

Piotr Gnaciński, Marcin Pepliński, Mariusz Szweda
Akademia Morska w Gdyni

WPLYW SUBHARMONICZNYCH I INTERHARMONICZNYCH NAPIĘCIA NA PRĄDY W UZWOJENIACH SILNIKA INDUKCYJNEGO

INFLUENCE OF SUBHARMONICS AND INTERHARMONICS VOLTAGE ON CURRENTS IN WINDINGS OF AN INDUCTION MACHINE

Abstract: In power systems commonly appear various disturbances such as voltage unbalance, voltage deviations, frequency deviations (in autonomous power systems) and voltage waveform distortions. Voltage waveform distortions are usually associated with presence of higher harmonics. Also, in some power systems are appeared voltage components, which have frequency components higher than the fundamental frequency and are not an integer multiple of the fundamental one - called interharmonics. Sometimes interharmonics occur together with subharmonics, i.e. voltage components with frequency less than the fundamental one. Both interharmonics and subharmonics are the most seldom investigated power quality disturbances, and their impact on an induction machine is still not satisfactorily explained. This paper is devoted to the effect interharmonic and subharmonic voltage components on currents in windings of an induction machine. The results of experimental investigations are presented for two low-power induction cage machines.

1. Wstęp

W systemach elektroenergetycznych powszechnie występują odkształcenia krzywej przebiegu napięcia. Zazwyczaj wiąże się je z obecnością wyższych harmonicznymi, niemniej w niektórych systemach mogą pojawiać się składowe napięcia o częstotliwości niższej od podstawowej harmonicznej, zwane subharmonicznymi oraz składowe napięcia o częstotliwości większej niż harmoniczna podstawowa i niebędące jej całkowitą wielokrotnością – interharmoniczne. Obecność subharmonicznych i interharmonicznych w przebiegach napięcia jest spowodowana pracą niektórych przekształtników energoelektronicznych oraz takich urządzeń jak: pieców łukowych, maszyn spawalniczych, podgrzewaczy plazmowych oraz silników pracujących z obciążeniem okresowo zmiennym [17]. Należy nadmienić, że okresowe wahania wartości skutecznej napięcia są specyficznym przypadkiem jednoczesnego występowania subharmonicznych i interharmonicznych.

Rozważane zaburzenia niekorzystnie wpływają na pracę odbiorników energii elektrycznej powodując m.in. zjawisko migotania światła [17] oraz momenty pasożytnicze, dodatkowe straty mocy i wzrost temperatury uzwojeń w silnikach indukcyjnych [1-4,7-13,15]. Szczególnie znaczący jest wpływ subharmonicznych napięcia na obciążenia cieplne i momenty pasożytnicze silników indukcyjnych. Ze względu na niską

częstotliwość subharmonicznych prądów są słabo tłumione przez reaktancję uzwojeń. W efekcie, nawet niewielka zawartość subharmonicznych w napięciu zasilającym może spowodować przepływ subharmonicznych prądów o znaczących nieraz wartościach. Powstające w ten sposób dodatkowe składowe prądów prowadzą do powstawania dodatkowych strat mocy. Ich skutkiem jest wzrost temperatury uzwojeń, powodujący przyśpieszenie procesu starzenia cieplnego układu izolacyjnego i skrócenie czasu życia maszyny [1-3,10]. Ze względu na nagrzewanie silników indukcyjnych oraz momenty pasożytnicze, autorzy niektórych prac [3,4] postulują, aby w systemach elektroenergetycznych dopuszczalne amplitudy subharmonicznych napięć nie przekraczały 0,1% składowej podstawowej.

Dotychczas wpływ subharmonicznych i interharmonicznych napięć na silnik indukcyjny badano głównie metodą symulacyjną. W pracach de Abreu i Emanuela [1-3] zamieszczono wyniki obliczeń dotyczących wpływu subharmonicznych na czas życia maszyny. Posłużono się modelem maszyny, który nie uwzględniał wahań prędkości obrotowej wału i nie został zweryfikowany eksperymentalnie. Jak wykazuje dokonane przez autorów porównanie wyników pomiarów cieplnych i obliczeń w oparciu o model zaczerpnięty z prac [1-3], takie uproszczenie prowadzi do znaczącego niedoszacowania temperatury uzwojeń [13].

Wahania prędkości obrotowej wału uwzględniono w pracy [15], przy czym zakres badań ograniczono do analizy subharmonicznych i interharmonicznych prądu. Według rozważanej pracy, wahania prędkości obrotowej wału powodują, że w przypadku zasilania silnika napięciem zawierającym subharmoniczne, w uzwojeniach oprócz subharmonicznych prądu płyną również interharmoniczne prądu. Analogicznie, w uzwojeniach silnika zasilanego napięciem zawierającym interharmoniczne, płyną również subharmoniczne prądu.

Wg pracy [15] częstotliwość dodatkowych składowych subharmonicznych i interharmonicznych odpowiada następującym zależnościom:

$$f_s = f_1 - f_m \quad (1a)$$

$$f_i = f_1 + f_m \quad (1b)$$

gdzie:

f_s – częstotliwość dodatkowych składowych subharmonicznych

f_i – częstotliwość dodatkowych składowych interharmonicznych

f_1 – częstotliwość harmonicznego podstawowej prądu

f_m – różnica częstotliwości interharmonicznego lub subharmonicznego napięcia $f_{i,s}$ i częstotliwości harmonicznego podstawowej napięcia f_1 :

$$f_m = |f_{i,s} - f_1| \quad (2)$$

Należy podkreślić, że w pracy [15] nie przedstawiono weryfikacji eksperymentalnej wykorzystanego modelu silnika.

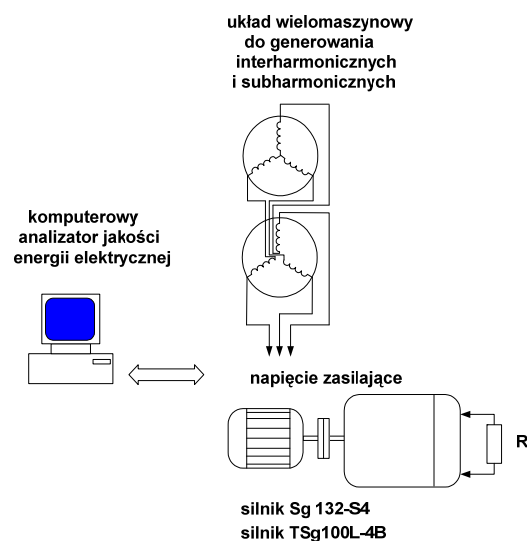
Wyniki badań eksperymentalnych dotyczących wpływu subharmonicznych i interharmonicznych napięć na strumień magnetyczny, prądy i obciążenia cieplne silnika indukcyjnego przedstawiono w pracach autorów [7-13]. W artykule [9] zamieszczono wstępne wyniki badań wpływu interharmonicznych napięć na prądy w silniku indukcyjnym. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych potwierdziły, że składowe interharmoniczne napięcia powodują przepływ w uzwojeniach zarówno interharmonicznych jak i subharmonicznych prądu. Powyższe zjawisko było dotychczas znane wyłącznie z symulacji komputerowej [15].

Badania przedstawione w pracy [15] ograniczono do jednego silnika i dwóch przypadków interharmonicznych napięć o różnych częstotliwościach. Poniższy artykuł jest kontynuacją pracy [9]. Przedstawiono w nim wyniki badań

wplywu subharmonicznych i interharmonicznych napięć na prądy w silniku. Badania doświadczalne wykonano dla dwóch silników i dla częstotliwości zaburzeń w zakresie 5...75 Hz.

2. Stanowisko pomiarowe

Badania eksperymentalne, których wyniki zaprezentowano w niniejszym artykule, przeprowadzono dla dwóch silników indukcyjnych klatkowych: stosunkowo mocno nasyconego [16] silnika typu TSg100L-4B o mocy 3 kW (oznaczonego jako silnik *A*) oraz stosunkowo słabo nasyconego [16] silnika typu Sg132-S4 o mocy 5,5 kW (oznaczonego jako silnik *B*). Badane silniki obciążano prądnicami prądu stałego oraz zasilano z układu wielomaszynowego do generowania subharmonicznych i interharmonicznych. W jego skład wchodzi dwie prądnice synchroniczne sprzęgnięte poprzez transformator (układ połączeń zaczerpnięto z pracy [14]). Zwartość subharmonicznych i interharmonicznych w napięciu mierzono za pomocą komputerowego analizatora, jakości energii elektrycznej opracowanego w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni.



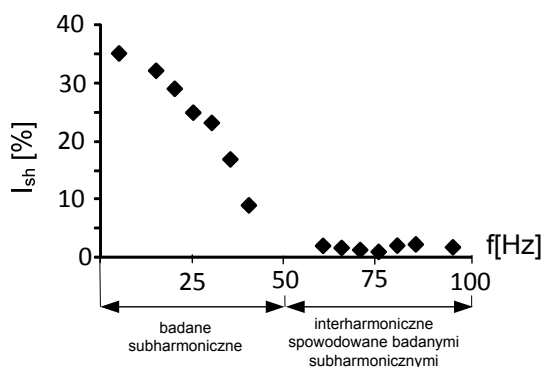
Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 1, a dane badanych silników zamieszczono w pracach [5,6].

3. Wyniki badań eksperymentalnych

Poniżej przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących wpływu subharmonicznych i interharmonicznych o kolejności zgodnej na prądy w uzwojeniach stojana silni-

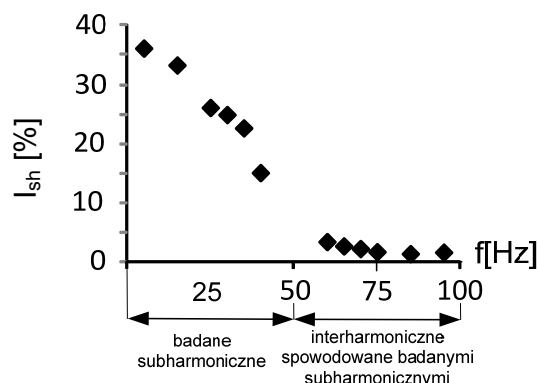
ków indukcyjnych A i B . Odpowiednie pomiary wykonano dla momentu obciążenia i podstawowej harmonicznej napięcia o wartości znamionowych oraz amplitudy badanych zaburzeń równej 2,5 % składowej podstawowej napięcia. Na rys. 2 i 3 zamieszczono charakterystyki znormalizowanych subharmonicznych i interharmonicznych prądu stojana (odniesionych do wartości skutecznej podstawowej harmonicznej prądu stojana) w funkcji częstotliwości subharmonicznej napięcia. Rys. 2 odpowiada silnikowi A , a rys. 3 silnikowi B . Na rozważanych charakterystykach można wyróżnić dwa zakresy częstotliwości. Pierwszy z nich (5...40 Hz) odpowiada subharmonicznym prądu o częstotliwości równej częstotliwości subharmonicznych napięcia. Drugi zakres (60...95 Hz) odpowiada interharmonicznym prądu o częstotliwości opisanej zależnością (1a), powstającym w wyniku wahań prędkości obrotowej wału. Dla obu silników (różniących się przede wszystkim nasyceniem obwodu magnetycznego – patrz opis stanowiska pomiarowego) dla częstotliwości subharmonicznej napięcia równej 5 Hz, amplituda subharmonicznej prądu wynosi ok. 35 % amplitudy harmonicznej podstawowej I_1 . Zwiększenie częstotliwości do $f_{i,s}=40\text{Hz}$ powoduje nieliniowy spadek amplitudy subharmonicznej prądu do ok. 15% I_1 . Z kolei amplitudy interharmonicznych prądu nie przekraczają 1,5 % I_1



Rys.2 Amplituda subharmonicznej i interharmonicznej prądu stojana odniesiona do harmonicznej podstawowej w funkcji częstotliwości subharmonicznej napięcia dla silnika A

Należy podkreślić, że dla obu badanych silników, rozważane charakterystyki są zbliżone do charakterystyki wyznaczonej metodami symulacyjnymi w pracy [15] dla silnika o mocy 3 KM (ok. 2,2 kW). Na podstawie wyników ba-

dań doświadczalnych przedstawionych na rys. 2 i rys. 3 oraz wspomnianych badań symulacyjnych przedstawionych w [15] należy stwierdzić, że w silnikach małej mocy interharmoniczne prądu spowodowane wahaniami prędkości obrotowej wału mają marginalne znaczenie. Natomiast w silnikach wielkiej mocy wartości rozważanych interharmonicznych mogą być tylko nieznacznie mniejsze od amplitud subharmonicznych prądu (na podstawie badań symulacyjnych przedstawionych w pracy [15]).

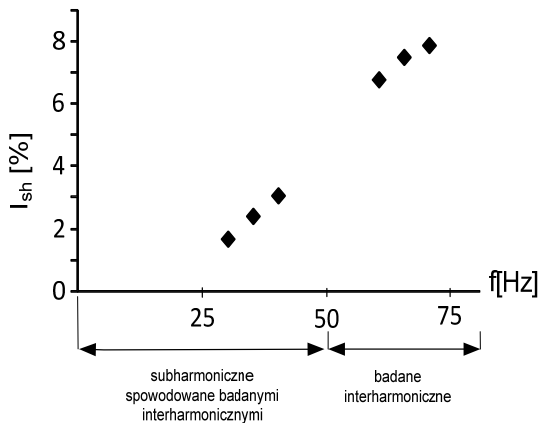


Rys.3 Amplituda subharmonicznej i interharmonicznej prądu stojana odniesiona do harmonicznej podstawowej w funkcji częstotliwości subharmonicznej napięcia dla silnika B

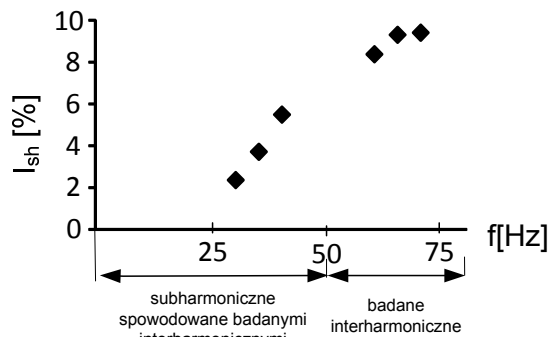
Na rys. 4 i 5 zamieszczono charakterystyki znormalizowanych interharmonicznych i subharmonicznych prądu stojana (odniesionych do wartości skutecznej podstawowej harmonicznej prądu stojana) w funkcji częstotliwości interharmonicznych napięcia, dla silnika odpowiednio A i B . Podobnie jak wykresy z rys. 2 i rys. 3, charakterystyki te posiadają dwa zakresy częstotliwości, odpowiadające częstotliwości interharmonicznych oraz subharmonicznych prądu powstających w wyniku wahań prędkości obrotowej wału.

Dla silnika A (rys. 4) amplituda interharmonicznej prądu przyjmuje wartość ok. 7%...8% I_1 , natomiast amplituda subharmonicznej prądu zmienia się w zakresie od ok. 1,5% do 3% I_1 . Z kolei dla silnika B (rys. 5) amplituda interharmonicznej prądu jest równa ok. 7,5%...8,5% I_1 , natomiast amplituda subharmonicznej prądu zmienia się w zakresie od ok. 2,5% do 5,5% I_1 . Należy nadmienić, że jak wynika z badań symulacyjnych [15], charakterystyka amplitudy interharmonicznej prądu w funkcji częstotliwości interharmonicznej napięcia jest rosnąca tylko w zakresie częstotliwości zbliżonych do czę-

stotliwości harmoniczej podstawowej. Ze względu na ograniczoną dopuszczalną prędkość obrotową prądnic w układzie do generowania subharmonicznych i interharmonicznych, autorzy mieli możliwość wykonania pomiarów tylko dla częstotliwości interharmonicznych nieprzekraczających 75 Hz.



Rys. 4 Amplituda subharmonicznej i interharmonicznej prądu stojana odniesiona do harmoniczej podstawowej w funkcji częstotliwości interharmonicznej napięcia dla silnika A



Rys. 5 Amplituda subharmonicznej i interharmonicznej prądu stojana odniesiona do harmoniczej podstawowej w funkcji częstotliwości interharmonicznej napięcia dla silnika B

Warto dodać, że charakterystyki z rys. 4 i rys. 5 są zbliżone do charakterystyki wyznaczonej metodami obliczeniowymi dla silnika o mocy 3 KM, zamieszczonej w pracy [15]. Ponadto, prezentowane wyniki badań eksperymentalnych oraz wspomnianych badań symulacyjnych [15] dowodzą, że w silnikach małej mocy subharmoniczne prądu powstające w wyniku wahań prędkości obrotowych wału mają znacznie mniejsze wartości od subharmonicznych prądu

spowodowanych przez subharmoniczne napięcia (przy tych samych wartościach amplitud interharmonicznych i subharmonicznych napięcia). Natomiast w silnikach wielkiej mocy amplitudy rozważanych subharmonicznych prądu mogą być nieznacznie mniejsze od amplitud rozważanych interharmonicznych prądu (na podstawie wyników symulacji komputerowej prezentowanych w [15]). Rozważane zjawisko może mieć znaczenia przy nagrzewaniu silnika oraz propagacji subharmonicznych w systemie elektroenergetycznym.

3. Wnioski

Dotychczasowy stan wiedzy dotyczący wpływu subharmonicznych i interharmonicznych na prądy silnika indukcyjnego opierał się głównie na symulacjach komputerowych. Tylko w nielicznych pracach autorów zaprezentowano wstępne wyniki badań eksperymentalnych [8,9]. Przedstawione w niniejszym artykule wyniki pomiarów stanowią potwierdzenie charakterystyk uzyskanych na drodze symulacyjnej przedstawionych w pracy [15]. Prezentowane wyniki badań mogą przyczynić się do lepszego poznania zjawisk związanych z nagrzewaniem silnika indukcyjnego oraz propagacją subharmonicznych w systemie elektroenergetycznym.

7. Literatura

- [1] Abreu de J.P.G., Emanuel A.E., *Induction motor loss of life due to voltage imbalance and harmonics: a preliminary study*, Proc. of 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Orlando, Florida, USA, vol. 1, 1-4 October 2000, pp. 335-40.
- [2] de Abreu J. P. G., Emanuel A. E.: *Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated costs* IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, January/February 2002, pp. 12-20.
- [3] Abreu de J.P.G., Emanuel A.E., *The need to limit subharmonics injection*, Proc. of 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Orlando, Florida, USA, vol. 1, 1-4 October 2000, pp. 251-3.
- [4] Fuchs E.F., Roesler D.J., Masoum M.A.S., *Are harmonics recommendations according to IEEE and IEC too restrictive?*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, October 2004, pp. 1775-1786.
- [5] Gnaciński P.: *Prediction of windings temperature rise in induction motors supplied with distorted voltage*. Energy Conversion and Management, , vol.

49, no 4, pp. 707-717, Apr. 2008, doi. 10.1016/j.enconman.2007.07.23

[6] Gnacinski P.: *Windings temperature and loss of life of an induction machine under voltage unbalance combined with over or undervoltages*. IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 23, no 2, June 2008, pp. 363-371, DOI 10.1109/TEC.2008.918596

[7] Gnaciński P.: *Wybrane zagadnienia wpływu, jakości energii elektrycznej na obciążenia cieplne silników indukcyjnych klatkowych małej mocy*. Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2009

[8] Gnaciński P., M. Pepliński, Szweđa M. *Badanie silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym składowe subharmoniczne*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni.

[9] Gnaciński P., M. Pepliński, Szweđa M. *Silnik indukcyjny zasilany napięciem zawierającym składowe interharmoniczne*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 88/2010, s. 175-180, Katowice 2010.

[10] Gnaciński P., Pepliński M., Szweđa M., *The effect of subharmonics on induction machine heating*, Proc. of 13th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008, Poznań, 1-3 września 2008, pp. 826-829.

[11] Gnaciński P., Pepliński M., Szweđa M., *The effect of subharmonics on the flux in an induction cage machine*, Proc. of 5th International Workshop Compatibility in Power Electronics CPE'07, Gdańsk-Jelitkowo, 29 maja-1 czerwca 2007 (CD-ROM).

[12] Gnaciński P., Pepliński M., Szweđa M.: *Wpływ interharmonicznych na obciążenie cieplne silnika indukcyjnego*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, nr 178A, s. 99-104, Gdynia 2009

[13] Gnaciński P., Pepliński M., Szweđa M.: *Wpływ podharmonicznych na obciążenie cieplne silnika indukcyjnego*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 84/2009, Katowice 2009, s. 97-101.

[14] Ho S. L., Fu W. N.: *Analysis of indirect temperature-rise tests of induction machines using time stepping finite element method*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 16, no. 1, March 2001, pp. 55-60.

[15] Tennakoon S.; Perera S.; Robinson D.: *Flicker attenuation—Part I: Response of three-phase induction motors to regular voltage fluctuations*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 2, April 2008, pp.: 1207 – 1214

[16] Latek W., *Badania maszyn elektrycznych w przemyśle*. WNT, Warszawa 1979

[17] PN-EN 61000-2-4:2003, *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 2-4, Środowisko – Poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych*.

Autorzy

dr inż. Piotr Gnaciński, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej Akademia Morska, Gdynia ul. Morska 81-87, tel. +58 6901382, e-mail: piotrg@am.gdynia.pl

mgr inż. Marcin Pepliński, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej Akademia Morska, Gdynia ul. Morska 81-87, +58 6901536, e-mail: marcinpe@atol.am.gdynia.pl

mgr inż. Mariusz Szweđa, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej Akademia Morska, Gdynia ul. Morska 81-87, +58 6901511, e-mail: szweđa@atol.am.gdynia.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski