

Corrientes armónicas en el circuito de secuencia cero de generadores independientes sincronizados al Sistema Eléctrico Nacional. Caso Elpidio Gómez.

Dr. Ing. Marcos A. de Armas Teyra
Msc Ing. Julio Gómez Sarduy
Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente
Universidad de Cienfuegos, Cuba
e-mail marmas53@yahoo.es

RESUMEN

Un aspecto importante y poco tratado en la literatura relacionada con la presencia de armónicos en sistemas eléctricos industriales, es la interacción entre el generador y el transformador de enlace a través del circuito de secuencia cero. Considerar este aspecto es fundamental en instalaciones de mediana y pequeña potencia que emplean recursos distribuidos, fuentes renovables, sistemas de cogeneración o generación independiente cuando los generadores se enlazan al sistema a través de transformadores con devanados conectados en estrella aterrada sólidamente o mediante reactores y resistencias. Este artículo, a partir de las mediciones de los armónicos producidos por un generador Alemán de 1500 kW en condiciones reales de explotación con carga variable, estudia en detalle la causa de las elevadas corrientes en el circuito de secuencia cero y voltajes de riesgo en las estructuras metálicas adyacentes a la estación de potencia en la Empresa Elpidio Gómez, alimentada con biomasa cañera, que posee un transformador de enlace con el sistema de 1000 kVA. El trabajo concluye con la solución adoptada de acuerdo con las condiciones locales.

Palabras claves - Armónicos, circuito de secuencia cero, generadores interconectados

I. INTRODUCCIÓN

La circulación de armónicos en un sistema eléctrico de potencia se debe fundamentalmente a la

presencia de cargas no lineales y en menor grado a la operación de transformadores sobreexcitados o a máquinas eléctricas rotatorias. Los generadores, particularmente los de gran potencia, son cuidadosamente diseñados para reducir los armónicos de espacio de la inducción y de tiempo en la forma de onda de voltaje. Las medidas más comunes consisten en seleccionar adecuadamente el factor de devanado, la curvatura en las caras polares, mejorar del factor de forma del campo de excitación, etc. Como resultado el voltaje se considera prácticamente sinusoidal. Sin embargo, los generadores de pequeña y mediana potencia, como los utilizados en fuentes renovables y recursos distribuidos, en la medida que se reduce su potencia poseen mayor distorsión armónica de voltaje y, potencialmente, pueden producir fenómenos complicados e indeseables en el sistema. La magnitud y el tipo de problema depende tanto del espectro armónico presente, la conexión del banco de transformadores, el tipo de aterramiento como del grado de desbalance y el nivel de carga del generador.

Cuando los sistemas son balanceados, por el neutro circulan sólo los terceros armónicos y sus múltiplos. Si el sistema es desbalanceado, como sucede cuando existen cargas no lineales monofásicas, cada armónico posee su propio componente de secuencia positiva, negativa y cero y por el neutro existen corrientes de todas las frecuencias y aumentan las probabilidades de fenómenos indeseables en el circuito de secuencia cero, particularmente, si existe trayectoria para la circulación de estas corrientes.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Generalmente, el análisis operacional de los generadores se basa en sistemas de voltaje y corrientes simétricos y sinusoidales. Mientras en la mayoría de los casos es suficiente dar un tratamiento de este tipo, en los generadores pequeños no siempre es posible, particularmente cuando están presentes los armónicos superiores de tiempo en la forma de onda del voltaje.

Corrientes armónicas en el circuito de secuencia cero de generadores independientes sincronizados al Sistema Eléctrico Nacional. Caso Elpidio Gómez.

Uno de los aspectos mas interesantes del voltaje no sinusoidal (y de las cargas no lineales), es que la corriente armónica circula por el conductor neutro independientemente del grado de desbalance del sistema, que aún con bajos valores de distorsión, debido a la baja impedancia de los circuitos de secuencia cero de los generadores y transformadores, permite que la corriente r.m.s alcance valores considerables de modo que el sistema opera en un estado similar a una falla permanente introduciendo problemas como sobrecarga en fase y neutro, pérdidas de energía, operación inadecuada de las protecciones, subutilización de la capacidad de generación y transformación, probabilidad de resonancia, etc.

En casos en que la forma de onda del voltaje sea simétrica con relación al eje de las abscisas, no existirán los armónicos pares y estarán presente los armónicos de orden:

$n = 1, 3, 5, 7, 9, 11, \dots, (2k + 1)$ donde $k = 0, 1, 2, 3, \dots$
 Los armónicos de orden $3k$, son armónicos de secuencia cero y producen corrientes que se suman aditivamente en el neutro, en un sistema no balanceado, cada armónico posee su propio componente de frecuencia positiva, negativa y cero y en el neutro están presentes todas las corrientes armónicas incluyendo la fundamental. Sin embargo, como se demuestra en las mediciones de campo en el presente trabajo, la reacción de armadura distorsiona el campo y el espectro armónico es más amplio.

El sistema simplificado de la Empresa Elpidio Gómez, objeto de análisis, se muestra en la Figura 1 y el circuito equivalente de secuencia cero en la Figura 2.

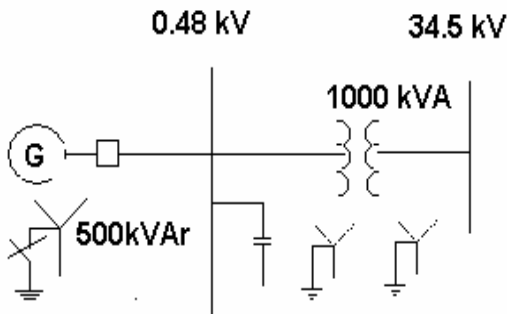


Figura 1 Sistema simplificado de la Empresa Elpidio Gómez

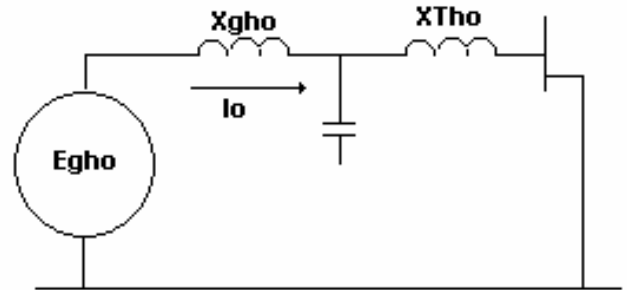


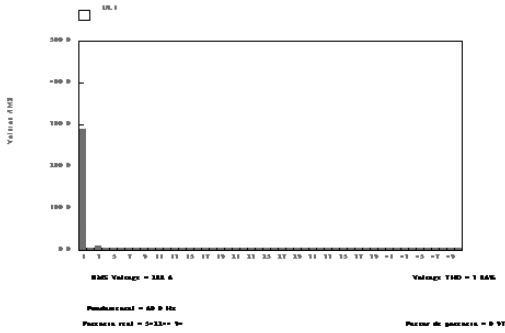
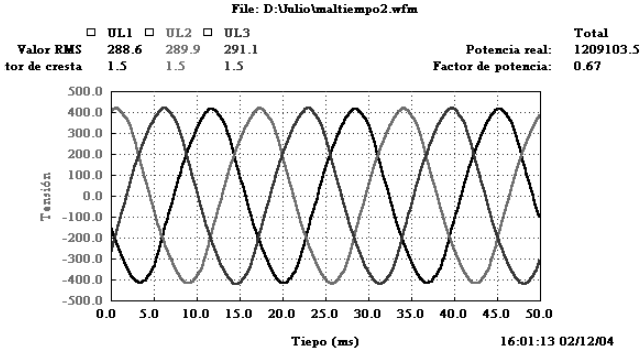
Figura 2 Circuito de secuencia cero

Para calcular en tiempo real la magnitud de la corriente en el neutro debido a la presencia armónica, es necesario conocer el espectro armónico de los voltajes de fase. Esta medición, mostrada en la Figura 3, se llevó a cabo con un analizador de redes POWER SIGHT 3000. En ella se muestra, además de las formas de onda, el grafico de barras y las magnitudes y fases de los armónicos correspondientes para un estado de carga próximo al nominal. Como se observa, para esta máquina, los terceros armónicos son de una magnitud considerable. La Figura 4, muestra las mediciones en un estado sub cargado pudiéndose observar la variación del espectro armónico con el estado de carga del generador.

El contenido armónico incrementa con la carga debido a la reacción de armadura y varía con el factor de potencia de la máquina. Los generadores que se diseñan para suprimir los terceros armónicos se enrollan con un paso de $2/3 \tau$. Este diseño produce una máquina de impedancia reducida de secuencia cero lo cual incrementa la corriente de falla a tierra y permite la circulación de los terceros armónicos generados en otras cargas no lineales del sistema con mayor facilidad.

Con el incremento de la carga, el generador, puede desarrollar un voltaje de tercer armónico significativo. Con un aterramiento sólido, sin impedancia externa, por el circuito de secuencia cero circulará una corriente producida por estos terceros armónicos cuyo valor puede ser considerable y aproximarse incluso a la corriente nominal.

Corrientes armónicas en el circuito de secuencia cero de generadores independientes sincronizados al Sistema Eléctrico Nacional. Caso Elpidio Gómez.



RMS Voltage = 288.6
Fundamental 60.0 Hz
Potencia real = 54244.94
UL1 RMS Voltage.

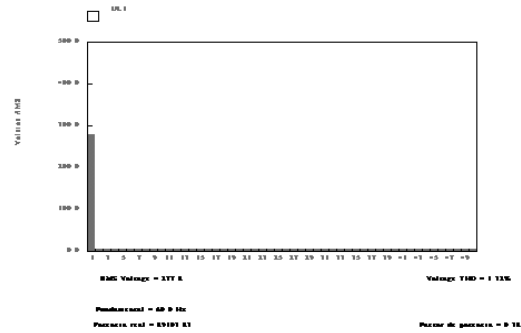
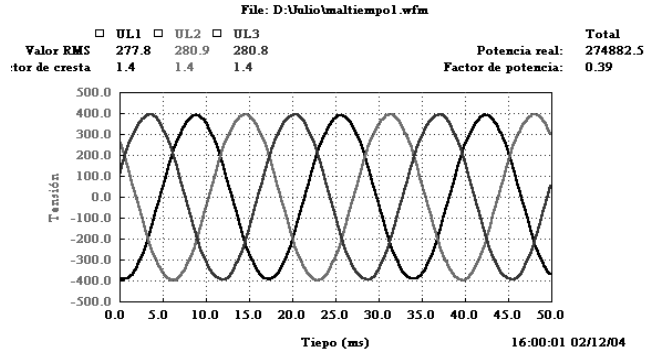
Hrm	Mag	Phase
1	288.157	0.0
3	10.514	-53.7
5	0.252	0.0
7	2.340	73.9
9	1.577	-54.8
11	0.271	0.0
13	0.216	0.0
15	0.255	0.0
17	0.201	0.0
19	0.202	0.0
21	0.511	0.0
23	0.084	0.0
25	0.107	0.0
27	0.152	0.0
29	0.256	0.0

Figura 3. Mediciones con 1209 kW de carga.
El THD de voltaje es de 3,86 %.

Características de los generadores industriales.

Los generadores utilizados en la industria poseen características que lo hacen diferente a los transformadores. En comparación con estos, el generador tiene mucho menos capacidad para soportar las fuerzas electromagnéticas y el calentamiento que producen las corrientes de

cortocircuito. Los generadores se diseñan para soportar corrientes del orden de 10 p.u. y sólo en



RMS Voltage = 277.8
Fundamental 60.0 Hz

Hrm	Mag	Phase	Potencia real =
1	277.984	0.0	89103.83
3	1.767	-167.1	UL1 RMS Voltage.
5	0.275	0.0	
7	2.073	6.1	
9	1.126	-148.8	
11	0.762	144.4	
13	0.222	0.0	
15	0.216	0.0	
17	0.186	0.0	
19	0.283	0.0	
21	0.474	0.0	
23	0.098	0.0	
25	0.119	0.0	
27	0.167	0.0	
29	0.103	0.0	

Figura 4. Mediciones con 275 kW de carga.
El THD de voltaje es de 1,32 %.

casos especiales, definidos por la nema MG1, se diseñan para servicios con corrientes superiores.

Corrientes armónicas en el circuito de secuencia cero de generadores independientes sincronizados al Sistema Eléctrico Nacional. Caso Elpidio Gómez.

Los transformadores pueden soportar corrientes de hasta 25 p.u.; en comparación, el generador soporta mucho menos efecto térmico. Si la corriente es desbalanceada esta capacidad puede ser reducida aún más. [1]

La reactancia de secuencia cero tiene el mínimo valor y la reactancia de secuencia positiva varía en función del tiempo de transición del cortocircuito; subtransiente, transiente y de estado estable.

Todas las limitaciones impuestas a los generadores se deben a que se dispone de menos espacio para alojar el aislamiento y los conductores a los devanados auxiliares y al carácter rotatorio de estas máquinas. Por esta razón los generadores tienen menor capacidad para soportar los sobrevoltajes y sobrecargas debiendo prestarse especial atención a limitar estos efectos con un sistema de aterramiento apropiado.

Si el lado estrella de un transformador Yo/D o Yo/Yo, se conecta a un generador en Yo aterrado, el generador debe poseer un paso de $2/3 \tau$ para eliminar los terceros armónicos. De otra forma la conexión al transformador actúa como un cortocircuito a los terceros armónicos y sin la cancelación de éstos, la corriente circulante limita la capacidad del generador y creará problemas en los relevadores de falla a tierra.

En el caso de la Empresa analizada, debido a que los sistemas de aterramiento del generador y del transformador no estaban interconectados mediante un conductor efectivo, la trayectoria de la corriente de secuencia cero era irregular a través de las estructuras de la vecindad apareciendo chispas y un voltaje de riesgo. La solución que se adoptó fue abrir el circuito que une el centro de la estrella del generador a la red local de aterramiento.

Cálculo de la corriente circulante.

En las Tablas 1 y 2 se muestran los datos del generador y transformador utilizado en esta Empresa. A partir de los mismos se realizan los cálculos de la corriente en el circuito de secuencia cero para cada armónico para las condiciones de carga mostrada en la Figura 3.

Impedancia fundamental de secuencia cero del transformador

$$Z_{BASE} = \frac{kV \times 1000}{\sqrt{3} \times I_N} = \frac{480}{\sqrt{3} \times 1204} = 0.230$$

$$X_{T1} = 0.055 \times 0.230 = 0.0127 \Omega$$

Cálculo de la impedancia fundamental de secuencia cero del generador

$$Z_{BASE} = \frac{kV \times 1000}{\sqrt{3} \times I_N} = \frac{480}{\sqrt{3} \times 2260} = 0.1228$$

$$X_{T1} = 0.08 \times 0.1228 = 0.00982 \Omega$$

Tabla 1 Datos del Generador Tipo DGK 1318 – 4P 1500 kW

S	1875 kVA
I_N	2260 A
Conexión	4Y (6 terminales)
n	1800 r.p.m.
Vexc	45 V
Iexc	356 A
FP	0,8
X_d''	15%
X_2	23%
X_0	8%
Vn	480 V
Grado de protección	IP 44
Ranuras	96
Ranuras /polo	24
$^\circ E$ /ranura	7.5
Bobina/polo/fase	8
Grupos	12
Vueltas por bobina	1
Factor de paso [Kpaso (1-21) 150 $^\circ E$]	0.9659
Factor de distribución [Kdis]	0.9556
Factor de devanado [kpaso \times Kdis]	0.9230 (fundamental)
Factor de paso (tercer armónico)	- 0.707
Factor de distribución (tercer armónico)	0.64
Factor de devanado (tercer armónico)	0.453
Calibre del conductor	1.50 \times 4.0 mm ²

Corrientes armónicas en el circuito de secuencia cero de generadores independientes sincronizados al Sistema Eléctrico Nacional. Caso Elpidio Gómez.

Conductores en paralelo	18
Masa total de cobre	260 Kg.
Densidad de corriente	5.23 A/mm ²

En estas condiciones el generador se encuentra sometido a una sobrecarga térmica equivalente en términos fundamentales de

$P = 3 \times V_F \times I_F = 3 \times 277 \times 158.5 = 131 \text{ kW}$ reduciendo su capacidad de entregar una potencia efectiva superior.

Tabla 2 Datos del transformador

S	1000 kVA
Voltaje	34.5/0.48 kV
Conexión	Yo/Yo
%Z	5.5
I _N	1204 A

Impedancia total de secuencia cero fundamental

$$Z_o = X_{go1} + X_{To1} = 0.00982 + 0.0127 = 0.02252 \Omega$$

$$I_o = \sqrt{\sum_{h=3}^k \left[\frac{E_{gho}}{Xgho + XTho} \right]^2}$$

$$I_{o3} = \frac{E_{go3}}{3 \times Z_o} = \frac{10.514}{3 \times 0.0222} = 158.26 \text{ A}$$

$$I_{o9} = \frac{E_{go9}}{3 \times Z_o} = \frac{1.557}{9 \times 0.0222} = 7.8 \text{ A}$$

$$I_{o12} = \frac{E_{go12}}{12 \times Z_o} = \frac{0.120}{12 \times 0.0222} = 0.45 \text{ A}$$

$$I_{o15} = \frac{E_{go15}}{15 \times Z_o} = \frac{0.225}{15 \times 0.0222} = 0.67 \text{ A}$$

$$I_{oRMS} = \sqrt{(158.26)^2 + (7.8)^2 + (0.45)^2 + (0.67)^2} = 158.5 \text{ A}$$

Para las tres fases la corriente en el neutro es $I = 3 \times I_{oRMS} = 475.5 \text{ A}$. El valor real de la corriente medida fue de 492 A para un error de un 3.3 % lo cual es una aproximación adecuada para un estudio de ingeniería.

III. CONCLUSIONES

1. Los generadores pequeños poseen una distorsión armónica de voltaje que potencialmente pueden crear distorsiones y generar grandes corrientes armónicas por el neutro debido a la baja impedancia del circuito de secuencia cero en sistemas sólidamente aterrados.
2. El sistema de aterramiento empleado y el grupo de conexión de los transformadores es determinante en las pérdidas y la limitación de capacidad que puede resultar en el generador.
3. El aterramiento en los sistemas eléctricos industriales donde trabajan en paralelo la generación propia y la compañía electrificadora, debe evaluarse prestando atención, además, a las corrientes armónicas que puedan circular.

Referencias

[1] NEMA MG1 -1987 Motors and Generators part 22
 [2] Gregory N. Massey "Power Distribution System Design for Operation Under Nonsinusoidal Load Conditions" IEEE Transaction on Industry Applications Vol/31 No 3 May/June 1995 pp. 513 – 519.
 [3] Robert D. Handerson. "Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers" IEEE Transaction on Industry. Applications Vol 30 No 3 May/June 1994
 [4] IEEE 512 – 1992 "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
 [5] De Armas Teyra Marcos A. "Curso de Calidad de la Energía" Instituto de Ingeniería UABC Mexicali, México, Febrero 2004
 [6] De Armas Teyra Marcos A. "Curso de Sistemas de Aterramiento" Instituto de Ingeniería UABC, Mexicali, México, Febrero 2004
 [7] IEEE 142 – 1991 "Recommended Practices for Grounding Electrical Power Systems"