instantánea puede ser elevada (Green & Marks, 2005).

Es importante estudiar en detalle la aplicación y definir claramente las funciones necesarias desde el FA para solucionar los problemas o requerimientos como es solicitado por el usuario final. Dependiendo de las funciones requeridas, el tipo adecuado de FA en derivación puede ser seleccionado o especificado.

Tabla 1: Funciones típicas que los FA pueden proveer.

Capacidades de mejora en calidad de energía		SVG	AHF	ALB	HVC	LHD
Distorsiones de forma de onda	Armónicos		X		X	X
	Interarmónicos		X		X	X
	Corte intermitente		X		X	X
Variaciones de corta duración	Caídas de voltaje (sags)	X	X		X	
	Subidas de voltaje (swells)	X	X		X	
Transitorios	Transitorios de impulso		X		X	
	Transitorios oscilatorios		X		X	
Otros problemas de calidad de energía	Desbalance de voltaje	X	X	X	X	X
	Fluctuaciones de voltaje (flicker)	X	X		X	X
	Bajo factor de potencia (en atraso o adelanto)	X	X	X	X	X
Servicios de red auxiliar						
Soporte de voltaje	Control de potencia reactiva	X	X		X	

Control de factor de potencia	X	X		X
Rápida inyección de corriente reactiva	X	X	X	X

SVG = Generador Var Estático
AHF = Filtros Activos de Armónicos
ALB = Balanceadores Activos De Carga
HVC = Compensadores Var Híbridos
LHD = Variadores de Bajos Armónicos

2.2 Tiempo de respuesta

Algunos fenómenos de calidad de energía ocurren extremadamente rápido y algunos requerimientos de eficiencia energética o Código de Red requieren de una respuesta en tiempo real. Es muy importante evaluar ambos, el tiempo de reacción del FA y el tiempo de reacción promedio, para asegurar que el dispositivo cumple las necesidades de la aplicación.

La velocidad de respuesta juega un papel muy importante en decidir la filosofía de control a implementar en el FA requerido. En general, el costo de cualquier FA particular está relacionado con la velocidad de respuesta implementada.

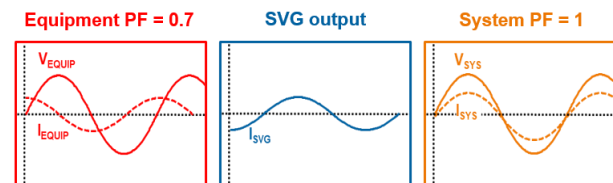


Fig. 3: Respuesta típica instantánea de un SVG

2.3 Rango de voltajes

Los FA en derivación se ofrecen en un rango de voltajes, los más comunes son de 200V hasta 690V, ya que están construidos utilizando transistores de electrónica de potencia (IGBT) de bajo voltaje. Algunos otros fabricantes diseñan FA para determinado nivel de voltaje (usualmente 400 V) y después conectan el FA al

sistema eléctrico de potencia de 200-690 V utilizando un transformador reductor o elevador. Este enfoque aumenta el tamaño, los costos y las pérdidas de toda la solución.

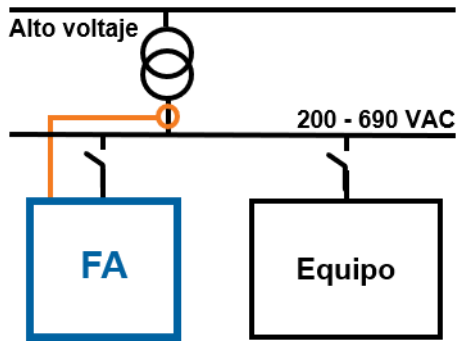


Fig. 4: Conexión típica directa de bajo voltaje para un FA

Es posible conectar FA en sistemas de alto voltaje (más de 1 kV) utilizando un transformador elevador adecuado. En estos casos, los transformadores de corriente que suministran las señales de corriente están localizados cerca del equipo de alto voltaje que necesita la compensación.

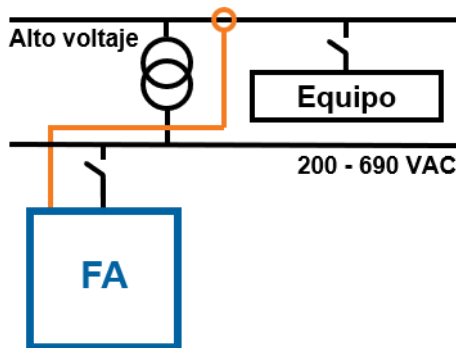


Fig. 5: Conexión típica de alto voltaje para un FA

Cuando se utilizan transformadores para la conexión de FA, estos transformadores deberían de ser estudiados cuidadosamente durante la fase de diseño del proyecto. Transformadores elevadores o reductores pueden reducir el desempeño de la compensación debido al incremento de la impedancia entre el FA y el sistema eléctrico de potencia.

2.4 Topología del inversor

Muchos FA modernos están contruidos bajo la última topología VSC, la topología del inversor acoplado de punto neutro de 3 niveles (NPC), la cual brinda muchos beneficios comparados a los FA contruidos bajo la topología de 2 niveles convencional.

En la topología de 3 niveles, el estrés por la conmutación de frecuencia y voltaje están distribuidos entre los transistores IGBT logrando un mejor desempeño espectral de las salidas de voltaje. La reducción del estrés extiende la vida de la electrónica de potencia. A mayor eficiencia, también se logra una menor pérdida en la corriente residual de salida, menores pérdidas, menores niveles de ruido y un diseño más compacto con una distribución más reducida. Estas ventajas hacen un costo total general de propiedad (TCO) mucho menor.

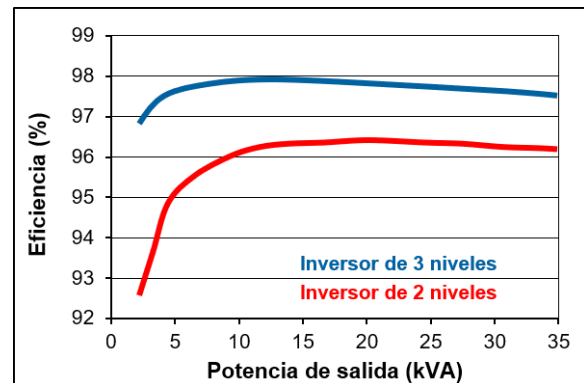


Fig. 6: Comparación de eficiencia entre una tipología de inversor NPC de 3 niveles y de 2 niveles (Buschkuhle, 2010)

2.5. Tecnologías habilitadas para el Internet

Los FA en derivación que utilizan tecnología del internet de las cosas industrial (IIoT) pueden de forma asertiva y consistente capturar y comunicar datos en tiempo real. La adopción del IIoT por FA está siendo habilitada por las mejoras en la disponibilidad y rentabilidad de sensores y procesadores. El IIoT permite la incorporación de

aprendizaje de máquinas y tecnologías de gran cantidad de datos en los dispositivos.

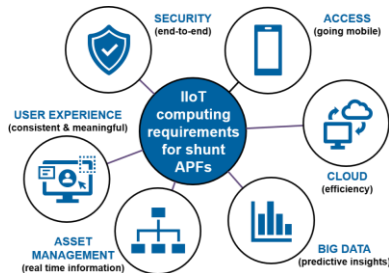


Fig. 7: Requerimientos de cálculo en IloT en FA en derivación

Algunos fabricantes ofrecen la posibilidad de conectar todos los FA de la instalación mediante una arquitectura basada en red. Un operador puede así tener una perspectiva general del estado de todos los FA conectados y registrarlos. Esto permite la posibilidad de registrar eventos que pueden haber causado disturbios de producción y monitorear FA individuales.

Hay un incremento en la demanda del mercado por la tecnología de conectividad de dispositivos inalámbricos e inteligentes para equipo industrial. Muchos FA en el mercado ofrecen la posibilidad de conectividad con el activo remoto, procesamiento de gran cantidad de datos y analítica al utilizar plataformas de programas o software IloT. Esto puede mejorar la eficiencia operacional de las instalaciones (por ejemplo, mejoras en la utilización del activo y del tiempo en funcionamiento) mediante mantenimiento predictivo y gestión remota.

2.6 Salida nominal

Los FA ofrecen una salida instantánea, continua, paulatina y eficiente que no está afectada por las fluctuaciones en la red de voltaje. Su capacidad y salida nominal pueden ser seleccionadas para ser exactamente lo que la aplicación requiere.

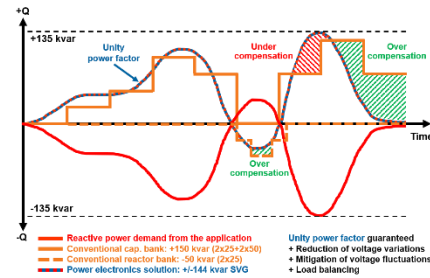


Fig. 8: Salida de SVG comparada con soluciones convencionales

Esta es una gran diferencia comparada con soluciones convencionales como bancos de capacitores, bancos de reactores en derivación o filtros pasivos de armónicos que usualmente están sobredimensionados para ajustarse de mejor manera a los cambios de demandas del equipo a ser compensado. Otra desventaja de estas soluciones convencionales es que continuamente estas sobrecompensando o subcompensando al sistema eléctrico de potencia debido a que su salida es inyectada al sistema en pasos de cierto tamaño.

Seleccionando un FA que entrega la salida exacta demandada por la aplicación ayuda a reducir los costos de toda la solución. En el mercado se pueden encontrar dispositivos modulares con una salida tan pequeña como +/- 30 kvar para SVGs o 25 A para AHFs para ajustar a las necesidades de edificios modernos o sistemas de riego de agua, por ejemplo. También se pueden conseguir dispositivos modulares con una salida tan grande como +/- 150 kvar para SVGs o 200 A para AHFs para ajustar a las necesidades de las plantas de manufactura modernas o de plantas de generación renovable, por ejemplo.

2.7 Controlador y redundancia

El incremento en la sensibilidad de muchas instalaciones y procesos en cuanto a problemas en la calidad de energía vuelve la disponibilidad de potencia eléctrica de buena calidad un factor

crucial para el desarrollo del sistema eléctrico de potencia. Asegurar una completa redundancia del sistema completa es un problema mayor en muchas aplicaciones en la actualidad, especialmente para industrias con procesos críticos y plantas con procesos críticos.

Un diseño muy seguro que permite redundancia al sistema es el utilizar FA del tipo modular con un diseño de controlador independiente (arreglo maestro/maestro). Con este diseño, si cualquier módulo del FA falla, el resto continúa en operación sin dañar el equipo o interrumpir procesos.

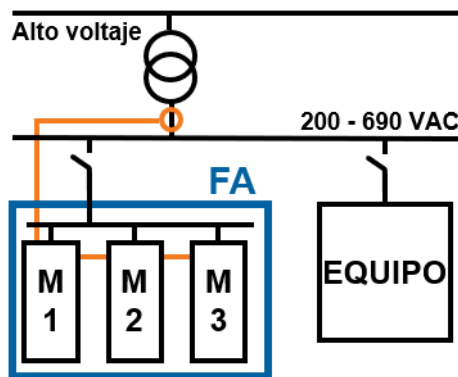


Fig. 9: Tipo de FA en derivación redundante modular

2.8 Compatibilidad electromagnética (EMC)

En algunos países hay lineamientos estrictos respecto a EMC. Para estar seguro de que el FA no está causando ninguna interferencia debe de estar equipado con un filtro EMC correctamente diseñado. Los estándares típicos EMC que requieren los FA son IEC 61000-6-2 (inmunidad) e IEC 61000-6-4 (emisión).

2.9 Capacidad de compensación armónica

Los armónicos se pueden ver tanto en los órdenes de armónicas pares y nones. Capacidad de compensación común para FA en el mercado le permite mitigar hasta la armónica del orden 50 (par o impar). Algunas veces hay una afirmación por algunos fabricantes sobre poder mitigar la

armónica de orden 51 o mayor, la cual tiene un pequeño valor ya que estas órdenes de armónicos no causan problemas o ni aparecen usualmente en los sistemas eléctricos de potencia.

Una función importante que los FA pueden ofrecer es la posibilidad de seleccionar qué orden de armónica se compensará. Para algunos dispositivos, es posible seleccionar el espectro completo de armónicos (2do a 50, pares e impares), pero para algunos otros sólo pocas órdenes de armónicos pueden ser seleccionadas. Dependiendo de la aplicación, la capacidad para compensar a cierta orden de armónicos es un problema crítico que afecta el desempeño del sistema completo.

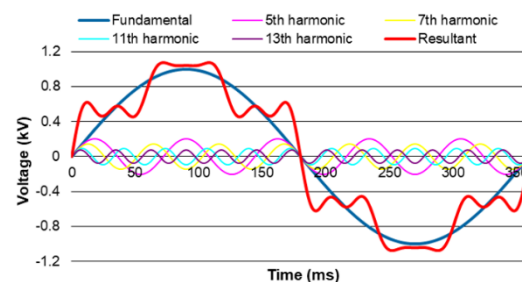


Fig. 10: Forma de onda armónica

2.10. Reducción acorde a la orden armónica

El valor nominal de un FA es usualmente definido a una carga nominal de (50/60 Hz). Conforme el FA va trabajando las armónicas, su capacidad es comparada a arranques nominales para reducirlas. Por ejemplo, una reducción del 50% en la orden de armónico 13 significa que un FA con una corriente de salida nominal de 100 A sólo tiene la capacidad de compensar 50 A en la orden de armónico 13.

La reducción es una cuestión de cómo robustamente el FA está diseñado. Esta capacidad es más dependiente en el cambio de la razón de corriente que sólo la frecuencia y la magnitud de la corriente (todas las frecuencias

diferentes, su magnitud y su fase tienen un efecto). Debido a esto, una curva reducida no puede mostrar la capacidad de determinado FA. La única manera de verificar la compensación real de un dispositivo es chequear su capacidad di/dt . Esta capacidad de compensación es claramente mejor en un FA con una topología del inversor NPC de 3 niveles comparado con equipos de 2 niveles.

2.11. Interarmónicos

Los interarmónicos usualmente son causados por problemas de sincronización o por la operación de equipos como los cicloconvertidores, hornos de inducción o algunos generadores eólicos. Si la instalación incluye fuentes de interarmónicos, el fabricante debe ser consultado ya que no todos los FA pueden lidiar con ellos.

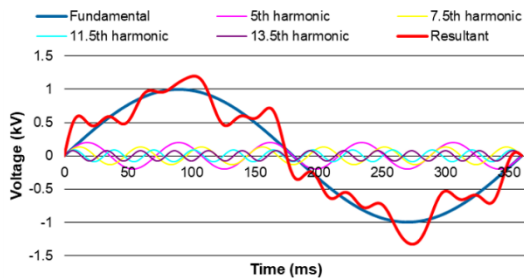


Fig. 11: Forma de onda interarmónica.

2.12. Arreglo de montaje.

Muchos proveedores de FA en derivación ofrecen varias alternativas de instalación:

- Dispositivos de tipo cubículo: Un FA a capacidad nominal construido dentro de un gabinete que se encuentra fijo al suelo.
- Dispositivos montados en pared: Un FA a capacidad nominal construido en un gabinete ligero y compacto fijo a la pared.
- Dispositivos montados en estantes: Uno o varios estantes montados para FA en un gabinete especialmente diseñado.

- Dispositivos en módulos individuales: Uno o más módulos FA pueden ser instalados dentro de un cubículo existente o uno nuevo.

Un diseño de FA modular le permite al usuario final adaptarse a los cambios potenciales futuros en cuanto a calidad de energía y necesidades de eficiencia energética o requerimientos de código de red. Con los diseños modulares se quiere decir que es posible agregar fácilmente más capacidad a la capacidad de los FA dentro de la configuración existente, ahorrando tanto costo como espacio.

2.13. Pérdidas

Dependiendo de su diseño y topología, los FA pueden tener mayores o menores pérdidas. Es importante poder revisar las pérdidas ya que las pérdidas reducirán los costos de vida útil (LCC) en la inversión.

Usualmente, los FA tienen alrededor de 2-3% de pérdidas (dependiendo de la potencia nominal). Los FA construidos bajo la topología del inversor de 3 niveles NPC tienen menos pérdidas que los de 2 niveles. Dependiendo del perfil del usuario, las pérdidas significan una oportunidad de ahorros considerables si el LCC es calculado en un periodo de unos pocos años.

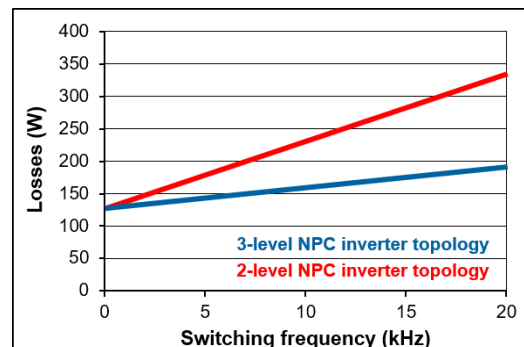


Fig. 12: Comparativa entre las pérdidas entre la topología de inversor NPC de 3 niveles y de 2 niveles (Buschkühle, 2010)

2.14 Software para puesta en marcha e interfaz HMI

Existen diferentes configuraciones de HMI para FA. Algunas ofrecen una interfaz muy simple mientras otros tienen un analizador de calidad de energía integrado para calcular la compensación requerida que incluye las gráficas donde se muestra la forma de onda de la corriente y el voltaje y muchas otras funciones extras en diversos idiomas. Un gran valor agregado para cualquier HMI es la posibilidad de conectarse a cualquier software de la plataforma IIoT.

La puesta en marcha y servicio de FA sin las herramientas apropiadas puede consumir tiempo. Algunos proveedores ofrecen software como éste. La funcionalidad mínima requerida debe ser la revisión automática de su voltaje y el orden de fase del TC, revisión de la polaridad del TC, auto diagnóstico y auto calibración. Estas funciones encontrarán errores en la instalación antes de que estos puedan causar problemas y podrán acortar el tiempo de puesta en marcha. Si el FA no tiene este tipo de software, el tiempo de puesta en marcha se hace más complejo y puede requerir soporte externo agregando costos al sistema.

2.15. Funciones de protección integradas

Los FA modernos tienen varias funciones de protección integradas para asegurar una operación confiable y segura durante condiciones del sistema anormales. Algunas de las funciones de protección integradas más comunes son:

- Protección interna contra corto circuito.
- Sobrecorriente con valores pico y RMS.
- Un capacitor electrolítico en CC y un sistema CA por sobre voltaje y bajo voltaje.

- Sobre carga en la onda remanente suprimida del circuito y falla en la onda remanente suprimida del circuito.
- Sobrecalentamiento en transistores IGBT y en el gabinete.

2.16. Control de bancos de capacitores con reactancias desintonizadas

De manera muy frecuente los FA son instalados en lugares junto a bancos de capacitores desintonizados con contactores o tiristores conmutados. Algunos suministradores de FA ofrecen la posibilidad de controlar los pasos de estos bancos directamente desde el sistema de control del FA mediante salidas digitales dedicadas. Al hacer esto es posible utilizar el monitoreo de calidad de energía comprensivo y las funciones de reporte de FA para poder monitorear con exactitud todos los parámetros de la instalación y gerenciar todas las necesidades de mejora de la calidad de energía.

Con un óptimo sistema de integración, esta función brinda una operación eficiente, ahorro en costos en el sistema de control y la posibilidad de construir un compensador var híbridos (HVC) utilizando un banco de capacitores desintonizado nuevo o existente.

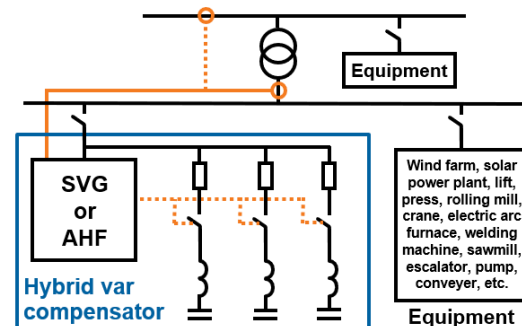


Fig. 13: Diagrama de conexión de un HVC

3. Conclusiones

El alza de cargas no lineales, no balanceadas, variables y otras cargas que constituyan un reto, y generadores en sistemas eléctricos de potencia presentan problemas únicos y desafíos. Los filtros activos de potencia son la más completa respuesta para resolver los problemas de calidad de energía y cumplir con el código de red y requerimientos de eficiencia energética para un amplio rango de segmentos y aplicaciones.

Los FA son un tipo de solución de electrónica de potencia de alto desempeño, flexible, compacta, modular y rentable que provee una respuesta efectiva e instantánea en sistemas eléctricos de potencia de alto y bajo voltaje. Estos permiten un tiempo de vida de equipos más largo, mayor confiabilidad del proceso, mejora en la estabilidad y capacidad del sistema de potencia, y reducir pérdidas de energía, cumpliendo con los más demandantes estándares de eficiencia energética y calidad de energía y código de red.

Su versatilidad, tiempo de respuesta instantáneo y numerosos beneficios comparados con soluciones convencionales, aunado a la disminución de sus precios en años recientes, hacen que los FA en la actualidad sean considerados como un reemplazo natural para soluciones convencionales en muchas aplicaciones. Su correcta especificación y proceso de compra es un aspecto crítico cuando se diseñan nuevos sistemas o cuando se consideran en sistemas existentes.

4. Referencias

Buschkühle, M. (2010). Highly Efficient 3-Level Solutions for Renewable Energy Applications (Soluciones de 3 niveles Altamente Eficientes para Aplicaciones de Energías

Renovables). Power Electronics Europe(5), 17-20.

Green, T., & Marks, J. (2005). (Técnicas de Control para Filtros Activos de Potencia). Electric Power Applications, IEE Proceedings, 152, pp. 369 - 381.

5. Acerca de los autores

Desde el año 2002 Pedro Esteban acumula una amplia experiencia en innovación y transición energética incluyendo soluciones en electrónica de potencia, energías renovables, almacenaje de energía, microrredes y su integración en Smart Grid. Ha sido un experto destacado en varias posiciones de desarrollo de negocio, planificación estratégica, mercadotecnia y comunicaciones en Areva T&D, Alstom Grid y General Electric. Desde el 2012 él reside en Singapur y actualmente está trabajando en Merus Power Dynamics Oy.

Santiago Barcón es ingeniero eléctrico con más de 30 años de experiencia en calidad de la energía en particular compensación de factor de potencia y filtro de armónicas. Coautor del libro "Calidad de la Energía: Factor de potencia y filtrado de armónicas". Fundador de INELAP y actualmente Director General de PQ Barcon.

Luis Carlos Villarreal es ingeniero mecánico electricista con más de 10 años de experiencia en mantenimiento, confiabilidad, seguridad eléctrica y análisis de sistemas de energía como cortocircuito, coordinación de protecciones, relámpago de arco y calidad de energía. Actualmente Director de Operaciones en AMPSAFE México.