



Editorial de la Universidad
Tecnológica Nacional

Visualización de armónicas de ranura en un generador sincrónico didáctico

Diego M. Ferreyra ⁽¹⁾, Omar D. Gallo ⁽²⁾, Mauricio
A. Sada ⁽³⁾

Grupo **GISENER** (Grupo de Investigación Sobre **ENER**gía) [1 y 3]

Grupo **CIDEME** (Cálculo e Investigación, Desarrollo y Ensayo de Máquinas
Eléctricas) [1 y 2]

Facultad Regional San Francisco
Universidad Tecnológica Nacional – U.T.N.
Argentina

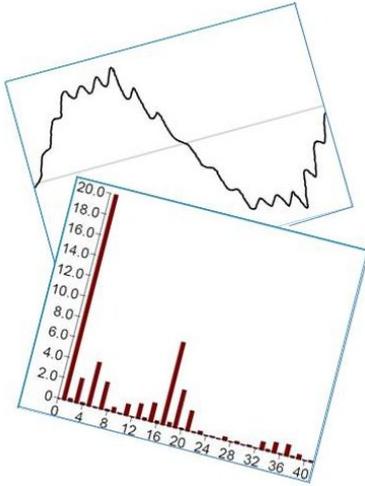
2013

Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional – edUTecNe

<http://www.edutecne.utn.edu.ar>

edutecne@utn.edu.ar

© [Copyright] La Editorial de la U.T.N. recuerda que las obras publicadas en su sitio web son de libre acceso para fines académicos y como un medio de difundir la producción cultural y el conocimiento generados por docentes universitarios y autores auspiciados por las universidades, pero que estos y edUTecNe se reservan el derecho de autoría a todos los fines que correspondan.



Visualización de armónicas de ranura en un generador sincrónico didáctico

Autores: Diego M. Ferreyra ⁽¹⁾, Omar D. Gallo ⁽²⁾, Mauricio A. Sada ⁽³⁾

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco

(1) (3) Grupo **GISENER** (Grupo de Investigación Sobre **ENERGÍA**)
 (1) (2) Grupo **CIDEME** (Cálculo e Investigación, Desarrollo y Ensayo de **Máquinas Eléctricas**)

Resumen

En este trabajo, se describe un ensayo realizado para observar el efecto de las armónicas de ranura en las tensiones de salida de un generador sincrónico trifásico didáctico. Se realiza una breve introducción teórica que se articula con guías de estudio específicas de las asignaturas relacionadas con este trabajo. En función de las características constructivas de la máquina giratoria, se realizan los cálculos de las frecuencias que se esperan observar en la tensión medida. Con las mediciones realizadas sobre el generador en cuestión, se corroboran los cálculos realizados en cuanto a las frecuencias de las armónicas de ranura preponderantes. Finalmente, se compara el nivel de distorsión armónica a la salida del generador con el nivel de distorsión armónica de la red eléctrica disponible en el laboratorio donde se realiza el ensayo.

Palabras clave

máquinas eléctricas, generador sincrónico, armónicas de ranura, armónicas de diente, THD

Objetivos

- Proponer una disposición de laboratorio para la visualización de armónicas de ranura en la tensión de salida de un generador sincrónico
- Proporcionar material auxiliar para complementar los apuntes y la bibliografía de las asignaturas Máquinas Eléctricas, de 4.º nivel de Ingeniería Electromecánica, y Máquinas e Instalaciones Eléctricas, de 4.º nivel de Ingeniería Electrónica.
- Proporcionar un material que permita fortalecer la formación de los estudiantes del 4.º nivel de Ingeniería Electromecánica en el ámbito de Mediciones Eléctricas, generando así un vínculo más sólido entre esta asignatura y Máquinas Eléctricas.
- Presentar un material que pueda servir como introducción a temas de calidad de energía en carreras de grado de ingeniería.

Introducción

El presente trabajo de laboratorio surge como inquietud de los docentes de Máquinas Eléctricas de la carrera Ingeniería Electromecánica, con la finalidad de suplementar la formación de los estudiantes en cuanto a los temas correspondientes a la propia asignatura y a Mediciones Eléctricas, planificada en el mismo nivel de esta carrera.

Sobre la base de la experiencia ganada con la implementación de esta experiencia, se observa que la realización de este trabajo en el 4.º nivel de la carrera también implica que los estudiantes interrelacionen y apliquen conocimientos ya trabajados en otros niveles de la carrera, como en Electrotecnia y Matemática Superior para Ingeniería Electromecánica, ambas asignaturas del 3.º nivel de la carrera.

La actividad específica que aquí se describe es parte de un ensayo de mayor extensión: como parte de la segunda unidad temática de Máquinas Eléctricas, se realiza el ensayo completo de un generador sincrónico. Se denomina ensayo completo a la sucesión de un ensayo en vacío, un ensayo en cortocircuito y diversos ensayos a diferentes estados de carga.

Para evitar una extensión desmesurada del presente trabajo, se asume el manejo por parte del lector de ciertos conocimientos elementales de máquinas eléctricas propuestos en la bibliografía de referencia.

Concretamente, sobre la base de la guía de estudio de la asignatura en cuestión, resulta deseable haber completado el estudio de transformadores, se requiere haber completado el estudio de la introducción de máquinas eléctricas giratorias, y se sugiere haber avanzado prácticamente sobre todos los contenidos relativos a generadores sincrónicos de corriente alterna y los detalles constructivos de sus devanados.

Conceptos fundamentales

Para construir devanados estáticos de máquinas giratorias de corriente alterna, normalmente se recurre a disposiciones distribuidas, con un número de ranuras por polo y por fase N_{rpf} superior a la unidad ($N_{rpf} > 1$). Es decir, se evita la construcción de devanados concentrados, para los cuales el número de ranuras por polo y por fase es exactamente igual a la unidad ($N_{rpf} = 1$).

La razón principal de recurrir a la construcción de devanados distribuidos radica en la necesidad de aprovechar al máximo el material activo de la máquina y facilitar su fabricación. De todos modos, según sea el principio de funcionamiento de la máquina giratoria en cuestión, dicha distribución del devanado estático tiene un objetivo adicional de suma importancia:

- En un generador sincrónico, la conexión en serie de varias bobinas distribuidas ayuda a que la forma de onda en las tensiones de salida se acerque más a una senoide, aún cuando la distribución del flujo magnético en el entrehierro no sea exactamente sinusoidal. De esta forma, se minimiza la introducción por parte del generador de armónicas en la tensión del sistema alimentado.
- En el caso de un motor asíncrono de inducción, la distribución de las bobinas estáticas es importante debido a que el campo magnético giratorio principal de la máquina está producido íntegramente por el estator. Así, una correcta distribución del devanado del estator contribuye a que la distribución del flujo en el entrehierro sea sinusoidal, con lo cual se reducen los problemas de ruido, vibraciones o inconvenientes en el arranque.

A pesar de la importancia de la distribución de los devanados en estas máquinas, con ella surge un inconveniente de funcionamiento: la disposición de las ranuras estáticas sobre el entrehierro implica variaciones regulares y notorias de reluctancia en el circuito magnético por donde circula el flujo principal de la máquina. Las variaciones de reluctancia aludidas se dan por la gran diferencia entre el material ferromagnético de los dientes con respecto al espacio vacío de las ranuras, solo relleno con conductores de un material ligeramente diamagnético (cobre) o a lo sumo levemente paramagnético (aluminio). Tales variaciones de reluctancia se traducen en pulsaciones del flujo magnético que corta los conductores estáticos.

En la Fig. 1, se esquematiza la concentración del flujo magnético en los dientes del estator en comparación con las ranuras, debido a su importante diferencia de reluctancia.

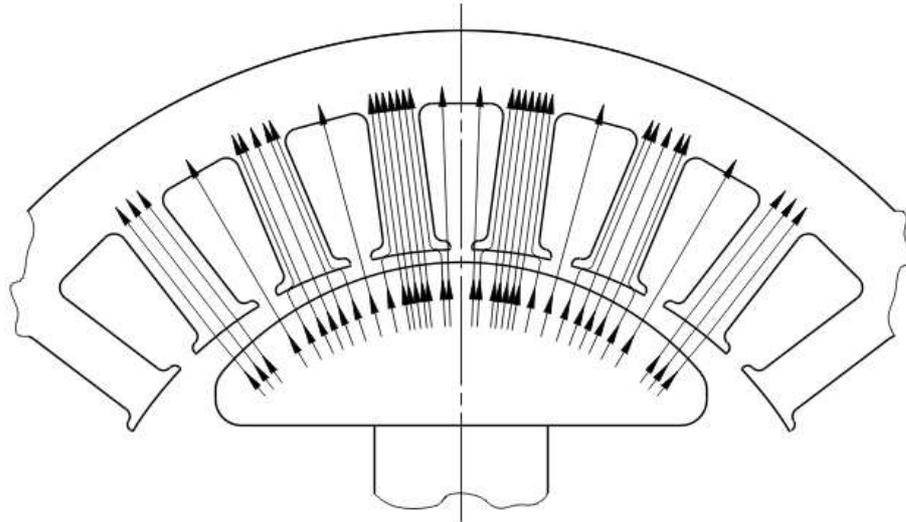


Figura 1. Esquema de la concentración del flujo en los dientes de las ranuras del estator

En un generador sincrónico, el fenómeno que aquí se describe se manifiesta con la aparición de componentes armónicas específicas en las tensiones inducidas en los devanados estatóricos. Haciendo referencia al fenómeno que las origina, dichas armónicas se denominan armónicas de diente o armónicas de ranura. Tales armónicas de ranura suelen ser más notorias en máquinas de gran tamaño, con ranuras abiertas o semiabiertas, pero también pueden hacerse importantes en circunstancias como las que se describen en el presente trabajo.

Como se muestra en la expresión siguiente, las frecuencias de las armónicas de ranura están dadas exclusivamente por la frecuencia nominal y por un conjunto de parámetros constructivos de la máquina:

$$f_R = f \cdot \left(\frac{2m \cdot N_{re}}{P} \pm 1 \right) \quad (1)$$

donde:

f_R : frecuencia de armónica de ranura

f : frecuencia de las tensiones generadas en la máquina

m : número entero, 1, 2, 3, ...

N_{re} : cantidad de ranuras del estator de la máquina

P : cantidad de polos de la máquina

Es útil destacar que, en la expresión anterior, puede identificarse el siguiente valor como el orden armónico de cada una de las frecuencias de ranura obtenidas:

$$\nu = \frac{f_R}{f} = \left(\frac{2m \cdot N_{re}}{P} \pm 1 \right) \quad (2)$$

En las expresiones (1) y (2), los valores menores de m son los que normalmente identifican las armónicas de ranura más problemáticas en cuanto a magnitud, es decir las que se manifiestan más notoriamente en la distorsión de la forma de onda de las tensiones.

Debe tenerse en cuenta que, para una máquina dada, no es trivial desde el punto de vista constructivo reducir los efectos de las armónicas de ranura, ya que dependen de características fijas como el espacio entre las ranuras de distintas ramas de una misma bobina o el grado de apertura de las ranuras. Sin embargo, pueden tenerse en cuenta algunos principios que pueden adoptarse con esta finalidad:

- Es válido afirmar que, en una máquina con mayor cantidad de ranuras en relación con la cantidad de polos, las armónicas de ranura tendrán frecuencias mayores y por ende sus efectos serán menos notorios.
- Para la reducción de algunas armónicas de frecuencias particulares, puede recurrirse a la construcción de devanados con pasos fraccionarios, para los cuales se tiene un número fraccionario de ranuras por polo y por fase, por ejemplo $N_{rpf} = 2\frac{1}{2}$. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que estos devanados contienen grupos de bobinas distintos, lo cual puede ocasionar desequilibrios internos de tensión en los motores.
- Un método muy extendido en los generadores sincrónicos para minimizar la amplitud de los armónicos de ranura es disponer las ranuras del estator con una leve inclinación, de manera que la transición de cada polo frente a cada ranura sea gradual. En las máquinas asincrónicas, dicha inclinación o sesgo se suele realizar en las ranuras del rotor. Es importante notar que este artificio permite reducir la amplitud de las armónicas de ranura, pero no elimina selectivamente ninguna frecuencia. Como ejemplo, se muestra en la Fig. 2 el estator de un generador sincrónico con sus ranuras sesgadas. Naturalmente, este estator se complementa con un rotor cuyos polos se presentan en una disposición recta, sin ninguna inclinación con respecto al eje principal de la máquina.

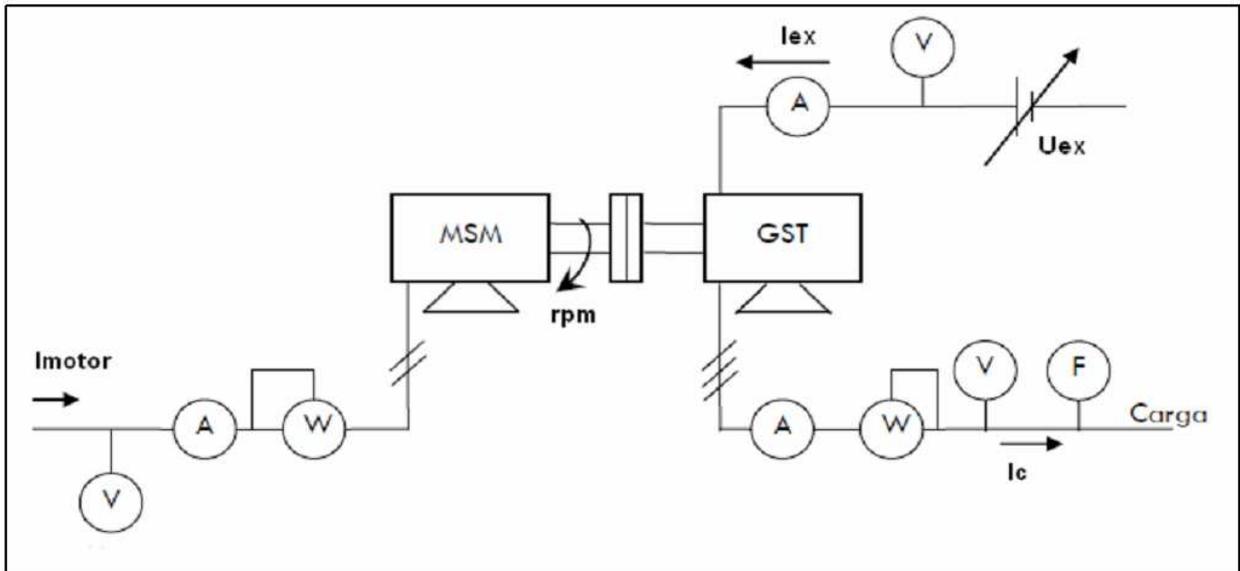


*Figura 2. Estator de un generador sincrónico con sus ranuras sesgadas
(Cortesía DBT S. A.)*

Metodología

Para la realización del trabajo aquí propuesto, se aprovechó una configuración preparada para el ensayo completo de un generador. Para el accionamiento del generador por ensayar, se utilizó un motor sincrónico monofásico; para la excitación del campo del rotor de dicho generador, se utilizó una fuente de corriente continua regulable; y para tomar carga del estator del generador, se utilizó un conjunto trifásico equilibrado de cargas puramente resistivas.

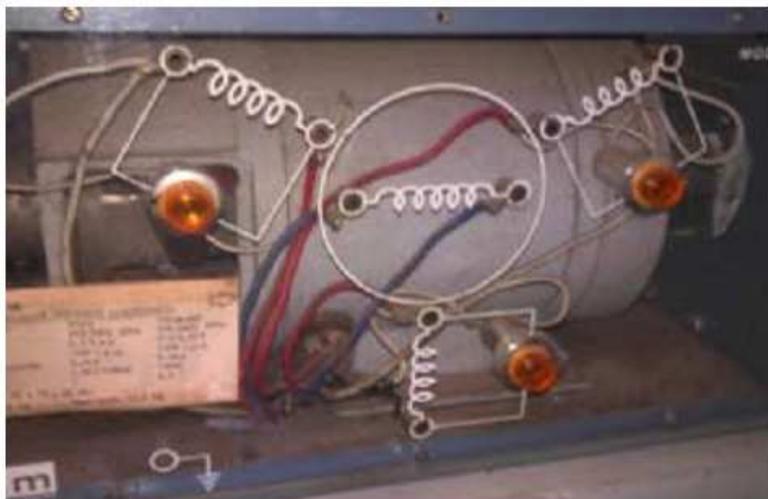
En la Fig. 3, se muestra el esquema de conexiones elemental para la realización del ensayo aquí propuesto.



- | | | |
|----------------------------------|---|--|
| V: medición de tensión | I_{motor}: corriente consumida por el motor de accionamiento | I_c: corriente consumida por la carga del generador |
| A: medición de corriente | rpm: velocidad mecánica del conjunto motor-generador | MSM: motor sincrónico monofásico |
| W: medición de potencia | U_{ex}: tensión de excitación del generador | GST: generador sincrónico trifásico |
| F: medición de frecuencia | I_{ex}: corriente de excitación del generador | |

Figura 3. Esquema de conexión unifilar del ensayo realizado

En la Fig. 4, se muestra el generador ensayado dentro de su gabinete y un detalle de su placa de características, donde se indican sus especificaciones principales para funcionamiento como motor y como generador.



MOTOR-GENERADOR SINCRÓNICO	
MCO 1094 N°	SERV. PERM.
TIPO: POLOS GIRATORIOS	
MOTOR	GENERADOR
220/380V, 50 Hz	220/380V, 50 Hz
0,716,4 A	0,5/0,28 A
1/4 CV (185 W)	185 W
1500 RPM	1500 RPM
I _{ex} : 0,51 A	I _{ex} : 0,56 A
COS FI: 1 PF: 0,8	
INDUSTRIA ARGENTINA	

Figura 4. Generador ensayado

Los datos fundamentales del generador en cuestión son los siguientes: potencia nominal de 185 VA, frecuencia de 50 Hz, tensiones de 220/380 V, y 4 polos (velocidad mecánica 1500 min⁻¹). En la parte izquierda de la figura anterior, se distinguen claramente los dos bornes de entrada al rotor y los tres pares de bornes de salida correspondientes a las tres fases del estator.

En la Fig. 5, se muestra un detalle del interior del generador ensayado, donde se observan 36 ranuras estatóricas sin ninguna inclinación como la que se mostraba en la Fig. 2.

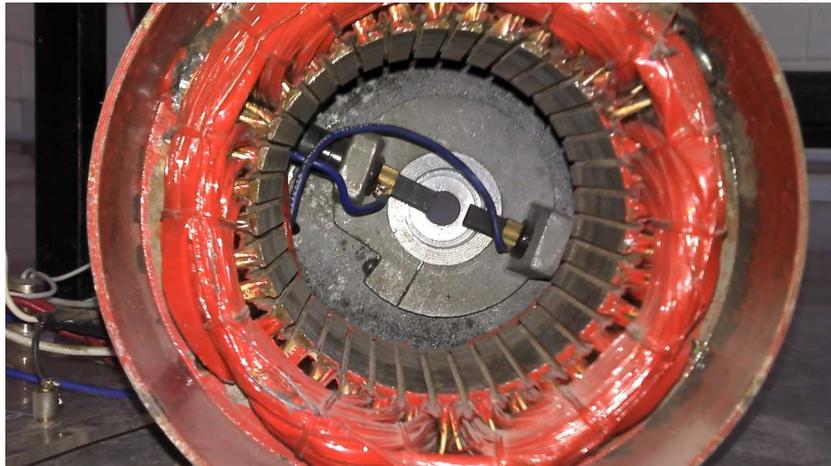


Figura 5. Detalle del interior del generador ensayado

En la Fig. 6, se indican a rasgos generales los bloques principales identificables en la disposición utilizada para el conjunto completo de equipamiento e instrumental.

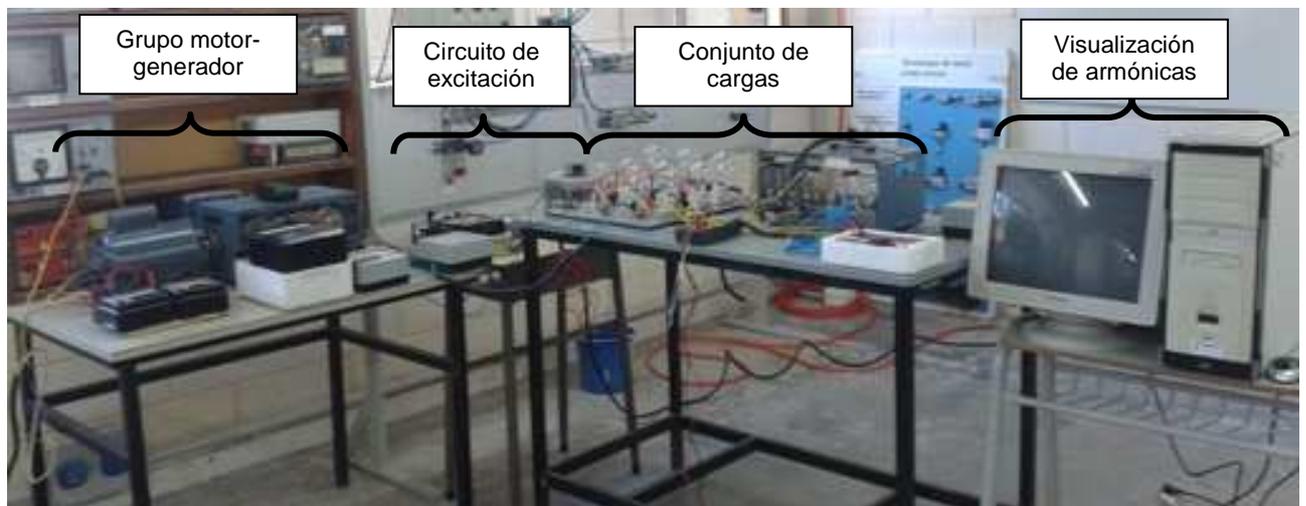


Figura 6. Equipamiento e instrumental utilizado

Para la observación de las armónicas de ranura, se conectó a los bornes del generador un analizador de calidad de potencia marca METREL, modelo Power Quality Analyser-Plus MI 2292, de 0,1 V de resolución y precisión igual a $\pm 0,5\%$ de la lectura ± 2 dígitos para las mediciones de tensión. En la Fig. 7, se muestra este equipo.



Figura 7. Analizador de potencia utilizado para las mediciones

Resultados y discusión

Se conoce que el generador es de 4 polos y que su estator tiene 36 ranuras, cantidad habitual para este tamaño de máquina. Se sabe además que las ranuras del estator no están inclinadas, lo cual propicia la generación de armónicas de ranura de magnitudes considerables.

En vista de estos valores, pueden calcularse las frecuencias de armónicas de ranura que pueden esperarse en las tensiones de salida. Aplicando la expresión (2) para $m = 1$, se obtienen los órdenes armónicos $\nu_1 = 17$ y $\nu_2 = 19$, que según la expresión (1) corresponden a $f_{R1} = 850 \text{ Hz}$ y $f_{R2} = 950 \text{ Hz}$ respectivamente. Es de esperar entonces que sean estas las armónicas de mayor preponderancia por observar en las tensiones de salida.

En la Fig. 8, se muestra la forma de onda de tensión de una de las fases del generador en vacío, donde se manifiesta el efecto de las armónicas de ranura: a la fundamental, se le superponen oscilaciones de amplitud reducida pero de frecuencias notoriamente superiores.

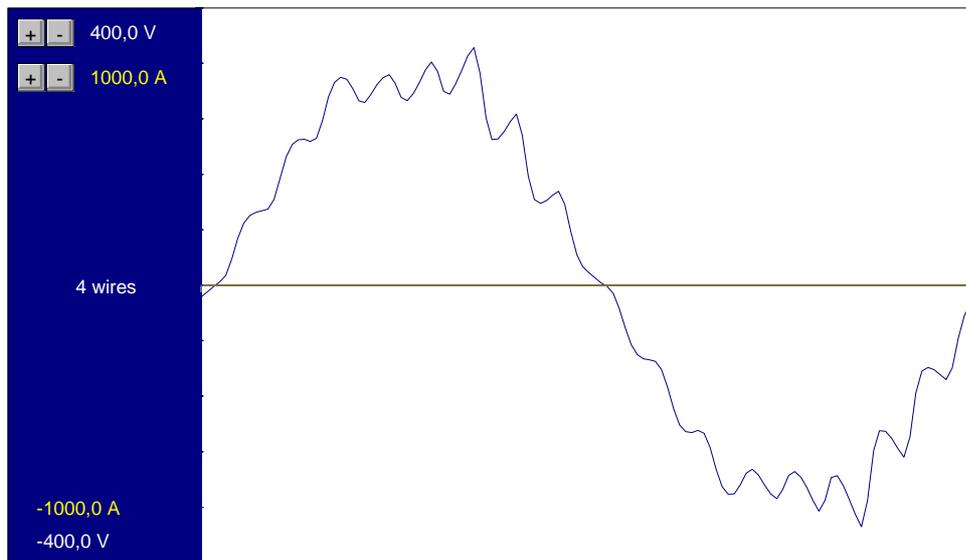


Figura 8. Forma de onda de la tensión del generador en vacío

En la Fig. 9, se muestra el espectro en frecuencia de la misma tensión de la figura anterior, donde se notan amplitudes relativamente importantes para ciertas frecuencias específicas.

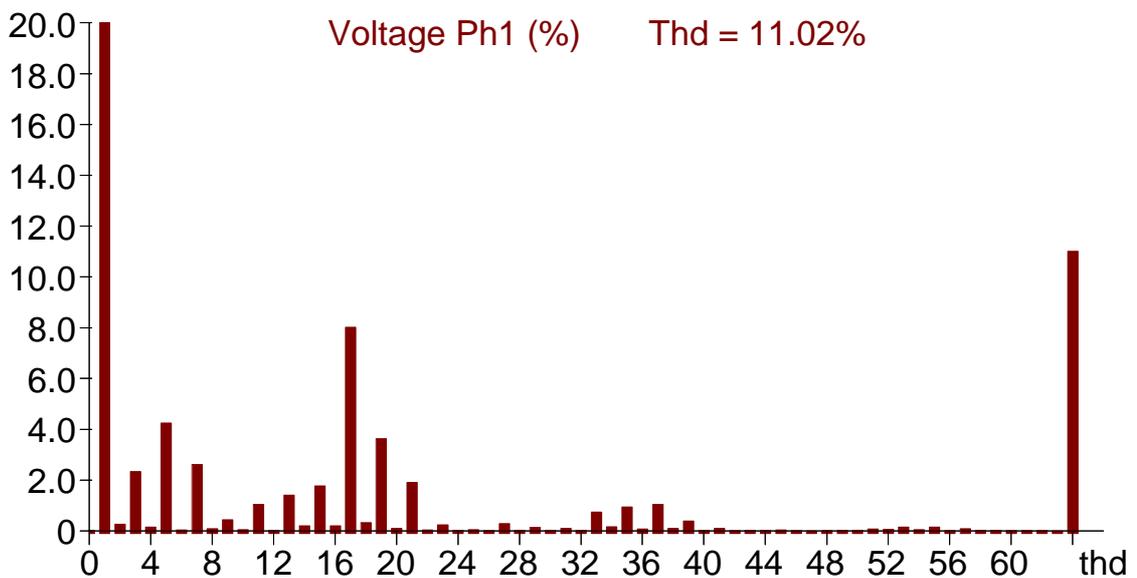


Figura 9. Espectro en frecuencia de la tensión del generador en vacío

Similarmente, en la Fig. 10, se muestra la forma de onda de tensión de una de las fases del generador alimentando una carga resistiva pura del orden del 60 % de su potencia nominal.

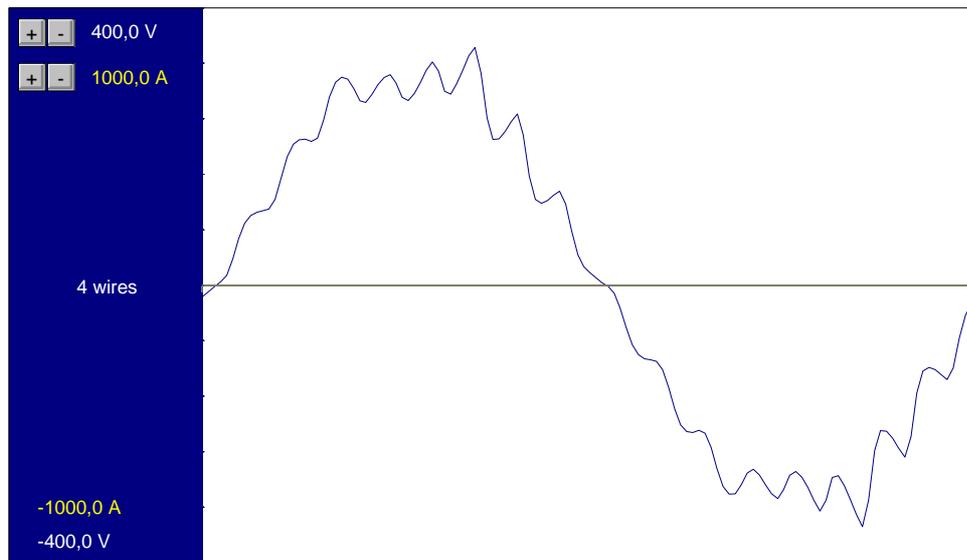


Figura 10. Forma de onda de la misma tensión del generador alimentando una carga resistiva del 60 % de su potencia nominal

Debe tenerse en cuenta que, en este nuevo caso con carga, el valor de la corriente de excitación es superior que para la medición en vacío, a fin de compensar la caída de tensión interna de la máquina. En otras palabras, la fuerza electromotriz interna de los devanados es superior en comparación con la tensión en vacío mostrada en la Fig. 8. Debido a la mayor saturación del circuito magnético, es razonable entonces esperar que la distorsión armónica de esta tensión medida en carga sea superior en comparación con la tensión de vacío.

En la Fig. 11, se muestra el espectro en frecuencia de la tensión del generador alimentando la misma carga resistiva.

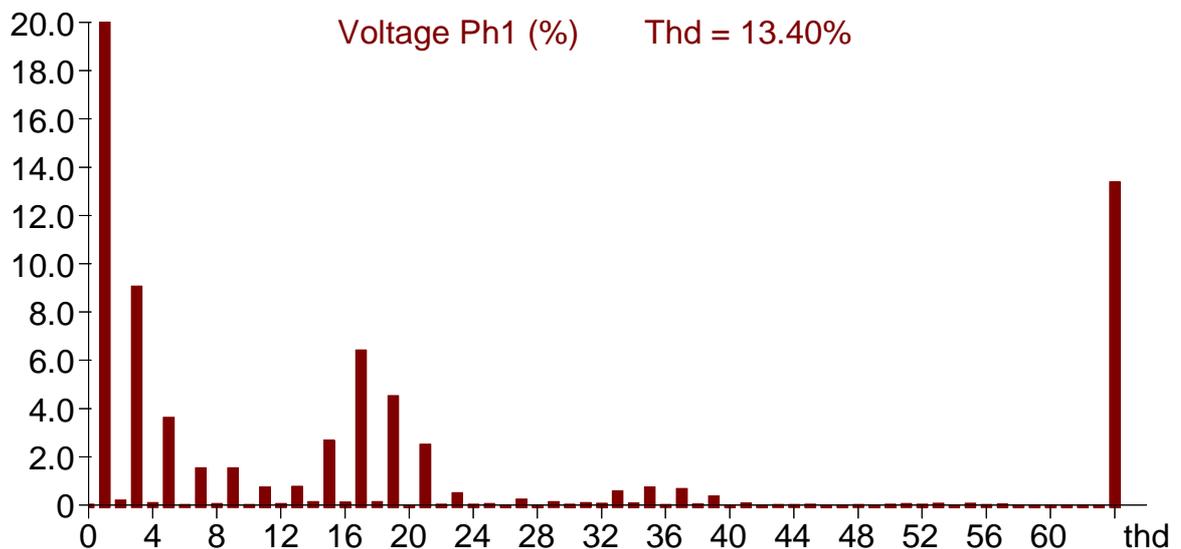


Figura 11. Espectro en frecuencia de la misma tensión del generador alimentando una carga resistiva del 60 % de su potencia nominal

Vistas las frecuencias para las cuales las armónicas de ranura son más notorias, se reconfirma la validez de los valores calculados inicialmente, ya que queda claro de los espectros de frecuencia de las Fig. 9 y 11 que las armónicas de ranura de orden $\nu_1=17$ y $\nu_2=19$ ($f_{R1} = 850 \text{ Hz}$ y $f_{R2} = 950 \text{ Hz}$) son las preponderantes.

En la tensión de salida del generador, se mide un THD (*Total Harmonic Distortion*, tasa de distorsión armónica) del orden del 11 %, lo cual es sumamente elevado desde el punto de vista de los límites establecidos por la normativa internacional y nacional sobre calidad de energía. Por caso, y aunque se referiría a períodos de medición extensos, se considera que la distorsión armónica de la tensión de una red de distribución de baja tensión no debería superar un THD del 8 %. De hecho, frecuentemente se considera que un THD de 4 % ya es suficiente como para considerar la necesidad de aplicar acciones correctivas en una red eléctrica. Para el caso de este trabajo, desde un punto de vista didáctico, resulta de interés la gran magnitud de las armónicas de ranura, pero evidentemente la alimentación provista por este generador distaría de ser la ideal.

A los fines de destacar más claramente lo elevado de la distorsión armónica medida sobre la tensión de salida de este generador didáctico, se replicaron las mismas mediciones en un tomacorriente de la red en el mismo momento del ensayo. En la Fig. 12, se muestra la forma de onda de la tensión de la red.

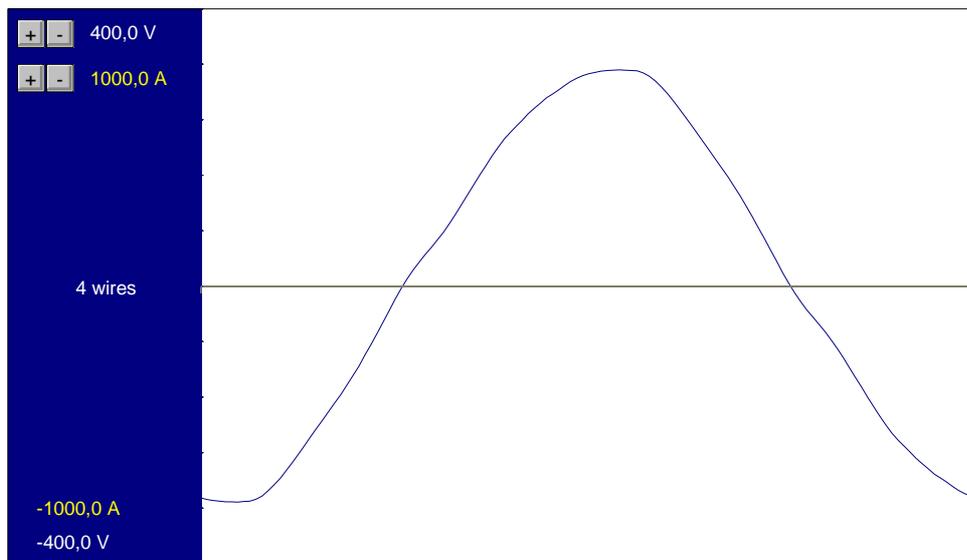


Figura 12. Forma de onda de la tensión de la red

En la Fig. 13, se muestra el espectro en frecuencia de la tensión de red.

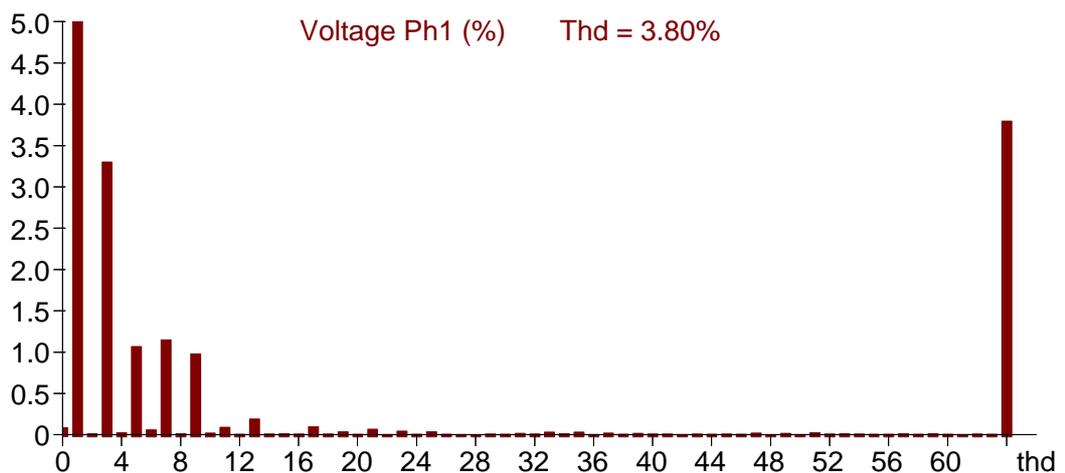


Figura 13. Espectro en frecuencia de la tensión de la red

Todas las mediciones cuyos resultados se muestran en las Fig. 12 y 13 se tomaron alrededor de las 20.00 de un día laboral de agosto de 2013. Por conocimiento previo de la red sobre la cual se midieron las características de tensión, se sabe que el THD observado del 3,80 % es habitual en ese horario, y que puede llegar a valores bastante menores del 2,00 % en otros horarios.

Conclusiones

En el presente trabajo, se detalló la realización de un ensayo elemental de medición de armónicas de ranura sobre un generador de uso didáctico. Las mediciones realizadas permiten cuantificar la incidencia de las armónicas de ranura en un generador sincrónico trifásico. Las características de diseño de esta máquina hacen que los efectos de las armónicas de ranura resulten muy notorios, lo cual reviste interés desde el punto de vista didáctico en el ámbito de Máquinas Eléctricas. Se considera que la realización de este ensayo elemental refuerza entre los estudiantes de Ingeniería Electromecánica numerosos conceptos relativos a las máquinas eléctricas giratorias. La determinación del nivel de distorsión armónica de la tensión generada y su comparación con una medición de la red contribuye a generar entre los estudiantes de grado mayor conciencia sobre aspectos relacionados con la cuantificación de la calidad de la energía eléctrica.

Referencias

- [1] Omar D. Gallo, Diego M. Ferreyra y Raúl A. Beinotti, "Guía de estudio de las asignaturas Máquinas Eléctricas (4.º nivel de Ingeniería Electromecánica) y Máquinas e Instalaciones Eléctricas (4.º nivel de Ingeniería Electrónica)", UTN Facultad Regional San Francisco, San Francisco (Córdoba, Argentina), 2013
- [2] Stephen J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, 4.ª edición, McGraw Hill, México D. F., 2005 (traducción de Stephen J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 4th Edition, McGraw Hill, 2005), Apéndice B
- [3] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., y Stephen D. Umans, *Máquinas Eléctricas*, 6.ª edición, McGraw Hill, México D. F., 2004 (traducción de A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., y Stephen D. Umans, *Electric Machinery*, 6th Edition, McGraw Hill, 2003), Apéndice B
- [4] Juan Corrales Martín, *Cálculo Industrial de Máquinas Eléctricas. Tomo I: Fundamentos del cálculo*, Marcombo Boixareu, Barcelona, 1982
- [5] Michael Liwschitz Garik y Clyde C. Whipple, *Máquinas de corriente alterna*, CECSA, 1970 (traducción de Michael Liwschitz Garik & Clyde C. Whipple, *Alternating Current Machines*, 2nd Edition, D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, 1961), Capítulo 24
- [6] *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*, norma EN 50160:1999 (extractos tomados de [3])
- [7] *Modern Power Quality Measurement Techniques*, cód. 20-750-592, Metrel, Ljubljanska (Eslovenia), 2003
- [8] Resolución ENRE (Ente Nacional Regulador de la Electricidad) N.º 184/2000, *Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico - Etapa 2*, Buenos Aires, 2000

El presente trabajo surgió como resultado indirecto de las actividades realizadas en el ámbito de los siguientes proyectos de investigación desarrollados en la Facultad Regional San Francisco de la Universidad Tecnológica Nacional:

- "Estudio del nivel de distorsión armónica de la tensión de suministro en una red urbana de distribución de energía eléctrica", Rectorado de UTN, cód. UTN1827. Desde 01/01/2013 hasta 31/12/2013. Director: Ing. Diego M. Ferreyra
- "Programa de Gestión de Bobinados (ProGeBo)", Rectorado de UTN, cód. UTI1824. Desde 01/01/2013 hasta 31/12/2014. Director: Mg. Ing. Omar D. Gallo