

Artigo técnico

Harmónicos de ranhura em sistemas de geração eléctrica

Introdução

Os problemas derivados por falta de qualidade eléctrica e mais concretamente pelos harmónicos, são sobejamente conhecidos por técnicos e engenheiros.

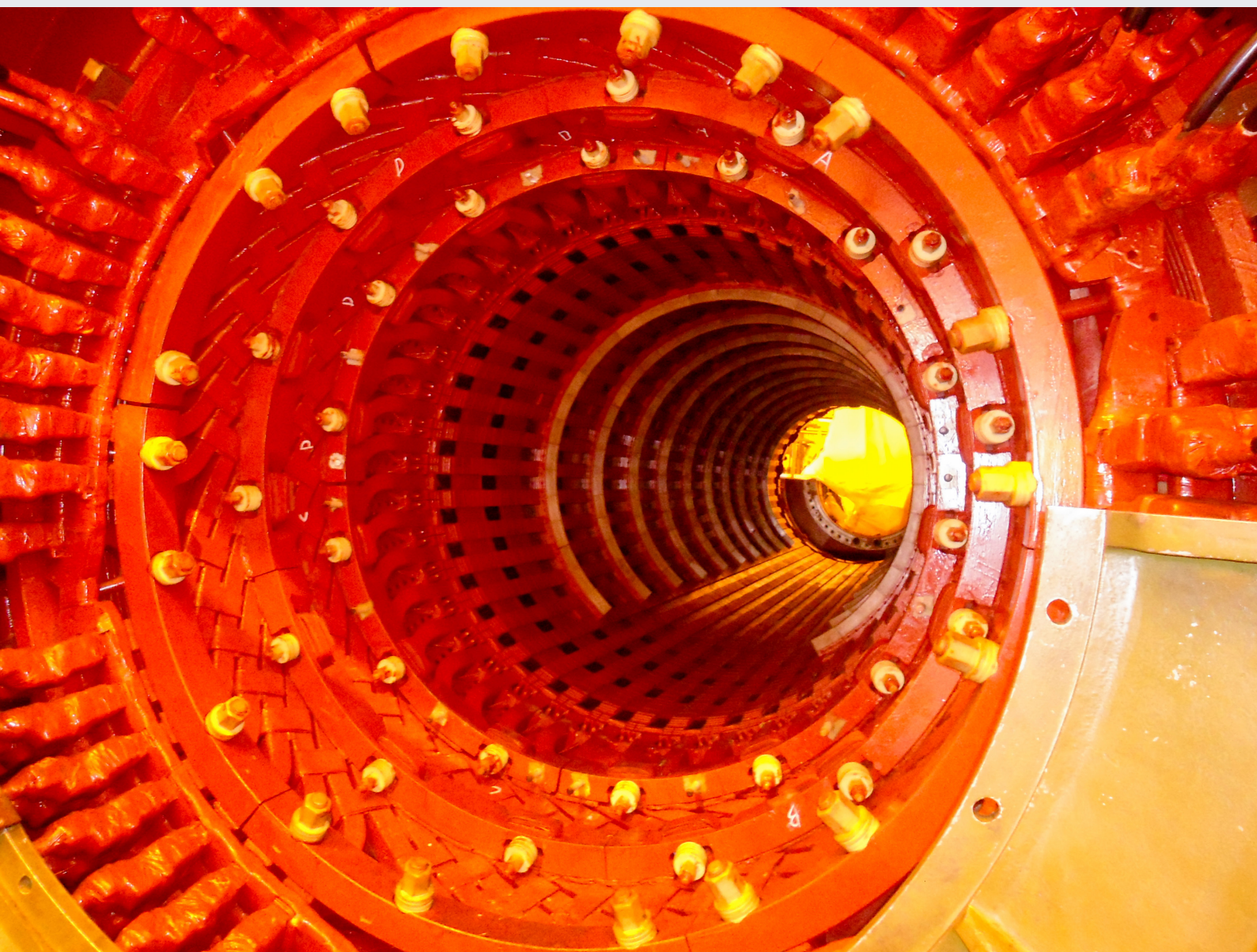
Os sistemas de filtração encarregam-se de reduzir e atenuar a própria corrente harmónica consumida pelos receptores mas, *e se a origem da qualidade eléctrica advier do sistema de geração?*

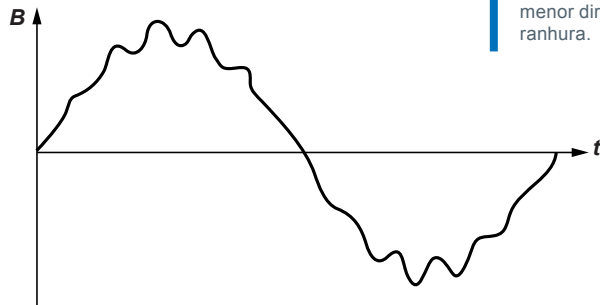
No presente artigo veremos o que são os harmónicos de ranhura e o estudo de um caso de ressonância com este tipo de harmónicos gerados.

Harmónicos de ranhura

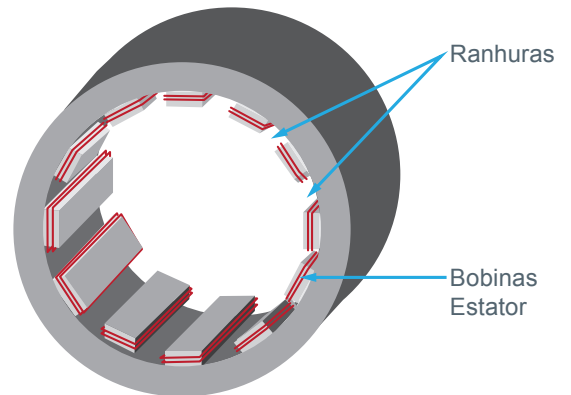
A própria construção dos enrolamentos dos estatores das máquinas eléctricas giratórias de corrente alternada pode criar a aparição de componentes harmónicos em tensão denominados de "harmónicos de ranhura".

A existência de ranhuras uniformes em volta da parte interna do estator cria variações regulares de relutância e de fluxo ao longo da superfície do estator, criando a deformação da onda de tensão.





A relutância de cada ranhura é maior do que a superfície metálica entre elas, através da qual a densidade de fluxo é menor directamente sobre a ranhura.



Ranhuras

Bobinas Estator

Elementos de um Motor de Indução.

A existência de ranhuras uniformes em redor da parte interna do estator cria variações regulares de relutância e de fluxo.

Os harmónicos de ranhura ocorrem em frequências determinadas pelo espaço que existe entre as ranhuras adjacentes. A ordem dos componentes é indicada pela expressão:

$$v_{\text{ranhura}} = \frac{2 \cdot M \cdot S}{P} \pm 1$$

onde:

v_{ranhura} = ordem do componente harmónico

S = número de ranhuras do estator

P = número de pólos da máquina

M = número inteiro, normalmente igual a 1, com o qual se produzem os harmónicos de ranhura de menor frequência.

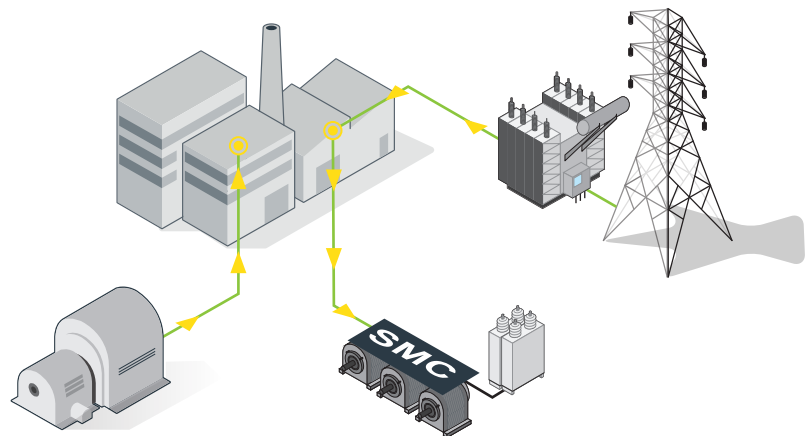
Os principais efeitos dos harmónicos de ranhura são:

- Indução de harmónicos de tensão no sistema eléctrico, deformando a onda em tensão.
- Aumento da taxa de distorção em tensão THDU(%)
- Maior facilidade de apresentar ressonância com baterias de condensadores
- Diminuição do rendimento de motores (menor par, vibrações, etc)
- Actuação inadequada de dispositivos electrónicos sensíveis.

Ressonância por harmónicos de ranhura

Neste caso, encontramos-nos com uma indústria que dispõe de uma dupla alimentação, formada por um gerador de 6,5 MW a 4,16 kV/60Hz e a alimen-

tação directa da rede eléctrica através de uma rede eléctrica primária de 69 kV através de um transformador de 9 MVA e secundário de 4,16 kV/60 Hz. A instalação dispunha de um sistema de controlo de motores (SMC) que era compensado com um condensador de 50 kvar a 4,16 kV.



Problemas

Os problemas que apresentava a instalação eram os seguintes:

- Falha reiterada do arrancador do motor SMC.
- Disparo das protecções e degradação dos condensadores de MT.
- Falhas no sistema de alimentação ininterrupta UPS em BT.
- Danos nos reactores electrónicos.
- Falsos alarmes de aquecimento em compressores, etc.

Esquema simplificado do sistema eléctrico e medições eléctricas.

Provas

Realizaram-se 4 diferentes provas na alimentação do motor:

- Alimentação a partir da rede eléctrica com e sem bateria de condensadores.
- Alimentação do gerador com e sem bateria de condensadores.

Na [Tabela 1](#) podemos ver, em forma de resumo, os principais parâmetros eléctricos medidos, vindo que a variação das componentes harmónicas

sem (Fig.1 e 2) ou com (Fig.3 e 4) bateria de condensadores é praticamente a mesma e sempre com os níveis correctos.

Tabela 1

Comparativo de parâmetros eléctricos em plena carga num motor de 300 HP, alimentado a partir da rede eléctrica, com e sem bateria de condensadores de 50 kVAr, 4, 16 kV																	
~	Condensador 50 kVAr	Tensão (V)	Exigência pedida		F.P.	% THD		% harmónicos em tensão e corrente, fase 3									
			kW	kVAr		V	I	3º		5º		7º		35º		37º	
								V	I	V	I	V	I	V	I	V	I
CFE	Fora de operação	4155	212	125	0.86	1.01	1.92	0.49	0.66	0.38	1.52	0.26	0.81	0.04	0.03	0.16	0.04
	Em operação	4155	212	99	0.90	0.77	1.92	0.14	0.52	0.34	1.54	0.11	0.88	0.04	0.06	0.19	0.09

Fig.1

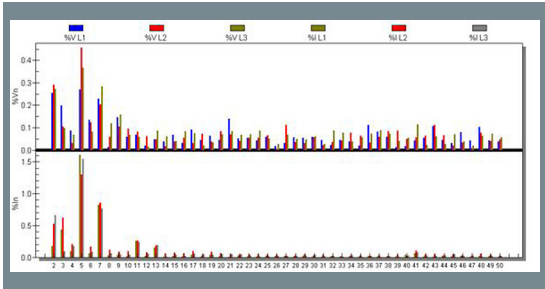


Fig.2

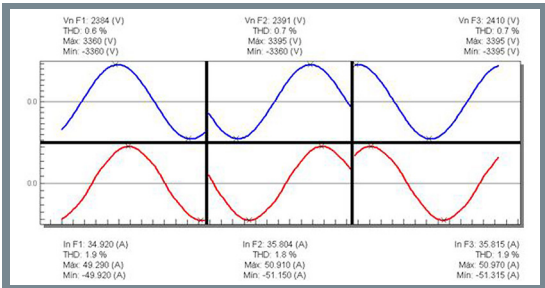


Fig.3

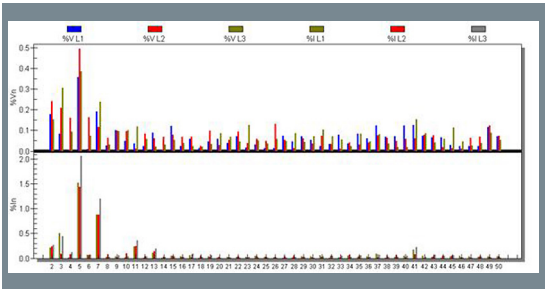
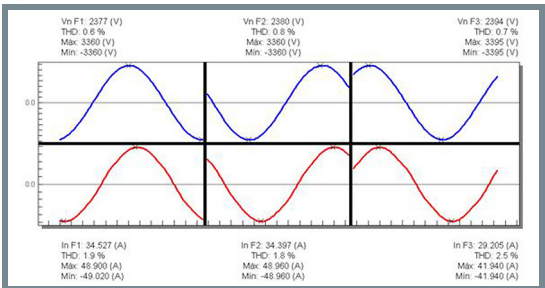


Fig.4



Personalizadas e efectivas.
As baterias de condensadores (CAPACITORES) da CIRCUTOR, são especialmente fabricadas de acordo com o tipo de soluções que sejam necessárias.



Na **Tabela 2** podemos ver o comportamento do sistema alimentado através do gerador de 6,5 MW. Vemos como aparece um aumento considerável na

distorção em tensão quando conectamos o condensador de 50 kvar, principalmente o aumento que é produzido no harmónico de ordem 37.

Tabela 2

Comparativo de parâmetros eléctricos em plena carga num motor de 300 HP, alimentado através de gerador de 6,5 MW, com e sem banco de condutores de 50 kVar, 4, 16 V

~	Condensador 50 kVAr	Tensão (V)	Exigência pedida		F.P.	% THD		% harmónicos em tensão e corrente, fase 3									
			kW	kVAr		V	I	3°		5°		7°		35°		37°	
								V	I	V	I	V	I	V	I	V	I
G 6500 kW	Fora de operação	4155	208	123	0.86	2.96	2.53	0.42	0.11	1.89	2.05	0.80	1.42	0.30	0.02	1.26	0.04
	Em operação	4155	209	97	0.90	4.60	7.20	0.46	0.10	1.74	1.08	0.91	1.18	0.49	1.38	3.96	6.49

Fig.5

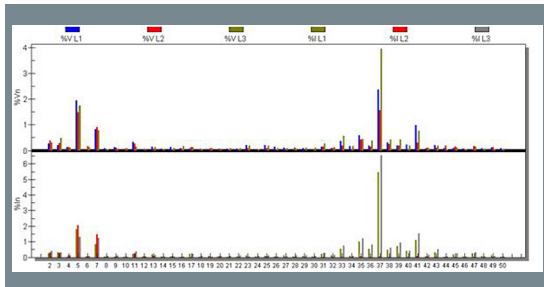


Fig.6

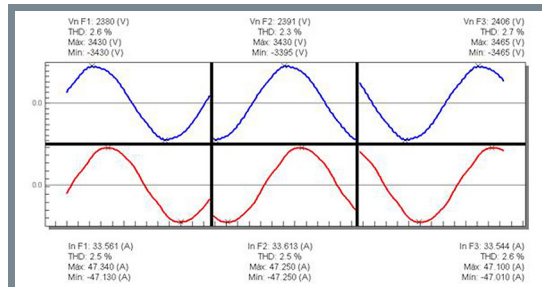


Fig.7

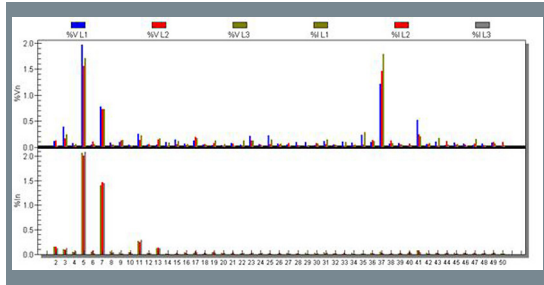
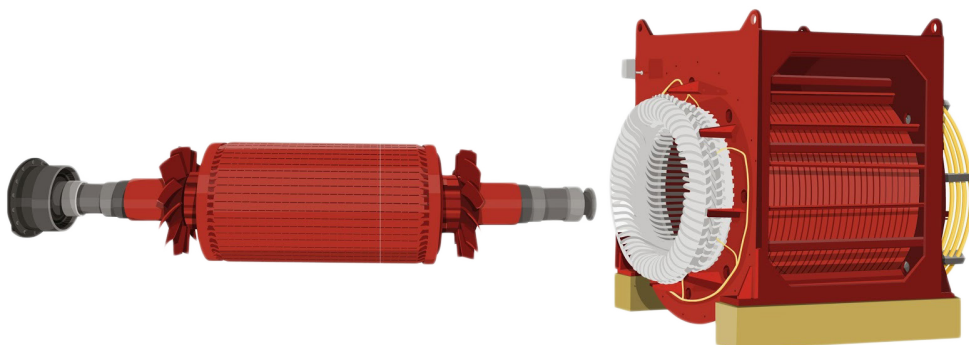
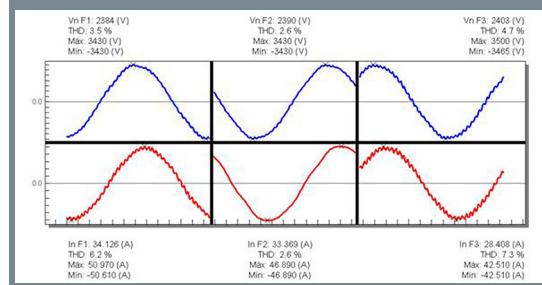


Fig.8



Detalhe do rotor e do estator de um gerador.

Normalmente, tanto no estator como no rotor, existem enrolamentos feitos com condutores de cobre através dos quais circulam correntes fornecidas ou cedidas a um circuito exterior que constitui o sistema eléctrico.

Fonte:
www.endesaeduca.com
Recursos/conceitos básicos/Os geradores

Como se pode verificar nas (Figuras 6 e 7 sem condutor) e (5 e 8 com condutor), vemos que a distorção harmónica a operar com o gerador é maior quando comparada com a distorção que se apresenta operando directamente com a rede eléctrica; vemos que se apresentam os componentes de ordem 5 e 37 com amplitudes aparentemente depreciables (1,89% e 1,26 respectivamente).

Com a bateria de condensadores em operação, apresenta-se a ressonância no harmónico 37º levando a sua amplitude para valores elevados (>3%). Durante a prova surgiram falhas, entre elas, o falso alarme no controlo da caldeira devido à distorção da voltagem que se apresenta em todos os circuitos alimentados pelo gerador.

A causa desta ressonância deve-se à combinação de parâmetros de curto circuito no bus de 4,16 kV, 71230 kVAcc e ao tamanho do condensador, 50 kVAR. Assim, a frequência é dada através de:

$$n = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

onde:

n = ordem harmónica de ressonância
 S_{cc} = Potência de curto circuito no ponto de conexão do banco de condutores
 Q = Potência efectiva do banco de condutores

assim:

$$n = \sqrt{\frac{71230}{50}} = 37,74$$



Fig.9

$$v_{ranhura} = \frac{2 \cdot M \cdot S}{P} \pm 1 = \frac{2 \cdot 1 \cdot 72}{4} \pm 1 = 35 \text{ y } 37$$

Vimos também que o gerador era de 4 pólos e tinha 72 ranhuras no seu estator sendo que, aplicando a fórmula inicial concluímos que os seus harmónicos de ranhura de ordem mais baixa são de ordem 35 e 37, coincidindo com a ressonância apresentada na instalação e que comportava os diferentes problemas subjacentes. (Fig.9)

Um aspecto interessante desta prova foi o facto de que conforme a carga foi descendo até 0, a distorção da onda de tensão se acentuou tal como se mostra na figura com o perfil da taxa de distorção em tensão THD(U) %.

Conclusões

Neste caso, a medida imediata foi deixar o condensador de 50 kVAR permanentemente fora de operação, criando a necessidade de utilizar uma bateria de condensadores com filtro de rejeição dessintonizado a 7%. Assim, a presença do 37º harmónico de tensão, ao ser um problema inerente ao design do gerador, não se pode eliminar e, portanto, em períodos de carga baixa foi apresentado o mesmo falso alarme no controlo da caldeira para o qual foi sugerido, alimentar através de um sistema UPS tipo online, o controlo da caldeira para que se pudesse eliminar este componente da tensão de alimentação.

Cada vez se torna mais imprescindível utilizar equipamentos de compensação com filtros de rejeição ou dessintonizados devido ao aumento de aplicações com dispositivos electrónicos e de electrónica de potência, cujos efeitos hoje em dia não podemos desvalorizar.

A implementação de um sistema de monitorização facilita-nos o diagnóstico, o controlo e a utilização eficiente da energia eléctrica e o poder de detectar qualquer anomalia que surja na nossa instalação. ▀



Bibliografia:

- "Máquinas eléctricas"
 Stephen Chapman
 Ed. McGrawHill 2ª edição.
- "Eficiencia en el uso de la energía eléctrica"
 Josep Balcells,
 Francesc Fornieles,
 Vicente Barra.
 Ed. Marcombo