

Piotr Gnaciński, Marcin Pepliński
Akademia Morska w Gdyni

SILNIK INDUKCYJNY ZASILANY NAPIĘCIEM ZAWIERAJĄCYM SUBHARMONICZNE O KOLEJNOŚCI PRZECIWIWEJ

INDUCTION MOTOR SUPPLIED WITH VOLTAGE CONTAINING NEGATIVE-SEQUENCE SUBHARMONICS

Streszczenie: Artykuł dotyczy prądów w uzwojeniach stojana silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne o kolejności przeciwnej. Dokonano analizy widma prądu pobieranego przez silnik oraz amplitudy subharmonicznych prądu. Przedyskutowano różnice dotyczące odpowiedzi prądowej silnika na subharmoniczne napięcia o kolejności przeciwnej i zgodnej. Wyniki badań eksperymentalnych przedstawiono dla silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 3 kW i różnych częstotliwości subharmonicznych napięcia.

Abstract: This paper deals with current consumed by an induction cage machine supplied with voltage containing negative-sequence subharmonic injection. The spectrum of the motor supply current and amplitude of current subharmonics are analysed. The differences in the effect of negative-sequence voltage subharmonic and positive-sequence ones are discussed. The results of experimental investigations are presented for various subharmonic frequency and an induction cage machine of the rated power of 3 kW.

Słowa kluczowe: maszyny indukcyjne, subharmoniczne, interharmoniczne, jakość napięcia

Keywords: induction machines, subharmonics, interharmonics, power quality

1. Wstęp

Parametry napięcia w systemach elektroenergetycznych zazwyczaj odbiegają od stanu idealnego – układu trzech symetrycznych, w pełni sinusoidalnych napięć o wartości skutecznej równej znamionowej. Zazwyczaj w systemach występują różne zaburzenia jakości napięcia, jak asymetria napięcia, odchylenia napięcia od wartości znamionowej, odkształcenia krzywej przebiegu napięcia, a w systemach morskich – dodatkowo odchylenia częstotliwości. Odkształcenia krzywej przebiegu napięcia zazwyczaj wiążą się z obecnością wyższych harmonicznymi, niemniej w niektórych systemach [1] występują subharmoniczne (podsynchroniczne interharmoniczne) napięcia. Definiuje się je jako składowe napięcia o częstotliwości mniejszej od częstotliwości składowej podstawowej. Jedną z przyczyn występowania subharmonicznych są zmiany obciążania odbiorników dużej mocy, np. urządzeń walcowniczych [2], pieców indukcyjnych [3,4]. Również liczne urządzenia małej mocy [5] mogą spowodować wahania napięcia, będące w istocie złożeniem subharmonicznych i interharmonicznych [6,7]. Inną przyczyną występowania subharmonicznych jest praca odbiorników nieliniowych, takich jak cyklokonwerterów [2], pieców łukowych [3, 8] oraz przemienników częstotliwości, szczególnie w przypadku, gdy przemiennik jest zasilany

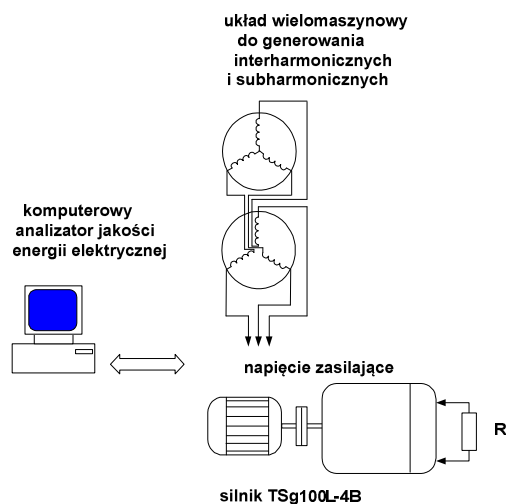
napięciem asymetrycznym [9] oraz gdy przemiennik zasila silnik z wewnętrzną asymetrią [10]. Źródłem subharmonicznych napięcia może również być praca elektrowni wiatrowych, co wiąże się między innymi z tzw. efektem cienia aerodynamicznego wieży [8].

Subharmoniczne napięcia są uważane za szczególnie szkodliwe zaburzenie jakości napięcia. Mogą między innymi powodować zjawisko migotania światła [11], wahania momentu obrotowego generatorów synchronicznych [3] oraz podmagnesowywanie rdzeni transformatorów [12,13]. Zasilanie silnika indukcyjnego napięciem zawierającym subharmoniczne skutkuje między innymi wzrostem prądu magnesującego [14,15], temperatury uzwojeń [14,15] oraz drganiami i wibracjami.

Wpływ subharmonicznych napięcia na silnik indukcyjny jest tematem licznych prac badawczych [3,6,14-18] zazwyczaj opartych na obliczeniach bez weryfikacji eksperymentalnej. Badania eksperymentalne przedstawiono głównie w pracach autorów [14,15]. Należy podkreślić, że dotychczasowe opracowania dotyczyły niemal wyłącznie przypadku subharmonicznych o kolejności zgodnej. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących prądów w uzwojeniach stojana silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne o kolejności przeciwnej.

2. Stanowisko pomiarowe

Prezentowane badania eksperymentalne wykonano na stanowisku pomiarowym, którego uproszczony schemat zamieszczono na rys. 1. W skład stanowiska wchodzi układ wielomaszynowy do generowania subharmonicznych i interharmonicznych, silnik indukcyjny typu TSg100L-4B o mocy 3 kW oraz komputerowy analizator jakości energii elektrycznej opracowany w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni [14]. Układ wielomaszynowy jest zbudowany z dwóch prądnic synchronicznych, sprzęgniętych poprzez transformator (układ połączeń zaczerpnięto z pracy [19]). Parametry badanego silnika przedstawiono w [20].



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

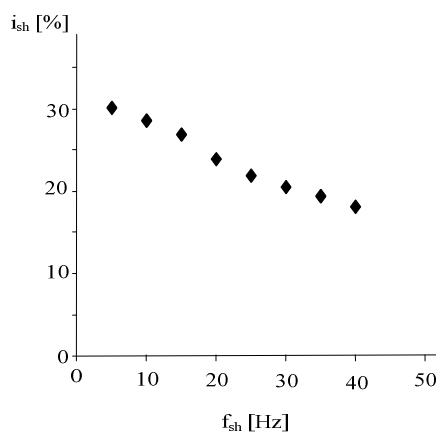
3. Wyniki badań eksperymentalnych

Poniżej przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących wpływu subharmonicznych o kolejności przeciwnej na prądy w uzwojeniach stojana silnika indukcyjnego. Odpowiednie pomiary wykonano dla momentu obciążenia i podstawowej harmonicznej napięcia o wartości znamionowych oraz amplitudy subharmonicznych napięcia równej 2,5 % amplitudy składowej podstawowej.

Na rys. 2 przedstawiono charakterystykę amplitudy subharmonicznej prądu zasilania silnika w funkcji częstotliwości subharmonicznej napięcia. Dla subharmonicznej napięcia o częstotliwości równej $f_{sh}=5$ Hz, zawartość wynosi ok. 30 % amplitudy harmonicznej podstawowej I_1 . Zwiększenie częstotliwości do $f_{sh}=40$ Hz powoduje nieliniowy spadek amplitudy subharmonicznej prądu do ok. 17% I_1 . Należy podkreślić, że powyższe wartości znacząco różnią się

od zawartości subharmonicznych dla składowej o kolejności zgodnej.

Analizę silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne o kolejności zgodnej zamieszczono we wcześniejszych pracach autorów [14,15]. Zmierzona amplituda subharmonicznej prądu dla tego samego silnika typu TSg100L-4B i identycznej amplitudy subharmonicznej napięcia (2,5% amplitudy składowej podstawowej) wynosiła odpowiednio ok. 35% I_1 dla $f_{sh}=5$ Hz i ok. 10% I_1 dla $f_{sh}=40$ Hz.



Rys. 2. Amplituda subharmonicznych prądu stojana odniesiona do harmonicznej podstawowej w funkcji częstotliwości subharmonicznej napięcia

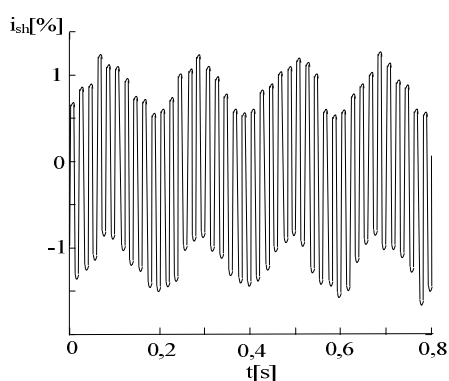
Ponadto, odpowiednie charakterystyki zmierzone dla subharmonicznych o kolejności przeciwnej i zgodnej [14,15] znacząco różnią się kształtem.

Na kolejnych rysunkach – rys. 3 i rys. 4 – zamieszczono zarejestrowany przebieg prądu pobieranego przez silnik przy zasilaniu napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości $f_{sh}=5$ Hz oraz jego widmo. Z kolei na rys. 5 i rys. 6 zaprezentowano zarejestrowany przebieg prądu i jego widmo dla częstotliwości subharmonicznej równej $f_{sh}=35$ Hz. Podobnie jak w przypadku charakterystyki zamieszczonej na rys. 2, prezentowane widma znacząco różnią się od analogicznych widm dla subharmonicznych o kolejności zgodnej [14,15]. W przypadku zasilania silnika napięciem zawierającym subharmoniczne o kolejności zgodnej, w prądzie silnika występują również interharmoniczne spowodowane wahaniami prędkości obrotowej [14,15]. Częstotliwość dodatkowych składowych interharmonicznych prądu f_i jest określona zależnością (na podstawie [6]:

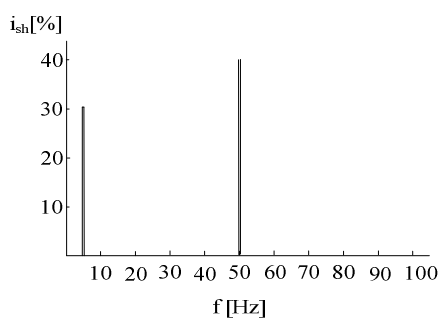
$$f_i = f_1 - f_{sh} \quad (1)$$

gdzie: f_i – częstotliwość składowej podstawowej.

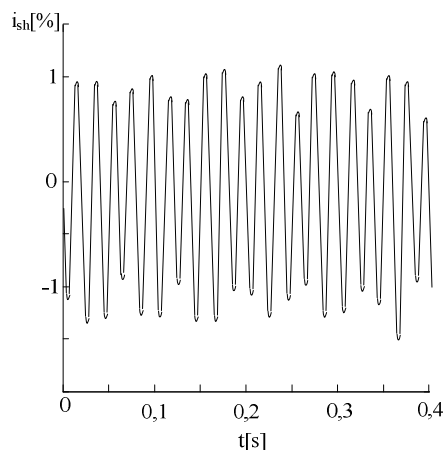
Obecności powyższych interharmonicznych prądu nie zaobserwowano w widmie silnika zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne o kolejności przeciwnej (rys. 4, rys. 6). Podsumowując, prezentowane wyniki badań mogą być przydatne przy analizie rozprzestrzeniania się subharmonicznych i interharmonicznych w systemie elektroenergetycznym [6] oraz ocenie obciążeń cieplnych silnika indukcyjnego zasilanego napięciem o zaniżonej jakości.



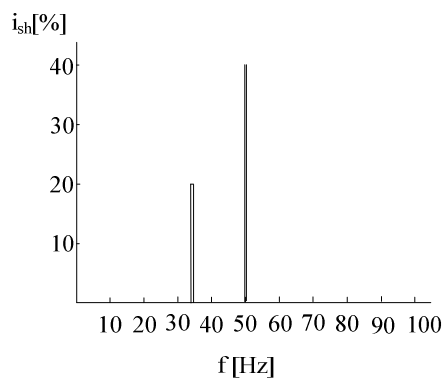
Rys. 3. Zarejestrowany przebieg prądu pobieranego przez silnik przy zasilaniu napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości $f_{sh}=5$ Hz i amplitudzie wynoszącej 2,5 % amplitudy harmonicznej podstawowej.



Rys. 4. Widmo prądu pobieranego przez silnik przy zasilaniu napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości $f_{sh}=5$ Hz i amplitudzie wynoszącej 2,5 % amplitudy harmonicznej podstawowej.



Rys. 5. Zarejestrowany przebieg prądu pobieranego przez silnik przy zasilaniu napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości $f_{sh}=35$ Hz i amplitudzie wynoszącej 2,5 % amplitudy harmonicznej podstawowej.



Rys. 6. Widmo prądu pobieranego przez silnik przy zasilaniu napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości $f_{sh}=35$ Hz i amplitudzie wynoszącej 2,5 % amplitudy harmonicznej podstawowej.

3. Wnioski

Zasilanie silnika indukcyjnego napięciem zawierającym subharmoniczne o kolejności przeciwnej powoduje przepływ w uzwojeniach subharmonicznych prądu o znaczących wartościach. Dla badanego silnika i częstotliwości subharmonicznych 40 Hz, amplituda subharmonicznych prądu jest znacznie większa niż w przypadku subharmonicznych o kolejności zgodnej. Z kolei dla częstotliwości do ok. 30 Hz, amplituda subharmonicznych prądu jest mniejsza niż dla kolejności zgodnej. Ponadto nie zaobserwowano dodatkowych interharmonicznych prądu jak w przypadku zasilania silnika napięciem zawierającym subharmoniczne o kolejności zgodnej.

4. Literatura

- [1]. Barros, J., de Apraiz, M., Diego, R.I.: *Measurement of subharmonics in power voltages*, Power Tech 2007 IEEE Conference, Lausanne, Switzerland, 1-5 July 2007, pp. 1736–1740
- [2]. Hsu, C. T., Chen, C. S., Lin, C. H.: *Electric power system analysis and design of an expanding steel cogeneration plant*, IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, Vol. 47, No. 4, pp. 1527-1535
- [3]. Sürgevil T., Akpınar E.: *Effects of electric arc furnace loads on synchronous generators and asynchronous motors*, Proc. of International Conference on Electrical and Electronics Engineering ELECO 2009, Bursa, 5-8 Nov. 2009, pp. I-49 - I-53.
- [4]. Yılmaz, I., Ermis, M., Cadirci, I.: *Medium-frequency induction melting furnace as a load on the power system*, IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, Vol. 48, No. 4, pp. 1203-1214
- [5]. Deokar S. A., Waghmare L., Jadhav G. N.: *Voltage flicker assessment of induction motors used in the integrated water pumping station*, Proc. of 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, New Delhi, 20-23 December 2010.
- [6]. 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, 2008, pp. 1207 – 1214
- [7]. D. Gallo, R. Langella, A. Testa, A. Emanuel, *On the effects of voltage subharmonics on power transformers: a preliminary study*, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2004, pp. 501–506
- [8]. Kolagar, A. D., Shoulaie, A.: *Reduction of undesired harmonic components in a steel industrial plant with DC electric arc furnaces*, Proc. of 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, 2011
- [9]. Chang, G. W., Chen, S. K., Su, H. J., Wang, P. K.: *Accurate assessment of harmonic and interharmonic currents generated by VSI-fed drives under unbalanced supply voltages*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, Vol. 26, No. 2, pp. 1083-1091
- [10]. Basic D.: *Input current interharmonics of variable-speed drives due to motor current imbalance*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 25, no. 4, October 2010, pp. 2797-2806.
- [11]. Hanzelka Z.: *Jakość energii elektrycznej. Wąhania napięcia*, www.elektroinfo.pl.
- [12]. Gnaciński P., Hallmann D., Jankowski P., *Badanie wpływu subharmonicznego napięcia na pracę transformatora jednofazowego*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 4/2014 (104) str. 173-178
- [13]. Langella R., Testa A, Emanuel A: *On the effects of subsynchronous interharmonic voltages on power transformers: single phase units* IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, Vol. 23, No. 4, pp. 2480-2487
- [14]. Pepliński M. *Wpływ subharmonicznego i interharmonicznego napięcia na prądy i temperaturę uzwojeń silników indukcyjnych małych mocy*, Rozprawa doktorska, Akademia Morska w Gdyni, 2014
- [15]. Gnaciński P., Pepliński M., *Induction cage machine supplied with voltage containing subharmonics and interharmonics*, IET Electric Power Applications, Volume 8, Issue 8, September 2014, pp. 287 – 295
- [16]. Baptista J., Gonçalves J., Soares S., Valente, A., Morais, R., Bulas-Cruz, J., Reis, M. J.: *Induction motor response to periodical voltage fluctuations*, Proc. XIX International Conference on Electrical Machines ICEM, Roma, Italy 2010.
- [17]. 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, 2004, vol. 19, no. 4, pp. 1775-1786.
- [18]. Stumpf P., Jordan R. K., Nagy I.: *Subharmonics generated by space vector modulation in ultra-high speed drives*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 2, 2012, pp. 1029-1039.
- [19]. 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, 2001, pp. 55-60.
- [20]. 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.

Autorzy

dr hab. inż. Piotr Gnaciński, prof. nadzw. AM, e-mail: p.gnacinski@we.am.gdynia.pl
 dr inż. Marcin Pepliński,
 email: m.peplinski@we.am.gdynia.pl
 Akademia Morska w Gdyni,
 Katedra Elektroenergetyki Okrętowej
 ul. Morska 83, 81-225 Gdynia