

Protección contra faltas de c.c. en sistemas VSC

D.M. Larruskain¹, I. Zamora¹, J.J. Zamora² and O. Abarrategui¹

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad del País Vasco

La Casilla nº 3, 48012 Bilbao (España),

Telef:+34 946 014 472, fax:+34 946 014 300, e-mail: marene.larruskain@ehu.es, inmaculada.zamora@ehu.es,
oihane.abarrategui@ehu.es

²Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones
e-mail: juanjose.zamora@ehu.es

Resumen. La tecnología HVDC basada en convertidores alimentados por tensión (VSC) se utiliza en sistemas de transporte o distribución repartidos por todo el mundo. Esta tecnología presenta ventajas técnicas y económicas. Sin embargo, las faltas en el circuito de c.c. constituyen una de las principales limitaciones de esta tecnología. Por ello, para evitarlas, los sistemas VSC comerciales instalados no utilizan líneas aéreas.

El objetivo de esta comunicación consiste en analizar las faltas de c.c. Así, se presenta una revisión de diferentes métodos para interrumpir dichas faltas y de posibles soluciones que permitan mitigar el fenómeno de resonancia. Se incluye también la aplicación para sistemas multiterminales.

Palabras llave

Convertidores alimentados por tensión (VSC), corriente continua, falta, protección.

1. Introducción

En 1997 se construyó el primer enlace HVDC con VSC, entre la isla de Gotland y la Suecia continental, con un rango de 50 MW, 360 A y ± 80 kV.

Esta tecnología se caracteriza por la capacidad de controlar el encendido y el apagado de los dispositivos del convertidor (Fig. 1), permitiendo un control independiente de la potencia activa y reactiva. Otras características principales incluyen la capacidad de arranque blackout, la posibilidad de energizar sistemas de c.a. pasivos y el hecho de no presentar requisitos de potencia de cortocircuito.

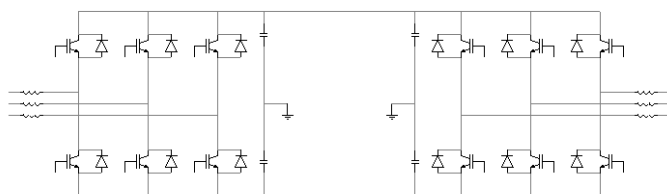


Fig. 1 Sistema VSC

Las características citadas permiten que esta tecnología sea adecuada para algunas aplicaciones en rangos de potencia menores, como por ejemplo: parques eólicos, plataformas de gas y petróleo y alimentación de ciudades.

Sin embargo, una de las principales limitaciones de los sistemas VSC es que los convertidores están indefensos ante faltas de c.c., también se debe tener en cuenta que la capacidad de soportar faltas es mucho menor que la de los convertidores clásicos, que están basados en tiristores. El método de protección que generalmente se utiliza consiste en evitar estas faltas. Debido a que habitualmente aparecen en líneas aéreas, los sistemas VSC utilizan cables subterráneos o no tienen circuito de transporte. Hoy en día, no hay ningún sistema VSC comercial instalado con líneas aéreas.

2. Falta de c.c. en sistemas tradicionales HVDC

La principal característica de un cortocircuito de c.c. es que no se extingue por sí mismo hasta que la corriente se reduzca a cero y el arco se desionice. Las faltas de c.c. en líneas aéreas habitualmente son transitorias, debidas a rayos, y se despejan por sí mismas, pero esto no siempre sucede. En sistemas subterráneos o submarinos las faltas de c.c. generalmente son permanentes y se deben a daños mecánicos. Se pueden enterrar los cables como medida de protección.

Cuando aparece una falta, la tensión de línea y la corriente del inversor se reducen y la corriente del rectificador aumenta. Las protecciones detectan la falta, la operación del rectificador cambia y comienza a trabajar como inversor. La corriente se reduce rápidamente y la energía almacenada en el circuito de c.c. se despeja. Esta acción requiere una inversión de la tensión del rectificador.

Cuando el arco se desioniza, la línea se carga de nuevo. En caso de que la falta sea intermitente, la línea podrá soportar la tensión y después de un tiempo, la potencia plena se volverá a restaurar a los valores pre-falta.

Si la falta es permanente, por ejemplo, debido a aisladores sucios, una segunda falta aparece después de la reconexión. Después de varios intentos fallidos, la reconexión se realiza aplicando una tensión reducida.

3. Falta de c.c. en sistemas VSC

Cuando aparece una falta de c.c. en un enlace VSC, el condensador se cortocircuita y los diodos en antiparalelo conducen como un puente rectificador, alimentando la falta (Fig. 2). A pesar de que los convertidores se bloquean por puerta, la corriente de falta no se interrumpe y está limitada únicamente por la impedancia de la reactancia, provocando grandes corrientes que pueden destruir los dispositivos semiconductores. La corriente soportada por los IGBT típicamente es el doble de la corriente nominal. El convertidor no es capaz de extinguir la corriente de falta como en el caso de los sistemas tradicionales HVDC.

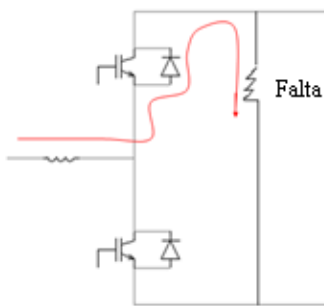


Fig. 2. Los diodos alimentan la corriente de falta

En el circuito de c.c. se pueden considerar diferentes faltas:

- Falta línea a tierra (positiva o negativa)
- Cortocircuito entre las dos líneas

A continuación se analizarán las faltas más representativas:

A. Falta línea a tierra

La corriente de falta fluye en el convertidor vía el elemento de puesta a tierra. Si la puesta a tierra es directa, la sobrecorriente no se puede suprimir. Para limitar la corriente de falta es necesario un diseño adecuado de la puesta a tierra. Se puede colocar una resistencia en la puesta a tierra en un extremo, y el otro extremo se puede conectar a tierra mediante una resistencia y un condensador en serie. Es necesario un método para cortar la corriente de falta. Debido a la R colocada en la puesta a tierra, el potencial del neutro y de la línea no afectada aumenta, por lo que emerge el problema de sobretensión. Cuanto mayor es el valor de la R, mejor se suprime la sobrecorriente, pero los valores de sobretensión son mayores. Por lo tanto, la R debe elegirse cuidadosamente

B. Cortocircuito de las dos líneas y tierra

La reducción de la corriente solo es posible colocando un elemento limitador de corriente en el circuito principal.

Se debe aumentar la tolerancia a la sobrecorriente de los diodos. Esta corriente generalmente no excede de 5 p.u. y disminuye con la potencia de cortocircuito. La corriente de falta se debe extinguir con algún método. En este caso no hay problemas de sobretensión.

4. Métodos para extinguir la corriente de falta

A. Utilización de IA de c.c.

La corriente de falta se extingue mediante un IA (Interruptor Automático) de c.c. Este método es el más eficaz pero es el más caro.

B. Utilización de IA de c.a.

La corriente de falta se extingue utilizando un IA de c.a. Es el método más barato, ya que los sistemas VSC ya están equipados en el lado de c.a., pero que requiere un tiempo de actuación grande.

C. Extinción de las componentes de la corriente de falta

La corriente de falta es debida a la intensidad que pasa a través del convertidor y a la intensidad del condensador. Para extinguir la corriente de falta, se deben eliminar sus dos componentes.

El condensador se descarga con una constante de tiempo pequeña (la constante de tiempo del condensador es relativamente pequeña para conseguir un rizado pequeño, una sobretensión transitoria pequeña en la tensión de c.c. y para permitir un control rápido de la potencia activa y reactiva). El condensador se puede proteger mediante hardware, por medio de snubbers que limiten la velocidad de descarga de la corriente. Sin embargo los snubbers no interrumpen la corriente de descarga. Para interrumpir esta corriente se necesita un IA del condensador muy rápido. En la Fig. 3a se muestra un IA del condensador basado en ETO (Emitter Turnoff Device). El principio de operación consiste en comparar la corriente que circula con un valor límite, cuando la corriente a través del condensador supera este límite, se corta el dispositivo en 3-7 μ s [8].

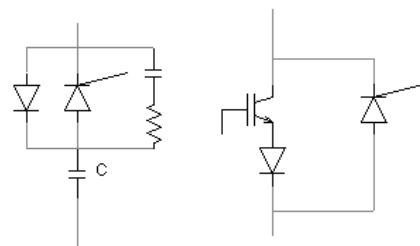


Fig. 3a protección del condensador

3b. Interrupción de la corriente por medio de elementos de auto-apagado.

Para interrumpir la corriente a través de los diodos en antiparalelo, se pueden reemplazar estos diodos por dispositivos electrónicos de auto-apagado (Fig. 3b) [8].

C. IA-IGBT

Se puede colocar un IGBT que realiza la función de un IA. Este método consiste en interruptores IGBT y diodos en antiparalelo situados entre los nodos del condensador y los nodos de la línea de c.c. (Fig. 4). Esta solución no posee una capacidad de bloqueo bidireccional, pero es económica. Cuando la corriente de c.c. circula desde el convertidor hacia la línea (flecha azul), el bloqueo del IGBT corta esta corriente. Cuando la corriente tiene la dirección contraria (flecha roja), no puede ser cortada por el IGBT y fluye a través del diodo. En este caso, el corte de la corriente se realiza bloqueando los IGBT del convertidor.

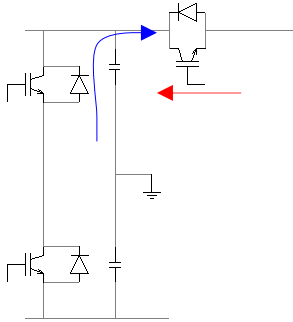


Fig. 4 Protección del convertidor con IA-IGBT

5. Control y protección en faltas de c.c.

En este apartado se proponen soluciones para la sobretensión y sobrecorriente en faltas de c.c.

A. Falta línea a tierra (Fig. 5)

- 1) La sobrecorriente del convertidor se mantiene en 1.5 p.u. por medio de resistencias de tierra, para evitar que el IA c.a. dispare.
- 2) La falta se detecta en los terminales por medio de una caída de la tensión de c.c., el convertidor se bloquea por puerta, y la sobretensión en la línea no afectada se mantiene en 0.6 p.u. aproximadamente.
- 3) Después del bloqueo, la corriente de falta se limita por medio de la resistencia de puesta a tierra, y se corta con un IA c.c. en todos los terminales. Se espera un tiempo suficiente para que el plasma se extinga y no haya posibilidad de re-cebado cuando la tensión de c.c. reaparezca. Los IA se rehacen y los convertidores vuelven a arrancar.

B. Cortocircuito entre líneas

- 1) No hay un limitador de corriente eficaz. La falta se detecta en los terminales por medio de una caída de la tensión de c.c., el convertidor se bloquea por puerta, y la corriente de falta se corta con IA c.a.
- 2) Los diodos se diseñan para que sean capaces de soportar la corriente de falta (máx. 5 p.u. durante 4 ciclos) hasta que operen los IA.

- 3) Cuando los IA se recuperan, el convertidor se pone en marcha

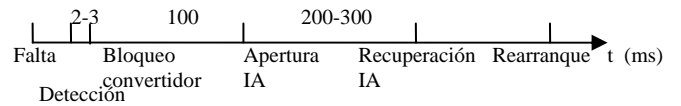


Fig.5 Secuencia de control en faltas línea a tierra

6. Componente de falta de secuencia cero

A. Aspectos generales

Un sistema trifásico desequilibrado se descompone en las componentes directa, inversa y cero. La secuencia directa es la componente pre-falta que entrega el convertidor. La secuencia inversa provoca componentes de tensión y corriente en el lado de c.c., al doble de la frecuencia del sistema de c.a.

Cuando existe la componente de secuencia cero, se divide en dos mitades, cada una de ellas fluye a través de una línea (positiva y negativa), por lo que los dos condensadores se cargan en direcciones opuestas, aumentando la divergencia de las tensiones positiva y negativa en los condensadores (u_{div}).

$$u_{div} = 0.5(u_p - u_n) \quad (1)$$

$$U_{cc} = u_p - u_n \quad (2)$$

Esta divergencia no influye en la tensión de c.c. entre polos ya que se autocancela, pero proyecta tensiones de secuencia cero en el lado de c.a.. Las tensiones de secuencia cero u_{div} y las tensiones de c.a. tienen la misma frecuencia.

El circuito equivalente para la secuencia cero se muestra en la Fig. 6.

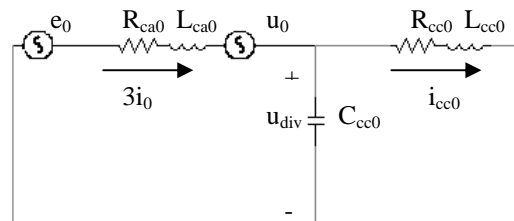


Fig. 6.Circuito equivalente de secuencia cero

donde:

R_{ca0} : resistencia equivalente de secuencia cero del lado de c.a.

L_{ca0} : inductancia equivalente de secuencia cero del lado de c.a.

e_0 : componente de secuencia cero de la tensión de alimentación de c.a. (la mayor parte proviene de los armónicos impares, múltiplos de tres de la saturación magnética)

u_0 : componente de secuencia cero de la tensión del VSC (la mayor parte proviene de las conmutaciones del PWM)

u_{div} : proyecciones de las tensiones desequilibradas del condensador en el lado de c.a.

R_{cc0} : resistencia equivalente de secuencia cero del lado de c.c.

L_{cc0} : inductancia equivalente de secuencia cero del lado de c.c.

C_{cc0} : capacidad equivalente de secuencia cero del lado de c.c.

Las relaciones (3) a (5) se cumplen cuando se usan parámetros concentrados independientes, sin acoplamiento mutuo

$$C_{cc0} = 4C_{cc} \quad (3)$$

$$R_{cc0} = 0.25R_{cc} \quad (4)$$

$$L_{cc0} = 0.25L_{cc} \quad (5)$$

B. Resonancia de secuencia cero

Puede aparecer un fenómeno de resonancia de las inductancias en el lado de c.a. con las capacitancias en el lado de c.c.

La frecuencia de resonancia de c.a. para las secuencias positiva y negativa se muestra en la ec (6).

$$\omega_a = \omega_c \pm \omega_0 \quad (6)$$

donde:

ω_c : frecuencia de c.c.

ω_0 : frecuencia de línea

La frecuencia de resonancia de c.a. para la secuencia cero es igual a la del lado de c.c.

Una resonancia entre las inductancias L_{ca0} y L_{cc0} y la capacidad C_{cc0} se atenúa en las resistencias R_{ca0} y R_{cc0} (Fig.6). La única posibilidad de efectos adversos proviene de las fuentes de ruido e_0 o u_0 , que tienen una componente de frecuencia que coincide con la frecuencia de resonancia. El factor de sobretensión puede ser elevado.

La tensión de divergencia u_{div} inicial se disipa en las resistencias R_{ca0} y R_{cc0} , pero las corrientes de descarga atenuadas pueden tener oscilaciones debido a las inductancias L_{ca0} y L_{cc0} .

Cuando hay sobretensiones en el lado de c.a. los transformadores se saturan, apareciendo armónicos de tensión impares múltiplos de tres, de secuencia cero, que se pueden tratar como e_0 . La operación del VSC sigue sin variar por la secuencia cero, debido a que la tensión entre polos es independiente de u_{div} . Los armónicos se puentean en el condensador C_{cc0} y se ahogan en la inductancia L_{cc0} , proporcionando un filtro de c.c. efectivo.

Cuando la corriente de secuencia cero en el lado de c.a. se debe reducir más, se puede conectar a tierra el neutro del transformador en el lado VSC a través de una resistencia no lineal.

Durante la operación normal, cuando la tensión en la resistencia es baja, la resistencia bloquea las corrientes de secuencia cero. En caso de falta, la tensión alta provoca que conduzca como una resistencia pequeña, de manera que el neutro esté puesto a tierra.

En general las corrientes de secuencia cero de la saturación del transformador no son grandes, salvo en el caso de amplificación por resonancia forzada (poco frecuente). En estos casos se puede actuar de varias maneras.

1) Modificar la frecuencia de resonancia

1.1) Cambiar el valor del condensador o de la inductancia para lograr que la frecuencia de resonancia no coincida con la frecuencia del ruido [4],[5]. Para que un circuito RLC no sea resonante se debe cumplir la ec. (7). Generalmente se incrementa la C del circuito.

$$C \geq 4 \frac{L}{R^2} \quad (7)$$

1.2) Cambiar el tipo de configuración del circuito.

La configuración se cambia de RLC a RL [4]. La capacidad de la puesta a tierra se puede desconectar por medio de un interruptor semiconductor o un pararrayos. (Fig.7).

a) Interruptor. Cuanto menor es el tiempo de detección de la falta y de cierre del interruptor, la sobretensión generada es menor, pero el coste es mayor.

b) Pararrayos. Cuando la R de tierra es pequeña, el efecto de la C de la línea es despreciable (incluso para líneas largas). Cuando la R de tierra es grande, el efecto de la C de la línea es mayor que el C de tierra. Es importante seleccionar un R adecuado que reduzca la sobretensión y la sobreintensidad.

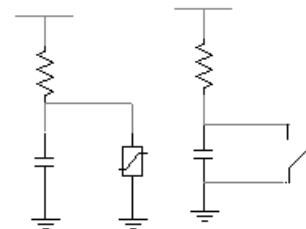


Fig. 7 Supresión de sobretensión mediante a) pararrayos b) interruptor

2) *Desacoplo Feedforward*. Las corrientes de fase siguen una referencia de corriente. Las tensiones a la entrada del filtro del VSC se miden y se usan como señal de alimentación positiva que se convierte en la señal de modulación. Las

tensiones de c.a. se pro-alimentan con la señal de modulación. Las componentes de secuencia cero de la tensión de c.a. cancelan la tensión de ruido del sistema de c.a., de manera que no hay posibilidad de entrar en resonancia. [4]

- 3) *Resistencia no lineal.* Se añade una resistencia no lineal entre el neutro del transformador (conectado en estrella) y tierra, incrementando R_{ca0} y reduciendo el factor de sobretensión [4].

7. Sistemas multiterminales de c.c.

Un sistema multiterminal de c.c. consiste en varios VSC conectados a una red de c.c. mediante sus terminales de c.c. (Fig.8). Los sistemas multiterminales son relevantes debido a que se asemejan a líneas de distribución. Además, se debe tener en cuenta que estos sistemas tienen una aplicación importante en la generación distribuída y las energías renovables.

Para conseguir que los sistemas multiterminales de c.c. sean competitivos se debe utilizar como criterio fundamental la reducción de costes. Las soluciones aportadas se tratan de ajustar a este criterio.

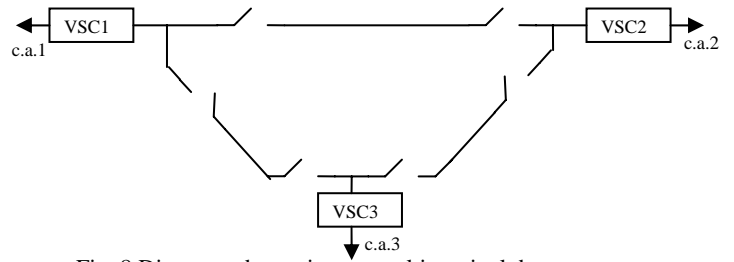


Fig. 8 Diagrama de un sistema multiterminal de c.c. con interruptores rápidos

A. Métodos para extinguir corrientes de falta

En los sistemas multiterminales es imprescindible aislar la línea con falta. Para ello, en primer lugar se debe identificar cual es la línea que presenta falta y en segundo lugar, se debe aislar. Se pueden utilizar los siguientes métodos para cortar las corrientes de falta.

- 1) *IA de c.c.* Se coloca un IA de c.c. en cada extremo de las líneas. Es la solución más cara.
- 2) *Interruptores rápidos de c.c. e IA de c.a.* Se colocan interruptores rápidos de c.c. en cada extremo de las líneas. La falta se interrumpe con los IA de c.a. y una vez eliminada, los

TABLA I Secuencia de protección

Acción	Método A	Método B
Detección de la falta, basado en medidas locales		
Bloqueo de los IGBT	Se bloquean los IGBT de los terminales y el IGBT-IA	
Selección de la línea con falta	Cada terminal determina la línea con falta en función de las formas de onda y abre el interruptor correspondiente a esa línea. Todas las terminales por turno alcanzan la condición de falta.	Todas las terminales seleccionan la línea que tiene falta en función de la amplitud y dirección de la intensidad
Extinción de la falta	La falta se extingue de forma natural ya que todos los caminos que pueden alimentarla están abiertos	Apertura del IA c.a.
Se espera a que la tensión e intensidad de la línea seleccionada caiga a cero		
Determinación de falta permanente o transitoria	Desbloqueo del IGBT-IA a ambos lados de la línea con falta - si la falta es transitoria la tensión de c.c. se recupera - si la falta es permanente la tensión cae a cero, los interruptores de c.c. se abren	- Apertura del interruptor de la línea seleccionada en el tercer paso (la línea que tiene la falta estará abierta en los dos extremos). Es necesario aislar la línea con falta ya que esta podría ser permanente - Se esperan unos ms, y se desbloquea el VSC para equilibrar las tensiones de c.c. a tierra positiva y negativa y se vuelve a bloquear el VSC. - Se cierra el IA c.a. - Se cierra el interruptor cuando la tensión a ambos lados del mismo alcance su valor prefijado
Desbloqueo de todos los VSC		

interruptores rápidos pueden abrir el circuito para aislar la línea de c.c. (Fig. 8). Es la solución más económica, pero debido a ello, el sistema sufrirá una pequeña interrupción del servicio mientras se activan los IA de c.a.

- 3) *Soluciones intermedias*. En sistemas grandes se pueden aislar diferentes subsistemas mediante IA de c.c.
- 4) *IA-IGBT*. Se puede sustituir el IA de c.c. por un IA-IGBT (Fig. 4).

B. Protección de sistemas multiterminales de c.c.

Como sistemas de protección, se presentan dos métodos, en el método A [6] cada terminal se protege con IA-IGBT y con interruptores rápidos. La corriente de falta se extingue cortando todas las fuentes que la puedan alimentar.

En el método B [7] se utilizan interruptores rápidos. La falta de c.c. se extingue con los interruptores de c.a. que están ya instalados en el lado de c.a. de los convertidores.

La tabla I establece los pasos para la implementación de la protección en caso de falta de c.c., para los dos métodos indicados.

El método A es sensible a la longitud y características de la línea, mientras que el método B es más robusto. Sin embargo, los dos métodos son adecuados para proteger los sistemas multiterminales contra faltas de c.c. Los sistemas multiterminales pueden sobrevivir a las faltas de c.c. utilizando interruptores rápidos para aislar las faltas.

Conclusiones

En esta comunicación se ha analizado el diferente comportamiento que presentan los sistemas tradicionales HVDC y los sistemas VSC ante faltas de c.c.. También se

ha analizado el problema de la resonancia en convertidores VSC. Se han presentado diferentes métodos para extinguir la corriente de falta, y soluciones para la sobretensión y sobreintensidad generadas en faltas de c.c.. Se ha incluido la aplicación para el caso de sistemas multiterminales

Tras el análisis realizado se puede concluir que los sistemas VSC pueden sobrevivir a faltas de c.c. Por todo ello, los sistemas VSC, tanto punto a punto como multiterminales, se podrán implementar en el futuro utilizando líneas aéreas.

Referencias

- [1] Jos Arrillaga, "High Voltage Direct Current Transmission", Ed. Peter Peregrinus, 1983. pp. 173-175.
- [2] "It's time to connect- Technical description of HVDC Light® technology" rev.5, 2008, ABB, www.abb.com/hvdc
- [3] M. Takasaki, N. Gibo, K. Takenaka, T. Hayashi, H. Konishi, S. Tanaka, H. Ito "Control and protection scheme of HVDC system with self-commutated converter in system fault conditions" IEE Japan, Vol.118-B No.12, Dec, 1998
- [4] N. Gibo, K. Takenaka, "Protection scheme of Voltage Sourced Converters based HVDC system under DC fault" Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002, Asia Pacific. IEEE/PES, 6-10 Oct. 2002
- [5] L. Tang, B.T Ooi, "Managing zero sequence in voltage source converter", Industry Applications Conference, 2002, 37rd IAS Annual Meeting, pp. 795 - 802
- [6] L. Tang, B.T Ooi, "Protection of VSC multi-terminal HVDC against DC faults", Power Electronics Specialists Conference, 2002, IEEE 33rd Annual, Vol. 2, pp. 719 - 724
- [7] L. Tang, B.T Ooi, "Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 22, No. 3, pp 1877-1883, July 2007.
- [8] M.E. Baran, N.R. Mahajan, "Overcurrent protection on Voltage Source Converters based multiterminal DC distribution system" ", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 22, No. 1, pp 406-411, January 2007