

OBCIĄŻALNOŚĆ MOCĄ SILNIKA INDUKCYJNEGO W WARUNKACH WYSTĘPOWANIA ODCHYLENIA NAPIĘCIA I CZĘSTOTLIWOŚCI

THE LOAD-CARRYING CAPACITY OF AN INDUCTION CAGE MACHINE UNDER VOLTAGE AND FREQUENCY DEVIATION

Andrzej Budziłowicz, Piotr Gnaciński*

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 odchylenia częstotliwości i napięcia zasilającego na dopuszczalną obciążalność silnika indukcyjnego klatkowego. Wyniki badań przedstawiono dla silnika o mocy 3 kW budowy całkowicie zamkniętej. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem nieliniowego cieplnego schematu zastępczego silnika.

Słowa kluczowe: jakość napięcia, silnik indukcyjny, temperatura.

Abstract: The paper deals with the effect of frequency and voltage deviation on load-carrying capacity of an induction cage machine. The results of computer simulation are shown for an induction machine of rated power 3 kW. Computations were performed by using a non-linear equivalent thermal network of a totally enclosed induction motor.

Keywords: voltage quality, induction motor, temperature.

1. WSTĘP

Okrętowy system elektroenergetyczny należy do grupy systemów autonomicznych. Charakteryzuje się małą mocą zwarciovą, ograniczoną liczbą źródeł energii elektrycznej oraz niekorzystnym stosunkiem mocy największych odbiorników do mocy prądnicy [Mindykowski 2014].

W celu poprawy bezpieczeństwa na morzu wprowadzono odpowiednie przepisy okrętowych towarzystw klasyfikacyjnych [ABS 2014]. Zawierają one m.in. szczegółowe zapisy dotyczące systemu elektroenergetycznego statków. Zgodnie z normami urządzenia elektryczne powinny funkcjonować w sposób zadowalający w "normalnie występujących zmianach napięcia i częstotliwości", które zwykle przyjmuje się jako +6%, –10% napięcia i $\pm 5\%$ częstotliwości [ABS 2014]. Należy nadmienić, że w przypadku generatora wałowego, zasilającego

bezpośrednio system elektroenergetyczny, odchylenia częstotliwości wynoszą $\pm 5,5\%$. Dodatkowo tolerancja napięcia wytwarzanego przez prądnicę wynosi zwykle $\pm 2,5\%$, a spadek dopuszczalny napięcia w systemie -6% [ABS 2014]. Poza odchyleniem napięcia i częstotliwości, w systemach okrętowych mogą pojawić się znaczne odkształcenia przebiegu napięcia [Mindykowski 2014]. Dopuszczalny współczynnik THD wynosi zwykle 5 lub 10%. Dodatkowe przepisy niektórych towarzystw klasyfikacyjnych umożliwiają przyjęcie arbitralnych poziomów THD [ABS 2014]. Warto dodać, że dopuszczalne poziomy odchylen napięcia nie są zwykle określone w odpowiednich przepisach [ABS 2014; Mindykowski 2014,].

Przepisy towarzystw klasyfikacyjnych określają również sposoby sprawdzania urządzeń elektrycznych na statkach. Powyższy wymóg, zgodnie z którym urządzenia "powinny być zdolne do pracy w sposób zadowalający w normalnie występujących wahaniami napięcia i częstotliwości" sugeruje, że powinny być badane pod kątem różnych kombinacji napięcia i częstotliwości. W rzeczywistości jedynie urządzenia nawigacyjne i radiowe należy badać w równoważnych warunkach, natomiast badania cieplne maszyn elektrycznych trzeba wykonywać tylko w nominalnych warunkach pracy zgodnie z metodami badań określonymi w publikacji IEC 60034-1 [IEC 2004], która jest normą dla maszyn elektrycznych w systemach lądowych [ABS 2014].

W konsekwencji silniki instalowane na statkach zazwyczaj nie mają odpowiedniego zapasu cieplnego, umożliwiającego długotrwałą pracę w warunkach zasilania napięciem o zaniżonej jakości. Pojawienie się zaburzeń jakości napięcia może powodować znaczny wzrost temperatury uzwojeń [Gnaciński, Mindykowski i Tarasiuk 2009] oraz przyspieszone starzenie cieplne układu izolacyjnego [Gnaciński i Pepliński 2016]. Skutecznym sposobem ochrony silnika przed przegrzaniem w wyniku zasilania napięciem o zaniżonej jakości jest odpowiednie obniżenie mocy na wale (ang. *derating*) [Gnaciński i Pepliński 2016].

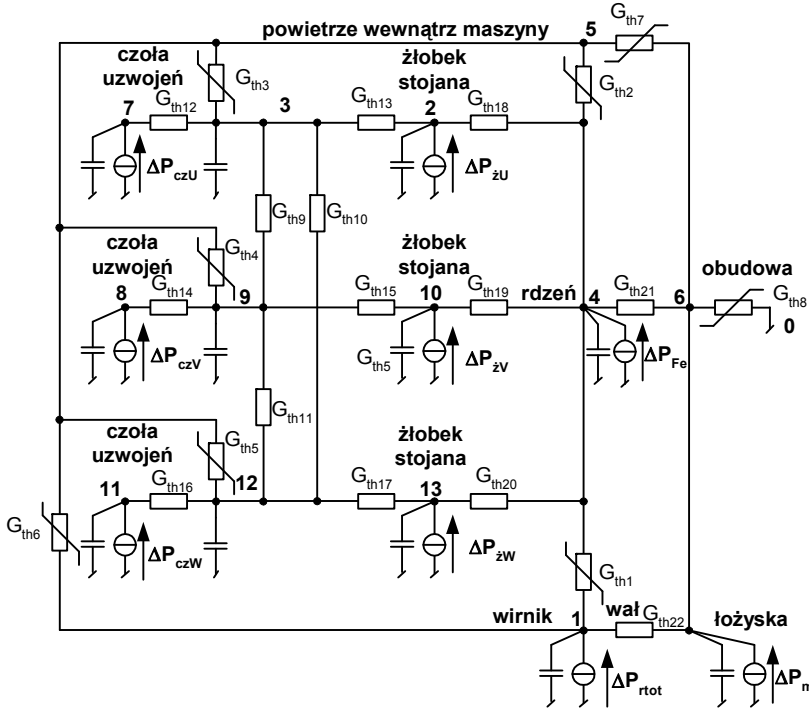
Dotychczasowe badania na temat rozważanej problematyki dotyczą w znacznej mierze przypadków zaburzeń jakości napięcia typowych dla sieci lądowych [Gnaciński 2016]. Niepełne wyniki badań dla silników morskich zaprezentowano w [Gnaciński 2014].

Niniejszy artykuł jest poświęcony dopuszczalnej obciążalności mocą i momentem silnika indukcyjnego w warunkach odchylenia częstotliwości i wartości skutecznej napięcia zasilającego.

2. OPIS MODELU

Do badań symulacyjnych wykorzystano metodę cieplnych schematów zastępczych [Gnaciński 2009]. Metoda ta cechuje się stosunkowo prostym modelem matematycznym oraz wystarczającą dokładnością do celów praktycznych. Ponadto jest powszechnie stosowana w analizie zagadnień cieplnych, w których nie wymaga się dokładnej znajomości rozkładu temperatury wewnątrz maszyny. W rozważanej

metodzie pojemności cieplne są modelowane przez pojemności elektryczne, rezystancje cieplne przez rezystancje elektryczne, przepływ ciepła przez przepływ prądu, a temperaturom odpowiadają potencjały. Wykorzystany zastępczy schemat cieplny zamieszczono na rysunku 1. Jego szczegółowy opis przedstawiono w [Gnaciński 2009].



Rys. 1. Nieliniowy cieplny schemat zastępczy silnika indukcyjnego klatkowego budowy całkowicie zamkniętej [Gnaciński 2009]

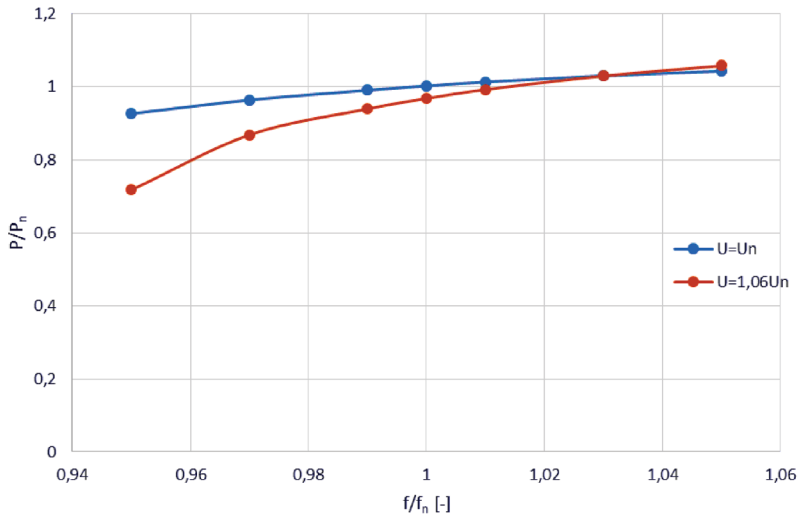
Fig. 1. A non-linear equivalent thermal network of a totally enclosed cage induction motor [Gnaciński 2009]

3. WYNIKI SYMULACJI

Badania przeprowadzono dla silnika typu TSg 100L-4B o mocy znamionowej 3 kW i stosunkowo mocno nasyconym obwodzie magnetycznym [Gnaciński 2014]. Dopuszczalne obciążenie wyznaczono w taki sposób, aby przyrost temperatury uzwojeń był równy przyrostowi dla warunków pracy znamionowej.

Na rysunku 2 przedstawiono wykres dopuszczalnego obciążenia momentem w funkcji częstotliwości napięcia zasilającego. Obliczenia wykonano dla napięcia równego $U = 100\% U_N$ oraz $U = 106\% U_N$. Dla napięcia o wartości znamionowej

i częstotliwości równej $f = 95\% f_N$ dopuszczalne obciążenie wynosi $96,8\% M_N$, natomiast dla częstotliwości $f = 105\% f_N$ dopuszczalne obciążenie wynosi $99,4\% M_N$. W przypadku podwyższenia napięcia dla $U = 106\% U_N$ i częstotliwości $f = 95\% f_N$ dopuszczalne obciążenie wynosi $73,6\% M_N$, natomiast dla częstotliwości $f = 105\% f_N$ dopuszczalne obciążenie wynosi $100\% M_N$.

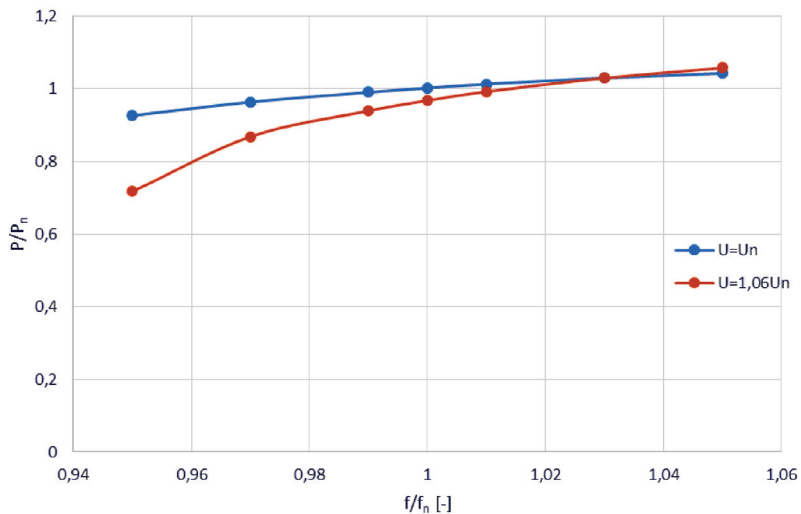


Rys. 2. Charakterystyka dopuszczalnego obciążenia momentem w funkcji częstotliwości napięcia zasilającego

Fig. 2. Permissible load torque versus frequency of supply voltage

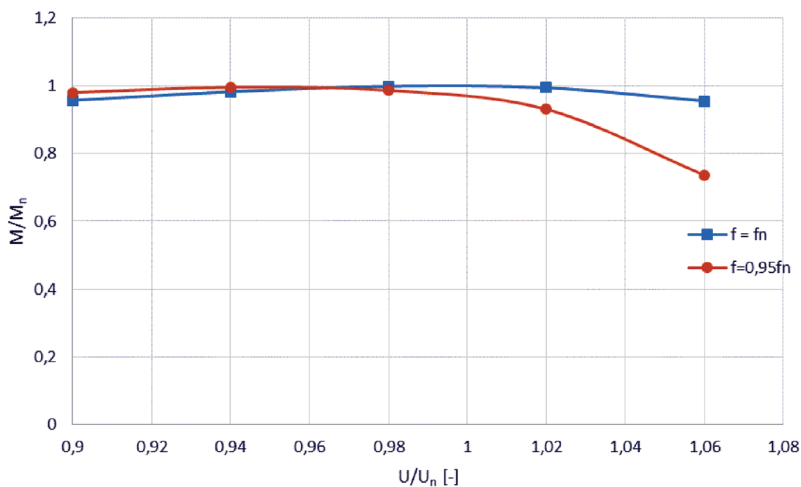
Na rysunku 3 przedstawiono zależność dopuszczalnego obciążenia mocą i częstotliwości napięcia zasilającego. Dla $U = U_N$ i $f = 95\% f_n$ dopuszczalne obciążenie wynosi $92,7\% P_N$, natomiast dla $f = 105\% f_n$ wynosi ono $104\% P_N$. W przypadku podwyższenia napięcia o 6% ($U = 106\% U_N$) i obniżenia częstotliwości o 5% ($f = 95\% f_n$) dopuszczalne obciążenie wynosi $71,8\% P_N$, natomiast dla $f = 105\% f_n - 105\% P_N$.

Na rysunku 4 zamieszczono wykresy dopuszczalnego obciążenia momentem w funkcji napięcia zasilającego. Rozważany przypadek dotyczy zasilania napięciem o częstotliwości $f = f_n$ i $f = 95\% f_n$ oraz wartości skutecznej napięcia, zmieniającej się w zakresie od 90 do 106% U_N . Dla częstotliwości równej $f = f_n$ oraz napięcia $U = 90\% U_N$ dopuszczalne obciążenie wynosi $95,8\% M_N$, wzrost wartości napięcia zasilania jedynie nieznacznie wpływa na dopuszczalną obciążalność momentem. Dla $U = 106\% U_N$ dopuszczalne obciążenie wynosi $95,6\% M_N$, z kolei dla obniżenia częstotliwości napięcia zasilającego $f = 95\% f_n$ i napięcia $U = 90\% U_N$ dopuszczalne obciążenie wynosi $98\% M_N$. Zwiększenie wartości napięcia zasilania do $U = 106\% U_N$ powoduje spadek dopuszczalnego obciążenia do zaledwie $73,6\% M_N$.



Rys. 3. Charakterystyka dopuszczalnego obciążenia mocą w funkcji częstotliwości napięcia zasilającego

Fig. 3. Permissible load power versus frequency of supply voltage

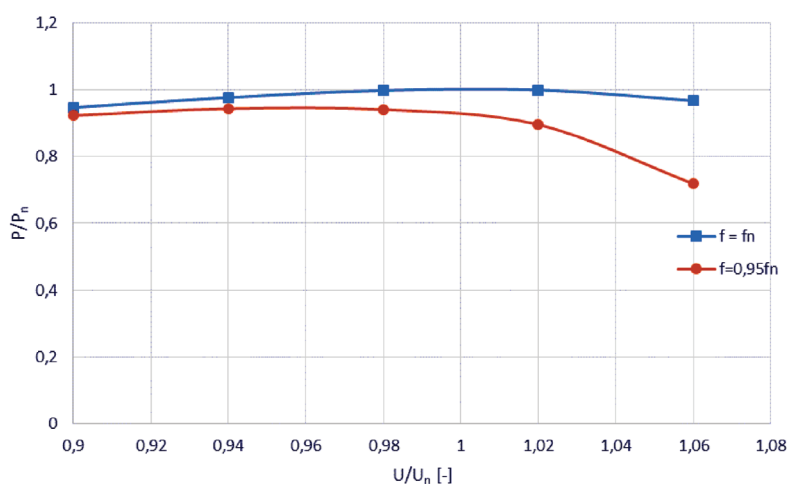


Rys. 4. Charakterystyka dopuszczalnego obciążenia momentem w funkcji napięcia zasilającego

Fig. 4. Permissible load torque versus supply voltage

Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki dopuszczalnego obciążenia mocą w funkcji napięcia zasilającego. Obliczenia wykonano dla częstotliwości równej $100\% f_N$ oraz $95\% f_N$. Dla $f = f_N$ i $U = 90\% U_N$ dopuszczalne obciążenie wynosi $94,7\% P_N$, natomiast dla $U = 106\% U_N$ dopuszczalne obciążenie mocą jest równe $96,8\% P_N$. Dla jednoczesnego obniżenia częstotliwości i napięcia do wartości równych $f = 95\% f_N$ i $U = 90\% U_N$ dopuszczalne obciążenie wynosi $92,4\% P_N$. Z kolei dla częstotliwości równej $f = 95\% f_N$ i napięcia $U = 106\% U_N$ dopuszczalne obciążenie wynosi $71,8\% P_N$.

Podsumowując, największe spadki dopuszczalnego obciążenia momentem i mocą dla badanego silnika wystąpiły przy obniżeniu częstotliwości i wzroście wartości skutecznej napięcia zasilania. Jest to spowodowane nasyceniem obwodu magnetycznego silnika.



Rys. 5. Charakterystyka dopuszczalnego obciążenia mocą w funkcji napięcia zasilającego

Fig. 5. Permissible load power versus supply voltage

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona symulacja dostarcza istotnych informacji w zakresie zmian obciążalności mocą silnika w warunkach wystąpienia odchylenia częstotliwości i napięcia zasilającego. Zaobserwowano szczególnie znaczący spadek obciążalności mocą oraz momentem dla podwyższonego napięcia $U = 106\% U_N$ i jednoczesne obniżenie częstotliwości $f = 95\% f_N$. Natomiast dla podwyższenia częstotliwości do $f = 105\% f_N$ spadek obciążalności był znacznie mniejszy. Należy nadmienić, że prezentowanych wyników badań nie można bezpośrednio przenosić na silniki ze słabo nasyconym obwodem magnetycznym [Gnaciński 2014].

LITERATURA

- American Bureau of Shipping, 2014, *Rules for Building and Classing Steel Vessels, Part 4, Vessel Systems and Machinery*.
- Det Norske Veritas, 2001, *Rules for Ships/High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft*.
- Gnaciński, P., 2009, *Derating of an Induction Machine Under Voltage Unbalance Combined with Over- or Undervoltages*, Energy Conversion and Management, vol. 50, s. 1101–1107.
- Gnaciński, P., 2009, *Wybrane zagadnienia oceny wpływu jakości energii elektrycznej na obciążenia cieplne silników indukcyjnych klatkowych małych mocy*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia.
- Gnaciński, P., 2014, *Thermal Loss of Life and Load-Carrying Capacity of Marine Induction Motors*, Energy Conversion and Management, vol. 78, no. 4, s. 574–583.
- Gnaciński, P., Mindykowski, J., Tarasiuk, T., 2008, *A New Concept of the Power Quality Temperature Factor and its Experimental Verification*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 57, no. 8, s. 1651–1660.
- Gnaciński, P., Mindykowski, J., Tarasiuk, T., 2009, *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, vol. 50, no. 10, s. 2477–2485.
- Gnaciński, P., Pepliński, M., 2016, *Lowered Voltage Quality and Load-Carrying Capacity of Induction Motors*, IET Electric Power Applications, no. 10(9), s. 843–848.
- IACS Req. 2010, International Association of Classification Societies, *Requirements Concerning Electrical Installations*.
- IACS Req. 2014, International Association of Classification Societies, *UR M. Requirements Concerning Machinery Installations*.
- IEC Std. 60034-1:2004 *Rotating Electrical Machines, Part 1, Rating and Performance*.
- IEEE Std 45™-2002 *IEEE Recommended Practice for Electrical Installations on Shipboard*.
- Mindykowski, J., 2014, *Power Quality on Ships: Today and Tomorrow's Challenges*, Keynote Speech, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering EPE 2014, 16-18 October, Jasi, Romania.