



PORTFOLIO:

Energooszczędny układ obciążenia maszyny indukcyjnej na stacji prób

Autorzy: Tomasz Lerch

Centrum Inteligentnych Systemów Informatycznych Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
budynek C-2 pokój 426 tel: 12 617 44 53 www.isi.agh.edu.pl isi@agh.edu.pl



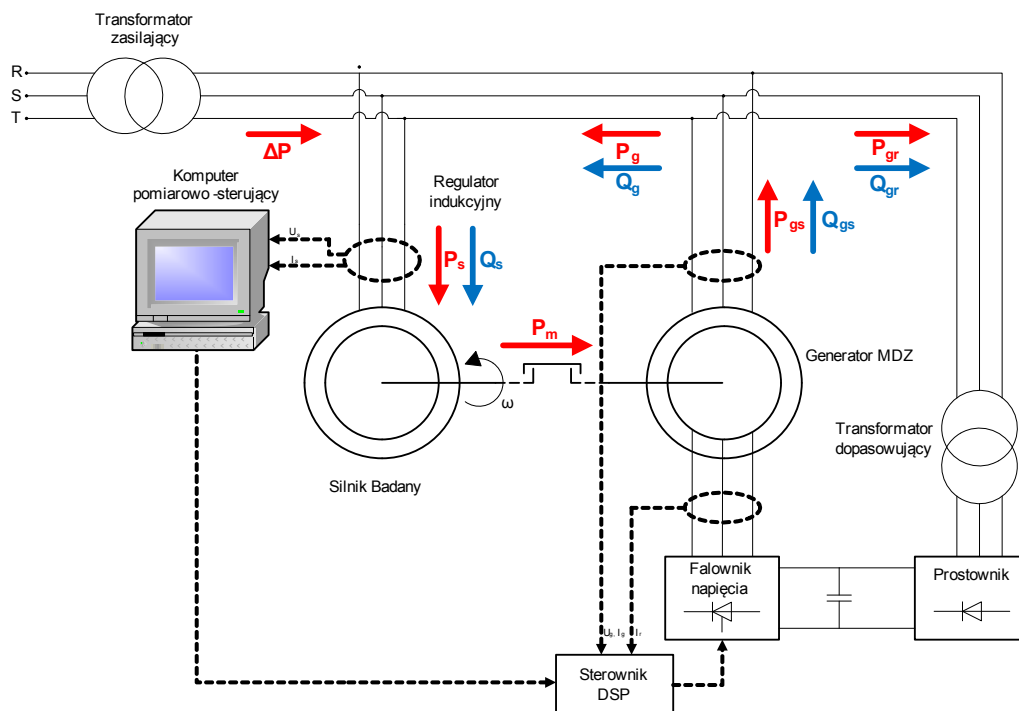
Opis merytoryczny:

Badanie maszyn elektrycznych zgodnie z wytycznymi norm wymaga wyposażenia stacji prób w układ obciążenia pozwalający w kontrolowany sposób zadawać obciążenie od zera do momentu maksymalnego maszyny. Pomiary obciążenia należy wykonać dla każdego nowego typu wyrobu. 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.



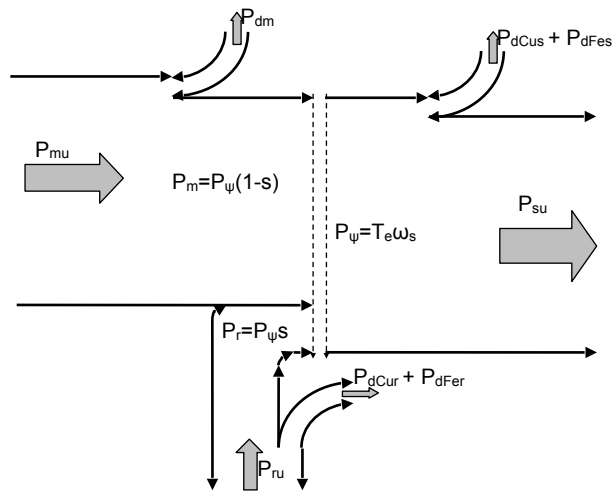
Rys. 1 Widok ogólny stacji prób w instytucie EMAG do badania maszyn elektrycznych dużej mocy

Adoptując rozwiązania znane między innymi z energetyki wiatrowej można w znacznym stopniu zoptymalizować układ obciążenia pod względem nakładów inwestycyjnych a przede wszystkim bilansu energetycznego. W tym celu opracowano koncepcję zastosowania zmodyfikowanego układu maszyny dwustronnie zasilanej (MDZ) pracującej jako generator obciążający badaną maszynę. W proponowanym układzie zastosowano tylko jedną maszynę indukcyjną pierścieniową której wirnik zasila falownik napięcia. Schemat ideowy opracowanego układu przedstawiono na rysunku 2.



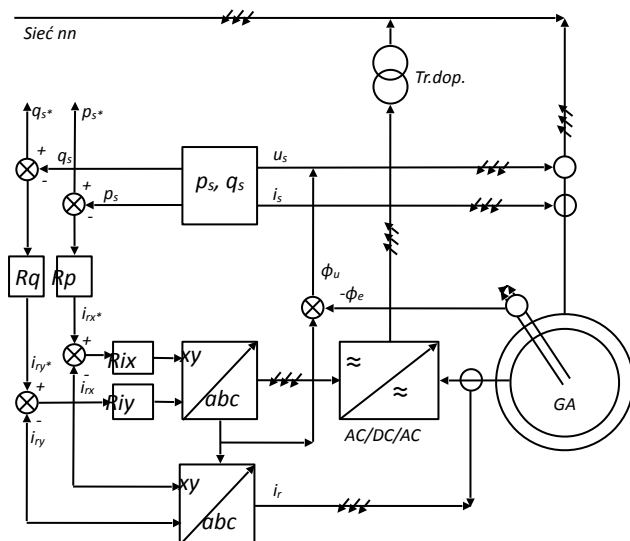
Rys. 2 Schemat ideowy układu obciążenia z MDZ

Moc przekształtnika zasilającego wirnik maszyny zależna jest od maksymalnego poślizgu z jakim będzie pracować MDZ. Obciążenie badanej maszyny indukcyjnej do momentu maksymalnego oznacza pracę z poślizgiem kilku procent, stosując zatem MDZ jako układ obciążający moc przekształtnika energoelektronicznego będzie stanowiła nie więcej niż 10% mocy maszyny obciążającej. Co więcej, praca tylko przy dodatnim poślizgu oznacza jedno kierunkowy przepływ mocy przez przekształtnik do wirnika [1]. Wyjaśnia to bilans mocy układu, który został przedstawiony na rysunku 3. Z powyższego wynika, że realizacja proponowanej koncepcji pozwoli znacznie ograniczyć koszty inwestycyjne dzięki możliwości zastosowania przekształtnika jednokierunkowego o mocy stanowiącej ułamek mocy generatora.



Rys. 3 Przepływ mocy czynnej w proponowanym układzie MDZ

Sterowanie mocą czynną i bierną MDZ odbywa się poprzez zadawanie składowych prądu zasilającego wirnik [2, 3], co wymaga zastosowania układu sterowania wektorowego. Schemat ideowy układu sterowania wektorowego zastosowany z opracowanym układzie przedstawiono na rysunku 4. Realizacja tego typu układu sterowania związana jest z dużą liczbą obliczeń w czasie rzeczywistym, stąd sterownik został zbudowany w oparciu o procesor sygnałowy Texas Instruments TMS320F2812.



Rys. 4 Schemat układu sterowania wektorowego MDZ

Głównym założeniem opracowanego układu obciążenia była minimalizacja zużycia energii, która przy długotrwałych próbach maszyn dużej mocy stanowi istotny problem. Moc mechaniczną jaką wydaje badana maszyna jest przetwarzana w MDZ na energię elektryczną. Część mocy, zależna od poślizgu, „krąży” w zamkniętym układzie stojan-wirnik natomiast większość pobierana jest z powrotem przez maszynę badaną. Kierunki przepływu mocy czynnej w układzie przedstawiają czerwone strzałki na rysunku 2. Z zewnątrz do

układu doprowadzana jest tylko moc potrzebna na pokrycie strat w maszynie badanej i układzie MDZ. Dzięki zamkniętej i krótkiej drodze przepływu mocy czynnej sprawność układu według obliczeń będzie wynosiła około 84%. Zatem do badania maszyn dużej mocy w proponowanym rozwiązaniu moc rozdzielni zasilającej stacje prób może wynosić nie więcej niż 20% mocy największych badanych maszyn.

Ponieważ maszyna dwustronnie zasilana przetwarza moc czynną w torze stojana i wirnika, całkowita przetwarzana moc czynna wynosi:

$$p = p_s - s \cdot p_s$$

(1)

gdzie: s to poślizg maszyny, p_s to moc przetwarzana w torze stojana

Uwzględniając to, w proponowanym rozwiązaniu układ sterowania został zmodyfikowany tak aby umożliwić zadawanie wartości mocy mechanicznej (p_m na rysunku 2), jaką MDZ obciąża maszynę badaną. Moc mechaniczna obliczana jest jako iloczyn momentu elektromagnetycznego i prędkości kątowej wirnika.

$$p_m = T_e \cdot \omega_r$$

(2)

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:

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

(3)

Składowe prądów wirnika muszą zostać przeliczone na stronę stojana oraz przetransformowane do prostokątnego układu odniesienia $\alpha\beta$ związanego ze stojanem, za co odpowiada procesor sygnałowy zastosowany w układzie sterowania.

Bardzo istotną zaletą MDZ jest również możliwość sterowania mocą bierną pobieraną lub wydawaną do sieci zasilającej przez układ, dzięki czemu może ona kompensować zapotrzebowanie na moc bierną maszyny badanej. Problem jest istotny ponieważ maszyny indukcyjne pobierają stosunkowo duża moc bierną, co skutkuje poborem prądu rzędu 30% wartości znamionowej. W przypadku badania maszyn dużej mocy prąd ten dodatkowo obciąża rozdzielnię zasilającą powodując dodatkowe straty mocy czynnej. W opracowanym rozwiązaniu moc bierna nie musi być doprowadzana do układu, jej przepływ został zobrazowany na rysunku 2 niebieskimi strzałkami.

Realizacja strategii sterowania w której z zewnątrz do układu doprowadzana jest tylko moc czynna na pokrycie strat wymaga zastosowania nadrzędnego komputera pomiarowo-sterującego. Komputer komunikuje się z układem za pomocą karty akwizycji danych. Do

komputera doprowadzone są sygnały z poszczególnych punktów układu, na podstawie których określa się chwilowy rozptyw mocy czynnej i biernej. Program sterujący pracą układu w oparciu o informacje o rozptywie mocy wypracowuje sygnały zadanej mocy mechanicznej i biernej które realizowane są przez procesor sygnałowy sterujący pracą przekształtnika wirnikowego.

Badania symulacyjne układu obciążenia z MDZ

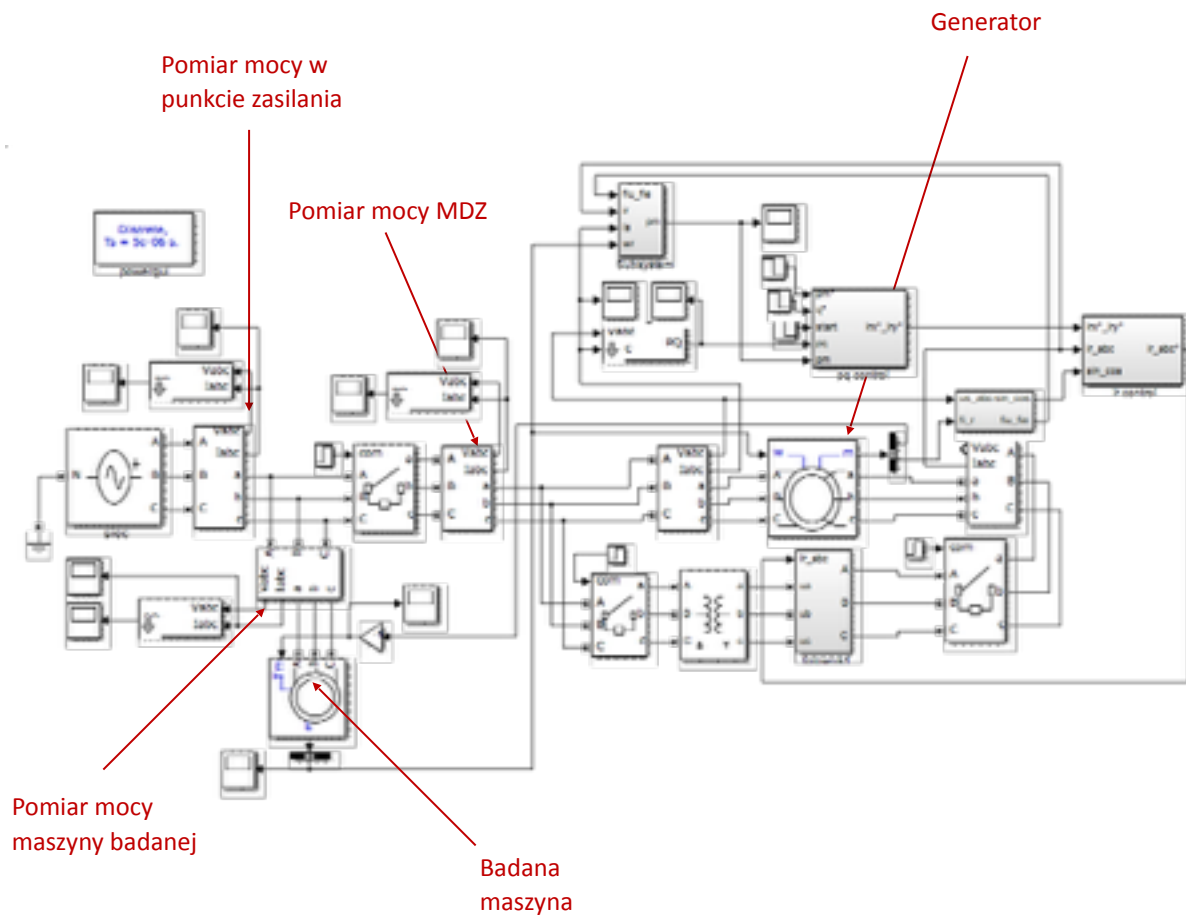
W celu weryfikacji poprawności działania proponowanego rozwiązania przeprowadzono badania symulacyjne. Badania zostały zrealizowane w środowisku Matlab-Simulink gdzie stworzono model dynamiczny składający się z maszyny badanej i układu obciążenia z MDZ. W układzie MDZ uwzględniono wszystkie istotne elementy układu: maszynę pierścieniową, transformator dopasowujący i przekształtnik energoelektroniczny. Model symulacyjny przedstawiono na rysunku 5.

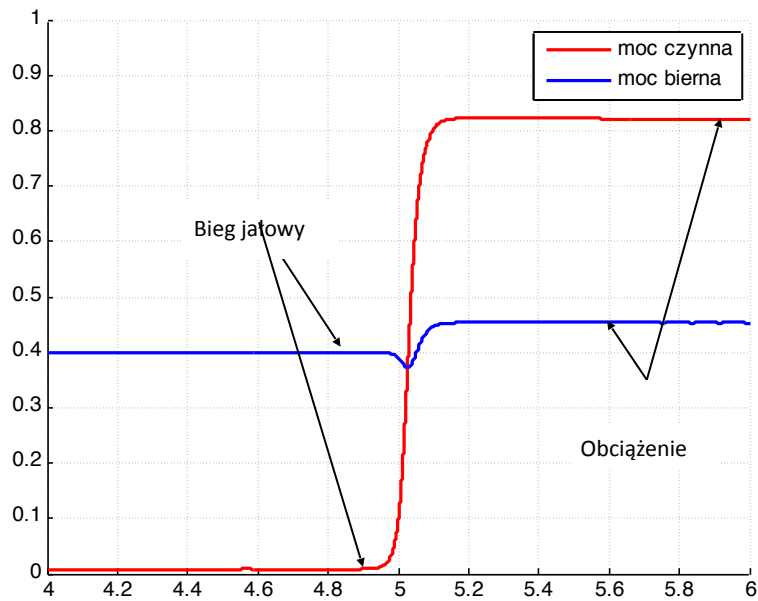
Analiza działania układu obciążenia z MDZ

Wyniki symulacji przedstawiają przebiegi mocy w poszczególnych punktach układu podczas włączania i regulacji układu obciążającego maszynę badaną. Na rysunku 6 przedstawiono przebieg mocy czynnej i biernej pobieranej przez badaną maszynę w stanie biegu jałowego a następnie po włączeniu obciążenia. Moc czynna pobierana przez maszynę w stanie biegu jałowego wynika ze strat maszyny uwzględnionych w modelu. Praca przekształtnika energoelektronicznego MDZ nie ma wpływu na kształt prądu pobieranego przez badaną maszynę co widać na przebiegach przedstawionych na rysunku 7.

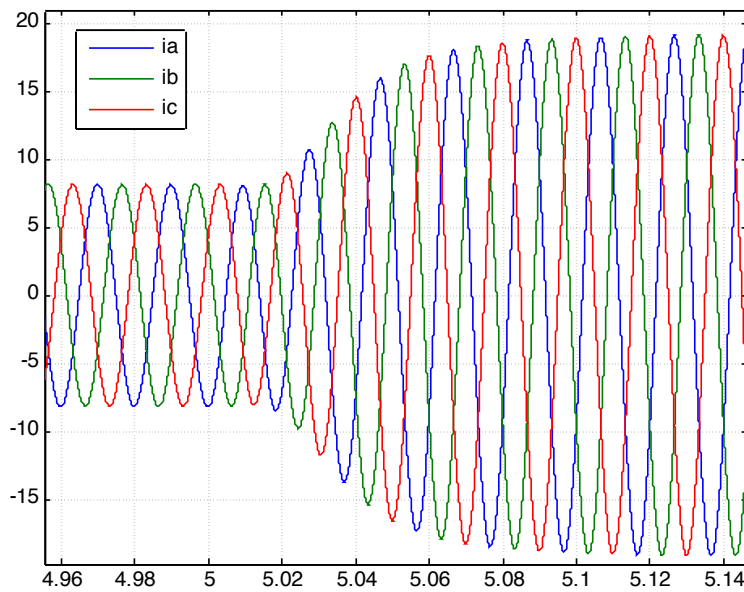
Kolejnym istotnym punktem badania działania układu jest analiza przebiegów mocy na zaciskach MDZ. Przebieg mocy czynnej i biernej w tym punkcie przedstawiono na rysunku 8. Pierwszy skok na przebiegu odpowiada załączeniu obwodu stojana, w tym stanie maszyna pobiera pełną moc bierną oraz moc czynną na pokrycie strat w uzwojeniach. Następny skok odpowiada załączeniu transformatora dopasowującego zasilającego obwód wirnika, widoczny wzrost mocy biernej wynika z magnesowania transformatora. Po włączeniu układu sterowania zadawana wartość mocy mechanicznej i biernej wynosi zero. Ponieważ układ steruje mocą bierną w obwodzie stojana MDZ, widoczna na rysunku moc bierna pobierana jest przez transformator dopasowujący. Podobnie zerowa moc mechaniczna na wale maszyny oznacza dalszy pobór mocy czynnej na pokrycie strat w MDZ. Ostatni skok widoczny na rysunku 8 odpowiada pracy układu sterowania przy konkretnych wartościach zadanych. Wartość mocy czynnej odpowiada mocy oddawanej przez MDZ do sieci przy zadawaniu mocy mechanicznej. Wartość zadanej mocy biernej równa się sumie mocy biernej pobieranej przez transformator dopasowujący i maszynę badaną. Mierzona wartość wydawanej mocy biernej indukcyjnej na zaciskach MDZ jest zatem równa mocy pobieranej przez maszynę badaną, co widać porównując rysunki 6 i 8. Warto zauważyć, że wzrostowi mocy biernej wydawanej przez MDZ do sieci towarzyszy nieznaczny spadek wydawanej mocy czynnej. Wynika to ze zwiększonego poboru prądu potrzebnego do domagnesowania maszyny od strony wirnika, co skutkuje wzrostem strat mocy czynnej w tym obwodzie.

Rys 5. Schemat modelu symulacyjnego układu obciążenia z MDZ

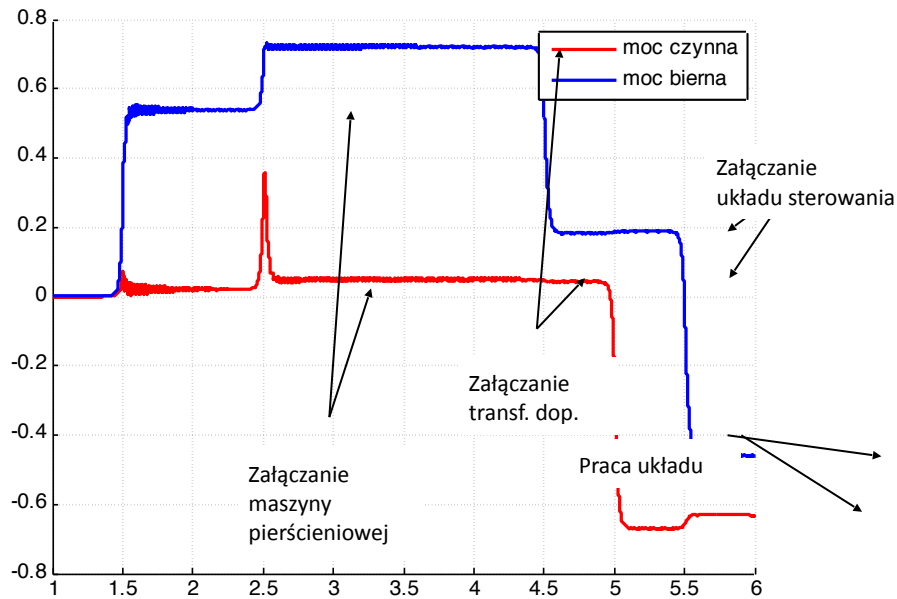




Rys. 6 Przebiegi mocy badanej maszyny podczas obciążenia

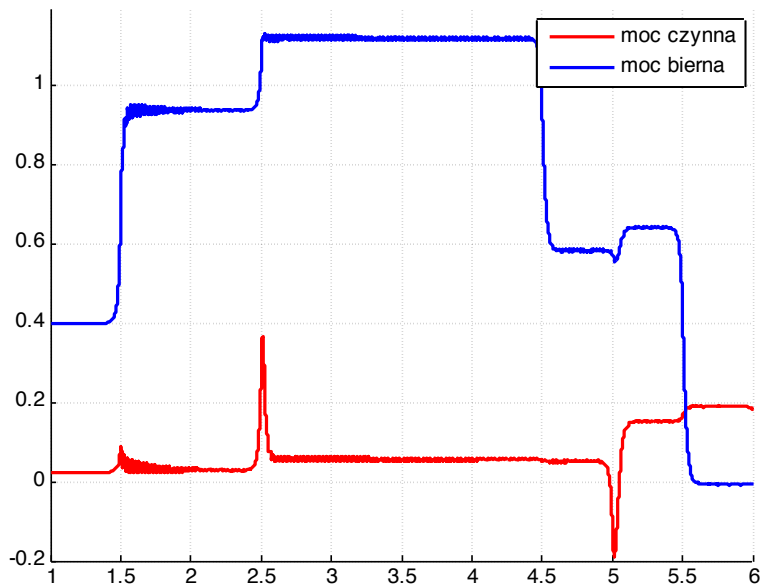


Rys. 7 Przebiegi prądu badanej maszyny podczas obciążenia



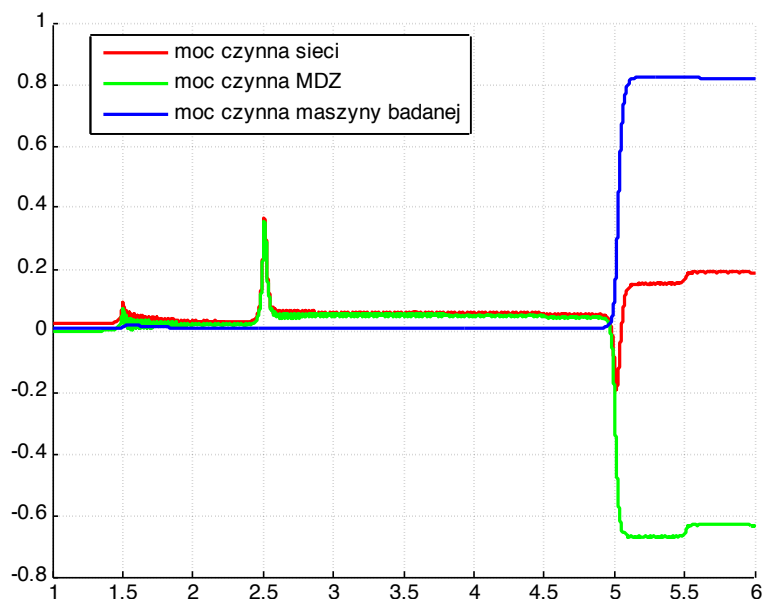
Rys. 8 Przebiegi mocy MDZ załączania układu i regulacji

Przebiegi mocy w punkcie przyłączenia modelowanej stacji prób do sieci zasilającej przedstawiono na rysunku 9. Kolejne skoki mocy widoczne na rysunku wynikają z przełączeń w układzie MDZ i odpowiadają przebiegom na zaciskach MDZ (rys. 8). Najistotniejszym punktem tego przebiegu jest ostatni fragment, kiedy maszyna badana pracuje pod obciążeniem, a moc bierna w punkcie przyłączenia jest w pełni skompensowana.



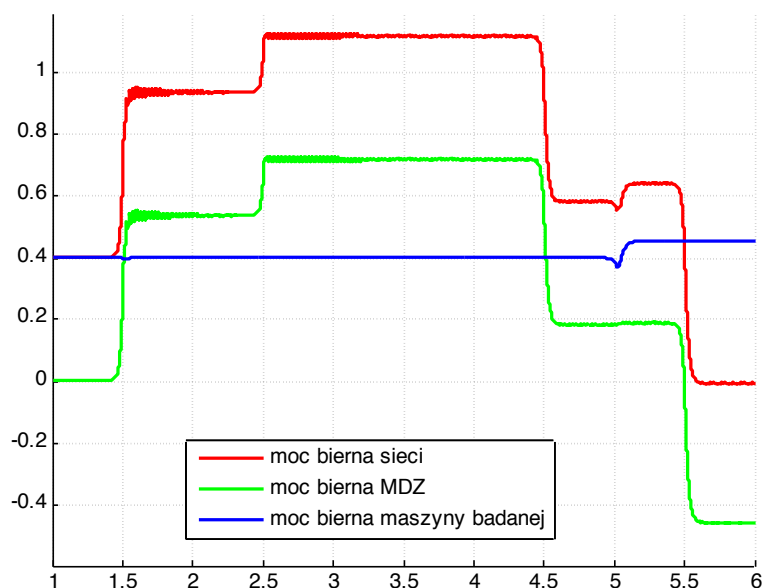
Rys. 9 Przebiegi mocy w punkcie przyłączenia stacji prób do sieci

W celu czytelniejszego zobrazowania rozplywu mocy w modelowanym układzie na rysunkach 10 i 11 zestawiono przebiegi w trzech analizowanych punktach układu osobno dla mocy czynnej i biernej. Moc czynna pobierana przez maszynę badaną przetwarzana jest na moc mechaniczną na wale, następnie MDZ przetwarza moc mechaniczną z powrotem na moc elektryczną. Przetwarzanie energii w obu maszynach odbywa się z określoną sprawnością, stąd różnica pomiędzy mocą pobieraną przez maszynę badaną i oddawaną przez MDZ (rys. 10) pokrywana jest z sieci zasilającej.



Rys. 10 Przebiegi mocy czynnej poszczególnych punktach układu

Moc bierna pobierana jest przez wszystkie odbiorniki o charakterze indukcyjnym, w modelowanym układzie są to obie maszyny oraz transformator dopasowujący. Cechą maszyny dwustronnie zasilanej, która została zastosowana w proponowanym układzie, jest możliwość wydawania mocy biernej indukcyjnej dzięki zasilaniu uzwojeń wirnika z przekształtnika energoelektronicznego. Moc bierna wydawana przez obwód stojana kompensuje zapotrzebowanie na moc bierną pozostałych elementów układu. Jeżeli zadana wartość mocy biernej MDZ będzie równa sumie zapotrzebowania maszyny badanej i transformatora w układzie wirnika wówczas całkowita moc bierna doprowadzana do układu z sieci zasilającej będzie równa zero.



Rys. 11 Przebiegi mocy biernej poszczególnych punktach układu

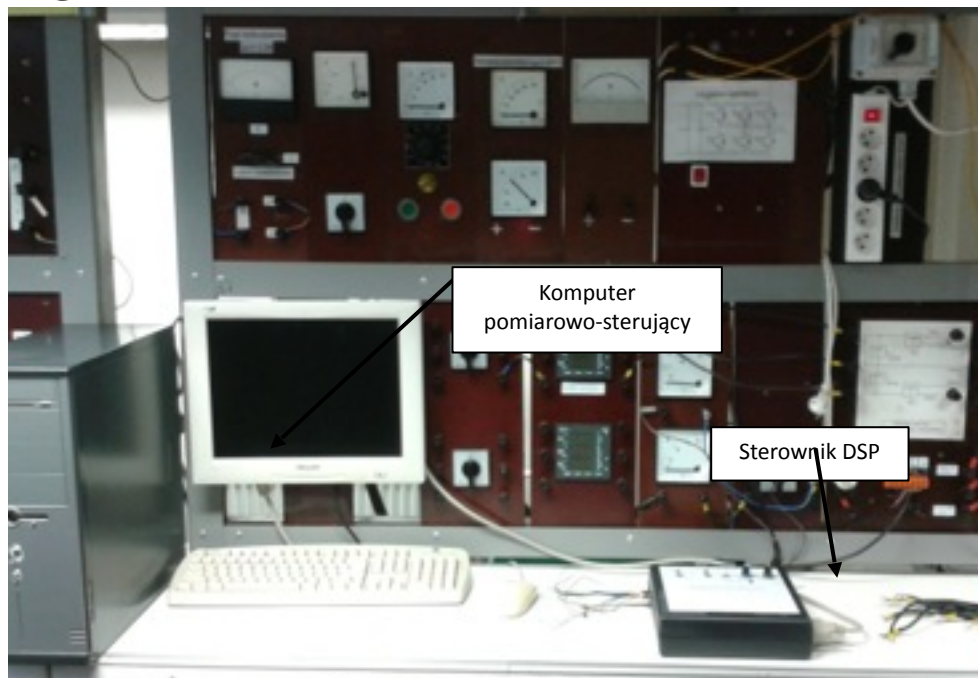
Przeprowadzone badania symulacyjne proponowanego układu pozwalają stwierdzić, zastosowanie MDZ jako obciążenia maszyny indukcyjnej pozwoli znacznie zoptymalizować koszt budowy stacji prób lub zwiększyć zakres mocy badanych maszyn. Przedstawione rozwiązanie pozwala także znacznie ograniczyć pobór mocy czynnej i biernej zasilającej stację prób.

Charakterystyka i typ potencjalnych nabywców

Opracowane rozwiązanie adresowane jest przede wszystkim do przedsiębiorstw produkujących i remontujących maszyny elektryczne które w procesie technologicznym wykorzystują stacje prób do badania maszyn. Mogą być nim także zainteresowane instytuty prowadzące badania maszyn elektrycznych. Maszyny średniej i dużej mocy w Polsce wytwarza około pięciu wytwórców, dodatkowo badania są przeprowadzane w 3-4 laboratoriach. Realnie rozwiązanie może być zastosowane w 2-3 miejscach. Dodatkowo, ewentualnie mogą być nim zainteresowani wytwórcy silników wysokoprężnych wykorzystujący w procesie produkcji układ obciążenia silników.

Materiały promocyjne

Opracowany układ będzie prezentowany na konferencjach branżowych oraz w czasopismach zajmujących się tematyką maszyn elektrycznych. W Laboratorium Maszyn Elektrycznych przygotowywane jest stanowisko na którym będzie istniała możliwość przeprowadzenia demonstracji działania układu. Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono stan obecny przygotowywanego stanowiska.



Rys. 12 Widok ogólny pulpitu sterowniczego



Rys. 13 Maszyny zainstalowane na stanowisku laboratoryjnym

Potencjalni rozmówcy

Potencjalnymi rozmówcami mogą być autorzy rozwiązania. Dodatkowo spoza kręgu autora rozmówcami mogą być pracownicy firmy ENEL w Gliwic, którzy będą brali czynny udział w wykonaniu systemu u zainteresowanego nabywcy. Przedsiębiorcą który zgłosił zainteresowanie systemem jest firma EMAG z Katowic którzy zamierzają zmodernizować swoją stację prób wykorzystując proponowane rozwiązanie. Z ramienia tej firmy rozmówcą może być Kierownik Laboratorium Badań Maszyn i Urządzeń Elektrycznych.

Silne i słabe strony projektu

Silną stroną projektu jest doświadczenie autorów którzy od wielu lat zajmują się maszyną dwustronnie zasilaną o czym świadczą publikacje z tego zakresu. Autorzy zbudowali także i przeprowadzili próby opracowanego rozwiązania w laboratorium.

Do słabych stron należy zaliczyć ograniczaną liczbę użytkowników rozwiązania ze względu na specjalistyczny charakter układu, jak już wcześniej wspomniano w kraju można znaleźć kilka zakładów dla których to rozwiązanie może być interesujące.

Czynniki ryzyka

Czynnikiem ryzyka może być w tym przypadku brak wcześniejszych zastosowań podobnych układów w praktyce przemysłowej a także stosunkowo słaba znajomość właściwości i zasady działania maszyny dwustronnie zasilanej. Poważnym czynnikiem ryzyka jest także na pewno niechęć do zmian w zakładach które od lat prowadzą badania maszyn w „tradycyjny” sposób.

Literatura

1. Skwarczyński J., Drabek T., i 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* Przegląd Elektrotechniczny 2011 R. 87 nr 6, s. 118–124.
3. Bogalecka E.: *Zagadnienia sterowania maszyną dwustronnie zasilaną pracującą jako prądnica w systemie elektroenergetycznym*. Gdynia: Prace naukowe wyższej szkoły morskiej, 1997.