

Stanisław Azarewicz, Bogumił Węgliński
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

BADANIA SILNIKA INDUKCYJNEGO MAŁEJ MOCY PRACUJĄCEGO W CIEKŁYM AZOCIE

RESEARCH OF SMALL POWER INDUCTION MOTOR WORKING IN LIQUID NITROGEN

Abstract: Results of test of a small power induction motor working in liquid nitrogen are presented in the paper. The motor was designed in such manner to enable flow of the liquid nitrogen inside it. Bearings and design of its rotor were changed to minimize additional mechanical loss. Tests were carried on at feeding the motor from network with sinusoidal voltage and by frequency converter. Results of the motor tests in ambient temperature are presented for comparison reasons. Research was provided due to increasing requirement for equipment for transfer, storage and distribution of liquid gases, which require motors working more often in submerged conditions. Results of the presented research enable assessment of possibilities of applications of typical small power motors to be working as submerged in liquid gases, being dielectrics, as liquid nitrogen at temperature - 196⁰C and liquid natural gas at temperature – 161⁰C.

1. Wstęp

Wraz z rozwojem światowego przemysłu wzrasta także intensywnie zapotrzebowanie na nośniki energii. Ograniczenia związane z możliwością zaspakajania zapotrzebowania energetycznego z tradycyjnych źródeł powodują, że intensywnie poszukuje się zarówno nowych źródeł energii jak i dywersyfikacji dostaw istniejących produktów. Do nich z całą pewnością należy dziedzina zaopatrzenia gospodarki w gaz. Wraz z opracowaniem efektywnych i taniach metod skraplania gazu naturalnego, jego transportowania, przechowywania i dystrybucji w wielu krajach staje się on alternatywnym źródłem zaopatrzenia w energię. Ciekły gaz naturalny (LNG) o temperaturze – 161⁰C stwarza jednak pewne problemy techniczne związane zarówno z niską temperaturą jak i chemicznym oddziaływaniem na materiały i urządzenia z którymi się styka. Dotyczy to także silników elektrycznych napędzających pompy, zawory, urządzenia dystrybucji itp. Badania światowych ośrodków zajmujących się ciekłym gazem wykazały, że najlepsze rezultaty eksploatacyjne osiągają urządzenia pracujące w zanurzeniu w ciekłym gazie. Dotyczy to także indukcyjnych silników klatkowych, wykorzystywanych do napędu różnego rodzaju urządzeń. Silniki te są z reguły budowy otwartej, w których ciekły gaz przepływając przez ich wnętrze spełnia rolę czynnika chłodzącego.

Niska temperatura gazu, a także jego właściwości chemiczne oddziałują na silnik skutkując zarówno narażeniem izolacji jak i zmianą parametrów magnetycznych i elektrycznych maszyny [1,2]. Zmiana podstawowych parametrów materiałów czynnych silnika powinna skutkować zmianą jego konstrukcji tak, aby otrzymać optymalną do pracy w LNG. W wielu przypadkach, ze względu na niewielkie obecnie zapotrzebowanie w kraju na urządzenia współpracujące z ciekłym gazem należy spodziewać się stosowania typowych silników indukcyjnych głównie małej mocy po odpowiednich dostosowaniach konstrukcji i zmianie izolacji uzwojenia do pracy w ciekłym gazie. Należy także spodziewać się, że coraz częściej silniki małej mocy głównie pomp i dystrybutorów będą także zasilane z przemienników częstotliwości. W wielu przypadkach zasilanie silników z przemienników częstotliwości wobec istotnego zmniejszenia rezystancji uzwojeń może stanowić jedyne rozwiązanie umożliwiające ich prawidłową pracę. W artykule przedstawiono wyniki badań zmian podstawowych parametrów silnika indukcyjnego małej mocy zanurzonego w ciekłym azocie o temperaturze – 196⁰C i zasilanego z różnych typów przemienników częstotliwości. Badania w ciekłym azocie dają wyniki zbliżone do tych jakie uzyskiwałby silnik pracujący w gazie naturalnym, a prowadzone badania nie stwarzają zagrożeń typowych do badań z wykorzystaniem gazu LNG.

2. Badania silnika indukcyjnego małej mocy w ciekłym azocie

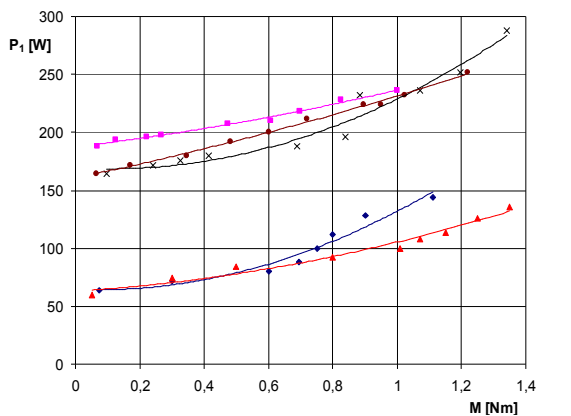
Badaniom poddano silnik indukcyjny klatkowy o mocy 0,09 kW i prędkości znamionowej 680 obr/min. W ramach jego dostosowania do pracy w ciekłym azocie zmieniono łożyska, zlikwidowano „chorągiewki” wentylacyjne wirnika, aby zminimalizować opory ruchu w cieczy, a także wykonano otwory w pokrywach łożyskowych aby umożliwić przepływ ciekłego azotu przez wnętrze silnika.

Badany silnik pracował w pojemniku z ciekłym azotem natomiast układ pomiaru momentu i obciążenie wyprowadzono poza pojemnik, stosując odpowiednią izolację termiczną.

Program badań silnika w ciekłym azocie obejmował badania parametrów silnika przy zasilaniu z przemienników częstotliwości o sterowaniu skalarnym oraz wektorowym SLV.

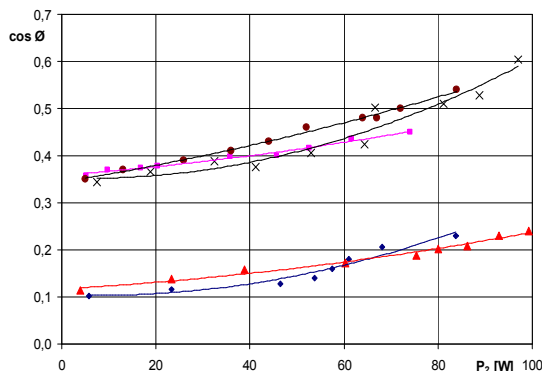
Uzyskane wyniki porównano z parametrami uzyskiwanymi przez silnik w temperaturze otoczenia przy zasilaniu analogicznym jak w azocie oraz przy zasilaniu z sieci.

Wyniki pomiarów przedstawiono w postaci wykresów na rysunkach 1 do 6.



- ◆ Sterowanie skalarnie; ciekły azot T= -196 °C
- Sterowanie skalarnie, temperatura otoczenia ok 20 °C
- ▲ BezczyJNIKowe sterowanie wektorowe, ciekły azot T= -196°C
- × BezczyJNIKowe sterowanie wektorowe, temperatura otoczenia ok. 20°C
- Układ zasilany z sieci, temperatura otoczenia ok. 20°C

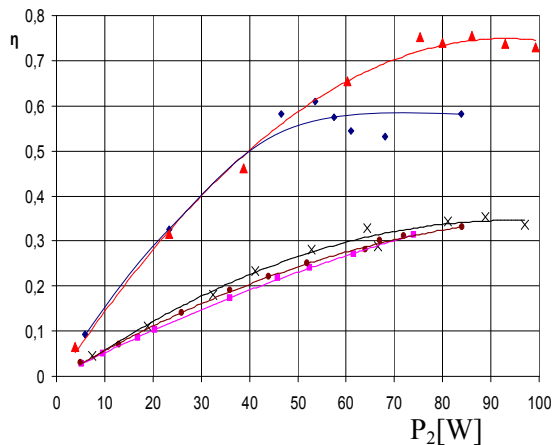
Rys. 1. Charakterystyki $P_1 = f(M)$ dla różnych rodzajów sterowania w dwóch różnych ośrodkach



- ◆ Sterowanie skalarnie; ciekły azot T= -196 °C
- Sterowanie skalarnie, temperatura otoczenia ok 20 °C
- ▲ BezczyJNIKowe sterowanie wektorowe, ciekły azot T= -196°C
- × BezczyJNIKowe sterowanie wektorowe, temperatura otoczenia ok. 20°C
- Układ zasilany z sieci, temperatura otoczenia ok. 20°C

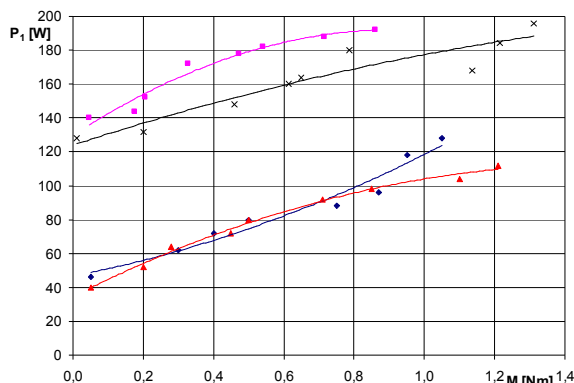
Rys. 2. Charakterystyki $\cos \varphi = f(P_2)$ dla różnych rodzajów sterowania w dwóch różnych ośrodkach dla częstotliwości $f=50$ Hz

Zmiana parametrów silnika jest skutkiem zmian wartości rezystancji uzwojeń oraz parametrów obwodu magnetycznego, a w szczególności zmian stratności blach i w mniejszym stopniu, zmian ich charakterystyki magnesowania.



- ◆ Sterowanie skalarnie; ciekły azot T= -196 °C
- Sterowanie skalarnie, temperatura otoczenia ok 20 °C
- ▲ BezczyJNIKowe sterowanie wektorowe, ciekły azot T= -196°C
- × BezczyJNIKowe sterowanie wektorowe, temperatura otoczenia ok. 20°C

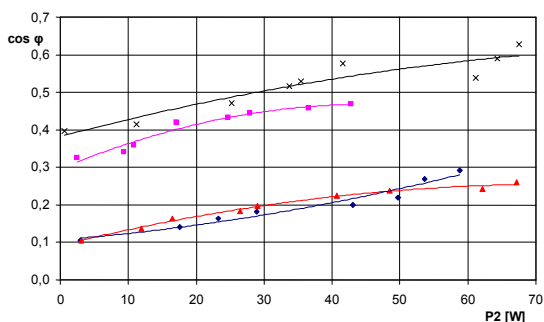
Rys. 3. Charakterystyki $\eta = f(P_2)$ w dwóch różnych ośrodkach dla częstotliwości zasilania $f=50$ Hz



- ◆ Sterowanie skalarne; ciekły azot T= - 196 °C
- Sterowanie skalarne, temperatura otoczenia ok 20 °C
- ▲ Bezczylnikowe sterowanie wektorowe, ciekły azot T= -196°C
- × Bezczylnikowe sterowanie wektorowe, temperatura otoczenia ok. 20°C

Rys. 4. Przebiegi $P_1 = f(M)$ dla częstotliwości zadanej $f = 35$ Hz

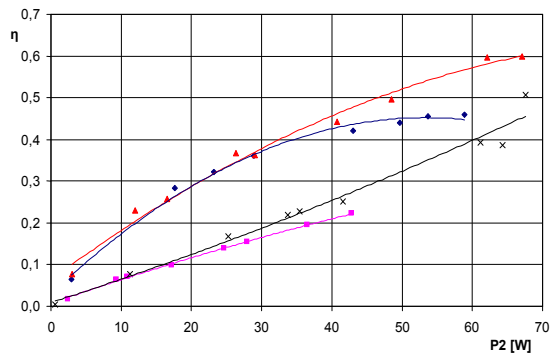
Na rysunku 7 przedstawiono zmiany rezystancji miedzi i aluminium podczas schładzania, zaś na rysunku 8 przedstawiono przykładowo zmianę charakterystyki magnesowania blachy elektrotechnicznej o grubości 0,5 mm schłodzonej w ciekłym azocie.



- ◆ Sterowanie skalarne; ciekły azot T= - 196 °C
- Sterowanie skalarne, temperatura otoczenia ok 20 °C
- ▲ Bezczylnikowe sterowanie wektorowe, ciekły azot T= -196°C
- × Bezczylnikowe sterowanie wektorowe, temperatura otoczenia ok. 20°C

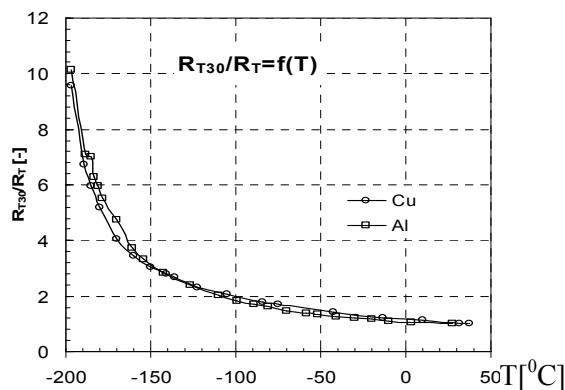
Rys. 5. Porównanie przebiegów $\cos \varphi = f(P_2)$ dla częstotliwości $f = 35$ Hz

Jak wynika z przedstawionych pomiarów wzrost indukcji magnetycznej w ciekłym azocie jest stosunkowo niewielki dla częstotliwości 50 Hz i zawiera się w granicach 5%. Znacznie istotniejsze jest zmniejszenie rezystancji uzwojeń. W badanym silniku rezystancja uzwojeń stojana uległa zmniejszeniu 6,8 krotnie.

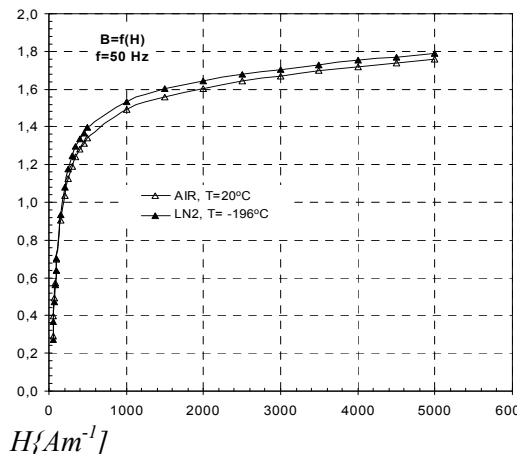


- ◆ Sterowanie skalarne; ciekły azot T= - 196 °C
- Sterowanie skalarne, temperatura otoczenia ok 20 °C
- ▲ Bezczylnikowe sterowanie wektorowe, ciekły azot T= -196°C
- × Bezczylnikowe sterowanie wektorowe, temperatura otoczenia ok. 20°C

Rys. 6. Charakterystyki $\eta = f(P_2)$ dla częstotliwości zadanej $f = 35$ Hz



Rys. 7. Zmiany rezystancji materiałów czynnych w wyniku ich schładzania



Rys. 8. Charakterystyki magnesowania blachy elektrotechnicznej o grubości 0,5 mm w powietrzu i ciekłym azocie

3. Analiza wyników

Porównując moc pobieraną przez silnik pracujący w temperaturze otoczenia i w ciekłym azocie można stwierdzić, że moc pobierana

przez silnik dla tych samych wartości obciążenia jest w azocie istotnie mniejsza.

Porównując wyniki przy sterowaniu skalarnym i wektorowym typu SLV można zauważyć, że sterowanie wektorowe daje korzystniejsze wyniki w wyższych zakresach obciążenia silnika niż sterowanie skalarne. W zakresie niedociążenia silnika oba typy sterowania dają wyniki zbliżone. Badany silnik wykazywał także zdecydowanie wyższą sprawność podczas pracy w ciekłym azocie w stosunku do sprawności w temperaturze otoczenia. Także w tym przypadku sterowanie wektorowe SLV jest korzystniejsze niż skalarne a uzyskana sprawność w granicach 75% dla częstotliwości napięcia wyjściowego wynoszącej 50 Hz jest sprawnością bardzo wysoką jak na silnik tej mocy.

4. Wnioski

Badania silnika indukcyjnego małej mocy pracującego w ciekłym azocie o temperaturze -196°C wykazały, że:

- istotne obniżenie momentu rozruchowego przy jednoczesnym zwiększeniu prądu rozruchowego w skutek blisko siedmiokrotnego zmniejszenia rezystancji uzwojeń w praktyce uniemożliwia bezpośrednie zasilanie typowych silników indukcyjnych z sieci,
- silniki indukcyjne po stosunkowo niewielkich zmianach konstrukcyjnych oraz wzmocnieniu izolacji uzwojeń stojana mogą być wykorzystywane do pracy w ciekłych gazach przy zasilaniu z przemienników częstotliwości,
- badania wykazały, że lepsze parametry eksploatacyjne uzyskuje silnik podczas sterowania częstotliwościowego typu SLV,
- silnik w ciekłym azocie osiągnął lepsze parametry eksploatacyjne niż podczas pracy w temperaturze otoczenia. Ma na to wpływ głównie zmniejszenie rezystancji uzwojeń oraz zachowanie praktycznie stałej ich wartości niezależnie od obciążenia silnik,
- obniżenie częstotliwości napięcia zasilającego z przemiennika częstotliwości skutkuje stosunkowo nieznacznym pogorszeniem jego parametrów eksploatacyjnych.

Literatura

- [1]. Azarewicz S., Gaworska D., Węgliński B., *Właściwości blach prądnicowych w ciekłych gazach. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Proc. 2005.*
- [2]. Azarewicz S., Buniowski A., Węgliński B., *“Performance of sosen magnetic materiale in crio-*

genic temperatures”Sixth International Conference on Unconventional Electomechanical and Electrical Systems. 6th UEES’04 Vol.3 Alushta Ukraina, s. 955 – 960.

Adres Autorów

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