

ACGEF: Análisis de cortocircuitos en generadores eólicos y fotovoltaicos

Alejandro Maldonado, Conrado Silveira, Federico Esteve
 Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República
 Montevideo, Uruguay

maldonadoale4@gmail.com, conrasa.12@gmail.com, fedeesteve1985@gmail.com

Resumen—El presente estudio realiza un análisis comparativo entre las corrientes de cortocircuito aportadas por distintos generadores eléctricos, así como sus consecuencias en la red eléctrica. La norma internacional IEC-60909 [1] se utiliza como guía del trabajo propuesto, donde se centrará en el generador síncrono, fotovoltaico y los aerogeneradores full-converter y DFIG.

Index Terms—generador síncrono, aerogenerador, fotovoltaico, inversor, cortocircuito, IEC-60909.

I. INTRODUCCIÓN

Los cortocircuitos son situaciones anómalas de la red eléctrica, donde sus componentes se ven sometidos a estrés eléctrico, mecánico y térmico. Determinar el andamio de las corrientes de cortocircuito adquiere diferentes aplicaciones, en [1] se indica que se puede dimensionar el equipamiento y ajustar el sistema de protecciones.

Los generadores síncronos pueden definirse como “convencionales” debido a su extendido uso en la generación de energía eléctrica. En las últimas décadas las fuentes de energías “alternativas” comenzaron a adquirir mayor preponderancia en la matriz energética. Implicando que el operador de red defina nuevas reglamentaciones “grid codes”.

El aumento de la demanda energética cubierta por los generadores “alternativos”, en conjunto con los “grid code”, son factores que modifican el andamio de las corrientes de cortocircuitos en la red. Por lo que resulta de interés analizar las diferencias entre las corrientes aportadas por cada generador desde el punto de vista de la red y cuales son sus consecuencias.

Desde el punto de vista de la red, se realiza un estudio comparativo entre las corrientes de cortocircuito aportadas por el generador síncrono, fotovoltaicos y los aerogeneradores full-converter y DFIG. Además de las consecuencias que tienen en la misma.

II. CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN EL GENERADOR SÍNCRONO

El generador síncrono utiliza el fenómeno del campo magnético giratorio para transmitir potencia eléctrica hacia la red. Desde el punto de vista de la red, el generador es visualizado como una impedancia inductiva previo al cortocircuito. En el instante de la falta, los campos magnéticos presentes en la máquina deben mantenerse continuos y asumiendo linealidad también lo hacen las corrientes inducidas por los mismos.

Quiere decir que conociendo el comportamiento de los campos magnéticos giratorios dentro de la máquina, puede deducirse la corriente de cortocircuito inyectada en la red. La corriente consta de dos componentes:

- Componente continua I_{DC} .
- Componente alterna simétrica I_{as} .

Planteando un modelo de variable de estado lineal de la máquina síncrona, su solución homogénea representaría la componente continua y la particular la alterna simétrica. Significa que la componente continua es el comportamiento de los flujos naturales dentro de la máquina y tiene el objetivo de mantener la continuidad del campo en el instante de falta. Por otra parte la componente de alterna representa los flujos forzados o la respuesta de la máquina al cortocircuito.

Para el caso de I_{as} , el generador no puede modelarse como una impedancia de valor fijo. Debido a la interacción del devanado amortiguador y la dinámica del devanado rotórico.

Mediante [1] se determinan tres períodos de tiempo: subtransitorio, transitorio y régimen. Durante el subtransitorio todos los devanados aportan a la corriente. El período dura hasta que se mitigue el aporte de la rama de amortiguador. Luego comienza el período transitorio hasta que el aporte del rotor permanezca invariante. Finalizando se llega al régimen permanente de cortocircuito.

En la figura 1 se representa el equivalente de Thevenin del generador durante los diferentes períodos de tiempo.

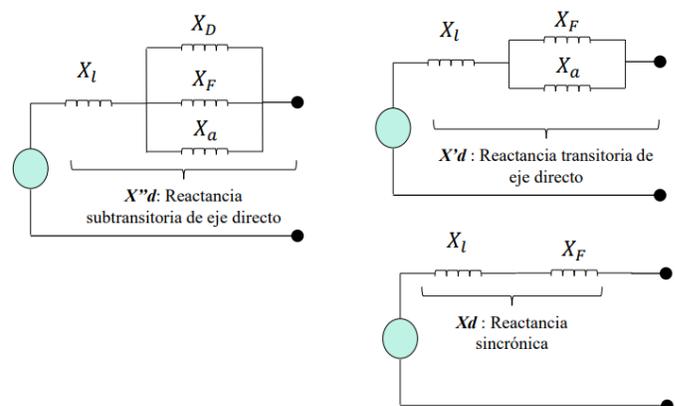


Figura 1. Equivalente de Thevenin en cada período,[3]

Las reactancias de la figura 1 son las siguientes:

- X_l representa la autoinducción del estator
- X_F representa la mutua que existe entre estator y rotor.
- X_D respresenta la autoinducción del devanado amortiguador
- X_a representa la autoinducción del devanado de rotor.

Cada período se representa con una reactancia y una fuente de tensión equivalente. Asumiendo que en el instante de falta todos los devanados aportan corriente, la impedancia vista es X_d'' y la tensión interna queda determinada por el punto de operación previo a la falta. La corriente I_d'' es la corriente subtransitoria que es el valor eficaz inicial de la corriente I_{as} . La corriente transitoria I_d' se razona de igual forma, pero sin considerar el devanado amortiguador. Finalizando la corriente I_{ccp} es la corriente de cortocircuito permanente y es la corriente a tiempo infinito (no se despeja la falta).

Además, el pasaje de un período a otro debe ser continuo y se considera que el valor eficaz de I_{as} decrece exponencialmente. Las constantes de tiempo asociadas a cada período τ_d'' y τ_d' son datos del fabricante. El valor eficaz de la alterna simétrica se determina según la ecuación 1.

$$I_{as,eff}(t) = (I_d'' - I_d')e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + (I_d' - I_{ccp})e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_{ccp} \quad (1)$$

La fase se determina en función de la fase de la tensión interna en el instante de falta. La corriente se la asume directa porque se considera que la red puramente inductiva y esta en cuadratura con la tensión interna (eje q). En la ecuación 2 se representa la corriente I_{as} de la fase A de estator. Para las fases restantes se utiliza el desfase $\pm \frac{2\pi}{3}$ correspondiente.

$$I_{as}(t) = \sqrt{2}I_{as,eff}\cos(\omega t + \angle E - \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

La componente continua representa el campo magnético previo dentro del generador, este decrece exponencialmente y debe mantenerse continuo en el instante de falta. La componente continua I_{DC} se representa en la ecuación 3.

$$I_{DC} = I_{u0}e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (3)$$

La constante de tiempo τ_i depende de los parámetros de fabricante y la corriente I_{u0} satisface la corriente previa al cortocircuito. La onda típica de cortocircuito de un generador síncrono se muestra en la figura 2.

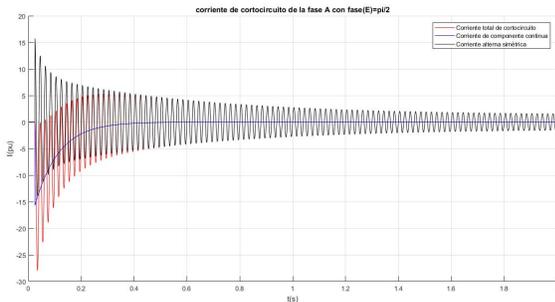


Figura 2. Circuito de cortocircuito de un generador síncrono

III. CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN EL DFIG

Para el caso del DFIG, el análisis es similar aunque se debe considerar el efecto del convertidor back-to-back. Al igual que para el generador síncrono, el flujo magnético (o campo magnético) se conserva en el instante de falta, generando una componente continua y una alterna. La corriente de estator se determina por medio del circuito magnético de la máquina según la ecuación 4.

$$\overline{I_s}(t) = \frac{\overline{\Phi_s}}{L'_s} - k_r \frac{\overline{\Phi_r}}{L'_r} \quad (4)$$

Los flujos $\overline{\Phi_s}$ y $\overline{\Phi_r}$ son de estator y rotor respectivamente. El factor k_r y las autoinductancias L'_s y L'_r se deducen de los datos de fabricante.

Para mantener la continuidad del flujo de estator, aparece un flujo natural fijo respecto al estator que decrece exponencialmente con la constante τ'_s . Para mantener la continuidad del flujo de rotor, aparece un flujo natural que decrece exponencialmente según τ'_r , que es fijo respecto al rotor y gira a ω_m (frecuencia mecánica) respecto al estator. La frecuencia ω_m puede diferir de ω_s (frecuencia de red) hasta un 30 % en función del deslizamiento previo. Adicionalmente el convertidor del lado del rotor es considerado como una fuente independiente de la red que introduce un flujo forzado. Este flujo induce en el estator una corriente de frecuencia ω_s .

En el estator existen tres corrientes diferentes actuando al mismo tiempo, descomponiendo en coordenadas de fase se tiene una exponencial decreciente, una senoide de frecuencia ω_m que decrece exponencialmente y una senoide de frecuencia ω_s impuesta por el convertidor.

Durante el transitorio se asume que el flujo natural es predominante y la corriente es determinada solo por el estator. Una vez mitigado el flujo natural se alcanza el régimen y se puede considerar que la corriente es determinada por el convertidor tanto del lado de la red como del rotor. En la ecuación 5 se muestra el vector de corriente de estator que induce el flujo natural. Para el flujo forzado impuesto por el convertidor del lado del rotor no hay una expresión exacta.

$$\overline{I_{CC}}(t) = \frac{\overline{\Phi_s}(0^-)}{L'_s} e^{-\frac{t}{\tau'_s}} + k_r \frac{\overline{\Phi_r}(0^-)}{L'_r} e^{-\frac{t}{\tau'_r}} e^{j\omega_m t} \quad (5)$$

En la figura 3 se muestra la corriente de cortocircuito típica de un DFIG.

El inconveniente de utilizar convertidores o dispositivos electrónicos es su sensibilidad a sobretensiones o sobrecorrientes. Por ello se implementa la protección de chopper y crowbar. El chopper conecta una resistencia en paralelo al convertidor del lado de continua y limita la tensión del DC-link. El crowbar protege al convertidor del lado del rotor contra sobretensiones que pueden ser inducidas durante el cortocircuito. Estas sobretensiones pueden alcanzar valores de hasta cinco o siete veces la tensión en condiciones nominales.

El crowbar también reduce la constante de tiempo τ'_r . En general se elige la resistencia de crowbar al menos treinta veces mas grande que la resistencia rotórica y en tal caso la constante se reduce en igual proporción. Por lo que el flujo natural del rotor en general dura unos pocos ciclos. En

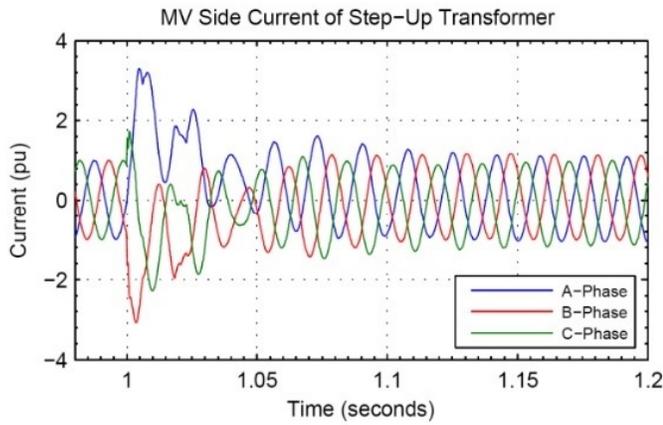


Figura 3. Corriente de cortocircuito de un generador DFIG.[2]

la ecuación 6 se muestra la constante de tiempo según la resistencia de crowbar R_{cb} .

$$\tau'_r = \frac{L'_r}{R_r + R_{cb}} \quad (6)$$

IV. CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN LOS GENERADORES FULL CONVERTER Y FOTOVOLTAICO

Estos generadores se estudian en conjunto debido a que el aporte de corriente a un cortocircuito está determinada en ambos casos por la respuesta del inversor que conecta el generador a la red. Un modelo genérico del circuito en este caso es el de la figura 4.

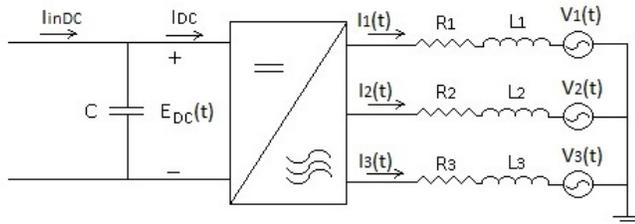


Figura 4. Esquema de un inversor conectado a la red

Los voltajes $V_1(t)$, $V_2(t)$ y $V_3(t)$ dependen del tipo de falta y corresponden al voltaje residual de fase visto desde el generador, teniendo en cuenta el grupo de conexión del transformador de la unidad generadora y de la estación en el punto de conexión. Las impedancias R_i y L_i son las impedancias vistas por fase, que corresponden a las impedancias de las líneas del parque, de los transformadores y la impedancia de cortocircuito de la red del punto de conexión en el estado de falta.

La respuesta dinámica de la corriente se divide en dos períodos: transitorio y régimen.

En el momento que ocurre el cortocircuito la tensión de red cae a un valor residual que depende de la distancia al punto del cortocircuito.

La forma de onda de corriente $I_i(t)$ ($i=1,2,3$) saliente del convertidor depende de la relación $\frac{L_i}{R_i}$ vista hacia la red, de la tensión residual V_i , de la topología y cantidad de estados del inversor así como la operación de sus llaves bajo la consigna de potencia previa al cortocircuito. El efecto del filtro a la salida del inversor y las inductancias mútuas del transformador introducen aún más complejidad al análisis dinámico desde la perspectiva de encontrar una solución analítica para la corriente.

No obstante, existen retrasos entre la consigna de potencia previo a la falta y la nueva. En el momento que la tensión cae bruscamente, como el generador intenta inyectar la misma potencia, las corrientes de referencia del inversor comienzan a aumentar. En consecuencia, las corrientes de fase intentaran seguir la referencia hasta valores muy por encima de las corrientes de operación normal.

Luego de que el control de modulación comienza a establecer la nueva consigna. La corriente puede permanecer en un valor superior al nominal por un tiempo limitado, de forma que los componentes no sufran estrés térmico. Finalmente, la corriente pasa al estado de régimen, con un valor RMS dentro de los límites de operación del inversor.

En la figura 5 se puede ver la forma de onda típica de corriente de un aerogenerador full converter obtenida de una simulación en [2].

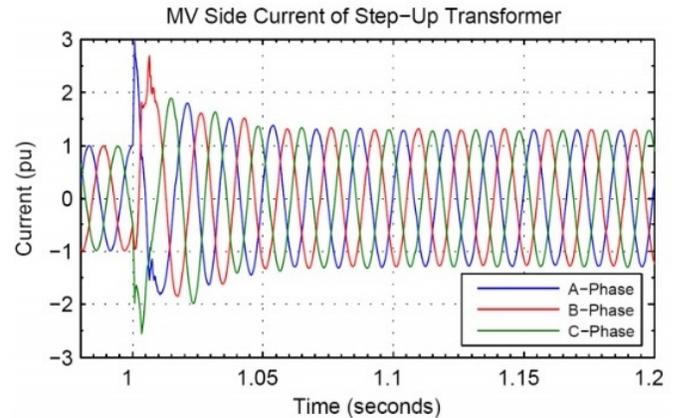


Figura 5. Corriente de cortocircuito de un generador full converter.[2]

V. ESTUDIO DE LA NORMA IEC 60909

Cada generador se estudió individualmente y su incorporación en una red genérica puede verse en la figura 6.

Para poder analizar las corrientes de cortocircuito en el punto F se establece una forma de corriente típica según la figura 7.

Las curvas presentadas se basan en el comportamiento del generador síncrono y las corrientes de los generadores alternativos se caracterizan según los parámetros de esta forma de onda. Los parámetros de la curva son:

- I''_k [A]: corriente simétrica inicial o subtransitorio.
- i_p [A]: corriente de pico.
- i_{DC} [A]: corriente de componente continua.

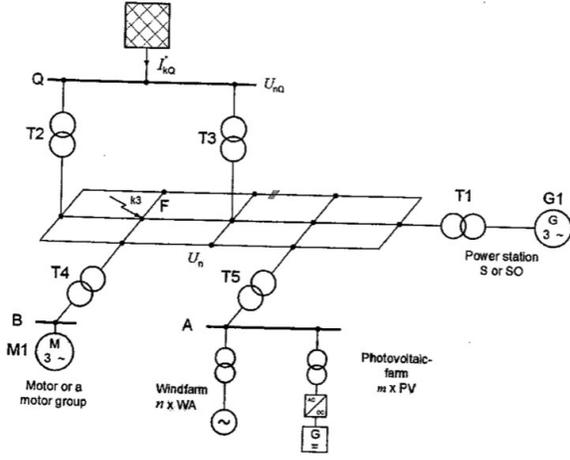


Figura 6. Cortocircuito en una red genérica,[1]

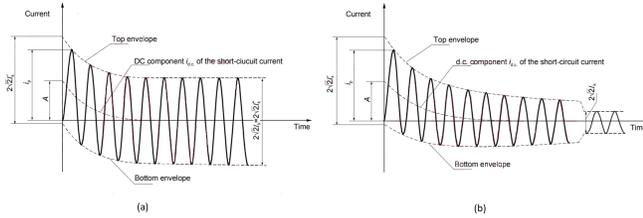


Figura 7. Curva de cortocircuito típica,[1]

- $A[A]$: valor inicial de la corriente i_{DC} .
- $I_k[A]$: corriente de régimen de cortocircuito.

La corriente de cortocircuito depende de las condiciones previas de la red, como los desbalances de tensión o la consigna de potencia de cada generador. Entonces dentro de los posibles cortocircuitos se distinguen los máximos y mínimos.

V-A. Corriente subtransitoria

Para el cálculo de la corriente de subtransitoria, se realiza un modelo de impedancias de red y se sustituye el cortocircuito por una fuente equivalente. La fuente equivalente vale $\frac{cU_n}{\sqrt{3}}$, donde el factor c representa los desbalances que se producen en la red, maximizando o minimizando la corriente de cortocircuito.

El generador síncrono y el DFIG tienen un comportamiento similar durante el transitorio debido a la existencia del flujo natural. El generador síncrono se sustituye por su impedancia subtransitoria $R_a + X_d''$ y el DFIG por una impedancia Z_{WD} . Esta última no solo depende de sus inductancias, sino que también existe el efecto de las protecciones del convertidor. Por lo tanto la impedancia se define contemplando la electrónica involucrada y sus protecciones según la ecuación 7.

$$Z_{WD} = \frac{ci_{WDmax}}{\sqrt{2}U_{rHV}} \quad (7)$$

La corriente i_{WDmax} es el pico de la corriente de un cortocircuito trifásico máximo y el factor k_{WD} tiene en cuenta la actuación de las protecciones chopper y crowbar.

Utilizar una fuente equivalente en el punto de falta induce un error en el cálculo y por esta razón se aplican factores de corrección K a cada impedancia según el caso.

Los generadores Full converter y fotovoltaico tienen fuentes de energía diferentes, pero intercambian la potencia con la red por medio del inversor. Por lo que desde el punto de vista de la red se los analiza de igual forma. Los dispositivos de electrónica de potencia son sensibles a las sobrecorrientes y sobretensiones. Por lo que el fabricante aporta la corriente máxima que puede circular por estos sin que se dañen o destruyan. En la norma se los modela como fuentes de corrientes independientes I_{skPFi} cuyo valor depende del fabricante. En general el aporte de este tipo de generador es menor al de un generador síncrono o DFIG.

La corriente total de cortocircuito puede calcularse aplicando superposición, considerando una única fuente de tensión y las n fuentes de corrientes por separado. La fuente de tensión ve una impedancia Z_k . Las corrientes que aporta cada inversor se calcula de forma independiente mediante un divisor de corriente entre Z_k y la impedancia desde el inversor hasta la falta Z_{ij} . Para un cortocircuito trifásico la corriente de cortocircuito se calcula por medio de la ecuación 8.

$$I''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} + \frac{1}{Z_k} \sum_{i=1}^{i=n} Z_{ij} I_{skPFi} \quad (8)$$

Se considera que el cortocircuito es máximo cuando c es máximo, se introducen los factores K correctivos y los generadores conectados por inversor son tomados en cuenta si al considerarlos aportan más del 5% de la corriente de cortocircuito. Cuando sea mínimo el factor c es mínimo, los factores K no se aplican y los generadores conectados por inversor no son tenidos en cuenta.

Para los cortocircuitos asimétricos se aplicarán las componentes simétricas (Teorema de Fortescue).

Para la secuencia directa, se utilizan los modelos señales en el cortocircuito trifásico.

Para la secuencia inversa, el generador síncrono utiliza la reactancia de secuencia inversa X_i y es dato de fabricante. Para el DFIG es más complejo debido al comportamiento del convertidor ante faltas asimétricas. La red de secuencia negativa impone un flujo inverso en el estator que gira a $-\omega_s$ y algunos generadores lo contrarrestan inyectando una corriente desmagnetizante de secuencia inversa. Esta corriente induce un flujo magnético opuesto al de estator y reduce el flujo negativo impuesto por la red. Entonces el comportamiento del generador depende estrictamente del control del convertidor del lado del rotor. Los generadores conectados por inversor dependen estrictamente del control del convertidor.

La red de secuencia cero queda determinada por el transformador que conecta el generador con la red. En general este es DYn, con la estrella aterrada del lado de la red.

Con las redes de secuencia determinadas se utilizan las fórmulas de cortocircuito correspondiente a cada tipo de falta.

V-B. Corriente continua

La corriente i_{DC} solo es aplicable al DFIG y generador síncrono, ya que los generadores conectados a la red por un inversor no tienen flujo magnético interno que deba conservarse.

En los DFIG y generadores síncronos, el valor A se asocia a la continuidad del flujo magnético en el instante de falta. La componente es una exponencial decreciente, donde su valor inicial máximo $A = \sqrt{2}I''_k$ depende de la condición de operación previa y de la corriente alterna simétrica. La constante de tiempo depende de un cociente $\frac{R}{X}$.

Existen distintos métodos para determinar el cociente $\frac{R}{X}$, cada uno de ellos conlleva a errores de precisión y en la norma se sugiere aplicar el método de la frecuencia equivalente. Este método consiste en calcular la impedancia Z_k para una frecuencia f_c según la tabla I. Luego el cociente se determina según la ecuación 9.

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c f_c}{X_c f} \quad (9)$$

$\frac{ft}{f_c}$	<1	<2.5	<5	<12.5
$\frac{ft}{f}$	0.27	0.15	0.092	0.055

Cuadro I

TABLA PARA CALCULAR EL COCIENTE DE FRECUENCIAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

V-C. Corriente de pico

La corriente de pico depende de la componente alterna simétrica y de la componente continua simultáneamente. Tanto en magnitud como en las constantes de tiempo involucradas. Se parametriza la corriente i_p según la ecuación 10.

$$\begin{aligned} i_p &= \sqrt{2k}I''_k \\ k &= 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} \end{aligned} \quad (10)$$

El cociente $\frac{R}{X}$ se determina por el método de frecuencia equivalente con $f_c = 20Hz$. El aumento del cociente (R aumenta) disminuye la constante de tiempo e implica que se tiene un efecto amortiguador en i_p . Cuando la resistencia es mínima la corriente alcanza su valor máximo $i_{pmax} = 2\sqrt{2}I''_k$. En resumen, desde el punto de falta, cuanto más inductiva sea la red mayor es el pico de cortocircuito.

Los generadores conectados por inversor no tienen componente continua. Por tanto, la corriente de pico no supera su corriente máxima definida $\sqrt{2}I_{skPFj}$ y su factor k es 1.

V-D. Corriente de régimen

Para la corriente de régimen I_k máxima se debe introducir el concepto de la corriente de break I_b . Es la corriente eficaz para la cual comienza a abrirse el primer polo del interruptor, con el fin de despejar la falta. En general las protecciones actúan antes de que las corrientes de falta alcancen el régimen. Por lo que la corriente I_k máxima es determinada por la corriente de break.

El generador DFIG mitiga su flujo natural y el convertidor determina la corriente de régimen. Es igual al caso del generador conectado por inversor y se lo modela como una fuente de

corriente. Este valor es proporcionado por el fabricante para el cortocircuito máximo y mínimo. El generador conectado por inversor mantiene el mismo modelo que para el cálculo de I''_k .

Por lo que en el caso de un cortocircuito mínimo se lo calcula según la ecuación 8, considerando solamente la impedancia de los generadores síncronos X_d .

VI. CONSECUENCIAS EN COMPONENTES DE LA RED

La norma [1] define la corriente térmica I_{th} en el sistema de ecuaciones 11.

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = (I''_k)^2(m+n) = I_{th}^2 T_k \quad (11)$$

$$I_{th} = I''_k \sqrt{m+n}$$

Donde I''_k es la corriente simétrica inicial de cortocircuito ya definida, m es el factor de calentamiento por la componente i_{DC} , n es el factor de calentamiento por la componente alterna y T_k es el tiempo de duración de la corriente de cortocircuito.

En [1] se determinan la utilidad práctica de las corrientes calculadas, según la tabla II.

Corrientes de cortocircuito	Equipamiento	Corrientes relevantes		
		3F	FF	FT
Corrientes máximas				
estrés:				
- dinámico	Componentes de las instalaciones	i_p	i_p	-
- Apertura	Interruptores.	i_p	-	i_p
- Cierre	Interruptores.	i_b	-	i_b
- térmico		i_{th}	-	i_{th}
Corrientes mínimas				
Disparo de relés	Protecciones	-	I''_k, I_k	I''_k, I_k

Cuadro II

UTILIDAD DE LAS CORRIENTES DE CC

VI-A. Estrés térmico

Para el caso de generadores conectados a la red a través de un inversor, la corriente de cortocircuito no tiene componente i_{DC} apreciable, por lo que el factor m es cero. Entonces el valor n es tal que $\sqrt{n} = \frac{I''_{kMAX}}{I''_k}$. Los valores máximos para inversores que manejan grandes potencias rondan valores de no más de 3 p.u. ([2]). En cuanto al tiempo T_k , se estima que la corriente I''_k dura entre medio ciclo y tres ciclos, por lo que $T_{kMAX} = 60ms$ ([2]). Estos valores varían entre distintos modelos de inversor y de los controladores.

En el caso de aerogeneradores DFIG, n depende de los parámetros del circuito de protección del convertidor y su sistema de control específico, en particular del tiempo de actuación y el valor de la resistencia de Crowbar. Puntualmente, n disminuye cuando R_{cb} aumenta. El parámetro m , asociado a la componente i_{DC} depende de la magnitud del flujo de estator en el instante de la falta. También disminuye el tiempo T_k , como se vio en la sección III puede ser hasta treinta veces menor.

VI-B. Estrés mecánico

En la sección IV se vio que la corriente instantánea máxima de generadores conectados a la red por medio de un inversor se da en el período transitorio. Según [1] la corriente de pico

máxima i_{pMAX} de este tipo de generadores se calcula como $i_{pMAX} = \sqrt{2}I''_{kPPF}$, donde el valor I''_{kPPF} es proporcionado por el fabricante.

En el caso de un DFIG, la norma [1] indica que la corriente de pico máxima i_{WDmax} debe ser un dato proporcionado por el fabricante. El estrés mecánico producido por la corriente de un DFIG durante un cortocircuito puede ser mayor que en el caso anterior, ya que la corriente instantánea puede alcanzar valores altos durante varios ciclos mientras decaen las componentes alterna simétrica y DC del período transitorio.

VII. CONCLUSIONES

En este estudio se analizaron las diferencias en cuanto a la corriente de cortocircuito de los distintos generadores. Se encontraron similitudes en las formas de onda de la corriente de generadores síncronos y DFIG. El modelo dinámico de ambos tipos de generador responde a la conservación del flujo magnético en el rotor y estator durante la falta.

Por otra parte, a pesar de tratarse de distintas fuentes de energía, los aerogeneradores full converter y generadores fotovoltaicos dependen de la respuesta del inversor que los conecta con la red. El período transitorio de estos generadores suele durar menos tiempo que el de un DFIG o un generador síncrono. Los DFIG, full converter y fotovoltaico son similares en cuanto a la corriente en régimen, la que depende exclusivamente de la consigna de control del convertidor en función de la magnitud del hueco de tensión.

La norma [1] propone un método de cálculo para el aporte a la corriente de cortocircuito de cada tipo de generador en función de parámetros proporcionados por el fabricante. Las expresiones propuestas para la corriente de cada tipo de generador coinciden con lo analizado en este estudio.

El estrés térmico y mecánico que se introduce en los componentes de la red, dependen de la corriente de pico y térmica. Las mismas dependen de la componente continua de distintas formas y en consecuencia el DFIG y generador síncrono implementan un mayor desgaste. Los generadores conectados por inversor tienen un mayor grado de control durante el cortocircuito, tanto en magnitud como en duración.

REFERENCIAS

- [1] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (GENEVA) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, *Short-circuit Currents in Three-phase Ac Systems, Part 0: Calculation of Current, IEC-60909 Edition 2.0*, 2016-01.
- [2] GURSOY, E AND WALLING, RA, *Representation of variable speed wind turbine generators for short circuit analysis*, Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2011 IEEE.
- [3] *Curso de Redes Electricas [Online]*, Available: <https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?id=598>, Accessed on: Jun. 1, 2018.