

Informe Técnico

“Protecciones en sistemas HVDC-VSC multi-terminal”

**Preparado por:
Instituto de Investigación Tecnológica (IIT)
E.T.S. de Ingeniería (ICAI)
Universidad Pontificia Comillas**

J. Renedo, A. García Cerrada, L. Rouco, L. Sigrist, J. L. Zamora, I. Egido,

P. García González, M. Ochoa Giménez, R. A. de Marcos

14 de Enero de 2018

Contents

1	Introducción	5
1.1	Tecnología de convertidores para sistemas HVDC-VSC	6
1.2	Interruptores HVDC	7
1.3	Análisis de faltas en el lado de CC en redes HVDC-VSC	8
1.4	Tipos de protección en redes HVDC	10
2	Estrategias de protección usando medidas locales	12
2.1	Algoritmo de protección basado en wavelets (WAVELET1)	12
2.1.1	Algoritmo	13
2.1.2	Ajuste	14
2.1.3	Resumen	15
2.2	Algoritmo de protección basado en la diferencia de tensiones en la inductancia de protección	15
2.2.1	Algoritmo	16
2.2.2	Ajuste	16
2.2.3	Resumen	17
2.3	Algoritmo de protección de sobrecorriente de tiempo inverso	17
2.3.1	Algoritmo	18
2.3.2	Ajuste	19
2.3.3	Resumen	19
2.4	Algoritmo de protección basado en la transformada wavelet de la corriente (WAVELET2)	19
2.4.1	Algoritmo	20
2.4.2	Ajuste	20
2.4.3	Resumen	21
2.5	Algoritmo de protección basado en medidas de la derivada de la tensión de CC (ROCOV1)	21
2.5.1	Algoritmo	22
2.5.2	Ajuste	23
2.5.3	Resumen	24
2.6	Algoritmo de protección basado en medidas de la derivada de la tensión de CC (ROCOV2)	24
2.6.1	Algoritmo	25
2.6.2	Ajuste	25
2.6.3	Resumen	26
2.7	Algoritmo de protección basado en la media móvil de la corriente de CC	26
2.7.1	Algoritmo	28
2.7.2	Ajuste	29
2.7.3	Resumen	29

3	Estrategias de protección usando comunicaciones	30
3.1	Algoritmo de protección diferencial 1	30
3.1.1	Algoritmo	31
3.1.2	Ajuste	31
3.1.3	Resumen	31
3.2	Algoritmo de protección diferencial 2	32
3.2.1	Algoritmo	32
3.2.2	Ajuste	33
3.2.3	Resumen	33
3.3	Algoritmo de protección de comparación direccional comu- cada con hilo piloto	34
3.3.1	Algoritmo	34
3.3.2	Ajuste	35
3.3.3	Resumen	35
3.4	Algoritmo de protección basado en ondas viajeras y utilizando medidas GPS	36
3.4.1	Algoritmo	38
3.4.2	Ajuste	39
3.4.3	Resumen	39
4	Conclusiones	40

Resumen ejecutivo

En este informe se presenta el estado del arte de los sistemas de protección en sistemas multi-terminal de corriente continua en alta tensión basados en convertidores fuente de tensión (HVDC-VSC). El estudio se restringe a localización de faltas en las líneas o en las barras de redes HVDC-VSC de cualquier topología (malladas o radiales), asumiendo la disponibilidad de interruptores HVDC para despejar la falta. Es decir, el estudio no cubre las protecciones del lado de alterna ni las protecciones para faltas internas de los convertidores electrónicos. En este informe se discuten distintas propuestas para la localización de faltas en redes HVDC-VSC malladas, identificando ventajas, inconvenientes y retos requeridos para su aplicación.

Del análisis de las referencias consultadas, se concluye que ya hay propuestas de protección con un alto grado de madurez, aunque todavía se necesitan más pruebas y estudios para garantizar su robustez. Las propuestas más maduras son las que utilizan medidas locales en los terminales del relé e inductancias en los extremos de las líneas de CC. estas inductancias sirven para limitar la derivada de la corriente de falta y dar más tiempo a la protección y para mejorar su selectividad.

Sin embargo, las propuestas de protección con comunicaciones no parecen estar maduras para su aplicación a sistemas HVDC-VSC multi-terminal con líneas largas, debido a los retrasos de las comunicaciones y las dificultades para la sincronización de las medidas en ambos terminales. Por tanto, todavía se necesita más investigación en esta línea.

Para finalizar, se puede destacar que, con carácter general, se requiere un procedimiento sistemático para la prueba de la robustez de las protecciones investigadas para, as, proceder a su evaluación.

Este trabajo ha sido desarrollado para el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España en el proyecto:

“Herramientas de simulación y análisis para el estudio de la operación y la optimización de sistemas híbridos HVDC-VSC multiterminal/HVAC (proyecto RETOS, ref. ENE2014-57760-C2-1-R).”

1 Introducción

Igual que en los sistemas de corriente alterna (CA), los sistemas de protección de redes HVDC-VSC multi-terminal deben cumplir: [1, 2]:

- *Sensibilidad*: la protección debe detectar la falta.
- *Actuación*: la protección debe aislar la falta.
- *Selectividad*: la protección sólo debe actuar ante las faltas en su zona de protección. Es decir, debe discriminar cuándo actuar, esperar o bloquearse.
- *Rapidez*: la protección debe actuar lo más rápido posible y el tiempo de actuación debe ser lo suficientemente pequeño para que ningún equipo se dañe.
- *Fiabilidad*: la protección debe localizar la falta y (a) actuar cuando debe y (b) no actuar cuando no debe (obediencia y seguridad).
- *Robustez*: la protección debe soportar las condiciones de trabajo y ser capaz de detectar las faltas en condiciones normales y adversas.
- *Seguridad*: la protección debe despejar la falta minimizando el número de instalaciones desconectadas y, una vez despejada la falta, el sistema debe estar en un punto de operación seguro.

Los sistemas HVDC-VSC multi-terminal presentan características distintas a los sistemas de CA de alta tensión (HVAC) convencionales, por lo que se necesitan nuevas estrategias de protección. En [3] se resumen 4 características generales por las que la protección de redes HVDC es más difícil que la protección de redes HVAC convencionales:

1. Se producen corrientes de cortocircuito muy elevadas en tiempos muy cortos (del orden de milisegundos). En redes de CA, la corriente de cortocircuito está limitada por las inductancias de las líneas y los transformadores, pero en redes HVDC las impedancias de las líneas son mucho más pequeñas y las corrientes pueden crecer mucho más rápidamente.
2. Los convertidores VSC son muy sensibles a las sobre-corrientes y se dañarán casi instantáneamente si su corriente límite se supera. Las protecciones deben actuar extremadamente rápido (en ~ 2 ms, según [4]).
3. La interrupción de la corriente en CC es más difícil que en CA, ya que la primera no pasa por cero.

- Las estrategias de localización de la falta en redes HVDC deben ser diferentes a las utilizadas en redes HVAC, debido a la distinta naturaleza de los sistemas y a la rapidez de actuación requerida en las primeras.

1.1 Tecnología de convertidores para sistemas HVDC-VSC

La tecnología de convertidores más reciente para sistemas HVDC-VSC es la tecnología de convertidores multi-nivel modulares (MMC) [5], que permiten obtener una tensión de alterna baja en armónicos, permite utilizar tensiones de continua elevadas (a pesar de las limitaciones en las tensiones de bloqueo de los interruptores) y presentan menos pérdidas de conmutación que los convertidores fuente de tensión con topologías más simples [6]. En esta topología, el convertidor controla la tensión de alterna controlando los IGBTs de cada módulo. En [7] se revisa el estado del arte de los convertidores VSC multi-nivel. Por ahora, la topología MMC es la única en la que se pueden abordar este tipo de proyectos.

La topología de convertidores MMC más común es la de medio puente. Sin embargo, en este caso particular, no se puede limitar la corriente ante faltas en el lado CC, ya que los diodos de libre circulación empezarán a conducir, como se ilustra en la Figura 1-a [6]. En cambio, con tecnología MMC de puente completo (o puente en "H") [8,9], los convertidores sí son capaces de limitar la corriente durante un cortocircuito en el lado de CC (Fig. 1-b). Sin embargo, esta última opción es más cara y tiene más pérdidas que la solución MMC con medio puente.

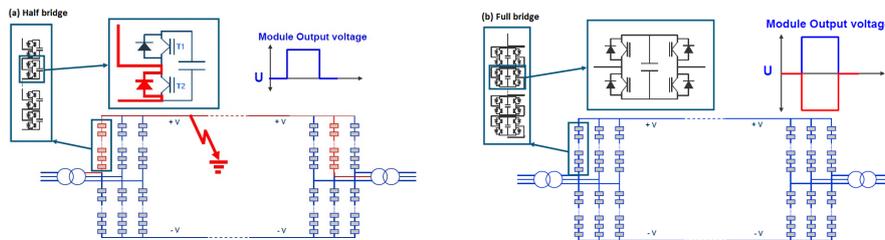


Figure 1: Tecnología de los convertidores: (a) Multinivel Modular (MMC) de medio puente y (b) MMC de puente completo. Figura tomada de [6].

Los principales fabricantes disponen de tecnología MMC para enlaces HVDC-VSC:

- ABB: "HVDC Light". Convertidores MMC de medio puente [10].
- Siemens: "HVDC Plus". Convertidores MMC de medio puente [11].

- General Electric, GE (antes Alstom Grid): “HVDC MaxSine”. Convertidores MMC de puente completo [12].

Una descripción de la tecnología de convertidores para HVDC-VSC de cada fabricante se puede encontrar en el Capítulo 4 de [13]. Los convertidores MMC de ABB y Siemens son de medio puente, mientras que los de GE son de puente completo [12]. GE propone una topología híbrida, que combina módulos de IGBTs de medio puente con módulos de puente completo para reducir los costes y las pérdidas de los convertidores MMC con todos los módulos de puente completo [13].

1.2 Interruptores HVDC

Para que las redes HVDC-VSC sean viables es imprescindible disponer de interruptores de HVDC [14], ya que no sería admisible dejar fuera de servicio toda la red HVDC ante una falta en el lado de CC. Sin embargo, el desarrollo de interruptores HVDC es más difícil que el desarrollo de interruptores HVAC porque la corriente no pasa por cero y en sistemas HVDC-VSC se necesita que interrumpan la corriente muy rápido para proteger a los convertidores. Las soluciones más recientes son interruptores híbridos, que contienen elementos de electrónica de potencia, interruptores mecánicos rápidos y disipadores de energía [2, 15]. En la actualidad no hay interruptores de HVDC en operación, pero los principales fabricantes ya han desarrollado prototipos de interruptores HVDC híbridos:

- ABB: capaz de interrumpir corrientes de CC de 9 kA en 2 ms (en 320 kV), según [16] (Figura 2).
- GE (antes Alstom Grid): capaz de interrumpir corrientes de CC de 5.2 kA en 5 ms (a 120 kV), según [17, 18] (Figura 3).

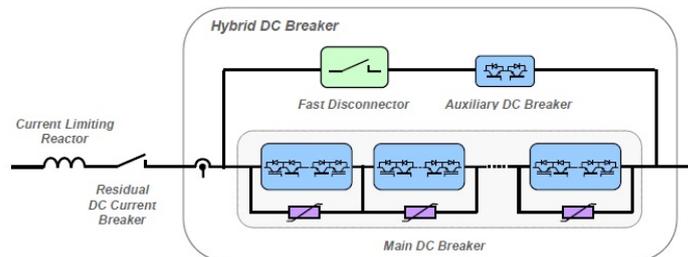


Figure 2: Interruptor de HVDC híbrido de ABB. Figura tomada de [19].

Estos últimos avances tecnológicos apuntan a que la tecnología de interruptores HVDC podría estar madura en pocos años.

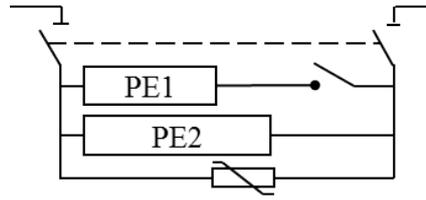


Figure 3: Interruptor de HVDC híbrido de GE. Figura tomada de [17].

1.3 Análisis de faltas en el lado de CC en redes HVDC-VSC

Los cortocircuitos en líneas de CC de sistemas HVDC-VSC puede ser de 2 tipos [20]:

- Falta polo-tierra: Cuando se produce un cortocircuito entre uno de los polos y tierra (Figura 4-a).
- Falta polo-polo: Cuando se produce un cortocircuito entre el polo positivo y negativo de la línea CC (Figura 4-b).

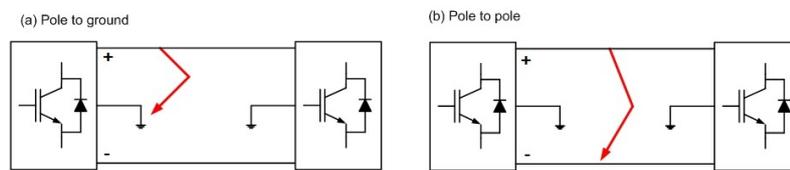


Figure 4: Tipos de faltas en la línea CC de un enlace HVDC-VSC: (a) falta polo-tierra y (b) falta polo-polo.

Para tener una idea de la respuesta dinámica de los sistemas HVDC-VSC ante faltas en el lado de CC, se ha simulado una falta polo-polo en el lado de CC del convertidor VSC1 del enlace HVDC-VSC punto a punto de Matlab + Simulink + Simpowersystems (`power_hvdc_vsc`) [21], representado en la Figura 5. Los datos nominales del enlace son (± 100 kV, 200 MW) y los convertidores son de 3 niveles.

Las tensiones de CC de los polos positivo y negativo y la corriente de falta de CC se muestran en la Fig. 6. La corriente de CC supera los 10 p.u en pocos milisegundos después de producirse la falta (1 p.u = 1 kA) y las tensiones caen a cero mientras que los convertidores no son capaces de limitar la corriente ante faltas en el lado de CC. El elevado valor de la corriente en tan poco tiempo hace imprescindible disponer de protecciones muy rápidas (~ 2 ms) que eviten daños en los convertidores.

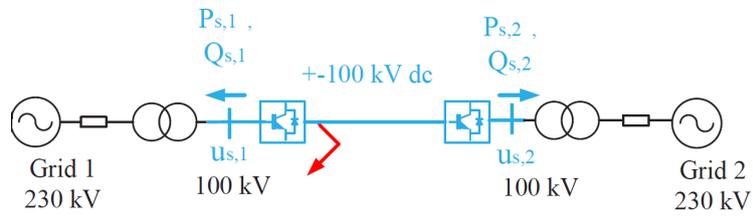


Figure 5: Enlace HVDC-VSC punto a punto de Simulink + Simpower.

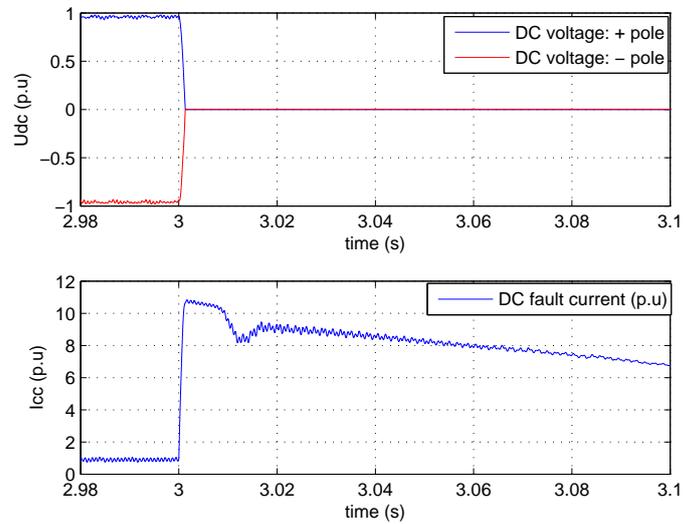


Figure 6: Tensiones y corriente de CC ante una falta polo-polo en el lado de CC del convertidor 1 del enlace HVDC-VSC.

En el trabajo de [22] se describe el análisis de faltas en el lado de CC de sistemas HVDC-VSC. El circuito equivalente es no lineal y básicamente debe dividirse en tres fases (todos los detalles pueden consultarse en [13,22]):

1. Descarga del condensador equivalente en el nudo de CC,
2. descarga de la inductancia de la línea de CC y entrada en conducción de los diodos de libre circulación de los IGBTs del convertidor electrónico y
3. alimentación del cortocircuito desde la red de CA a través de los diodos de libre circulación.

Como se describe en [23], la falta de CC debería ser aislada por el sistema de protección en los primeros instantes del transitorio, ya que la corriente de falta en régimen permanente, en general, será excesivamente elevada. Por tanto, para la simulación de un cortocircuito, sería necesario usar modelos electromagnéticos de los convertidores y los cables, y prestar especial atención a la primera frase descrita arriba: la descarga de los condensadores. En los trabajos de [24], [23] y [25] se proponen modelos de sistemas HVDC-VSC multi-terminal para simulación electromagnética, apropiados para el estudio de las protecciones ante faltas en el lado de CC. En el modelo propuesto en [23], el sistema se representa como un condensador equivalente paralelo (capacidad equivalente del lado de CC del convertidor) conectado a una resistencia y una inductancia en serie (parte del cable antes del punto de falta). El sistema se representa de esta forma ya que en los primeros milisegundos de una falta en el lado de CC la componente más importante de la corriente de falta va a ser la descarga de los condensadores. Como se discute en [23], este modelo es válido, ya que se asume que una falta en el lado de CC será despejada en tiempos del orden de milisegundos o decenas de milisegundos, en los que ocurre la descarga de los condensadores. Por tanto, no serían necesarios modelos para faltas de mucha duración.

1.4 Tipos de protección en redes HVDC

En [26] se distinguen 4 formas de proteger un sistema HVDC-VSC multi-terminal ante faltas en el lado de CC:

1. Protección con interruptores de AC [27]. Este método consiste en desconectar el sistema HVDC-VSC multi-terminal abriendo los interruptores de CA alterna de los convertidores cuando se detecta una falta en el lado de CC. Una vez desconectado el sistema, la falta se aísla abriendo los seccionadores de la línea correspondiente (en vacío) y posteriormente se retoma el servicio del sistema HVDC-VSC multi-terminal con la línea que tiene la falta desconectada. Este método de protección sólo es válido para sistemas HVDC-VSC multi-terminal

pequeños, ya que implica la interrupción de la red completa durante un cierto periodo de tiempo.

2. Usando convertidores MMC de puente completo. Todos los convertidores se bloquearán cuando se detecte una falta en el lado de CC. Posteriormente se aísla la falta en vacío y el sistema HVDC-VSC multi-terminal retoma el servicio cuando los seccionadores de la línea de la falta se han abierto. Este método de protección también es válido sólo para sistemas HVDC-VSC multi-terminal pequeños, ya que implica la interrupción de la red completa durante un periodo de tiempo.
3. Protección sólo con interruptores HVDC en serie con cada convertidor. El interruptor de cada convertidor abre cuando se detecta una falta en el lado de CC. Posteriormente se aísla la falta en vacío y el sistema HVDC-VSC multi-terminal retoma el servicio cuando los seccionadores de la línea de la falta se han abierto. De nuevo, este método de protección es válido sólo para sistemas HVDC-VSC multi-terminal pequeños, porque implica la interrupción de la red completa durante un periodo de tiempo.
4. Protección con interruptores HVDC en los extremos de las líneas y en serie con cada convertidor. Ante una falta en el lado de CC, sólo abrirán los interruptores de la línea en la que se ha producido la falta. Si la falta se produce en una barra de CC, deberán abrir sólo los interruptores de los elementos conectados a ese nudo (interruptores de líneas y/o convertidores conectados al nudo). Esta forma de protección es aplicable a sistemas HVDC-VSC multi-terminal grandes, ya que sólo se dejan fuera de servicio las líneas donde se produce la falta, siguiendo la filosofía de protección que se utiliza hoy en día en redes de transporte en HVAC.

En este documento se van a revisar las propuestas más recientes para protección de sistemas HVDC-VSC multi-terminal ante faltas en el lado de CC. El trabajo sólo incluirá la cuarta forma de protección de la lista anterior (con interruptores HVDC), por ser la única opción admisible en redes HVDC.

Debido a que las protecciones en redes HVDC-VSC tienen que ser muy rápidas, hay que distinguir entre las estrategias de protección que requieren sólo medidas en los terminales donde se encuentra conectado el interruptor y aquellas otras en las que se requieren medidas de otros terminales. Por tanto, las estrategias de protección se clasificarán en:

- Estrategias de protección usando medidas locales.
- Estrategias de protección usando comunicaciones.

En este documento también se discutirá el uso de inductancias en los extremos de las líneas de CC para facilitar la protección porque es una estrategia presente en la mayoría de las propuestas de protección [28–30]. Las inductancias en los extremos de las líneas de CC se utilizan por dos motivos:

- Para limitar la derivada de la corriente (de CC) ante faltas en el lado de CC y conseguir así dar más tiempo a las protecciones sin que las corrientes superen el poder de corte de los interruptores HVDC, ni dañen a las estaciones convertidoras.
- Para mejorar la selectividad en algunas estrategias de protección.

Más información sobre protecciones en redes HVDC-VSC se puede encontrar en [31–33].

2 Estrategias de protección usando medidas locales

2.1 Algoritmo de protección basado en wavelets (WAVELET1)

En el trabajo de [3] se propone un algoritmo de protección para faltas en el lado de CC de sistemas HVDC-VSC multi-terminal, basada en *wavelets* y utilizando medidas locales en cada relé.

En la Fig. 7 se muestra un ejemplo de sistema multi-terminal de CC con faltas localizadas en distintos puntos. Cada línea de CC tendrá un relé (R12 y R21, en la Fig. 7) en cada uno de sus extremos. Cada relé deberá actuar solo ante faltas en la propia línea (primera zona). Por ejemplo, el relé R12 de la Figura 7 sólo deberá abrir el interruptor ante las faltas F1 y F2. En cambio, no deberá actuar ante las faltas externas F3, F4 y F5.

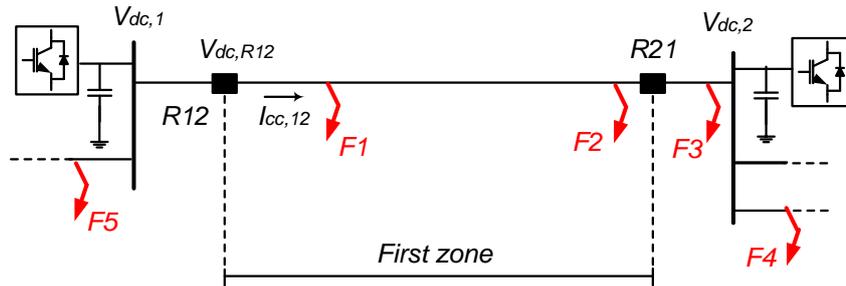


Figure 7: Esquema general del algoritmo de protección en redes de CC.

La transformada Wavelet es una herramienta matemática para el análisis de señales, basada en el análisis tiempo-escala, en vez de en el dominio de

frecuencia [3]. Los fundamentos de la transformada Wavelet se pueden encontrar en [34] y ejemplos de la aplicación de wavelets para análisis de transitorios electromagnéticos en sistemas de energía eléctrica se puede encontrar en [35]. Esta es una herramienta potente para el estudio de transitorios rápidos en sistemas eléctricos, debido a su capacidad para analizar señales no-periódicas o señales que contengan componentes sinusoidales e impulsos al mismo tiempo [35].

La transformada wavelet “diaética” o de Haar, de una función $f(t)$, viene dada por:

$$WT(f)(u, 2^j) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi^* \left(\frac{t-u}{2^j} \right) dt \quad (1)$$

donde ψ se conoce como la función wavelet madre, que verifica:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2)$$

El coeficiente wavelet de detalle 2^j , evaluado en un tiempo t , viene dado por:

$$d_j(t) = WT(f)(u = t, 2^j) \quad (3)$$

El algoritmo de protección propuesto en [3] utiliza los coeficientes wavelets de la tensión y corriente de CC medidas en el relé, así como la derivada de la tensión y su magnitud. El uso de wavelets permite que sea un algoritmo selectivo, requiriendo sólo medidas locales.

Los resultados de [3] muestran una buena robustez del algoritmo ante el ruido y otros transitorios en el sistema, aunque no se estudian faltas resistivas. En [3] se obtienen tiempos de localización menores de 1 ms. No se utilizan inductancias en los extremos de las líneas de CC, ya que esta estrategia fue una de las primeras propuestas para redes HVDC-VSC malladas. Las inductancias de protección podrían ayudar enormemente a esta estrategia para limitar la corriente de falta durante el transitorio y para mejorar la selectividad de la protección.

2.1.1 Algoritmo

En el algoritmo de [3] la unidad de protección instalada en cada nudo de CC utiliza tres criterios distintos para la detección y localización de una falta. El relé de una línea actuará si se localiza positivamente la falta en dos de los tres criterios.

Para empezar, se definen:

- $d_k(V_{dc,Rij})$: coeficiente wavelet de detalle 2^k de la tensión de CC medida por el relé Rij .
- $d_k(I_{cc,ij})$: coeficiente wavelet de detalle 2^k de la corriente de CC medida por el relé Rij .

y el algoritmo consiste en [3]:

- Detección:

- Criterio D1: Si se verifica:

$$d_1(V_{dc,Rij}) > \epsilon_{D1} \quad (4)$$

- Criterio D2: Si se verifica:

$$\frac{dV_{dc,Rij}}{dt} < \epsilon_{D2} \quad (5)$$

- Criterio D3: Si se verifica:

$$d_1(I_{cc,ij}) < \epsilon_{D3} \quad (6)$$

- Localización:

- Criterio L1: Si se verifica el criterio de detección D1 y:

$$d_1(V_{dc,Rij}) = \max\{d_1(V_{dc,Ril})\} \text{ con } \ell \in C_i \quad (7)$$

donde C_i representa el conjunto de las líneas conectadas al nudo dc, i .

- Criterio L2: Si se verifica el criterio de detección D2 y:

$$V_{dc,Rij} - V_{dc,nom} = \min(V_{dc,Ril} - V_{dc,nom}) \text{ con } \ell \in C_i \quad (8)$$

- Criterio L3: Si se verifica el criterio de detección D3 y:

$$\text{signo}(d_1(I_{cc,ij})) < 0 \text{ y } \text{signo}(d_1(I_{cc,i\ell})) > 0 \text{ con } \ell \in C_i \text{ y } \ell \neq j \quad (9)$$

El relé Rij localizará la falta en la línea $i-j$ si se verifican al menos dos de los tres criterios de localización. En este caso, el relé Rij recibirá orden de apertura.

2.1.2 Ajuste

El algoritmo de protección se ha evaluado mediante simulación electromagnética en PSCAD, utilizando un sistema HVDC-VSC multi-terminal de ± 320 kV de tensión de CC (no se especifica su potencia nominal).

Los umbrales se deben ajustar basándose en las simulaciones, para garantizar la selectividad. En el sistema estudiado en [3] se utilizan $\epsilon_{D1} = 2$, $\epsilon_{D2} = -50$ kV/ms y $\epsilon_{D3} = -0.02$. Una descripción más detallada sobre los umbrales puede encontrarse en [36].

Según [3] la protección tarda en localizar la falta menos de 1 ms. Asumiendo interruptores HVDC que actúan en 2 ms, el tiempo total de despeje de un relé, desde que se produce la falta, rondaría los 3 ms.

2.1.3 Resumen

- Descripción: Protección para la localización de faltas en redes HVDC-VSC utilizando una protección basada en wavelets.
- Medidas: Cada relé usa medidas locales para el algoritmo de localización y medidas locales del resto de relés de las líneas concurrentes al nudo de CC .
- Procesamiento de la señal: Se necesitan medidas de la tensión de CC, de su derivada, de la corriente de CC del relé y se utilizan los coeficientes wavelets de la tensión y corriente de CC.
- No se utilizan inductancias en los extremos de las líneas aunque podrían ser de gran utilidad para mejorar la selectividad del algoritmo y que se dependa menos del ajuste de los umbrales.
- Temporización: La protección es capaz de localizar la falta muy rápido (un tiempo del orden de 1 ms).
- Se cubre la primera zona de protección.
- Diseño de los umbrales: Se escogen por simulación electromagnética, con modelos detallados de los elementos.
- Robustez: La protección es robusta ante ruido y otros transitorios. Sin embargo, no se evalúa el algoritmo de protección ante faltas resistivas.

2.2 Algoritmo de protección basado en la diferencia de tensiones en la inductancia de protección

En [37] se propone un algoritmo de protección para faltas en el lado de CC de sistemas HVDC-VSC multi-terminal basado en la diferencia de tensiones en las inductancias colocadas en los extremos de las líneas.

La Fig. 10 recoge el esquema general de protección en un sistema HVDC-VSC multi-terminal con inductancias de protección en los extremos de las líneas. La idea fundamental de este algoritmo es comparar las tensiones de los dos extremos de la inductancia asociada a cada relé:

$$V_{ind,ij} = V_{dc,i} - V_{dc,Rij} \quad (10)$$

Ante una falta en la línea 1 – 2 de la Figura 8 (F1), la tensión $V_{dc,Rij}$ caerá inmediatamente, mientras que la tensión en el otro extremo de la inductancia, $V_{dc,1}$, se mantendrá unos instantes, permitiendo que la falta se pueda localizar correctamente con la medida $V_{ind,12}$.

Según los resultados de [37], el algoritmo de protección localizaría correctamente hasta faltas resistivas de 50 Ω .

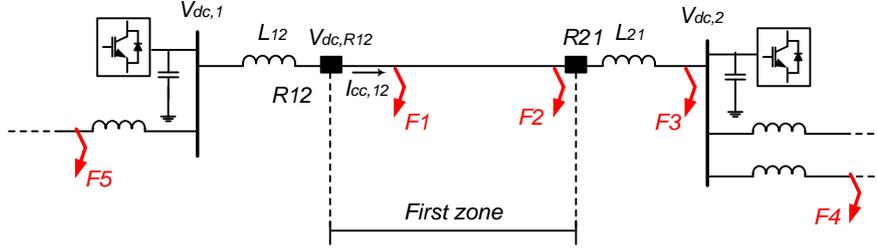


Figure 8: Esquema general del algoritmo de protección en redes de CC, con inductancias en los extremos de las líneas.

2.2.1 Algoritmo

Las condiciones de detección y localización de falta del relé R_{ij} son las siguientes:

- Si $V_{ind,ij} > V_{ind,ij}^{TH+}$, el relé localiza la falta y actúa.
- Si $V_{ind,ij} < V_{ind,ij}^{TH-}$, el relé localiza se bloque (espera) un tiempo Δt_{block} .
- En caso contrario, el relé no actúa.

$V_{ind,ij}^{TH+}$ y $V_{ind,ij}^{TH-}$ son umbrales.

2.2.2 Ajuste

El algoritmo de protección se ha evaluado mediante simulación electromagnética en un sistema HVDC-VSC multi-terminal con convertidores de 2 niveles de ± 320 kV de tensión de CC. Tampoco aquí se especifica la potencia nominal de los convertidores, sin embargo, La protección también se validó experimentalmente en [29].

En las referencias mencionadas, se investiga con distintas inductancias de protección y se realiza un gran número de simulaciones para determinar los umbrales. Se escogen inductancias de $L = 30$ mH, $V_{ind,ij}^{TH-} = -40$ kV y los valores de $V_{ind,ij}^{TH+}$ son distintos para cada relé y varían entre 168 y 231.8 kV. No se presentan los valores de Δt_{block} , que deberían ser del orden de milisegundo.

Los tiempos de detección de la protección son menores que 1 ms y se asumen interruptores HVDC que actúan en 1 ms después de localizar la falta.

Para más información sobre el ajuste de esta protección puede consultarse [29].

2.2.3 Resumen

- Descripción: Protección para la localización de faltas en redes HVDC-VSC utilizando la diferencia de tensiones en la inductancia en los extremos de las líneas.
- Medidas: Cada relé usa medidas locales de tensión de CC para el algoritmo de localización.
- Procesamiento de la señal: Únicamente se necesitan las medidas de tensión en ambos extremos de las inductancias y no hacen falta técnicas sofisticadas de procesamiento de señales.
- Se utilizan inductancias en los extremos de las líneas.
- Temporización: El tiempo de localización de la protección es menor de 1 ms.
- Se cubre la primera zona de protección.
- Diseño de los umbrales: Se escogen por simulación electromagnética, con modelos detallados.
- Robustez: Se evalúa el algoritmo de protección ante faltas resistivas con valores de resistencia de hasta 50Ω . Se concluye que faltas con mayor resistencia podrían comprometer la selectividad.

2.3 Algoritmo de protección de sobrecorriente de tiempo inverso

En [38] se propone una protección de sobrecorriente de tiempo inverso para la detección y localización de faltas en el lado de continua en sistemas HVDC-VSC multi-terminal. Es decir, el tiempo de actuación del relés es inversamente proporcional a la corriente de falta. En esta estrategia, cada relé requiere medidas locales de corriente y es necesario usar inductancias en los extremos de las líneas para la selectividad de la protección.

En la Figura 8 se muestra un sistema HVDC-VSC multi-terminal con faltas localizadas en distintos puntos. También se ilustra la zona que cubre la protección primaria de la línea 1-2 (primera zona). Los relés R12 y R21 deben actuar ante faltas internas (F1 y F2), pero no deben actuar ante faltas externas (F3, F4 y F5). Como se discute en [38], cada relé podrá detectar y localizar faltas cercanas utilizando la medida de corriente sin mayores dificultades. Sin embargo, la corriente medida en el relé lejano a la falta (de la línea en la que se produce la contingencia) será similar a la corriente medida en líneas sanas (si no se utilizan inductancias en los extremos de las líneas).

En el trabajo de [38] se muestra que el algoritmo propuesto es capaz de localizar faltas en redes de CC satisfactoriamente. Sin embargo, no se investiga la robustez de la protección ante faltas en función de la impedancia de la falta y tampoco se discuten en detalle los ajustes de la protección.

2.3.1 Algoritmo

El tiempo de actuación de un relé de sobrecorriente de tiempo inverso, t_R , viene dado por (Fig. 9):

$$t_R(I) = \begin{cases} \frac{A}{\left(\frac{I}{I_{pickup}}\right)^p} + B & \text{si } I > I_{pickup} \\ \infty & \text{si } I \leq I_{pickup} \end{cases} \quad (11)$$

donde I es la corriente medida por el relé, I_{pickup} es la corriente de detección (comúnmente conocida como corriente “pick up”) y los parámetros A , B y p se ajustan para obtener la curva de tiempo inverso requerida, que determinará el tiempo de actuación de la protección en cada situación.

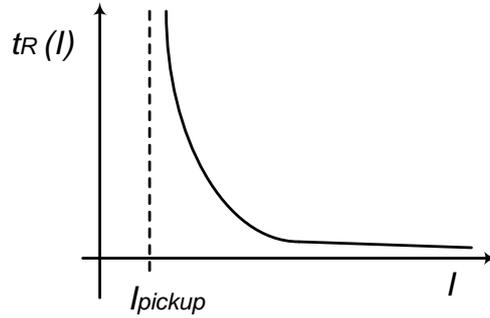


Figure 9: Protección de sobrecorriente de tiempo inverso.

Por tanto, el algoritmo consiste en [38]:

- Detección: El relé R_{ij} detectará una falta si:

$$I_{cc,ij} > I_{pickup} \quad (12)$$

- Localización: Una vez detectada una falta, la condición de localización de una falta por el relé R_{ij} es:

$$\int_{t=t_0}^t \frac{1}{t_R(I_{cc,ij})} dt \geq 1 \quad (13)$$

donde el tiempo de actuación $t_R(I_{cc,ij})$ viene dado por (11) y t_0 es el tiempo en el que el relé R_{ij} ha detectado una falta.

2.3.2 Ajuste

En el trabajo de [38] se evalúa el algoritmo de protección simulando en PSCAD un sistema HVDC multi-terminal de ± 400 kV de tensión de CC con convertidores MMC de medio puente. No se especifican las potencias nominales de los convertidores, pero, de acuerdo a los resultados, serían de unos 800-1000 MVA.

Se utilizan inductancias de $L = 10$ mH. No se describen los ajustes de la protección. Sin embargo, los resultados muestran que los relés localizan la falta muy rápidamente (1-3 ms). Además del tiempo empleado en la localización, debería sumarse el tiempo de actuación de un interruptor HVDC, que podría ser de unos 2 ms.

2.3.3 Resumen

- Descripción: Protección para la localización de faltas en redes HVDC utilizando una protección de sobrecorriente de tiempo inverso.
- Medidas: Cada relé usa medidas locales de corriente para el algoritmo de localización.
- Procesamiento de la señal: Sólo se necesitan medidas de la corriente de CC del relé, por lo que no se necesitan filtros especiales.
- Se necesitan inductancias en los extremos de las líneas.
- Temporización: No se especifican claramente los tiempos de actuación de la protección, pero de los resultados se puede deducir que son muy cortos (del orden de milisegundos). En este tipo de sistemas la protección deberá actuar en unos pocos milisegundos.
- Se cubre la primera zona de protección.
- Ajuste: Se escogen por simulación electromagnética, con modelos detallados. No se discuten en detalle.
- Robustez: No se evalúa el algoritmo de protección ante faltas impedantes.

2.4 Algoritmo de protección basado en la transformada wavelet de la corriente (WAVELET2)

En [39] se propone una protección de sobrecorriente de tiempo inverso para la detección y localización de faltas en el lado de continua en sistemas HVDC-VSC multi-terminal. En esta estrategia de protección, cada relé requiere medidas locales de corriente y hay que usar inductancias en los extremos de las líneas para la selectividad de la protección. A diferencia del algoritmo

también basado en wavelets de la sección 2.1 [3], que calculaba la transformada wavelet de la tensión y de la corriente, en esta propuesta sólo se calcula la transformada wavelet de la medida de la corriente.

Considérese el esquema de la Figura 8. La transformada discreta de wavelet (discrete Wavelet transformation, DWT) de la corriente medida por el relé ($I_{cc,ij}$) se utiliza para discriminar faltas internas y externas. En concreto, la medida utilizada es la función de energía de los coeficientes wavelet de la corriente, que viene dada por:

$$WTC^2 = \sum_{k=1}^m d_k^2 \quad (14)$$

donde d_k es el coeficiente wavelet de la corriente de detalle k y m es el nivel de descomposición utilizado en la transformada wavelet.

Los resultados obtenidos en [39] muestran que el algoritmo propuesto es capaz de localizar, satisfactoriamente, faltas en redes de CC. También se comprueba que la protección no actúa indebidamente ante transitorios de inserción, de desconexión o de faltas en el lado de CA. Sin embargo, no se investiga la robustez de la protección en función de la impedancia de la falta y tampoco se describen los ajustes de la protección.

2.4.1 Algoritmo

El algoritmo consiste en [39]:

- Detección y localización: El relé Rij producirá una detección positiva si:

$$WTC^2(I_{cc,ij}) > WTC_{TH}^2 \quad (15)$$

$$I_{cc,ij} > 0 \quad (16)$$

donde WTC_{TH}^2 es un valor umbral y la condición (16) se utiliza para la direccionalidad.

2.4.2 Ajuste

En el trabajo de [39] el algoritmo se evalúa simulando en PSCAD un sistema HVDC multi-terminal de ± 400 kV de tensión de CC con convertidores MMC de medio puente, en la herramienta PSCAD. Las potencias nominales de los convertidores están entre 800 y 1200 MVA.

Se utilizan inductancias de $L = 10$ mH, que deben ser lo suficientemente grandes para que la protección discrimine correctamente faltas internas y externas. No se describen los ajustes de la protección.

2.4.3 Resumen

- Descripción: Protección para la localización de faltas en redes HVDC utilizando la transformada wavelet de la corriente.
- Medidas: Cada relé usa medidas locales de corriente para el algoritmo de localización.
- Procesamiento de la señal: Se calcula la transformada wavelet discreta de la corriente del relé.
- Se necesitan inductancias en los extremos de las líneas.
- Temporización: No se especifican claramente los tiempos de actuación de la protección, pero de los resultados se puede deducir que son muy cortos (del orden de milisegundos). En este tipo de sistemas la protección deberá actuar en unos pocos milisegundos.
- Se cubre la primera zona de protección.
- Diseño de los umbrales: Se escogen por simulación electromagnética, con modelos detallados. No se discuten en detalle.
- Robustez: Se verifica que la protección no actúa indebidamente ante otros transitorios, como energización, desconexión o faltas en el lado de CA, pero no investiga el comportamiento de la protección en función de la impedancia de la falta.

2.5 Algoritmo de protección basado en medidas de la derivada de la tensión de CC (ROCOV1)

En [40] se propone un algoritmo de protección por zonas para la localización de faltas en el lado de continua en sistemas HVDC-VSC multi-terminal. El algoritmo se basa en el fenómeno de reflexión de ondas viajeras y requiere el uso de inductancias en los extremos de las líneas de CC (entre las barras de CC y el relé) para la localización de la falta. En esta estrategia, cada relé requiere medidas locales únicamente: la tensión de CC, la derivada de la tensión de CC y la derivada de la corriente.

En la Figura 10 se muestra un sistema multi-terminal de CC con faltas localizadas en distintos puntos. En la protección primaria, cada relé deber actuar solo ante faltas en la propia línea (primera zona). Por ejemplo, el relé R12 de la Figura 10 sólo deberá abrir el interruptor ante las faltas F1 y F2. En cambio, no deberá actuar ante las faltas externas F3, F4 y F5.

En el algoritmo de protección propuesto en [40], las inductancias se utilizan para distinguir entre faltas internas y externas, usando la derivada de la tensión de CC ($dV_{dc,R}/dt$). Por ejemplo, ante una falta cualquiera, en la línea 1-2 de la Figura 10 (F1 o F2), la tensión en el relé R12 ($V_{dc,R12}$)

caerá bruscamente, (derivada negativa muy grande en valor absoluto) en los primeros milisegundos de la falta. En cambio, la derivada de la tensión en las barras de CC ($dV_{dc,1}/dt$) se verá atenuada gracias a la inductancia L_{12} . Debido al ruido que puede presentar la derivada de la tensión, se añade una condición de subtensión al criterio de discriminación de faltas. También se utiliza la derivada de la corriente medida en el relé, que gracias a su direccionalidad permite distinguir entre faltas delante y detrás del relé.

En [40] se propone el concepto de protección de segunda zona como protección de respaldo ante faltas en líneas adyacentes, de forma similar a lo que ocurre con las protecciones de distancia de sistemas convencionales de corriente alterna. Sin embargo, en [40] no se discuten las fronteras de la segunda zona ni su temporización.

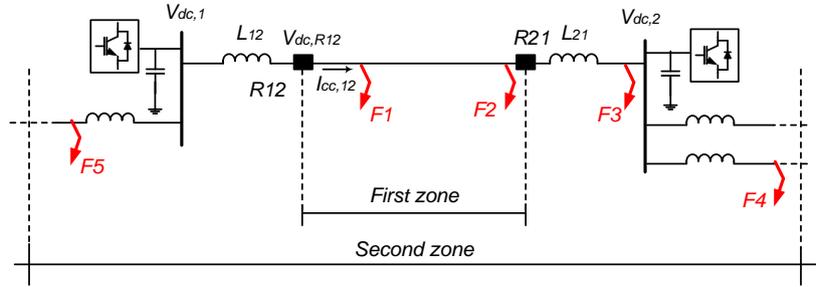


Figure 10: Esquema general para la protección en redes de CC.

2.5.1 Algoritmo

El algoritmo consiste en [40]:

1. Detección: Un relé R_{ij} considerará que hay falta en el sistema si su medida de tensión está por debajo de un umbral durante un tiempo de detección (t_{det}):

$$V_{dc,Rij} < V_{dc,det} \text{ durante } t_{det} \text{ ms.} \quad (17)$$

2. Localización:

- Primera zona:

Las condiciones en el relé R_{ij} para considerar que la falta está localizada en la primera zona, son las siguientes:

$$\frac{dV_{dc,Rij}}{dt} < \left(\frac{dV_{dc}}{dt} \right)_{Z1} \quad (18)$$

$$V_{dc,Rij} < V_{dc,Z1} \text{ durante } t_{discr} \text{ ms.} \quad (19)$$

$$I_{cc,Rij} > 0 \quad (20)$$

donde $V_{dc,Z1}$ y $(dV_{dc}/dt)_{Z1}$ son los umbrales de primera zona de tensión de CC y su derivada, respectivamente, y t_{discr} es la temporización de localización (o discriminación) de la protección.

- Segunda zona:

Las condiciones para considerar que la falta está en la segunda zona son las siguientes:

$$\frac{dV_{dc,Rij}}{dt} > \left(\frac{dV_{dc}}{dt} \right)_{Z1} \quad (21)$$

$$V_{dc,Rij,t_{discr}} < V_{dc,det} \text{ durante } t_{det} \text{ ms.} \quad (22)$$

Es decir, cuando se detecta una falta que no está en la primera zona. Se podría definir la frontera de la segunda zona usando un umbral de tensión $V_{dc,Z2}$, siempre que ese umbral verifique verifique $V_{dc,Z1} < V_{dc,Z2} \leq V_{dc,det}$. La protección secundaria deberá actuar en un tiempo $t_{discr,Z2} > t_{discr}$ desde la detección.

2.5.2 Ajuste

En el trabajo de [40] se evalúa el algoritmo de protección simulando en PSCAD un sistema HVDC multi-terminal de ± 320 kV de tensión de CC con convertidores MMC de medio puente con potencias nominales de 900 MVA y 1200 MVA. Las líneas de CC son cables aislados.

En [40], el tiempo de detección se considera instantáneo $t_{det} = 0$ ms y, en la práctica, debería ajustarse a un valor muy pequeño. El tiempo de localización de la falta de la protección primaria se fija en $t_{discr} = 100 \mu\text{s}$ y el umbral de tensión para la detección se fija en $V_{dc,det} = 0.85 \%$. Se asume que un interruptor HVDC actuará en 2ms desde su orden de disparo. Además, se usan valores de inductancias en los extremos de las líneas que rondan los $L = 10 - 40$ mH y se elige $V_{dc,Z1} = 0.70 - 0.75$ p.u. El resto de umbrales se ajustan por simulación electromagnética [40], asegurando que cada relé localiza una falta en la línea en el caso más crítico. Por ejemplo, el relé R12 de la Fig. 10 debe activarse ante un falta en F2 con resistencia elevada (por ejemplo 60Ω), pero no debe actuar ante una falta franca en F3. Todos los umbrales dependen de las inductancias utilizadas, y se obtienen los siguientes ajustes:

$$\left(\frac{dV_{dc}}{dt} \right)_{Z1} = -463 \text{ kV/ms y } V_{dc,Z1} = 0.72 \text{ p.u. para } L = 20 \text{ mH,} \quad (23)$$

$$\left(\frac{dV_{dc}}{dt} \right)_{Z1} = -278 \text{ kV/ms y } V_{dc,Z1} = 0.76 \text{ p.u. para } L = 40 \text{ mH,} \quad (24)$$

En [40] también se propone un modelo reducido para estudiar las faltas y calcular los ajustes de la protección mediante simulación electromagnética.

2.5.3 Resumen

- Descripción: Protección para la localización de faltas en redes HVDC utilizando medidas de la derivada de la tensión de CC y de la propia tensión de CC.
- Medidas: Cada relé usa medidas locales para el algoritmo de detección.
- Procesamiento de la señal: Se necesitan medidas de tensión, derivada de tensión y derivada de corriente.
- Se necesitan inductancias en los extremos de las líneas.
- Temporización: Se espera un tiempo de detección t_{det} cuando la tensión baje del umbral de detección y el tiempo de discriminación es de $t_{discr} = 100 \mu s$ aprox. El tiempo de detección no se discute, pero debería ser del orden de magnitud del tiempo de discriminación.
- El algoritmo divide entre primera y segunda zona de protección.
- Ajuste: Se propone un modelo reducido de la red visto por cada relé y sus umbrales se diseñan por simulación en el tiempo de ese modelo reducido.
- Robustez: No se analiza el impacto del filtrado/ruido en la medida de la derivada.

2.6 Algoritmo de protección basado en medidas de la derivada de la tensión de CC (ROCOV2)

En [26] se propone una estrategia de protección para la detección y localización de faltas en redes de CC similar a la propuesta de [40]. Con en ese caso, hay que usar inductancias en los extremos de las líneas de CC, como muestra la Fig. 10, y calcular la derivada de la tensión de CC medida en el relé para la localización de la falta ($dV_{dc,R}/dt$). El objetivo nuevamente será que los relés actúen ante faltas en la línea y no actúen ante faltas en líneas externas.

En el trabajo de [26] se omiten los detalles del ajuste del tiempo de discriminación y sólo se analiza la protección primaria (primera zona). Sin embargo se profundiza en otros aspectos como la operación de los interruptores HVDC, representándolos con más detalle y especificando que las inductancias utilizadas en la protección deben ser diseñadas teniendo en cuenta el tiempo de operación y el poder de corte de los interruptores. También, se discute las diferencias en el ajuste de la protección para líneas aéreas o para cables aislados debidas al considerable impacto de las capacidades parásitas.

Además, los relés se ajustan para que actúen ante faltas en barras (por ejemplo, el relé R12 de la Fig. 10 también abriría ante una falta en la barra

$dc, 1$), aunque se comenta que las faltas en barras se podrían detectar con una protección diferencial. Cuando se identifica una falta en barras, los relés de todas las líneas conectadas deben abrir.

2.6.1 Algoritmo

Faltas en líneas

El algoritmo consiste en [26]:

1. Detección: Un relé Rij produciría una detección positiva de falta en el sistema si:

$$\frac{dV_{dc,Rij}}{dt} < \left(\frac{dV_{dc}}{dt} \right)_{det} \text{ durante } t_{det} \text{ ms.} \quad (25)$$

2. Localización (primera zona): La condición de localización de falta en primera zona por el relé Rij es:

$$\frac{dV_{dc,Rij}}{dt} < \left(\frac{dV_{dc}}{dt} \right)_{Z1} \quad (26)$$

Faltas en barras

La condición de detección y localización de falta en la barra dc, i es:

$$\left| \frac{dV_{dc,i}}{dt} \right| > \left| \frac{dV_{dc,Rij}}{dt} \right| \quad (27)$$

para todos los relés de las líneas $i - j$ conectadas al nudo dc, i

2.6.2 Ajuste

En [26], la evaluación del algoritmo de protección se lleva a cabo a través de la simulación en PSCAD de un sistema HVDC multi-terminal de ± 320 kV de tensión de CC con convertidores MMC de medio puente (no se especifican sus potencias nominales).

En [26] sólo se discute la protección primaria y se omiten los detalles de los ajustes de detección en (25). Además, no se diferencia entre detección y localización, ya que el estudio sólo investiga si un relé es capaz de detectar (y localizar) la falta en su zona. Se asume que los interruptores HVDC abren en 2ms desde su orden de disparo.

En este algoritmo, se usan inductancias en los extremos de las líneas ($L = 100$ mH). El diseño de estas inductancias debe contemplar no sólo facilitar la localización correcta de la falta utilizando la derivada de la tensión de CC sino también la limitación de las corrientes de falta, para que éstas no superen el poder de corte de los interruptores en su tiempo de actuación.

El ajuste del umbral de localización (27) se escoge por simulación para garantizar que cada relé actúe ante faltas internas y no actúe ante faltas externas. Los siguientes valores han sido utilizados en [26]:

$$\left(\frac{dV_{dc}}{dt}\right)_{Z1} = -800 \text{ kV/ms para cables aislados,} \quad (28)$$

$$\left(\frac{dV_{dc}}{dt}\right)_{Z1} = -2000, -5000 \text{ kV/ms para líneas aéreas,} \quad (29)$$

Relés en distintas líneas podrían tener ajustes distintos, aunque siempre de un orden de magnitud parecido.

En [26] no se discute el tiempo de discriminación de la falta, pero se deduce que es muy corto (parecido al de [40])

2.6.3 Resumen

- Descripción: Protección para la localización de faltas en redes HVDC utilizando medidas de la derivada de tensión de CC.
- Medidas: Cada relé usa medidas locales para el algoritmo de detección.
- Procesamiento de la señal: Se necesitan medidas de derivada de tensión de CC.
- Hay que colocar inductancias en los extremos de las líneas.
- No se especifican claramente los tiempos de detección de la falta y se asume que el interruptor HVDC actúa en 2 ms. En este tipo de sistemas la protección deberá actuar en unos pocos milisegundos.
- Se cubre la primera zona de protección.
- Diseño de los umbrales: Se escogen por simulación electromagnética, con modelos detallados.
- Robustez: Se debe analizar el impacto del filtrado/ruido en la medida de la derivada de la tensión de CC.

2.7 Algoritmo de protección basado en la media móvil de la corriente de CC

En [41] se propone una estrategia de protección para la detección y localización de faltas en las barras y en las líneas en redes HVDC-VSC. En cada nudo de CC se coloca una unidad de protección con las medidas de corriente del interruptor de barras y de los interruptores de las líneas conectadas al nudo, como muestra la Figura 11. Hay que colocar inductancias en los extremos de las líneas de CC y en el interruptor de barras para limitar la

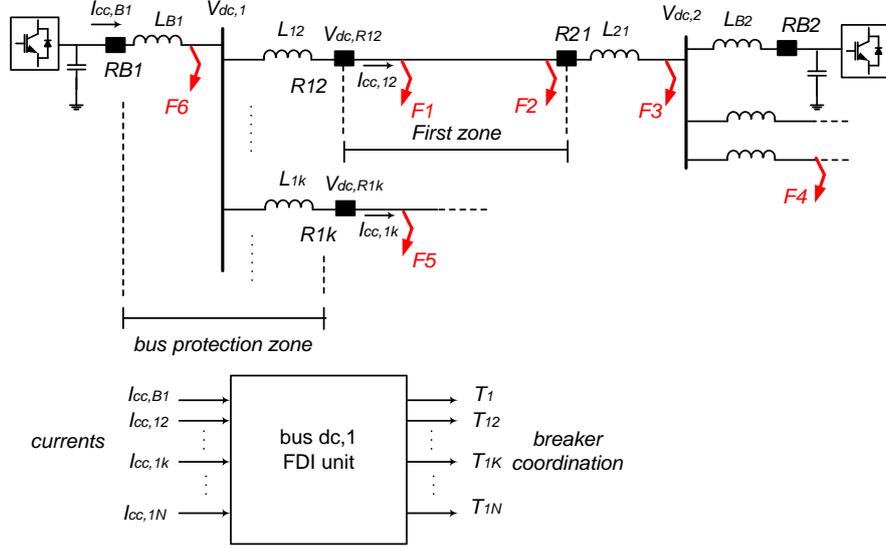


Figure 11: Esquema general para la discusión de la estrategia de protección en redes de CC.

derivada de las corrientes de falta y para mejorar la discriminación de faltas externas.

La unidad de protección de cada nudo de CC se encarga de coordinar el disparo de los interruptores correspondientes (de barras o de líneas), a partir de las medidas locales de corriente en la estación: la corriente medida en el sensor del interruptor de barras ($I_{cc,Bi}$) y las corrientes por las líneas ($I_{cc,ij}$). La unidad de protección de cada nudo $dc, 1$ envía la señal de apertura a los interruptores del nudo ($T_i, T_{1k}, \dots, T_{1N}$). El algoritmo de localización de faltas en las líneas se basa fundamentalmente en la comparación de la corriente de las líneas con la media móvil de instantes anteriores. Se define la siguiente señal:

$$\bar{d}I_{cc,ij} = I_{cc,ij} - MA(I_{cc,ij}) \quad (30)$$

donde $MA(I_{cc,ij})$ es la media móvil calculada en una ventana temporal de N_w muestras, utilizando un tiempo de muestreo t_s :

$$MA(I_{cc,ij})(t = kt_s) = \frac{1}{N_w} \sum_{\ell=1}^{N_w} I_{cc,ij}(t = [k - \ell]t_s), \quad k = 1, 2, \dots \quad (31)$$

En concreto, el algoritmo de localización de faltas en líneas de CC analiza los picos de $\bar{d}I_{cc,ij}$. Para la detección y localización de faltas en barras de CC, se utiliza una protección diferencial.

En el trabajo de [41] sólo se discute la protección primaria.

2.7.1 Algoritmo

Faltas en líneas

El algoritmo consiste en [41]:

1. Detección: Un relé Rij detectará una falta en el sistema si:

- Detección de una potencial falta: Si se detecta un extremo local de $\bar{d}I_{cc,ij}$. El n -ésimo extremo local de $\bar{d}I_{cc,ij}$ detectado se llama $\bar{d}I_{cc,ij}^n$ y el valor de la corriente en ese punto se llama $I_{cc,ij}^n$.
- Criterio de fiabilidad: Este criterio se utiliza para distinguir entre picos $\bar{d}I_{cc,ij}^n$ producidos por faltas o por otros transitorios como apertura de líneas o pérdida de convertidores. Para ello, el valor de $I_{cc,ij}^n$ se compara con el máximo valor que ha tomado $I_{cc,ij}^n$ hasta el momento (max_{ij}). El criterio de fiabilidad se satisface si se verifica:

$$I_{cc,ij}^n \geq max_{ij} \quad (32)$$

2. Localización:

- Criterio de selectividad: La condición de localización de falta en el relé Rij es la siguiente:

$$\bar{d}I_{cc,ij} \geq I_{TH}^L \quad (33)$$

donde I_{TH}^L es un valor umbral.

- Coordinación de los interruptores: El relé Rij sólo recibirá orden de apertura si el resto de relés de líneas en los extremos conectados al nudo dc, i no han recibido orden de apertura. Es decir, en caso de que más de un relé satisfagan la condición de selectividad, sólo abrirá el que haya recibido la orden primero. Gracias a las inductancias en los extremos de las líneas, faltas internas serán detectadas antes por los relés de las líneas afectadas que por los relés de líneas sanas.

Faltas en barras

La condición para la detección y localización de una falta en las barras dc, i es la siguiente [41]:

$$|I_{cc,Bi} + \sum_{j \in C_i} I_{cc,ij}| > I_{TH}^B \quad (34)$$

donde I_{TH}^B es un umbral de valor pequeño y C_i representa el conjunto de líneas conectadas al nudo dc, i . Nótese que (34) es una protección diferencial

de barras. En caso de verificarse (34), se envía señal de disparo a los relés de todas las líneas conectadas al nudo dc, i .

Aunque no se discute en [41], la condición de detección y localización de faltas en barras (34) sólo deberá activarse si no se ha detectado una falta en las líneas conectadas al nudo dc, i , ya que, en caso contrario, la apertura de un interruptor ante falta en la línea también provocaría el disparo de la protección diferencial de barras.

2.7.2 Ajuste

En [41] se investiga el algoritmo de protección simulando en PSCAD un sistema HVDC multi-terminal de ± 320 kV de tensión de CC con convertidores MMC de medio puente (no se especifican sus potencias nominales).

Se utilizan inductancias de $L = 50$ mH en los extremos de las líneas y para calcular la media móvil (31) en el cálculo de $\bar{d}I_{cc,ij}$, se utiliza una ventana de 20 muestras, con tiempo de muestreo $t_s = 0.5$ ms. Se asume que los interruptores HVDC abren a los 2 ms de la orden de disparo.

Los umbrales de la protección (I_{TH}^L y I_{TH}^B) se obtienen de las simulaciones electromagnéticas, para que se detecten correctamente faltas internas y los relés no actúen indebidamente ante faltas externas. Los siguientes umbrales se utiliza en [41]:

$$I_{TH}^L = 0.5 \text{ kA} , \quad (35)$$

$$I_{TH}^B = 2 \text{ kA} , \quad (36)$$

2.7.3 Resumen

- Descripción: Protección para la localización de faltas en redes HVDC-VSC basado en la media móvil de la medida de la corriente de falta.
- Medidas: Cada relé usa medidas locales para el algoritmo de detección.
- Procesamiento de la señal: Se necesitan medidas de las corrientes de CC.
- Se necesitan inductancias en los extremos de las líneas.
- Permite localizar faltas en una atapa temprana de la falta y por tanto las corrientes de falta han llegado todavía a un valor elevado.
- Temporización: No se especifican claramente los tiempos de detección de la falta. En este tipo de sistemas la protección deberá actuar en unos pocos milisegundos.
- Se cubre la primera zona de protección.
- Diseño de los umbrales: Se escogen por simulación electromagnética, con modelos detallados.

3 Estrategias de protección usando comunicaciones

3.1 Algoritmo de protección diferencial 1

En [42] se propone una protección diferencial de cable para la detección y localización de faltas en el lado de CC en sistemas HVDC-VSC multi-terminal. Al igual que la protección diferencial de CA, el método consiste en que los dos relés en los extremos de una línea compararán su medida de corriente y actuar si la suma de las dos corrientes no es cero (ver el esquema de la Fig. 12).

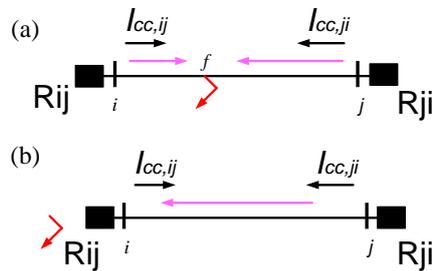


Figure 12: Protección utilizando medidas en los dos extremos de la línea. Principio de funcionamiento: (a) falta interna, (b) falta externa.

La protección diferencial tiene la ventaja de que es selectiva y simple. Sin embargo, el inconveniente es el uso de comunicaciones. Los retrasos en las comunicaciones entre ambos terminales y los producidos por la propagación de la onda viajera podrían comprometer el algoritmo, ya que, como ya se ha discutido, en redes CC la protección tiene que ser extremadamente rápida. Además, como los transitorios de interés son muy rápidos, los retrasos podrían provocar que las medidas de corriente en ambos extremos no estén sincronizadas. De hecho, este problema se observó en los resultados de [43], donde se estudia una red HVDC-VSC en el Mar del Norte con una variante de protección diferencial en las líneas de CC, con telecomunicaciones a través de fibra óptica. En este ejemplo, el retraso de las comunicaciones provoca que la protección actúe después de que algunos convertidores ya han superado su corriente límite. Por tanto, hoy en día la protección diferencial en redes HVDC es apropiada sólo para la protección de barras o de líneas de CC cortas.

En el ejemplo descrito, no se usan inductancias en los extremos de las líneas. El uso de inductancias en los extremos limitaría la derivada de la corriente y podría dar más tiempo a la protección en este algoritmo.

3.1.1 Algoritmo

Por tanto, el algoritmo consiste en [42]:

- Detección: Los relés R_{ij} y R_{ji} detectará una falta si:

$$|I_{cc,ij} + I_{cc,ji}| > I_{TH}^{det} \quad (37)$$

donde I_{TH}^{det} es un valor umbral. En [42] no se discute su valor, pero debería ser pequeño.

- Localización: Los relés R_{ij} y R_{ji} localizarán una falta en la línea $i - j$ si se verifica:

$$I_{cc,ij} + I_{cc,ji} > I_{TH}^{loc} \quad (38)$$

donde $I_{TH}^{loc} > 0$ es un umbral pequeño. En [42] se discute que ante faltas externas, la suma de las corrientes de ambos relés será negativa en los primeros instantes y cero en régimen permanente. Por tanto, la condición (38) garantiza la selectividad.

3.1.2 Ajuste

El algoritmo se evalúa simulando un sistema HVDC-VSC multi-terminal con convertidores MMC de medio puente. Desafortunadamente, no se especifican los datos nominales del sistema, ni la herramienta de simulación utilizada.

En [42] no se discuten los ajustes de la protección, pero puede suponerse que los umbrales I_{TH}^{det} y I_{TH}^{loc} serán pequeños. Un tema relevante que no se trata es el tiempo de actuación de la protección. Como ya se mencionó, en esta protección tendrán impacto los retrasos de las comunicaciones entre los dos relés de los extremos de cada línea y los retrasos producidos por la velocidad de propagación de la onda viajera de corriente, al llegar a cada extremo. Además, el algoritmo requiere que las medidas estén sincronizadas para que se puedan comparar las dos corrientes en el transitorio. En [42] se apunta que la sincronización de las medidas se podría conseguir con compensaciones en los filtros de medida, lo que inevitablemente incluiría más retrasos en los tiempos de actuación lo que dificultaría limitar la corriente de falta antes de la interrupción.

3.1.3 Resumen

- Descripción: Protección diferencial para la localización de faltas en redes HVDC.
- Medidas: Se requiere comunicación entre los dos relés de los extremos de cada línea.
- Procesamiento de señal: Se necesitan medidas de las corrientes de CC.

- No se utilizan inductancias en los extremos de las líneas, pero podrían ayudar a limitar la corriente de falta durante el transitorio.
- Temporización: Debido a los retrasos en comunicaciones y en la propagación de la onda, la protección podría ser demasiado lenta. Sin embargo, en [42] no se discute el impacto del retraso en las comunicaciones entre los dos relés
- Debido a que la protección podría ser demasiado lenta, las corrientes de falta podrían ser excesivamente altas en el momento de ser interrumpidas.
- Se cubre la primera zona de protección.
- Diseño de los umbrales: Se escogerían por simulación electromagnética, con modelos detallados. Sin embargo no se discuten en [42].

3.2 Algoritmo de protección diferencial 2

En [44] también se propone un algoritmo de protección diferencial para faltas en el lado de CC de sistemas HVDC-VSC multi-terminal. El método de detección es distinto al de [42], ya que se utilizan medidas de las derivadas de tensión y de corriente del relé. En [44], sí se describen en detalle los ajustes de la protección. El principio de funcionamiento también puede resumirse a partir de la Fig. 12: se comparan las corrientes de ambos extremos de una línea.

La protección detecta la falta en tiempos del orden de 1 ms. Se investiga la robustez del algoritmo analizando faltas resistivas de hasta 200 Ω . En [29] también evalúa este algoritmo de protección ante retrasos en las comunicaciones, que se realizan por fibra óptica.

3.2.1 Algoritmo

Cada relé calcula la diferencia de corriente entre su extremo y el otro:

$$I_{diff,ij} = I_{cc,ij} - I_{cc,ji} \quad (39)$$

Las condiciones de detección y localización de la falta son las siguientes.

- Detección: El relé R_{ij} detectará una falta si se verifica:

$$\frac{dI_{cc,ij}}{dt} > \left(\frac{dI_{cc}}{dt} \right)_{det} \quad (40)$$

$$\frac{dV_{dc,Rij}}{dt} < \left(\frac{dV_{dc}}{dt} \right)_{det} \quad (41)$$

- Localización:

- Si $I_{diff,ij} > Th^+$ durante 3 muestras consecutivas, el relé localiza la falta y actuará.
- Si Si $I_{diff,ij} < Th^-$ durante 3 muestras consecutivas, el relé se bloquea durante un tiempo Δt_{block}
- Si no se verifica ninguna de las 2 condiciones anteriores, el relé no actúa.

3.2.2 Ajuste

La protección se evalúa en un sistema HVDC-VSC multi-terminal mediante simulación electromagnética en EMTP-RV. La protección también se validó experimentalmente en [29].

Los umbrales se fijan a $Th^+ = 2 \text{ kA}$ y $Th^- = 1 \text{ kA}$. El tiempo de bloqueo se fija a $\Delta t_{block} = 20 \text{ ms}$. No se dice explícitamente el orden de magnitud del tiempo de muestreo.

3.2.3 Resumen

- Descripción: Protección diferencial para la localización de faltas en redes HVDC.
- Medidas: Se requiere comunicación entre los dos relés de los extremos de cada línea.
- Procesamiento de la señal: Se necesitan medidas de las corrientes de CC. También se utilizan las derivadas de tensión y corriente para la condición de detección.
- No se utilizan inductancias en los extremos de las líneas, pero podrían ayudar a limitar la corriente de falta durante el transitorio.
- Temporización: Debido a los retrasos en comunicaciones y en la propagación de la onda, la protección podría ser demasiado lenta.
- Debido a que la protección podría ser demasiado lenta, las corrientes de falta podrían ser excesivamente altas en el momento de ser interrumpidas.
- Se cubre la primera zona de protección.
- Diseño de los umbrales: Se escogen por simulación electromagnética, con modelos detallados.

3.3 Algoritmo de protección de comparación direccional comunicada con hilo piloto

En [45] se presenta un algoritmo de protección basado en comparación direccional comunicada por hilo piloto para enlaces HVDC-VSC punto a punto. El algoritmo puede extenderse a sistemas HVDC-VSC multi-terminal, ya que la protección de cada línea de CC es selectiva.

El principio de operación básico consiste en comparar el signo de la corriente saliente de cada uno de los extremos de la línea de CC ($I_{cc,ij}$ e $I_{cc,ji}$ en la Figura 12). Ante una falta interna, las corrientes de CC de ambos extremos aumentarán para alimentar al cortocircuito y tendrán el mismo signo. Por el contrario, en operación normal o ante faltas externas, las corrientes de CC de ambos extremos tienen el signo distinto. La falta interna se aísla con interruptores de CC.

En el trabajo de [45] no se utilizan inductancias en los extremos de las líneas que, sin embargo, podrían ser útiles para limitar la derivada de la corriente de falta y dar más tiempo de actuación a la protección. El tiempo de localización de la falta dependerá de los ajustes de la protección. Para los ajustes utilizados en [45], el tiempo de localización rondará los 10 ms. La robustez de la protección se verifica estudiando faltas francas y áltamente resistivas. Sin embargo, no se discute el impacto de los retrasos de las comunicaciones entre los dos relés.

Para líneas largas, el método de comparación direccional apunta a ser más robusto y rápido que la protección diferencial, ya que solo se comunica el signo de la corriente y no el valor de ésta. La protección no se ve afectada por las capacidades parásito de las líneas, ni por el ruido en las medidas [2, 45].

3.3.1 Algoritmo

Se define $\Delta I_{cc,ij}$ como el incremento de la corriente con respecto al valor pre-falta:

$$\Delta I_{cc,ij} = I_{cc,ij} - I_{cc,ij}^0 \quad (42)$$

La medida utilizada para la comparación direccional será la media móvil de $\Delta I_{cc,ij}$, que viene dada por:

$$I_{op,ij}(t = kt_s) = \frac{1}{N_w} \sum_{\ell=1}^{N_w} \Delta I_{cc,ij}(t = [k - \ell]t_s), \quad k = 1, 2, \dots \quad (43)$$

donde t_s es el tiempo de muestreo y N_w es el tamaño de la ventana, utilizados para calcular la media móvil.

El algoritmo de protección de [45] viene dado por:

- Detección: Un relé R_{ij} detectará una falta si se verifica:

$$I_{op,ij} > I_{TH}^{det} \quad (44)$$

donde I_{TH}^{det} es un valor umbral. En [42] no se discute su valor, pero debería ser pequeño.

- Localización: Una vez detectada una falta por los relés R_{ij} y R_{ji} , éstos localizarán la falta en la línea $i - j$ si se verifica:

$$\text{signo}(I_{op,ij}) \cdot \text{signo}(I_{op,ji}) > 0 \quad (45)$$

3.3.2 Ajuste

El algoritmo de protección se evalúa mediante simulación electromagnética en PSCAD, utilizando un enlace HVDC-VSC punto a punto de ± 60 kV y 60 MW. El tiempo de muestreo y el tamaño de la ventana para el cálculo de la media móvil en (43) son $t_s = 0.5$ ms y $N_w = 10$, respectivamente (es decir, el tamaño de la ventana es $10 \times 0.5 = 5$ ms).

El umbral de detección en (44) es proporcional a la corriente nominal del enlace:

$$I_{TH}^{det} = k_{TH} I_{nom} \quad (46)$$

En [45] se utiliza un valor de $k_{TH} = 0.15$.

La robustez de la protección se investiga en faltas francas y con resistencias de 100Ω .

El tiempo que tarda la protección en localizar la falta, que dependerá del tiempo de muestreo y del tamaño de la ventana utilizada para el cálculo de la media móvil, es de unos 10 ms, según [45].

3.3.3 Resumen

- Descripción: Protección de comparación direccional para la localización de faltas en redes HVDC.
- Medidas: Se requiere comunicación entre los dos relés de los extremos de cada línea.
- Procesamiento de la señal: Se calcula el signo de la media móvil de las corrientes de CC en cada uno de los dos relés de una línea.
- No se utilizan inductancias en los extremos de las líneas, pero podrían ayudar a limitar la corriente de falta durante el transitorio.
- Temporización: Debido a los retrasos en comunicaciones y en la propagación de la onda, la protección podría ser demasiado lenta. Aunque, como sólo se comunica el signo de la señal, la comunicación sería más robusta y rápida que en el caso de la protección diferencial. En [45], no se discute el impacto del retraso en las comunicaciones entre los dos relés.

- Debido a que la protección podría ser demasiado lenta, las corrientes de falta podrían ser excesivamente altas en el momento de ser interrumpidas.
- Se cubre la primera zona de protección.
- Diseño de los umbrales: Se escogerían por simulación electromagnética, con modelos detallados.

3.4 Algoritmo de protección basado en ondas viajeras y utilizando medidas GPS

En [46] se propone un algoritmo de localización de faltas en la red HVDC basado en ondas viajeras y utilizando las medidas sincronizadas de corriente de CC en un número limitado de terminales, mediante señales GPS. El algoritmo se basa en el análisis del tiempo que tarda en llegar a los detectores la onda de corriente producida por la falta, como ilustra la Figura 13. Se deben instalar los detectores para que el sistema completo sea observable.

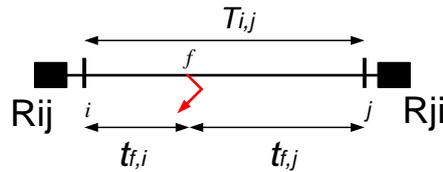


Figure 13: Protección mediante detección de onda viajera usando medidas sincronizadas en los dos terminales de una línea HVDC [46].

Ante una falta en una línea de la red HVDC, se busca detectar y localizar rápidamente la línea afectada para despejarla. En [46] se valida el algoritmo mediante simulación en el caso de una red HVDC mallada. También se investiga su robustez, analizando faltas en distintos puntos, incluyendo señales con ruido, aumentando la frecuencia de muestreo y simulando faltas con distintos valores de resistencia.

Los cálculos se hacen de forma centralizada utilizando comunicaciones mediante GPS. Si bien, los tiempos de detección de la onda viajera por cada equipo instalado serían muy cortos (del orden de algunos μs), no se analiza el impacto de los retrasos en las comunicaciones y no se recogen explícitamente los tiempos de detección y localización de las faltas. También, la infraestructura necesaria tendrá un coste elevado, debido a los detectores de onda viajera y su comunicación centralizada por GPS.

No se utilizan inductancias en los extremos de las líneas de CC, pero podrían ser útiles para limitar la derivada de corriente de falta y dar más tiempo a la protección.

Debido a la complejidad del algoritmo, se presentan primero sus fundamentos y en la siguiente subsección se describe el algoritmo de forma concisa.

Se utilizará la siguiente notación:

- t_0 : tiempo en que se produce la falta [s] (incógnita).
- $x_{f,i}$: distancia desde el terminal i hasta el punto de la falta [km] (incógnita).
- $t_{f,i}$: tiempo que tarda la onda viajera en ir desde el punto de la falta f hasta el detector del terminal i [μ s] (incógnita).
- $T_{i,j}$: tiempo que tarda la onda viajera en recorrer la línea (i, j) completa [μ s] (dato).
- t_i^m : tiempo en que el equipo del terminal i detecta la onda viajera [μ s] (dato).
- $\nu_{i,j}$: velocidad de propagación a través de la línea (i, j) [m/ μ s] (dato).

Si se produce una falta en la línea (i, j) , como en la Figura 13, se verifica que [46]:

$$t_i^m = t_0 + t_{f,i} \quad (47)$$

$$t_j^m = t_0 + t_{f,j} \quad (48)$$

$$T_{i,j} = t_{f,i} + t_{f,j} \quad (49)$$

que es un sistema de 3 ecuaciones y 3 incógnitas (t_0 , $t_{f,i}$ y $t_{f,j}$). Una vez que se resuelve el sistema, la distancia de la falta al terminal i se obtiene como: $x_{f,i} = t_{f,i} \times \nu_{i,j}$.

Los fundamentos del algoritmo de [46] se resumen a continuación:

- Determinación de líneas candidatas.

En primer lugar, se descartan las líneas en las que no se ha podido producir la falta, de acuerdo a las medidas. Posteriormente se procede a analizar las líneas restantes (líneas candidatas). Se analizan todas las líneas (i, j) de la red HVDC comparando las medidas de todos los pares de nudos con detector de onda viajera (p, q) .

Si se verifica:

$$t_q^m < t_p^m \quad \text{y} \quad \begin{cases} T_{i,q} > T_{i,p} \\ T_{j,q} > T_{j,p} \end{cases} \quad (50)$$

entonces se descarta a la línea (i, j) como candidata.

Las inecuaciones de la derecha de (50) indican que el tiempo que tarda en llegar la onda viajera desde un punto arbitrario de la línea (i, j)

hasta el detector del terminal p es más corto que el tiempo empleado en llegar hasta el detector del nudo q . Por otro lado, $t_q^m < t_p^m$ significa que el detector del nudo q detecta antes la onda viajera que el equipo del terminal p . Por tanto, las 2 expresiones de (50) no se pueden verificar simultáneamente si la falta se produce en la línea (i, j) .

- Localización de la falta.

Primero, se define:

$$A_i^k = t_k^m - T_{i,k} \quad (51)$$

Esta variable se evalúa para todos los terminales i de las líneas candidatas y para todos los terminales k que tienen equipo de detección.

El índice propuesto en [46] para la localización de la falta es:

$$EI_{i,j} = \sum_{k \in S_d} \min\{|t_k^m - (A_i^{max} + T_{i,k})|, |t_k^m - (A_j^{max} + T_{j,k})|\} \quad (52)$$

donde $A_i^{max} = \max_k\{A_i^k\}$ y S_d es el conjunto de terminales con detector.

Si $EI_{i,j} = 0$ (en la práctica un valor muy pequeño), entonces la falta está localizada en la línea (i, j) .

- Localización de la falta en la línea afectada.

La distancia del punto de la falta hasta uno de los nudos de la línea afectada (i, j) se obtiene con el tiempo que tarda en llegar la onda viajera al terminal, $t_{f,i}$. Para ello, se resuelve el siguiente sistema de ecuaciones:

$$t_k^m = T_{i,k} + t_{f,i} + t_0, \quad \forall k \in S_i \quad (53)$$

$$t_k^m = T_{j,k} + t_{f,j} + t_0, \quad \forall k \in S_j \quad (54)$$

El sistema es sobredeterminado y se resuelve por el método de mínimos cuadrados. La distancia hasta el punto de la falta viene dada por: $x_{f,i} = t_{f,i} \times \nu_{i,j}$.

3.4.1 Algoritmo

- Detección:

Los detectores obtienen los tiempos de llegada de la onda viajera, t_i^m , mediante la transformada wavelet.

- Localización:

Una vez detectada la falta, las condiciones de localización son las siguientes:

1. Se obtienen las líneas candidatas, haciendo uso de (50).
2. La línea con menor índice $EI_{i,j}$ en (52) es la línea dónde se ha producido la falta.
3. Una vez se ha localizado la línea en la que se ha producido la falta, la distancia desde el punto de falta hasta el terminal se obtiene resolviendo (53).

3.4.2 Ajuste

El algoritmo se evalúa mediante simulaciones con PSCAD en un sistema HVDC-VSC multi-terminal. Desafortunadamente, no se especifican los datos nominales del sistema.

Las señales en los detectores de onda viajera se muestran a 1 MHz. A diferencia de otros algoritmos de protección, éste no utiliza umbrales. Sin embargo, se deben resolver varios sistemas de ecuaciones.

3.4.3 Resumen

- Descripción: Protección basada en detectores de ondas viajeras con medidas sincronizadas para la localización de faltas en redes HVDC.
- Medidas: Se requiere un sistema centralizado con comunicación GPS.
- Procesamiento de la señal: Los detectores de onda viajera usan la transformada wavelet.
- No se utilizan inductancias en los extremos de las líneas, pero podrían ayudar a limitar la corriente de falta durante el transitorio.
- Temporización: No se analiza el impacto del retraso en las comunicaciones ni del tiempo de computación del microprocesador. Estos retrasos podría provocar que la protección fuese demasiado lenta. No se discute el tiempo total de detección y localización de falta.
- Debido a que la protección podría ser demasiado lenta, las corrientes de falta podrían ser excesivamente altas en el momento de ser interrumpidas.
- Se cubre la primera zona de protección.
- Robustez: Se verifica que la protección actúa correctamente ante faltas altamente resistivas y se investiga el efecto del ruido en las medidas y de las variaciones en la frecuencia de muestreo de los detectores.
- Ajuste: El algoritmo de protección se analiza por simulación electromagnética, con modelos detallados. Se debe ajustar la frecuencia de muestreo de los detectores de onda viajera.

4 Conclusiones

De la revisión de las propuestas de protección de sistemas HVDC-VSC multi-terminal ante faltas en el lado de CC se obtienen las siguientes conclusiones:

- Debido a las exigencias para la protección en sistemas HVDC-VSC multi-terminal, parece imprescindible el uso de inductancias en los extremos de las líneas de CC. Estas servirán para: (a) limitar la derivada de la corriente de falta y dar más tiempo a la protección y (b) para mejorar la selectividad en algunos algoritmos de protección.
- Todos los algoritmos de protección descritos en este documento han funcionado satisfactoriamente en el caso de estudio de la referencia correspondiente. Sin embargo, es necesario elaborar un protocolo de pruebas sistemático para evaluar la robustez de este tipo de protecciones. Se proponen incluir los siguientes elementos:
 - Estudio del impacto del procesamiento de la señal y filtrado.
 - Estudio del impacto de los retrasos en las comunicaciones en las estrategias que requieren medidas de otros relés remotos.
 - Pautas claras para el ajuste de las protecciones.
 - Estudio de la robustez de la protección ante faltas resistivas
 - Estudio del efecto del ruido en las medidas y de los transitorios rápidos producidos en la operación normal del sistema (distintos a los causados por las faltas).

Ningún trabajo cubre todos estos aspectos.

- Los algoritmos que parecen más maduros para su aplicación son los que requieren medidas locales. En concreto, las propuestas de [26, 40, 41]. Sin embargo, el impacto del ruido en las medidas y los retrasos introducidos por el filtrado en las estrategias de [26, 40] tienen que ser analizados con más detalle, ya que estas dos estrategias usan la medida de la derivada de tensión de CC. Especialmente interesante es la propuesta de [41], ya que utiliza medidas de corriente, que son menos problemáticas que las derivadas. En cambio, la robustez de la protección [41] ante faltas resistivas tiene ser analizada. También, apunta a ser interesante la propuesta de [3], incluyendo inductancias en los extremos de las líneas, ya que mejorarían la selectividad de la protección y darían más margen para el ajuste.
- Las protecciones con comunicaciones que están más maduras son la protección diferencial [42, 44] y de comparación direccional [45], aunque de momento el uso fiable de estas estaría restringido a líneas relativamente cortas. Se requieren más estudios para analizar su implementación en redes HVDC-VSC con distancias grandes.

- Sería interesante una comparación sistemática entre los distintos algoritmos de protección en el mismo caso estudio, analizando ventajas e inconvenientes.

References

- [1] P. M. Anderson, "Power system protection," *John Wiley & Sons - IEEE Press Power Engineering Series*, 1998.
- [2] D. Jovic, D. van Hertem, K. Linden, J.-P. Taisne, and W. Grieshaber, "Feasibility of DC transmission networks," *Proc. IEEE/PES 2nd International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Manchester, UK*, 2011.
- [3] K. De Kerf, K. Srivastava, M. Reza, D. Bekaert, S. Cole, D. Van Hertem, and R. Belmans, "Wavelet-based protection strategy for DC faults in multi-terminal VSC HVDC systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 5, no. 4, p. 496, 2011.
- [4] N. Macleod, "Research Activities and Innovation Projects: New Components Needed," in *HVDC Grids Workshop, Bilbao, Spain, 11-12-2012*, 2012.
- [5] A. Lesnicar and R. Marquardt, "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range," *Proc. IEEE/PES PowerTech Conference, Bologna, Italy*, pp. 1–6, 2003.
- [6] N. M. Macleod, C. D. Barker, R. S. Whitehouse, and W. Liang, "VSC HVDC Converter Design with Fault Blocking Capability for OHL Applications," *EPRI HVDC/FACTS Conference, Palo Alto, USA*, 2011.
- [7] S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M. A. Pérez, and J. I. Leon, "Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 8, pp. 2553–2580, 2010.
- [8] M. M. C. Merlin, T. C. Green, P. D. Mitcheson, D. R. Trainer, D. R. Critchley, and R. W. Crookes, "A new Hybrid Multi-Level Voltage-Source Converter with DC Fault Blocking Capability," in *AC and DC Power Transmission. 9th IET International Conference*, 2010.
- [9] M. M. C. Merlin, T. C. Green, P. D. Mitcheson, D. R. Trainer, R. Critchley, W. Crookes, and F. Hassan, "The Alternate Arm Converter : A New Hybrid Multilevel Converter With DC-Fault Blocking Capability," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 1, pp. 1–8, 2013.
- [10] ABB, "Its time to connect with offshore wind supplement," *ABB company technical report*, 2010.

- [11] M. Davies, M. Dommaschk, J. Dorn, J. Lang, D. Retzmann, and D. Soerangr, “HVDC PLUS Basics and Principle of Operation,” *Siemens*, 2008.
- [12] Alstom Grid, “HVDC-VSC : transmission technology of the future,” *Think Grid*, vol. 8, pp. 13–17, 2011.
- [13] E. Kontos, “Control and Protection of VSC-based Multi-terminal DC Networks,” Master’s thesis, Delft University of Technology, 2013.
- [14] D. Van Hertem and M. Ghandhari, “Multi-terminal VSC HVDC for the European supergrid: Obstacles,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 3156–3163, 2010.
- [15] M. Barnes and A. Beddard, “Voltage Source Converter HVDC Links - The State of the Art and Issues Going Forward,” *Energy Procedia*, vol. 24, pp. 108–122, 2012.
- [16] M. Callavik, A. Blomberg, J. Häfner, and B. Jacobson, “The Hybrid HVDC Breaker: An innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids. ,” *ABB Grid Systems*, 2012.
- [17] Alstom, “HVDC circuit breakers: driving towards the Supergrid,” *Think Grid*, 2014.
- [18] A. M. Denis (task leader), “DC grids: motivation, feasibility and outstanding issues,” *Deliverable 5.4 of the Twenties EU Project*, 2013.
- [19] J. Häfner and B. Jacobson, “Hybrid HVDC Breakers - A key innovation for reliable HVDC grids ABB,” in *Cigré symposium, Bologna*, 2011.
- [20] J. Candelaria and J.-D. Park, “VSC-HVDC System Protection: A Review of Current Methods,” *Proc. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE), Phoenix, AZ, USA*, pp. 1–7, 2011.
- [21] Mathworks, “Matlab2016b on-line documentation for power_hvdc_vsc,” <http://www.mathworks.com>, accessed: 2016-12-01.
- [22] J. Yang, J. E. Fletcher, and J. O. Reilly, “Multiterminal DC Wind Farm Collection Grid Internal Fault Analysis and Protection Design,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2308–2318, 2010.
- [23] W. Leterme and D. Van Hertem, “Reduced Modular Multilevel Converter Model to Evaluate Fault Transients in DC Grids,” *Proc. 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP), Copenhagen, Denmark*, pp. 1–6, 2014.

- [24] Cigré WG B4.57, “Guide for the Development of Models for HVDC Converters in a HVDC Grid,” TB 604, Tech. Rep., 2014.
- [25] W. Leterme, N. Ahmed, L. Ängquist, D. Van Hertem, and S. Norrga, “A new HVDC grid test system for HVDC grid dynamics and protection studies in EMT-type software,” *Proc. 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Birmingham, UK*, pp. 1–6, 2015.
- [26] J. Sneath and A. D. Rajapakse, “Fault Detection and Interruption in an Earthed HVDC Grid Using ROCOV and Hybrid DC Breakers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 973–981, 2016.
- [27] L. Tang and B.-t. Ooi, “Locating and Isolating DC Faults in Multi-Terminal DC Systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1877–1884, 2007.
- [28] F. Deng and Z. Chen, “Design of Protective Inductors for HVDC Transmission Line Within DC Grid Offshore Wind Farms,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 75–83, 2013.
- [29] J. Descloux, “Protection contre les courts-circuits des réseaux à courant continu de forte puissance,” PhD thesis, Université de Grenoble, 2013.
- [30] E. Kontos, S. Rodrigues, R. Teixeira Pinto, and P. Bauer, “Optimization of limiting reactors design for DC fault protection of multi-terminal HVDC networks,” *Proc. IEEE/PES Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, USA*, pp. 1–8, 2014.
- [31] Cigré Working Group B4.52, “HVDC Grid Feasibility Study,” TB 533, Tech. Rep., 2013.
- [32] S. Le Blond, R. Bertho, D. V. Coury, and J. C. M. Vieira, “Design of protection schemes for multi-terminal HVDC systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 965–974, 2016.
- [33] M. Farhadi and O. A. Mohammed, “Protection of multi-terminal and distributed DC systems: Design challenges and techniques,” *Electric Power Systems Research*, vol. 143, pp. 715–727, 2017.
- [34] S. Mallat, *A wavelet tour of signal processing*. Academic Press, 1999.
- [35] D. C. Robertson, O. I. Camps, J. S. Mayer, and W. B. Gish, “Wavelets and electromagnetic power system transients,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 2, pp. 1050–1058, 1996.
- [36] K. De Kerf, “Protection Strategies for DC Faults in Multi-Terminal VDC HVDC Systems,” Master’s thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2009.

- [37] J. Descloux, B. Raison, and J.-B. Curis, "Protection algorithm based on differential voltage measurement for MTDC grids," *Proc. 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP), Copenhagen, Denmark*, pp. 1–5, 2014.
- [38] R. E. Torres-Olguin and H. K. Høidalen, "Inverse time overcurrent protection scheme for fault location in multi-terminal HVDC," *Proc. IEEE/PES PowerTech Conference, Eindhoven, Netherlands*, pp. 1–6, 2015.
- [39] —, "Travelling waves-based fault detection method in multi-terminal HVDC grids connecting offshore wind farms," *Proc. 13th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP), Edinburgh, UK*, pp. 1–7, 2016.
- [40] W. Leterme, J. Beerten, and D. Van Hertem, "Non-unit Protection of HVDC Grids With Inductive DC Cable Termination," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 2, pp. 820–828, 2016.
- [41] S. P. Azad and D. Van Hertem, "A Fast Local Bus Current-Based Primary Relaying Algorithm for HVDC Grids," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 193–202, 2017.
- [42] A. Adamczyk, C. D. Barker, and H. Ha, "Fault Detection and Branch Identification for HVDC Grids," *Proc. 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP), Copenhagen, Denmark*, pp. 1–6, 2014.
- [43] I. Dallas and C. Booth, "Teleprotection in Multi-terminal HVDC Supergrids," *Proc. 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP), Copenhagen, Denmark*, pp. 1–6, 2014.
- [44] J. Descloux, P. rault, S. Nguéfeu, J.-B. Curis, X. Guillaud, P. Colas, and B. Raison, "HVDC meshed grid: Control and protection of a multi-terminal HVDC system," *Proc. CIGRE Session, Paris, France*, pp. 1–8, 2012.
- [45] G. Song, X. Chu, X. Cai, and S. Gao, "A novel pilot protection principle for VSC-HVDC cable lines based on fault component current," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 53, pp. 426–433, 2013.
- [46] S. Azizi, S. Afsharnia, and M. Sanaye-Pasand, "Fault location on multi-terminal DC systems using synchronized current measurements," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 63, pp. 779–786, 2014.