

Stanisław Azarewicz, Bogumił Węgliński
Politechnika Wroclawska, Wrocław

ZAGADNIENIA KSZTAŁTU I MATERIAŁU PRĘTÓW KLATKI WIRNIKA SINIKA INDUKCYJNEGO PRZEZNACZONEGO DO PRACY W WARUNKACH KRIOGENICZNYCH

PROBLEMS OF SHAPE AND MATERIAL OF CAGE BARS OF ASYNCHRONOUS MOTOR WORKING IN CRYIOGENIC CONDITIONS

Abstract: Electrical motors operating at low temperatures and in aggressive environment, such as liquid natural gas for instance, should exhibit high reliability, efficiency, and good electromagnetic parameters, both in dynamic and static states as well. Low working temperature has significant influence on change of parameters of conductive materials, and electrical sheets. Changes of their parameters determine run and values of the current and torque during start of the cage induction motor.

The paper presents results of laboratory tests, calculations, and computer simulations of parameters changes of conductive and magnetic materials submerged in liquid gas with temperature of -161°C . Results of calculation targeting to elaboration a way of the starting current decreasing and starting torque increasing of cage induction motors working at very low temperatures are given.

The shape, cross-section and material of a rotor's cage are the most influential elements on the above mentioned motor's parameters. That is why the paper presents chosen results of the influence analyze of these elements on the torque and current values and runs of the studied motor.

1. Wstęp

Silniki przeznaczone do pracy w ciekłych gazach o bardzo niskich temperaturach są stosunkowo słabo rozwiniętą dziedziną w konstrukcji i technologii maszyn elektrycznych. Ze względów eksploatacyjnych są to silniki indukcyjne klatkowe. Bardzo niska temperatura pracy, a także występujące narażenia powodowane przez środowisko powodują, że silnikom tym stawia się szereg wymagań związanych z bezpieczeństwem pracy, niezawodnością, sprawnością, wartościami momentu i prądu rozruchowego itp. Oprócz jakości izolacji tych silników istotnym problemem konstrukcyjnym jest zaprojektowanie silnika o możliwie małym prądzie i dużym momencie rozruchowym. Istotnym wymaganiem jest zazwyczaj także zapewnienie dużej przeciążalności momentem. Wymóg ten związany jest z możliwością zasilania silników napięciem z przemienników częstotliwości. Schłodzenie silnika do temperatury ciekłego gazu powoduje istotne zmniejszenie rezystancji uzwojeń oraz rezystywności żelaza czynnego. Zmiana rezystywności żelaza skutkuje zmianami parametrów magnetycznych, a zmiana rezystancji np. klatki wirnika niekorzystnie wpływa na przebieg prądu i momentu rozruchowego. Projektując silnik do pracy w bardzo niskich temperaturach można wykorzy-

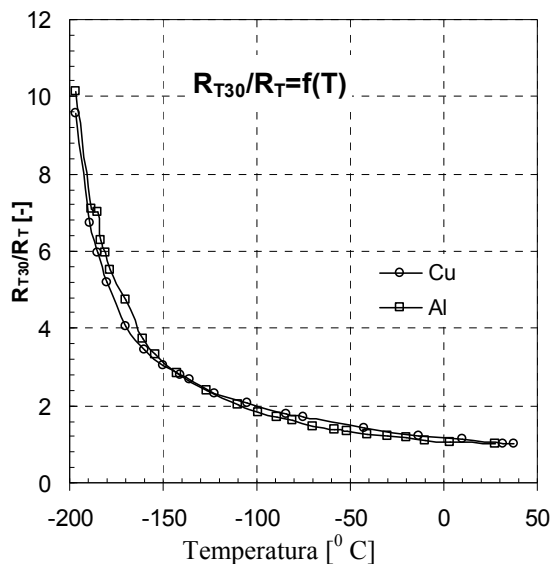
stać zarówno klasyczne rozwiązania techniczne i konstrukcyjne jak i nowe, nietypowe rozwiązania, które mogą okazać się rozwiązaniami korzystniejszymi dla tych silników. Ze względu na konieczność ograniczania prądu rozruchowego celem jest rozważenia zastosowania żłobków wirnika o innej geometrii niż w typowych silnikach indukcyjnych. Dodatkowo celem jest także rozważenie zastosowania innych materiałów niż powszechnie stosowane aluminium. Istotne zmniejszenie rezystywności klatki powoduje, że możliwe jest także zastosowanie większej gęstości prądu, a tym samym prętów klatki o mniejszym przekroju. Zmniejszenie przekroju prętów skutkuje jednak zarówno zmianami pozytywnymi dla parametrów obwodu magnetycznego jak i negatywnymi w postaci wzrostu strat w wirniku.

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń i symulacji skutków zastosowania w konstrukcji silnika „kriogenicznego” o mocy około 1 MW różnego kształtu i przekroju żłobków wirnika oraz różnego materiału z którego zostanie wykonana klatka.

2. Zmiany podstawowych parametrów materiałów kondukcyjnych i magnetycznych w temperaturze ciekłego gazu LNG

Badania zmiany rezystancji materiałów kondukcyjnych stosowanych w konstrukcji silnika wykonano wykorzystując w tym celu ciekły azot, którego temperatura jest niższa niż temperatura LNG i wynosi -196°C a wykorzystanie azotu w badaniach nie wiąże się z zagrożeniami. Badania te jednoznacznie umożliwiają określenie niezbędnych parametrów materiałów wykorzystanych podczas projektowania silników.

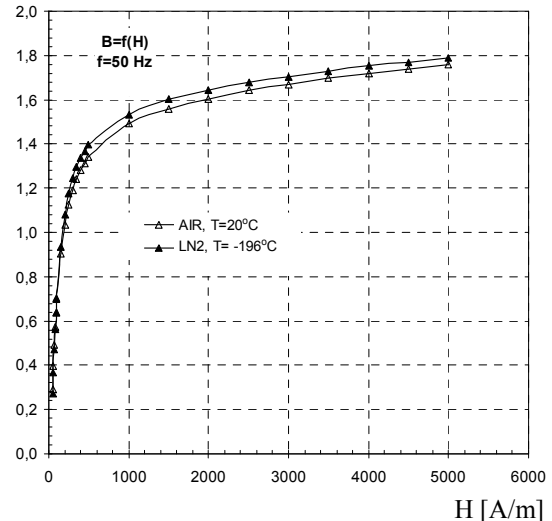
Wyniki pomiarów zmian rezystancji miedzi i aluminium w funkcji temperatury przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Zmiany rezystancji materiałów kondukcyjnych stosowanych w konstrukcji silników podczas ich schładzania do temperatury -196°C

Jak wynika z pomiarów zmiany wartości rezystancji w funkcji temperatury są znaczne i będą istotnie wpływały na parametry maszyny. Oprócz zmian parametrów materiałów kondukcyjnych istotne jest także określenie zmian podstawowych parametrów stosowanych materiałów magnetycznych.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe zmiany charakterystyki magnesowania dla blachy prądnicowej grubości 0,5 mm przy częstotliwości przemagnesowania wynoszącej 50 Hz.



Rys. 2. Porównanie charakterystyk magnesowania blachy prądnicowej w temperaturze otoczenia i w ciekłym azocie (blacha o grubości 0,5 mm)

Z przedstawionych wykresów wynika, że schładzanie blachy prądnicowej do temperatury ciekłego azotu ma niewielki wpływ na przebieg charakterystyk magnesowania.

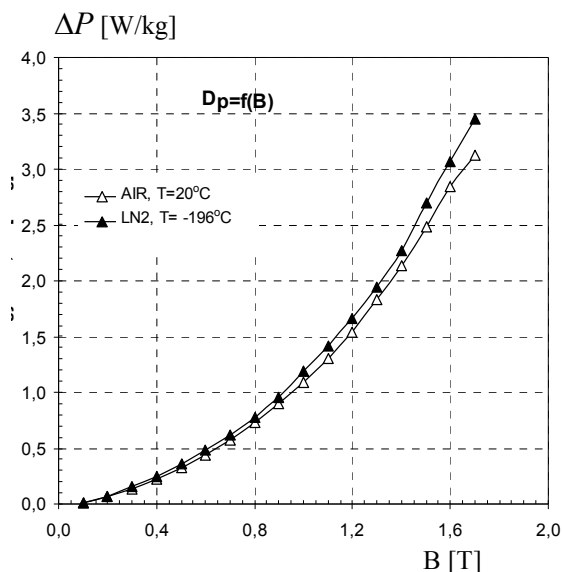
Drugim istotnym parametrem jest zmiana stratności stosowanych blach.

Stratność całkowitą zmierzono w temperaturze otoczenia i w ciekłym azocie uzyskując w ten sposób dane porównawcze określające wielkość tych zmian.

Wyniki pomiarów zmian stratności blach o grubości 0,5 mm w temperaturze otoczenia i ciekłego azotu dla częstotliwości przemagnesowania wynoszącej 50 Hz przedstawiono na rysunku 3.

Badania przeprowadzono na toroidalnych próbkach blach o szerokości 10 mm, co zdaniem autorów, dość dobrze odwzorowuje skutki wycinania żłobków na zmianę parametrów magnetycznych blach.

Przedstawione wyniki badań wskazują, że istotny wpływ na parametry silnika indukcyjnego schłodzonego do bardzo niskiej temperatury ma głównie zmiana rezystancji zastosowanych materiałów kondukcyjnych. Ponieważ w silnikach „kriogenicznych” podobnie jak w silnikach pracujących w normalnych warunkach dąży się do obniżenia wartości prądu rozruchowego i zwiększenia momentu rozruchowego należy rozważyć zmiany w konstrukcji wirnika spełniające te wymagania



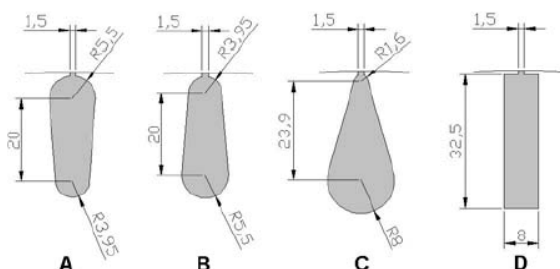
Rys. 3. Zmiany stratności blachy prądnicowej o grubości 0,5 mm

3. Analiza wpływu zastosowanych materiałów i kształtu pręta wirnika na parametry silnika indukcyjnego pracującego w ciekłym gazie naturalnym

Analizę przeprowadzono dla silnika indukcyjnego klatkowego o mocy około 1 MW, 6600 V, 60 Hz. Zmieniano w obliczeniach kształt i materiał prętów zachowując pole ich przekroju. Badania umożliwiły określenie optymalnego (z analizowanych) kształtu pręta klatki dla tego typu silników.

Badania symulacyjne wykonano metodą polowo – obwodową przy wykorzystaniu programu Flux 2D. W szczególności obliczeniom poddano przebiegi momentu magnetycznego i prądu silnika.

Do obliczeń i badań symulacyjnych przyjęto pręty wirnika jak na rysunku 4.

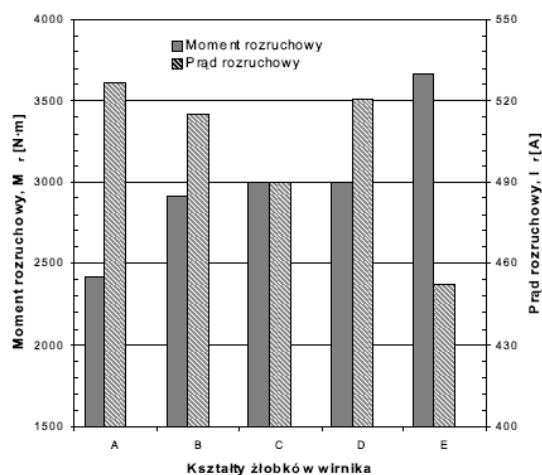


Rys. 4. Kształty żłobka wirnika badanego silnika

Kształt A żłobka wirnika jest typowym kształtem stosowanym w silnikach indukcyjnych klatkowych.

Kształt B (odwrotny do A) jest kształtem spotykanym w silnikach energooszczędnych.

Kształt C został zaproponowany przez autorów do zastosowania w silnikach „kriogenicznych” Wyniki obliczeń symulacyjnych wartości momentów i prądów rozruchowych badanych modeli silnika o prętach odlewanych z aluminium przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wartości momentu i prądu rozruchowego silnika „kriogenicznego” dla różnych kształtów żłobków wirnika

W celach porównawczych przedstawiono wartości otrzymane dla silnika o kształcie żłobków wirnika A, ale pracującego w temperaturze pokojowej (kształt E).

Z obliczeń wynika, że dość powszechnie stosowany kształt żłobka wirnika w silnikach indukcyjnych (A) zastosowany w silniku pracującym w warunkach kriogenicznych pozwala osiągnąć największy moment krytyczny przy jednocześnie najmniejszym momencie rozruchowym. Dla pozostałych kształtów żłobków otrzymano porównywalne wartości momentu krytycznego i momentu rozruchowego.

Analizując wartości prądu rozruchowego można stwierdzić, że dla żłobka wirnika o kształcie C jest on najmniejszy.

Dla zastosowanego żłobka o kształcie A wartość prądu rozruchowego jest największa.

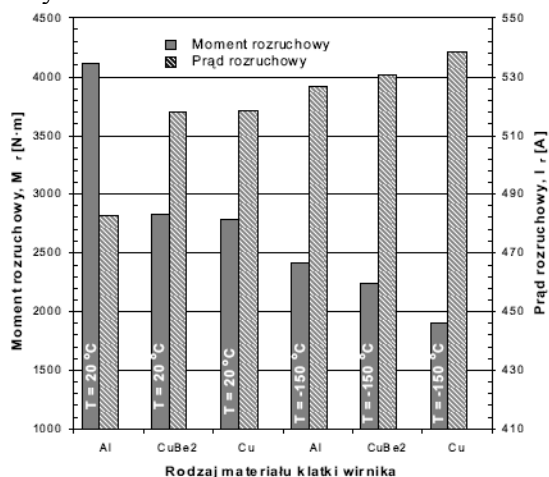
Można zatem przyjąć, że silniki z wirnikami o żłobkach A będą korzystniejsze w napędach regulowanych częstotliwościowo oraz tam gdzie zasilanie będzie z tzw. „miękkiej” sieci.

3.1. Wpływ rodzaju materiału zastosowanego na klatkę wirnika na jego moment i prąd rozruchowy

Obliczenia symulacyjne wykonano bazując na kształcie zębka A przyjmując, że temperatura prętów wirnika silnika pogrążonego w czasie pracy w ciekłym LNG wynosić będzie -150°C . Do obliczeń przyjęto następujące materiały użyte do wykonania klatki wirnika:

- aluminium (Al) stosowane do odlewania
- brąz berylowy (CuBe2) o niskiej zawartości berylu
- miedź (Cu)

Na rysunku 6 przedstawiono wartości momentu i prądu rozruchowego silnika „kriogenicznego” z wirnikami o klatkach wykonanych z analizowanych materiałów.



Rys. 6. Wartości momentu i prądu rozruchowego silnika dla różnych materiałów klatki wirnika

Z przedstawionych wartości wynika, że silnik z klatką miedzianą w porównaniu do silnika z klatką aluminiową, w temperaturze pracy -150°C charakteryzuje się mniejszym o około 21% momentem rozruchowym i większym o około 2,3% prądem rozruchowym.

Przedstawione wyniki obliczeń symulacyjnych wpływu materiału klatki wirnika na parametry eksploatacyjne silnika mają jedynie charakter poglądowy, ponieważ zmiana materiału klatki powinna wiązać się ze zmianą przekroju zębka, a tym samym zmianą szerokości zębów wirnika, co skutkuje zmianą parametrów Obwodu magnetycznego.

Przedstawione obliczenia umożliwiają ukierunkowanie prac związanych z optymalizacją konstrukcji silników indukcyjnych klatkowych przeznaczonych do pracy w ciekłych gazach, a szczególnie w ciekłym LNG.

4. Wnioski

Przeprowadzone badania zmian rezystancji materiałów konduktywnych oraz zmian parametrów materiałów magnetycznych w bardzo niskich temperaturach wykazały, że najistotniejsze zmiany dotyczą materiałów konduktywnych.

Obliczenia symulacyjne wpływu zastosowanego kształtu pręta klatki wirnika oraz materiału, z którego została klatka wykonana na wartość prądu i momentu rozruchowego silnika wykazały, że najlepsze parametry podczas rozruchu uzyskano dla wirnika z prętem o kształcie C. Silnik ten ma jedynie nieznacznie obniżony moment krytyczny.

Zastosowanie klatki wirnika wykonanej z miedzi lub jej stopu np. z dodatkiem berylu, który istotnie zwiększa sprężystość, skutkuje zmniejszeniem momentu rozruchowego oraz zwiększeniem prądu rozruchowego. Parametry te wystąpią przy niezmienionym przekroju pręta. Wpływie to oczywiście korzystnie na sprawność silnika, lecz nie zmienia istotnie jego konstrukcji.

Jak wynika z obliczeń zmiana momentu i prądu rozruchowego wynikająca z warunków pracy silnika w ciekłym LNG dla wirników z klatką miedzianą lub ze stopu berylowego jest mniejsza, niż w przypadku klatki wykonanej z aluminium. Wykonanie klatki z miedzi lub jej stopów jest obecnie trudniejsze technologicznie.

Literatura

- AZAREWICZ S., GAWORSKA D., WĘGLIŃSKI B., *Właściwości blach prądnicowych w ciekłych gazach. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Proc. 2005*
- AZAREWICZ S., KONIAREK J., WĘGLIŃSKI B., *Wpływ konstrukcji wirnika na parametry silnika indukcyjnego pracującego w ciekłych gazach XLII SME 2006*
- CEDRAT, FLUX® 8.10 2D Application, User guide, vol.4, Solving and results postprocessing, March 2005.

Adres Autorów

Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław
e-mail: stanislaw.azarewicz@pwr.wroc.pl
bogumil.we3glinski@pwr.wroc.pl