ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2004
Seria: ELEKTRYKA z. 192 Nr kol. 1634

Michał JELEŃ, Kazimierz GIERLOTKA, Jarosław MICHALAK
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej

ZASTOSOWANIE METODY DTC Z MODULATOREM WEKTOROWYM DO STEROWANIA MASZYNY INDUKCYJNEJ DWUSTRONNIE ZASILANEJ

Streszczenie. W artykule opisano układ bezpośredniego sterowania momentu (DTC) z modulatorem wektorowym maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej. Podano zasady sterowania momentu elektromagnetycznego silnika i mocy biernej w obwodzie stojana maszyny. Omówiono zalety i wady metody DTC z modelatorem wektorowym i porównano ją z innymi metodami sterowania maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej. Przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych.

APPLICATION OF DTC-SVM METHOD FOR THE CONTROL OF DOUBLE-FED INDUCTION MACHINE

Summary. The direct torque control with space vector modulator (DTC-SVM) system of double-fed induction is described in the paper. There are presented the principles of the control of the motor torque and of the reactive power in the stator circuit. Advantages and faults of the DTC-SVM method are discussed and it was compared with other control methods of the double-fed induction machine. The chosen results of the simulatiion tests of the machine controlled according to presented method are presented in the paperr.

1. WPROWADZENIE

Bezpośrednie sterowanie momentu (DTC) jest metodą znaną od prawie dwudziestu lat i nadal intensywnie rozwijaną. Umożliwia ona poprzez wybór odpowiedniego wektora przestrzennego napięcia falownika MSI sterowanie momentu elektromagnetycznego i strumienia stojana silnika. Metoda DTC cechuje się:

- bardzo dobrymi właściwościami dynamicznymi napędu,
- prostotą obliczeniową wynikającą z braku układów transformacji współrzędnych.

W klasycznej odmianie metoda DTC bazuje na komparatorowych regulatorach momentu i strumienia. Na podstawie sygnałów wyjściowych regulatorów oraz identyfikacji sektora, w którym znajduje się aktualnie wektor przestrzenny strumienia skojarzonego stojana, dokonywany jest przez tablicę przełączeń wybór jednego z sześciu aktywnych lub dwóch zerowych wektorów napięcia zasilania silnika z falownika FN-MSI. Z uwagi na sterowanie falownika całość tworzy modulator komparatorowy. Wadami takiego rozwiązania są:

- zniekształcenia prądów wynikające ze zmian sektorów,
- zmienna i niekontrolowana częstotliwość przełączania zaworów falownika.

Oprócz klasycznej metody DTC istnieją również odmiany tej metody, w których zamiast komparatorów i tablicy przełączeń stosuje się modulator wektorowy. Zastosowanie modulatora poprawia właściwości statyczne układu (eliminując charakterystyczne zniekształcenia w prądach i stabilizując częstotliwość przełączeń zaworów) bez pogarszania własności dynamicznych.

Metoda DTC została opracowana do sterowania silników indukcyjnych klatkowych, ale jest również stosowana w układach z maszyną synchroniczną i reluktancyjną. W ostatnich trzech latach ukazały się pierwsze publikacje dotyczące zastosowania metody DTC do sterowania maszyny asynchronicznej dwustronnie zasilanej [1, 2, 3].

W przypadku sterowania maszyny asynchronicznej pierścieniowej „od strony wirnika" przekształtnik wirnikowy zwymiarowany jest na maksymalną moc poślizgu. Jeżeli zakres sterowania prędkości, a tym samym maksymalny poślizg, z jakim pracuje maszyna asynchroniczna, jest niewielki, uzasadnione jest sterowanie prędkości silnika „od strony wirnika". Jednocześnie w takim przypadku istnieje możliwość sterowania wartości mocy biernej pobieranej przez maszynę asynchroniczną z sieci zasilającej.

Maszyna asynchroniczna dwustronnie zasilana może być wykorzystana zarówno w układach napędowych, jak i generacyjnych o sterowanej prędkości, np. w elektrowniach wodnych szczytowo-pompowych [5] lub wiatrowych [7]. Problematyka wysoko sprawnych systemów generacyjnych pracujących przy zmiennych obciążeniach jest bardzo aktualna z uwagi na rozwój energetyki rozproszonej wykorzystującej odnawialne źródła energii. W przypadku elektrowni wiatrowych wskazuje się na konieczność ich powiązania z elektrowniami szczytowo-pompowymi, co zapewni wymaganą jakość energii i elastyczność takiego systemu, tj. zdolność wytworzenia wymaganej wartości mocy niezależnie od aktualnej prędkości wiatru [5].

Sterowanie maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej może się odbywać wg metody orientacji wektora pola [5, 7], metod multiskalarnych [6] lub metody DTC [1, 2, 3]. Klasyczna metoda DTC w zastosowaniu do sterowania maszyny dwustronnie zasilanej ma podobne zalety i wady, jak w przypadku jej zastosowania do sterowania maszyny asynchronicznej klatkowej. Nakłady obliczeniowe są jednak nieco większe, gdyż niezbędna jest transformacja wielkości mierzonych do układu współrzędnych związanego z wirnikiem maszyny. Wady klasycznej metody DTC, wynikające z będącej jej istotą modulacji komparatorowej, mogą być ograniczone przez zastosowanie do sterowania silnika pierścieniowego dwustronnie zasilanego metody bezpośredniego sterowania momentu z modulatorem wektorowym.

2. BEZPOŚREDNIE STEROWANIE MOMENTU I STRUMIENIA WIRNIKA MASZYNY ASYNCHRONICZNEJ DWUSTRONNIE ZASILANEJ

2.1. Sterowanie momentu elektromagnetycznego

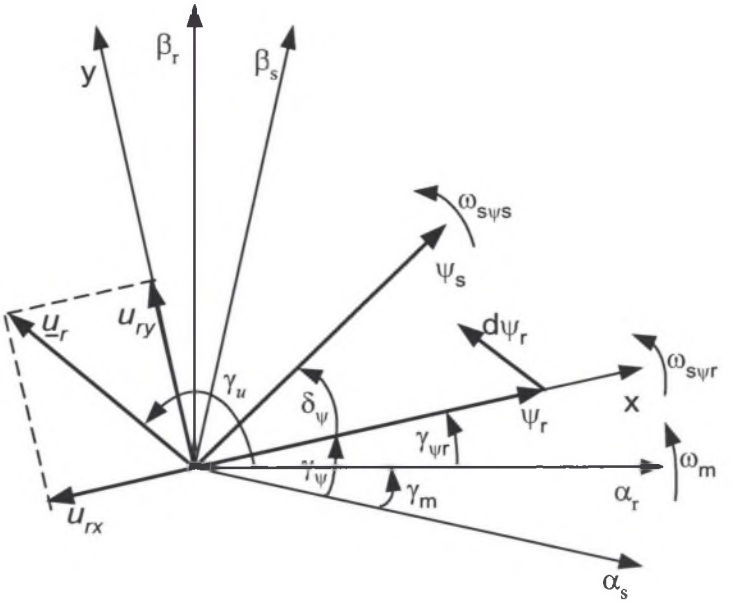
Moment maszyny indukcyjnej można opisać zależnością [4]:

$$\tau = \frac{1}{l_\sigma}\frac{l_M}{l_r}\psi_s\psi_r \sin\delta_\psi, \tag{1}$$

gdzie:

$$l_\sigma = \frac{l_s l_r - l_M^2}{i_s i_r} l_s = \sigma l_s, \tag{2}$$

a δ_ψ jest kątem między wektorami przestrzennymi strumieni skojarzonych stojana i wirnika.



Rys. 1. Wykres wektorowy maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej
Fig. 1. Space vectors of double-fed induction machine

W przypadku maszyny dwustronnie zasilanej stojan silnika zasilany jest z sieci trójfazowej napięciem sinusoidalnym o stałej częstotliwości, zatem wektor przestrzenny strumienia skojarzonego stojana ψ_s posiada stałą amplitudę i wiruje względem wirnika ruchem jednostajnym z prędkością poślizgu. Wektor przestrzenny strumienia skojarzonego wirnika ψ_r może być w przypadku silnika dwustronnie zasilanego sterowany napięciem wirnika. W układzie współrzędnych α_r, β_r związanym z wirnikiem, przy pominięciu rezystancji uzwojeń wirnika, otrzymuje się:

$$\underline{\psi}_r = \frac{1}{T_N} \int \underline{u}_r dt \,. \tag{3}$$

Wektor przestrzenny napięcia zasilającego wirnik, w układzie współrzędnych x, y zorientowanym względem strumienia wirnika, można rozłożyć na składowe: równoległą do strumienia u_{rx} oraz prostopadłą u_{ry} (rys.1). Składowa u_{rx} wpływa na przyrost amplitudy strumienia, natomiast składowa u_{ry} na przyrost momentu (zmianę kąta δ_ψ pomiędzy strumieniami skojarzonymi stojana i wirnika). Odpowiednie kształtowanie tych dwóch składowych napięcia wirnika prowadzi zatem do sterowania momentu i strumienia wirnika maszyny asynchronicznej.

2.2. Sterowanie mocy biernej

Moc bierna pobierana z sieci przez maszynę asynchroniczną wyrażona jest zależnością:

$$q = \mathrm{Im}\left(\underline{u}_s \underline{i}_s^*\right) = u_{sy} i_{sx} - u_{sx} i_{sy} \,, \tag{4}$$

Uzależniając składowe napięcia i prądu stojana maszyny od strumieni skojarzonych stojana i wirnika otrzymuje się [3]:

$$q = \frac{\omega_s}{l_\sigma}\left(\psi_s^2 - \frac{l_M}{l_r}\psi_{sx}\psi_r\right) + \frac{T_N}{l_\sigma}\left[\left(\psi_{sx} - \frac{l_M}{l_r}\psi_r\right)\frac{d\psi_{sy}}{dt} - \psi_{sy}\frac{d\psi_{sx}}{dt}\right]. \tag{5}$$

Z zależności (5) wynika, że w stanie ustalonym moc bierna w obwodzie stojana maszyny zależna jest od amplitudy strumienia skojarzonego wirnika. Zatem stosując podobne zasady, co w klasycznym DTC, do sterowania falownika zasilającego wirnik maszyny dwustronnie zasilanej, uzyskujemy:

- sterowanie momentu maszyny poprzez zmianę kąta zawartego pomiędzy wektorami przestrzennymi strumieni skojarzonych wirnika i stojana. Odbywa się to przez zadawanie składowej u_{ry} wektora przestrzennego napięcia wirnika (wzrost momentu odpowiada ujemnej wartości składowej u_{ry}),
- sterowanie mocy biernej poprzez zmianę amplitudy strumienia wirnika, co odbywa się przez zadawanie składowej u_{rx} wektora przestrzennego napięcia wirnika.

Tabela 1

Porównanie metod sterowania maszyny asynchronicznej dwustronnie zasilanej

	DTC	**Orientacja wektora pola**	**Sterowanie multiskalarne**
Sterowanie falownika wirnikowego w układzie współrzędnych	α_r, β_r	α_r, β_r	α_r, β_r
Obliczenia sterowania (układ regulacji) w ukł. współrzędnych	α_r, β_r	x, y	wielkości skalarne
Wielkości sterowane	δ_ψ, ψ_r	i_{rx}, i_{ry}	z_{12}, z_{22}
Zależności mocy biernej i czynnej (momentu elektromagnetycznego) od bezpośrednich wielkości sterowanych w stanie ustalonym	P=f(δ_ψ, ψ_r), Q=f(δ_ψ, ψ_r) ster. słabo sprzężone	P=f(i_{ry}), Q=f(i_{rx}) sterowanie odsprzężone	P=f(z_{12}), Q=f(z_{22}) sterowanie odsprzężone
Wielkości odtwarzane lub mierzone	δ_r, δ_ψ, ψ_r, m, q, ω	δ_r, p, q, i_{rx}, i_{ry}, $\psi_{s\alpha}$, $\psi_{s\beta}$, ω	δ_r, p, q, z_{11}, z_{12}, z_{21}, z_{22}, u_{sf1}, u_{sf2}, u_{si1}, u_{si2}, $\psi_{s\alpha}$, $\psi_{s\beta}$

W tabeli 1 przedstawiono porównanie metody DTC z innymi metodami sterowania maszyny dwustronnie zasilanej. Zalety metody DTC w porównaniu z innymi to:

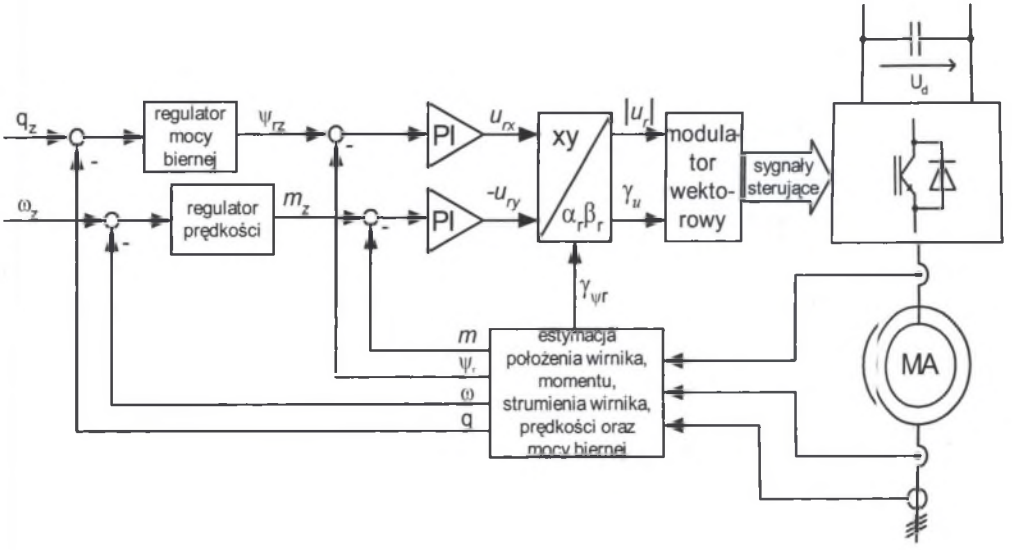
- zarówno sterowanie falownika wirnikowego, jak i obliczenia sterowania przeprowadzane są w jednym układzie współrzędnych α_r, β_r związanych z wirnikiem,
- mniejsza liczba mierzonych lub odtwarzanych zmiennych koniecznych do sterowania.

Zaletą metody DTC zastosowanej do sterowania maszyny dwustronnie zasilanej są również bardzo dobre właściwości dynamiczne napędu. Wadą metody jest zależność w stanie ustalonym zmiennych regulowanych - momentu elektromagnetycznego (mocy czynnej) silnika i mocy biernej – od obydwu wielkości sterowanych: amplitudy strumienia wirnika ψ_r i kąta δ_ψ zawartego między wektorami przestrzennymi strumieni skojarzonych stojana i wirnika. Sprzężenia te mogą być w znacznym stopniu skompensowane przez obwody regulacji momentu i mocy biernej silnika.

3. UKŁAD STEROWANIA MASZYNY DWUSTRONNIE ZASILANEJ

Schemat układu sterowania maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej został przedstawiony na rys. 2. Uzwojenia stojana maszyny podłączone są bezpośrednio do sieci, natomiast uzwojenia wirnika zasilane są z falownika napięcia. Układ sterowania falownika wirnikowego, oparty na metodzie DTC z modulatorem wektorowym, składa się z następujących elementów:

- bloku estymacji,
- regulatora PI składowych u_{rx} i u_{ry} wektora napięcia wirnika,
- układu transformacji współrzędnych,
- modulatora wektorowego.



Rys. 2. Układ sterowania maszyny dwustronnie zasilanej oparty o metodę DTC z modulatorem wektorowym

Fig. 2. DTC-SVM-based control system of the double-fed induction machine

W metodzie DTC konieczna jest estymacja momentu generowanego przez maszynę oraz strumienia wirnika. Ponieważ sterowanie falownika wirnikowego odbywa się w układzie współrzędnych zorientowanym wg wirnika, zatem wektor przestrzenny strumienia skojarzonego wirnika powinien być estymowany również w tym układzie współrzędnych. Można to zrealizować opierając się na metodzie przedstawionej w [6].

Wyestymowane wartości strumienia wirnika i momentu oraz ich wartości zadane ψ_{rz} i m_z doprowadzone są do dwóch regulatorów typu PI. Regulatory te, wykorzystując zależność momentu maszyny od składowej u_{ry} oraz strumienia wirnika od składowej u_{rx}, wypracowują składowe napięcia zasilającego silnik. Wektor napięcia wirnika określony przez składowe u_{rx} i u_{ry} transformowany jest następnie do układu współrzędnych związanych z wirnikiem i zamieniany na moduł $|u_r|$ oraz kąt γ_u. Wielkości te stanowią sygnały wejściowe dla modulatora wektorowego.

Wartości zadane momentu oraz strumienia maszyny są sygnałami wyjściowymi dwóch regulatorów PI, odpowiednio regulatora prędkości oraz regulatora mocy biernej. W przypadku układu sterowania maszyny pracującej jako generator zamiast regulatora prędkości należy zastosować regulator mocy czynnej.

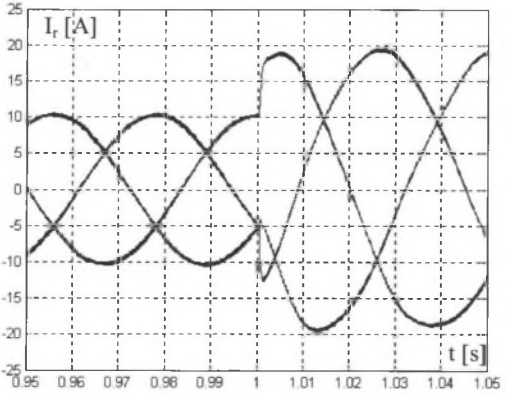
4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Badania symulacyjne zostały przeprowadzone w środowisku Matlab-Simulink. Układ sterowania maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej został zrealizowany jako cyfrowy z czasem dyskretyzacji wynoszącym 5 μs. Modulator wektorowy pracował z czasem dyskretyzacji równym 400 μs, zatem częstotliwość przełączeń zaworów wynosiła 2,5 kHz.

4.1. Skokowa zmiana wartości zadanej momentu

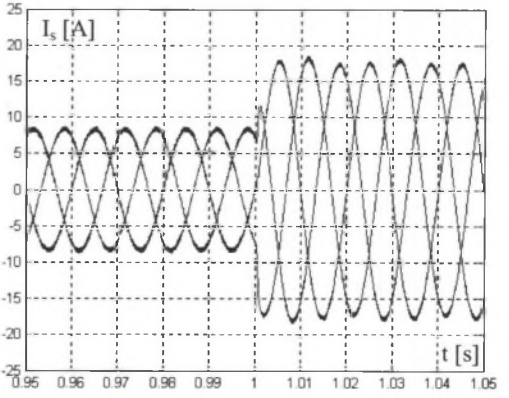
Przebiegi wybranych wielkości w odpowiedzi na skokową zmianę momentu zadanego maszyny z M_N na $2M_N$ przedstawiono na rys. 3-7. Prędkość wynosi $0{,}7n_N$, układ pracuje z jednostkowym współczynnikiem mocy. Na uwagę zasługuje czas odpowiedzi układu na zmianę momentu, który wynosi około 1 ms.

Rys. 7 przedstawia wpływ zmiany momentu silnika na moc bierną w obwodzie stojana: po około 40 ms jej wartość wraca do poziomu zadanego 0 VAr.



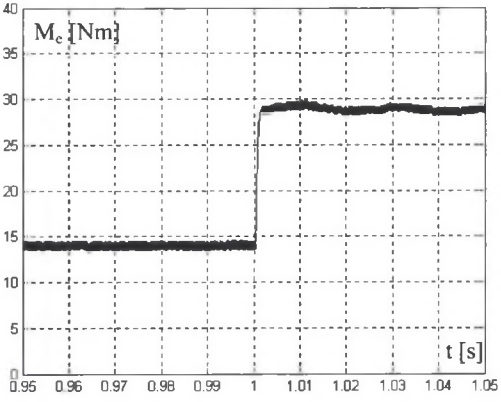
Rys. 3. Prądy wirnika dla skokowej zmiany momentu zadanego

Fig. 3. Rotor current for step change of the reference value of the torque

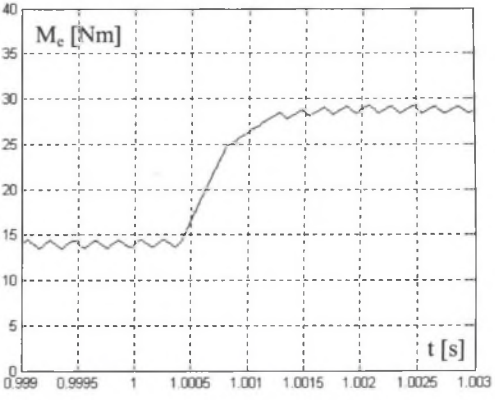


Rys. 4. Prądy stojana dla skokowej zmiany momentu zadanego

Fig. 4. Stator current for step change of the reference value of the torque



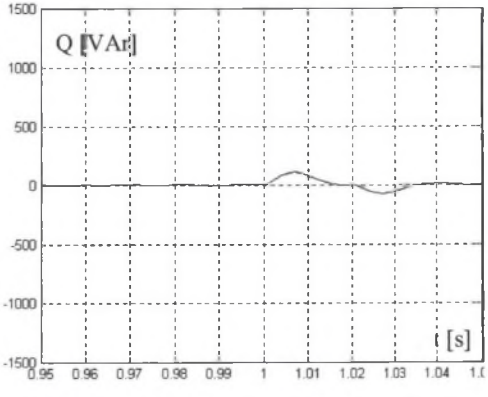
Rys. 5. Moment elektromagnetyczny dla skokowej zmiany momentu zadanego
Fig. 5. Motor torque for step change of the reference value of the torque



Rys. 6. Moment elektromagnetyczny dla skokowej zmiany momentu zadanego
Fig. 6. Motor torque for step change of the reference value of the torque

4.2. Skokowa zmiana wartości zadanej mocy biernej

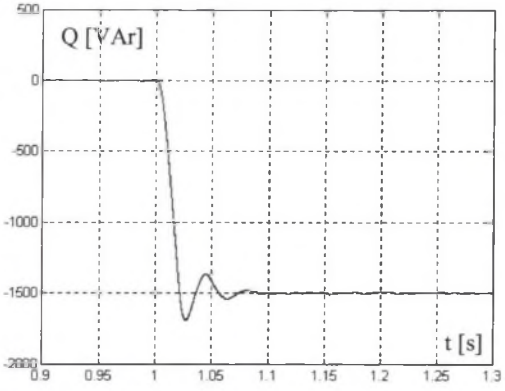
Przebiegi wybranych wielkości w odpowiedzi na skokową zmianę wartości zadanej mocy biernej z 0 na $-0{,}5Q_N$ przedstawiono na rys. 8–11. Prędkość maszyny utrzymywana jest na poziomie $0{,}7n_N$. Wartość amplitudy strumienia wirnika (rys. 9) rośnie, powodując zmniejszenie mocy biernej w obwodzie stojana maszyny – pracuje ona z pojemnościowym współczynnikiem mocy. Moment elektromagnetyczny maszyny jest praktycznie niewrażliwy na zmianę mocy biernej (rys. 11).



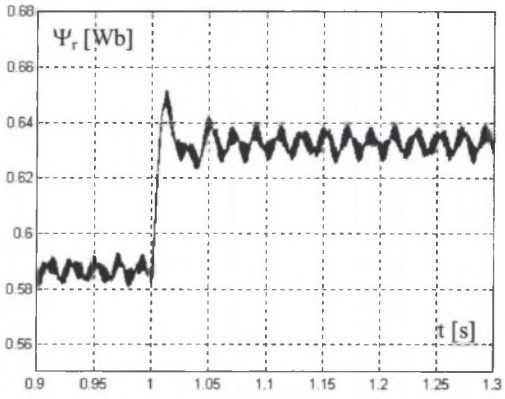
Rys. 7. Moc bierna w obwodzie stojana dla skokowej zmiany momentu zadanego
Fig. 7. Reactive power for step change of the reference value of the torque

4.3. Prąd wirnika silnika

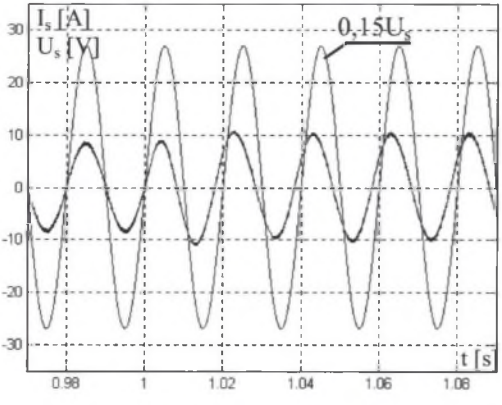
Na rys. 12 porównano prąd jednej fazy wirnika silnika pracującego w układzie sterowania DTC z regulatorami komparatorowymi strumienia wirnika i momentu elektromagnetycznego silnika (rys. 12a) oraz w układzie DTC z modulatorem wektorowym (rys. 12b). Widoczny jest lepszy kształt prądu wirnika przy zastosowaniu modulatora wektorowego.



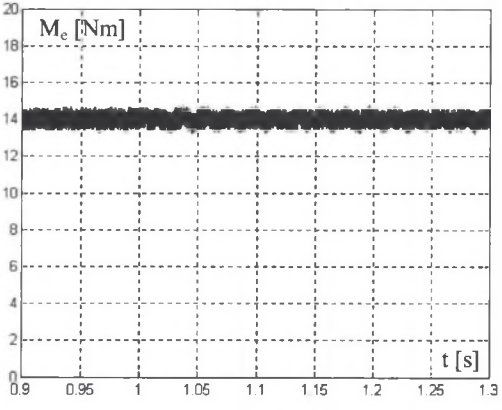
Rys. 8. Moc bierna dla skokowej zmiany wartości zadanej mocy biernej
Fig. 8. Reactive power for step change of the reference value of reactive power



Rys. 9. Amplituda strumienia wirnika dla skokowej zmiany wartości zadanej mocy biernej
Fig. 9. Rotor flux amplitude for step change of the reference value of reactive power



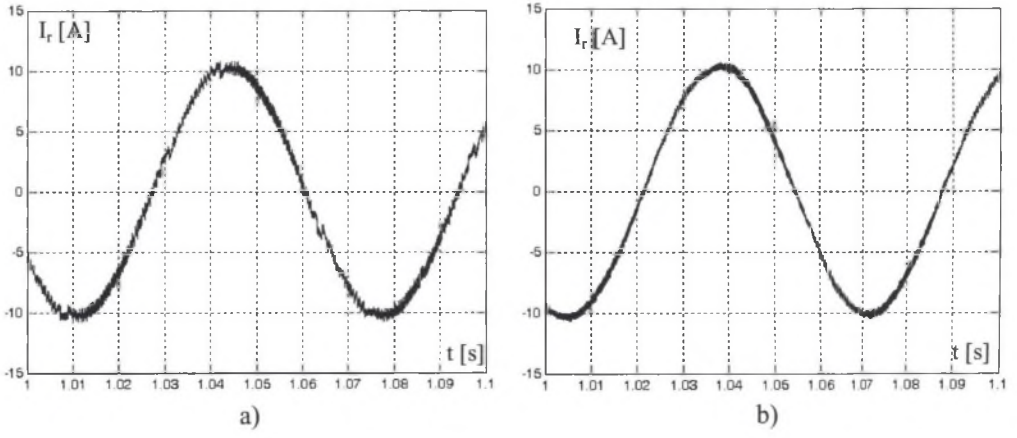
Rys. 10. Napięcie i prąd stojana dla skokowej zmiany wartości zadanej mocy biernej
Fig. 10. Stator voltage and current for step change of the reference value of reactive power



Rys. 11. Moment elektromagnetyczny dla skokowej zmiany wartości zadanej mocy biernej
Fig. 11. Motor torque for step change of the reference value of reactive power

5. WNIOSKI

W układzie z maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną, sterowaną za pomocą metody DTC z modulatorem wektorowym, możliwe jest niezależne sterowanie momentu maszyny i mocy biernej w obwodzie stojana. Maszyna może pracować bez poboru mocy biernej z sieci z jednostkowym współczynnikiem mocy lub z współczynnikiem mocy pojemnościowym – moc bierna indukcyjna konieczna do namagnesowania maszyny dostarczana jest wówczas od strony wirnika. Wiąże się to jednak ze wzrostem obciążeń prądowych wirnika silnika.



Rys. 12. Prąd jednej fazy wirnika: a) w układzie z klasycznym sterowaniem DTC; b) z modulatorem wektorowym

Fig. 12. Rotor current in the case of: a) classical DTC control; b) DTC-SVM control system

W zamkniętym układzie regulacji nie zaobserwowano wpływu zmian mocy biernej na moment elektromagnetyczny silnika. Skokowa zmiana wartości zadanej momentu z wartości M_N do $2M_N$ powoduje w stanie nieustalonym krótkotrwałe (około 40 ms) i silnie tłumione oscylacje mocy biernej o maksymalnej amplitudzie równej około 6% znamionowej wartości mocy biernej maszyny.

Metoda DTC zapewnia bardzo dobre własności dynamiczne napędu z maszyną asynchroniczną dwustronnie zasilaną. Inne zalety tej metody to: prostota, łatwość realizacji w systemie mikroprocesorowym oraz niewielkie zapotrzebowanie na moc obliczeniową.

Użycie modulatora wektorowego poprawia statyczne własności układu w porównaniu z klasycznym DTC poprzez wyeliminowanie charakterystycznych zniekształceń w prądach występujących przy przekraczaniu granic sektorów przez wektor strumienia wirnika. Dodatkowo stała częstotliwość przełączeń tranzystorów, którą zapewnia modulator, jest korzystna z punktu widzenia filtracji zakłóceń.

Przedstawione wyniki symulacji stanowią wstęp do realizacji układu laboratoryjnego z maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną, sterowaną za pomocą metody DTC.

LITERATURA

1. Arnalte S., Burgos J. C., Rodriguez-Amendo J. L.: *Direct Torque Control of a Doubly-Fed Induction Generator for Variable Speed Wind Turbines*, Electric Power Components and Systems, 30: 199-216, 2002.
2. Datta R., Ranganathan V.T.: *Direct Power Control of Grid-Connected Wound Rotor Induction Machine Without Rotor Position Sensors*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 16, No. 3, May 2001.
3. Gierlotka K., Jeleń M.: *Zastosowanie metody DTC do sterowania maszyny asynchronicznej dwustronnie zasilanej*, VI Konferencja SENE, Łódź 2003.
4. Kaźmierkowski M., Tunia H.: *Automatic Control of Converter-Fed Drives*, PWN, Warszawa 1994.

5. Kelber Ch. R., Schumacher W.: *Control of double-fed induction machines as an adjustable speed motor/generator*, European Conference "Variable Speed in Small Hydro", Grenoble 2001.
6. Krzemiński Z.: *Sensorless Multiscalar Control of Double Fed Machine for Wind Power Generators,* PCC Osaka 2002. pp. 334-339.
7. Radel U., Navarro D., Berger G., Berg S.: *Sensorless field oriented control of a slipring induction generator for 2.5 MW wind power plant from Nordex Energy Gmbh*, 9th Europ. Conf. on Power Electronics and Applic. EPE'2001, Graz, 2001.
8. Takahashi I., Noguchi T.: *A new quick-response and high efficiency strategy of an induction motor,* IEEE Trans. Ind. Appl. IA-22, 1986, pp.820-827.

Pracę wykonano w ramach projektu finansowanego przez KBN nr 3 T10A 050 26.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Krzemiński

Wpłynęło do Redakcji: 4 maja 2004 r.