

Piotr DROZDOWSKI<sup>1)</sup>, Zbigniew SZULAR<sup>2)</sup>

## STEROWANIE NAPIĘCIA WYJŚCIOWEGO GENERATORA SYNCHRONICZNEGO WZBUDZANEGO MAGNESAMI TRWAŁYMI ZA POMOCĄ UKŁADU PRZEKSZTAŁNIKOWEGO

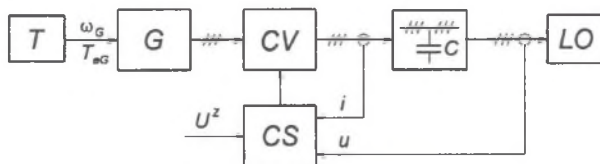
**Streszczenie.** Generatory synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi znajdują ostatnio zastosowanie m. in. w siłowniach wiatrowych i zespołach prądowców z uwagi na dobry stosunek mocy do masy maszyny. Ujemną stroną takiego zastosowania jest zmienność napięcia i częstotliwości w zależności od prędkości turbiny. Powstaje zatem konieczność regulacji napięcia wyjściowego za pomocą układów przekształtnikowych oraz nadania mu przebiegu sinusoidalnego o znormalizowanych parametrach. Przedmiotem artykułu jest zbadanie możliwości automatycznej regulacji i kształtowania napięcia wyjściowego opartego na zasadzie ładowania pojemności za pomocą regulowanego źródła prądu. Strukturę analizowanego układu przedstawiono na rys. 1.

## OUTPUT VOLTAGE CONTROL OF PM SYNCHRONOUS GENERATOR WITH A POWER ELECTRONIC CONVERTER

**Summary.** PM synchronous generators have found an application among others in wind power stations and generating sets because of good power/weight ratio. However, the variable voltage and frequency depending on the speed is a drawback of such an application. So, the output voltage must be controlled and shaped sinusoidally by a converter connected to the machine stator winding. The subject of this paper is an idea of the converter feedback control and the voltage shaping on terminals of capacitance battery charged by a controlled current source. The structure of the analysed system is shown in Fig. 1.

### 1. WSTĘP

Generatory synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi mogą być atrakcyjnym źródłem energii elektrycznej tam, gdzie istotne są małe gabaryty i ciężar maszyny przy stosunkowo dużej mocy.



Rys. 1. Koncepcja układu regulacji napięcia generatora synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi: T – napęd generatora, G – generator, CV – przekształtnik, C – bateria kondensatorów wyjściowych, CS – układ sterowania, LO – obciążenie,  $U^z$  – sygnał napięcia zadanego,  $u$ ,  $i$  – sygnały sprzężenia zwrotnego (napięciowego i prądowego),  $\omega_G$  – zmienna prędkość generatora,  $T_{eG}$  – moment elektromagnetyczny napędzania generatora

Fig. 1. The idea of the voltage control system designed for a PM synchronous generator: T – generator drive, G – PM generator, CV – converter, C – battery of output capacitors, CS – control system, LO – loading,  $U^z$  – voltage reference signal,  $u$ ,  $i$  – feedback signals (voltage and current),  $\omega_G$  – variable angular speed of the generator,  $T_{eG}$  – electromagnetic torque driving the generator

<sup>1)</sup> Dr inż., Politechnika Krakowska, Inst. Elektrotech. Przemian Energii, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel: 628-26-26, fax: 633-49-15, e-mail: pdrozdow@usk.pk.edu.pl

<sup>2)</sup> Mgr inż., Politechnika Krakowska, Inst. Elektrotech. Przemian Energii, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel: 628-26-99, fax: 633-49-15, e-mail: szular@polbox.com

Przykładem mogą być silownie wiatrowe lub zespoły prądotwórcze. Wadą tego typu generatorów jest brak możliwości regulacji napięcia za pomocą wzbudzenia. Napięcie i częstotliwość generatora mogą się zmieniać na skutek zmian prędkości układu napędowego oraz zmian obciążenia.

Rozwiązaniem w takim przypadku może być zastosowanie układu przekształtnikowego włączonego na zaciski wyjściowe generatora, a służącego do sinusoidalnego kształtowania i regulacji napięcia o znormalizowanych parametrach. Tego typu strukturę przedstawiono na rys. 1, przy czym osobnym zagadnieniem jest łączenie takich układów w system energetyczny lub z krajową siecią energetyczną.

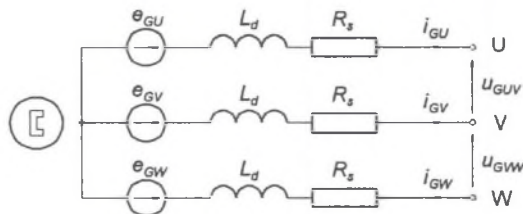
Koncepcja sinusoidalnego kształtowania napięcia oparta jest na odpowiednim ładowaniu kondensatorów za pomocą sterowanego źródła prądu w układzie ze sprzężeniem zwrotnym [5]. Takim źródłem mogą być, w rozważanym układzie trójfazowym, układ przekształtnikowy CV złożony z prostownika i tranzystorowego falownika napięcia wymuszającego prądy wyjściowe, tranzystorowy falownik prądu ładujący baterię kondensatorów lub przekształtnik macierzowy, tworzący wraz z generatorem synchronicznym sterowane źródło prądowe ładujące kondensatory.

W pracy porównano pracę dwóch układów regulacji napięcia: z falownikiem napięcia oraz z falownikiem prądu. Przykład zastosowania pierwszego z nich, lecz do zasilania trójfazowego silnika indukcyjnego, przedstawiono w [4] i [5]. W niniejszej pracy zmodyfikowano układ sterowania w celu przystosowania układu do stabilizacji napięcia. Zastosowaniem przekształtników macierzowych na razie nie zajmowano się, chociaż z doświadczeń zawartych między innymi w [1], [2] wynika, że można wykorzystać metody sterowania stosowane zwykle wobec falownika napięcia.

## 2. MODELOWANIE CYFROWE

Analizę układów przeprowadzono metodą symulacji komputerowej bazującej na programie SPICE, gdyż można było wykorzystać modele biblioteczne podzespołów energoelektronicznych, a generator synchroniczny przedstawić w postaci schematu zastępczego włączonego w topologię układu. Układ sterowania zamodelowano za pomocą wyrażeń funkcyjnych operujących na źródłach sterowanych dostępnych w programie.

Model generatora synchronicznego bez klatki, wzbudzanego magnesami trwałymi montowanymi powierzchniowo, wynika z układu równań różniczkowych maszyny po transformacji Parka. Przy założeniu, że indukcyjności stojana w osi podłużnej i poprzecznej, dla takiej maszyny, są niemal równe ( $L_d \approx L_q$ ), schemat zastępczy przyjmuje postać przedstawioną na rys. 2.



Rys. 2. Schemat zastępczy generatora synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi  
Fig. 2. Equivalent circuit of PM synchronous generator

Napięcia rotacji określone są wyrażeniami:

$$e_{GU} = -p\omega_G \Psi \sin p\vartheta \quad ; \quad e_{GV} = -p\omega_G \Psi \sin(p\vartheta - \frac{2\pi}{3}) \quad ; \quad e_{GW} = -p\omega_G \Psi \sin(p\vartheta + \frac{2\pi}{3}) \quad , \quad (1)$$

gdzie wartość strumienia  $\Psi$  można wyznaczyć na podstawie pomiaru napięcia na biegu jałowym prądnicy, natomiast  $p$  jest jej liczbą par biegunów,  $\omega_G$  prędkością napędzania, a  $\vartheta$  kątem obrotu wirnika.

Moment elektromagnetyczny, który jest obciążeniem dla napędu prądnicy, zależy od jej obciążenia i wyraża się wzorem:

$$T_{eG} = p\sqrt{\frac{3}{2}}\Psi \left[ \frac{1}{\sqrt{2}}(i_{GV} - i_{GW})\cos p\vartheta - \sqrt{\frac{2}{3}}(i_{GU} - \frac{1}{2}i_{GV} - \frac{1}{2}i_{GW})\sin p\vartheta \right] \quad . \quad (2)$$

Przy momencie  $T_T$  napędzania prądnicy i wypadkowym momencie bezwładności  $J$  układu wirującego równania ruchu opisane są zależnościami:

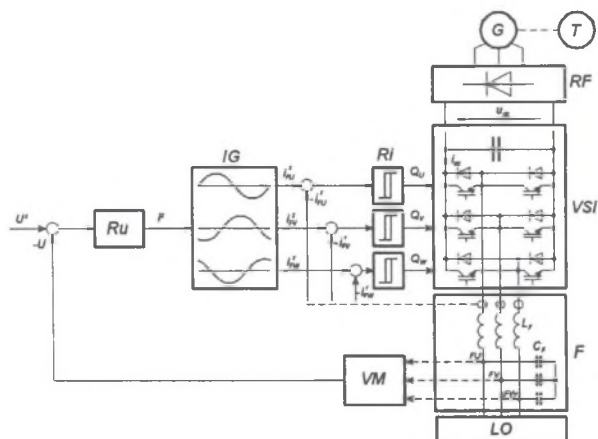
$$J \frac{d\omega_G}{dt} = T_T - T_{eG} ; \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_G . \quad (3)$$

W przypadku napędzania prądnicy za pomocą turbiny wiatrowej można zastosować wzór uproszczony na moment napędzający:  $T_T = Ad^2v^2 - B\omega_G^2$ , gdzie  $A$  i  $B$  są współczynnikami konstrukcyjnymi,  $d$  - średnicą koła zataczanego przez śmigło, a  $v$  - prędkością wiatru, która jest wymuszeniem w układzie.

### 3. ANALIZA UKŁADU Z FALOWNIKIEM NAPIĘCIA

Strukturę układu sterowania napięcia wyjściowego generatora za pomocą falownika napięcia przedstawiono na rys. 3. Generator  $G$  jest napędzany poprzez turbinę lub silnik  $T$ . Napięcia wyjściowe, po prostowaniu w prostowniku diodowym  $RF$ , zasilają falownik napięcia  $VSI$ , który jest sterowany za pomocą histerezowych regulatorów prądu  $Ri$  tak, aby utrzymywać sinusoidalne prądy w dławikach  $L_F$  filtra  $F$ . Prądy są kształtowane w generatorze sygnałowym  $IG$  przy zadawanej przez regulator napięcia  $Ru$  amplitudzie  $I^z$ . Częstotliwość sygnałów  $i_{FU}^z$ ,  $i_{FV}^z$ ,  $i_{FW}^z$  jest ustawiana wewnątrz  $IG$  na wartość znormalizowaną. Sygnałem zadawanym jest  $U^z$  proporcjonalny do wartości skutecznej napięć wyjściowych, natomiast porównywany z nim jest sygnał  $U$  mierzony w  $VM$  wartości skutecznej napięcia na odbiorniku  $LO$ .

Sinusoidalne prądy dławików filtra ładują kondensatory baterii wyjściowej powodując, że napięcia na zaciskach baterii są również sinusoidalne, lecz zaburzone odbiornikiem  $LO$  w zależności od jego typu. Zaburzenie to może się zmieniać przy zmianach obciążenia, prędkości napędzania generatora oraz wartości zadawanego napięcia. Przy projektowaniu konkretnego urządzenia należy uwzględnić wszystkie te czynniki w celu doboru parametrów układu, zakresu obciążenia oraz odchyłek od stanu znormalizowanego. W niniejszej pracy przeprowadzono jedynie analizę wstępną, pozwalającą zorientować się co do możliwości wykorzystania przedstawionej propozycji.



Rys. 3. Układ kształtowania i regulacji napięcia wyjściowego generatora synchronicznego za pomocą falownika napięcia

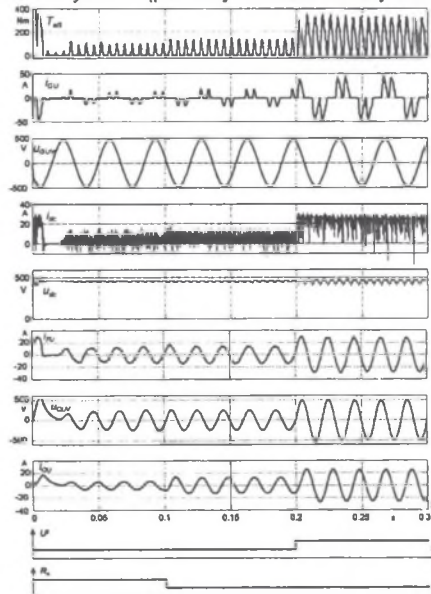
Fig. 3. The system with a VS inverter for the generator output voltages control and shaping:  $T$  – driving engine,  $G$  – PM synchronous generator,  $RF$  – diode rectifier,  $VSI$  – voltage source inverter,  $F$  – LC filter,  $LO$  – loading,  $Ru$  – voltage controller,  $IG$  – signal generator of 3-phase sinusoidal currents of inductors  $L_F$ ,  $Ri$  – current controllers of hysteresis type,  $VM$  – measurement system of r.m.s. output voltage  $U$ ,  $U^z$  – reference signal of r.m.s. output voltage value,  $I^z$  – command amplitude of controlled currents

Wybrano generator synchroniczny o następujących parametrach:  $R_s = 0,02 \Omega$ ,  $L_d = 3 \text{ mH}$ ,  $\Psi = 1,5 \text{ Wb}$ ,  $p = 3$ . Odbiornikiem LO był układ trzech dwójników  $R_o$ ,  $L_o$  połączonych w gwiazdę, przy indukcyjności  $L_o = 15 \text{ mH}$  i rezystancji przyjmującej dwie wartości  $R_o = 10$  i  $20 \Omega$ . Założono stałą prędkość napędzania generatora  $\omega_G = 60 \text{ rad/s}$  oraz stałą, zadaną częstotliwość napięcia wyjściowego falownika  $f_s = 50 \text{ Hz}$ . Sygnał napięcia zadanego  $U^z$  przyjmował dwie wartości odpowiadające dwóm wartościom skutecznym napięcia międzyfazowego 110 i 220 V. Histerezę regulacji prądów wyjściowych ustawiono na  $I_H = 1 \text{ A}$ .

Na rys. 4 przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych pracy układu przy zmieniającym się skokowo sygnale napięcia zadanego i zmieniającym się skokowo obciążeniu (rezystancji  $R_o$ ). Pokazano wybrane przebiegi dotyczące generatora, obwodu pośredniczącego prądu stałego, filtru i obwodu wyjściowego:

- momentu elektromagnetycznego generatora  $T_{eG}$ ,
- prądu fazowego  $i_{GU}$  i napięcia międzyfazowego  $u_{GUUV}$ ,
- prądu i napięcia zasilania falownika  $i_{dc}$ ,  $u_{dc}$ ,
- fazowego prądu wyjściowego falownika  $i_{FU}$ ,
- napięcia międzyfazowego  $u_{OUV}$  na odbiorniku i prądu fazowego odbiornika  $i_{OU}$ .

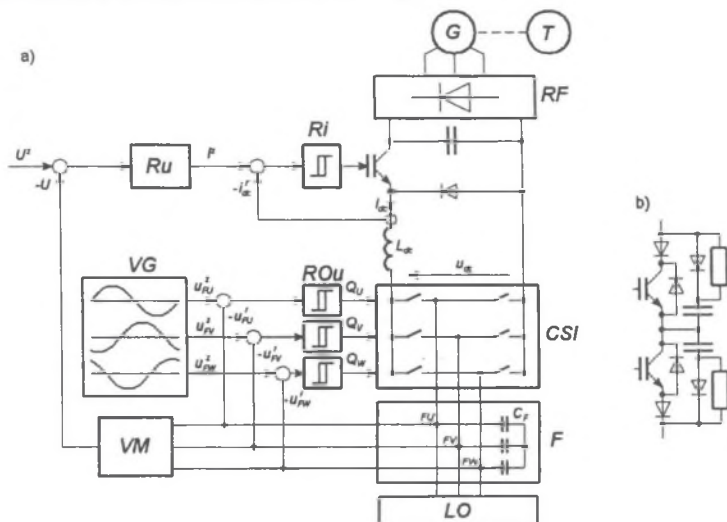
Przebiegi czasowe zmian sygnału napięcia zadanego  $U^z$  oraz rezystancji fazowych  $R_o$  odbiornika również pokazano na rysunku (poziomy wartości zostały wcześniej wymienione).



Rys. 4. Przykładowe przebiegi ilustrujące pracę układu z rys.3 przy skokowo zmieniającym się sygnale sterującym  $U^z$  i skokowo zmieniającej się rezystancji trójfazowego odbiornika gwiazdowego  $3 \times R_o$ ,  $L_o$

Fig. 4. Examples of waveforms illustrating operation of the system from Fig. 3 for the control signal  $U^z$  and the loading resistance  $R_o$  both in step changed (the star connected loading  $3 \times R_o$ ,  $L_o$ ):  $T_{eG}$  – electromagnetic torque of the generator,  $i_{GU}$ ,  $u_{GUUV}$  – phase current and the line-line voltage of the generator,  $i_{dc}$ ,  $u_{dc}$  – DC link current and voltage,  $i_{FU}$  – one phase current forced by the inverter in the output,  $u_{OUV}$ ,  $i_{OU}$  – line-line voltage and current of the loading

Przeprowadzone badania symulacyjne pokazują, że układ działa poprawnie pod względem jakości regulacji napięcia i jego stabilizacji przy skokowych zmianach obciążenia i zmianach prędkości generatora. W obliczeniach nie uwzględniono jednak dynamicznych zmian prędkości turbiny napędzającej generator na skutek zmian obciążenia.



Rys. 5. Układ kształtowania i regulacji napięcia wyjściowego generatora synchronicznego za pomocą falownika prądu (a) i przykładowy układ jednego półmostka (b)

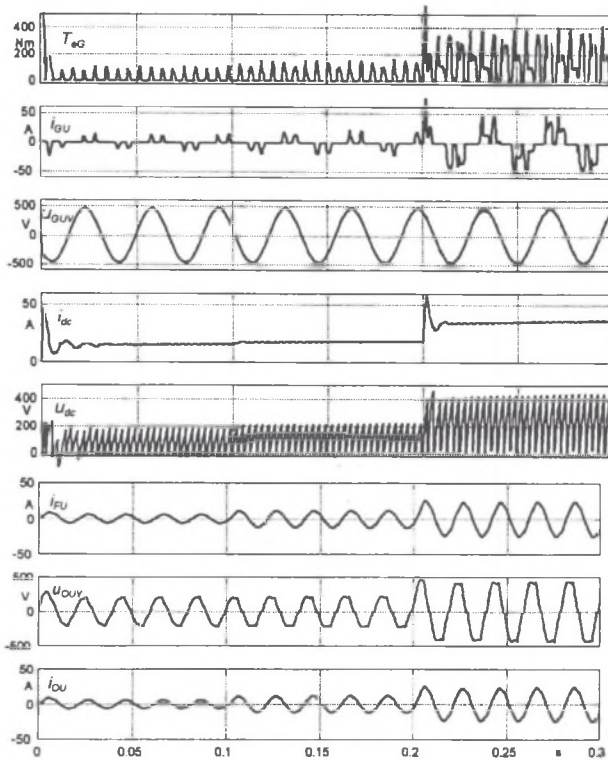
Fig. 5. The system with a CS inverter for the generator output voltages control and shaping (a) and one half-bridge (b): T – driving engine, G – PM synchronous generator, RF – diode rectifier, CSI – current source inverter, F – output capacitors, LO – loading, Ru – voltage controller, VG – signal generator of 3-phase sinusoidal voltages of capacitors  $C_F$ , Ri – current controllers of hysteresis type, ROu – hysteresis controllers of output voltages, VM – measurement system of r.m.s. output voltage U,  $U^*$  – reference signal of r.m.s. output voltage value,  $I^*$  – command amplitude of controlled current in the DC link

#### 4. ANALIZA UKŁADU Z FALOWNIKIEM PRĄDU

Układ regulacji napięcia wyjściowego za pomocą tranzystorowego falownika prądu pokazano na rys. 5. Regulowanym źródłem prądu zasilającym falownik CSI jest generator G napędzany turbiną T, prostownik RF i przerywacz prądu stałego wymuszający histerezowo prąd  $i_{dc}$  zadany sygnałem  $I^*$  przez regulator napięcia Ru. Przebiegi napięć wyjściowych są zadawane przez generator sygnałowy VG, a po porównaniu z przebiegami mierzonymi na pojemnościach wyjściowych  $C_F$  tworzą sygnały uchybów regulatorów histerezowych ROu, które wytwarzają sygnały sterujące zaworami falownika  $Q_U, Q_V, Q_W$ .

W układzie zastosowano generator synchroniczny o takich samych parametrach jak poprzednio i zadano taką samą funkcję sygnału sterującego  $U^*$ . Układ obciążono tak samo odbiornikiem trójfazowym złożonym z dwójników  $R_o = 10, 20 \Omega$ ,  $L_o = 15 \text{ mH}$  połączonych w gwiazdę. Histerezę regulacji prądu  $i_{dc}$  zasilania falownika ustalono na  $I_H = 1 \text{ A}$ , a histerezę regulacji napięć fazowych na  $U_H = 5 \text{ V}$  przy  $C_F = 400 \mu\text{F}$ . Na rys. 6 pokazano wyniki symulacji pracy układu.





Rys. 6. Przykładowe przebiegi ilustrujące pracę układu z rys. 5 przy sygnale sterującym  $U^z$  i rezystancji  $R_o$  odbiornika gwiazdowego  $3 \times R_o$ ,  $L_o$ , zmieniającymi się tak samo jak na rys. 4

Fig. 6. Examples of waveforms illustrating operation of the system from Fig. 5 for the reference signal  $U^z$  and the star connected loading  $3 \times R_o$ ,  $L_o$  changing in the same way as in Fig. 4

Jak widać z przedstawionych przebiegów jakość kształtowania sinusoidalnego przebiegu napięcia jest w tym przypadku gorsza, chociaż napięcie osiąga te same wartości jak poprzednio. Zostało to spowodowane tym, że zastosowano w układzie regulację prądu obwodu pośredniczącego na wartość zadaną przez regulator napięcia  $RU$  (napięcie jest regulowane w układzie przez dwa regulatory). Gdyby zrezygnować z tego regulatora i zadawać prąd  $i_{dc}$  o wartości stałej, wystarczająco dużej, to przy odpowiednim doborze pojemności  $C_F$  można kształtować napięcie sinusoidalnie z dokładnością do przyjętej histerezy regulacji. W takim przypadku sprawność przetwarzania energii będzie jednak bardzo niska (ok. 50%), gdyż znaczna część energii wytwarzanej przez generator nie będzie wykorzystana służąc jedynie do przeładowywania kondensatorów baterii wyjściowej. Z tego względu lepszy wydaje się zaproponowany układ z dwoma regulatorami napięcia.

Bliższa analiza układu pozwala określić kryteria wstępnego doboru pojemności  $C_F$ . Dla histerezowego kształtowania napięć sinusoidalnego na pojemności (praca ze stałym prądem  $I_{dc}$  obwodu pośredniczącego) powinna zawierać się w granicach:

$$C_{F\min} < C_F < C_{F\max} \quad (4)$$

$$\text{gdzie: } C_{F\min} = \frac{I_{dc}}{8 U_H f_{\max}}, \quad C_{F\max} = \frac{I_{dc}}{2\pi\sqrt{2} U_z f_z}.$$

Wartość minimalna wynika z analizy pracy układu przy wypełnieniu impulsów prądowych ładujących pojemność  $\lambda = 0,5$ , gdzie:  $I_{dc}$  – ustalona wartość prądu obwodu pośredniczącego,  $U_H$  – histereza regulacji napięcia  $f_{max}$  – maksymalna częstotliwości przełączania zaworów falownika. Wartość maksymalna wynika z warunku pochodnej napięcia na kondensatorze podczas ładowania prądem  $I_{dc}$ , która musi być większa od pochodnej sinusoidalnego napięcia zadanego, aby zachodziły oscylacje napięcia wokół przebiegu zadanego z założoną histerezą, gdzie:  $U_z$  – wartość skuteczna sinusoidalnego, zadanego napięcia fazowego o częstotliwości  $f_z$ . Dla zaproponowanego układu z rys. 5 najlepiej jest dobrać wstępnie  $C_F = C_{Fmax}$ .

## 5. WNIOSKI

Oba zaproponowane układy regulacji napięcia wyjściowego generatora synchronicznego spełniają swoją funkcję poprawnie. Układy te są niejako wzajemnie dualne. Sprawność przetwarzania energii jest w obu układach wysoka i dochodzi do 90%. Jakość kształtowania napięcia za pomocą układu z falownikiem prądu (rys. 5) jest jednak niższa niż w układzie z falownikiem napięcia (rys. 3), a dodatkowo zastosowane kondensatory filtra  $F$  powinny mieć większą pojemność. Z drugiej strony w układzie potrzebny jest tylko jeden dławik w obwodzie pośredniczącym prądu stałego zamiast trzech dławików filtra. Jego indukcyjność zależy od histerezy regulowanego prądu, podobnie jak dławików  $L_F$  układu z rys. 3. Alternatywą dla obu układów może być przekształtnik macierzowy  $3 \times 3$ .

## LITERATURA

1. Drozdowski P.: Field oriented control of the Induction Motor Fed by a 3H3 Matrix Converter. CD-ROM Proc. of 8th European Conf. on Power Electronics and Applications EPE'99, Lausanne (Switzerland) 1999.
2. Drozdowski P.: Matrix converters as systems of controlled voltage sources. XVI Symp. "Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits" EPNC'2000, Kraków (Poland) 2000, pp. 155-158.
3. Koczara W., Seliga R.: Przekształtnik wytwarzający napięcie sinusoidalne dla układu regulacji prędkości indukcyjnego silnika klatkowego. Mat. XXXV Symp. Masz. El. SME'99. Polit. War. Prace naukowe „Elektryka” z. 111. Ofic. Wyd. Polit. War. 1999, ss. 297-302.
4. Koczara W., Seliga R., Matraszek J.: Sine-Wave Voltage Inverter for Variable Speed Cage Induction Motor Drive System. CD-ROM Proc. 8th European Conf. on Power Electronics and Applications EPE'99. Lausanne (Switzerland) 1999.
5. Abdel-Rahim Naser M., Quinace John E. : Analysis and Design of a Multiple Feedback Loop Control Strategy for Single Phase Voltage-Source UPS Inverters. IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 11, No. 4, July 1996.

Recenzent: Dr hab. inż. Aleksander Żywiec  
Profesor Politechniki Śląskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 2001 r.

## Abstract

The PM synchronous generators have found an application among others in wind power stations and generating sets because of good power/weight ratio. However, the variable voltage and frequency depending on the speed is a drawback of such an application. So, the output voltage must be controlled and shaped sinusoidally by a converter connected to the machine stator winding.

The subject of this paper is a concept of the converter feedback control and the voltage shaping on terminals of capacitance battery charged by a controlled current source. The general structure of the analysed system is shown in Fig. 1.

For the system analysis the simplified model of the synchronous generator was assumed with the equivalent circuit shown in Fig. 2. This model is correct under assumption of almost equal synchronous inductances  $L_d \approx L_q$  and sinusoidal distribution of winding turns.

As the current sources two systems can be used: the voltage inverter and the current inverter. The structure with the first one is shown in Fig 3 whereas with the second in Fig. 5. Both of them were loaded with a star connected receiver  $R_o, L_o$ , the generator speed was constant  $\omega_G = 60$  rad/s and on the output were forced 50Hz sinusoidal voltages. Results of simulation (using SPICE) for the variable loading  $R_o$  and the variable reference voltage signal  $U^z$  are shown in Figs. 4 and 6 respectively.

In both the cases the quality of control is satisfactory, though slightly worse using the current inverter. Both the systems have relatively high efficiency of conversion attaining 90%. So, they can be applied in practice. As the alternative the matrix converter 3x3 can be used and controlled in the similar way as the voltage inverter.