

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE TERCER ARMÓNICO EN EL ESTATOR DE UN GENERADOR SÍNCRONO

Analysis of the variation of the third harmonic voltages in the stator of synchronous generator

RESUMEN

El estudio de los generadores es importante, por su naturaleza fundamental en el sistema de potencia.

En este artículo se presenta un análisis de la tensión del tercer armónico ante variaciones de la capacitancia de los equipos conectados en terminales del generador y ante fallas a tierra, debido que este armónico es utilizado para la protección del 100% del devanado del estator ante fallas a tierra. Como resultado se presenta la región de variación del tercer armónico para un generador prototipo, que permite tomar decisiones sobre donde medir y que estrategia de protección es la más adecuada.

PALABRAS CLAVES: Fallas fase tierra, generador síncrono, tercer armónico.

ABSTRACT

The study of synchronous generators is a very important task due to the fundamental nature of this equipment in the power system.

In this paper, the behavior of the third harmonic voltage as consequence of variations in the equipment capacitance connected in terminals and phase to ground faults are analyzed, because this harmonic is used to develop a 100% stator ground fault protection. As a result, the region of variation of the third harmonic voltage magnitude for a prototype generator is presented. These results help to take decisions about the best place to take measurements and the best protection strategy.

KEYWORDS: Phase to ground fault, synchronous generator, third harmonic.

1. INTRODUCCIÓN

Los generadores síncronos son parte fundamental en los sistemas de potencia y se deben estudiar detalladamente para entender su comportamiento, tanto en el estado estable como en el transitorio. Esto es importante para mantener altos niveles de confiabilidad [1].

De forma general, los generadores síncronos se componen del estator que es la parte fija, el rotor que es la parte móvil que gira dentro del estator y el entrehierro o espacio de aire que los separa. En el estator existen bobinas que se representan en forma de tres devanados concentrados y desfasados 120 grados [2]. Los tres devanados del estator se conectan normalmente en estrella, con un neutro que se conecta a tierra de diferentes formas, tal como se presenta en la figura 1.

Ante fallas a tierra, la magnitud de las corrientes que circulan por el neutro depende del tipo de aterramiento del generador y de la posición de la falla a lo largo de los devanados del estator. En los generadores con baja impedancia de puesta a tierra, las corrientes circulantes por el neutro son equivalentes a casi toda la corriente de la falla en el estator. En generadores con una impedancia de valor medio tienen valores de aproximadamente 100

BYRON F. RUIZ M.

Ingeniero Electricista
Universidad Tecnológica de Pereira
proteccionnes@yahoo.com

JUAN J. MORA F.

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

SANDRA M. PÉREZ L.

Ingeniera Electricista, M.Sc.
Profesor
Universidad Tecnológica de Pereira.
saperez@utp.edu.co

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y ESTABILIDAD - ICE³

A; y las corrientes circulantes en generadores con alta impedancia de puesta a tierra están entre 3A y 25A, para fallas externas [2][3]. El método de alta impedancia de puesta a tierra es el más utilizado; normalmente el generador se aterriza a través de un transformador y una resistencia secundaria o también con la resistencia directamente a tierra, tal como se muestra en la figura 1.

Ante fallas a tierra del estator, se utilizan protecciones que miden la corriente por el neutro para determinar la presencia o no de la falla. Cuando la falla a tierra ocurre muy cerca del punto de neutro, las corrientes no son suficientes para detectar la presencia de la situación anormal [2]. Es por esta razón que se deben analizar otros métodos de protección no dependientes de la corriente, para proteger el 100 % del estator del generador, tal como el método del tercer armónico, que motiva el análisis presentado en este artículo. Una falla inicial en el estator de un generador aterrizado con una alta impedancia no causa problema, pero una segunda falla origina corrientes muy altas que afectan el núcleo, causando daños de un alto costo de reparación [4][5].

La tensión generada por la máquina, medida en los terminales del estator, contiene componentes armónicas,

debido a que las bobinas no están exactamente distribuidas en el estator. Entre los armónicos existentes solo se encuentran los de tercer orden debido a la simetría del semiciclo positivo y negativo de la onda [6].

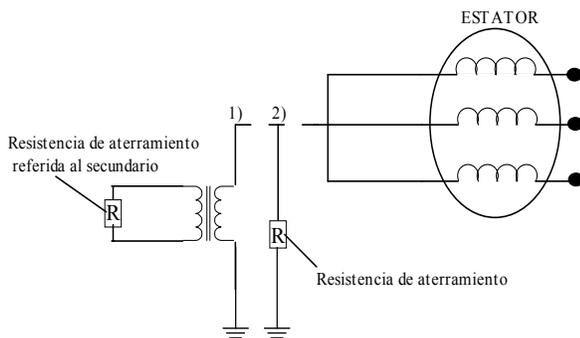


Figura 1. Métodos de aterramiento de un generador síncrono. 1) Mediante un transformador; 2) Directamente a tierra

En este artículo se analiza la tensión de tercer armónico, debido a las variaciones de la carga y de los parámetros de los devanados de un generador síncrono. Este análisis es de naturaleza fundamental, ya que la componente de tercer armónico es la que se utiliza para brindar una protección 100% de los devanados del estator contra fallos fase tierra, en conjunto con las protecciones convencionales [6].

Como contenido del artículo, en el numeral dos se presenta una breve síntesis del comportamiento de la tensión del tercer armónico, considerando situaciones de funcionamiento sin falla, falla en el neutro y falla en terminales, tanto para plena carga como sin carga. En el numeral tres se presenta el modelo del estator del generador síncrono, mientras que en la sección cuatro se muestra el análisis de cada modelo bajo las diferentes circunstancias de operación. En el numeral cinco se presentan las pruebas y el análisis de resultados para un generador prototipo. Finalmente se presentan las conclusiones más importantes del análisis realizado.

2. VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE TERCER ARMÓNICO, ANTE DIFERENTES SITUACIONES OPERATIVAS DEL GENERADOR.

El nivel de armónicos de tensión varía con la carga, la posición a lo largo del devanado del estator donde se mide, y también con la presencia o no de fallas. El valor normal de tercer armónico en los generadores síncronos está entre el 1 y 6% de la tensión nominal [2] [7].

2.1. Tensión de tercer armónico en condiciones normales de operación.

En la figura 2 se presenta la distribución de los voltajes del tercer armónico producidos a lo largo de los devanados del estator del generador, en condiciones normales de operación. En la misma figura se consideran las variaciones debidas al nivel de carga del generador.

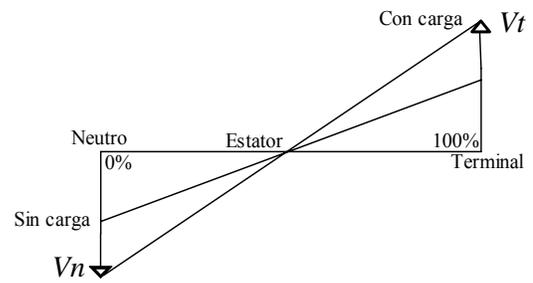


Figura 2. Tensión de tercer armónico en el estator de un generador, ante circunstancias normales de operación.

2.2. Tensión de tercer armónico en condiciones de falla fase tierra.

Ante una falla fase tierra en el neutro del generador, la tensión del tercer armónico presente en el neutro se hace prácticamente cero. La tensión de tercer armónico se puede medir en los terminales del generador, tal como se muestra en la figura 3.

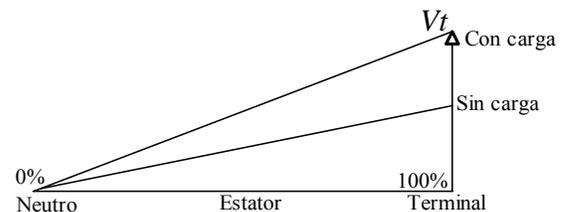


Figura 3. Tensión de tercer armónico, ante falla fase tierra en el neutro del generador.

En el caso de que la falla fase tierra ocurra en los terminales del generador, las tensiones se comportan de manera opuesta al caso de falla en el neutro. La tensión de tercer armónico en el neutro se hace máxima, mientras que en los terminales, su valor se hace cercano a cero, como se observa en la figura 4.

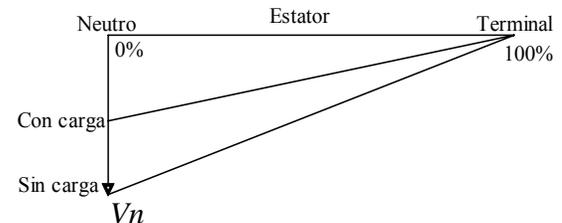


Figura 4. Tensión de tercer armónico con falla en terminales.

3. MODELO DEL ESTATOR DE UN GENERADOR SÍNCRONO

El modelo del generador síncrono propuesto se presenta en esta sección, tanto para condiciones normales de operación, como para falla del estator a tierra.

3.1. Parámetros del modelo del estator de un generador síncrono.

Para el desarrollo del modelo del estator del generador síncrono se deben tener en cuenta los elementos externos

conectados, tales como los interruptores de potencia, el transformador elevador, la resistencia de aterramiento y algunos otros elementos como los barrajes [2]. En la figura 5 se presenta un esquema general de los elementos que interfieren en el modelo del estator

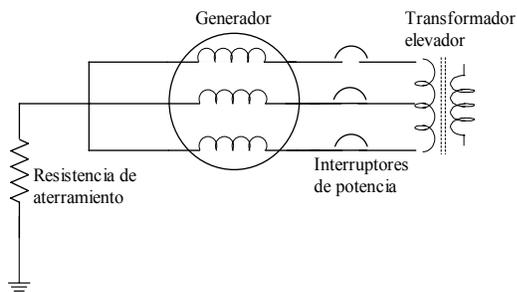


Figura 5. Principales elementos externos conectados al generador síncrono que afectan el modelo del estator.

Cada uno de los elementos de la figura 5, se debe considerar en el modelo de los devanados del estator, para determinar aproximadamente el comportamiento del tercer armónico ante circunstancias de falla. El modelo del estator propuesto se esquematiza en la figura 6.

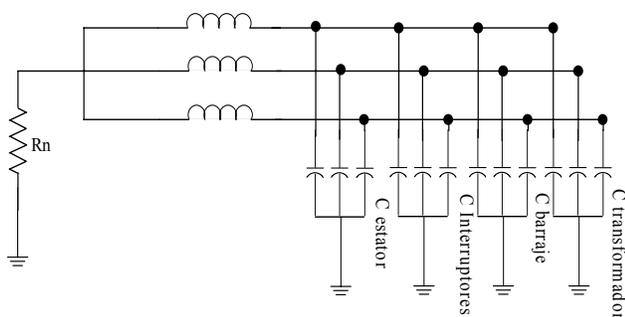


Figura 6. Parámetros aportados por los elementos conectados al generador síncrono

Cada elemento conectado tiene una capacitancia que se adiciona a la del estator. Adicionalmente, se debe considerar la resistencia y la inductancia de los devanados del estator, pero estos valores son generalmente muy pequeños y no suponen un cambio significativo en el comportamiento de los armónicos [9].

3.2. 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 7. 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 resistencia de aterramiento (R_n) y las tensiones de tercer armónico de cada fase de los devanados del estator (E_3). Estos están relacionados con la tensión nominal de la máquina.

En el modelo de la figura 7, se utiliza un modelo π para la capacitancia del estator, debido a que ésta se encuentra repartida a lo largo de los devanados.

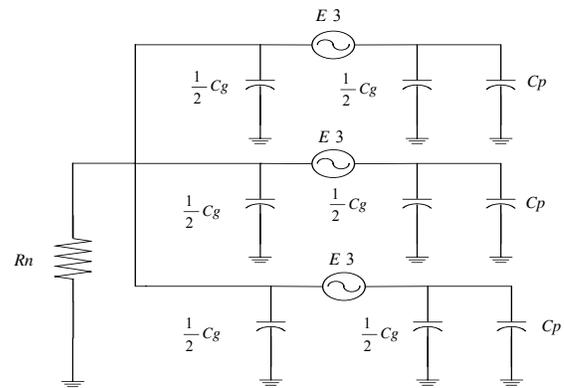


Figura 7. Modelo del estator en condiciones normales de operación.

3.3. Modelo de los devanados del estator de un generador síncrono con una falla fase tierra.

El modelo en falla se presenta en la figura 8. Para el desarrollo del modelo se parte del principio que el voltaje 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 , R_n , los voltajes de tercer armónico producidos en las fases del estator que no se encuentran bajo falla (E_3), el voltaje de tercer armónico en el neutro (E_{3n}) y en los terminales (E_{3t}) del generador en la fase fallada y las capacitancias con respecto al neutro y terminales de la máquina (C_n y C_t).

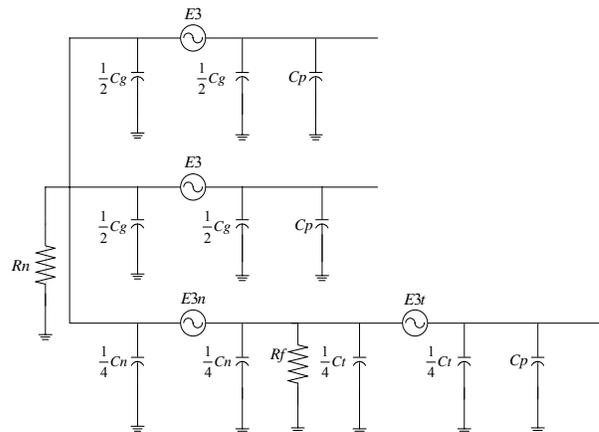


Figura 8. Modelo del estator bajo falla fase tierra para $k = 1/2$.

El valor de la tensión de tercer armónico 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 de tercer armónico generada por la máquina, las capacitancias y las tensiones del tercer armónico en la fase fallada, se hallan según (1) y (2).

$$C_n = k \cdot C_{stator} \quad C_t = (1 - k) \cdot C_{stator} \quad (1)$$

$$E_{3n} = k \cdot E_3 \quad E_{3t} = (1 - k) \cdot E_3 \quad (2)$$

De la figura 8 se aprecia que en fase en donde se encuentra la falla, las capacitancias se dividen en dos modelos π en cascada, ya que de esta forma se puede

hacer una mejor representación de las variaciones de la tensión del tercer armónico.

4. ANÁLISIS DE LOS MODELOS DEL ESTATOR DE UN GENERADOR SÍNCRONO

En este numeral se presenta un análisis circuital para cada uno de los modelos, con el fin de determinar la influencia de la variación de los parámetros considerados en la magnitud del tercer armónico.

4.1. Análisis bajo condiciones normales de operación

El modelo mostrado en la figura 7 para condiciones normales de operación, puede ser reducido utilizando el concepto de las componentes de secuencia cero. Debido a que las tensiones de tercer armónico se encuentran en fase, éstas se suman en el neutro del generador. El circuito reducido se muestra en la figura 9.

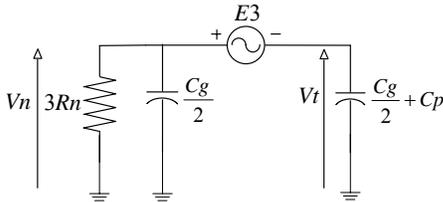


Figura 9. Circuito reducido del modelo bajo condiciones normales de operación, utilizando las componentes de secuencia cero.

A partir de un equivalente del circuito mostrado en la figura 9, se obtienen las ecuaciones (3) y (4), para el circuito equivalente es mostrado en la figura 10.

$$Z_t = \frac{i}{\pi f [C_g + 2C_p]} \tag{3}$$

$$Z_n = \frac{i}{3\pi f \cdot R_n \cdot C_g \cdot i + 1} \tag{4}$$

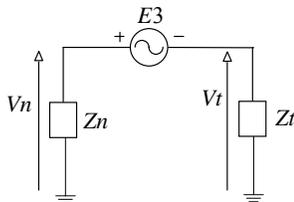


Figura 10. Circuito reducido de secuencia cero, para condiciones normales de operación.

Del circuito de la figura 10, se obtienen las ecuaciones (5) y (6), que muestran como se comportan las tensiones de tercer armónico en el neutro y en terminales, ante las variaciones de los parámetros del modelo del estator del generador, ante condiciones normales de operación.

$$V_n = \frac{3\pi f \cdot R_n \cdot [C_g + 2C_p] E_3}{\sqrt{1 + [6\pi f \cdot R_n [C_g + C_p]]^2}} \tag{5}$$

$$a = \left[1 + 18 (\pi f \cdot R_n)^2 C_g (C_g + C_p) \right]^2$$

$$V_t = \frac{E_3 \sqrt{a + [3\pi f \cdot R_n (C_g + 2C_p)]^2}}{1 + [6\pi f \cdot R_n [C_g + C_p]]^2} \tag{6}$$

4.2. Análisis del estator con falla fase tierra.

El modelo del estator bajo condiciones de falla fase tierra de la figura 8, se reduce utilizando el teorema de Millman. El circuito reducido se presenta en la figura 11.

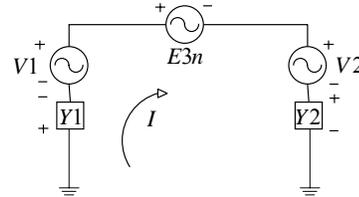


Figura 11. Circuito bajo condiciones falla fase tierra reducido utilizando el teorema de Millman.

Los parámetros del circuito de la Figura 11 se obtienen de las ecuaciones (7), (8), (9), (10) y (11).

$$\overline{V1} = \frac{2\pi f \cdot E_3 [C_g + 2C_p] i}{2\pi f [C_g (2+k) + 2C_p] i + \frac{1}{R_n}} \tag{7}$$

$$\overline{Y1} = 2\pi f [C_g (2+k) + 2C_p] i + \frac{1}{R_n} \tag{8}$$

$$\overline{V2} = \frac{2\pi f \cdot E_3 [(1-k)C_g + 2C_p] (1-k) i}{2\pi f [C_g (1-k) + C_p] i + \frac{1}{R_f}} \tag{9}$$

$$\overline{Y2} = 2\pi f [C_g (1-k) + C_p] i + \frac{1}{R_f} \tag{10}$$

$$I = \frac{(Y2 \cdot Y1)(V1 - V2 - kE_3)}{Y1 + Y2} \tag{11}$$

Resolviendo el circuito mostrado en la figura 11 y también a partir del mostrado en la figura 12, se obtienen las ecuaciones (12), (13) y (14) que modelan el comportamiento de las tensiones de tercer armónico en el neutro y en terminales, ante las variaciones de los parámetros del modelo del estator del generador, considerando una falla fase tierra.

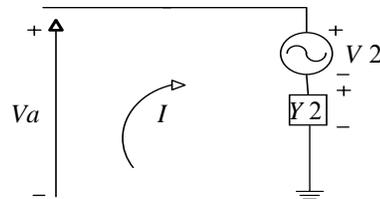


Figura 12. Circuito equivalente utilizado para hallar Vn y Vt.

$$V_a = V_2 + I \left(\frac{1}{Y_2} \right) \tag{12}$$

$$V_n = V_1 - \left(\frac{1}{Y_1}\right)I \tag{13}$$

$$V_t = V_a - (1 - k)E_3 \tag{14}$$

5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de la deducción de la ecuaciones propuestas en el numeral anterior, se obtuvieron cuatro relaciones fundamentales para el análisis del comportamiento de la tensión del tercer armónico; dos para el modelo sin falla y dos para el modelo bajo condiciones de falla fase tierra (ecuaciones 5, 6 y 13, 14 respectivamente). A partir de estas ecuaciones, se determinan los parámetros que son más relevantes y por lo tanto cuales afectan de forma más apreciable los voltajes del tercer armónico presentes en los devanados del estator.

5.1. Sistema prototipo de pruebas

El generador síncrono utilizado en las pruebas se presenta en la tabla 1 [2].

Potencia nominal (S_N)	850 MVA
Velocidad nominal	3000 rpm
Frecuencia (f_0)	50 Hz
Voltaje nominal (U_n)	21 kV
Capacitancia a tierra de los devanados del estator (C_{gnd})	0.385 μ F
Resistencia de aterramiento (R_n)	10 A 21/ $\sqrt{3}$ → $R_n=1212 \Omega$
Capacitancia del bus (C_{bus})	0.1 μ F/fase
Capacitancia entre el transformador y los disyuntores (C_{surge})	0.25 μ F/fase
Capacitancia del transformador (C_{trafo})	0.2 μ F/fase
Porcentaje de tercer armónico	1.7321
Posición de la falla	50%, $k=0.5$

Tabla 1. Parámetros del generador síncrono para las pruebas.

5.2. Variación de la tensión de tercer armónico - Condiciones normales de operación.

Para el generador de prueba y de acuerdo con el análisis realizado en el numeral anterior, la tensión de tercer armónico en el neutro y en los terminales de la máquina, en función de la capacitancia de los equipos conectados al generador, se presenta en las figuras 13 y 14. Este comportamiento es para la máquina en funcionamiento normal sin falla.

A partir de las pruebas del generador sin falla, se observa que cuando la capacitancia C_p aumenta, el voltaje de tercer armónico en terminales disminuye, mientras que en el neutro aumenta. Esto muestra un desplazamiento de la magnitud de los voltajes de tercer armónico de terminales hacia el neutro, que se debe considerar para el análisis de la mejor alternativa de medición, cuando se usa el tercer armónico como base para la protección del estator ante fallas a tierra.

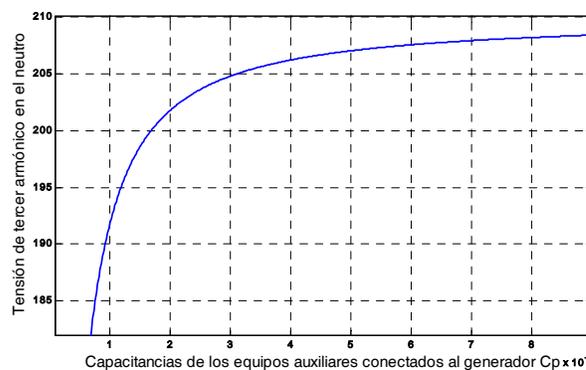


Figura 13. Tensión del tercer armónico en el neutro del generador vs la capacitancia de los equipos auxiliares.

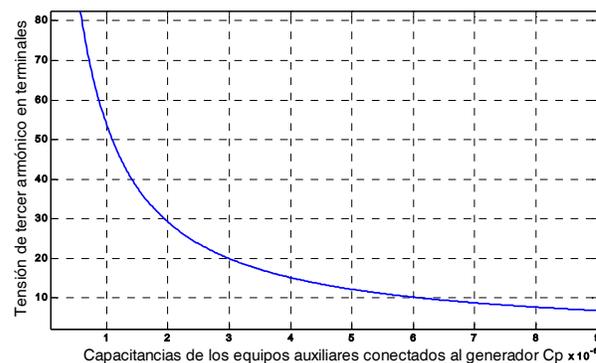


Figura 14 Tensión del tercer armónico en terminales del generador vs la capacitancia de los equipos auxiliares.

5.3. Variación de la tensión de tercer armónico - Generador con el estator en falla.

La tensión de tercer armónico, para el caso de un generador con falla del estator a tierra, localizada a una distancia k en p.u. desde el neutro, se presenta en esta sección para el caso del generador prototipo del ejemplo. Las situaciones que se analizan incluyen la variación de la posición de la falla, el valor de la capacitancia de los equipos conectados al generador y el valor de la resistencia de falla. Los resultados representan en las figuras 15 a la 18.

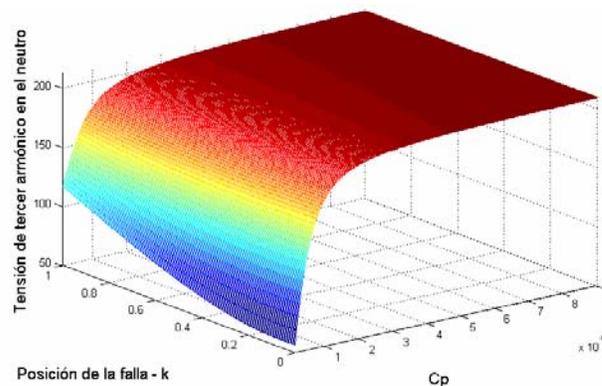


Figura 15. Tensión del tercer armónico en el neutro del generador vs la posición de la falla y la capacitancia de los equipos auxiliares.

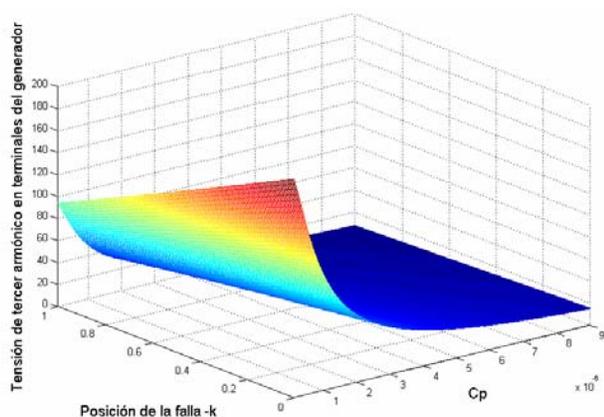


Figura 16. Tensión del tercer armónico en terminales del generador vs la posición de la falla y la capacitancia de los equipos auxiliares.

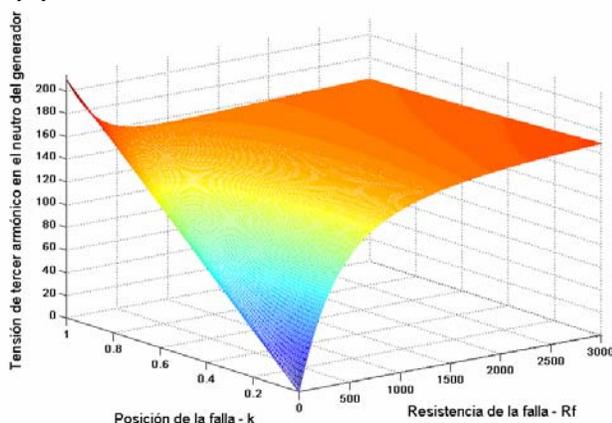


Figura 18. Tensión del tercer armónico en el neutro del generador vs la resistencia y la posición de la falla.

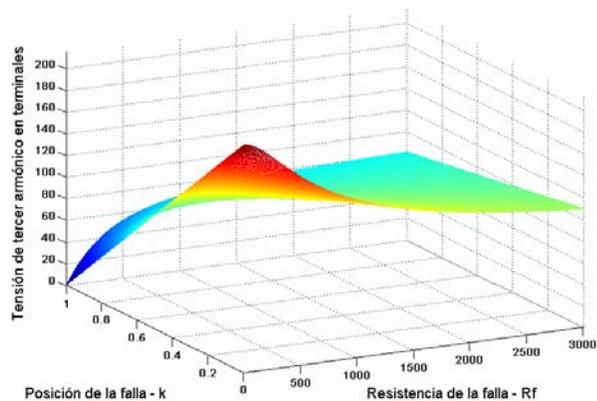


Figura 19. Tensión del tercer armónico en terminales del generador vs la resistencia y la posición de la de falla.

Según los resultados para el generador de la tabla 1, bajo condiciones de falla se aprecia que el valor de la resistencia y la posición de la falla inciden de manera apreciable en la magnitud de la tensión de tercer armónico, tanto en el neutro como en terminales.

La capacitancia de los equipos auxiliares produce una variación considerable, cuando su valor se reduce a menos de $4\mu\text{F}$. Esto se debe tener en cuenta para la

adecuada configuración de una protección basada en el tercer armónico de tensión.

6. CONCLUSIONES

El análisis del modelo del generador para determinar la región de variación en la magnitud del tercer armónico, permite determinar las mejores estrategias que se deben utilizar en el ajuste de protecciones del 100% del estator ante fallas a tierra.

En los modelos con y sin falla se debe tener en cuenta la variación de la capacitancia de los equipos conectados en terminales del generador (C_p). Ésta puede variar independientemente de las condiciones de funcionamiento de la máquina, ya que los equipos conectados al generador pueden ser cambiados.

Para realizar un buen diseño de una protección 100% deben ser tenidos en cuenta las variaciones en la tensión de tercer armónico, ya que estas pueden afectar la confiabilidad y la sensibilidad de la protección.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Clark "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,april 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", Tsinghua University, Xuchang Relay Institute, P.R. of China. 2003
- [9] S. Shiwen, S. Binhua. "Analysis of ground protection of unit connected generators using third harmonics", Nanjing Institute of Technology, P.R. China. 2004
- [10] M. Fulczyk "Zero-sequence voltages in unit-connected generator for different methods of grounding generator neutral, ABB Corporate Research, Krakow", Poland Developments in Power System Protection, Conference Publication No.479 0 IEEE 2001. Pags 499-502.