

Balancedores activos de carga para aplicaciones de alto y bajo voltaje

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 los equipos como los variadores de velocidad (VSD), máquinas de soldar, transformadores, hornos, iluminación, sistemas UPS de conversión doble, cargas altamente dinámicas, cargas monofásicas, cargadores de baterías, sistemas de electrificación de ferrocarril, generadores de combustible fósil y fuentes de generación renovable, por nombrar unos pocos. Eventos como la conmutación de capacitores (de bancos de capacitores existentes o filtros de armónicas pasivos), operaciones de reconexión automática de líneas de transmisión y distribución o el arranque de motores grandes también contribuyen 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 se pueden controlar para que

actúen como generadores de corriente o voltaje. Se pueden conectar en paralelo o en serie con el sistema de energía eléctrica. Los FA conectados en paralelo se les llama FA en derivación o FA alimentado por corriente y son los FA más ampliamente usados en estos días. Los FA conectados en serie también se les llama FA alimentados por voltaje. El FA en derivación basado en un convertidor de fuente de voltaje (VSC) es por mucho el tipo más común debido a su topología bien conocida, costos razonables y un procedimiento de instalación muy sencillo.

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.

Tipos de FA en derivación

Los FA en derivación más recientes, se construyen sobre tecnología de inversor conectado al punto neutro (NPC). Se pueden instalar en cualquier punto del sistema eléctrico de potencia (bajo o alto voltaje) en paralelo con el equipo que causa problemas o que necesite cumplir con ciertos requerimientos.

A lo largo de los años, el diseño de los FA en derivación se ha confeccionado para entregar funciones específicas. Pueden compensar distorsiones basadas en corriente como las corrientes armónicas, bajo factor de potencia, desbalances de voltaje y altas corrientes neutras en los conductores. También se usan para compensar distorsiones basadas en voltaje como los voltajes armónicos, fluctuaciones de voltaje, variaciones de voltaje y desbalances de voltaje.

Las soluciones de FA personalizados que se pueden encontrar actualmente en el mercado incluyen filtros activos de armónicos (AHF), generadores de var estáticos (SVG), balanceadores activos de carga (ALB) y dos tipos de diseños especiales, compensadores de var híbridos (HVC) y variadores de armónicas bajas (LHD).

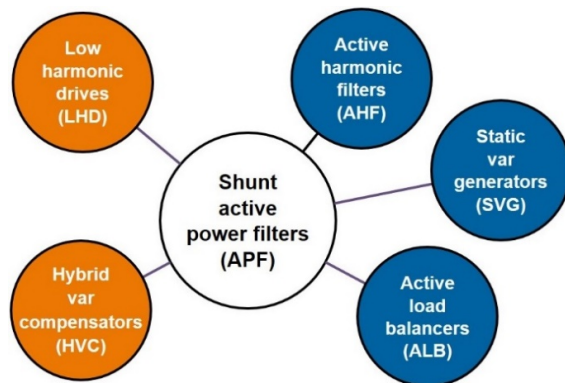


Fig. 1: Tipos de FA en derivación

Diseño

Los FA en derivación están equipados con un elemento de almacenamiento de energía, transistores IGBT y un sistema de control, el cual le permite al dispositivo inyectar la corriente requerida al sistema eléctrico de potencia. Su operación es independiente de la impedancia de la red, forma de la curva de

corriente a ser compensada y de la calidad del voltaje de suministro.

Los FA en derivación más modernos están contruidos sobre la topología VSC más reciente, topología del inversor conectado al punto neutro (NPC) de 3 niveles, la cual trae varios beneficios comparado con los FA contruidos sobre la topología de 2 niveles convencional. En la topología de 3 niveles, la frecuencia de conmutación y el estrés en el voltaje se distribuyen a través de los transistores IGBT llevando a un mejor desempeño del espectro del voltaje de salida. La reducción del estrés prolonga la vida útil de la electrónica de potencia. Una mayor eficiencia, menor pérdida en la corriente residual de salida, menores pérdidas, niveles de ruido más bajos y también se logra un diseño más compacto con una distribución más reducida. Estas ventajas hacen un costo total general de propiedad (TCO) mucho menor.

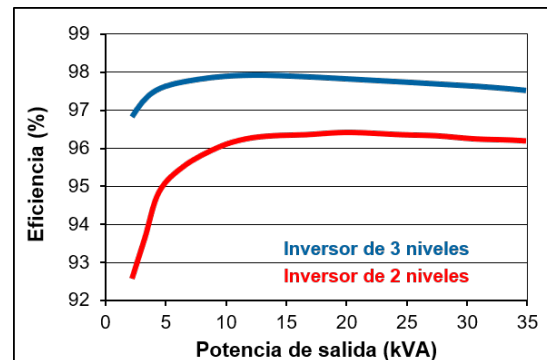


Fig. 2: Comparación de la eficiencia entre la topología del inversor NPC de 3 niveles y de 2 niveles (Buschkühle, 2010)

La gama de voltaje más común de los FA en derivación es de 200 V hasta 690 V ya que se construyen usando transistores IGBT de bajo voltaje. Es posible conectar los FA a sistemas de alto voltaje (arriba de 1 kV)

usando un transformador elevador adecuado. Los transformadores deben estudiarse con cuidado cuando se diseña un sistema con FA.

El FA en derivación tiene varias alternativas de instalación: dispositivos tipo cubículo, dispositivos montados a la pared o dispositivos modulares sueltos que se pueden instalar dentro de cubículos nuevos o existentes. Un diseño de FA modular les permite a los usuarios finales adaptarlo a los cambios potenciales en las necesidades futuras de calidad de energía y del mejoramiento en la eficiencia energética o los requerimientos del código de red.

Balancedores activos de carga (ALB)

Los balancedores activos de carga (ALB por sus siglas en inglés), también llamados balancedores activos de fase o balancedores dinámicos de fase, han estado presentes desde inicios del 2000. La descripción de su topología y principio de operación se pueden encontrar desde el 2004. Se desarrollaron como un caso personalizado de FA en derivación para hacerse cargo de los problemas de desbalances de las instalaciones que las soluciones convencionales como los balancedores estáticos, transformadores de balanceo de carga (LBT) o la reconfiguración de la red realizada por el balanceo de fase o carga que no podían manejar.

Funciones

Los ALB pueden balancear cualquier carga desbalanceada desde el punto de vista del sistema de suministro usando el control de corriente, convirtiéndolos en cargas activas de potencia trifásicas simétricas. También pueden balancear voltajes del sistema si el desbalance es causado por una carga de potencia desbalanceada activa o reactiva (Pana, 2011). Además, los ALB modernos pueden hacerse cargo de otros problemas de

calidad de energía y de servicios auxiliares de la red combinando diferentes funciones de control en un solo dispositivo.

Tabla 1: Funciones típicas del ALB

Capacidades de mejoramiento de la calidad de energía	
Otros problemas de energía	Desbalances de voltaje Bajo factor de potencia (en atraso o adelanto)
Servicios auxiliares de la red	
Respaldo del voltaje	Inyección rápida de corriente reactiva (FRCI)

Mercados, segmentos y aplicaciones

Los ALB se pueden emplear en aplicaciones pequeñas, medias o grandes en unos cuantos segmentos especializados.

Table 2: Mercados y segmentos típicos para ALB

Mercados	Segmentos	Aplicaciones
Red inteligente	Generación renovable	Secundaria
	Generación no-renovable	Ninguna
	Transmisión y distribución	Secundaria
	Microgrids	Ninguna
Extracción y procesamiento de materia prima	Minería	Ninguna
	Petróleo y gas	Ninguna
	Minerales y cemento	Ninguna
Manufactura e infraestructura	Acero y metales	Secundaria
	Manufactura convencional	Primaria
	Industrias de proceso crítico	Primaria
	Transporte	Primaria

	Agua y aguas residuales	Secundaria
Edificios verdes y ciudades inteligentes	Instalaciones de asistencia médica	Secundarias
	Instalaciones de proceso crítico	Secundarias
	Instalaciones industriales y de oficinas	Primaria
	Instalaciones de comercio minorista y de ocio	Primaria

Tienen algunas aplicaciones potenciales de bajo y alto voltaje donde su uso ofrece muchos beneficios.

- Máquinas de soldadura de arco: arco de metal blindado, arco de tungsteno con gas, arco de gas metálico, arco de núcleo fundente, arco sumergido y soldadura de electro-escoria.
- Máquinas de soldadura de resistencia: Punto, costura, a tope, arco, proyección y a tope/resistencia.
- Cargas monofásicas no bien distribuidas en el sistema trifásico en una instalación como impresoras, plóter, fotocopiadoras, computadoras, iluminación, máquinas fax, sistemas UPS, televisores, acondicionadores de aire, etc.
- Sistemas de electrificación de ferrocarril (trenes y tranvías).
- Estaciones de carga monofásicas para vehículos eléctricos.
- Hornos de arco eléctrico (EAF) y hornos de cuchara (LF) monofásicos.
- Generadores monofásicos como pequeñas turbinas eólicas e inversores solares conectados al sistema eléctrico de potencia por medio de inversores electrónicos de potencia monofásicos.

Diseño

Un ALB es un dispositivo basado en la electrónica de potencia conectado en paralelo con el equipo que genera los problemas de calidad de energía o que tiene problemas para cumplir con los requerimientos del código de red y la eficiencia energética. El ALB se comporta como una fuente de corriente controlada que proporciona cualquier tipo de forma de onda de corriente (en términos de fase, amplitud y frecuencia) en tiempo real (el tiempo de reacción típico es de menos de 50 microsegundos y el tiempo de respuesta total típico es de menos de 100 microsegundos).

Por su capacidad de conexión, los ALB se pueden clasificar en dispositivos de 3 o 4 hilos (Akagi, 1996).

- Los ALB de 3 hilos típicamente se usan en aplicaciones industriales.
- Los ALB de 4 hilos típicamente se usan en edificios.

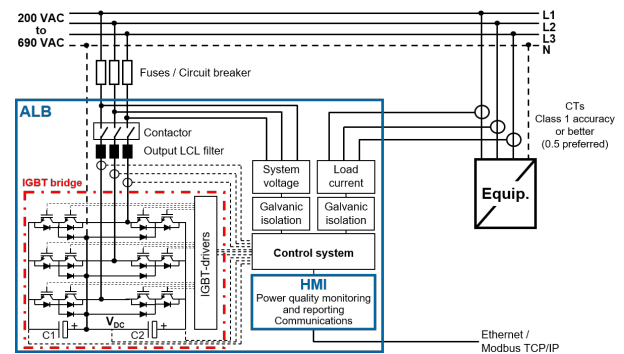


Fig. 3: Diseño típico de un ALB para conexión de bajo voltaje

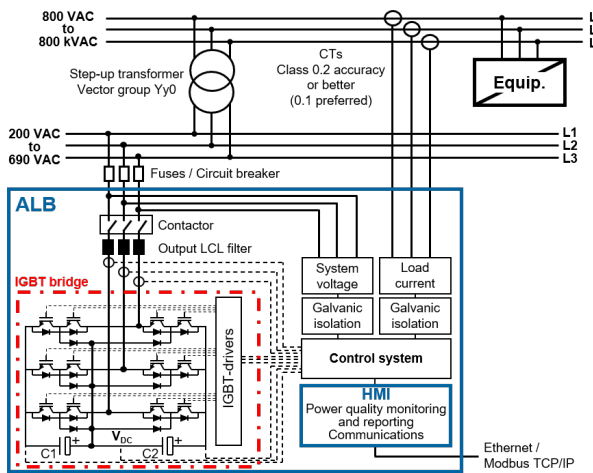


Fig. 4: Diseño típico de un ALB para conexión de alto voltaje

Principio de operación

Usar equipos monofásicos en un sistema de potencia eléctrica trifásica (conectado fase-a-fase o fase-a-neutro) resulta en condiciones desbalance en el sistema.

La distribución desigual de equipos entre las tres fases por la operación individual demandada resulta en corrientes de fase desiguales en el sistema. A esto se le llama desbalance de corriente.

Si llega a ser importante, esta corriente desbalanceada puede resultar en varios problemas incluyendo desbalance de voltaje y afectar otros equipos conectados en el sistema.

Entre otros problemas, condiciones de desbalance causan excesivas corrientes por el neutro, resultando en motores y transformadores sobrecalentados, pérdidas de potencia y menores eficiencias del sistema. En este tipo de casos, el balanceo de carga es necesario para mejorar la calidad de energía y la eficiencia del sistema.

Current unbalance

Voltage unbalance

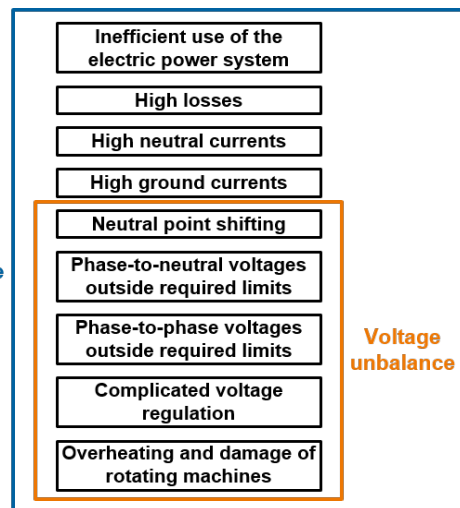


Fig. 5: Problemas típicos causados por el desbalance de la corriente y el voltaje

Los ALB utilizan el control de corriente para entregar la función del balanceo de carga en sistemas de 3 y 4 hilos con su capacidad nominal plena. El cómo esto se relaciona con la energía depende de las variables como el factor de potencia de la carga. Inyectan corriente capacitiva o inductiva de secuencia negativa que tiene una fase opuesta a la corriente de secuencia negativa de la carga. Como resultado, la red ve una carga simétrica, y los voltajes y corrientes de fase están balanceados sin intercambiar potencia activa entre la red y el ALB.

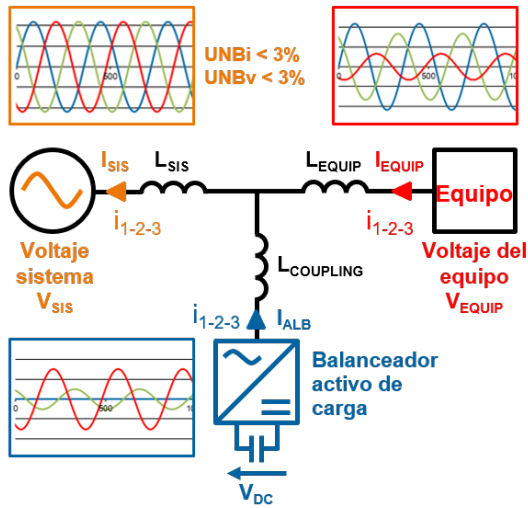


Fig. 6: Principio de operación del ALB

Características

Las características más típicas de los ALB que se pueden encontrar en estos días en el mercado incluyen:

- Conexión directa a sistemas eléctricos de potencia de 200-690 V 50/60 Hz 3-hilos y 4-hilos.
- Conexión sencilla a sistemas de alto voltaje por medio de un transformador elevador Yy0 adecuado.
- Posibilidad de conectar una cantidad ilimitada de ALB en paralelo para alcanzar salidas de potencia más elevadas.
- Construido en topología de inversor (IGBT) NPC de 3 niveles con enlace de voltaje (capacitores electrolíticos CD) reduciendo sus pérdidas, ruido, tamaño y prolongando su vida útil.
- Tiempo de respuesta en general <100 microsegundos.
- Excelente desempeño en el balanceo de la carga para componentes de secuencia negativa y cero, atenuando también corrientes neutras y descargando cables neutros.

- Inherentemente corrige el desplazamiento del factor de potencia.
- Adecuado para redes con distorsión armónica.
- Balanceo de carga y descarga de cables neutros.
- Funciones de protección integradas incluyendo la sobrecorriente, sobrevoltaje, bajo voltaje, sobret temperatura y sobrecarga de onda del circuito.
- Diseño compacto y modular, enfriamiento por aire forzado.
- Capacidad de monitorear y reportar la calidad de energía.
- Conectividad remota del activo, gran procesamiento y análisis de datos con plataformas de software industrial IoT (IIoT).

Beneficios

Algunos de los beneficios técnicos y económicos de utilizar los ALB se pueden resumir como:

- Mejorar el desbalance de voltaje de fases y reducir la corriente por el neutro, aumentando la seguridad de la instalación y permitiendo la operación de cargas sensibles.
- Evitar la saturación y sobrecarga de los transformadores.
- Reducir las pérdidas de energía y caídas de voltaje en los conductores neutros.
- Reducir la oscilación del par motor de máquinas rotativas que aparece debido a las variaciones en la carga.
- Evitar el sobrecalentamiento y la pérdida de eficiencia del equipo eléctrico que causa fallas prematuras.
- Al no verse afectados por la caída del voltaje, pueden proporcionar su capacidad nominal plena a un voltaje reducido en el sistema.

- Pueden encargarse de los patrones de perturbaciones individuales y automáticamente adaptarse a las condiciones cambiantes del equipo y topologías de la red.
- Dimensionamiento e instalación simple.
- Cumplimiento de los más estrictos estándares de calidad de energía y códigos de red.

Comparación con soluciones convencionales

Las maneras convencionales de resolver los problemas de desbalance en el sistema eléctrico de potencia se relacionan con la modulación artificial de fase, ajuste inteligente de fase, el uso de balanceadores estáticos, transformadores de balanceo de carga (LBT) o la reconfiguración de la red hecha por el balanceo de fase o carga (usando conmutadores o reordenando las cargas de la instalación).

Algunas de las principales desventajas de las soluciones convencionales se pueden resumir como:

- No proporcionan la respuesta en tiempo real necesaria que requieren los sistemas eléctricos de potencia modernos.
- No pueden satisfacer la creciente demanda por los dispositivos inteligentes y la tecnología de conectividad inalámbrica incluyendo su integración a las plataformas de software IIoT.
- Pueden ser soluciones costosas y que consumen mucho tiempo (por ejemplo, implementar el óptimo reordenamiento de cargas para un edificio).

Ejemplo de la aplicación: Edificios con desbalance

Los diseñadores de sistemas y electricistas normalmente tratan de balancear las cargas en todo el sistema trifásico de un edificio

durante las fases de planeación e instalación del proyecto. En la práctica, los sistemas trifásicos raramente están perfectamente balanceados en la fase de instalación. Con el paso de los años, la situación se hace más crítica si se han agregado diferentes cargas al sistema sin una planeación cuidadosa.

El desbalance del voltaje y la corriente en los edificios puede ser causado por lo siguiente:

- Distribución grande y/o desigual de las cargas monofásicas: Esto puede ocurrir cuando las cargas monofásicas de bajo voltaje se conectan a la fase más cercana al neutro (el conductor más fácil de alcanzar).
- Cargas entre fases: Esto ocurre con algún equipo que sencillamente requiere de una conexión monofásica, pero del voltaje entre líneas.
- Cargas trifásicas desbalanceadas: Algunas cargas trifásicas están conformadas por equipo tanto monofásico como trifásico. Es importante que estas cargas estén balanceadas para satisfacer los requerimientos de la instalación.

Tradicionalmente, el balanceo de carga en edificios se hace a intervalos periódicos, manualmente, después de llevar a cabo algunas mediciones de campo para entender el grado de desbalanceo de corriente y voltaje presentes en el sistema en ese periodo específico.

Aunque éste es un método estable, debido a las características estocásticas y variables con el tiempo de las cargas monofásicas, no es un método eficiente. Debido a esto, el balanceo dinámico de fase es un método más efectivo para lograr los requerimientos del usuario final.

Los ALB pueden balancear toda la instalación en tiempo real. Las alternativas como reordenar todas las cargas del edificio son más costosas y consumen más tiempo. El uso de ALB trae varios beneficios a los edificios incluyendo la eliminación del sobrecalentamiento y el ruido en los motores y transformadores y la reducción de las pérdidas de potencia y caídas del voltaje en los conductores neutros.

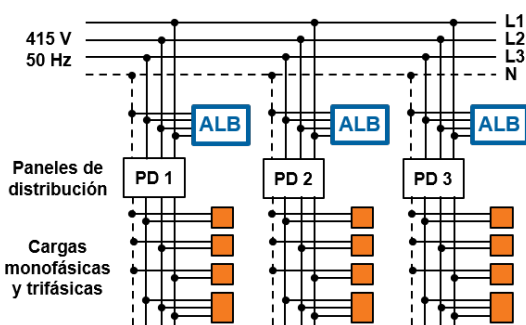


Fig. 7: Diagrama de conexión de ALBs en un edificio

Conclusiones

El aumento de desafiantes cargas y generadores no-lineales, desbalanceados y variables en los sistemas eléctricos de potencia presentan problemas y desafíos únicos. Los filtros activos de potencia como balanceadores activos de carga son la mejor respuesta a los problemas de calidad de energía y para satisfacer los requerimientos del código de red y de eficiencia energética para una amplia gama de segmentos y aplicaciones.

Los ALB son un tipo de solución de la electrónica de potencia de alto rendimiento, flexible, compacta, modular y económica que proporcionan una respuesta instantánea y efectiva en sistemas eléctricos de potencia en bajo y alto voltaje. Le permiten al equipo una vida útil más prolongada, mayor confiabilidad del proceso, mejora en la capacidad y estabilidad del sistema de potencia, y

reducción de pérdidas de energía, cumpliendo con los más demandantes estándares de calidad de energía y eficiencia energética y códigos de red.

Su versatilidad, tiempo de respuesta instantáneo y numerosos beneficios comparados con las soluciones convencionales junto con su disminución de precio en años recientes, hacen que hoy en día los ALB se consideren el reemplazo natural para soluciones convencionales en muchas aplicaciones.

Referencias

Akagi, H. (1996). New trends in active power filters for power conditioning. Proceedings of EPE-95. IA-vol 32, pp. 1312-1322. IEEE Trans. Ind. Applic.

Buschkühle, M. (2010). Highly Efficient 3-Level Solutions for Renewable Energy Applications. Power Electronics Europe(5), 17-20.

Pana, A. (2011). Active Load Balancing in a Three-Phase Network by Reactive Power Compensation. In A. Zooba, R. Bansal, & M. Manana, Power Quality: Monitoring, Analysis and Enhancement (pp. 219-254).

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, almacenamiento 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.