

WPŁYW TEMPERATURY UZWOJEŃ SILNIKA INDUKCYJNEGO ZASILANEGO NAPIĘCIEM ZAWIERAJĄCYM SUBHARMONICZNE NA MOMENT ELEKTROMAGNETYCZNY

THE INFLUENCE OF WINDING TEMPERATURE ON ELECTROMAGNETIC TORQUE OF INDUCTION MOTOR UNDER VOLTAGE CONTAINING SUBHARMONICS

Piotr Gnaciński*, Damian Hallmann

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81-87, 81-225 Gdynia, Wydział Elektryczny,
Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, e-mail: p.gnacinski@we.am.gdynia.pl

* Adres do korespondencji/Corresponding author

Streszczenie: Artykuł dotyczy wpływu temperatury uzwojeń silnika oraz zaburzeń napięcia zasilania na moment elektromagnetyczny. W pracy przedstawiono przebiegi momentu oraz ich widma. Porównano amplitudy wahań dla różnych częstotliwości subharmonicznych. Zamieszczono wyniki eksperymentów numerycznych, wykonanych za pomocą metody elementów skończonych dla silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 3 kW.

Słowa kluczowe: jakość napięcia, modelowanie polowe, silnik indukcyjny, subharmoniczne.

Abstract: The article concerns the impact of the winding temperature and supply voltage disturbances on the electromagnetic torque. The torque waveforms and their spectrums are presented. The amplitude of torque fluctuation is compared for various subharmonics frequencies. The results of numerical computations with the finite element method are shown for a 3 kW cage induction motor.

Keywords: voltage quality, field modeling, induction motor, subharmonics.

1. WSTĘP

Jedną z przyczyn występowania odkształcenia przebiegu napięcia jest praca odbiorników nieliniowych, takich jak, piece indukcyjne [Sürgevil i Akpnar 2009], piece łukowe, napędy elektryczne dużej mocy, napędy walcownicze, maszyny ciągnikowe [Hanzelka 2011]. Na jakość energii w sieci wpływają również procesy łączeniowe baterii kondensatorów, nieprawidłowości w pracy przełącznika zache-

pów transformatora, rozruchy silników asynchronicznych, spawarki elektryczne, bojler, piły i młoty elektryczne, pompy i kompensatory, windy, dźwigi i inne [Sürgevil i Akpnar 2009; Deokar, Waghmare i Jadhav 2010; Yilmaz, Ermis i Cadirci 2012]. Przykładowo, w pracy [Sürgevil i Akpnar 2009] opisano wpływ pieców indukcyjnych dużej mocy zainstalowanych w stalowniach na pracę prądnicy synchronicznej i silnika indukcyjnego. Odnotowano amplitudę wahań napięcia około 3% przy pracy jednego pieca indukcyjnego. W niektórych systemach źródłem wahań może być również oświetlenie fluorescencyjne [Otomański 2010].

Wahania napięcia można traktować jako złożenie interharmonicznych i subharmonicznych [Tennakoon, Perera i Robinson 2008]. Inną przyczyną występowania subharmonicznych jest praca odbiorników nieliniowych i elektrowni wiatrowych oraz innych źródeł energii [Basic 2010; Deokar, Waghmare i Jadhav 2010; Chang i in. 2011; Hsu, Chen i Lin 2011; Kolagar i Shoulaie 2011; Yilmaz, Ermis i Cadirci 2012; Karimi i in. 2016; Kovaltchouk i in. 2016].

Subharmoniczne napięcia są zaburzeniem szczególnie szkodliwym dla transformatorów [Gallo i in. 2004], źródeł światła [Deokar, Waghmare i Jadhav 2010], prądnic synchronicznych [Sürgevil i Akpnar 2009] oraz silników indukcyjnych. W silnikach indukcyjnych powodują one m.in. wzrost wartości skutecznej prądu, wzrost strat mocy, temperatury uzwojeń oraz wahania momentu obrotowego i temperatury uzwojeń [Gallo i in. 2004; Gnaciński i Pepliński 2014].

Dotychczasowe badania wpływu omawianych zaburzeń na pracę silnika indukcyjnego prowadzone były głównie za pomocą metod obwodowych i doświadczalnych [de Abreu i Emanuel 2002; Fuchs, Roesler i Masoum 2004; Tennakoon, Perera i Robinson 2008; Baptista i in. 2010; Gnaciński i Pepliński 2014]. Wstępne wyniki badań za pomocą metod polowych zamieszczono w późniejszych pracach autorów [Gnaciński i Hallmann 2015; 2016; 2017].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki obliczeń polowych momentu elektromagnetycznego silnika w warunkach napięcia zasilania znamionowego, dla silnika zimnego (temperatura uzwojeń 20°C) oraz dla silnika po długotrwałej pracy z obciążeniem znamionowym.

2. OPIS MODELU

W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych silnika indukcyjnego klatkowego typu TSg 100L-4B, o mocy znamionowej 3 kW, napięciu znamionowym 380 V, prądzie znamionowym 6,9 A i prędkości znamionowej 1415 obr/min, M_n równym 20,25 Nm i uzwojeniach połączonych w trójkąt. Model silnika został zrealizowany w środowisku ANSYS Maxwell.

Poniżej przedstawiono ogólne równanie pola magnetycznego (1) zależnego od czasu i uwzględniające takie zjawiska, jak ruch ośrodka czy obecność magnesów trwałych [ANSYS *Technical Documentation*]:

$$\nabla \times v \nabla \times A = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla V + \nabla \times H_c + \sigma v \times \nabla \times A \quad (1)$$

gdzie:

- H_c – koercja magnesu trwałego,
- v – prędkość części ruchomych,
- A – wektorowy potencjał magnetyczny,
- V – potencjał elektryczny,
- ν – reluktywność,
- σ – konduktywność,
- J_s – gęstość prądu źródła.

Powyższe równanie jest wykorzystywane przez program ANSYS Maxwell. Z kolei dynamikę ruchu obrotowego opisuje równanie (2) [ANSYS *Technical Documentation*]:

$$J\beta + \lambda\omega = M_e - M_{op} \quad (2)$$

gdzie:

- J – moment bezwładności,
- ω – chwilowa kątowna,
- M_e – moment elektromagnetyczny,
- M_{op} – moment oporowy,
- β – przyspieszenie kątowe,
- λ – współczynnik tłumienia.

Do obliczeń wykorzystano model dwuwymiarowy, wykonany w układzie kartezjańskim. Do modelu została utworzona siatka podziału, która liczy około 20 tysięcy elementów.

Przyjęto, że silnik jest zasilany z układu trzech idealnych napięć międzyfazowych sinusoidalnych $e_{ab}(t)$, $e_{bc}(t)$, $e_{ca}(t)$, do których dodatkowo dodano subharmoniczną o wartości 2,5% składowej podstawowej napięcia zasilania. Napięcia zasilania można opisać za pomocą wzorów (3, 4, 5):

$$e_{ab}(t) = U_{max} \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t) + 0,025 \cdot U_{max} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{sbh} \cdot t) \quad (3)$$

$$e_{bc}(t) = U_{max} \cdot \sin\left(2\pi \cdot 50 \cdot t - \frac{2}{3}\pi\right) + 0,025 \cdot U_{max} \cdot \sin\left(2\pi \cdot f_{sbh} \cdot t - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (4)$$

$$e_{ca}(t) = U_{max} \cdot \sin\left(2\pi \cdot 50 \cdot t - \frac{4}{3}\pi\right) + 0,025 \cdot U_{max} \cdot \sin\left(2\pi \cdot f_{sbh} \cdot t - \frac{4}{3}\pi\right) \quad (5)$$

gdzie:

- U_{max} – wartość maksymalna składowej podstawowej napięcia zasilania,
- f_{sbh} – wartość częstotliwości subharmonicznej.

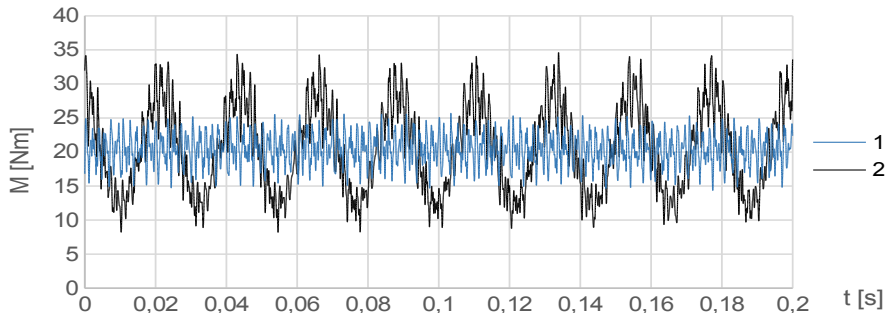
3. WYNIKI SYMULACJI

W artykule przedstawiono obliczenia dla napięcia sinusoidalnego zawierającego subharmoniczną o wartościach 2,5% i częstotliwości od 5 do 45 Hz z krokiem 5 Hz. W każdym rozpatrywanym przypadku napięcie zasilania silnika zawierało jedynie jedną subharmoniczną o wybranej częstotliwości.

Obliczenia wykonano dla silnika zimnego (temperatura uzwojeń wynosi 20°C) oraz po długotrwałej pracy znamionowej (temperatura uzwojeń wirnika wynosi 120,5°C, a temperatura uzwojeń stojana 98,5°C).

Wyniki prezentowane w pracy obliczono dla stanu ustalonego i znamionowego momentu obciążenia.

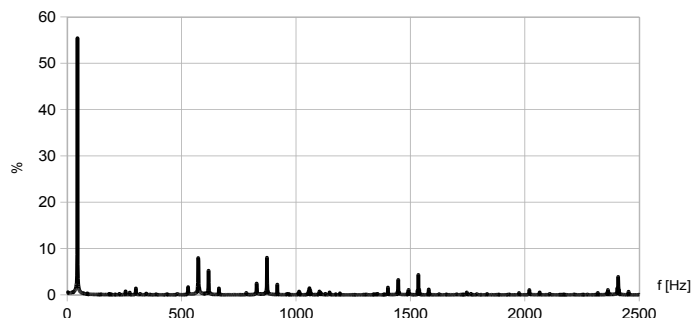
Na rysunku 1 przedstawiono przebiegu momentu elektromagnetycznego dla silnika nagrzanego i napięcia idealnie sinusoidalnego oraz napięcia zawierającego subharmoniczną o wartości 2,5% i częstotliwości 5 Hz. Amplituda wahań momentu dla prezentowanego przypadku wynosi 13,2 Nm.



Rys. 1. Przebieg momentu elektromagnetycznego dla silnika nagrzanego zasilanego napięciem w pełni sinusoidalnym (1) oraz zawierającym subharmoniczną o częstotliwości 5 Hz (2), $M = M_N$, $U_1 = U_N$, $f = f_N$

Fig. 1. Electromagnetic torque waveform for the warm motor supplied with fully sinusoidal voltage (1) and voltage containing subharmonic of frequency 5 Hz (2), $M = M_N$, $U_1 = U_N$, $f = f_N$

Na rysunku 2 przedstawiono widmo momentu elektromagnetycznego dla silnika zimnego, zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości 5 Hz.

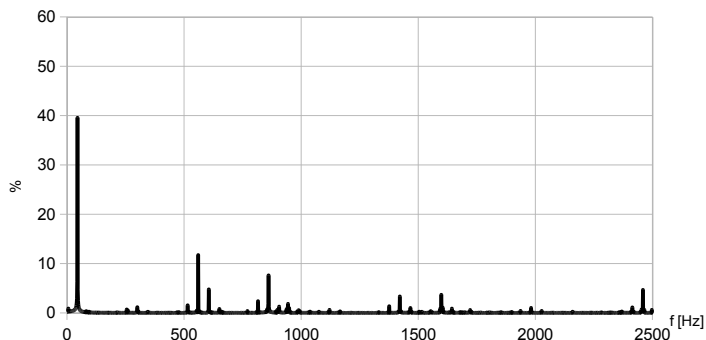


Rys. 2. Widmo momentu elektromagnetycznego dla zimnego silnika i napięcia zawierającego subharmoniczną o częstotliwości 5 Hz – poszczególne składowe odniesione do momentu znamionowego

Fig. 2. Spectrum of electromagnetic torque for cold motor and voltage containing subharmonic of frequency 5 Hz – individual components are related to the rated torque

Na rysunku 3 przedstawiono widmo momentu elektromagnetycznego dla silnika nagrzanego, zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości 5 Hz. Rozważane widma wyznaczono za pomocą FFT przy częstotliwości próbkowania 5 kHz i liczbie próbek równej 4096 (819,2 ms).

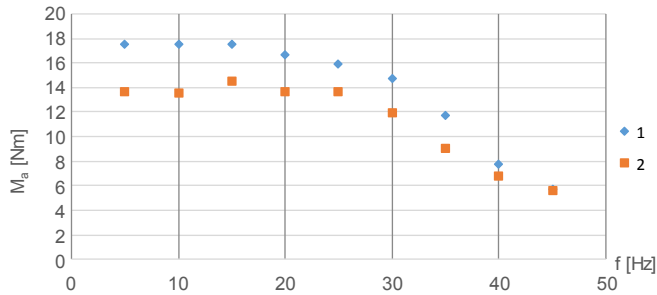
Na obu wykresach dominujący prążek występuje dla częstotliwości 45 Hz. Wynika to z różniącej się częstotliwości podstawowej harmoniczej i subharmoniczej. Dla silnika zimnego (rys. 2) zawartość składowej o częstotliwości 45 Hz wynosi 55,4% M_n , natomiast dla silnika nagrzanego – 39,5% M_n .



Rys. 3. Widmo momentu elektromagnetycznego dla nagrzanego silnika i napięcia zawierającego subharmoniczną o częstotliwości 5 Hz – poszczególne składowe odniesione do momentu znamionowego

Fig. 3. Spectrum of electromagnetic torque for warm motor and voltage containing subharmonic of frequency 5 Hz – individual components are related to the rated torque

Na rysunku 4 przedstawiono amplitudy wahań momentu obrotowego dla silnika zimnego oraz nagrzanego w funkcji częstotliwości subharmonicznych.



Rys. 4. Amplitudy wahań momentu (M_a) dla silnika zimnego (1) oraz nagrzanego (2) w funkcji częstotliwości subharmonicznej napięcia zasilania

Fig. 4. Graph of amplitude of torque fluctuation (M_a) for the cold motor (1) and the warm motor (2) versus subharmonic frequency of supply voltage

Największe amplitudy wystąpiły dla silnika zimnego i nagrzanego w zakresie częstotliwości subharmonicznych od 5 Hz do 15 Hz. Wynika to z faktu, że dla niskich częstotliwości subharmoniczne prądy są tłumione przede wszystkim przez rezystancję uzwojeń, natomiast dla częstotliwości zbliżonej do częstotliwości sieci – przez indukcyjność uzwojeń.

4. PODSUMOWANIE

Celem przeprowadzonej analizy było zbadanie wpływu temperatury uzwojeń silnika na przebieg momentu elektromagnetycznego silnika, zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne. Wyniki prezentowanych obliczeń dowodzą, że w przypadku silnika zimnego subharmoniczne powodują znaczne zwiększenie wahań momentu elektromagnetycznego w stosunku do silnika nagrzanego. Przedstawione wyniki badań mogą być użyteczne przy ocenie wpływu subharmonicznych na drgania silnika indukcyjnego, a w szczególności na drgania skrętne, które mogą powodować pęknięcia wału silnika oraz uszkodzenia sprzęgła [Feese, Maxfield i Hilscher 2008].

LITERATURA

de Abreu, J.P.G., Emanuel, A.E., 2002, *Induction Motor Thermal Aging Caused by Voltage Distortion and Imbalance: Loss of Useful Life and its Estimated Cost*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 1, s. 12–20.

ANSYS Technical Documentation, <http://www.ansys.com>.

- Baptista, J., Gonçalves, J., Soares, S., Valente, A., Morais, R., Bulas-Cruz, J., Reis, M.J., 2010, *Induction Motor Response to Periodical Voltage Fluctuations*, Proc. XIX International Conference on Electrical Machines ICEM, Roma, Italy.
- Basic, D., 2010, *Input Current Interharmonics of Variable-Speed Drives Due to Motor Current Imbalance*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, s. 2797–2806.
- Bolen, M.H.J., Gu, I.Y.H., 2006, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*, Wiley, New York.
- Chang, G.W., Chen, S.K., Su, H.J., Wang, P.K., 2011, *Accurate Assessment of Harmonic and Interharmonic Currents Generated by VSI-fed Drives under Unbalanced Supply Voltages*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 2, s. 1083–1091.
- Deokar, S.A., Waghmare, L., Jadhav, G.N., 2010, *Voltage Flicker Assessment of Induction Motors Used in the Integrated Water Pumping Station*, Proc. of Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Power India, New Delhi.
- Feese, T., Maxfield, R., Hilscher, M., 2008, *Torsional Vibration Problem with Motor/ID Fan System Due to PWM Variable Frequency Drive*, 37th Turbomachinery Symposium, Houston, TX, s. 9–11.
- Fuchs, E.F., Roesler, D.J., Masoum, M.A.S., 2004, *Are Harmonics Recommendations According to IEEE and IEC Too Restrictive?* IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, s. 1775–1786.
- Gallo, D., Langella, R., Testa, A., Emanuel, A., 2004, *On the Effects of Voltage Subharmonics on Power Transformers: a Preliminary Study*, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, Lake Placid, s. 501–506.
- Gnaciński, P., Hallmann, D., 2015, *Badania wstępne silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne z wykorzystaniem metod polowych*, Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe, 4(108), s. 65–69.
- Gnaciński, P., Hallmann, D., 2016, *Wstępne badania wahań prędkości obrotowej silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne*, Prace Instytutu Elektrotechniki, nr 275, s. 57–66.
- Gnaciński, P., Hallmann, D., 2017, *Badania wstępne silnika indukcyjnego w warunkach wahań napięcia z wykorzystaniem metod polowych*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 98, s. 64–70.
- Gnaciński, P., Pepliński, M., 2014, *Induction Cage Machine Supplied with Voltage Containing Subharmonics and Interharmonics*, IET Electric Power Applications, vol. 8, no. 8, s. 287–295.
- Hanzelka, Z., 2011, *Jakość energii elektrycznej. Wahania napięcia*, http://twelvee.com.pl/pdf/Hanzelka/cz_3_pelna.pdf.
- Hsu, C.T., Chen, C.S., Lin, C.H., 2011, *Electric Power System Analysis and Design of an Expanding Steel Cogeneration Plant*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 4, s. 1527–1535.
- Karimi, M., Mokhlis, H., Naidu, K., Uddin, S., Bakar, A.H.A., 2016, *Photovoltaic Penetration Issues and Impacts in Distribution Network – A Review*, Renewable Energy, vol. 53, s. 594–605.
- Kolagar, A.D., Shoulaie, A., 2011, *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 (PEDSTC), Tehran, Iran.
- Kovaltchouk, T., Armstrong, S., Blavette, A., Ahmed, H.B., Multon, B., 2016, *Wave Farm Flicker Severity: Comparative Analysis and Solutions*, Renewable Energy, vol. 91, s. 32–39.
- Otomański, P., 2010, *Wpływ wahań napięcia na wybrane źródła promieniowania optycznego*, Pomiar. Automatyka. Kontrola, R. 56, nr 9, s. 1077–1080.

- Pepliński, M., 2014, *Wpływ subharmonicznych i interharmonicznych napięcia na prądy i temperaturę uzwojeń silników indukcyjnych małych mocy*, rozprawa doktorska, Akademia Morska w Gdyni, Gdynia.
- Sürgevil, T., Akpınar, E., 2009, *Effects of Electric Arc Furnace Loads on Synchronous Generators and Asynchronous Motors*, Proc. of International Conference on Electrical and Electronics Engineering ELECO, Bursa, Turkey, s. I-49 – I-53.
- Tennakoon, S., Perera, S., Robinson, D., 2008, *Flicker Attenuation, Part I: Response of Three-phase Induction Motors to Regular Voltage Fluctuations*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 2, s. 1207–1214.
- Yilmaz, I., Ermis, M., Cadirci, I., 2012, *Medium-Frequency Induction Melting Furnace as a Load on the Power System*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 4, s. 1203–1214.

