



Artykuł techniczny

Harmoniczne żłobkowe

w systemach
wytwarzania prądu
elektrycznego

Wprowadzenie

Technicy i inżynierowie spotykają się dość często z problemami wynikającymi ze złej jakości zasilania prądem elektrycznym, na skutek występowania harmonicznych.

Systemy filtrowania mają za zadanie zmniejszanie i ograniczanie prądu harmonicznego pobieranego przez odbiorniki, lecz *co robić, gdy przyczyną złej jakości zasilania prądem elektrycznym jest sam system, który go wytwarza?*

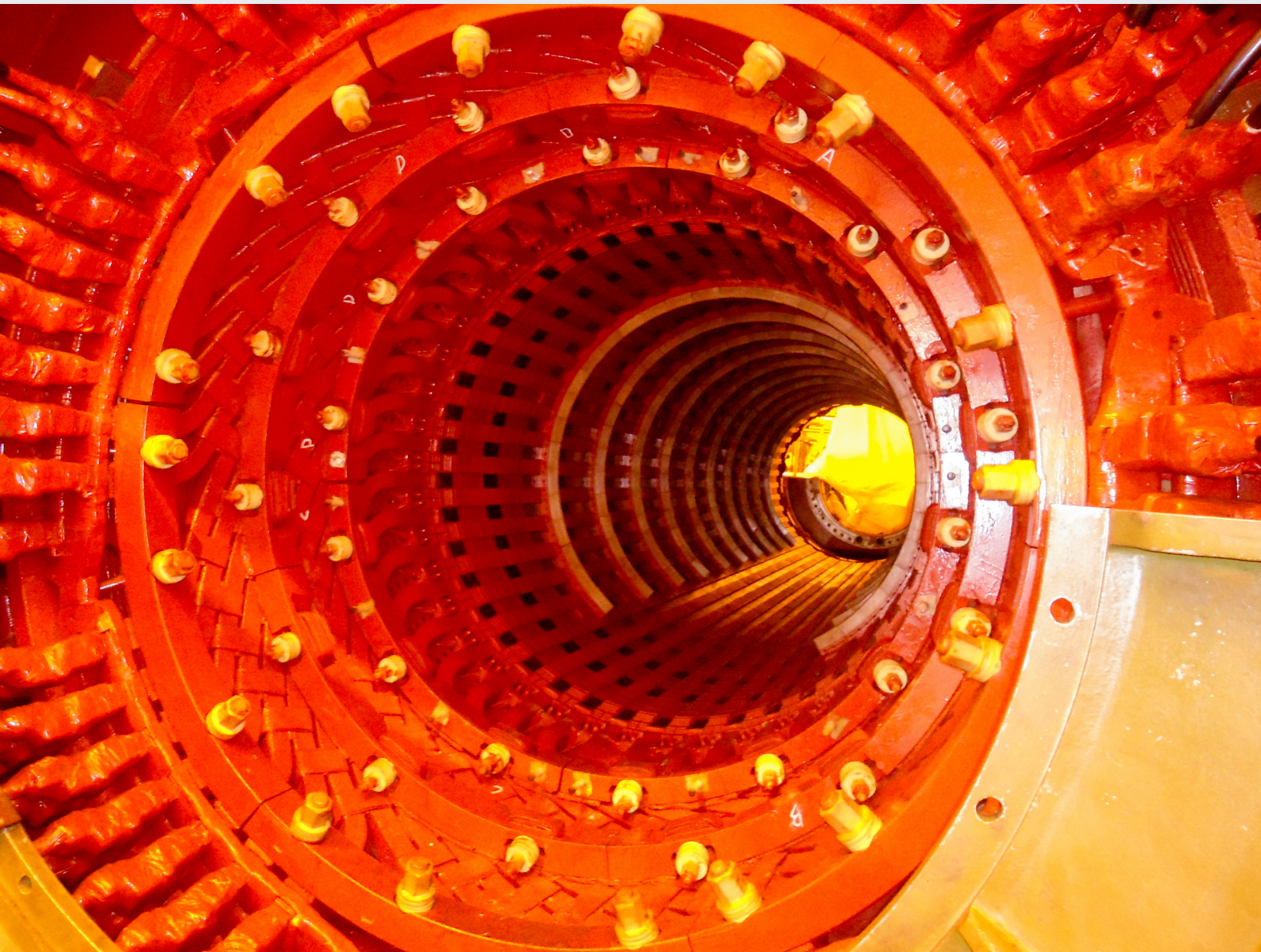
W niniejszym artykule zapoznamy się ze zjawiskiem harmonicznym żłobkowym oraz przeanalizujemy przypadek z

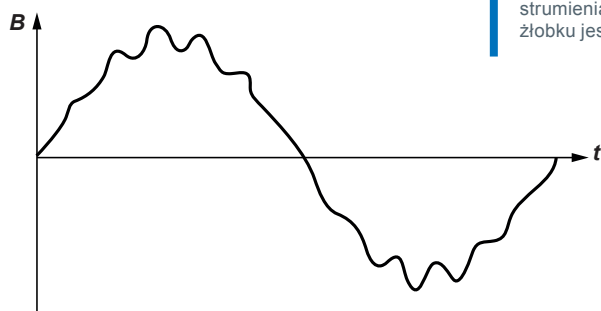
rezonansem z tym rodzajem generowanych harmonicznych.

Harmoniczne żłobkowe

Konstrukcja uzwojenia stojanów obrotowych maszyn elektrycznych zasilanych prądem przemiennym może spowodować pojawienie się składowych harmonicznych napięcia, zwanych "harmonicznymi żłobkowymi".

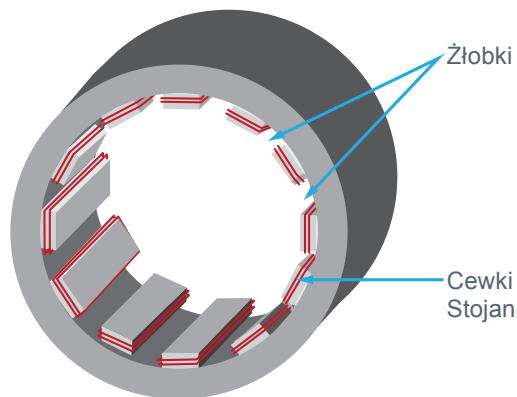
Występowanie jednolitych żłobków wokół wewnętrznej części stojana powoduje regularne wahania reluktancji oraz strumienia na całej powierzchni stojana, powodując odkształcenie fali napięciowej.





Stojan ze żłobkami

Reluktancja każdego rowka jest większa od metalowej powierzchni między żłobkami; z tego względu gęstość strumienia bezpośrednio na żłobku jest mniejsza.



Elementy silnika indukcyjnego.

Występowanie jednolitych żłobków wokół wewnętrznej części stojana powoduje regularne wahania reluktancji i strumienia.

Harmoniczne żłobkowe występują w częstotliwościach określonych przez przestrzeń, która się znajduje między sąsiadującymi żłobkami. Rząd składowych jest określany przez wyrażenie:

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

gdzie:

$v_{\text{żłobek}}$ = rząd składowej harmonicznej

S = liczba żłobków w stojanie

P = liczba biegunów w maszynie

M = liczba całkowita, zazwyczaj równa 1, przy której wytwarzają się harmoniczne żłobkowe mniejszej częstotliwości.

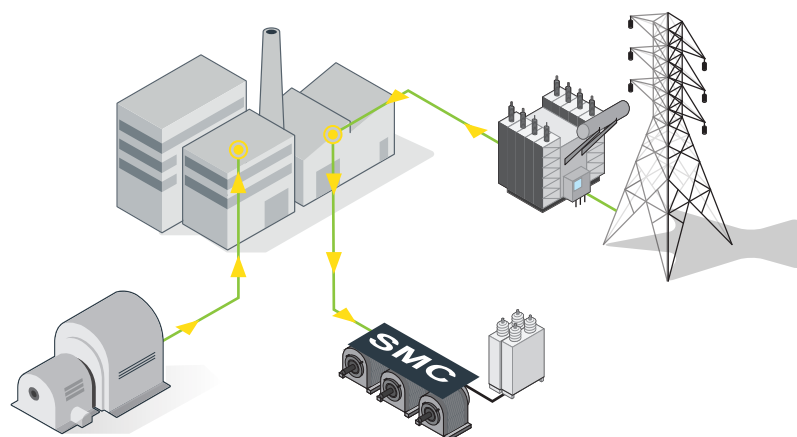
generatora 6,5 MW o napięciu 4,16 kV/60Hz oraz zasilania bezpośredniego z sieci elektrycznej poprzez główną sieć elektryczną 69 kV za pomocą przekładnika 9 MVA oraz poprzez podrzędną sieć elektryczną 4,16 kV/60 Hz. Instalacja posiadała system sterowania silnikami (SMC), który był kompensowany za pomocą kondensatora 50 kvar o napięciu 4,16 kV.

Główne skutki harmoniczných żłobkowych to:

- Indukowanie harmoniczných napięć w systemie elektrycznym, powodujących odkształcenie fali napięciowej.
- Zwiększenie współczynnika zawartości wyższych harmoniczných w napięciu THDU(%)
- Większa podatność na występowanie rezonansu z bateriami kondensatorów
- Zmniejszenie wydajności silników (mniejszy moment obrotowy, drgania itd.)
- Nieprawidłowe działanie czułych urządzeń elektronicznych.

Rezonans spowodowany przez harmoniczne żłobkowe

W tym przykładzie mamy do czynienia z instalacją przemysłową wyposażoną w podwójny system zasilania złożony z



Problemy

Problemy, które występowały w instalacji:

- Powtarzające się usterki rozrusznika silnika SMC.
- Zadziałanie zabezpieczeń i uszkodzenie kondensatorów średniego napięcia.
- Usterki w systemie nieprzerwanego zasilania UPS w instalacji niskiego napięcia.
- Uszkodzenia w statecznikach elektronicznych.
- Fałszywe alarmy dotyczące przegrzania w sprężarkach itd.

Uproszczony schemat systemu elektrycznego i pomiarów elektrycznych

Testy

Wykonano 4 różne testy systemu zasilania silnika:

- Zasilanego z sieci elektrycznej z i bez baterii kondensatorów.
- Zasilanego z generatora z i bez baterii kondensatorów.

W Tabeli 1 podano, jako podsumowanie, główne pomiary parametrów elektrycznych, stwierdzając, że wahania składowych harmonicznych

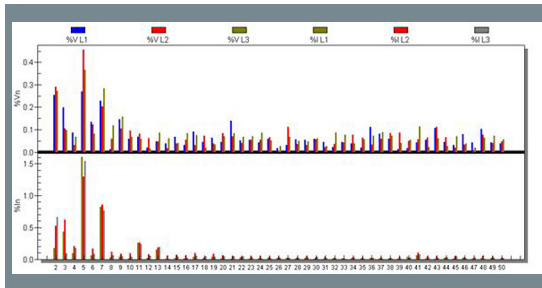
bez baterii (Rys. 1 i 2) lub z (Rys.3 i 4) bateriami kondensatorów są praktycznie takie same i w każdym momencie znajdują się na prawidłowym poziomie.

Tabela 1

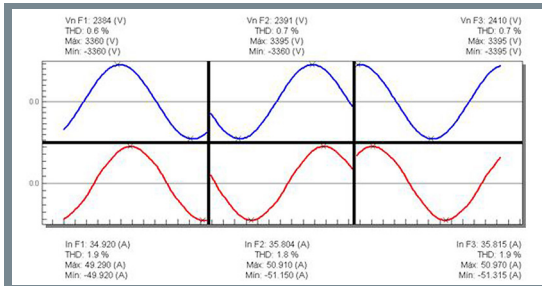
Porównanie parametrów elektrycznych przy pełnym obciążeniu silnika 300 KM, zasilanego z sieci elektrycznej, z bateriami i bez baterii kondensatorów 50 kVar, 4, 16 kV

~	Kondensator 50 kVar	Napięcie (V)	Zmierzony pobór mocy		Współczynnik mocy	% THD		% harmonicznych napięcia i prądu, faza 3									
			kW	kVar		V	I	3.		5.		7.		35.		37.	
								V	I	V	I	V	I	V	I	V	I
CFE	Wyłączony	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
	Załączony	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

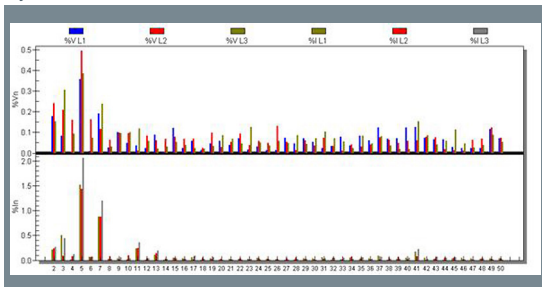
Rys.1



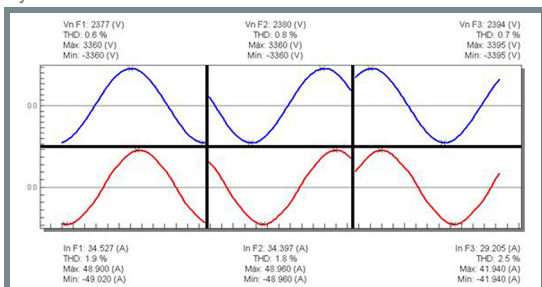
Rys.2



Rys.3



Rys.4



Spersonalizowane i wydajne.
Baterie kondensatorów (KONDENSATORY) firmy CIRCUTOR są produkowane na życzenie, w zależności od potrzebnych rozwiązań.



W Tabeli 2 zostało przedstawione zachowanie systemu zasilanego przez generator 6,5 MW. Widzimy, jak pojawia się widoczny wzrost zawartości

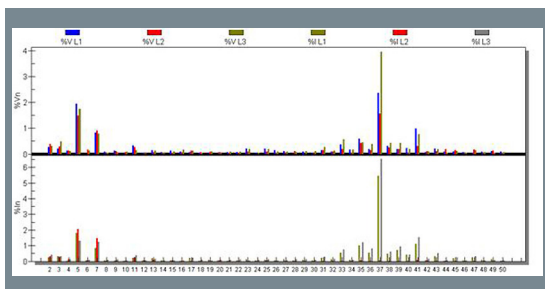
wyższych harmonicznych w napięciu po podłączeniu kondensatora 50 kvar. Wzrost głównie występuje w harmonicznej rzędu 37.

Tabela 2

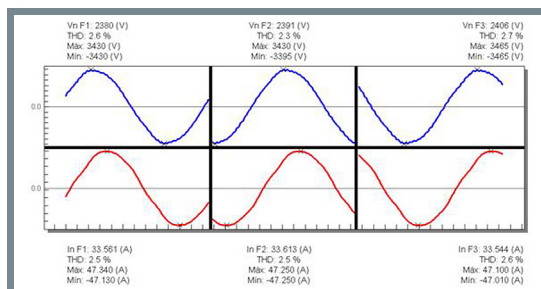
Porównanie parametrów elektrycznych przy pełnym obciążeniu silnika 300 KM, zasilanego przez generator 6,5 MW, z bateriami i bez baterii kondensatorów 50 kVar, 4, 16 kV

~	Kondensator 50 kVar	Napięcie (V)	Zmierzony pobór mocy		Współczynnik mocy	% THD		% harmonicznych napięcia i prądu, faza 3									
			kW	kVar		V	I	3.		5.		7.		35.		37.	
								V	I	V	I	V	I	V	I	V	I
G 6500 kW	Wyłączony	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
	Załączony	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

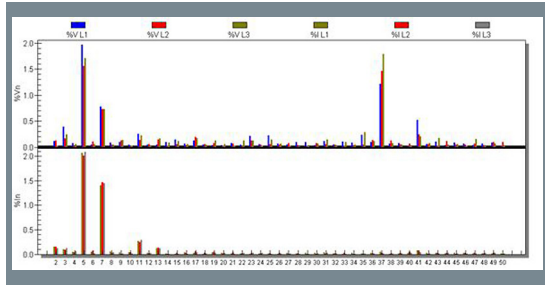
Rys.5



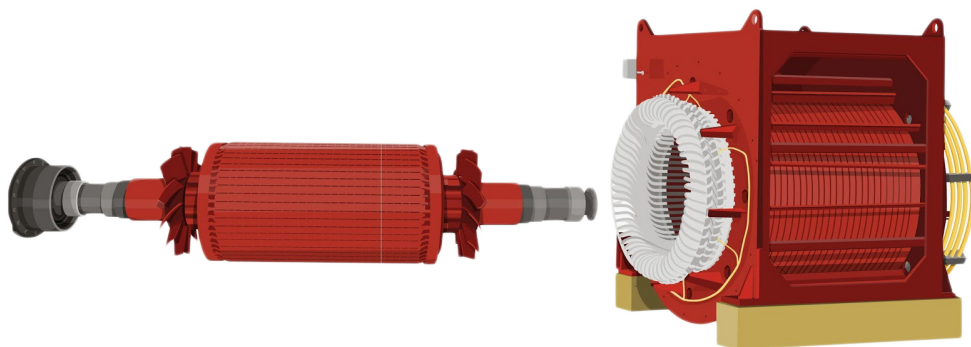
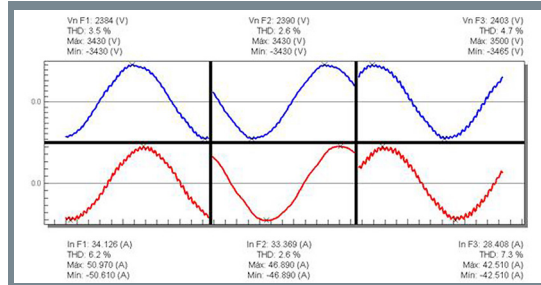
Rys.6



Rys.7



Rys.8



Informacje szczegółowe dot. wirnika i stojana generatora.

Zazwyczaj zarówno w stojanie jak i w wirniku występują uzwojenia wykonane z przewodów miedzianych, którymi przepływa prąd dostarczany lub przekazywany do obwodu zewnętrznego stanowiącego system elektryczny.

Źródło:
www.endesaeduca.com
Zasoby / podstawowe terminy /
Generatory

Jak można zauważyć na rysunkach 6 i 7 (bez kondensatora) oraz 5 i 8 (z kondensatorem), widzimy, że zawartość wyższych harmonicznych przy korzystaniu z generatora jest większa niż przy korzystaniu bezpośrednio z sieci elektrycznej. Można zauważyć, że występują składowe harmoniczne rzędu 5. i 37. o amplitudach pozornie nieistotnych (odpowiednio 1,89% i 1,26%).

Przy działaniu z baterią kondensatorów, występuje rezonans w harmonicznej 37., powodując zwiększenie jej amplitudy do dużych wartości (>3%). Podczas testu wystąpiły usterki, między innymi, fałszywy alarm systemu sterowania kotłem, ponieważ zawartość wyższych harmonicznych napięcia występuje we wszystkich obwodach zasilanych przez generator.

Przyczyną tego rezonansu jest kombinacja parametrów zwarcia w magistrali 4,16 kV, 71230 kVAcc oraz rozmiaru kondensatora 50 kVAr. W rezultacie częstotliwość dostrojenia jest określana przez:

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

gdzie:

n = rząd harmonicznej rezonansowej
 S_{cc} = Moc zwarcia dostępna w punkcie podłączenia baterii kondensatorów
 Q = Moc skuteczna baterii kondensatorów

zatem:

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



Rys. 9

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

Zauważyliśmy również, że generator jest 4-biegunowy i posiada 72 żłobki w stojanie. W związku z tym, stosując początkowy wzór, dowiadujemy się, że jego harmoniczne żłobkowe najniższego rzędu to 35. i 37., przy czym jednocześnie występuje rezonans w instalacji, pociągający za sobą różne ukryte problemy. (Rys.9)

Ciekawym aspektem tego testu był fakt, że w miarę jak obciążenie spadało do 0, odkształcenie fali napięciowej wzmacniało się w sposób pokazany na rysunku z profilem współczynnika zawartości wyższych harmonicznych w napięciu THD(U)% .

Wnioski

W tym przypadku, natychmiastowy środek zaradczy polegał na odłączeniu na stałe kondensatora 50 kVAr, powodując konieczność użycia odstrojonej na 7% baterii kondensatorów z filtrem tłumiącym. Jednak obecność 37. harmonicznej napięcia, będąca problemem związanym bezpośrednio z konstrukcją generatora, nie może zostać wyeliminowana. W konsekwencji, w okresach niskiego obciążenia, wystąpił ten sam fałszywy alarm systemu sterowania kotłem. W związku z tym zasugerowano zasilanie systemu sterowania kotłem za pomocą systemu UPS typu online, w celu wyeliminowania tej składowej z napięcia zasilania.

Na skutek zwiększenia ilości aplikacji z wykorzystaniem urządzeń elektronicznych oraz energoelektronicznych, których wpływu nie można pomijać, coraz częściej niezbędne okazuje się stosowanie urządzeń kompensacyjnych z filtrami tłumiącymi lub odstrojonymi. Wdrożenie systemu monitorowania ułatwia nam diagnostykę, kontrolę i wydajne wykorzystanie energii elektrycznej, a także wykrywanie wszelkich nieprawidłowości występujących w naszej instalacji. ▀



Bibliografia:

- "Maszyny elektryczne"
 Stephen Chapman
 Wyd. McGrawHill 2. wydanie.
- "Efektywność zużycia energii elektrycznej"
 Josep Balcells,
 Francesc Fornieles,
 Vicente Barra.
 Wyd. Marcombo