

Piotr Gnaciński
Marcin Pepliński
Mariusz Szweda
Akademia Morska w Gdyni

BADANIE SILNIKA INDUKCYJNEGO ZASILANEGO NAPIĘCIEM ZAWIERAJĄCYM SKŁADOWE SUBHARMONICZNE

Jednym z najczęściej występujących zaburzeń jakości napięcia są odkształcenia jego przebiegu, które zazwyczaj wiążą się z obecnością wyższych harmonicznych. W niektórych systemach elektroenergetycznych oprócz wyższych harmonicznych występują również składowe interharmoniczne i subharmoniczne. Ich obecność powoduje dodatkowe straty mocy oraz wzrost obciążeń cieplnych silników indukcyjnych. W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu subharmonicznych na prądy i nagrzewanie silnika indukcyjnego.

WSTĘP

Zaburzeniem jakości napięcia powszechnie występującym niemal we wszystkich systemach elektroenergetycznych są odkształcenia krzywej jego przebiegu. Odkształcenia krzywej przebiegu napięcia zazwyczaj wiążą się z obecnością wyższych harmonicznych, niemniej w niektórych systemach morskich i lądowych mogą występować również zaburzenia o częstotliwości mniejszej od częstotliwości składowej podstawowej harmonicznej, zwane subharmonicznymi [17]. Przykładowo, w pracy [2] odnotowano znaczące poziomy subharmonicznych w budynku z dużą liczbą odbiorników nieliniowych, znajdującym się w pobliżu huty. Maksymalna wartość pierwiastka z sumy kwadratów subharmonicznych o częstotliwości 5, 10... 45 Hz wynosiła 1,67% amplitudy podstawowej harmonicznej. Przyczyny występowania subharmonicznych w przebiegach napięcia mogą być związane z pracą takich urządzeń, jak: piece łukowe, maszyny spawalnicze, podgrzewacze plazmowe, silniki pracujące z obciążeniem okresowo zmiennym oraz niektóre urządzenia energoelektroniczne [17].

Subharmoniczne są zaburzeniem jakości napięcia szczególnie niekorzystnie oddziaływającym na odbiorniki. Powodują m.in. zjawisko migotania światła, momenty pasożytnicze [4], wahania prędkości obrotowej wału [18] oraz wzrost strumienia [13] i strat mocy w silnikach indukcyjnych [3, 4] i w konsekwencji – przegrzewanie się ich uzwojeń [1, 3, 4, 10, 12, 14]. Skutkiem zwiększenia temperatury

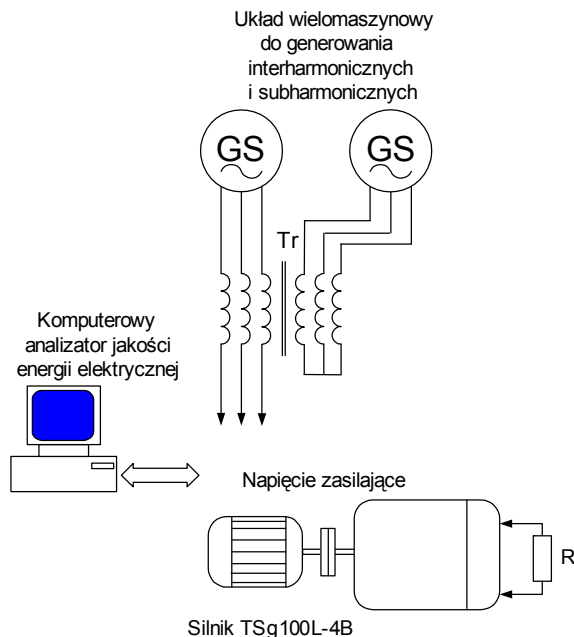
uzwojeń może być znaczące skrócenie czasu życia maszyny, szczególnie w przypadku silników dużej i średniej mocy [1].

Wpływ subharmonicznych na silnik indukcyjny analizowano w pracach [1, 3, 4, 7, 10, 12, 13, 14, 18]. W artykule [1] przedstawiono wyniki obliczeń wpływu subharmonicznych na zmniejszenie czasu życia silnika w wyniku nadmiernych obciążeń cieplnych. Należy podkreślić, że nie przedstawiono weryfikacji eksperymentalnej wykorzystanego modelu silnika. Z kolei w pracy [18] przeprowadzono analizę subharmonicznych i interharmonicznych prądu w uzwojeniach silnika indukcyjnego za pomocą metody obliczeniowej. Również w rozważanym artykule [18] nie przedstawiono weryfikacji wykorzystanego modelu silnika. W pracy [4] zamieszczono wyniki obliczeń dotyczących wpływu subharmonicznych na straty mocy i moment obrotowy silnika (bez weryfikacji wykorzystanego modelu) oraz zmierzone przyrosty temperatury dla subharmonicznych o wartości skutecznej 5% składowej podstawowej napięcia (U_1) i częstotliwości 50... 75% f_N . Wyniki badań eksperymentalnych zamieszczono również w pracach [10, 12, 14]. Wykazano między innymi, że modele silnika zastosowane we wspomnianych artykułach de Abreu i Emanuela oraz Fuchsa i innych [1, 3, 4] prowadzą do znaczącego niedoszacowania temperatury uzwojeń [14]. Z kolei w pracy [13] udowodniono, że subharmoniczne powodują znacznie mniejszy wzrost strumienia magnetycznego w maszynie niż wynikający z dotychczasowych analiz teoretycznych [1]. W pracach [10, 12] przedstawiono wstępne wyniki badań dotyczące wpływu subharmonicznych na rozkład temperatury w maszynie oraz wpływu częstotliwości subharmonicznych na dodatkowy przyrost temperatury uzwojeń. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wpływu amplitudy subharmonicznych na temperaturę uzwojeń i przebieg prądu silnika indukcyjnego.

1. STANOWISKO POMIAROWE

Badania eksperymentalne, których wyniki zaprezentowano w niniejszym artykule, przeprowadzono dla stosunkowo mocno nasyconego [16] silnika indukcyjnego klatkowego typu TSg100L-4B o mocy 3 kW. W różnych częściach badanego silnika – czołach uzwojeń, części żłobkowej uzwojenia, zębach i rdzeniu stojana, na obudowie, pod łożyskami oraz w powietrzu wewnątrz maszyny – wbudowano 19 termopar, natomiast w wirniku zainstalowano indywidualnie kalibrowane termistory. Badany silnik obciążono prądnicą prądu stałego oraz zasilano z układu wielomaszynowego do generowania subharmonicznych. W jego skład wchodziły dwie prądnice synchroniczne sprzęgnięte poprzez transformator (układ połączeń zaczerpnięto z pracy [15]). W celu generowania subharmonicznych jedną z prądnic synchronicznych należy napędzać z prędkością odpowiadającą częstotliwości podstawowej harmonicznej, a drugą z prędkością odpowiadającą częstotliwości składowej subharmonicznej. Pomiar zawartości subharmonicznych w przebiegach napięcia przeprowadzono za pomocą komputerowego analizatora jakości energii

elektrycznej opracowanego w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 1, dane badanego silnika – w pracy [9], a schemat rozmieszczenia termopar – w artykule [7].



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego [oprac.własne]

2. WPŁYW SUBHARMONICZNYCH NA STRATY

Dla określonych warunków chłodzenia przyrosty temperatury w maszynie zależą od strat w jej poszczególnych elementach. Największy wpływ na temperaturę uzwojeń mają straty, które bezpośrednio się w nich wydzielają [5, 8, 10]. W przypadku rozważanego zaburzenia wzrost strat w uzwojeniach wiąże się m.in. z przepływem subharmonicznych prądu. Przy pominięciu wpływu temperatury na rezystancję uzwojeń dodatkowe straty mocy są proporcjonalne do kwadratu wartości skutecznej subharmonicznych prądu. Należy jednak zauważyć, że zwiększenie rezystancji uzwojeń w wyniku przegrzania maszyny powoduje dalszy wzrost strat w maszynie, a w szczególności wzrost strat w uzwojeniach od podstawowej harmonicznej prądu [5, 6, 8, 9, 10].

Jak już wspomniano, subharmoniczne napięcia wywołują również inne zjawiska, niekorzystnie oddziałujące na silnik. Jak wynika z badań doświadczalnych autorów, powodują one m.in. niewielki wzrost harmonicznej podstawowej prądu pobieranego przez silnik. W przypadku badanego stosunkowo mocno nasyczonego

silnika typu TSg100L-4B subharmoniczna napięcia o wartości $U_{sh} = 3,5\% U_1$ i częstotliwości równej 5 Hz powoduje wzrost podstawowej harmonicznej prądu stojana o ok. 0,3 A, tj. o ok. 4–5% I_N . Należy nadmienić, że na obecnym etapie badań nie została jeszcze poznana zależność pomiędzy amplitudą, częstotliwością subharmoniczną, parametrami silnika oraz wzrostem podstawowej harmonicznej prądu. Jedną z możliwych przyczyn tego wzrostu mogą być nieliniowe właściwości obwodu magnetycznego silnika (subharmoniczne powodują wzrost strumienia magnetycznego [13]).

Załóżmy, że składowa podstawowa prądu I_1 wzrośnie o wartość $\Delta I_1 \ll I_1$. Wówczas można napisać następującą zależność (przy pominięciu wpływu temperatury uzwojeń na straty mocy [5, 8, 10]):

$$\Delta P_u \sim (I_1 + \Delta I_1)^2 = I_1^2 + 2I_1 \Delta I_1 + \Delta I_1^2 \approx I_1^2 + 2I_1 \Delta I_1 \quad (1)$$

gdzie:

ΔP_u – straty mocy w uzwojeniach,

I_1 – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej prądu,

ΔI_1 – przyrost podstawowej harmonicznej prądu spowodowany występowaniem składowych subharmonicznych.

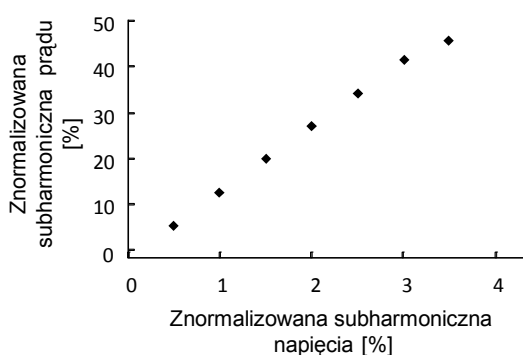
Zgodnie z powyższą zależnością straty mocy w uzwojeniach spowodowane przepływem prądu podstawowej harmonicznej rosną w przybliżeniu proporcjonalnie do przyrostu ΔI_1 . Ponieważ, jak już wspomniano, na obecnym etapie badań, zjawisko wzrostu podstawowej harmonicznej prądu nie zostało wystarczająco poznane, na podstawie analizy czynników powodujących wzrost strat w maszynie nie można jednoznacznie stwierdzić, czy dodatkowe przyrosty temperatury uzwojeń silnika powinny rosnąć z kwadratem subharmonicznej, czy zgodnie z inną zależnością. Charakter powyższej zależności można zbadać za pomocą metod eksperymentalnych.

3. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

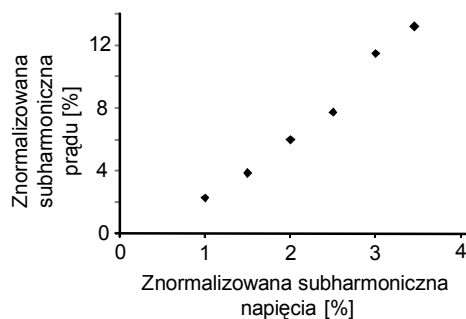
Poniżej przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących wpływu subharmonicznych o kolejności zgodnej na prądy w stojanie silnika i na nagrzewanie się czoł uzwojeń. Odpowiednie pomiary wykonano dla momentu obciążenia równego znamionowemu oraz podstawowej harmonicznej napięcia o wartości znamionowej.

Na rysunku 2 i 3 zamieszczono charakterystyki znormalizowanej wartości subharmonicznych prądu stojana (odniesionej do prądu znamionowego) w funkcji znormalizowanej wartości subharmonicznych napięcia (odniesionej do wartości napięcia znamionowego). Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów dla częstotliwości subharmonicznych f_{sh} równych 5 Hz (10% częstotliwości podstawowej harmonicznej), a na rysunku 3 – dla częstotliwości f_s równej 40 Hz (80% częstotliwości podstawowej harmonicznej). Dla częstotliwości f_{sh} równej 5 Hz (rys. 2) subharmoniczna napięcia U_{sh} o wartości 3,5% napięcia znamionowego (U_n) spo-

wodowała przepływ subharmonicznego prądu równego około 46% prądu znamionowego (I_n). Natomiast dla częstotliwości f_{sh} równej 40 Hz (rys. 3) znormalizowane wartości subharmonicznego prądu są ponadczterokrotnie mniejsze. Przykładowo, subharmonicznego napięcia U_{sh} o wartości 3,5% U_n odpowiadała subharmonicznego prądu I_{sh} równa 3% I_n . Znaczące różnice pomiędzy rozważanymi częstotliwościami subharmonicznymi wynikają z faktu, że prądy wywołane subharmonicznymi o niskich częstotliwościach są ograniczone tylko niewielką rezystancją uzwojeń. Natomiast dla subharmonicznymi o większych częstotliwościach prądy te dodatkowo ogranicza reaktancja rozproszenia. Warto również nadmienić, że obie rozważane charakterystyki są liniowe.



Rys. 2. Znormalizowana wartość subharmonicznego prądu stojana (odniesiona do prądu znamionowego) w funkcji znormalizowanej wartości subharmonicznego napięcia (odniesionej do napięcia znamionowego) dla subharmonicznymi o częstotliwości $f = 5$ Hz [oprac. własne]

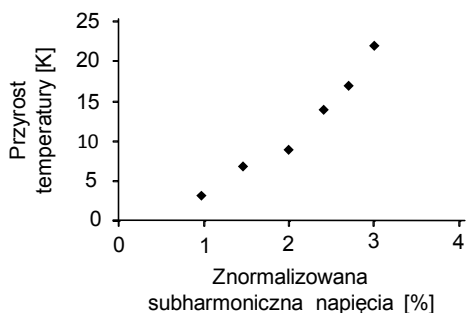


Rys. 3. Znormalizowana wartość subharmonicznego prądu stojana (odniesiona do prądu znamionowego) w funkcji znormalizowanej wartości subharmonicznego napięcia (odniesionej do napięcia znamionowego) dla subharmonicznymi o częstotliwości $f = 40$ Hz [oprac. własne]

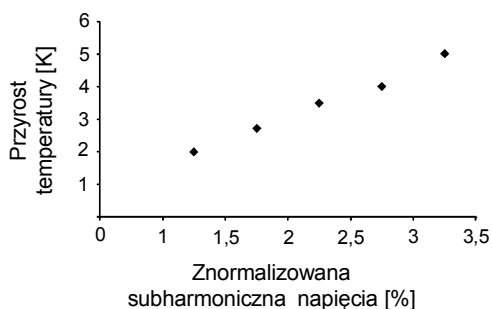
Na kolejnych rysunkach (rys. 4 i 5) zamieszczono charakterystyki dodatkowego przyrostu temperatury uzwojeń w funkcji znormalizowanej wartości subharmonicznego napięcia. Rysunek 4 dotyczy badań cieplnych dla częstotliwości subharmonicznymi f_{sh} równej 5 Hz, a rysunek 5 – 40 Hz. W przypadku badanego silnika, dla częstotli-

wości f_{sh} równej 5 Hz dodatkowy przyrost temperatury uzwojeń jest nawet ok. cztero-, pięciokrotnie wyższy niż dla f_{sh} równej 40 Hz. Dla częstotliwości 5 Hz i subharmonicznej napięcia U_{sh} równej 3% U_n zmierzony dodatkowy przyrost temperatury wynosił ok. 22 K, natomiast dla częstotliwości 40 Hz i subharmonicznej U_{sh} równej 3,5 wynosił ok. 5 K.

Ponadto, analiza rozważanych wykresów wskazuje, że dla badanego silnika dodatkowy przyrost temperatury uzwojeń rośnie w przybliżeniu z kwadratem subharmonicznej napięcia dla częstotliwości f_{sh} równej 5 Hz oraz wolniej dla częstotliwości 40 Hz.



Rys. 4. Zmierzony dodatkowy przyrost temperatury czoł uzwojeń w funkcji znormalizowanej wartości subharmonicznej napięcia (odniesionej do napięcia znamionowego) dla subharmonicznych o częstotliwości $f = 5$ Hz [oprac. własne]



Rys. 5. Zmierzony dodatkowy przyrost temperatury czoł uzwojeń w funkcji znormalizowanej wartości subharmonicznej napięcia (odniesionej do napięcia znamionowego) dla subharmonicznych o częstotliwości $f = 40$ Hz [oprac. własne]

WNIOSKI

Prezentowane wyniki badań eksperymentalnych dla subharmonicznych o kolejności zgodnej dowodzą, że subharmoniczne te powodują nieznaczny wzrost podstawowej harmonicznej prądu pobieranego przez silnik indukcyjny. Ponadto dla częstotliwości subharmonicznych znacznie mniejszej od częstotliwości harmo-

nicznej podstawowej dodatkowy przyrost temperatury uzwojeń rośnie w przybliżeniu z kwadratem subharmonicznej napięcia. Natomiast dla subharmonicznych o częstotliwości zbliżonych do częstotliwości podstawowej harmonicznej dodatkowy przyrost temperatury rośnie wolniej niż z kwadratem subharmonicznych napięcia w przypadku silnika stosunkowo mocno nasyczonego.

Dokładne poznanie rozważanych zagadnień będzie tematem dalszych dociekań autorów.

LITERATURA

1. Abreu J.P.G. de, 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, January/February 2002, vol. 38, s. 12–20.
2. Barros J., Apraiz M. de, *Measurement of subharmonics in power voltage*, Proc. of 2007 IEEE Power Tech, Lausanne, Switzerland, 1–5 July 2007, s. 1736–1740.
3. 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, Jul. 1986, vol. PWRD-1, no. 3, s. 301–307.
4. 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) s. 1775–1786.
5. Gnaciński P., *Effect of power quality on windings temperature of marine induction motors. Part I. Machine model*, Energy Conversion and Management, Elsevier, October 2009, vol. 50, no. 10, s. 2463–2476.
6. Gnaciński P., *Effect of unbalanced voltage on windings temperature, operational life and load carrying capacity of induction machine*. Energy Conversion and Management, April 2008, vol. 49, no. 4, s. 761–770.
7. Gnaciński P., *Energy saving work of frequency-controlled induction cage machine*, Energy Conversion and Management, Elsevier, March 2007, vol. 48, no. 3, s. 919–926.
8. Gnaciński P., *Prediction of windings temperature rise in induction motors supplied with distorted voltage*. Energy Conversion and Management, April 2008, vol. 49, no. 4, s. 707–717.
9. 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, June 2008, vol. 23, no. 2, s. 363–371.
10. Gnaciński P., *Wybrane zagadnienia wpływu jakości energii elektrycznej na obciążenia cieplne silników indukcyjnych klatkowych małej mocy*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2009.
11. 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, October 2010, vol. 50, no. 10, s. 2477–2485.
12. 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, s. 826–829.
13. Gnaciński P., Pepliński M., Szweda 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).

14. Gnaciński P., Pepliński M., Szweda M., *Wpływ podharmonicznych na obciążenie cieplne silnika indukcyjnego*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2009, nr 84, s. 97–101.
15. 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, March 2001, vol. 16, no. 1, s. 55–60.
16. Latek W., *Badanie 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 malej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych*.
18. 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, April 2008, vol. 23, no. 2, s. 1207–1214.

INVESTIGATIONS OF INDUCTION MACHINE SUPPLIED WITH VOLTAGE CONTAINING SUBHARMONIC COMPONENTS

Summary

One of the most frequently appearing power quality disturbances are waveform voltage distortions that are usually connected with higher harmonics. However, on some powers systems interharmonic and subharmonic voltage components are present too. They cause additional power losses and an increase in thermal loads of induction machines. This paper deals with an effect of subharmonic on currents and heating of an induction cage machine.