

**Tomasz Lerch**  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

## ENERGOOSZCZĘDNY UKŁAD OBCIĄŻENIA MASZYN INDUKCYJNEJ NA STACJI PRÓB

### ENERGY-EFFICIENT LOAD OF INDUCTION MACHINE AT A TESTING STATION

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono koncepcje energooszczędnego układu obciążenia silników indukcyjnych na stacjach prób wykonujących badania maszyn elektrycznych. Głównym założeniem opracowanego rozwiązania była możliwość zwrotu energii do sieci oraz wysoka sprawność układu. W tym celu zaadoptowano znany głównie z energetyki wiatrowej układ maszyny dwustronnie zasilanej (MDZ). Rozwiązanie to oprócz wymienionych wyżej cech pozwala także całkowicie kompensować zapotrzebowanie na moc bierną całej stacji prób. Dodatkowo w proponowanym układzie obciążenia zastosowano tylko jedną maszynę indukcyjną pierścieniową oraz przekształtnik o stosunkowo małej mocy, dlatego też wiąże się on z najmniejszymi kosztami inwestycyjnymi spośród możliwych rozwiązań.

**Abstract:** The paper presents concepts of an energy-efficient load system for motors testing stations performing tests of electrical machines. The main goal of the developed solution was the regenerative power supply and high efficiency. For this purpose was adapted doubly fed induction generator (DFIG) system mostly known for wind energy. In addition the solution besides the aforementioned features allows also fully compensate the reactive power demand throughout the testing station. In addition, the proposed load system uses only one wound-rotor induction machine and relatively low power inverter and therefore binds with the smallest investment costs of the possible solutions.

**Słowa kluczowe:** badanie maszyn indukcyjnych, maszyna dwustronnie zasilana  
**Keywords:** testing of induction machines, double-fed induction machine

#### 1. Wstęp

Badanie maszyn elektrycznych zgodnie z wytycznymi norm wymaga wyposażenia stacji prób w układ obciążenia pozwalający w kontrolowany sposób zadawać obciążenie od zera do momentu krytycznego. Klasycznym rozwiązaniem stosowanym na stacjach prób jest wielomaszynowy układ Leonarda, w którym poprzez regulację prądu wzbudzenia maszyny prądu stałego można sterować momentem obciążenia. Rozwiązanie to wywodzi się z czasów, kiedy niedostępne były regulowane napędy prądu przemiennego. Jego zaletą jest prostota sterowania mocą układu oraz wynikająca z tego niezawodność. Zdecydowaną zaś wadą układu Leonarda jest jego wielomaszynowa struktura, a co za tym idzie niska sprawność, pobór mocy biernej przez maszynę badaną i prądnicę AC, oraz duże nakłady inwestycyjne. Zastąpienie wielomaszynowego układu Leonarda stało się możliwe wraz z upowszechnieniem przekształtników energoelektronicznych. W takiej strukturze można zastosować tylko jedną maszynę indukcyjną zasilaną przez przekształtnik, co poprawia sprawność układu.

Rozwiązanie takie pozwala precyzyjnie sterować mocą układu oraz eliminuje problem poboru mocy biernej przez układ obciążający. Poważną wadą tego rozwiązania jest fakt, że cała moc oddawana przez maszynę obciążającą do sieci, musi być przetwarzana przez falownik co znacznie podnosi koszty inwestycyjne. Dodatkowo silniki dużej mocy najczęściej pracują zasilane średnim napięciem, co również zwiększa komplikacje związane z zastosowaniem przekształtnika. Autor artykułu proponuje rozwiązanie układu obciążenia eliminujące problemy występujące w wyżej opisanych konfiguracjach.

#### 2. Zasada działania MDZ

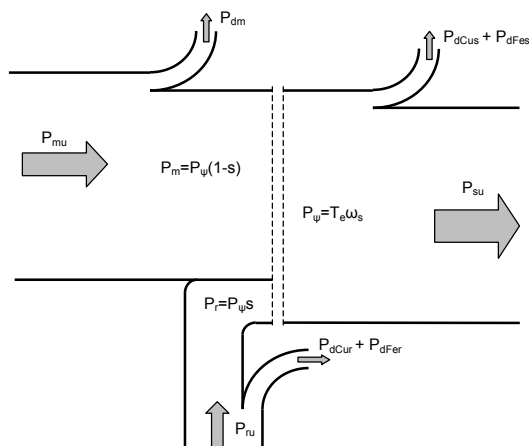
Maszyna indukcyjna klatkowa pracuje jako generator przy ujemnym poślizgu tzn. przy prędkości nadsynchronicznej. Przeprowadzenie badania maszyny indukcyjnej wymaga obciążenia jej w zakresie od zera do kilku procent dodatniego poślizgu. Zatem, jeżeli układ obciążenia jest zbudowany w oparciu o maszynę indukcyjną musi ona pracować jako generator przy

prędkości podsynchronicznej. Taki stan pracy można osiągnąć w maszynie indukcyjnej pierścieniowej, której wirnik jest zasilany prądem o częstotliwości poślizgowej [1]. Układ taki nosi nazwę maszyny dwustronnie zasilanej. MDZ znana jest w literaturze do ponad stu lat jednak jej praktyczne zastosowanie na szeroką skalę wiąże się z rozwojem energetyki wiatrowej, gdzie jest ona wykorzystywana jako jeden z podstawowych rodzajów generatorów. Najważniejszą cechą MDZ wyróżniającą ją spośród innych układów napędowych jest możliwość pracy silnikowej i generatorowej zarówno przy poślizgu dodatnim i ujemnym. Zasadę działania MDZ dobrze obrazuje jej bilans mocy [2] dla pracy generatorowej z dodatnim poślizgiem przedstawiony na rysunku 1. Moc pola wirującego  $P_\psi$ , która po odjęciu strat jest oddawana do sieci wynosi:

$$P_\psi = P_{su} + P_{dCus} + P_{dFe} = T_e \cdot \omega_s \quad (1)$$

Moc mechaniczna przetwarzana przy pracy generatorowej na moc elektryczną ma postać:

$$P_m = P_{mu} - P_{dm} = T_e \cdot \omega_r = P_\psi (1-s) \quad (2)$$



Rys. 1. Bilans mocy MDZ dla  $s > 0$

Moc wirnika, uwzględniając zmianę kierunku przepływu wraz ze zmianą znaku poślizgu, ma postać:

$$P_r = P_{ru} - \text{sign}(s)P_{dCur} = P_\psi s = T_e \cdot \omega_s \cdot s \quad (3)$$

gdzie:

- $P_{su}$  – moc stojana
- $P_\psi$  – moc pola wirującego
- $T_e$  – moment elektromagnetyczny
- $\omega_s$  – pulsacja pola wirującego

- $P_m$  – moc mechaniczna
- $P_{mu}$  – moc mechaniczna użyteczna
- $s$  – poślizg
- $P_r$  – moc wirnika (moc poślizgu)
- $P_{dCus}$  – straty w uzwojeniach stojana
- $P_{dCur}$  – straty w uzwojeniach wirnika
- $P_{dFes}$  – straty w rdzeniu stojana
- $P_{dFer}$  – straty w rdzeniu wirnika
- $P_{dm}$  – straty mechaniczne

Z równania 3 wynika, że zmiana znaku mocy czynnej wirnika  $P_r$  przy stałym dodatnim poślizgu powoduje zmianę znaku mocy pola, a co za tym idzie zmianę znaku momentu. Zatem zasilając wirnik maszyny pierścieniowej pracującej z prędkością podsynchroniczną maszyna będzie wydawała do sieci moc czynną stojana, która po dodaniu strat będzie równa sumie dostarczonej mocy poślizgu i mocy mechanicznej. Z bilansu mocy wynika zatem, że część mocy czynnej krąży w obwodzie stojan-wirnik, to znaczy część mocy oddawanej przez stojan pobierana jest przez wirnik maszyny. Wartość tej mocy jest wprost proporcjonalna do poślizgu z jakim pracuje maszyna.

### 3. Sterowanie MDZ w układzie obciążenia

Sterowanie mocą czynną i bierną wydawaną przez maszynę dwustronnie zasilaną do sieci oparte jest o teorię chwilowej mocy biernej Akagiego [3, 4]. Dla stojana maszyny indukcyjnej moc chwilowa ma postać:

$$\begin{aligned} p_s &= u_{sx}i_{sx} + u_{sy}i_{sy} \\ q_s &= u_{sy}i_{sx} - u_{sx}i_{sy} \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie:  $p_s$  – moc chwilowa czynna,  $q_s$  – moc chwilowa bierna,  $u_{sx}$ ,  $u_{sy}$  – składowe wektora napięcia stojana,  $i_{sx}$ ,  $i_{sy}$  – składowe wektora prądu stojana.

Podstawiając w miejsce składowych prądu stojana wartości wynikające z równań modelu maszyny indukcyjnej można wyprowadzić równania, które są podstawą syntezy układu sterowania [5, 6]:

$$p_s = -\frac{L_m}{L_s} u_{sx} i_{rx}; \quad q_s = -\frac{1}{L_s} \frac{u_{sx}^2}{\omega_k} + \frac{L_m}{L_s} u_{sx} i_{ry} \quad (5)$$

gdzie:  $L_s$  – indukcyjność fazy stojana,  $L_m$  – indukcyjność magnesowania maszyny,  $\omega_k$  – prędkość kątowna układu odniesienia.

Równania (5) są wyprowadzone przy założeniu stanu ustalonego i przy pominięciu rezystancji stojana ( $R_s=0$ ).

Z powyższych równań wynika, że chwilowa moc czynna stojana w układzie sterowania związanym z wektorem napięcia stojana zależy od składowej  $x$  wektora prądu wirnika, zaś chwilowa moc bierna zależy od składowej  $y$ .

Do zrealizowania układu sterowania będzie zatem potrzebna informacja o kącie  $\varphi$  wykorzystywanym do transformowania składowych prądu wirnika. Kąt ten określony jest jako:

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_e \quad (6)$$

przy czym  $\varphi_u$  jest kątem położenia wektora przestrzennego napięcia stojana, wyliczanym zgodnie ze wzorem:

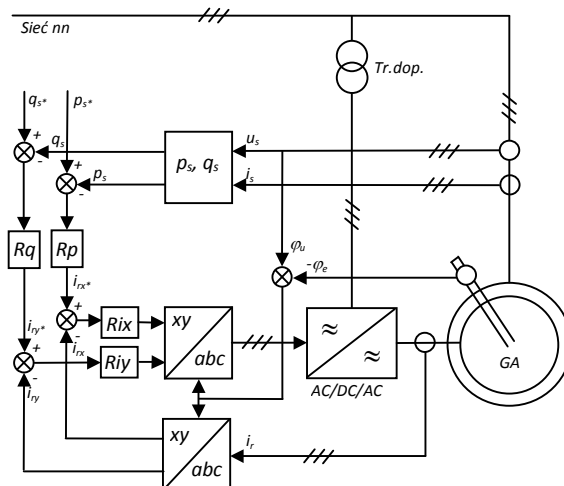
$$\varphi_u = a \tan\left(\frac{u_\beta}{u_\alpha}\right) \quad (7)$$

zaś  $\varphi_e$  jest kątem położenia wirnika liczonym w stopniach elektrycznych zgodnie ze wzorem:

$$\varphi_e = p \int \omega_r dt + \varphi_0 \quad (8)$$

gdzie:  $p$  – liczba par biegunów;  $\omega_r$  – prędkość kątowna wirnika maszyny;  $\varphi_0$  – położenie początkowe wirnika maszyny.

Układ sterowania wektorowego chwilową mocą czynną i bierną maszyny dwustronnie zasilanej przedstawia rysunek 2. Sygnały wartości zadanej mocy czynnej i biernej stojana oznaczone na powyższym schemacie  $p_s^*$   $q_s^*$ , pochodzą z nadrzędnego układu sterowania mocą czynną i bierną. Moc czynna zadawana jest w zależności od aktualnego zapotrzebowania wynikającego z momentu obciążającego maszynę badaną. Wartość zadanej mocy biernej indukcyjnej wydawanej do sieci powinna być równa całkowitemu zapotrzebowaniu na moc bierną w układzie, na którą składa się moc bierna pobierana przez maszynę badaną oraz transformatora dopasowującego z obwodzie wirnika MDZ (rysunku 3).



Rys. 2. Schemat układu sterowania mocą MDZ

Należy tutaj zaznaczyć, że maszyna dwustronnie zasilana przetwarza moc czynną w torze stojana i wirnika. Zatem całkowita przetwarzana moc czynna wynosi:

$$p = p_s - s \cdot p_s \quad (9)$$

gdzie  $s$  to poślizg maszyny dodatni dla prędkości podsynchronicznej a ujemny dla nadsynchronicznej.

Uwzględniając to w proponowanym przez autora rozwiązaniu układ sterowania został zmodyfikowany tak, aby umożliwiać zadawanie wartości mocy mechanicznej jaką MDZ obciąża maszynę badaną oraz wartości mocy biernej oddawanej lub pobieranej przez stojan maszyny. Moc mechaniczna obliczana jest jako iloczyn momentu elektromagnetycznego i prędkości kątownej wirnika.

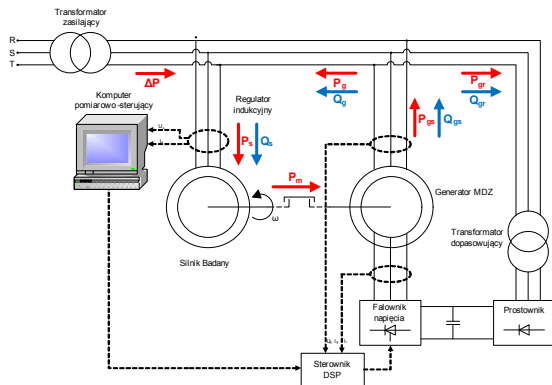
$$p_m = T_e \cdot \omega_r \quad (10)$$

Realizacja zmodyfikowanego układu sterowania wymaga zastosowania obserwatora momentu elektromagnetycznego. W przypadku maszyny pierścieniowej bezpośrednio mierzalne są zarówno prądy stojana jak i wirnika. Najwygodniej zatem zastosować obserwator momentu wyznaczający jego wartość w oparciu o składowe prostokątne prądów maszyny [2]:

$$T_e = pb \cdot Lm \cdot (i_{r\alpha}^s i_{s\beta}^s - i_{r\beta}^s i_{s\alpha}^s) \quad (11)$$

Składowe prądów wirnika muszą zostać sprowadzone na stronę stojana oraz przetransformowane do prostokątnego układu odniesienia  $\alpha\beta$  związanego ze stojanem. Ze względu na dużą liczbę obliczeń koniecznych do wykonania w czasie rzeczywistym układ sterowania

przedstawiony na rysunku 2 został zrealizowany na procesorze sygnałowym. Nadrzędnym układem sterującym całej stacji prób jest komputer PC, który umożliwia rejestrację parametrów badanej maszyny takich jak napięcia, prądy, prędkość i temperatury. Drugim zadaniem komputera sterującego jest zadawanie mocy obciążenia oraz mocy biernej wydawanej przez MDZ. Struktura proponowanego rozwiązania została przedstawiona na rysunku 3.



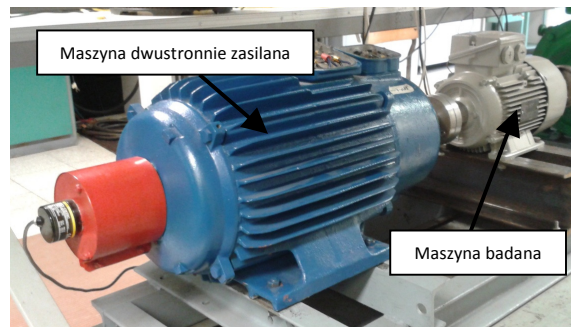
Rys. 3. Struktura układu obciążenia z MDZ

Dzięki możliwości sterowania mocą bierną w obwodzie stojana można zadawać wydawanie mocy biernej indukcyjnej do sieci. Daje to możliwość całkowitego skompensowania mocy biernej pobieranej przez maszynę badaną i transformator dopasowujący. W takim przypadku transformator zasilający będzie pokrywał tylko straty mocy czynnej w układzie, zatem jego moc może być niższa niż moc badanej maszyny. Przepływ mocy czynnej i biernej w proponowanym układzie zaznaczono na rysunku 3 odpowiednio czerwonymi i niebieskimi strzałkami.

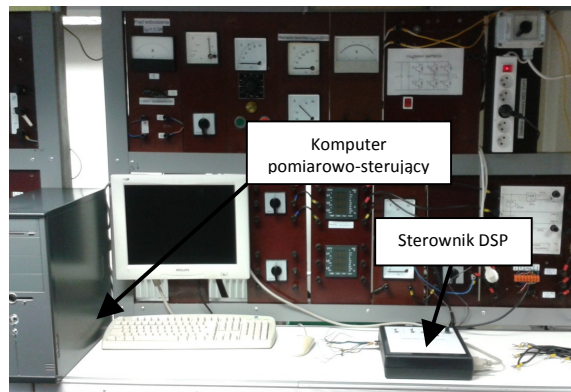
#### 4. Badania laboratoryjne MDZ

Zaproponowany układ obciążenia z MDZ został przebadany w warunkach laboratoryjnych. Badany układ obciążenia został zbudowany w oparciu o maszynę pierścieniową o mocy 10kW. Rolę maszyny badanej na stanowisku laboratoryjnym pełniła maszyna indukcyjna klatkowa i mocy znamionowej 3kW. Widok stanowiska laboratoryjnego przedstawia rysunek 4. Na rysunku 5 przedstawiono widok pulpitu sterowniczego całego stanowiska. Układ sterowania umożliwiał zadawanie mocy mechanicznej maszyny oraz mocy biernej obwodu stojana. Przeprowadzone pomiary potwierdziły możliwość niezależnego sterowania mocą mechaniczną i bierną MDZ. Rysunek 6 przedsta-

wia zarejestrowane w układzie przebiegi mocy czynnej i biernej stojana przy skokowej zmianie wartości zadanych.



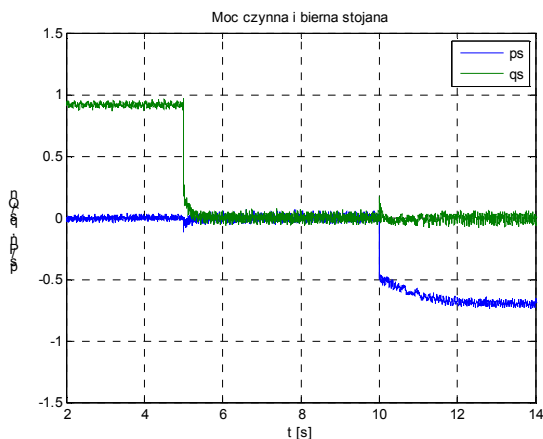
Rys. 4. Maszyny zainstalowane na stanowisku laboratoryjnym



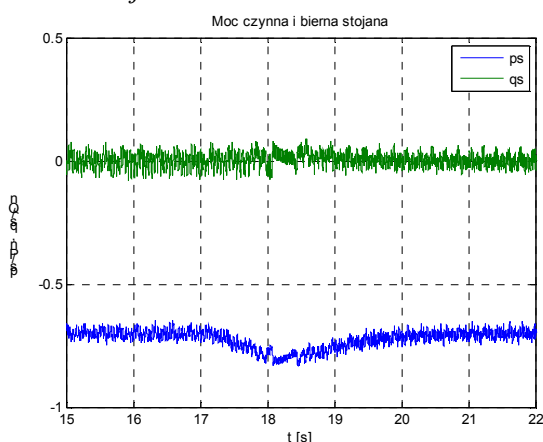
Rys. 5. Widok ogólny pulpitu sterowniczego stanowiska

Jak można zauważyć skokowa zmiana jednej z zadanych wartości nie powoduje, poza chwilowym uchybem, trwałej zmiany drugiej kontrolowanej wartości.

Rysunek 7 przedstawia przebiegi chwilowej mocy czynnej i biernej podczas zmiany prędkości obrotowej od 0,9 do 1,1 prędkości synchronicznej między 17 i 20 sekundą rejestracji. Wartość mocy biernej (kolor zielony) w stanie dynamicznym jest niezmienna. W przebiegu chwilowej mocy czynnej zauważalny jest uchyb w czasie zmiany prędkości obrotowej. Wynika to z faktu, że równania 5 będące podstawą syntezy układu sterowania wyprowadzone są dla stanu ustalonego. W stanie dynamicznym wartość chwilowej mocy czynnej nie jest zależna tylko od składowej  $i_{rx}$  prądu wirnika [5, 6]. W zastosowaniu MDZ do obciążenia maszyny indukcyjnej nie ma to większego znaczenia, ponieważ pomiary obciążeniowe wykonywane są dla stanów statycznych.



Rys. 6. Przebiegi  $p_s$  i  $q_s$  – skokowa zmiana wartości zadanej

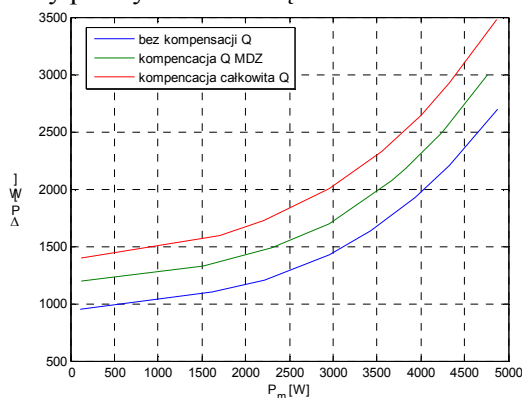


Rys. 7. Przebiegi  $p_s$  i  $q_s$  - zmiana prędkości obrotowej

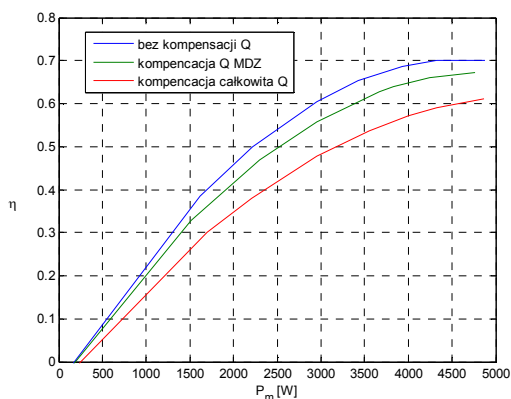
Układ laboratoryjny został przebadany także pod kątem sprawności. Obliczenia teoretyczne przeprowadzone dla zestawu maszyn zainstalowanego w laboratorium wykazały, że układ będzie osiągał maksymalną sprawność około 80%. Sprawność w laboratorium przebadano dla trzech przypadków: bez kompensacji mocy biernej, z kompensacją mocy biernej MDZ i dla całkowitej kompensacji mocy biernej układu.

W pierwszym przypadku MDZ pobiera moc bierną o wartości wynikającej z parametrów znamionowych danej maszyny pierścieniowej. Drugi przypadek zakłada moc bierną stojana MDZ równą zero. W tym przypadku do całego układu trzeba doprowadzić moc bierną na pokrycie potrzeb maszyny badanej i transformatora dopasowującego. W trzecim przypadku MDZ wydaje moc bierną indukcyjną o wartości równej zapotrzebowaniu całego układu (maszyna badana i transformator dopasowujący), zatem do układu z zewnątrz nie jest doprowadzana moc bierna. Wydawanie mocy biernej

przez MDZ wymaga zgodnie ze wzorem 5 zadawania odpowiedniej wartości składowej  $i_{ry}$  prądu wirnika. Zwiększenie wartości prądu w obwodzie wirnika powoduje zwiększenie strat mocy czynnej w transformatorze dopasowującym, przekształtniku oraz samych uzwojeniach wirnika. W związku z tym dla tego samego punktu pracy układu zwiększenie kompensacji mocy biernej powoduje zwiększony pobór mocy czynnej doprowadzanej do układu. Charakterystyki przedstawiające zależność mocy doprowadzanej do układu od mocy obciążenia na wale maszyny badanej dla trzech wariantów kompensacji mocy biernej przedstawiono na rysunku 8. Jak można zaobserwować, całkowita kompensacja mocy biernej układu zwiększa moc doprowadzaną na pokrycie strat mocy w całym układzie. Na podstawie opisanych wyżej pomiarów sporządzono charakterystyki sprawności (rys. 9) układu obciążenia dla trzech wariantów kompensacji. Maksymalna sprawność układu dla wariantu bez kompensacji mocy biernej wynosi 70%. Niższa od zakładanej sprawność układu wynika ze znacznie przewymiarowanych elementów w torze zasilania wirnika (transformator, przekształtnik) a także parametrów prądowo-napięciowych wirnika zastosowanej maszyny pierścieniowej. W układach MDZ stosuje się maszyny pierścieniowe, których napięcie wirnika  $E_{20}$  jest wyższe od napięcia znamionowego stojana, dzięki czemu można zminimalizować straty obciążeniowe w uzwojeniach wirnika. Maksymalna zmierzona sprawność układu obciążenia dla pełnej kompensacji mocy biernej wynosi 60%. W tym przypadku jednak korzystniejszy jest bilans całej stacji prób, gdyż całkowita kompensacja mocy biernej powoduje mniejszy pobór prądu z sieci zasilającej, zmniejszając straty przesyłowe wewnątrz zakładu.



Rys. 8. Zależność mocy dostarczonej w funkcji mocy obciążenia



Rys. 9. Zależność sprawności w funkcji mocy obciążenia

### 5. Zalety układu obciążenia z MDZ

Zastosowanie maszyny dwustronnie zasilanej do obciążania maszyn indukcyjnych na stacji prób ma szereg zalet. Rozwiązanie to wymaga najniższych kosztów inwestycyjnych spośród możliwych układów. Z równania 3 wynika, że moc przekształtnika wirnikowego jest proporcjonalna do poślizgu z jakim pracuje maszyna. Jeżeli zatem założymy, że poślizg z jakim pracuje MDZ nie przekracza 5% to do obciążenia silnika o mocy 1 MW, uwzględniając kompensację mocy biernej w układzie, wystarczy przekształtnik wirnikowy o mocy 100kW. Kierunek przepływu mocy w obwodzie wirnika zależy od znaku poślizgu, zatem przy pracy tylko w zakresie dodatnich poślizgów można zastosować jednokierunkowy przekształtnik wirnikowy, co znacznie upraszcza jego budowę i obniża koszty. Moc czynna oddawana jest przez obwód stojana przy czym część mocy o wartości proporcjonalnej do poślizgu jest pobierana przez wirnik maszyny. Pozostała część mocy może być pobierana przez maszynę obciążaną. Z sieci do układu należy zatem doprowadzić tylko moc czynną na pokrycie strat. Bardzo ważną zaletą MDZ jest możliwość sterowania mocą bierną. MDZ może podobnie jak maszyna synchroniczna wydawać moc bierną indukcyjną. Dzięki temu cały układ przedstawiony na rysunku 3 może być w pełni skompensowany. Pozwala to znacznie zredukować wartość prądu obciążającego transformator zasilający stację prób.

### 6. Podsumowanie

Zaproponowane przez autora rozwiązanie jest adresowane do przedsiębiorstw produkujących i remontujących maszyny elektryczne, które

w procesie technologicznym wykorzystują stacje prób do badania maszyn. Zastosowanie MDZ jako układu obciążającego badaną maszynę pozwoli znacznie zoptymalizować koszt budowy stacji prób lub zwiększyć zakres mocy badanych maszyn. Przedstawione rozwiązanie pozwala także znacznie ograniczyć pobór mocy czynnej i biernej zasilających stację prób.

### 7. Literatura

- [1]. Skwarczyński J., Drabek T., Lerch T.: *Porównanie własności maszyny dwustronnie zasilanej przy napięciowym i prądowym zasilaniu wirnika w układzie otwartym*. Przegląd Elektrotechniczny, 2006: 62-69.
- [2]. Lerch T.: *Stany dynamiczne elektrowni wiatrowej z maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną*. Kraków, Wydawnictwa AGH, 2011
- [3]. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.: *Generalized theory of the instantaneous reactive power in the three-phase circuits*. Proc. JIEE-IPEC, Tokio, 1375-1380, r. 1983.
- [4]. Czarnecki Leszek S.: *Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.
- [5]. Lerch T.: *Współpraca elektrowni wiatrowej z maszyną dwustronnie zasilaną z systemem energetycznym w warunkach niesymetrii napięć* Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 80, 2008, wyd. KOMEL, s. 121-126.
- [6]. Bogalecka E.: *Zagadnienia sterowania maszyną dwustronnie zasilaną pracującą jako prądnica w systemie elektroenergetycznym*. Gdynia: Prace naukowe wyższej szkoły morskiej, 1997.

### Autor

dr inż. Tomasz Lerch, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: lerch@agh.edu.pl