

OCW Integración de energías renovables en la red eléctrica

Generación renovable y corriente de cortocircuito

Pablo Ledesma

Índice

1. Conceptos de corriente y potencia de cortocircuito	1
2. Corriente de cortocircuito y protecciones	2
3. Cálculo de corrientes de cortocircuito en presencia de generación no síncrona	4

El efecto de los convertidores electrónicos sobre la corriente de cortocircuito es uno de los principales focos de atención de los operadores de sistema conforme aumenta la generación renovable no síncrona [1]. La corriente de cortocircuito en los nudos de la red eléctrica debe ser suficientemente elevada, estable y previsible para que actúen las protecciones y también suficientemente reducida para que los aparatos de corte puedan interrumpirla en caso de falta. El principal impacto de la generación renovable sobre la corriente de cortocircuito se produce a través de la detección y localización de las faltas por parte de las protecciones.

Este capítulo trata sobre los conceptos de corriente y potencia de cortocircuito en los sistemas eléctricos, sobre el potencial impacto de la generación renovable sobre los mismos y sobre los métodos de cálculo de la aportación de los parques eólicos y fotovoltaicos a la corriente de cortocircuito.

1. Conceptos de corriente y potencia de cortocircuito

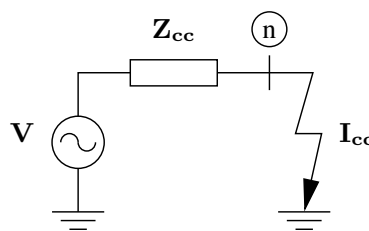


Figura 1: Cortocircuito franco trifásico equilibrado.

La corriente de cortocircuito en un nodo de la red eléctrica es la corriente que circula hacia la falta en dicho nodo en caso de una conexión accidental entre varios conductores o entre uno o varios conductores y tierra. Si el cortocircuito es equilibrado, lo cual ocurre cuando las tres fases se ponen en contacto de manera que se mantiene la simetría del circuito, se puede calcular la corriente de cortocircuito resolviendo el equivalente monofásico correspondiente. La figura 1 representa una red eléctrica vista desde el nudo n mediante su equivalente Thevenin, consistente en una fuente de tensión V detrás de una impedancia Z_{cc} . La corriente de cortocircuito trifásico franco¹ se calcula

¹Defecto franco: Conexión accidental, de impedancia despreciable, entre dos o más puntos con distinto potencial.

en por unidad como

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{cc}},$$

y tomando $V = 1$ tenemos

$$I_{cc} = \frac{1}{Z_{cc}}.$$

Las expresiones anteriores son en números reales porque en este caso nos interesa la magnitud de la corriente de cortocircuito, no el desfase. Sin embargo es interesante considerar que en redes de transporte la impedancia Z_{cc} es casi una reactancia porque, como se menciona en el tema 4, el efecto inductivo de líneas y transformadores tiene más peso que las pérdidas en la red. En estas condiciones I_{cc} , aunque sea elevada, es una corriente predominantemente inductiva y la fuente de tensión V apenas aporta potencia activa durante el cortocircuito.

La corriente de cortocircuito está ligada al concepto de *fortaleza* de una red a través del parámetro *potencia de cortocircuito*, que se calcula en por unidad como el producto de la corriente de cortocircuito y la tensión nominal

$$S_{cc} = VI_{cc} = \frac{V^2}{Z_{cc}}$$

y, considerando de nuevo que en por unidad $V = 1$,

$$S_{cc} = \frac{1}{Z_{cc}}.$$

Se dice que una red es *fuerte* en un nudo cuando la potencia de cortocircuito en dicho nudo es elevada, es decir el módulo de la impedancia Thevenin Z_{cc} es reducido. El concepto de fortaleza se refiere a que, en condiciones normales de funcionamiento, la tensión en un nudo *fuerte* es similar a la tensión interna de la red. Es posible inyectar o evacuar en el nudo una cantidad elevada de potencia activa o reactiva sin que ello afecte significativamente a su tensión. En términos de la figura 1, las tensiones en ambos lados de la rama Thevenin son parecidas porque la impedancia Z_{cc} es pequeña.

Por el contrario, se dice que una red es *débil* cuando la potencia de cortocircuito es reducida. En una red débil la inyección o el consumo de una cantidad de potencia relativamente pequeña provoca una gran variación en la tensión en el nudo de conexión. Para evaluar si una red es fuerte o débil en una instalación es frecuente calcular la relación entre la potencia de cortocircuito del nudo de conexión y la potencia nominal de la instalación. Si el ratio resultante es menor que 3 se suele decir que la red es débil, y si es menor que 2 que es muy débil. Un operador de sistema, por ejemplo, puede denegar el permiso de conexión de una instalación de 10 MVA en un nudo donde la potencia de cortocircuito es 20 MVA por considerar que el ratio de cortocircuito es solamente 2 y por tanto la red es demasiado débil en ese punto. Para aumentar la fortaleza de la red es necesario reducir la impedancia Z_{cc} , normalmente mediante la instalación de nuevas líneas o transformadores en paralelo.

2. Corriente de cortocircuito y protecciones

Un cortocircuito en una red eléctrica debe ser despejado rápidamente para asegurar un funcionamiento estable de la red. Para ello existen protecciones que detectan la falta y envían una orden de disparo a su correspondiente interruptor automático, que a su vez abre y aísla el elemento afectado por el cortocircuito. Los sistemas actuales de protección de las redes eléctricas están basados en la aportación desde los generadores síncronos de una corriente de cortocircuito hacia la falta, pero la contribución a la corriente de cortocircuito de un parque renovable con convertidores electrónicos puede ser muy diferente de la de un generador síncrono. En general, la corriente de cortocircuito de los convertidores se ve fuertemente afectada por su sistema de control.

Los cortocircuitos son inevitables y los elementos de la red donde suelen producirse son las líneas eléctricas, tanto por su extensión como por su exposición a una variedad de agentes causantes:

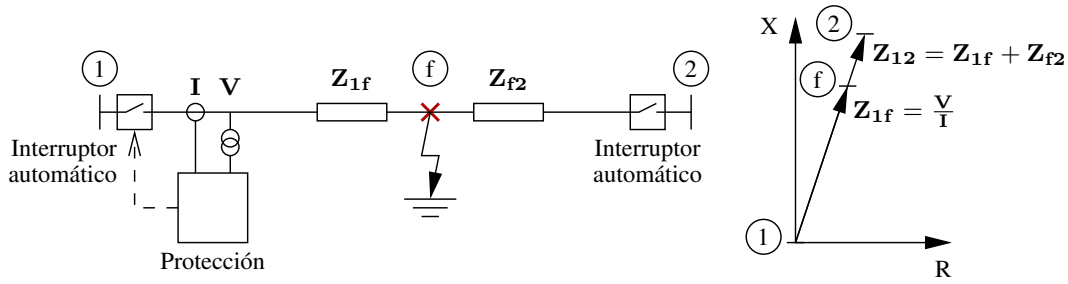


Figura 2: Principio de funcionamiento de una protección de distancia.

descargas atmosféricas, viento, hielo, vegetación, aves, etc. Los equipos que protegen las líneas se basan típicamente en los fasores de las variables eléctricas para deducir el tipo de falta que se ha producido y su localización. Por ejemplo, una de las protecciones más utilizadas en los sistemas eléctricos es la protección de distancia (código ANSI 21), cuyo funcionamiento básico se muestra en la figura 2. La protección mide los fasores de corriente I y tensión V en la cabecera de la línea del nudo 1, y calcula la impedancia $Z_{1f} = V/I$. En caso de producirse un cortocircuito directo en el punto f , la impedancia Z_{1f} toma un valor intermedio entre 0 y la impedancia de la línea Z_{12} , menor cuanto más cerca del nudo 1 se produce el cortocircuito y mayor cuanto más cerca del nudo 2. En función del valor calculado de Z_{1f} la lógica de la protección decide eventualmente que el cortocircuito se ha producido en su zona de actuación y manda la orden de apertura al interruptor de cabecera de la línea para aislar la falta.

Este principio de funcionamiento requiere la obtención de los fasores de tensión y corriente a partir de las medidas instantáneas, para lo cual es preciso disponer de unas variables eléctricas estables de forma sinusoidal. Durante una falta, los parques eólicos y fotovoltaicos pueden afectar en primer lugar a la magnitud de la corriente inyectada, y en segundo lugar a la estabilidad y forma de onda de la corriente.

El efecto de la generación eólica y fotovoltaica sobre la actuación de las protecciones es complejo porque depende del tipo de generador, de la protección considerada, del control del convertidor y de la velocidad de dicho control. Se trata de un campo en evolución conforme las protecciones y el control de los convertidores se adaptan a una penetración creciente de recursos conectados mediante semiconductores, en el que se identifican los siguientes problemas:

Rapidez del control. Dependiendo del tipo de control, el establecimiento de un cortocircuito en las proximidades de un convertidor puede provocar un periodo transitorio con una duración típica de entre 40 y 60 ms. Durante este periodo la corriente aportada por el convertidor es impredecible y no sinusoidal, por lo que las protecciones tienen dificultades para calcular los fasores que necesitan para actuar correctamente.

Secuencia negativa de corriente de cortocircuito. Las faltas desequilibradas provocan un reparto asimétrico de las corrientes y tensiones en las tres fases de la red. Las variables eléctricas desequilibradas se descomponen en una componente en secuencia positiva, otra en secuencia negativa y otra en secuencia homopolar². El control de algunos convertidores electrónicos suprime la componente negativa, lo cual afecta a la corriente de cortocircuito sobre todo en el caso de faltas fase-fase. En cualquier caso es posible adaptar el control de los convertidores para que aporten corriente de secuencia negativa si el código de red así lo requiere.

Actuación de la protección crowbar. Las turbinas eólicas con generadores asíncronos doblemente alimentados aplican una protección en el devanado del rotor que limita la corriente en

²Si en una secuencia positiva de variables eléctricas sinusoidales en las fases a, b y c el orden es abc, en la secuencia negativa el orden es acb y en la secuencia homopolar las tres variables están en fase. El análisis de faltas desequilibradas mediante sus componentes simétricas queda fuera del alcance de este texto, pero puede consultarse en [2].

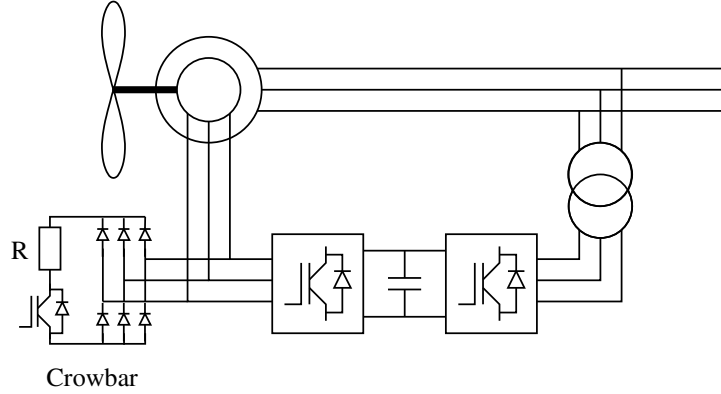


Figura 3: Generador asíncrono doblemente alimentado con protección de crowbar activo.

el convertidor del lado del rotor para evitar el sobrecalentamiento de los semiconductores. La figura 3 muestra una protección de este tipo en un aerogenerador. En caso de cortocircuito, la corriente puede crecer en el rotor debido al acoplamiento magnético entre el rotor y el estator, y el control del crowbar proporciona rápidamente un camino alternativo para la corriente evitando que pase por los semiconductores. En caso de cortocircuito en las proximidades del parque eólico, pueden ocurrir tres cosas:

1. La protección de crowbar no llega a activarse, en cuyo caso la corriente de cortocircuito queda determinada por el control del convertidor.
2. La protección de crowbar cortocircuita el devanado del rotor, en cuyo caso la contribución a la corriente de cortocircuito es similar a la de un generador de inducción.
3. La protección de crowbar se activa y desactiva repetidamente, provocando ondas de corriente no sinusoidales e imprevisibles. En este caso dificulta el cálculo de los fasores de corriente y tensión por parte de las protecciones.

Para más información sobre el efecto de los parques conectados mediante convertidores sobre la corriente de cortocircuito puede consultarse el documento [1] de ENTSO-E.

3. Cálculo de corrientes de cortocircuito en presencia de generación no síncrona

El cálculo sistemático de las corrientes de cortocircuito en un sistema eléctrico con generadores síncronos es un problema clásico que se resuelve empleando la matriz de impedancias del sistema y el principio de superposición. La explicación del método queda fuera del alcance de este texto y puede consultarse en [2], pero aquí hacemos una breve introducción para el caso de un cortocircuito trifásico franco. Supongamos que en el nudo f donde aplicamos el cortocircuito la tensión antes de la falta es $\mathbf{V}_f$. Entre dicho nudo y tierra conectamos en serie una fuente de tensión de valor $\mathbf{V}_f$ y otra de valor $-\mathbf{V}_f$. Como ambas fuentes suman una tensión cero, su conexión equivale al establecimiento del cortocircuito. El efecto de ambas fuentes se calcula por separado, aplicando el principio de superposición. El circuito con la fuente de valor $\mathbf{V}_f$ y las fuentes de tensión internas de los generadores síncronos representan el estado antes de la falta, que se resuelve mediante un flujo de cargas convencional. El circuito con la fuente de valor $-\mathbf{V}_f$ es la responsable de la aparición de la corriente de cortocircuito $\mathbf{I}_f$ y de unas *variaciones* de tensión $\Delta\mathbf{V}_i$ en el resto de los nudos,

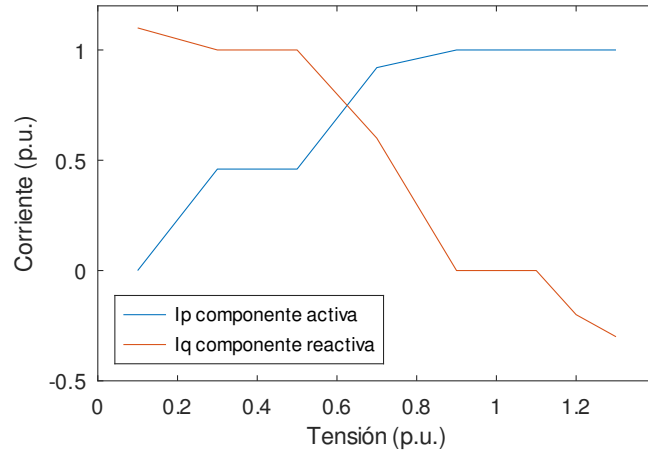


Figura 4: Característica tensión-corriente en caso de falta trifásica.

de forma que podemos aplicar la matriz de impedancias $[Z]$ y escribir

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ -V_f \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1f} & \dots & Z_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{f1} & \dots & Z_{ff} & \dots & Z_{fn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nf} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I_f \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Operando podemos calcular la corriente de cortocircuito como

$$I_f = -\frac{V_f}{Z_{ff}},$$

donde Z_{ff} es precisamente la impedancia de cortocircuito en el nudo f representada en la figura 1. Una vez calculada la corriente de cortocircuito es posible calcular la variación de tensión en cada nudo como

$$\Delta V_i = Z_{if} I_f.$$

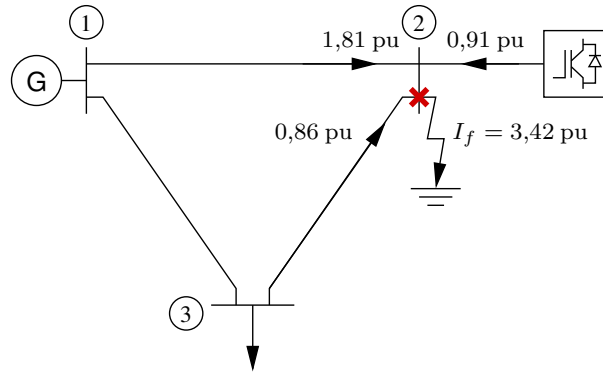
Estas variaciones de tensión, sumadas a las tensiones antes de la falta, nos proporcionan las tensiones durante la falta en todos los nudos. A partir de ellas es sencillo calcular la circulación de corriente por cualquier rama del circuito durante el cortocircuito.

Para resolver cortocircuitos desequilibrados se aplican la teoría de componentes simétricas y se extienden los cálculos anteriores a las matrices de impedancias de secuencia inversa y homopolar. Los programas comerciales de análisis de sistemas eléctricos en fasores realizan estos cálculos de manera automática.

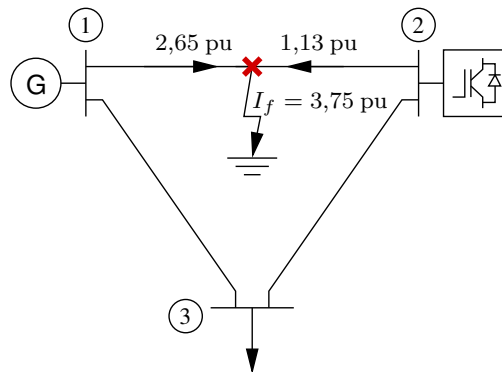
Convertidores electrónicos

El método de cálculo de corrientes de cortocircuito descrito anteriormente se modifica para representar los convertidores electrónicos con control de corriente como fuentes de corriente en secuencia directa. Cuando se estudian cortocircuitos desequilibrados, si el control del convertidor aporta corriente de secuencia inversa se aplica una fuente de corriente en el circuito de secuencia inversa, en caso contrario el equivalente de secuencia inversa del convertidor es un circuito abierto.

La corriente inyectada por el convertidor durante el cortocircuito depende del control y del límite de corriente que protege a los semiconductores. Es frecuente que los códigos de red impongan



(a) Cortocircuito franco trifásico en la barra 2.



(b) Cortocircuito franco trifásico en mitad de la línea 1-2.

Figura 5: Ejemplos de corriente de cortocircuito en presencia de un parque conectado mediante un convertidor.

durante las faltas una característica tensión-corriente que aporte potencia reactiva para ayudar a mantener la tensión aún a costa de sacrificar la potencia activa disponible. La figura 4 es un ejemplo de dicho requerimiento, que puede interpretarse de la siguiente forma:

- Alrededor de $V = 1$ pu, exactamente entre $V = 0,9$ y $V = 1,1$, existe una banda muerta de regulación. No se requiere una componente reactiva de la corriente, por lo que $I_q = 0$. Todo el margen de corriente está disponible para la aportación de potencia activa, por lo que $I_p = 1$.
- Por debajo de $V = 0,9$ pu se requiere al convertidor un aporte creciente de corriente reactiva para ayudar al soporte de tensión. En el extremo, cuando la tensión baja hasta $V = 0,1$ pu, la componente reactiva de la corriente del convertidor debe alcanzar 1,1 pu. Conforme aumenta la componente reactiva, en rojo en la figura, disminuye la componente activa, en azul, para que la magnitud de la corriente no supere 1,1 pu.
- Por encima de $V = 1,1$ pu se requiere al convertidor un consumo de potencia reactiva para ayudar a reducir la tensión, hasta un máximo de $I_q = -0,3$ pu cuando la tensión alcanza 1,3 pu.

La figura 5 muestra dos ejemplos de cálculo de corriente de cortocircuito trifásico franco en el sistema de tres nudos del tema anterior, uno correspondiente a una falta en el propio nudo de conexión del parque y otro a una falta en mitad de una línea. Los cortocircuitos trifásicos equilibrados son poco frecuentes en comparación, por ejemplo, con las faltas fase-tierra, pero

son sencillos de analizar porque sólo contienen la componente directa de las variables eléctricas y proporcionan una información valiosa para determinar el poder de corte de los interruptores automáticos a instalar en el sistema.

El convertidor conectado en el nudo 2 puede representar un parque generador u otro dispositivo, por ejemplo el terminal de una línea de corriente continua. La aportación de corriente por parte del convertidor está limitada a 1,1 por unidad para proteger a los semiconductores y sigue la característica tensión-corriente representada en la figura 4.

El caso de la figura 5 a) representa un cortocircuito en los terminales del convertidor electrónico. El grado de carga del parque antes de la falta es

$$K_l = \frac{\text{produccion}}{\text{potencia nominal}} = \frac{60 \text{ MW}}{100 \text{ MVA}} = 0,6.$$

La tensión en el convertidor cae a cero porque la falta se produce en el nudo de conexión, por lo que la componente reactiva de la corriente según la figura 4 es

$$I_q = 1,1K_l = 0,66 \text{ pu.}$$

La componente activa de la corriente de falta es la corriente activa antes de la falta:

$$I_d = \frac{P_2}{V_2} = \frac{0,66 \text{ pu}}{0,96 \text{ pu}} = 0,62 \text{ pu.}$$

La aportación de corriente total del convertidor es

$$I_{fconv} = |0,66 + j0,62| = 0,91 \text{ pu.}$$

La corriente no alcanza el máximo de 1,1 pu, por lo que no es necesario limitarla. Si fuese necesario, la componente reactiva de la corriente tendría prioridad.

La figura 4 muestra únicamente la magnitud de las corrientes, que es el valor más relevante para elegir la capacidad de corte de los interruptores automáticos asociados a las protecciones, pero la suma de las corrientes complejas en el nudo 2 es naturalmente cero. La corriente total de cortocircuito, $I_f = 3,42 \text{ pu}$, puede tomarse como base para elegir el interruptor que proteja a una instalación conectada al nudo 2³. Como puede observarse, la aportación de corriente del convertidor electrónico, I_{fconv} , a la corriente I_f es significativamente menor que la aportación del generador síncrono a través de los caminos 1-2 y 1-3-2.

La figura 5 b) muestra las corrientes de cortocircuito en caso de una falta en el centro de la línea 1-2. El cálculo de la aportación de la corriente de cortocircuito por parte del convertidor se realiza de manera similar al caso anterior, si bien en este caso la aportación de corriente reactiva es menor porque la tensión en el nudo 2 no cae hasta cero. En este caso, las corrientes de valor 2,65 y 1,13 pu son las que deberían interrumpir los interruptores automáticos en las correspondientes cabeceras de la línea en caso de producirse esta falta. Como puede observarse, la aportación de corriente desde el lado del generador síncrono es de nuevo significativamente mayor que desde el lado del convertidor electrónico.

Referencias

- [1] ENTSO-E, “Short circuit contribution of new generating units connected with power electronics and protection behaviour,” tech. rep., ENTSO-E European Network of Transmission System Operators for Electricity, 2019.
- [2] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Análisis de sistemas de potencia*. McGraw-Hill, 1996.

³En tal caso sería necesario tener en cuenta que, en función del régimen de neutro, es posible que un cortocircuito fase-tierra provoque una corriente de cortocircuito en la fase afectada algo superior a la de un cortocircuito trifásico. Como se ha indicado, el cálculo de cortocircuitos desequilibrados queda fuera del alcance de este texto.