

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 770 016**

51 Int. Cl.:

H02J 3/36 (2006.01)

H02H 7/26 (2006.01)

H02H 7/28 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.10.2016** **PCT/FR2016/052656**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.04.2017** **WO17064434**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.10.2016** **E 16794379 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.12.2019** **EP 3363093**

54 Título: **Equipo de interconexión para una red de alta tensión continua**

30 Prioridad:

16.10.2015 FR 1559921

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
30.06.2020

73 Titular/es:

SUPERGRID INSTITUTE (33.3%)
23 rue Cyprian
69100 Villeurbanne, FR;
INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE
(33.3%) y
UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES (33.3%)

72 Inventor/es:

LEON GARCIA, WILLIAM;
BERTINATO, ALBERTO;
TIXADOR, PASCAL;
RAISON, BERTRAND y
LUSCAN, BRUNO

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 770 016 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Equipo de interconexión para una red de alta tensión continua

La invención se refiere a las redes de transmisión y/o de distribución de corriente continua bajo una tensión elevada, en general designadas bajo el acrónimo HVDC. La invención se relaciona en particular con la selectividad y el tiempo de corte a nivel del nodo confrontado con un cortocircuito.

Las redes HVDC son en particular contempladas como una solución de interconexión de sitios de producción de electricidad dispares o no sincronizados, que aparecen con el desarrollo de las energías renovables. Las redes HVDC son en particular contempladas para la transmisión y la distribución de energía producida por los parques públicos marinos en lugar de las tecnologías de corriente alterna, debido a las pérdidas en las líneas inferiores y la ausencia de incidencia de las capacidades parásitas de la red sobre largas distancias. Dichas redes tienen típicamente niveles de tensión del orden de 50 kV y más.

Para la transmisión de electricidad punto a punto, se puede realizar un seccionamiento por medio de un convertidor de final de línea, provisto de un disyuntor. Por el contrario, el seccionamiento no se puede realizar más para dicho convertidor en la transmisión multipunto o multinodo. El corte de la corriente continua en dichas redes es un factor crucial que condiciona directamente la viabilidad y el desarrollo de dichas redes. De hecho, la aparición de un cortocircuito al nivel de un nodo se propaga muy rápidamente en toda la red. En ausencia de un corte suficiente rápido al nivel del nodo, la corriente de cortocircuito continúa aumentando y puede alcanzar varias decenas de kA en algunos ms. La corriente de cortocircuito puede por tanto sobrepasar el poder de corte de los disyuntores de corriente continua de los diferentes nodos. La corriente de cortocircuito podrá por tanto dañar la electrónica de potencia utilizada en los convertidores CA/CC.

Una solución conocida consiste en situar un disyuntor de corriente continua muy rápido en serie con las reactancias, para limitar la velocidad de crecimiento de la corriente de cortocircuito y permite su corte en un tiempo muy breve. Una medida local de tensión y de corriente a nivel del disyuntor permite controlar su apertura en caso de aparición de un cortocircuito.

Dicha solución induce a pérdidas no despreciables y se basa en el nivel de rapidez del disyuntor, lo que implica un coste de disyuntor particularmente elevado. Además, dicha solución resulta imperfecta para obtener una selectividad satisfactoria del corte en caso de cortocircuito y no ha sido todavía probada para asegurar una protección para la transmisión multinodo.

El documento publicado por Justine Descoux y otros, el 16 de junio de 2013 en el ámbito de la conferencia de la IEEE en Grenoble en 2013, titulado "*Protection system for Meshed HVDC network using superconducting fault current limiters*" en las páginas 1 a 5, describe un equipo de interconexión para red de alta tensión de corriente continua. Este equipo dispone de un primer y un segundo bornes para la conexión a líneas de una red de alta tensión, de un tercer borne para la conexión a una estación local y de un nodo conectado a estos bornes. Un disyuntor está conectado entre el primer borne y el nodo, otro disyuntor está conectado entre el segundo borne y el nodo. Un limitador de corriente de superconductor está conectado entre el tercer borne y el nodo. Dicho sistema no permite ni localizar ni aislar rápidamente un fallo.

El documento EP2908398 describe una estructura de interruptor en serie para una red de alta tensión. Éste interruptor comprende un interruptor controlado en serie con un limitador de corriente de superconductor.

El documento WO2012/123015 describe limitador es de corriente situados en la intersección entre subsegmentos de una red de alta tensión de corriente continua, con el fin de evitar la propagación de un fallo a toda la red.

La invención contempla resolver uno o varios de estos inconvenientes. La invención se relaciona por tanto con un equipo de interconexión para una red de alta tensión de corriente continua, tal y como se define en la reivindicación 1.

La invención se relaciona del mismo modo con el objeto de las reivindicaciones dependientes. Las diferentes características de las reivindicaciones dependientes pueden del mismo modo combinarse de forma independiente a las características de la reivindicación 1, sin constituir una generalización intermedia.

La invención se relaciona igualmente con una red eléctrica de alta tensión de corriente continua, que comprende:

- líneas de alta tensión;

- al menos tres equipos de interconexión tales como los reivindicados, el primer y el segundo bornes de cada uno de dichos equipos de interconexión que están interconectados por medio de dichas líneas de alta tensión.

Otras características y ventajas de la invención aparecerán claramente de la descripción que se hace a continuación, a título indicativo y no limitativo, con referencia los dibujos adjuntos, en los cuales:

- la figura 1 ilustra un ejemplo simplificado de una red de alta tensión de corriente continua que implementa los equipos de interconexión según la invención, asociada a redes alternas;

- la figura 2 ilustra de forma esquemática un ejemplo de modo de realización de un equipo de interconexión según la invención;

- la figura 3 ilustra un diagrama del modo de funcionamiento de un limitador de corriente de superconductor, en función de su temperatura y de su densidad de corriente;

5 - la figura 4 ilustra un diagrama del modo de funcionamiento de un limitador de corriente de superconductor en función de su corriente I del tiempo de mantenimiento de esta corriente;

- la figura 5 ilustra de forma esquemática un ejemplo de dispositivo de control de un equipo de interconexión según la invención;

- la figura 6 ilustra un caso de figura de cortocircuito aplicada a un equipo de interconexión según la figura 2;

10 - la figura 7 es un diagrama que ilustra diferentes corrientes durante un cortocircuito aplicado al equipo de interconexión de la figura 2;

- la figura 8 es un diagrama que ilustra la temperatura de diferentes limitadores de corriente durante un cortocircuito aplicado al equipo de interconexión de la figura 2;

- la figura 9 ilustra de forma esquemática un dispositivo de protección de una estación local;

15 - la figura 10 ilustra la proporción de tensión con respecto a la tensión nominal de línea durante un cortocircuito al nivel de un dispositivo de protección según otro aspecto de la invención.

La invención propone un equipo de interconexión que comprende al menos tres bornes conectados a un nodo, la conexión entre cada uno de sus bornes y el nodo que incluye un limitador de corriente de superconductor y un interruptor controlado (o disyuntor) conectados en serie. Un dispositivo configurado para inyectar una corriente eléctrica en el nodo durante una bajada de tensión en este nodo (en particular un condensador conectado entre el nodo y la tierra almacena la energía en el ejemplo detallado a continuación) está destinado a activar uno de los limitadores de corriente en cuyo borne se produce un cortocircuito. La energía inyectada por este dispositivo atraviesa este limitador de corriente hacia el cortocircuito, después el interruptor controlado conectado en serie se abre. Por tanto, sólo este limitador de corriente es activado y no los otros limitadores de corriente, se obtiene por tanto una selectividad de la apertura de los interruptores controlados.

La figura 1 es una representación esquemática simplificada de un ejemplo de una red 1 de alta tensión de corriente continua que implementa los equipos 21, 22 y 23 de interconexión según la invención, estando asociada la red 1 de alta tensión de corriente continua a redes alternas.

30 La red 1 comprende líneas 112, 113, 123 y 133 de alta tensión. La línea 112 de alta tensión conecta los equipos 21 y 22, la línea 123 de alta tensión conecta los equipos 22 y 23, y la línea de alta tensión 113 conecta los equipos 21 y 23. La red 1 comprende estaciones 31, 32 y 33 locales.

Las estaciones 31, 32 y 33 locales pueden incluir de manera conocida o bien generadores eléctricos (tales como parques eólicos, centrales maremotrices, centrales nucleares, centrales eléctricas térmicas o incluso generadores fotovoltaicos) o redes locales de transporte o de consumo.

35 Las estaciones 31, 32 y 33 locales comprenden en este caso cada uno un convertidor continuo/alternio y un equipo (generador o carga) alternio que representa el conjunto de la red alterna local en aras de la simplicidad. La estación 31 local comprende por tanto un convertidor 311 conectado al equipo 21 y una máquina 312 giratoria utilizada como generador conectada al convertidor 311. La estación 32 local comprende un convertidor 321 conectado al equipo 22 y un equipo 322 alternio conectado al convertidor 321. La estación 33 local comprende un convertidor 331 conectado al equipo 23 y un equipo 332 alternio conectado al convertidor 331. La estación 33 local está en este caso conectada al equipo 23 por medio de un dispositivo 24 de protección y de una línea 133 de alta tensión. Los convertidores 311, 321 y 331 son de forma ventajosa de tipo convertidor de fuente de tensión VSC, por ejemplo, de tipo modular de nivel múltiple o MMC (para *Modular Multi-Level Converter*) de tipo semipunto, punto completo, o un convertidor de fuente de tensión de dos niveles. En aras de la simplicidad, sea ilustrado en este caso únicamente una polaridad de la red de alta tensión. Cada equipo de conexión 31 a 33 puede por supuesto presentar bornes y componentes duplicados para gestionar la otra polaridad de la red.

40 La figura 2 ilustra de forma esquemática un ejemplo de un modo de realización de un equipo 2 de interconexión. El equipo 2 de interconexión comprende un borne 201 y un borne 202 destinados a ser conectados a líneas 11 de alta tensión de corriente continua respectivas, a su vez conectadas a otros equipos de interconexión. Un tercer borne 203 está destinado a ser conectado a una estación 3 (pero puede estar conectado a otra línea de alta tensión).

Un nodo 204 está conectado a los bornes 201, 202 y 203 por medio de ramas respectivas. El nodo 204 está por tanto conectado:

- al borne 201 por medio de un limitador 251 de corriente de superconductor y de un interruptor 261 controlado conectados en serie;

- al borne 202 por medio de un limitador 252 de corriente de superconductor y de un interruptor 262 controlado conectados en serie;

5 - al borne 203 por medio de un limitador 253 de corriente de superconductor y de un interruptor 263 controlado conectados en serie.

10 Los órdenes de conexión del limitador 251 de corriente de superconductor y del interruptor 261 controlado entre el borne 201 y el nodo 204, del limitador 252 de corriente de superconductor y del interruptor 262 controlado entre el borne 202 y el nodo 204, o del limitador 253 de corriente de superconductor y del interruptor 263 controlado entre el borne 203 y el nodo 204, se pueden invertir con respecto a la configuración ilustrada. Los limitadores 251 a 253 de corriente están configurados para mantener la corriente que atraviesa los interruptores 261 a 263 controlados a un nivel inferior a la potencia de corte de estos interruptores controlados, para por tanto permitir la apertura efectiva de uno de estos interruptores 261 a 263 en caso de cortocircuito. Con los limitadores 251 a 253 de corriente de tipo de superconductor, estos tienen una diferencia de potencial nula entre sus bornes cuando están en el estado de superconductor, lo que permite por tanto limitar las pérdidas inducidas en cada rama. Los limitadores 251 a 253 de corriente pueden o bien estar constituido de un componente limitador de corriente, o bien incluir una combinación de componentes conectados de manera conocida ya sea en paralelo en serie con un componente limitador de corriente, para obtener una función de limitación de corriente.

15 Los interruptores 261 a 263 controlados son de forma ventajosa interruptores electromecánicos, en particular debido a las bajas pérdidas de línea que son capaces de generar.

20 Un condensador 27 está conectado entre la tierra y el nodo 204. En funcionamiento normal, la tensión en los bornes del condensador 27 es igual a la tensión nominal en las líneas 11 de alta tensión.

25 El equipo 2 de interconexión comprende además en este caso un circuito 28 de control configurado para controlar de forma selectiva la apertura de cada uno de los interruptores 261 a 263 controlados. Un ejemplo de circuito 28 de control es por ejemplo ilustrado de forma esquemática en la figura 5. El circuito 28 de control comprende por ejemplo un circuito 282 de tratamiento. El circuito 282 de tratamiento está conectado a una interfaz 283 de entrada destinada recibir una medida de la corriente que atraviesa un limitador de corriente, y una interfaz 284 destinada recibir una medida de la tensión en los bornes de este limitador de corriente. Por supuesto podrán estar previstas interfaces dedicadas para medir estos parámetros para cada uno de los limitadores de corriente. El circuito 282 de tratamiento está conectado a un relé 281. El relé 281 está a su vez conectado a una interfaz 285 de salida. Para un control apropiado, el circuito 282 de tratamiento puede aplicar un control de apertura en el relé 281, el relé 281 que aplica por tanto un control de apertura a la interfaz 285 de salida. La interfaz 285 de salida está conectada a un electrodo de control de uno de los interruptores controlados. Cada uno de los interruptores 261 a 263 controlados puede presentar una interfaz de salida y un relé dedicados. Cada uno de los interruptores 261 a 263 controlados podrá presentar un tiempo de corte comprendido entre 10 y 50 ms (por ejemplo de 25 ms) después de la recepción de su orden de apertura.

30 El circuito 28 de control mide en este caso la corriente que atraviesa cada borne 201 a 203, por ejemplo midiendo la corriente que atraviesa cada uno de los limitadores 251 a 253 de corriente. Cuando una corriente medida sobrepasa un umbral, por ejemplo la corriente crítica de uno de los limitadores 251 a 253 de corriente, el circuito 28 de control determina que se presenta probablemente un cortocircuito al nivel de uno de los bornes 201 a 203. El circuito 28 de control mide en este caso igualmente la tensión en los bornes de cada limitador 251 a 253 de corriente. Cuando la tensión medida por un limitador de corriente sobrepasa un umbral, el circuito 28 de control determina que este limitador de corriente es activado, ya que un limitador de corriente de superconductor presenta una tensión sensiblemente nula en funcionamiento normal. Cuando el circuito 28 de control determina que el umbral de corriente y el umbral de tensión son sobrepasados para un limitador de corriente, el circuito 28 de control controla la apertura del interruptor controlado con el cual este limitador de corriente está conectado en serie. De forma ventajosa, el circuito 28 de control calcula el cuadrado de la tensión medida en los bornes de cada uno de los limitadores 251 a 253. Cuando el cuadrado de la tensión en los bordes de uno de los limitadores sobrepasa un umbral, el circuito 28 de control puede del mismo modo controlar la apertura del interruptor controlado, conectado en serie con este limitador. El cuadrado de la tensión en los bornes de un limitador de corriente de superconductor es de hecho bastante representativo de su fuga. En el caso de un cortocircuito que aparece a nivel intermedio de una línea de alta tensión, éste umbral será sobrepasado por los limitadores de corriente presentes en los dos extremos de la línea, con solamente un desfase temporal entre estos limitadores de corriente, en función de las distancias respectivas que le separan del cortocircuito. El circuito 28 de control puede de forma alternativa calcular la proporción de la tensión medida en los bornes de cada uno de los limitadores 251 a 253 con respecto a la corriente que atraviesa este limitador respectivo, para determinar si una resistencia de un limitador ha alcanzado un umbral de fuga. El circuito 28 de control puede de forma alternativa calcular para cada limitador 251 a 253 su valor I^2t , con I siendo la corriente que atraviesa el limitador correspondiente y " t " el tiempo, para detectar eventuales puntos calientes y defectos fuertemente restrictivos, cuando la corriente de defecto está próxima a la corriente crítica del limitador.

La energía almacenada en el condensador 27 permite por tanto activar más fácilmente el limitador de corriente más próximo al borne en el que está presente el cortocircuito, debido a la bajada de tensión constatada en el borne que presenta el cortocircuito. La apertura del interruptor conectado en serie con el limitador puede a continuación realizarse en un tiempo suficientemente breve antes de que las otras zonas de limitadores de corriente no induzcan por sí mismas la apertura de sus interruptores controlados respectivos.

Dicho equipo 2 de interconexión, resulta ventajoso ya que permite cortar la corriente para aislar el borne que presenta el cortocircuito sin por tanto necesitar una comunicación entre los diferentes equipos de interconexión de la red. Además, dicho equipo 2 de interconexión permite hacer la red 1 significativamente más robusta desde el punto de vista de la selectividad en las configuraciones crítica siguientes:

- una línea de alta tensión (sana) conectada al equipo de interconexión que sufre el cortocircuito se pone fuera de servicio (esto es verdad cuando hay al menos 3 bornes de conexión a las líneas de alta tensión de los equipos de interconexión);

- el equipo de interconexión que sufre el cortocircuito es conectado a una línea de alta tensión aérea sana (esto es verdad cuando hay al menos 3 bornes de conexión a las líneas de alta tensión del equipo de interconexión)

- fuertes disparidades de longitud de las líneas de alta tensión conectadas a un equipo de interconexión;

- una inversión de la corriente en el equipo de interconexión durante la aparición del cortocircuito;

- fuertes disparidades de corrientes críticas para los limitadores de corriente en un mismo equipo de interconexión de la red 1.

- el equipo de interconexión que sufre el cortocircuito está conectado a una estación de conversión (verdad para un convertidor MMC por ejemplo)

Los limitadores 251, 252 y 253 de corriente pueden ser del tipo restrictivo de superconductor. Dichos limitadores presentan una resistencia nula en funcionamiento normal y aumentan muy fuertemente cuando son activados. Los diagramas de las figuras 3 y 4 son representativos de un ejemplo de funcionamiento de dichos limitadores. Un limitador de corriente de resistencia superconductora comprende típicamente una cinta de material superconductor atravesado por la corriente nominal entre sus bornes (por ejemplo para un limitador de tipo YBCO). La cinta de material superconductor se sumerge en un baño de nitrógeno líquido para mantenerla por debajo de su temperatura crítica antes de su activación.

La figura 3 es un diagrama que ilustra el modo de funcionamiento de un limitador de corriente de resistencia superconductora en función de la necesidad de corriente que le atraviesa y de su temperatura. En una primera zona designada por nd, el limitador de corriente no es disipativo, debido a una densidad baja de corriente y a una temperatura baja. En una segunda zona designada por etd, el limitador de corriente está en un estado disipativo. En una tercera zona designada por ra, el limitador de corriente está en un estado de fuga térmica muy fuertemente disipativa y permanente, designado por el término de *runaway* en la lengua inglesa. Es en este estado en el que el limitador de corriente asegura lo esencial de su funcionamiento de limitación de corriente.

La figura 4 es un diagrama que ilustra los tiempos de activación en función de la corriente que atraviesa el limitador de corriente (en este caso ilustrado por la proporción de corriente con respecto a la corriente crítica).

Según la invención, el objetivo es activar el limitador de corriente lo más próximo al borne que presenta el cortocircuito de manera que se abre su interruptor antes de que los otros limitadores de corriente del equipo no hayan alcanzado su estado de fuga, y a tal fin garantizar la continuidad de servicio de la red 1 debido a la excelente selectividad obtenida.

Se pueden determinar criterios de dimensionamiento del condensador 27 que favorecen la activación del limitador de corriente apropiado. Se puede partir de la hipótesis de que el condensador 27 debe poder proporcionar una energía suficiente para permitir la activación de un limitador de corriente (alcance de la temperatura de fuga del limitador de corriente) antes de un cierto retardo. Suponiendo que los intercambios térmico son sensiblemente despreciables durante una fuga, se considerará entonces el limitador de corriente en estado adiabático durante su fuga. El balance energético del limitador de corriente podrá por tanto ser formulado como sigue:

$$\int_{t_1}^{t_{max}} v_{sc}(t) \times i_{sc}(t) \times dt = Vol \times \int_{T_0}^{T_{max}} Cp(T) \times dT$$

Con Vsc(t) la tensión en los bornes del limitador, isc(t) la corriente que la atraviesa, t1 el instante de aparición de un defecto, tmax el instante máximo de final de la limitación, Tmax la temperatura máxima de seguridad, Vol el volumen del limitador, To la temperatura nominal de funcionamiento del limitador de corriente y Cp su capacidad térmica por volumen.

Tomando como hipótesis un instante de activación (tquench) mucho más precoz que el instante de fin de limitación (t1 – tquench << t1 – tmax), el balance energético puede ser aproximadamente como sigue:

$$\int_{t_{quench}}^{t_{max}} v_{sc(t)} \times i_{sc(t)} \times dt = Vol \times \int_{T_c}^{T_{max}} Cp_{(T)} \times dT$$

Se deduce que:

$$V_{grid} \times I_c \times \Delta t_{open} \approx Vol \times Cp_{moy(T_c-T_{max})} \times (T_{max} - T_c) [1]$$

- 5 Con V_{grid} la tensión de la red de alta tensión, I_c la corriente de limitación o corriente crítica, T_c la temperatura de activación o temperatura crítica del limitador, Δt_{open} el tiempo máximo de limitación ($t_{max}-t_{quench}$) y Cp_{moy} la capacidad térmica media entre T_c y T_{max} .

La energía de activación de un limitador de corriente correspondiente a la energía necesaria para hacer elevar su temperatura hasta la temperatura T_c como sigue:

$$E_{quench} = \int_{t_1}^{t_{quench}} v_{sc(t)} \times i_{sc(t)} \times dt = Vol \int_{T_0}^{T_c} Cp_{(T)} dT$$

- 10 Se deduce que:

$$E_{quench} \approx Vol \times Cp_{moy(T_0-T_c)} \times (T_c - T_0) [2]$$

Las relaciones [1] y [2] permiten estimar la energía de activación de un limitador de corriente a partir de parámetros de red como sigue:

$$E_{quench} \approx (V_{grid} \times I_c \times \Delta t_{open})/k$$

$$k = [Vol \times Cp_{moy(T_c-T_{max})} \times (T_{max} - T_c)]/[Vol \times Cp_{moy(T_0-T_c)} \times (T_c - T_0)]$$

- 15 $k \approx 20$, valor típico para una cinta YBCO

Se deduce que:

$$E_{quench} \approx 0.05 \times V_{grid} \times I_c \times \Delta t_{open}$$

- 20 Finalmente, la energía almacenada por el condensador 27 debe permitir activar el limitador de corriente con la corriente (I_c) crítica lo más elevada (I_{cmax}) de entre los diferentes limitadores de corriente que componen el dispositivo de interconexión, esto le proporcionará el valor de la capacidad (C_{min}) mínima en el caso en el que no hay otras fuentes de corriente

$$E_{Cond} = 0.5 \times C \times V_{grid}^2 \approx 0.05 \times V_{grid} \times I_c \times \Delta t_{open}$$

Se deduce que:

$$C_{min} \approx (0.1 \times I_{cmax} \times \Delta t_{open})/V_{grid}$$

- 25 Por ejemplo, para una red con una tensión V_{grid} de 320kV, una corriente I_c crítica de 2,25kA y un tiempo máximo de alimentación de 25 ms, la ecuación permite estimar una capacidad de 17,8μF.

Los limitadores de corriente 251 a 253 son con preferencia de tipo superconductor de alta temperatura de segunda generación (designado por 2G HTS). Dichos limitadores de corriente presentan una gran homogeneidad de corriente crítica sobre toda la longitud del material que les constituyen, como por ejemplo dispersiones inferiores a un 10%.

- 30 Dicha homogeneidad resulta preferible para defectos fuertemente resistentes.

La figura 6 representa el equipo 2 de interconexión de la figura 2 en un ejemplo de configuración de cortocircuito. En este ejemplo, el cortocircuito está presente a nivel de la conexión con el borne 203. La selectividad debe permitir la apertura del interruptor 263 controlado antes de la activación de los limitadores 251 y 252 de corriente, de manera que se mantiene la interconexión de las líneas 11 de alta tensión por medio del nodo 204. El funcionamiento del equipo 2 de interconexión se aclarará a partir de la lectura de los diagramas de las figuras 7 y 8.

- 35

La figura 7 ilustra diferentes proporciones corriente/corriente crítica en función del tiempo. Se presentan impedancias diferentes en las líneas de alta tensión conectadas a los limitadores 251 y 252 de corriente. La simulación ha sido realizada en este caso con una misma corriente crítica para cada uno de los limitadores 251 a 253 de corriente. La corriente I_{cap} normalizada ilustrada en trazado continuo ilustra la corriente que atraviesa el conductor 27. La corriente I_{251} normalizada en trazado discontinuo representa la corriente a través del limitador 251 de corriente. La corriente normalizada I_{252} en trazos y puntos alternados representa la corriente a través del limitador 252 de corriente. La corriente I_{253} normalizada en línea de puntos representa la corriente a través de limitador 253 de corriente. La figura 8 ilustra las temperaturas de diferentes limitadores de corriente de superconductor en función del tiempo.

Durante la aparición del cortocircuito en el instante $t=0$, el condensador 27 carga a través del limitador 253 de corriente hacia el cortocircuito. La corriente que atraviesa el limitador 253 de corriente alcanza varias veces la corriente crítica del limitador 253, de manera que crea su fuga y le activa. La impedancia del limitador 253 de corriente crece, de manera que la corriente que atraviesa el limitador 253 de corriente decrece por tanto, hasta un valor próximo alrededor de la corriente crítica. Debido al aumento de la tensión en los bornes del limitador 253 de corriente y del nivel de corriente que lo atraviesa, el circuito 28 de control determina que el interruptor 263 debe ser abierto. El interruptor 263 puede por tanto ser abierto (no ilustrado en los diagramas) con una corriente que la atraviesa inferior a su potencia de corte. Mientras tanto, las corrientes a través de los limitadores 251 y 252 crecen del mismo modo. La activación del limitador 253 de corriente permite mantener los limitadores 251 y 252 de corriente fuera de su zona de fuga. Por tanto no es necesario disponer de interruptores 261 a 263 controlados particularmente rápidos, lo que hace que el coste de fabricación del equipo 2 de interconexión sea razonable.

Cada rama del equipo 2 de interconexión podrá por ejemplo estar dimensionada para tensiones continuas al menos iguales a 10kV, incluso al menos iguales a 50kV, típicamente al menos iguales a 100kV, y potencialmente al menos iguales a 300kV, incluso 500kV. Dicho dispositivo de corte de corriente podrá igualmente ser dimensionado para una corriente continua de servicio al menos igual a 1kA, incluso al menos igual a 2kA.

Disponiendo equipos 2 de interconexión en los extremos de diferentes líneas de alta tensión, se obtiene una selectividad para permitir activar en primer lugar el equipo de interconexión más próximo al cortocircuito sobre esta línea, debido a las diferencias de impedancia a ambos lados del cortocircuito.

La figura 9 ilustra de manera esquemática un dispositivo 24 de protección que puede estar conectado a la entrada de un convertidor 301 modular multinivel. El dispositivo 24 de protecciones de forma ventajosa utilizado en combinación con un equipo 2 de interconexión, con el fin de proteger el convertidor 301 y su equipo o red 302 alterna. El dispositivo 24 de protección comprende un borne 245 de entrada destinado a la conexión de una línea intermedia de alta tensión de una primera polaridad. El dispositivo 24 de protección comprende del mismo modo un borne 246 de entrada destinado a la conexión de una línea intermedia de alta tensión de una segunda polaridad. Estas líneas de alta tensión intermedias son a su vez conectadas al equipo 23 de interconexión, como se ilustra en la figura 1. Una inductancia 243 está conectada entre la primera entrada del convertidor 301 y el borne 245 de entrada. Una inductancia 244 está conectada entre una segunda entrada del convertidor 301 y el borne 246 de entrada. Un condensador 241 está conectado entre el borne 245 y la tierra. Un condensador 242 está conectado entre el borne 246 de entrada y la tierra. Los condensadores 241 y 242 permiten por ejemplo activar limitadores de corriente (no ilustrados e interruptores controlados de dispositivos de seguridad conectados a los bornes 245 y 246 de entrada. Las inductancias 243 y 244 están en particular destinadas a garantizar el control del convertidor 301 en un caso en el que se produjera un cortocircuito en la red, particularmente para el tipo de convertidor detallado anteriormente. El objetivo es en particular garantizar que las tensiones en los bornes del convertidor 301 del lado continuo permanezcan superiores a las tensiones del lado alterno. El objetivo es en particular conservar una tensión en cada borne de corriente continua al menos igual a 0,7 veces la tensión nominal en las líneas de alta tensión conectadas al dispositivo 24 de protección. Se puede colocar una reactancia a la salida del convertidor, para facilitar el control del convertidor durante el fallo, en particular para un convertidor multinivel de tipo semipunto.

Con un nivel de tensión nominal de 320kV en estas líneas de alta tensión, con una longitud de 350km para estas líneas de alta tensión, una simulación ha permitido determinar que los condensadores 241 y 242 de 5μF y las inductancias 243 y 244 de 10mH resultaron satisfactorios. Una simulación con dichos componentes se ilustra en particular en la figura 10, para un cortocircuito que interviene a nivel del convertidor 301. El diagrama de la figura 10 ilustra la proporción de la tensión en un borne de entrada con respecto a la tensión nominal de su línea de alta tensión, en función del tiempo.

El dispositivo de inyección de corriente en el nodo del equipo 22 de interconexión es un condensador en el ejemplo detallado anteriormente. Del mismo modo se puede contemplar que el dispositivo de inyección esté formado de un convertidor continuo/continuo, configurado para inyectar una corriente en el nodo 204 durante una bajada de tensión sobre este modo, estando configurado el convertidor para inyectar una corriente con una energía E_{quench} que verifica la relación:

$$E_{quench} \geq 1/k \times V_i \times I_c \times \Delta t_{open}$$

Con

$$k = \left[Vol \times Cp_{moy(Tc-Tmax)} \times (Tmax - Tc) \right] / \left[Vol \times Cp_{moy(T0-Tc)} \times (Tc - T0) \right]$$

Con Δt_{open} siendo la duración máxima tolerada para el fallo. Δt_{open} podrá por ejemplo ser del orden de 10ms o del orden de 25ms.

REIVINDICACIONES

1. Equipo (2) de interconexión para una red de alta tensión de corriente continua, que comprende:

- un primer y un segundo bornes (201, 202) configurados para la conexión a una primera y una segunda líneas de una red de alta tensión de corriente continua, un tercer borne (203) configurado para la conexión a una estación local o una línea de red de alta tensión;

- un nodo (204) conectado a los primer a tercer bornes (201, 203); caracterizado por que comprende:

- un primer limitador (251) de corriente de superconductor y un primer interruptor (261) controlado conectados en serie entre el primer borne y dicho nodo;

- un segundo limitador de corriente de superconductor y un segundo interruptor controlado conectados en serie entre el segundo borne y dicho nodo;

- un tercer limitador de corriente de superconductor y un tercer interruptor controlado conectados en serie entre el tercer borne y dicho nodo;

- un dispositivo configurado para inyectar una corriente eléctrica en dicho nodo durante una bajada de tensión en dicho nodo.

2. Equipo (2) de interconexión para una retirada tensión de corriente continua según la reivindicación 1, en el cual dicho dispositivo de inyección de corriente eléctrica está configurado para inyectar una corriente con una energía E_{quench} que verifica la relación siguiente:

$$E_{quench} \geq 1/k \times V_i \times I_c \times \Delta t_{open}$$

Con V_i siendo la tensión nominal en el primer y segundo bornes, I_c la corriente crítica del limitador que tenga la corriente crítica más elevada entre los primeros a 3er limitadores de corriente de superconductor, Δt_{open} la duración máxima tolerada para un fallo,

$$k = [Vol \times Cp_{moy}(T_c - T_{max}) \times (T_{max} - T_c)] / [Vol \times Cp_{moy}(T_0 - T_c) \times (T_c - T_0)],$$

Con C_p_{moy} siendo la capacidad térmica media entre dos temperaturas para este limitador de corriente, T_{max} su temperatura máxima de seguridad, T_c su temperatura de activación, T₀ su temperatura nominal de funcionamiento, Vol su volumen de material superconductor.

3. Equipo (2) de interconexión para una red de alta tensión de corriente continua según la reivindicación 1 o 2, en el cual dicho dispositivo de inyección de corriente eléctrica es un condensador (27) conectado entre dicho nodo (204) y la tierra.

4. Equipo (2) de interconexión según la reivindicación 3, en el cual la capacidad C del condensador (27) verifica la relación siguiente:

$$C \geq (0.1 \times I_c \times \Delta t_{open}) / V_i$$

5. Equipo (2) de interconexión según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además un circuito (28) de control de dichos primer a tercer interruptores (261, 262, 263) controlados, configurado para medir las tensiones respectivas en los bornes de dicho primer a tercer limitadores (251, 252, 253) de corriente I para medir las corrientes que atraviesan los primer a tercer limitadores de corriente, dicho circuito (28) de control que está además configurado para generar un comando de apertura de dichos interruptores controlados cuando la tensión en los bornes del limitador de corriente con el cual se conecta en serie sobrepasa un primer umbral y la corriente que atraviesa este limitador de corriente sobrepasa del mismo modo un segundo umbral.

6. Equipo de interconexión según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, que comprende además un circuito (28) de control de dichos primer a tercer interruptores (261, 262, 263) controlados, configurado para generar un control de apertura de uno de dichos interruptores controlados cuando el cuadrado de la tensión en los bornes del limitador de corriente con el cual están conectados en serie sobrepasa un tercer umbral, o cuando la proporción de tensión en los bordes del limitador de corriente con respecto a la corriente que atraviesa este limitador de corriente sobrepasa un cuarto umbral.

7. Equipo (2) de interconexión según la reivindicación 5 o 6, en el cual dicho circuito (28) de control está configurado para generar dicho control de apertura del interruptor controlado como máximo 1ms ya sea después de la superación del primer y segundo umbrales, ya sea después de la superación del tercer umbral.

8. Equipo (2) de interconexión según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, dimensionado para la aplicación de una tensión al menos igual a 10kV y de una corriente al menos igual a 1kA en uno cualquiera de dichos primer a tercer bornes.
- 5 9. Equipo (2) de interconexión según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el cual dichos primero a tercer interruptores (261, 262, 263) controlados son interruptores electromecánicos que presentan un tiempo de corte comprendido entre 5ms y 50ms.
10. Red (1) eléctrica de alta tensión de corriente continua, que comprende:
- líneas (112, 113, 123, 133) de alta tensión;
 - al menos tres equipos (21, 22, 23) de interconexión según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, el primer y segundo bornes de cada uno de dichos equipos de interconexión que están interconectados por medio de dichas líneas de alta tensión.
- 10

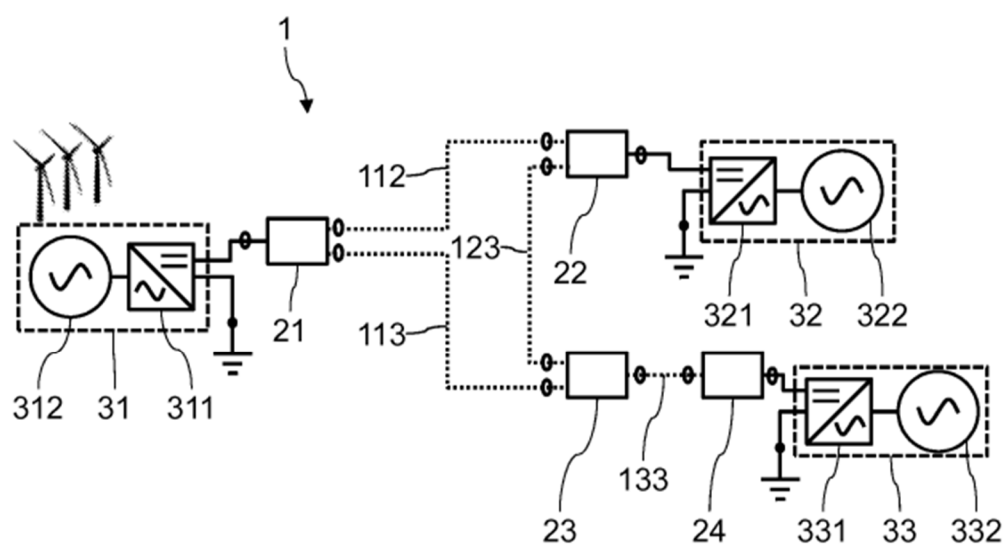


Fig. 1

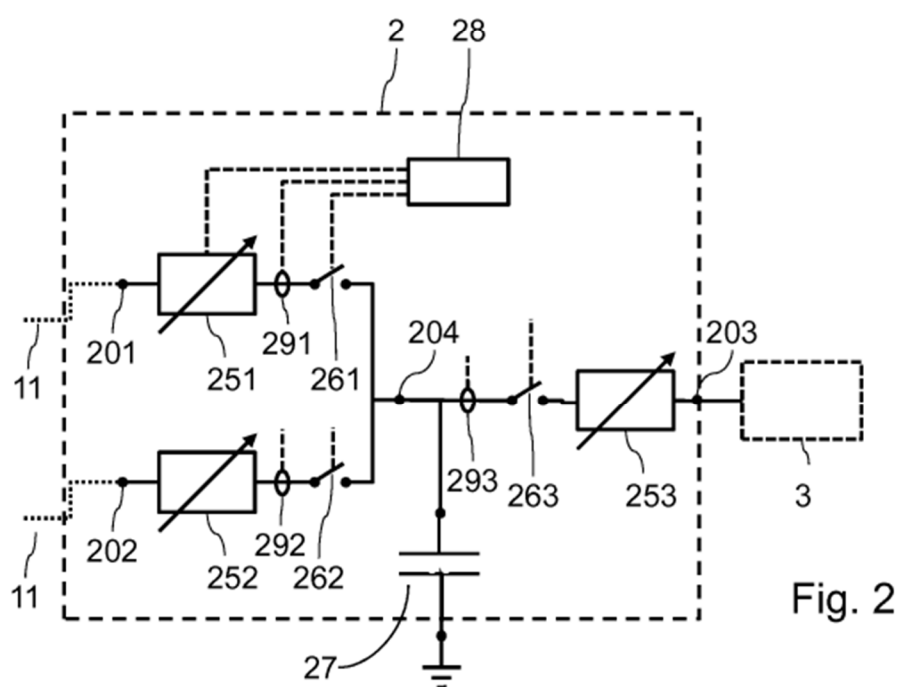


Fig. 2

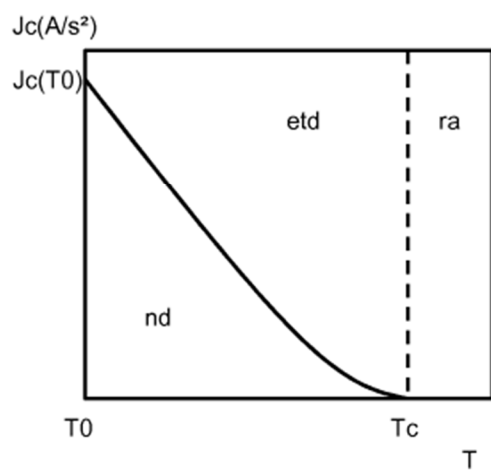


Fig. 3

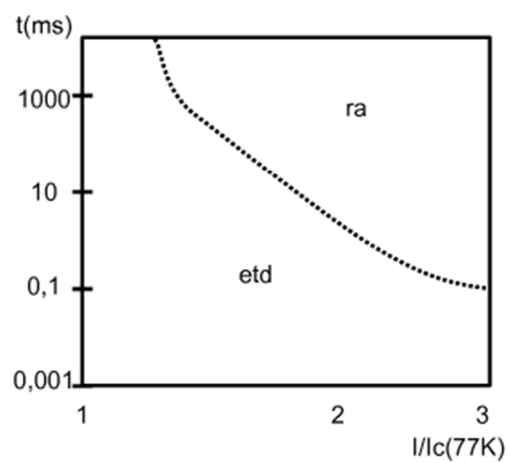


Fig. 4

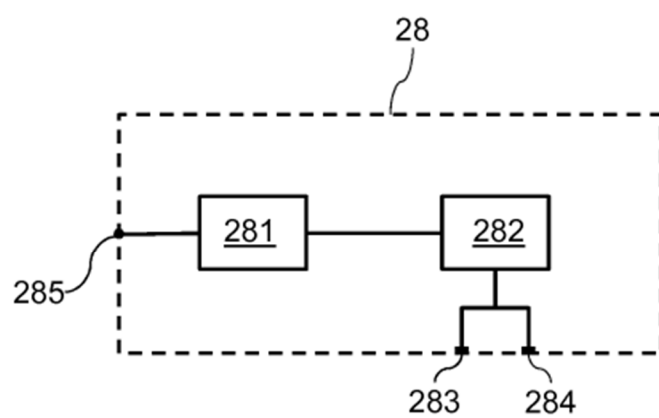


Fig. 5

Fig. 6

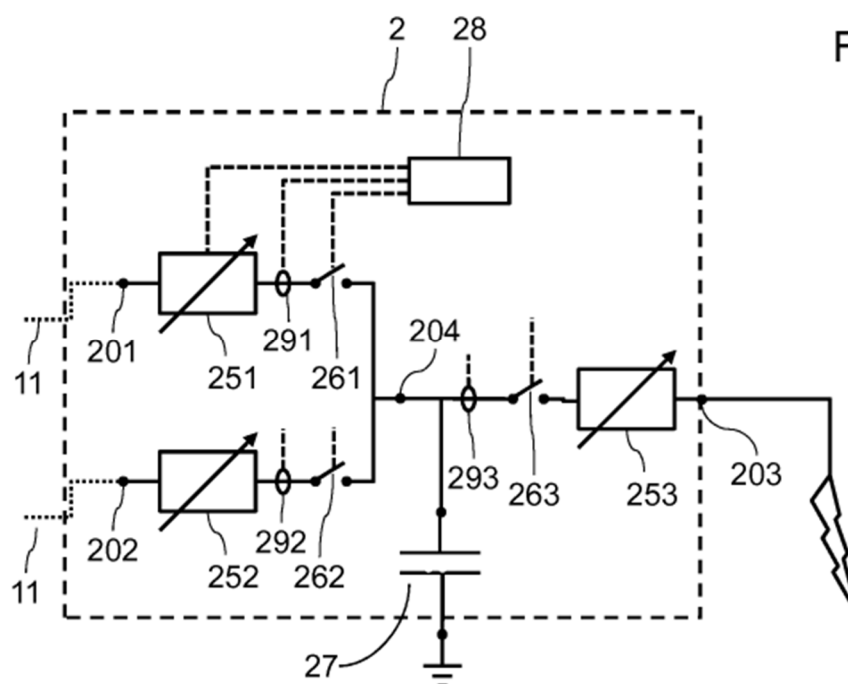


Fig. 7

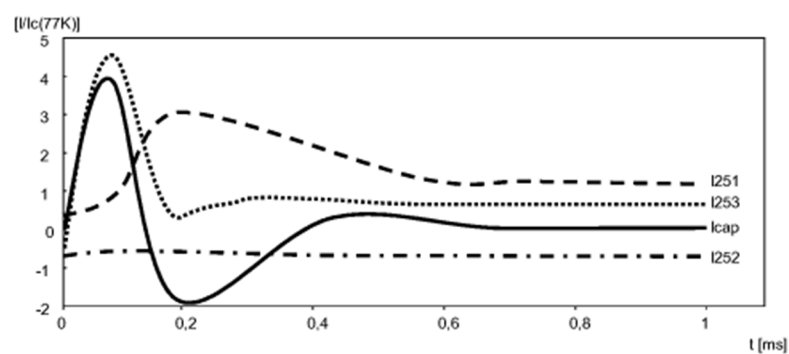
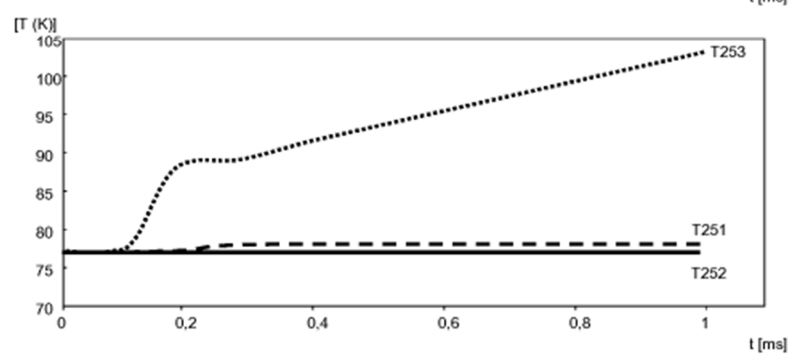


Fig. 8



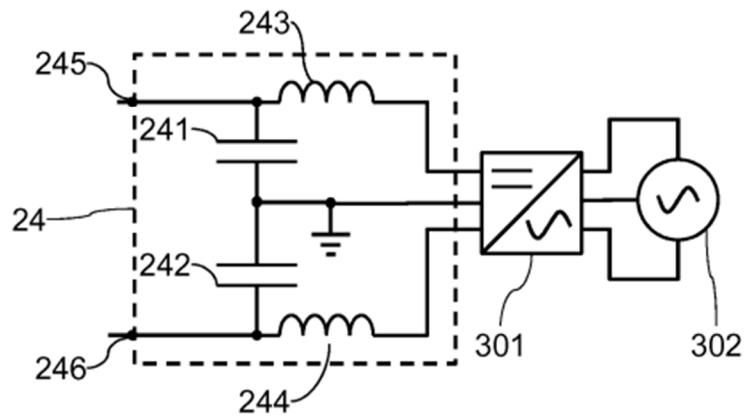


Fig. 9

Fig. 10

