

MODELADO DEL GENERADOR CON ATERRAMIENTO DE ALTA REACTANCIA PARA EL ANÁLISIS DE FALLAS DEL ESTATOR

High reactance grounding generator modeling to analyze stator faults

RESUMEN

Una de las protecciones de generadores que actualmente requiere más investigación es la del 100% del estator ante fallas a tierra. Para su diseño es indispensable conocer las variaciones de la corriente del neutro de la máquina.

En este artículo se propone un modelo para un generador puesto a tierra a través de una alta reactancia que sirve para el análisis de fallas en el estator. Como resultado, se obtiene el conjunto de ecuaciones que permiten evaluar el comportamiento del generador ante fallas a tierra.

Las pruebas en un sistema de generación prototipo, muestran las variaciones en la corriente del neutro debidas a cambios en los parámetros y útiles para el ajuste de las protecciones.

PALABRAS CLAVES: Falla a tierra, generador síncrono, inductancia de aterramiento, modelado, protección del 100% del estator.

ABSTRACT

One of the currently field of research is related to 100% stator ground fault protection. To adequately set this protective device it is required to know the possible variations at the machine neutral current.

In this paper, a model for high reactance grounding generators for analyzing stator ground faults is proposed. As results, a set of equations used to evaluate the behavior of the generator in case of stator ground faults is derived.

Test in a prototype generation system, show the variations of the neutral current, next used for relay setting.

KEYWORDS: *Grounding inductance, modeling, stator ground fault, synchronous generator, 100% ground fault protection.*

1. Introducción

Los generadores síncronos son una parte fundamental de los sistemas eléctricos de potencia, y por lo tanto deben ser protegidos adecuadamente ante cualquier tipo de anomalía que afecte su correcto de funcionamiento [1].

De otra parte, ante fallas en el estator del generador se pueden originar grandes sobrecorrientes que circulan por el neutro de la máquina y cuya la magnitud está estrechamente relacionada con el tipo de puesta a tierra y con la posición de la falla a lo largo de los devanados del estator. Un generador con un aterramiento mal diseñado está sometido a grandes sobrecorrientes que pueden producir daños severos al núcleo de la máquina [2][3].

Debido a lo anterior, es de gran importancia determinar como se comportan las corrientes que circulan por el neutro, ante las diferentes situaciones que puedan afectar el buen funcionamiento de los equipos de generación. Esto es de especial interés para el caso del desarrollo de la protección del 100% del estator del generador ante fallas a tierra. En este artículo se propone un modelo y se analiza el comportamiento de las corrientes producidas

por la presencia de una falla fase tierra en los devanados del estator, considerando el aterramiento de alta reactancia a tierra las variaciones de los parámetros de la reactancia total de puesta a tierra del generador.

Como contenido del artículo, en el numeral dos se presenta una breve síntesis de los aspectos generales asociados a la puesta a tierra de los equipos de generación. En el numeral tres se propone un modelo de representación del generador para su operación tanto en estado estable así como bajo circunstancias de falla del estator a tierra. A continuación en el numeral cuatro, se propone la determinación del modelo del estator, a partir del cual se puede evaluar el comportamiento del modelo ante cambios en sus parámetros. Estos cambios, tal como se reportan en los textos científicos relacionados, se presentan en el numeral cinco, considerando especialmente su impacto sobre la corriente por el neutro. Finalmente se presentan las conclusiones más importantes de la investigación desarrollada y que se presenta en este artículo.

Byron F. Ruíz-Mondragón

Ingeniero Electricista
Universidad Tecnológica de Pereira
proteccionnes@yahoo.com

Juan J. Mora-Flórez

Ingeniero Electricista, Ph.D.
Profesor
Universidad Tecnológica de Pereira
jjmora@utp.edu.co

Sandra M. Pérez-Londoño

Ingeniera Electricista, Ph.D. (c)
Profesor
Universidad Tecnológica de Pereira
saperez@utp.edu.co

Grupo de Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad - ICE³

2. Puesta a tierra o aterramiento de un generador síncrono

2.1. Aspectos generales

Los generadores síncronos se ponen a tierra principalmente debido a las siguientes necesidades [3]:

- Minimizar el daño de la máquina por fallas a tierra.
- Limitar esfuerzos mecánicos producidos por fallas externas.
- Limitar las sobretensiones y los transitorios presentes en las fallas.
- Proveer un medio para la detección de fallas a tierra en la máquina.
- Coordinar la protección del generador con los requerimientos de otros equipos conectados al mismo nivel de tensión, tales como el transformador elevador.

Estas necesidades exigen que el sistema de aterramiento de la máquina sea eficiente y confiable. Existen muchos tipos de aterramiento de los generadores, pero los utilizados más comúnmente se dividen en los siguientes grupos [4]:

- Alta impedancia a tierra.
- Baja resistencia a tierra.
- Reactancia a tierra.
- Aterrizaje desde los terminales.
- Aterrizaje mediante transformador de medida.

De los grupos anteriormente mencionados, los esquemas de aterramiento que más frecuentemente se utilizan son los siguientes:

- Esquema de aterrizaje mediante transformador de distribución con baja resistencia a tierra en el secundario
- Esquema de aterrizaje mediante transformador de distribución con reactancia de sintonización en el secundario
- Esquema de aterrizaje mediante baja resistencia a tierra
- Esquema de aterrizaje mediante reactancia a tierra
- Esquema de aterrizaje desde los terminales del generador

Todos los esquemas de aterramiento mencionados anteriormente están orientados a limitar la corriente máxima de fallo de la máquina [5]. De otra parte, el estándar que presenta de forma detallada, estas formas de aterramiento y algunas otras menos utilizadas, es el ANSI/IEEE C 62.92 de 1989. Este estándar contiene las especificaciones que se deben tener en cuenta en el aterramiento de un generador.

El esquema que más se utiliza es el propuesto por el método de reactancia a tierra y es el que se analiza en este documento [6][7]. Un diagrama sencillo de esta alternativa de aterramiento se muestra en la figura 1. El

análisis aquí presentado es válido para otros esquemas de aterramiento, sujeto a modificaciones menores.

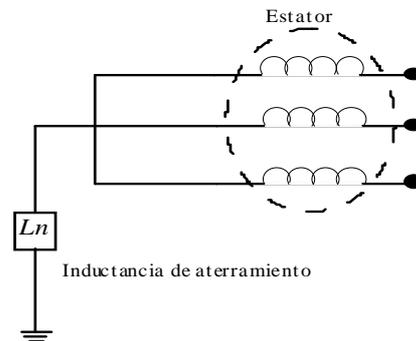


Figura 1. Esquema de aterramiento basado en reactancia a tierra. El esquema mostrado en la Figura 1 muestra como se conecta la inductancia de aterramiento al neutro del generador. En el siguiente numeral se presenta el análisis realizado para hallar la reactancia de aterramiento de la máquina.

2.2. Procedimiento para determinar la reactancia de aterramiento

El procedimiento para hallar la inductancia de aterrizaje tiene como objetivo hacer que la reactancia capacitiva total a tierra de la máquina sea igual o aproximadamente igual a la reactancia inductiva de aterrizaje, con el fin de que estas reactancias se cancelen y hagan que la corriente que circula por el neutro en una falla sea muy cercana a cero [8][9]. A continuación se muestran los pasos para hallar la inductancia de aterrizaje de la máquina [10]:

- Implementar una base de datos que contenga los parámetros de los equipos que aportan efecto capacitivo al modelo.
- Calcular la reactancia capacitiva total a tierra vista desde el punto neutro del generador X_c . Esta capacitancia total se define como la suma del efecto capacitivo de los equipos del sistema de conexión y del generador.
- Hallar la inductancia de aterrizaje L_n , siguiendo el criterio mostrado en las ecuaciones (1) y (2).

$$X_c = 3.X_n \quad (1)$$

$$L_n = \frac{X_c}{2\pi.f} \quad (2)$$

3. Modelado del generador síncrono en condiciones normales y bajo falla

En esta sección se presentan los modelos propuestos para el generador bajo condiciones normales de operación y condiciones de falla fase tierra, considerando un sistema de aterramiento con reactancia.

3.1. Modelo del estator de un generador síncrono en condiciones normales de operación

El modelo utilizado para condiciones sin falla en el estator se presenta en la figura 2. Este modelo tiene como parámetros la capacitancia de los devanados del estator (C_g), las capacitancias de los equipos auxiliares conectados al generador (C_p), la inductancia de aterramiento (L_n) y las tensiones nominales de cada fase de los devanados del estator (E_3). Éstos están relacionados con la tensión nominal de la máquina.

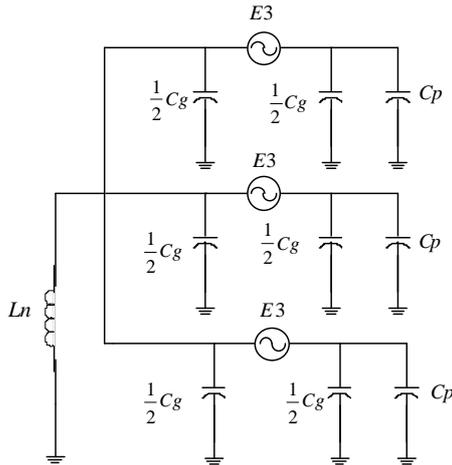


Figura 2. Modelo del estator en condiciones normales de operación.

En el la representación de la figura 2, se utiliza un modelo π para la distribución de la capacitancia del estator, debido a que ésta se encuentra repartida a lo largo de los devanados.

3.2. Modelo del estator de un generador síncrono ante una falla fase tierra

El modelo de los devanados del estator con falla a tierra se presenta en la figura 3. Para el desarrollo del modelo se parte del principio que la tensión del tercer armónico varía dependiendo de la posición en que éste se mida en los devanados del estator.

Este modelo tiene como parámetros C_g , C_p , L_n , las tensiones nominales en el estator para aquellas fases que no se encuentran bajo falla (E_3), la tensión nominal de la de tercer armónico en la fase fallada tanto en el neutro (E_{3n}) como en los terminales (E_{3t}) del generador y finalmente, las capacitancias con respecto al neutro y terminales de la máquina (C_n y C_t).

El valor de la tensión nominal varía dependiendo de la posición de la falla en los devanados del estator. Si k es la posición de la falla ($k=0$ para el neutro y $k=1$ para los terminales), y E_3 es la tensión nominal generada por la máquina, las capacitancias y las tensiones nominales en la fase fallada se hallan según las ecuaciones (3) y (4).

De la figura 3 se aprecia que en la fase en donde se encuentra la falla, la propuesta de modelado considera la división de las capacitancias en dos modelos π en

cascada, ya que de esta forma se puede hacer una representación más exacta de las variaciones de las tensiones en la máquina.

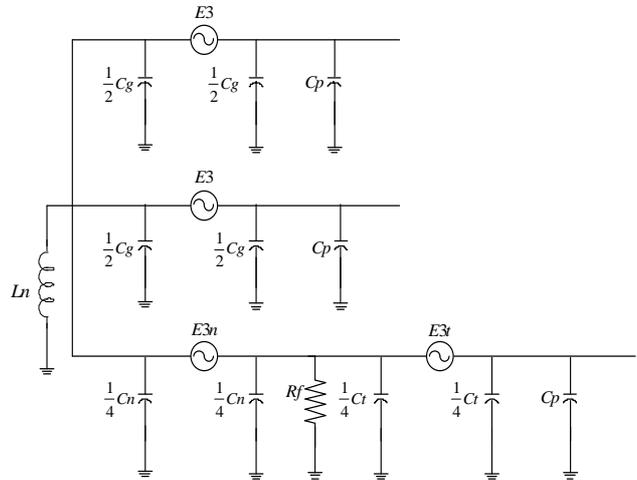


Figura 3. Modelo del estator bajo falla fase tierra.

$$C_n = k.C_{estator} \quad C_t = (1 - k).C_{estator} \quad (3)$$

$$E_{3n} = k.E_3 \quad E_{3t} = (1 - k).E_3 \quad (4)$$

4. Análisis de los modelos del estator de un generador síncrono

En este numeral se presenta un análisis para el modelo bajo condiciones normales de operación y un análisis circuital para el modelo bajo condiciones de falla fase-tierra en los devanados del estator. Este análisis propuesto es especialmente importante ya que permite determinar el comportamiento de la corriente circulante por el neutro, cuando ocurre una falla fase tierra, para el caso de utilizar el esquema de puesta a tierra con alta reactancia. A partir de este análisis se pueden proponer esquemas de protección del 100% del estator del generador ante fallas a tierra, tal como el método de inyección subarmónica, presentado en [11].

4.1. Análisis bajo condiciones normales de operación

Debido a que las tensiones generadas en la máquina síncrona presentan un desfase de 120 grados en cada una de las fases, éstas se cancelan en el neutro y por lo tanto el flujo de corriente que circula por el neutro del generador es cero.

4.2. Análisis del estator con falla fase tierra

A diferencia del caso anterior, cuando ocurre una falla se produce un desbalance en las tensiones del generador, lo cual causa un flujo de corriente por el neutro. A continuación se muestra el análisis teórico del modelo bajo condiciones de falla con el fin de obtener una ecuación que sirva para analizar el comportamiento de la

corriente en el neutro del generador con el método de aterramiento de reactancia a tierra.

El modelo del estator bajo condiciones de falla fase tierra de la figura 3, se reduce utilizando el teorema de Millman [12]. El circuito reducido se presenta en la figura 4.

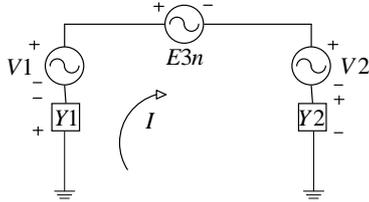


Figura 4. Circuito bajo condiciones falla fase tierra reducido utilizando el teorema de Millman.

Los parámetros del circuito de la Figura 4 se obtienen de las ecuaciones (5) a (8). La ecuación (9) corresponde al flujo de corriente circulante por el neutro cuando ocurre una falla fase tierra.

$$\bar{V}_1 = \frac{2\pi f \cdot E_3 [C_g + 2C_p] j}{2\pi f [C_g (2+k) + 2C_p] j + \frac{1}{R_n}} \quad (5)$$

$$\bar{Y}_1 = 2\pi f [C_g (2+k) + 2C_p] j + \frac{1}{R_n} \quad (6)$$

$$\bar{V}_2 = \frac{2\pi f \cdot E_3 [(1-k)C_g + 2C_p] (1-k) i}{2\pi f [C_g (1-k) + C_p] j + \frac{1}{R_f}} \quad (7)$$

$$\bar{Y}_2 = 2\pi f [C_g (1-k) + C_p] j + \frac{1}{R_f} \quad (8)$$

$$I = \frac{(Y_2 \cdot Y_1)(V_1 - V_2 - kE_3)}{Y_1 + Y_2} \quad (9)$$

5. Pruebas y análisis de resultados

5.1. Sistema prototipo de pruebas

El generador síncrono utilizado en las pruebas se presenta en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del generador síncrono utilizado en las pruebas.

Parámetro	Valor - Unidades
Potencia nominal (S_N)	850 [MVA]
Velocidad nominal	3000 [rpm]
Frecuencia (f_0)	50 [Hz]
Tensión nominal (U_n)	11,4 [kV]
Capacitancia a tierra de los devanados del estator (C_{gnd})	0,385 [μ F]
Capacitancia del bus (C_{bus})	1887 [pF/fase]
Capacitancia entre el transformador elevador y el interruptor (C_{surge})	0,129 [μ F/fase]
Capacitancia del transformador auxiliar (C_{trafo})	1092 [pF/fase]
Efecto capacitivo total de los equipos (C_{eq})	0,132 [μ F/fase]
Posición de la falla	50%, k=0,1
Resistencia de falla (R_f)	100 [Ω]

5.2. Determinación de la reactancia a tierra del generador

A partir de la estrategia planteada en el numeral 3, se obtiene la ecuación (10).

$$X_L = \frac{6157}{3} = 2\pi \cdot f \cdot L_n \quad (10)$$

Despejando el valor de la inductancia en 10, se obtiene un valor de 6.53 H, tal como se presenta en (11).

$$L_n = \frac{6157}{6\pi \cdot 50} = 6.53H \quad (11)$$

5.3. Variación de la reactancia capacitiva de la máquina y de la inductancia de puesta a tierra

Como se mostró en el numeral 3, la inductancia de aterramiento se debe determinar de tal forma que el flujo de corriente por el neutro del generador en caso de falla fase-fase o fase tierra sea cercano a cero. En las máquinas reales los parámetros capacitivos pueden variar, con lo cual se hace necesario verificar el comportamiento de las corrientes por el neutro del generador ante estas situaciones.

Para determinar el comportamiento de la corriente por el neutro se propone simular y analizar las variaciones en los parámetros de la máquina descrita en el numeral 5.1, a partir de la formulación propuesta en el numeral 4. Las capacitancias pueden variar en aplicaciones prácticas entre los valores mostrados en las relaciones (12) y (13) [8].

$$C_g = [0.37\mu F - 0.4\mu F] \quad (12)$$

$$C_p = [0.131\mu F - 0.134\mu F] \quad (13)$$

En las figuras 5 y 6 se observa que la variación del parámetro C_g (Capacitancia de los devanados del estator) produce cambios muchos mayores en la corriente del neutro de la máquina, que los ocasionados por variaciones en el parámetro C_p (las capacitancias de los equipos auxiliares conectados al generador).

Al igual que para los casos anteriores, en el caso de la máquina presentada en la tabla 1, la corriente del neutro puede variar significativamente en el caso de la variación de la inductancia de aterramiento (L_n). El valor de esta inductancia normalmente cambia debido al deterioro en los aislamientos de la bobina o por el calor presente en la unidad generadora, que hace que su valor inicial se altere con el paso del tiempo. Los resultados obtenidos se representan gráficamente en la figura 7, donde se aprecia que la variación de L_n produce variaciones importantes en la corriente.

Las variaciones en la capacitancia de los devanados del estator (C_g), causan cambios de una unidad en la primera cifra decimal del valor de la corriente del neutro, mientras que las variaciones en la capacitancias de los equipos auxiliares (C_p) sólo originan cambios de máximo una unidad en la tercera cifra decimal. De otra parte, se

muestra cómo ante variaciones de la inductancia de aterramiento, las variaciones en la corriente del neutro pueden alcanzar hasta 1.7 amperes de variación en la corriente del neutro y para la máquina analizada.

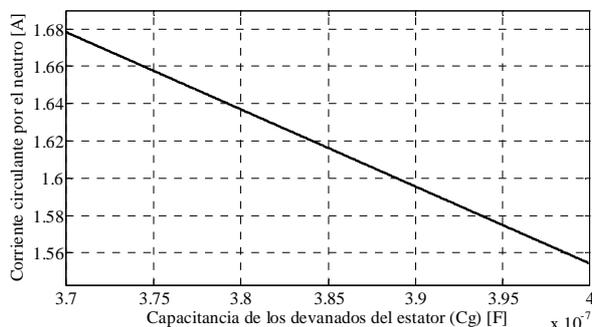


Figura 5. Variación de la corriente circulante por el neutro ante la variación de C_g .

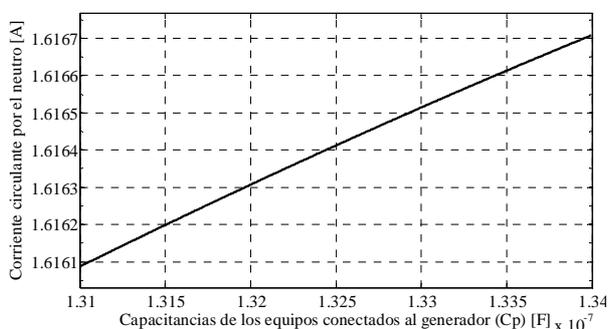


Figura 6. Variación de la corriente circulante por el neutro ante la variación de C_p .

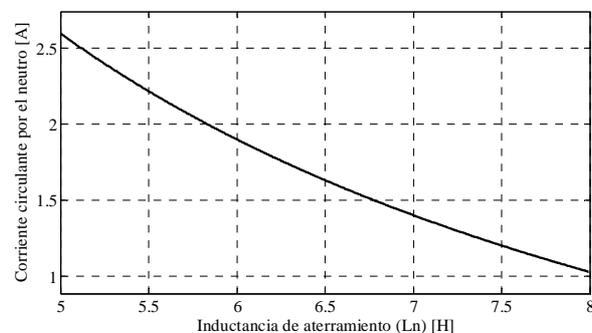


Figura 7. Corriente circulante por el neutro ante la variación de la reactancia inductiva de aterramiento de la máquina (L_n).

Finalmente, las variaciones en la corriente producidas por cambios en la reactancia capacitiva o la inductancia de aterramiento pueden hacer que la máquina quede desprotegida ante una falla del estator a tierra, por mala actuación de la protección del 100%. Esto puede causar problemas en la máquina tales como daño en el núcleo producido por el sobrecalentamiento, destrucción de los aislamientos de los bobinados y como consecuencia de esto, las consiguientes interrupciones en la generación de energía.

6. Conclusiones

El método de aterramiento basado en la reactancia a tierra es muy útil ya que permite reducir las corrientes en caso de falla fase tierra del estator de la máquina. Ante corrientes de falla reducidas, la posibilidad de daños en los equipos asociados se disminuye y por lo tanto se aumenta el índice de continuidad de los generadores.

En este documento se presenta una metodología que permita analizar adecuadamente el método de puesta a tierra basado en la inductancia de aterramiento. Esta metodología de análisis aquí propuesta se probó utilizando una máquina prototipo, para la cual se muestra cómo se puede afectar la protección del generador por las variaciones en los valores de los parámetros asociados.

Finalmente se puede apreciar que el método de aterramiento aquí analizado es más costoso económicamente que los métodos basados en resistencia de aterramiento, debido al valor asociado a la construcción de las bobinas respecto al de la construcción de resistencias.

7. Bibliografía

- [1] J. Clarck "Generator ground fault protection using overcurrent, overvoltage and undervoltage relays". IEEE Trans on Power Apparatus and Systems. "Vol. PAS 101 No 12, 1982
- [2] J W Pope. "A comparison of 100% stator ground fault protection schemes for generator stator windings" IEEE Trans on Power Apparatus and Systems.,vol.PAS-103 No 4, abril 1984
- [3] IEEE "Guide for AC generator protection" IEEE Std C37.102-1995 IEEE Standards Board
- [4] P.M. Anderson "Power System Protection" IEEE Press series. 1999
- [5] J. Blackburn "Protective relaying - principles and application". Ed. Marcell Dekker. Second edition. 1994
- [6] M. Saucedo "Diagnóstico integral del devanado del estator de generadores eléctricos". Comisión Federal de Electricidad. México 2001
- [7] G. Rockefeller "Generator Protection Application Guide" Basler Electric 1994
- [8] W. Wang, X. Xie, X. Zhong. "New Development of third harmonic ground fault protection schemes for turbine-generator stator windings". Fourth International Conference on Developments in Power Protection, pp 250-253. 1989.
- [9] S. Shiwen, S. Binhua. "Analysis of ground protection of unit connected generators using third harmonics", Fourth International Conference on Developments in Power Protection, pp 254-258. 1989.
- [10] M. Fulczyk "Zero-sequence voltages in unit-connected generator for different methods of grounding generator neutral" Developments in Power System Protection, Conference Publication No.479 0 IEEE 2001. Pags 499-502. Poland
- [11] J. Mora, G. Olguin, L. Giraldo. "Evaluación de la protección del estator de un generador ante fallas a tierra

usando el método de inyección subarmónica". Rev. Ingeniería y Competitividad, Vol.10, N. 1, Págs: 21–30, 2008.

- [12] D. Johnson, J. Hilburn, J. Johnson. "*Electric Circuit Analysis*". Ed. John Wiley and Sons, Inc. 1997.