

**Andrzej Kasprówic**

Akademia Morska w Gdyni

## **STEROWANIE SAMOWZBUDNYM GENERATOREM INDUKCYJNYM DLA ZASTOSOWAŃ W AUTONOMICZNYCH SYSTEMACH ZASILAJĄCYCH**

*W artykule przedstawiono oryginalne rozwiązanie oraz wyniki jego badań symulacyjnych przy sterowaniu samowzbudnym generatorem indukcyjnym na potrzeby autonomicznej elektrowni wiatrowej. Rozwiązanie to umożliwia niezależną regulację składowej biernej oraz czynnej prądu stojana generatora. Tym samym umożliwia ono stabilizację napięcia wyjściowego samowzbudnego generatora na zadanej wartości przy zmianach obciążenia i prędkości kątowej wału. Zakres dopuszczalnych zmian prędkości wału jest jednak ograniczony wzrastającą wartością wymaganą składowej biernej prądu stojana dla utrzymania stałej wartości napięcia wyjściowego.*

### **1. WSTĘP**

Tranzystorowy przekształtnik sieciowy jest urządzeniem umożliwiającym dwukierunkowy przepływ energii. Za pomocą sterowania można wpływać na jego charakter jako odbiornika dla układu zasilającego. Dzięki tym właściwościom może on w układzie energetycznym pełnić rolę zarówno odbiornika energii, jak i jej źródła. W wyniku sterowania charakter tego specyficznego odbiornika może być płynnie zmieniany w zakresie od indukcyjnego przez rezystancyjny aż do pojemnościowego. Ostatnia właściwość okazuje się szczególnie przydatna w procesie dowzbudzenia i stabilizacji napięcia wyjściowego samowzbudnego generatora indukcyjnego. Taki sposób dowzbudzenia i regulacji napięcia generatora indukcyjnego jest obecnie coraz częściej stosowany. Algorytmy sterowania, zapewniające stabilizację napięcia wyjściowego, są realizowane w układach z procesorami sygnałowymi. Duża moc obliczeniowa takich układów zapewnia możliwość wykonywania złożonych algorytmów sterowania w czasie rzeczywistym. Procesor sygnałowy oblicza algorytmy transformacji, regulatorów PI, pętli śledzenia fazy PLL, algorytmy obliczania wartości chwilowych mocy czynnej i biernej, algorytmy filtracji sygnałów oraz modulatora wektorowego. Algorytmy sterowania tranzystorowym przekształtnikiem sieciowym mogą być realizowane zarówno z bezpośrednią, jak i pośrednią orientacją wektora strumienia wirnika lub stojana. Powszechnie stosuje się sterowanie prądowe lub wykorzystuje się napięcie stojana jako zmienną sterowaną [2, 3, 4, 5, 6].

## 2. PRZEKSZTAŁNIK SIECIOWY JAKO UKŁAD DOWZBUDZANIA SEIG

W artykule zaproponowano wykorzystanie w algorytmie sterowania przekształtnikiem mocy chwilowych odpowiednio czynnej  $p$  i biernej  $q$  zdefiniowanych przez Akagiego [1]:

$$\begin{aligned} \vec{s} &= \vec{u}_s \vec{i}_s^*, \quad p = \operatorname{Re}(\vec{u}_s \vec{i}_s^*), \quad q = \operatorname{Im}(\vec{u}_s \vec{i}_s^*), \\ p &= u_{s\alpha} i_{s\alpha} + u_{s\beta} i_{s\beta}, \quad q = u_{s\beta} i_{s\alpha} - u_{s\alpha} i_{s\beta}. \end{aligned} \quad (1)$$

W realizowanym algorytmie zadane wartości mocy chwilowych odpowiednio czynnej  $p^*$  oraz biernej  $q^*$  są sygnałami wyjściowymi regulatorów napięcia odpowiednio stałego  $u_{DC}$  oraz przemiennego  $|u_{AC}|$ :

$$\begin{aligned} p^* &= K_{pDC} \left( 1 - \frac{1}{sT_{iDC}} \right) (u_{DC}^* - u_{DC}), \\ q^* &= K_{pAC} \left( 1 - \frac{1}{sT_{iAC}} \right) (|u_{AC}|^* - |u_{AC}|). \end{aligned} \quad (2)$$

Na potrzeby sterowania samowzbudnym generatorem indukcyjnym w zależnościach podanych przez Akagiego wprowadzono podstawienia:

$$\begin{aligned} p &= p^* & q &= q^* \\ u_{s\alpha} &= u_{s\alpha PII}^* [k+2] & u_{s\beta} &= u_{s\beta PII}^* [k+2] \\ i_{s\alpha} &= i_{s\alpha}^* [k+2] & i_{s\beta} &= i_{s\beta}^* [k+2] \end{aligned} \quad (3)$$

W związku z powyższym zadaną moc czynną i bierną, wyrażoną za pomocą napięcia i prądu dla chwili  $[k+2]$  sterowania, można opisać zależnością:

$$\begin{aligned} p^* &= u_{s\alpha PII}^* [k+2] * i_{s\alpha}^* [k+2] + u_{s\beta PII}^* [k+2] * i_{s\beta}^* [k+2], \\ q^* &= u_{s\beta PII}^* [k+2] * i_{s\alpha}^* [k+2] - u_{s\alpha PII}^* [k+2] * i_{s\beta}^* [k+2]. \end{aligned} \quad (4)$$

Na podstawie zadanych wartości chwilowych mocy są wyznaczone wartości zadane składowych prądu przekształtnika  $i_{s\alpha}^*$  oraz  $i_{s\beta}^*$ :

$$\begin{aligned} i_{s\alpha}^* [k+2] &= K * (u_{s\alpha PII} [k+2] * p^* + u_{s\beta PII} [k+2] * q^*), \\ i_{s\beta}^* [k+2] &= K * (u_{s\beta PII} [k+2] * p^* - u_{s\alpha PII} [k+2] * q^*), \end{aligned} \quad (5)$$

przy czym:

$$K = \frac{1}{u_{s\alpha PII}^2 [k+2] + u_{s\beta PII}^2 [k+2]}$$

Są to wartości składowych prądu, które mają być uzyskane w chwili  $[k + 2]$  przy wyznaczonym sterowaniu przekształtnika dla chwili  $[k + 1]$ .

Algorytm sterowania wykonywany jest w trybie dyskretnym. Pociąga to za sobą konieczność uwzględnienia opóźnienia sterowania. Dlatego też w algorytmie zastosowano dwukrotną predykcję, polegającą na obrocie składowych wektora napięcia o określony kąt. Kąt pojedynczego obrotu wektora jest wyznaczany za pomocą algorytmu pętli śledzenia fazy (ang. PLL) jako różnica kątów położenia tego wektora pomiędzy kolejnymi chwilami czasowymi sterowania. Przyjęto założenie, że pomiędzy kolejnymi chwilami sterowań prędkość wirowania wektora napięcia nie ulega zmianie. Wyznaczone składowe napięcia dla chwil  $[k + 1]$  i  $[k + 2]$  przedstawiają zależności:

$$\begin{aligned} u_{s\alpha PLL}[k+1] &= u_{s\alpha PLL}[k] * \cos(d\gamma_{PLL}) - u_{s\beta PLL}[k] * \sin(d\gamma_{PLL}) , \\ u_{s\beta PLL}[k+1] &= u_{s\alpha PLL}[k] * \sin(d\gamma_{PLL}) + u_{s\beta PLL}[k] * \cos(d\gamma_{PLL}) , \end{aligned} \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} u_{s\alpha PLL}[k+2] &= u_{s\alpha PLL}[k+1] * \cos(d\gamma_{PLL}) - u_{s\beta PLL}[k+1] * \sin(d\gamma_{PLL}) , \\ u_{s\beta PLL}[k+2] &= u_{s\alpha PLL}[k+1] * \sin(d\gamma_{PLL}) + u_{s\beta PLL}[k+1] * \cos(d\gamma_{PLL}) . \end{aligned} \quad (6b)$$

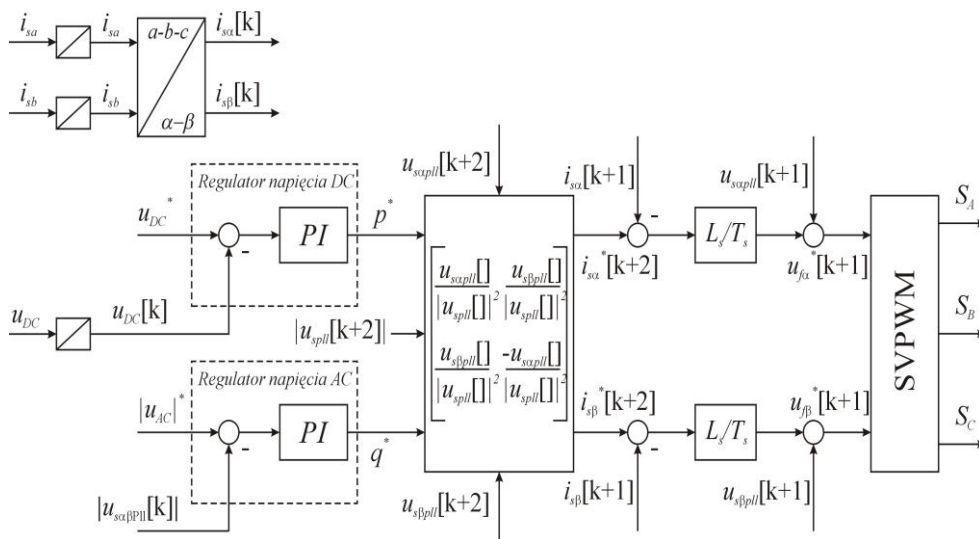
W algorytmie sterowania dokonywana jest również predykcja prądu na chwilę  $[k + 1]$ . Wykorzystuje się do tego celu znajomość prądu oraz napięć odpowiednio generatora i falownika w chwili  $k$  z pomiarów oraz parametrów obwodu głównego zasilania:

$$\begin{aligned} i_{s\alpha}[k+1] &= i_{s\alpha}[k] + \frac{T_s}{L_s} (u_{f\alpha}^*[k] - u_{s\alpha PLL}[k]) , \\ i_{s\beta}[k+1] &= i_{s\beta}[k] + \frac{T_s}{L_s} (u_{f\beta}^*[k] - u_{s\beta PLL}[k]) . \end{aligned} \quad (7)$$

Ostatecznie wyjściowe wartości zadane składowych napięcia przekształtnika  $u_{f\alpha}^*$  oraz  $u_{f\beta}^*$  wyznacza się na podstawie zależności:

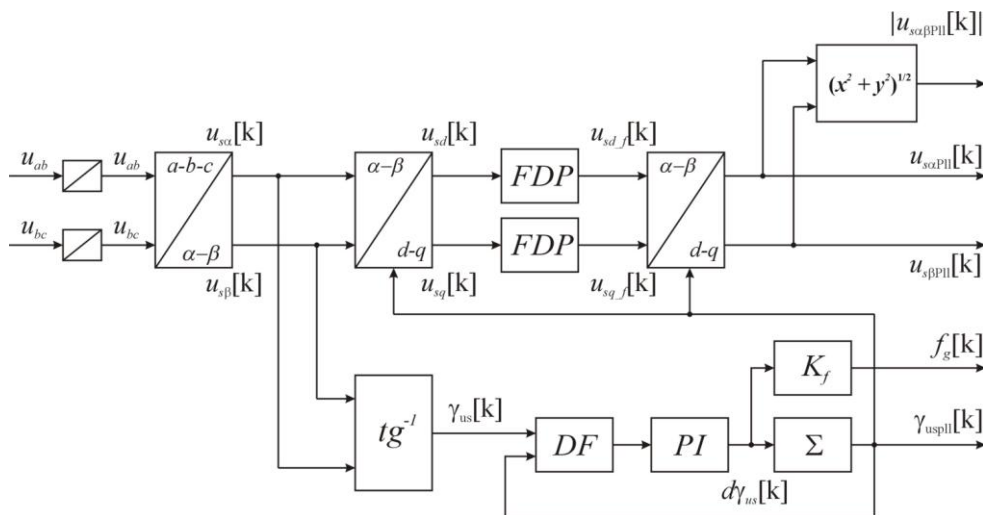
$$\begin{aligned} u_{f\alpha}^*[k+1] &= u_{s\alpha PLL}[k+1] + \frac{L_s}{T_s} (i_{s\alpha}^*[k+2] - i_{s\alpha}[k+1]) , \\ u_{f\beta}^*[k+1] &= u_{s\beta PLL}[k+1] + \frac{L_s}{T_s} (i_{s\beta}^*[k+2] - i_{s\beta}[k+1]) . \end{aligned} \quad (8)$$

Schemat blokowy algorytmu sterowania tranzystorowym przekształtnikiem przedstawiono na rysunku 1.



**Rys. 1.** Schemat blokowy algorytmu sterowania przekształtnikiem współpracującym z SEIG

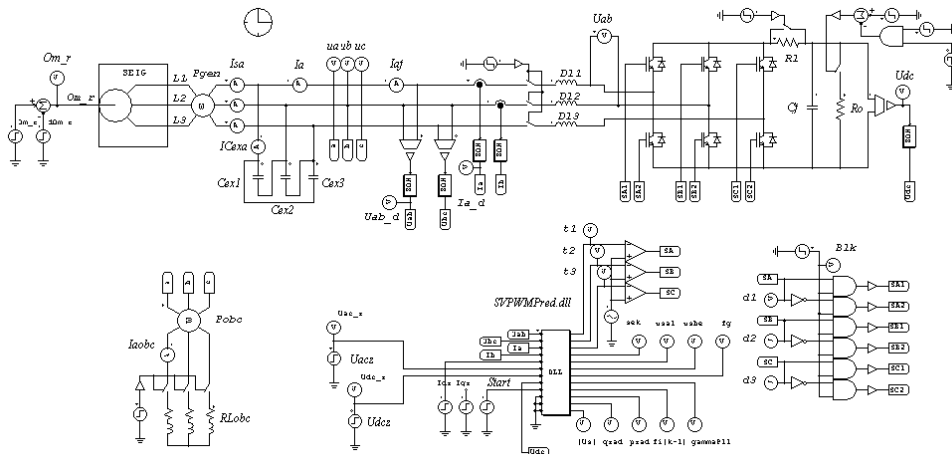
W realizacji algorytmu sterowania bardzo ważną rolę odgrywa pętla śledzenia fazy (PLL). Służy ona do wyznaczania chwilowego kąta położenia wektora napięcia, transformacji składowych, filtracji oraz odtwarzania podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego generatora. Przyrost chwilowego kąta położenia wektora wykorzystywany jest do wykonania predykcji. Schemat blokowy algorytmu pętli śledzenia fazy przedstawiono na rysunku 2.



**Rys. 2.** Schemat blokowy algorytmu PLL wraz z filtracją podstawowej harmonicznej napięcia

### 3. BADANIA SYMULACYJNE MODELU SAMOWZBUDNEGO GENERATORA Z PRZEKSZTAŁNIKIEM

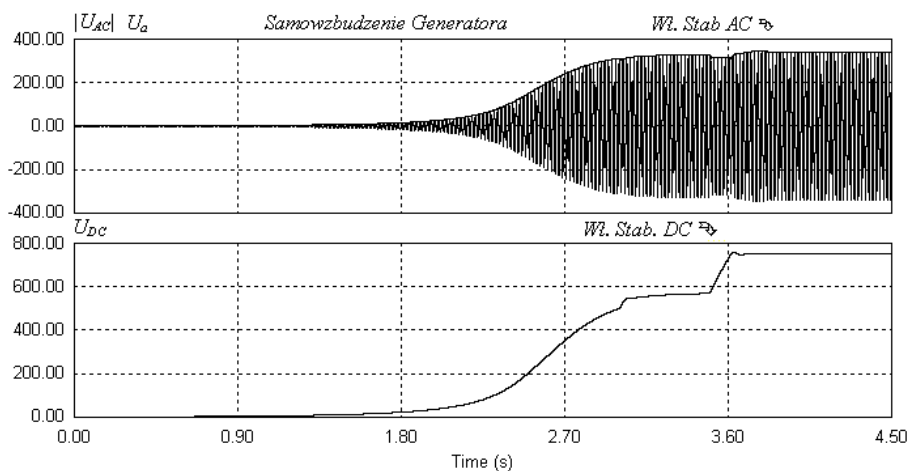
Na rysunku 3 przedstawiono model symulacyjny samowzbudnego generatora indukcyjnego sterowanego za pomocą przekształtnika sieciowego. Algorytm sterowania, zaproponowany przez autora, umieszczono w bloku oznaczonym *SVPWMPred.dll*. Jest on wykonany w postaci programu napisanego w języku C. Po zakończeniu badań symulacyjnych wersja ostateczna oprogramowania zostanie przeniesiona do systemu mikroprocesorowego budowanego modelu laboratoryjnego. Obliczenie algorytmu sterowania wymaga pomiaru pięciu wielkości: dwóch prądów fazowych  $i_{sa}$  i  $i_{sb}$ , dwóch napięć międzyfazowych  $u_{sab}$  i  $u_{sbc}$  oraz napięcia stałego  $U_{DC}$ .



**Rys. 3.** Model symulacyjny SEIG sterowanego za pomocą tranzystorowego przekształtnika

Ważnym zagadnieniem dla samowzbudzenia generatora indukcyjnego jest sekwencja rozruchu. W początkowej fazie wzbudzenie generatora odbywa się z magnetyzmu szczątkowego maszyny przy wykorzystaniu dodatkowych kondensatorów podłączonych do zacisków. Magnetyzm szczątkowy powoduje powstanie przy prędkości synchronicznej napięcia około  $U_{sz} = 7\text{ V}$  bez kondensatorów wzbudzających. Przyjęta do symulacji wartość pojemności kondensatorów  $C_{ex(abc)} = 15,9\text{ }\mu\text{F}$  gwarantuje wzbudzenie się generatora bez obciążenia powyżej prędkości synchronicznej. Wartość tej pojemności jest jednak za mała do pracy generatora z obciążeniem. W następnej fazie rozruchu następuje ładowanie kondensatora  $C_f$  w obwodzie prądu stałego. Aby nie doprowadzić do odwzbudzenia generatora, proces ten odbywa się z ograniczeniem prądu przy zablokowanym sterowaniu przekształtnika  $Blk = 0$ . W fazie końcowej sekwencji rozruchu następuje odblokowanie sterowania i regulacja napięcia stałego do wartości zadanej  $U_{DC}^*$ ,

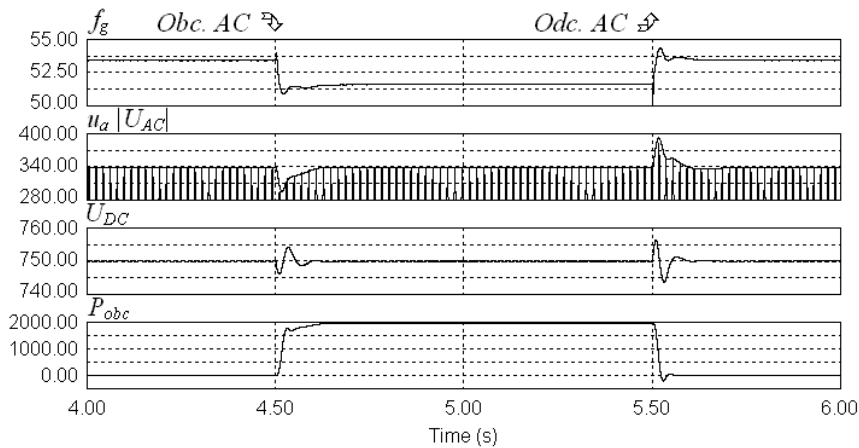
a następnie, z niewielkim opóźnieniem, regulacja napięcia przemiennego do wartości zadanej  $|U_{AC}|^*$ . Od tego momentu generator jest gotowy do pracy i może być bezpiecznie obciążany w granicach do jego mocy znamionowej. Nie grozi mu już odwzbudzenie i zanik napięcia. Na rysunku 4 przedstawiono oscylogram obrazujący sekwencję rozruchu zgodną z powyższym opisem.



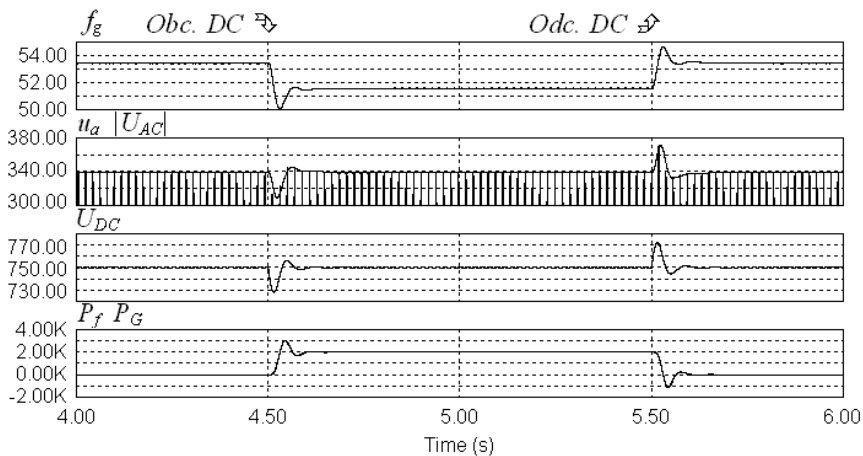
**Rys. 4.** Oscylogramy sekwencji rozruchu samowzbudnego generatora indukcyjnego

Badania symulacyjne zaproponowanego układu sterowania dotyczyły wpływu zmian obciążenia i prędkości kątowej wału na proces stabilizacji napięć wyjściowych odpowiednio stałego  $U_{DC}$  i zmiennego  $|U_{AC}|$ . Symulowano niezależne obciążenie w obu obwodach. Rejestrowano wpływ tych obciążeń na stałość napięć wyjściowych generatora. Na rysunku 5 zaprezentowano obraz próby obciążenia generatora w obwodzie prądu przemiennego. Do prób wykorzystano obciążenie typu  $RL$  o mocy  $P_{obc} = 2,0$  kW i  $\cos\phi = 0,8$ . Wzrost obciążenia spowodował spadek napięcia wyjściowego generatora o maksymalną wartość wynoszącą  $|\Delta U_{AC}| \approx 42,8$  V, który wystąpił w chwili  $\Delta t = 16$  ms od włączenia. W czasie około 200 ms układ regulacji doprowadził do odbudowy napięcia i stabilizacji na zadanej wartości. Na oscylogramach obserwowane jest jednak nieusuwalne zmniejszenie częstotliwości napięcia wyjściowego o wartości  $\Delta f_g = 1,8$  Hz. Spowodowane to jest wzrostem zapotrzebowania na moc i w konsekwencji wzrostem poślizgu maszyny przy stałej prędkości kątowej wału generatora.

Próbie obciążenia wykonano także dla obwodu napięcia stałego (rys. 6). W tym wypadku do obciążenia użyto rezystora o wartości  $R_{dc} = 281,25$   $\Omega$ . Włączenie go w obwód prądu stałego wywołało w obwodzie przepływ prądu odpowiadający obciążeniu  $P_{DC} = 2,0$  kW. Obciążenie to również wywołało początkowy spadek napięcia w obwodzie prądu przemiennego wynoszący  $|\Delta U_{AC}| \approx 34,2$  V oraz



**Rys. 5.** Oscylogram obciążania i odciążania generatora w obwodzie prądu przemiennego



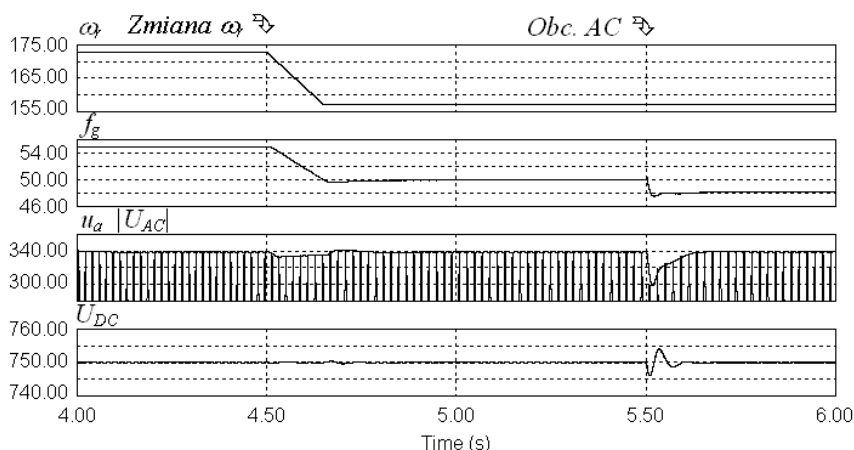
**Rys. 6.** Oscylogram obciążania i odciążania generatora w obwodzie prądu stałego

początkowy spadek napięcia w obwodzie prądu stałego  $\Delta U_{DC} \approx 22$  V. W czasie około 200 ms obwód regulacji doprowadził do odbudowy napięcia w obwodzie prądu przemiennego, a w 150 ms – do odbudowy napięcia w obwodzie prądu stałego oraz ich stabilizacji na zadanej znamionowej wartości. Tak jak uprzednio nieusuwalnemu zmniejszeniu uległa częstotliwość napięcia wyjściowego generatora o wartość  $\Delta f_g \approx 1,9$  Hz. Przy odciążeniu generatora częstotliwość napięcia wyjściowego powracała do poprzedniej wartości. Zmiana częstotliwości  $f_g$  napięcia wyjściowego generatora wywołana zmianami obciążenia obwodu napięcia stałego może zostać wykorzystany do stabilizacji częstotliwości napięcia przemiennego w przypadku zmian obciążenia w tym obwodzie. Zmiany obciążeń w obwodzie

prądu stałego i przemiennego idące w przeciwnych kierunkach mogą, w określonych warunkach, doprowadzić do utrzymania stałej częstotliwości napięcia wyjściowego generatora. W tym wypadku wymagane jest jednak, aby suma obciążeń w obwodzie prądu przemiennego i stałego, dla określonej prędkości kątowej wału generatora, była stała. Wzrost obciążenia w obwodzie prądu przemiennego pociąga za sobą konieczność zmniejszenia obciążenia w obwodzie prądu stałego. Realizacja tej koncepcji stabilizacji częstotliwości możliwa jest jedynie dla prędkości wału generatora powyżej jego prędkości synchronicznej z odpowiednim zapasem prędkości. W układzie musi występować wstępne obciążenie generatora, które pozwoli na stabilizację częstotliwości.

Przedstawione w artykule oscylogramy w chwili obecnej nie mają możliwości autonomicznej stabilizacji częstotliwości napięcia wyjściowego generatora. Ze względu na liczne ograniczenia trwają jeszcze w tym zakresie badania symulacyjne.

Kolejnym problemem w autonomicznej pracy samowzbudnego generatora indukcyjnego są zmiany prędkości wału wywołane zmianami prędkości wiatru. Oscylogramy przedstawione na rysunku 7 prezentują napięcia wyjściowe generatora przy zmianie prędkości wału o -10% prędkości znamionowej w czasie 150 ms. Na oscylogramach obserwowana jest znaczna zmiana częstotliwości napięcia wyjściowego generatora  $\Delta f_g = -5$  Hz. Pomimo tak znacznej zmiany prędkości wału napięcia wyjściowe generatora są utrzymywane na znamionowych wartościach w obu obwodach:  $U_{DC} = 750$  V i  $U_{AC} = 338,9$  V. Maksymalne zmniejszenie napięcia przemiennego, w stanie przejściowym, wynosi  $|\Delta U_{AC}| \approx 6$  V.

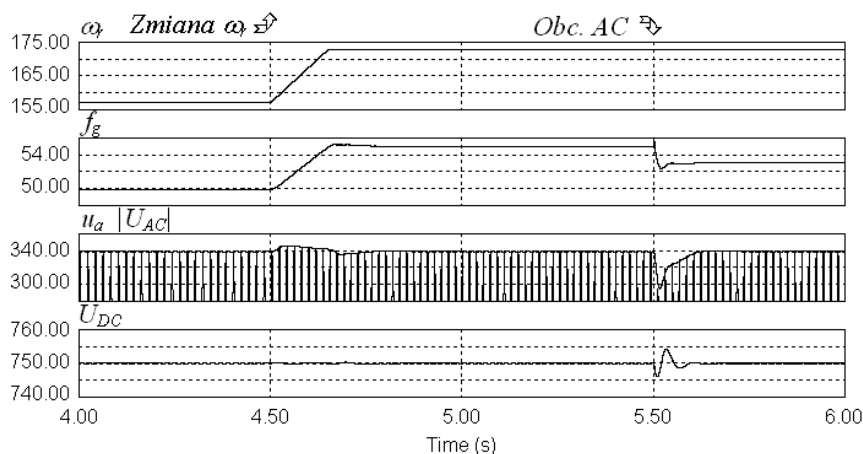


**Rys. 7.** Oscylogramy dla zmiany prędkości wału generatora o -10% w czasie 150 ms

Oscylogramy przedstawione na rysunku 8 prezentują natomiast napięcia wyjściowe przy zmianie prędkości wału generatora o +10% prędkości znamionowej w czasie 150 ms. Wywołuje to zmianę częstotliwości napięcia wyjściowego



generatora o  $\Delta f_g = +5$  Hz. Również i dla tego przypadku, po początkowym stanie przejściowym, napięcia wyjściowe są stabilizowane na wartościach znamionowych  $U_{DC} = 750$  V i  $U_{AC} = 338,9$  V. Maksymalne zwiększenie napięcia przemiennego w stanie przejściowym wynosi  $|\Delta U_{AC}| \approx 6,3$  V. Algorytm sterowania i w tym przypadku jest wykonywany bez zakłóceń.



**Rys. 8.** Oscylogramy dla zmiany prędkości wału generatora o +10% w czasie 150 ms

Na podstawie powyższych oscylogramów można stwierdzić, że autonomiczna praca generatora samowzbudnego z zaproponowanym algorytmem sterowania spełnia zadanie stabilizacji wartości napięcia wyjściowego. Układ nadaje się więc do zasilania większości odbiorników z wyłączeniem bezpośredniego zasilania silników indukcyjnych.

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawiony algorytm sterowania samowzbudnym generatorem indukcyjnym charakteryzuje się:

- stabilizacją napięcia wyjściowego generatora w pełnym zakresie dopuszczalnych obciążeń obwodu prądu przemiennego i stałego w szerokim zakresie zmian prędkości wału,
- możliwością eliminacji pomiaru napięcia przemiennego i zastąpienia go estymacją siły elektromotorycznej SEIG (były wykonywane takie próby),
- eliminacją przesunięcia fazowego prądu związanego z okresem próbkowania dzięki zastosowaniu predykcji,

- brakiem układu przełączania dodatkowych kondensatorów dla stabilizacji napięcia wyjściowego SEIG,
- funkcją płynnie regulowanej pojemności dla stabilizacji napięcia wyjściowego SEIG,
- odtwarzaniem podstawowej harmonicznej napięcia SEIG dzięki wykorzystaniu algorytmu PLL.

Pracę zrealizowano w ramach badań własnych w Akademii Morskiej w Gdyni – nr 870/BW/GU/2008.

## LITERATURA

1. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A., *Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits*, Conf. Rec. IEEJ-IPEC, 1983, s. 1375–1386.
2. Leidhold R., Garcia G., *Variable Speed Field-Oriented Controlled Induction Generator*, IEEE-Industry Application Society Annual Meeting, 1998 (IAS'98), s. 540–546.
3. Lopes L. A.C., Almeida R.G., *Wind-Driven Self-Excited Induction Generator with Voltage and Frequency Regulated by a Reduced-Rating Voltage Source Inverter*, IEEE Trans. On Energy Conversion, vol. 21, no. 2, JUNE 2006, s. 297–304.
4. Seyoum D., *The Dynamic Analysis and Control of a Self-Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine*, Ph. Thesis, The University of New South Wales, School of Electrical Engineering and Telecommunications, March 2003, s. 1–324.
5. Seyoum D., Grantham C., Rahman M. F., *The Dynamic Characteristic of an Isolated Self-Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine*, IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 39, no. 4, July/August 2003, s. 936–944.
6. Sousa G.C.D., Martins F.N., Rey J.P., Bruinsma J.A., *An Autonomous Induction Generator System with Voltage Regulation*, Proc 4th IEEE-Inter. Conf. PEDS 2001, vol. 1, s. 94–98.
7. Wang L., Lee C.H., *A Novel Analysis on the Performance of an Isolated Self-Excited Induction Generator*, IEEE Trans. On Energy Conversion., vol. 12, no. 2, JUNE 1997, s. 109–117.
8. Wekhande S., Agarwal V., *A Variable Speed Constant Voltage Controller for Self-Excited Induction Generator with Minimum Control Requirements*, IEEE-Inter. Conf. PEDS 1999, s. 98–103.

## ZAŁĄCZNIK

Dane maszyny indukcyjnej:

$$\begin{aligned}P_N &= 3,6 \text{ kW}, U_{l-l} = 415 \text{ V}, \\I_N &= 7,8 \text{ A}, f_N = 50 \text{ Hz}, 2p = 4 \\L_{s\sigma} &= L_{r\sigma} = 12 \text{ mH}, L_m = f(I_m) \\R_s &= 1,6 \Omega, R_r = 2,75 \Omega\end{aligned}$$

## CONTROL OF SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR FOR THE USAGE IN AUTONOMIC SUPPLY SYSTEMS

### *Summary*

*This paper discusses the regulation of a stand-alone wind power plant based on a self-excitation squirrel-cage induction machine. During self-excitation the variation in the value of magnetizing inductance, due to saturation, is the main factor that stabilizes growing initial transient of generated voltage. The required reactive power for self-excited generator is provided by a local capacitor bank connected to the stator induction machine. A shunt connected active rectifier and a controllable dump load are used for regulation of the voltage and frequency. A control scheme for the active rectifier with independent control of active and reactive power is presented. The feasibility of the proposed system is verified by simulations. (**Control of Self-Excited Induction Generator for Wind Power Plant**).*