

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

SILNIK INDUKCYJNY ZASILANY NAPIĘCIEM ZAWIERAJĄCYM SKŁADOWE INTERHARMONICZNE

INDUCTION MOTOR SUPPLIED WITH VOLTAGE CONTAINING INTERHARMONIC COMPONENTS

Abstract: This paper deals with influence of voltage interharmonics on currents in an induction cage machine. The results of investigations are presented for 5,5 kW four-pole induction cage machine under supply with voltage containing positive-sequence and negative sequence interharmonic injections of various frequencies. The phenomena that have been known from computer simulations only, are confirmed by experimental method. It is proved in this paper that positive-sequence voltage interharmonics have result in current subharmonics flowing in machine windings. The significant dependency between the frequency of voltage interharmonics and the amplitude of current subharmonics, which has been known so far from theoretical calculations, is confirmed experimentally as well.

1. Wstęp

Niemal we wszystkich systemach energetycznych występują zaburzenia jakości napięcia takie jak: asymetria napięcia, odkształcenia krzywej jego przebiegu, odchylenia napięcia, a ponadto systemach okrętowych – odchylenia częstotliwości. Zaburzenia jakości napięcia mają negatywny wpływ na funkcjonowanie odbiorników energii oraz innych elementów systemu elektroenergetycznego. Odbiornikami szczególnie wrażliwymi na zaburzenia jakości napięcia zasilania są silniki indukcyjne klatkowe, które zużywają 2/3 wyprodukowanej na świecie energii elektrycznej. Zaniżona jakość napięcia zasilania powoduje w silnikach indukcyjnych powstawanie dodatkowych strat mocy [1-8, 14] i w konsekwencji wzrost temperatury jego uzwojeń [1-12,14]. Wyższa temperatura uzwojeń wpływa na zmniejszenie niezawodności silnika oraz skrócenie jego czasu życia [1,4,5,7,14].

Jednym z zaburzeń powodujących dodatkowe straty mocy i przyrosty temperatury uzwojeń są interharmoniczne. Interharmoniczne są to zaburzenia o częstotliwości większej niż częstotliwość harmonicznej podstawowej (f_1), przy czym ich częstotliwość nie jest całkowitą wielokrotnością częstotliwości f_1 [16]. Przyczyny występowania interharmonicznych w przebiegach napięcia mogą być związane z pracą takich urządzeń jak: pieców łukowych, maszyn spawalniczych, podgrzewaczy plazmowych, silników pracujących

z obciążeniem okresowo zmiennym oraz niektórych urządzeń energoelektronicznych [16].

Wpływ interharmonicznych na obciążenie cieplne silnika indukcyjnego oraz moment obrotowy przedstawiono w pracach Fushsa *et al*, Emmanuela *et al* [1,2,3] oraz w pracy autorów [11]. W pracy [11] przedstawiono wstępne wyniki badań doświadczalnych nagrzewania maszyny zasilanej napięciem zawierającym interharmoniczne, natomiast pracach [1,2,3] zamieszczono wyniki obliczeń analitycznych i symulacyjnych w oparciu o uproszczone modele matematyczne maszyny. Rozważane modele nie zostały zweryfikowane eksperymentalnie dla interharmonicznych, natomiast w przypadku subharmonicznych mogą prowadzić do znaczącego niedoszacowania temperatury uzwojeń [12]. Z kolei w pracy Tenakoona *et al* [15] przedstawiono analizę prądów w silniku w oparciu o metodę obliczeniową. W pracy tej uwzględniono min. wpływ inetrharmonicznych na prąd magnesujący oraz wahania prędkości obrotowej wału. W wyniku wahań prędkości obrotowej wału w przebiegach prądu silnika występują dodatkowe składowe o częstotliwości mniejszej od częstotliwości podstawowej harmonicznej – subharmoniczne prądu. Według obliczeń przedstawionych w rozważanym artykule częstotliwość składowych subharmonicznych w prądzie zasilającym silnika (f_s) jest równa:

$$f_s = f_l - f_m \quad (1)$$

gdzie:

f_l – częstotliwość harmonicznej podstawowej
 f_m – różnica częstotliwości interharmonicznej f_i i częstotliwości harmonicznej podstawowej f_l :

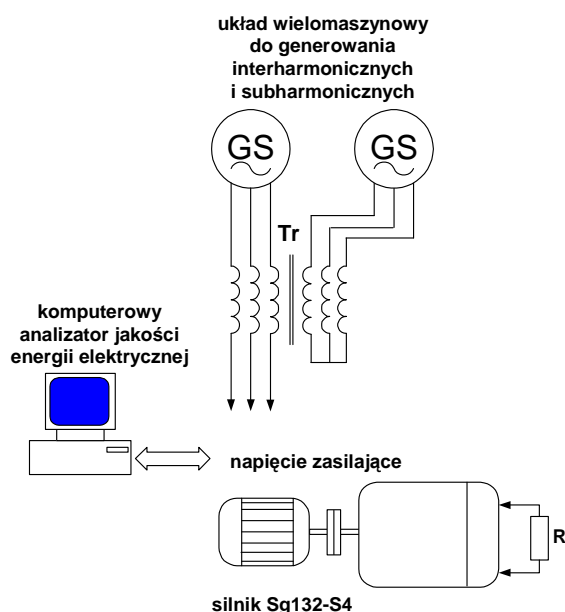
$$f_m = f_i - f_l \quad (2)$$

Szczegółową analizę wahań prędkości obrotowej wału i występowania subharmonicznych w przebiegach prądu zasilającego silnika zamieszczono w rozważanej pracy [15]. Należy podkreślić, nie przedstawiono w niej weryfikacji eksperymentalnej modelu silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym interharmoniczne.

Z przedstawionego przeglądu literatury wynika, że w obecnym stanie wiedzy występuje luka dotycząca między innymi badań eksperymentalnych silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym interharmoniczne. W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych dotyczących wpływu interharmonicznych na prądy w silniku indukcyjnym klatkowym małej mocy.

2. Stanowisko pomiarowe

Badania przeprowadzono dla silnika indukcyjnego klatkowego typu Sg132-S4 o mocy 5,5 kW obciążonego prądnicą prądu stałego. Badany silnik był zasilany z układu wielomaszynowego służącego do generowania interharmonicznych i subharmonicznych. W



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

jego skład wchodzić dwie prądnice synchroniczne sprzęgnięte poprzez transformator (układ połączeń zaczerpnięto z pracy [13]). W celu generowania interharmonicznych jedną z prądnic synchronicznych należy napędzać z prędkością odpowiadającą częstotliwości podstawowej harmonicznej, a drugą z prędkością odpowiadającą częstotliwości składowej interharmonicznej.

Pomiaru zawartości interharmonicznych w przebiegach napięcia dokonano za pomocą komputerowego analizatora jakości energii opracowanego w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 1, a dane badanego silnika w pracy [7].

3. Wyniki badań eksperymentalnych

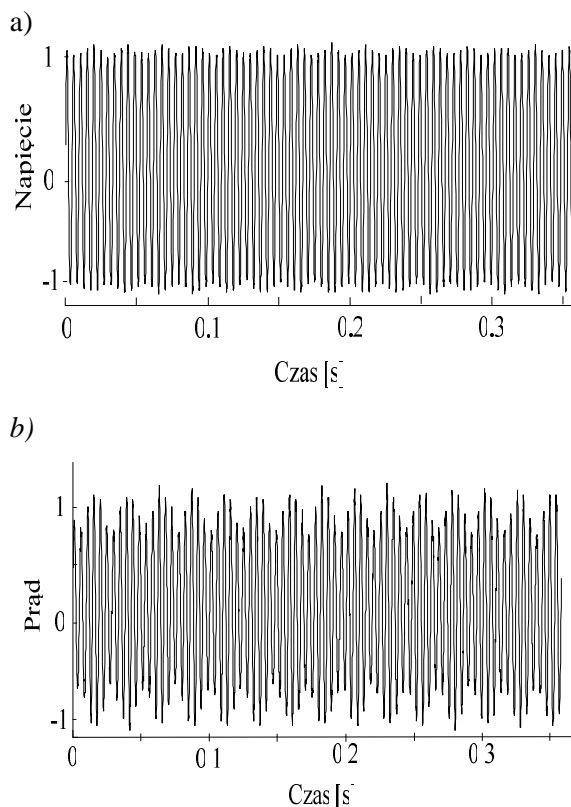
Poniżej przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu interharmonicznych na prądy w silniku. Badania doświadczalne przeprowadzono dla interharmonicznych o kolejności zgodnej i przeciwnej, o amplitudzie równej 4% amplitudy podstawowej harmonicznej. Odpowiednie próby wykonano dla dwóch częstotliwości: 60 Hz (120% częstotliwości znamionowej) i 75 Hz (150% częstotliwości znamionowej). Zarejestrowane przebiegi prądu i napięcia dla interharmonicznej o kolejności przeciwnej i częstotliwości równej 60 Hz zostały zamieszczone na rys. 2.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono widma prądów stojana dla interharmonicznej o kolejności zgodnej i częstotliwości odpowiednio równej 60 Hz i 75 Hz. W rozważanych przypadkach, interharmoniczna napięcia spowodowała przepływ prądów interharmonicznych o amplitudzie odpowiednio równej 12,9% amplitudy podstawowej harmonicznej (I_I) oraz 14,5% I_I . Ponadto, interharmonicznym prądem towarzyszyły subharmoniczne o częstotliwościach określonych zależnością (1) - odpowiednio równych 40 Hz i 25 Hz. Tym samym potwierdzono eksperymentalnie występowanie zjawiska, które dotychczas znano wyłącznie z symulacji komputerowej [15].

Warto nadmienić, że według wyników obliczeń przedstawionych w pracy [15], prądy subharmoniczne osiągają najwyższe wartości dla interharmonicznych o częstotliwości o kilka

Hz wyższej od częstotliwości f_1 . Z kolei dla interharmonicznych o większej częstotliwości wyższej, np. 150% f_1 , prądy subharmoniczne przyjmują wielokrotnie mniejsze wartości. Wyniki badań doświadczalnych przedstawione na rys. 3 i rys. 4 potwierdzają znaczącą zależność amplitudy subharmonicznego prądu od częstotliwości interharmonicznych napięcia. W przypadku interharmonicznej o częstotliwości 60 Hz, amplituda subharmonicznego prądu wynosiła 8,7% I_1 , natomiast dla interharmonicznej o częstotliwości 75 Hz – 3% I_1 .

Na kolejnych rysunkach – rys. 5 i rys. 6 – zamieszczono widma prądów dla interharmonicznej o kolejności przeciwnej i częstotliwości równej 60 Hz i 75 Hz. Jak wykazują prezentowane wyniki badań eksperymentalnych, zasilanie napięciem zawierającym interharmoniczne o kolejności

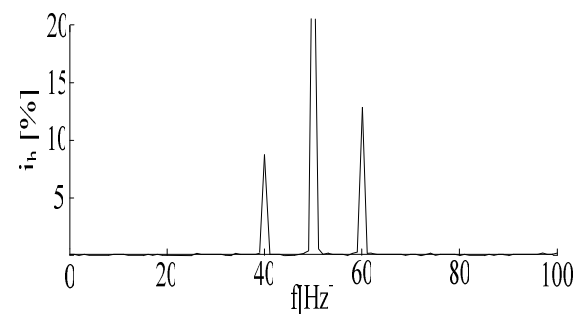


Rys. 2. Zarejestrowane przebiegi napięcia zasilania (rys. a) i prądu pobieranego przez silnik typu Sg132-S4 (rys. b) dla próby z interharmoniczną napięcia o kolejności przeciwnej, częstotliwości 60 Hz i amplitudzie równej 4% amplitudzie podstawowej harmonicznej. Widmo prądu pobieranego przez silnik przedstawiono na rys. 3.

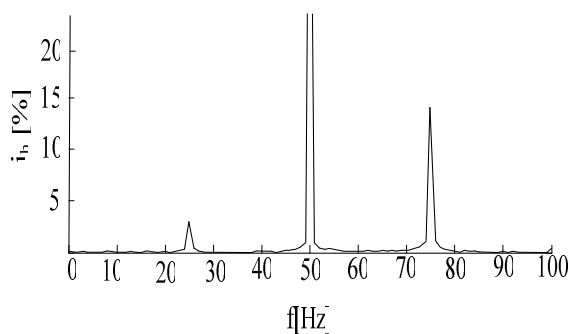
przeciwnej nie powoduje przepływu subharmonicznego prądu. Ponadto, interharmoniczne napięcia o kolejności przeciwnej powodują przepływ większych prądów interharmonicznych niż dla kolejności zgodnej. Dla częstotliwości 60 Hz i 75 Hz odpowiednie amplitudy wynoszą 20,1% i 16,8% I_1 , natomiast dla składowej zgodnej – jak już wspomniano – są równe 12,9% i 14,5% I_1 . Z tego względu interharmoniczne napięcia o kolejności przeciwnej powodują znacznie wyższe przyrosty temperatury w silniku niż interharmoniczne o kolejności zgodnej [11],

pomimo, że w przypadku interharmonicznych o kolejności zgodnej silnik jest dodatkowo nagrzewany przez subharmoniczne prądu.

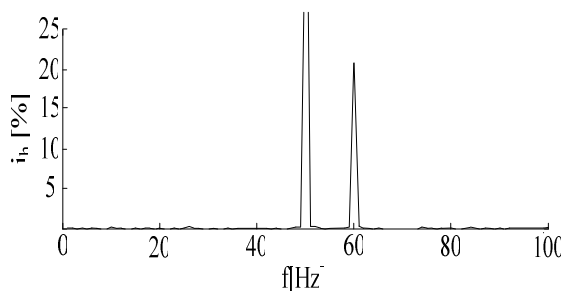
Dla porównania warto również przytoczyć wyniki obliczeń w oparciu o schemat zastępczy silnika z pracy [2] (metoda superpozycji). Dla rozważanych interharmonicznych o kolejności zgodnej i częstotliwości 60 Hz i 75 Hz, obliczone amplitudy interharmonicznych prądu wynoszą odpowiednio 11,2% i 14% I_1 . Z kolei dla interharmonicznych o kolejności przeciwnej są równe odpowiednio 17,9% i 18,7% I_1 . Wprawdzie wyniki obliczeń są generalnie zgodne z prezentowanymi wcześniej wynikami pomiarów, niemniej, zdaniem Autorów artykułu, zastosowanie rozważanej metody powinno być ograniczone jedynie do zgrubej analizy silnika zasilanego napięciem zawierającym interharmoniczne, ponieważ nie uwzględnia ona wahań prędkości obrotowej wału, których skutkiem są subharmoniczne prądu.



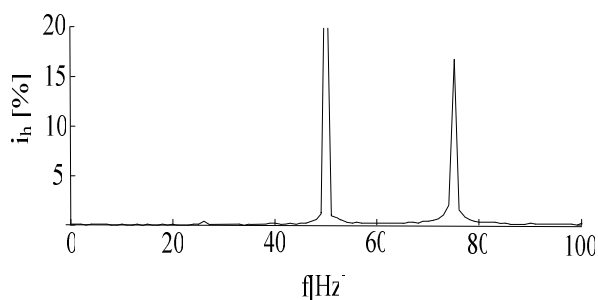
Rys. 3. Widmo prądu pobieranego przez silnik typu Sg132-S4 dla napięcia zasilania zawierającego interharmoniczną o kolejności zgodnej, częstotliwości 60 Hz i amplitudzie równej 4% amplitudzie podstawowej harmonicznej. Przebieg prądu przedstawiono na rys. 2b.



Rys. 4. Widmo prądu pobieranego przez silnik typu Sg132-S4 dla napięcia zasilania zawierającego interharmoniczną o kolejności zgodnej, częstotliwości 75 Hz i amplitudzie równej 4% amplitudy podstawowej harmonicznej



Rys. 5. Widmo prądu pobieranego przez silnik typu Sg132-S4 dla napięcia zasilania zawierającego interharmoniczną o kolejności przeciwnej, częstotliwości 60 Hz i amplitudzie równej 4% amplitudy podstawowej harmonicznej



Rys. 6. Widmo prądu pobieranego przez silnik typu Sg132-S4 dla napięcia zasilania zawierającego interharmoniczną o kolejności przeciwnej, częstotliwości 75 Hz i amplitudzie równej 4% amplitudy podstawowej harmonicznej

4. Wnioski

Badania doświadczalne potwierdziły wyniki wcześniejszych symulacji komputerowych. Interharmoniczne napięcia o kolejności zgodnej powodują przepływ prądów subharmonicznych w uzwojeniach silników indukcyjnych. Ponadto, istnieje silna zależność pomiędzy częstotliwością interharmonicznych oraz amplitudą subharmonicznych prądu.

Przedstawione wyniki badań mogą przyczynić się do lepszego poznania procesów cieplnych w silniku indukcyjnym zasilanym napięciem zawierającym interharmoniczne oraz lepszego poznania mechanizmów rozprzestrzeniania się subharmonicznych napięcia w systemie elektroenergetycznym.

Literatura

[1] 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.

[2] Fuchs E. F., Roesler D. J., Kvacz K. P.: *Aging of electrical appliances due to harmonics of the power system voltage*: IEEE Trans. on Power Delivery, vol PWRD-1, no. 3, Jul. 1986, pp.: 301-307

[3] Fuchs E. F., Roesler D. J., Masoum M. A. S.: *Are harmonics recommendations according to IEEE and IEC too restrictive?* IEEE Trans. on Power Delivery 2004; 19(4):1775-1786.

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

[5] Gnaciński P.: *Effect of unbalanced voltage on windings temperature, operational life and load carrying capacity of induction machine*. Energy Conversion and Management, vol. 49, no 4, pp. 761-770, Apr. 2008, doi. 10.1016/j.enconman.2007.07.33

[6] 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

[7] Gnaciński 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

- [8] Gnaciński P.: *Effect of power quality on windings temperature of marine induction motors. Part I. Machine model*, Energy Conversion and Management (ELSEVIER, vol. 50, no. 10, October 2009, pp. 2463-2476.
- [9] Gnaciński P., Mindykowski J., Tarasiuk T.: *Effect of power quality on windings temperature of marine induction motors. Part II. Results of investigations and recommendations for related regulations*, Energy Conversion and Management (ELSEVIER), vol. 50, no. 10, October, pp. 2477-2485.
- [10] Gnaciński P., Pepliński M., Szweda 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., Szweda M.: *Wpływ interharmonicznych na obciążenie cieplne silnika indukcyjnego*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, nr 178A, s. 99-104, Gdynia 2009
- [12] Gnaciński P., Pepliński M., Szweda M.: *Wpływ podharmonicznych na obciążenie cieplne silnika indukcyjnego*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 84/2009, Katowice 2009, s. 97-101.
- [13] 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.
- [14] Pillay P., Manyage M.: *Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies*. IEEE Transaction on Energy Conversion vol. 42, pp. 813-822, Dec. 2006, doi: 10.1109/TEC.2005.853724
- [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] 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 (058) 6901382, piotrg@am.gdynia.pl

mgr inż. Marcin Pepliński, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej Akademia Morska, Gdynia ul. Morska 81-87 (058) 6901536, marcinpe@atol.am.gdynia.pl

mgr inż. Mariusz Szweda, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej Akademia Morska, Gdynia ul. Morska 81-87 (058) 6901511, szweda@atol.am.gdynia.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Sobczyk