

► Protección de fallos en microrredes de CC de baja tensión con generadores fotovoltaicos

La conexión de microrredes basadas en energías renovables a redes eléctricas presenta muchas ventajas. No obstante, hay que tener cuidado al unir estos dos mundos eléctricos tan distintos para manejar adecuadamente las condiciones de fallo, en particular cuando una microrred con una instalación fotovoltaica (FV) o un sistema de almacenamiento de energía (ESS) se conecta a la red con un convertidor *front-end* (FEC). Esta configuración puede dejar que corrientes de fallo de la red de CA pasen directamente a través del convertidor y agraven el fallo. La mayoría de los FEC de uso general se basan en transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) combinados con diodos supresores, y no son capaces de cortar las corrientes de fallo en todas las situaciones. Por lo tanto, hace falta un sistema de protección específico para asegurar



la eliminación de fallos y la seguridad, especialmente con ESS o generadores de CC.

La conexión a sistemas de CA de microrredes de corriente continua de baja tensión (CC BT) que incluyen plantas FV está cobrando mucha importancia, ya que cada vez hay más fuentes renovables conectadas a redes nacionales. Aparte de las consideraciones eléctricas usuales sobre la conexión de estos dos mundos, debe prestarse atención a las condiciones de fallo ya que, dependiendo de los distintos esquemas de conexión a tierra, las plantas FV y ESS y sus electrónicas asociadas pueden comportarse de forma distinta durante los fallos, con distintas consecuencias para el funcionamiento de la red y el comportamiento de fallo.

Cuando se producen cortocircuitos y defectos a tierra en el lado de corriente continua, la mayoría de los convertidores de tipo general son incapaces de limitar las corrientes de fallo.

En una microrred CC BT, la sección de CC está separada normalmente de la red de CA mediante un FEC que vierte cualquier exceso de potencia de la microrred en la red de CA.

La cuestión más crítica es que cuando se producen cortocircuitos y defectos a tierra en el lado de CC, la

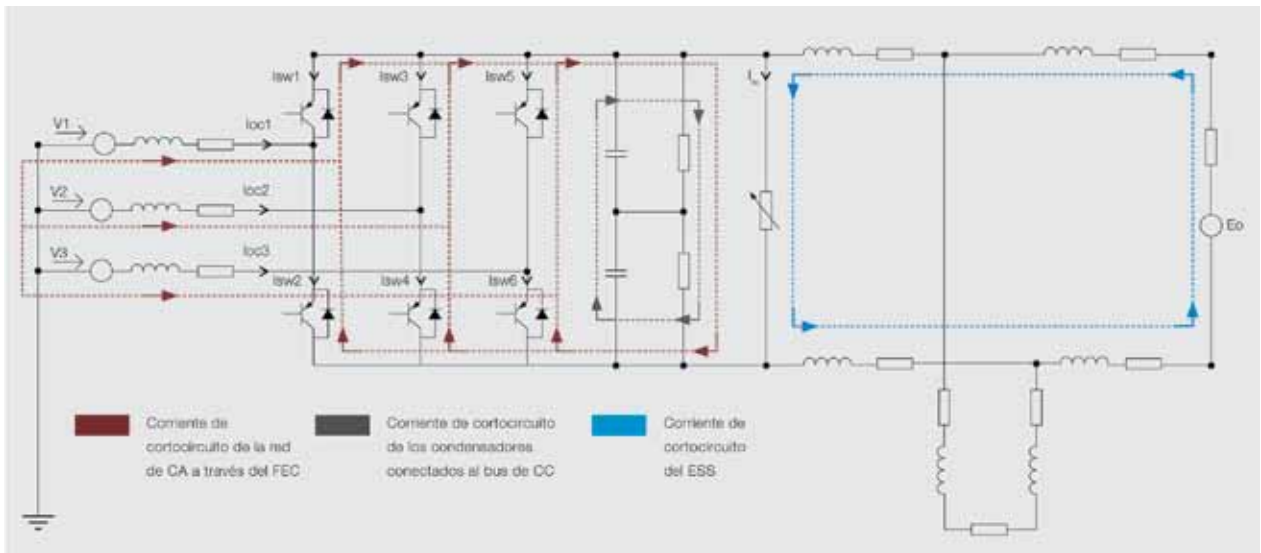


Figura 1. Componentes de corrientes de cortocircuito en un sistema de almacenamiento de energía.

mayoría de los convertidores de tipo general son incapaces de limitar las corrientes de fallo.

Esto ocurre en convertidores basados en IGBT con diodos supresores antiparalelos, el diseño más común (ver figura 1). Los diodos supresores del FEC permiten el paso de grandes intensidades de la red de CA. Por lo tanto, hacen falta diseños de protección especiales. (Conviene señalar que no se pueden emplear rectificadores de tiristores como convertidores *front-end* porque cuando se invierte el sentido de la corriente hay que cambiar la polaridad de la tensión, con graves consecuencias, obviamente, para los dispositivos conectados a la barra de CC).

Si se han instalado interruptores de dimensiones adecuadas, aunque la energía que circula por ellos haga que se sobrecalienten los semiconductores, se limita la intensidad, se mantiene la seguridad y se evitan otros daños a la instalación.

Los dos tipos principales de fallos que tienen que proteger estos diseños son cortocircuitos de CC y defectos a tierra.

Lado de CC: cortocircuito

Cuando se produce un cortocircuito entre los terminales de una barra de CC de una microrred sin ninguna

fuente en el lado de CC, pueden presentarse diversas situaciones, que dependen del valor de la resistencia de fallo: para valores altos de la resistencia de fallo, el FEC puede mantener la tensión de CC en su valor nominal, pero por debajo de cierto valor, el FEC empieza a trabajar en modo de sobremodulación.

Los dos tipos principales de fallos contra los que deben proteger los diseños son cortocircuitos de corriente continua y defectos a tierra.

La condición límite se produce cuando la resistencia de cortocircuito es muy pequeña, casi nula. En este punto, como la corriente circula en los diodos supresores, el FEC trabaja como rectificador en estado de cortocircuito. En este caso, la intensidad ya no se ve limitada por el FEC. La corriente de cortocircuito es la suma de las contribuciones de la red de CA a través del FEC, desde los condensadores conectados a la barra de CC y desde los generadores de CC o el ESS, si los hay (ver figura 1).

Si está instalada una planta FV o un ESS en el lado de CC, el generador activo proporciona una corriente de

fallo adicional, y cada contribución depende de la estructura de la microrred. Por otra parte, el componente activo, que incluye un controlador con su propio bucle de realimentación de tensión, también ayuda a mantener la tensión de CC en un valor mayor que en una red de CC pasiva. Por tanto, los valores de la resistencia de cortocircuito para la que el convertidor comienza a limitar la corriente absorbida del lado de CA, y en los que el control empieza a trabajar en condiciones de sobremodulación, son menores que en una red de CC pasiva.

En sistemas equipados con una planta FV o un ESS, no es posible calcular la corriente de fallo superponiendo los valores que se obtendrían de cada fuente, porque cada una de ellas afecta a las demás de formas que no son evidentes.

Esto significa que, en sistemas equipados con una planta FV o un ESS, no es posible calcular la corriente de fallo superponiendo los valores que se obtendrían de

cada fuente, porque cada una de ellas afecta a las demás de formas que no son evidentes. Deben calcularse, entonces, en cada caso, las corrientes de fallo teniendo en cuenta la totalidad del sistema.

Lado de CC: defecto a tierra

Las secciones de CC de las instalaciones eléctricas están generalmente aisladas de tierra. Por otra parte, por razones de seguridad, el transformador del lado de CA del FEC está normalmente puesto a tierra.

Cuando se produce un defecto a tierra en el lado de CC, pueden circular corrientes de fallo a través del convertidor, con resultados inesperados.

En una red de CC pasiva, dependiendo de la resistencia de fallo, pueden también presentarse situaciones similares a las descritas, con el convertidor pasando al modo de sobremodulación y, finalmente, comportándose como un rectificador. Un generador FV o un ESS, aunque contribuyen a mantener la tensión de CC en un valor mayor que una microrred pasiva comparable solo de CC, proporcionan una vía de retorno para

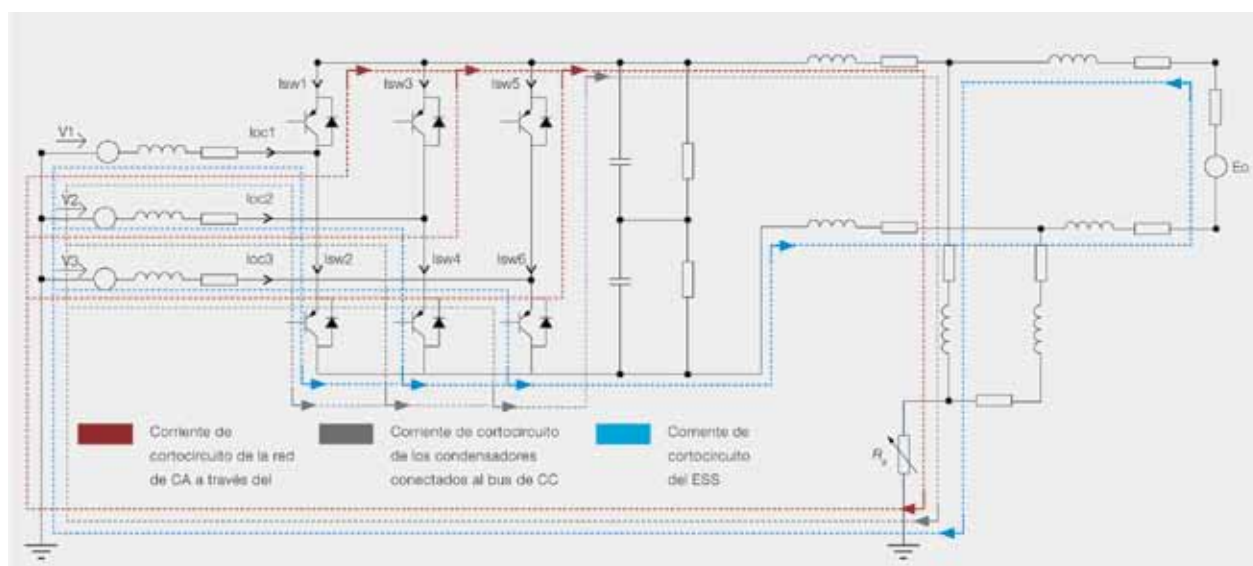


Figura 2. Recorrido de la corriente de derivación a tierra del polo positivo de corriente continua con sistema de almacenamiento de energía y pequeña resistencia de fallo.

un componente de corriente unidireccional con valores bajos de resistencia de fallo.

De hecho, un defecto a tierra en uno de los dos polos de la red de CC genera una vía de retorno para la corriente hacia el punto neutro de CA. Para valores bajos de resistencia de fallo y si el fallo se produce en el polo positivo, la contribución al fallo de la red de CA pasa por los diodos supresores de la estrella catódica del FEC, mientras que la contribución del ESS pasa por los IGBT de la estrella anódica del FEC (ver figura 2).

La situación se invierte si el fallo se produce en el polo negativo de la CC. Esto puede hacer que salgan corrientes de ambos terminales de CC del FEC en vez de solo uno, como es lo normal.

Dichas corrientes pueden ser suficientes para dañar el FEC, pese a lo cual es un error frecuente despreciarlas cuando se calcula la corriente de defecto a tierra en la fase de diseño.

En aplicaciones reales, el sistema de protección electrónica integrado en el convertidor mide la tensión a través del

IGBT cuando se activa su puerta. Si su tensión es superior a un umbral dado, el circuito de control apaga el IGBT desactivando la puerta. Esta protección, llamada "Desat" (desaturación), bloquea los IGBT pocos microsegundos después de que la corriente que los atraviesa supera un límite prefijado. Por tanto, la contribución de la corriente de fallo de la planta FV o del ESS se corta desactivando la modulación de la señal que regula los IGBT del FEC. No obstante, la contribución del fallo de la red de CA sigue siendo alimentada por el FEC a través de sus diodos supresores no controlados. Por tanto, debe instalarse un dispositivo externo de protección adecuado que interrumpa la corriente de fallo y proteja el FEC.

Estudio de un caso

Se llevaron a cabo varias simulaciones para analizar el comportamiento de la microrred (ver figura 3) durante cortocircuitos de CC y defectos a tierra. Normalmente, el punto neutro se conecta directamente a tierra para evitar una transferencia de tensión peligrosa al lado de baja tensión (BT) en caso de fallo entre los devanados del primario y el secundario.

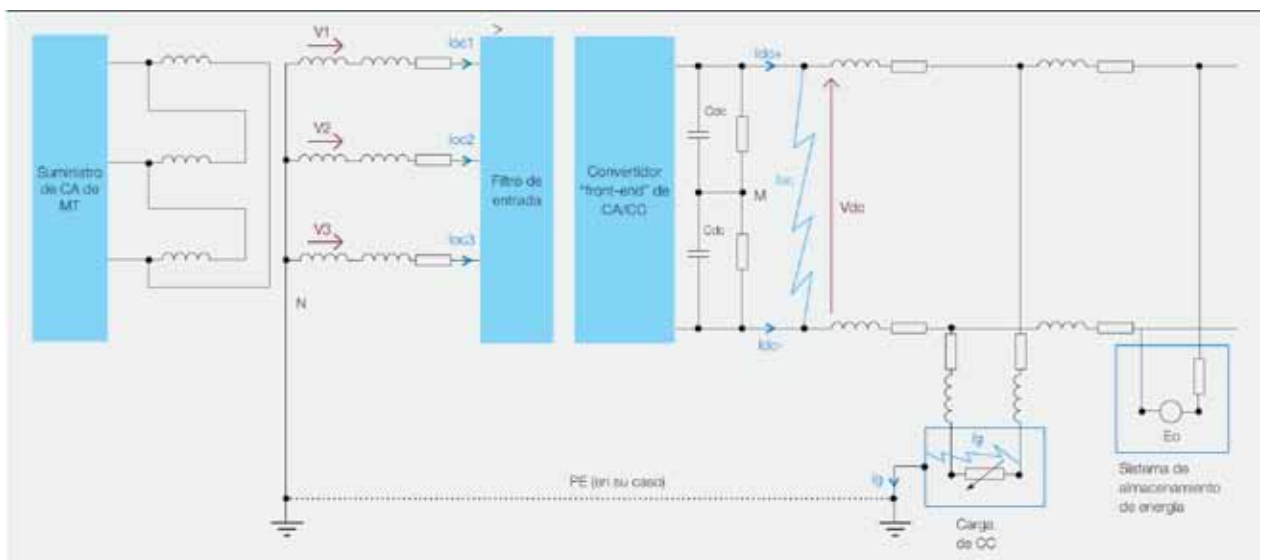


Figura 3. Esquema de microrred con el punto neutro del transformador puesto a tierra para análisis de defecto a tierra de corriente continua.

En caso de cortocircuito de CC con baja resistencia de fallo, la corriente de fallo entra en los diodos supresores sin que los IGBT puedan limitarla en forma alguna, ni siquiera si el sistema de control envía una señal de bloqueo del IGBT.

En este caso, apagar la modulación del IGBT es inútil, porque el diodo conectado en antiparalelo al IGBT hace que el FEC trabaje como rectificador de diodos trifásico. Las intensidades en juego pueden ser varias veces superiores a la intensidad nominal del FEC en el lado de CC (125 A, con $R_{sc} = 1 \text{ m}\Omega$, ver figura 4).

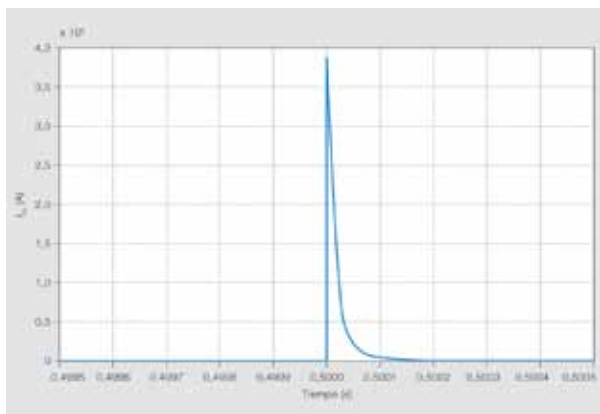


Figura 4. Tendencia de la corriente de fallo durante un cortocircuito en el lado de corriente continua.

Con bajas resistencias de fallo, la contribución del FEC a la corriente de cortocircuito puede alcanzar valores de hasta 16 veces la intensidad nominal del FEC en el lado de CC.

En caso de derivación a tierra de CC con baja resistencia de fallo, la corriente de fallo entra en los diodos supresores de la estrella catódica sin que los IGBT puedan limitarla en forma alguna, y también en los IGBT de la estrella anódica. Las intensidades alcanzan valores varias veces el de la nominal del FEC en el lado de CC (125 A, $R_g = 100 \text{ m}\Omega$). El apagado de la modulación del IGBT puede interrumpir únicamente la contribución del ESS.

Dependiendo del valor de R, la corriente en el lado de CA puede ser completamente positiva y todo el componente de CA que es absorbido por el convertidor durante un fallo alimenta el fallo (ver figura 5).

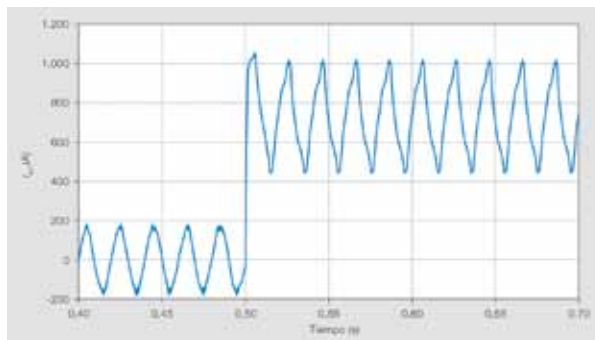


Figura 5. Tendencia de corriente i_{ac1} durante un defecto de tierra en el lado de corriente continua con sistema de almacenamiento de energía y $R_g = 100 \text{ m}\Omega$.

Con la disminución de R, la contribución del FEC a la corriente de cortocircuito puede alcanzar valores de hasta 27 veces la intensidad nominal del FEC en el lado de CC. Una contribución de ese tipo no puede ser eliminada por el bloque de IGBT, pues atraviesa los diodos supresores.

Análisis de la protección de fallo

Conviene señalar que, mientras para la protección de cortocircuitos de CC se puede emplear un interruptor unipolar, para los defectos a tierra es necesario uno bipolar, porque el sistema FV y el ESS pueden alimentar el fallo a través del polo de CC en buen estado y, además, las probabilidades de que el defecto perjudique a los polos positivo y negativo de CC son iguales.

Análisis de cortocircuitos de CC

Para simular cortocircuitos de CC, se apaga la modulación tras un tiempo de protección $Desat$ típico ($2 \mu\text{s}$), mientras se retrasa el disparo 15 ms para simular un interruptor de CC (ver figura 6).

Para reducir la sobretensión, el interruptor se sitúa después de las capacitancias de la barra de CC. Debido a la protección $Desat$, las intensidades indicadas entran en los diodos del FEC (ver figura 7).

El contenido de energía de un transitorio (el Pt) durante una interrupción es de unos $170 \text{ kA}^2\text{s}$. Este valor es excesivo

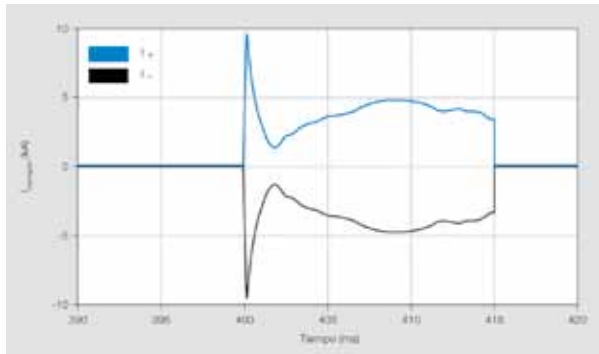


Figura 6. Corrientes que circulan en los dos polos del interruptor.

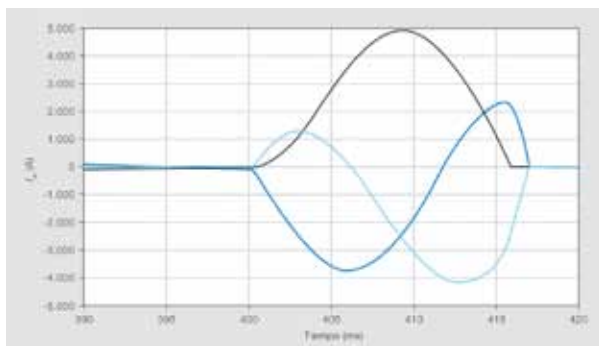


Figura 7. Corrientes de corriente alterna en las tres fases durante el disparo del interruptor.

para el FEC utilizado. Para los semiconductores considerados en la simulación, el valor de I^2t admisible es de 42 kA²s.

Por lo tanto, hay que sobredimensionar los diodos para que el FEC sea capaz de soportar los transitorios.

Análisis del defecto a tierra

Se simuló el mismo fallo descrito anteriormente entre el polo positivo de CC y tierra, con interrupción mediante un interruptor de CC. Las corrientes de CA resultantes fueron similares a las del cortocircuito entre polos. Por otra parte, las corrientes que circulan por los polos de CC del FEC son muy distintas (ver figura 8). En efecto, la corriente a través del polo defectuoso aumenta mientras la otra permanece próxima a cero, gracias a la protección Desat. La I^2t es de unos 157 kA²s y es comparable a la del cortocircuito. Una vez más, hay que sobredimensionar los diodos.

En resumen, no pueden ignorarse los defectos entre polos y entre polo y tierra en las redes de CC alimentadas por un FEC y equipadas con sistemas de generación FV y/o ESS. Además, la protección Desat no basta para proteger los componentes de conmutación del FEC, puesto que el apagado de la modulación IGBT no limita las

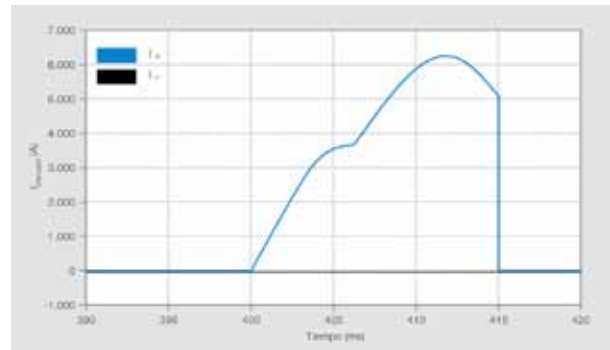


Figura 8. Corrientes que circulan en los dos polos del interruptor.

corrientes que atraviesan los diodos supresores. Por ello, hay que incorporar y dimensionar con cuidado aparatos de protección especiales para interrumpir de forma segura las corrientes de fallo y limitar los daños consiguientes.

Con el creciente número de interconexiones entre microrredes de CC BT y redes de CA, las protecciones sofisticadas frente a fallos serán una parte esencial del diseño de sistemas eléctricos. ■

Referencias

Nota del editor: la nota técnica aquí publicada está respaldada por bibliografía cuyas referencias no se publican por normas editoriales. Por consultas de esta índole, o cualquier otra acerca de la temática tratada, consultar a los autores:

Por Marco Carminati, marco.carminati@it.abb.com, y Enrico Ragaini, enrico.ragaini@it.abb.com

ABB Italia

Fuente: ABB Review 1/2016

www.abb.com.ar