

Nr 98/2017, 71–82  
ISSN 1644-1818  
e-ISSN 2451-2486

## WSPÓŁPRACA SAMOWZBUDNEGO GENERATORA INDUKCYJNEGO SEIG Z SIECIĄ ELEKTROENERGETYCZNĄ

### COOPERATION SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR SEIG FROM THE POWER

**Andrzej Kasprowicz**

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81–87, 81-581 Gdynia, Wydział Elektryczny,  
Katedra Automatyki Okrętowej, e-mail: a.kasprowicz@we.am.gdynia.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono sterowanie samowzbudnym generatorem indukcyjnym w warunkach współpracy z siecią energetyczną. Pozwoliło to rozszerzyć zakres zastosowania układu. Zaproponowany układ charakteryzuje się bardzo dużą elastycznością zasilania odbiorników łącznie z możliwością odsprzedaży wytworzonej energii do sieci. Kierunek przepływu energii do sieci może w zaproponowanym układzie zostać odwrócony. Stan taki występuje w przypadku niedoboru energii wytwarzanej przez generator SEIG (mała siła wiatru, niski stan wody, duże zapotrzebowanie na energię). Możliwość zmiany kierunku przepływu energii gwarantuje przekształtnik dwustronny AC/DC/AC zastosowany w proponowanym rozwiązaniu. Przekształtnik dwustronny jest sprzężony z siecią poprzez filtr LCL. Rozwiązanie to zapewnia sinusoidalny kształt prądu zarówno w przypadku przepływu energii do sieci, jak i z sieci. W przypadku pełnego przetwarzania energii generatora bez współpracy z siecią układ pracuje w trybie autonomicznym lub bezprzerwowego zasilania.

**Słowa kluczowe:** samowzbudny generator indukcyjny, moc chwilowa, predykcja, sterowanie dyskretne, przekształtnik sieciowy, sprzęgi sieciowe.

**Abstract:** The article presents the control of the self-excited induction generator in terms of cooperation with the mains. This made it possible to extend the scope of the system. The proposed system is characterized by very high flexibility of powering receivers as well as the possibility of reselling the produced energy to the grid. The direction of flow of energy to the proposed arrangement can be reversed. This condition occurs in case of shortage of energy produced by the generator SEIG (small wind strength, low water level, high energy requirements). The ability to change the direction of energy flow is ensured by a bilateral converter AC/DC/AC used in the proposed solution. The grid inverter is coupled to the network through an LCL filter. This solution provides a sinusoidal current flow in both directions: power supply and the grid. In the case of complete processing of the power of generator without the cooperation with the grid, the system operates in standalone mode or uninterruptible power supply mode.

**Keywords:** self-excited induction generator, instantaneous power, shunt converter, prediction, discrete control, grid converter, network couplers.

## 1. WSTĘP

Pomimo upływu wielu lat zainteresowanie samowzbudnym generatorem indukcyjnym SEIG (ang. *Self-Excited Induction Generator*) nie słabnie. Pojawiają się nowe opracowania dotyczące samego zjawiska samowzbudzenia z coraz dokładniejszym jego opisem matematycznym [Bašić, Vukadinović i Lukač 2011]. Prowadzone są próby opisu pracy równoległej takich generatorów pracujących na wspólne obciążenie [Palle, Simões i Farret 2005]. Równocześnie pojawiają się nowe opracowania aplikacyjne z zastosowaniem tych generatorów. Obejmują one układy ze stabilizacją napięcia wyjściowego na zaciskach generatora [Seyoum 2003]. Dotyczy to zasilania odbiorników, dla których nie jest wymagana określona stała częstotliwość, jak ogrzewanie, oświetlenie, sprzęt RTV, niektóre sprzęt AGD, ładowanie baterii akumulatorów itp.

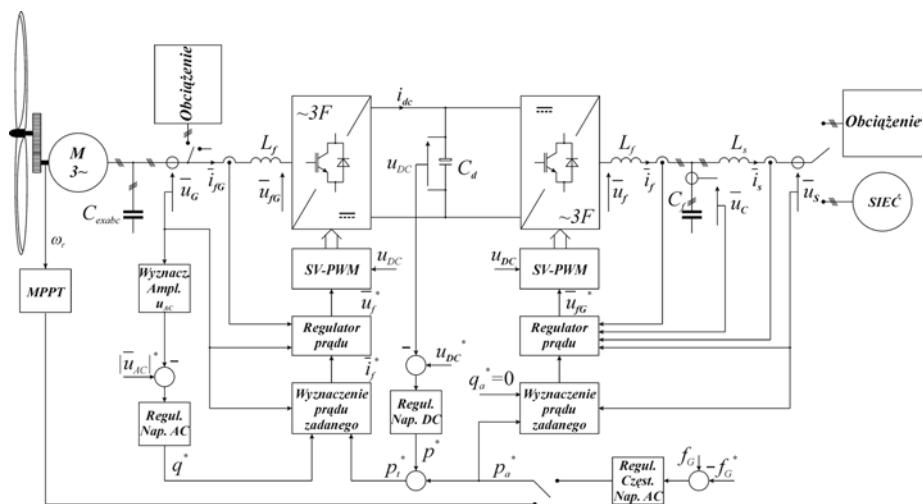
Bardziej wymagającą grupę odbiorów stanowią układy napędowe, gdzie prędkość obrotowa jest zależna od częstotliwości napięcia zasilającego. Dla tej grupy układów opracowuje się rozwiązania, w których priorytetowym zagadnieniem jest, oprócz stabilizacji napięcia wyjściowego generatora, również stabilizacja jego częstotliwości. W tym obszarze poszukiwań pojawiło się wiele opracowań [Trapp i in. 2012]. Tutaj jednak pojawia się pytanie, jak stabilizować tę częstotliwość. Rozwiązaniem jest wstępne obciążenie generatora pracującego z prędkością obrotową powyżej synchronicznej [Revanth, Ramesh i Jenish 2013]. W tym zakresie pracy generatora częstotliwość napięcia wyjściowego jest większa od jego częstotliwości synchronicznej. Wstępne obciążenie wirującego generatora wprowadza poślizg wzbudzonego w nim pola magnetycznego i częstotliwość napięcia wyjściowego ulega obniżeniu. Dobierając wielkość wstępnego obciążenia generatora w zależności od aktualnej prędkości obrotowej i aktualnego obciążenia użytkowego, można uzyskać stabilizację częstotliwości napięcia na zaciskach generatora. Tego typu stabilizacja realizowana jest tylko w określonych granicach prędkości obrotowych. Wstępne obciążenie generatora związane jest z energią, która jest pobierana z generatora. Pojawia się więc pytanie, jak można by było ją zagospodarować. W najprostszym rozwiązaniu może to być akumulacja w postaci ciepła w izolowanych zbiornikach wody lub w podgrzewaczach [Thomsen, Guerrero i Thøgersen 2014]. W bardziej zaawansowanych przypadkach będą to zasobniki energii z kołem zamachowym, superkondensatory lub baterie akumulatorów [Barrado, Griño i Valderrama-Blavi 2010]. Gromadzona w ten sposób energia wstępnego obciążenia byłaby możliwa do odzyskania w dowolnym późniejszym momencie.

Obecnie coraz częściej rozważa się możliwość przekazania energii wstępnego obciążenia do sieci elektroenergetycznej przy wykorzystaniu przekształtników sieciowych [Sikorski i Kuźma 2009]. Zastosowanie ich stwarza najkorzystniejsze warunki dla wstępnego obciążenia generatora w zakresie prędkości obrotowych powyżej jego prędkości synchronicznej. W zakresie prędkości poniżej synchronicznej występuje możliwość zasilania odbiorników niewymagających stałej

częstotliwości. Natomiast przy pełnym przetwarzaniu energii z wykorzystaniem przekształtników sieciowych umożliwia oddawanie nadwyżki do sieci. Przy pełnym przetwarzaniu energii daje również możliwość zasilania odbiorników wymagających stałej częstotliwości w układzie izolowanym [Thongam i in. 2012].

## 2. PROPONOWANY UKŁAD WSTĘPNEGO OBCIĄŻENIA GENERATORA

Wspomniane wcześniej układy w większym lub mniejszym stopniu prowadzą do zamiany wytworzonej energii w energię ciepłą. Obniża to wypadkową sprawność układów i ogranicza zakres ich zastosowania. W celu rozwiązania powyższych problemów w artykule zaproponowano nowe rozwiązanie. Polega ono na sprzęgnięciu układu generatora współpracującego z przekształtnikiem AC/DC z siecią elektroenergetyczną – od strony obwodu napięcia stałego przekształtnika AC/DC. Do tego celu wykorzystywano przekształtnik sieciowy. Zrealizowano w ten sposób układ dwustronny AC/DC/AC (ang. *back to back converter*). Rozwiązanie to umożliwia bardzo elastyczne wykorzystanie samowzbudnego generatora indukcyjnego do zasilania różnego typu odbiorników energii elektrycznej. Umożliwia również odprowadzenie nadwyżki wytworzonej energii, ponad aktualne zapotrzebowanie, do sieci elektroenergetycznej. W ten sposób cała wytworzona energia jest wykorzystywana od razu bez zamieniania jej na ciepło i przechowywania w tej postaci do późniejszego wykorzystania.



**Rys. 1.** Schemat blokowy generatora współpracującego z siecią elektroenergetyczną poprzez układ dwustronny AC/DC/AC ze sprzężeniem LCL (możliwości)

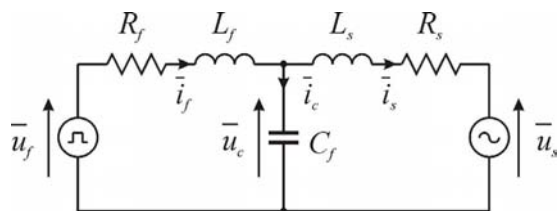
**Fig. 1.** The block diagram of the generator cooperating with the electricity network through double-sided circuit AC/DC/AC with coupling LCL (capabilities)

W zaproponowanym rozwiązaniu jako sprzęg sieciowy zastosowano filtr typu LCL. Zdecydował o tym sinusoidalny przebieg prądu sieci bez widocznego wpływu modulacji. Schemat blokowy zaproponowanego układu przedstawiono na rysunku 1. Zaznaczono na nim wszystkie możliwości pracy układu, które były badane w ramach symulacji.

### 3. UKŁADY SAMOWZBUDNEGO GENERATORA INDUKCYJNEGO WSPÓŁPRACUJĄCEGO Z SIECIĄ ELEKTROENERGETYCZNĄ

W układzie przedstawionym na rysunku 1 bardzo ważną rolę pełni filtr LCL. Schemat zastępczy filtra przedstawiono na rysunku 2. Filtr ten charakteryzuje się dużym współczynnikiem tłumienia, bo aż 60 db/dek dla częstotliwości powyżej jego częstotliwości rezonansowej. W ten sposób bardzo skutecznie tłumi sygnał modulacji. Niestety, jest to filtr trzeciego rzędu i w prądzie wyjściowym mogą pojawić się oscylacje.

$$a) L_s \frac{d\vec{i}_s}{dt} + \vec{i}_s R_s = \vec{u}_c - \vec{u}_s \quad b) L_f \frac{d\vec{i}_f}{dt} + \vec{i}_f R_f = \vec{u}_f - \vec{u}_c \quad c) C_f \frac{d\vec{u}_c}{dt} = \vec{i}_f - \vec{i}_s \quad (1)$$



Rys. 2. Schemat zastępczy filtra sprzęgającego LCL

Fig. 2. Equivalent circuit filter coupling LCL

Aby skutecznie tłumić oscylacje pojawiające się w prądzie sieciowym, zastosowano sterowanie na bazie uśrednionych wartości chwilowych napięcia sieci, falownika i kondensatora po zastosowaniu predykcji [Wojciechowski 2010]. Ponieważ filtr jest układem rzędu trzeciego, to zastosowano predykcję dwóch kroków wyprzedzenia. W związku z tym w przedziale czasu  $[k+1] - [k+2]$  napięcie wyjściowe przekształtnika sieciowego  $\vec{u}_f$  w postaci dyskretnej wyznaczane jest na podstawie zależności (2) wynikającej z (1b).

$$\vec{u}_f[k+1 | k+2] = \vec{u}_c[k+1 | k+2] + (\vec{i}_f[k+2] - A_f \vec{i}_f[k+1]) / B_f \quad (2)$$

Występujące w powyższej zależności wartości wyznaczane są zgodnie z poniższym algorytmem (3). Są one dyskretnym zapisem zmiennych stanu filtra LCL sprzęgającego układ generatora z siecią i wynikają z zależności (1abc).

$$\begin{aligned}\vec{i}_f[k+2] &= \vec{i}_s[k+2] + (\vec{u}_c[k+2 | k+3] - A_c \vec{u}_c[k+1 | k+2]) / B_c \\ \vec{u}_c[k+1 | k+2] &= A_c \vec{u}_c[k | k+1] + B_c (\vec{i}_f[k+1] - \vec{i}_s[k+1]) \\ \vec{u}_c[k+2 | k+3] &= \vec{u}_s[k+2 | k+3] + (\vec{i}_s[k+3] - A_s \vec{i}_s[k+2]) / B_s\end{aligned}\quad (3)$$

gdzie  $\vec{i}_s[k+2] = \vec{i}_s^*[k+2]$  i  $\vec{i}_s[k+3] = \vec{i}_s^*[k+3]$  to wartości zadane prądów sieci. Pozostałe wielkości wyznaczono zgodnie z (4) dla jednego kroku predykcji.

$$\begin{aligned}\vec{i}_s[k+1] &= A_s \vec{i}_s[k] + B_s (\vec{u}_c[k | k+1] - \vec{u}_s[k | k+1]) \\ \vec{i}_f[k+1] &= A_f \vec{i}_f[k] + B_f (\vec{u}_f[k | k+1] - \vec{u}_c[k | k+1]) \\ \vec{u}_c[k | k+1] &= A_c \vec{u}_c[k | k+1] + B_c (\vec{i}_f[k+1] - \vec{i}_s[k+1]) \\ \vec{u}_c[k-1 | k] &= 0.5(\vec{u}_c[k-1] + \vec{u}_c[k])\end{aligned}\quad (4)$$

Współczynniki występujące w powyższych zależnościach zostały wyznaczone na podstawie równań stanu filtru. Przy założeniu stałości parametrów elementów filtru można je obliczyć na podstawie zależności (5).

$$\begin{aligned}A_s &= 1 - \exp(-T_s/T_e) \quad B_s = (1 - A_s) / R_s \quad A_f = 1 - \exp(-T_s/T_f) \quad B_f = (1 - A_f) / R_f \\ A_c &= 1 - \exp(-T_s/T_c) \quad B_c = (1 - A_c) R_c \quad T_e = L_s / R_s \quad T_f = L_f / R_f \quad T_c = C_f R_c\end{aligned}\quad (5)$$

Do wyznaczenia prądu zadanego wykorzystano definicję mocy chwilowej dla pierwszej harmonicznej podaną przez Hirofumi Akagię (6).

$$\begin{aligned}\vec{s} &= \vec{u}_{sP11h} \vec{i}_s^* \quad p = \text{Re}(\vec{u}_{sP11h} \vec{i}_s^*) \quad q = \text{Im}(\vec{u}_{sP11h} \vec{i}_s^*) \\ p &= u_{s\alpha P11h} i_{s\alpha} + u_{s\beta P11h} i_{s\beta} \quad q = u_{s\beta P11h} i_{s\alpha} - u_{s\alpha P11h} i_{s\beta}\end{aligned}\quad (6)$$

Obciążenie czynne wymagane dla stabilizacji częstotliwości napięcia wyjściowego generatora realizowane jest przez przekształtnik sieciowy. Natomiast zadana moc bierna zależna jest od dodatkowych funkcji przekształtnika (7).

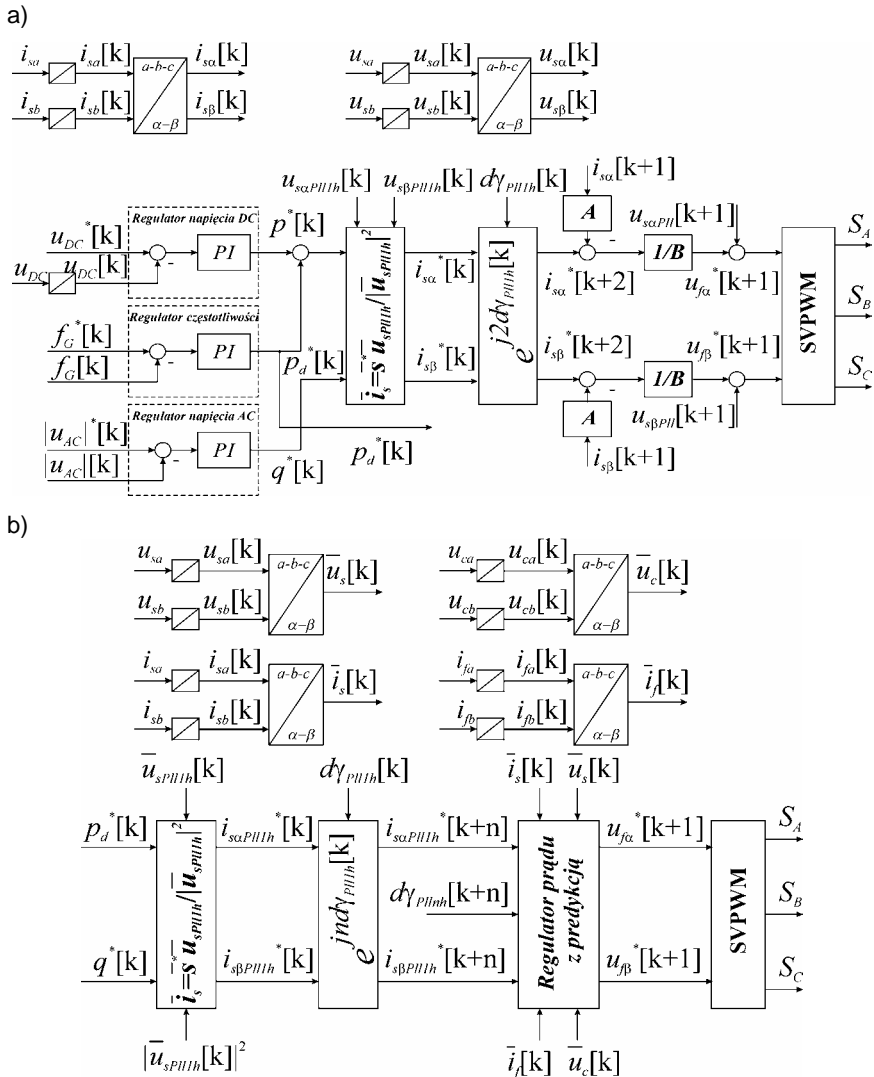
$$q_{dc} = 0 \quad \text{lub} \quad q_{dc} = \text{var}.\quad (7)$$

Na bazie powyższej definicji wyznaczany jest prąd zadany, dotyczy on jednak chwili bieżącej. W zależnościach (3) wymagane są prądy dla chwil  $[k+2]$  oraz  $[k+3]$ . Zakładając, że prąd sieciowy ma przebieg sinusoidalny, można w prosty sposób uzyskać wymagane wielkości. W tym celu dokonuje się 'n' krotnego obrotu wektora prądu zadanego, wyznaczonego dla chwili  $[k]$  o kąt wynikający z częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia sieci  $f_{P11h}$  i okresu próbkowania  $T_s$  (8). W ogólnym przypadku kąt ten jest wyznaczany za pomocą pętli synchronizacji fazowej (ang. *Phase Locked Loop*).

$$\vec{i}_s^*[k+n] = \vec{i}_s^*[k](\cos(nd\gamma_{PI1h}) + j\sin(nd\gamma_{PI1h})) \quad n = 2,3 \quad (8)$$

gdzie  $d\gamma_{PI1h} = 2PIf_{PI1h}T_s$

Uproszczone schematy blokowe algorytmów sterowania przekształtnikami: generatorowym i sieciowym zostały przedstawione na rysunkach 3a i 3b.



**Rys. 3.** Schematy blokowe algorytmów sterowania: a) przekształtnikiem generatorowym, b) przekształtnikiem sieciowym

**Fig. 3.** Block diagrams of control algorithms: a) generator inverter, b) grid inverter

Przybliżeniu napięcia podstawowej (9) oraz wyższych harmonicznych (10) dokonuje się, wykorzystując tę samą zasadę. Sumując uzyskane wartości podstawowej i wyższych harmonicznych 'm', otrzymuje się napięcia dla chwil  $[k+1]$ ,  $[k+2]$ ,  $[k+3]$  (11). Na podstawie wyznaczonych wartości chwilowych obliczane są wartości średnie w przedziałach czasowych  $[k] - [k+1]$ ,  $[k+1] - [k+2]$  oraz  $[k+2] - [k+3]$ .

$$\bar{u}_{sP11h}[k+n] = \bar{u}_{sP11h}[k](\cos(nd\gamma_{P11h}) + j \sin(nd\gamma_{P11h})) \quad n = 1,2,3 \quad (9)$$

gdzie:  $d\gamma_{P11h} = 2PIf_{P11h}T_s$

$$\bar{u}_{sP11mh}[k+n] = \bar{u}_{sP11mh}[k](\cos(nd\gamma_{P11mh}) + j \sin(nd\gamma_{P11mh})) \quad m = 5,7 \quad (10)$$

gdzie:  $d\gamma_{P11mh} = 2PIf_{P11mh}T_s$

$$\bar{u}_{sP11}[k+n] = \bar{u}_{sP11h}[k+n] + \sum_m \bar{u}_{sP11mh}[k+n] \quad n = 1,2,3 \quad m = 5,7 \quad (11)$$

Na bazie powyższych zależności stworzono algorytm sterowania przekształtnikiem sieciowym dla realizacji dwukierunkowego przepływu energii.

### 3.1. Współpraca z siecią elektroenergetyczną powyżej prędkości synchronicznej generatora

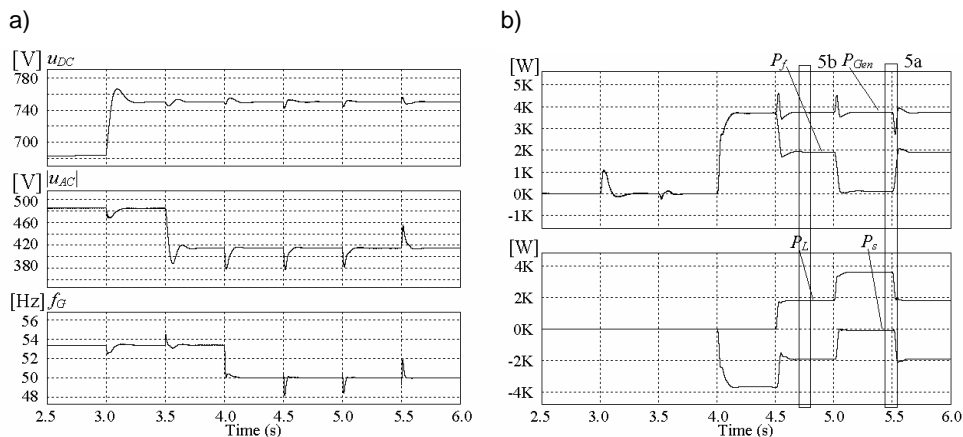
Układ generatora indukcyjnego współpracującego z siecią elektroenergetyczną zamodelowano za pomocą oprogramowania PSIM v8, natomiast zaawansowane procedury sterowania przekształtnikami zostały napisane w języku C i po skompilowaniu dołączone do głównego modułu symulacyjnego jako biblioteki \*.dll. Na potrzeby symulacji komputerowej układu przyjęto krok równy 1 us. Procedury wyznaczania sterowania wywoływane są co 50 us. Częstotliwość łączy elementów przekształtników przyjęto równą 10 kHz.

W pierwszej fazie badań zamodelowano pracę układu z prędkością obrotową generatora powyżej synchronicznej, w związku z czym możliwa jest typowa realizacja stabilizacji częstotliwości napięcia. W każdych warunkach prędkości obrotowych dokonuje się: stabilizacji napięcia przemiennego  $|u_{AC}|$  oraz stałego  $u_{DC}$  w układzie przekształtnika dwukierunkowego AC/DC/AC. Do realizacji stabilizacji częstotliwości wykorzystano współpracę z siecią elektroenergetyczną. Do niej odprowadzana jest energia, wynikająca z wymaganego aktualnego wstępnego obciążenia dla stabilizacji częstotliwości  $f_G$ . Odbiorniki energii są zasilane wprost z generatora. Tę fazę pracy układu obrazują rysunki 4 i 5.

Na rysunku 4a przedstawiono fazy uruchamiania poszczególnych układów stabilizacji. Po 3 s od rozruchu układu generatora zostaje włączona stabilizacja napięcia stałego  $u_{DC}$ , a po kolejnych 0,5 s – uruchomiona stabilizacja napięcia przemiennego  $|u_{AC}|$ . Jako ostatnią, po upływie kolejnych 0,5 s, uruchamia się stabilizację częstotliwości  $f_G$ . Jak można zauważyć, na poniższych przebiegach

po krótkich stanach przejściowych, związanych z kolejnymi załączeniami, układ pewnie powraca do stanu ustalonego.

Na rysunku 4b przedstawiono moce: generatora  $P_{Gen}$  i wstępnie obciążającego przekształtnika  $P_f$  (górne przebiegi) oraz przebiegi mocy: odbiornika  $P_L$  i mocy przekształtnika sieciowego  $P_s$  (dolne przebiegi). W rozpatrywanym zakresie pracy układu generatora moc przekształtnika sieciowego  $P_s$  występuje ze znakiem ujemnym. Oznacza to przepływ energii z układu generatora do sieci.



**Rys. 4.** Przebiegi: a) napięć i częstotliwości – strona generatora, b) mocy  $P_f$  i  $P_{Gen}$  – strona generatora (górną), obciążenia  $P_L$  i przekształtnika sieciowego  $P_s$  (dół)

**Fig. 4.** Waveforms: a) the voltages and frequency – side generator, b) powers  $P_f$  and  $P_{Gen}$  – side generator (top), load  $P_L$  and grid converter  $P_s$  (down)

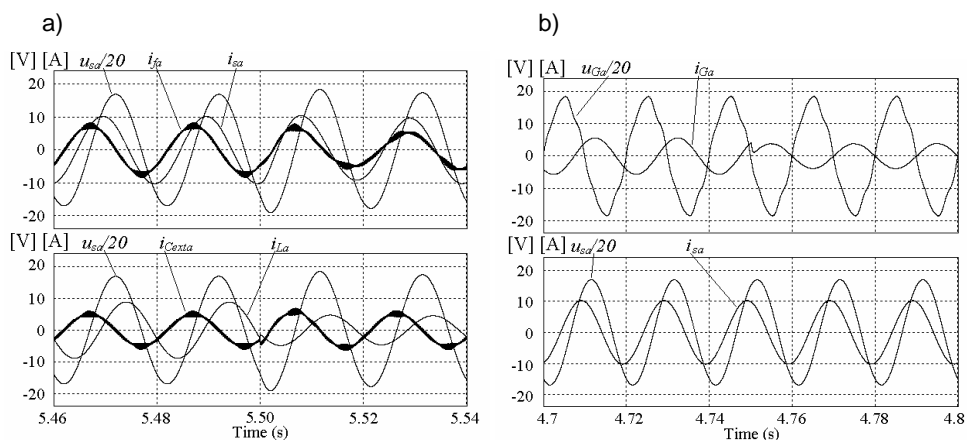
Po uruchomieniu stabilizacji częstotliwości generator jest źródłem mocy czynnej, wynikającej z aktualnej prędkości obrotowej, natomiast przesunięcie fazy prądu generatora względem jego napięcia jest wywołane układem stabilizacji napięcia przemiennego. W zależności od wartości tego napięcia, wynikającego z aktualnej prędkości obrotowej generatora, do obwodu jest dostarczana moc bierna o charakterze pojemnościowym lub indukcyjnym. W momencie załączenia obciążenia użytkowego następuje rozptył mocy czynnej. Całkowita moc pozostaje na stałym poziomie  $P_{Gen}$ , ale następuje jej rozdział pomiędzy obciążenie użytkowe  $P_L$  i obciążenie przekształtnikiem generatorowym  $P_f$ . Jak wynika z rysunku 4b (dolne przebiegi), moc obciążenia przekształtnikiem generatorowym  $P_f$  jest przekazywana poprzez przekształtnik sieciowy do współpracującej sieci  $P_s$ .

Na rysunku 5a przedstawiono przebiegi napięcia generatora  $u_{sa}$  oraz prądów obciążenia  $i_{La}$  i baterii kondensatorów  $i_{Cexta}$ . W chwili 5,5 s następuje skokowa zmiana obciążenia. Objawia się to skokową zmianą fazy prądu baterii kondensatorów  $i_{Cexta}$ . Proces przejściowy trwa jednak bardzo krótko. Na rysunkach obserwo-



wany jest sinusoidalny przebieg napięcia na zaciskach generatora  $u_{sa}$  oraz prądu obciążenia  $i_{La}$ . Wyższe harmoniczne związane z pracą przekształtnika są zwierane przez kondensatory.

Na rysunku 5b (górze) przedstawiono natomiast przebiegi napięcia  $u_{Ga}$  i prądu  $i_{Ga}$  po stronie przekształtnika sieciowego. Jak można zaobserwować, pomimo silnego odkształcenia napięcia sieci  $u_{Ga}$ , prąd, który płynie od strony przekształtnika do sieci  $i_{Ga}$ , ma przebieg sinusoidalny. Uzyskano to dzięki zastosowaniu filtra sprzęgającego typu LCL oraz sterowaniu predykcyjnemu. Dodatkową możliwością przekształtnika sieciowego jest sterowanie fazą prądu  $i_{Ga}$  dostarczanego do sieci. Jest ona niezależna od podstawowej funkcji przekształtnika w układzie. Może on więc dodatkowo pełnić funkcję kompensatora mocy biernej.



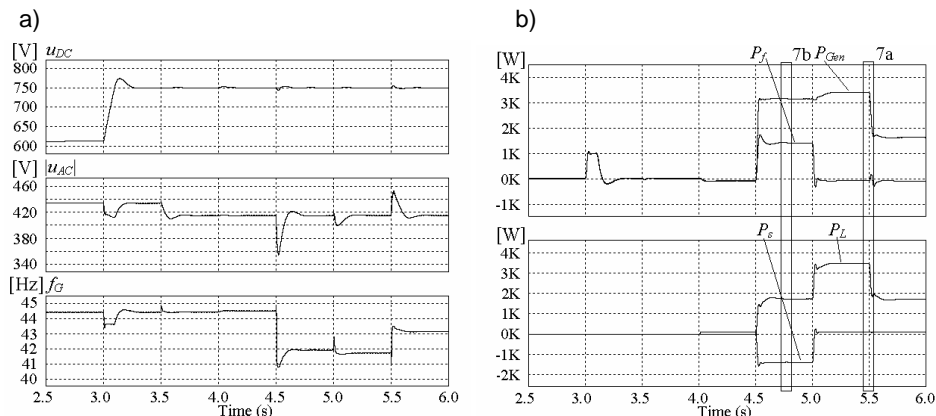
**Rys. 5.** Przebiegi: a) napięcia i prądów - strona generatora, b) napięcia i prądu sieci (górze), napięcia i prądu generatora (dół) układu ze stabilizacją częstotliwości

**Fig. 5.** Waveforms: a) voltage and currents – side generator, b) voltage and current grid (top), voltage and current generator (bottom) of the stabilized frequency

### 3.2. Współpraca z siecią elektroenergetyczną poniżej prędkości synchronicznej generatora

Rysunki 6 i 7 obrazują pracę generatora w zakresie jego prędkości obrotowych poniżej synchronicznej. Obserwowana jest stosunkowo niska częstotliwość napięcia wyjściowego generatora (~42 Hz). Pomimo tego napięcia zarówno stałe  $u_{DC}$ , jak i przemienne  $|u_{AC}|$  są dobrze stabilizowane (rys. 6a).

Rysunek 6b przedstawia moce: generatora  $P_{Gen}$ , obciążenia użytkowego  $P_L$  przy powyższych warunkach oraz moc dostarczaną do sieci  $P_s$ , wynikającą z realizacji procedury MPPT.

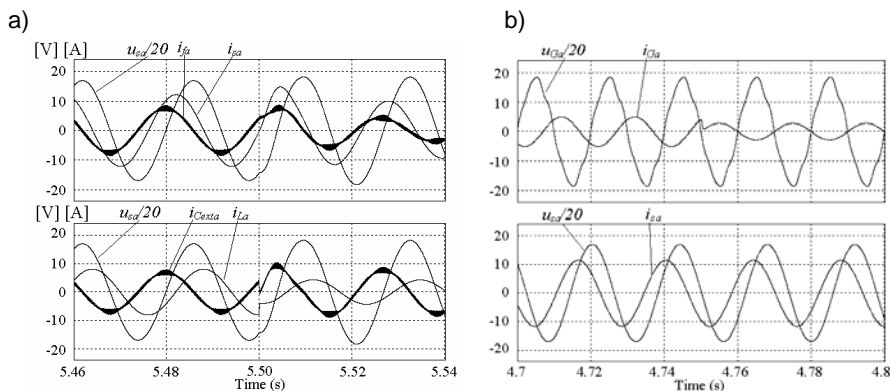


**Rys. 6.** Przebiegi: a) napięć i częstotliwości – strona generatora, b) mocy  $P_f$  i  $P_{Gen}$  – strona generatora (górze), obciążenia  $P_L$  i przekształtnika sieciowego  $P_s$  (dół)

**Fig. 6.** Waveforms: a) the voltages and frequency – side generator, b) powers  $P_f$  and  $P_{Gen}$  – side generator (top), load  $P_L$  and grid converter  $P_s$  (down)

Rysunek 7a przedstawia prąd  $i_{sa}$  i napięcie  $u_{sa}$  po stronie generatora. Charakteryzują się one sinusoidalnymi przebiegami, a ich częstotliwość ulega zmianie wraz ze zmianą obciążenia.

Rysunek 7b przedstawia napięcia i prądy po obu stronach przekształtnika AC/DC/AC. Od strony sieci przebieg prądu jak poprzednio ma kształt sinusoidalny pomimo silnego odkształcenia napięcia (100%  $V_{1h}$ , 5%  $V_{5h}$ , 3%  $V_{7h}$  i 10%  $V_0$ ).



**Rys. 7.** Przebiegi: a) napięcia i prądów – strona generatora, b) napięcia i prądu sieci (górze), napięcia i prądu generatora (dół) układu bez stabilizacji częstotliwości

**Fig. 7.** Waveforms: a) voltage and currents – side generator, b) voltage and current grid (top), voltage and current generator (bottom) system without frequency stabilization

## 4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule rozwiązania układu generatora umożliwiają od strony napędu współpracę zarówno z turbiną wiatrową, jak i wodną, natomiast od strony obciążenia – współpracę z siecią elektroenergetyczną oraz pracę autonomiczną. Rozszerzeniu ulega również zakres prędkości obrotowych generatora, w którym jest możliwa realizacja stabilizacji częstotliwości napięcia wyjściowego.

Dzięki dwukierunkowemu przepływowi energii wytworzona nadwyżka energii, ponad aktualne zapotrzebowanie, może być oddawana do sieci. W przypadku zaś niedoboru energii wytwarzanej przez generator SEIG (mała siła wiatru, niski stan wody, duże zapotrzebowanie na energię) jest możliwość jej uzupełnienia z sieci w celu realizacji stabilizacji częstotliwości.

Zaproponowany układ umożliwia również pracę bez stabilizacji częstotliwości, zapewniając pełne wykorzystanie wytworzonej energii. W tym trybie pracy zasilane są odbiorniki bez wymagania stałej częstotliwości napięcia. Nadwyżka energii ponad zapotrzebowanie jest dostarczana do sieci. Układ może również pracować z pełnym przetwarzaniem energii generatora jako układ bezprzerwowego zasilania. W tym trybie pracy realizowane jest śledzenie punktu maksymalnej mocy MPPT (ang. *Maximum Power Point Tracking*) [Thongam i in. 2012].

## LITERATURA

- Barrado, J.A., Griño, R., Valderrama-Blavi, H., 2010, *Power-Quality Improvement of a Stand-Alone Induction Generator Using a STATCOM with Battery Energy Storage System*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4.
- Bašić, M., Vukadinović, D., Lukač D., 2011, *Novel Dynamic Model of Self-Excited Induction Generator with Iron Losses*, International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, no. 5(2).
- Palle, B., Simões, M.G., Farret, F.A., 2005, *Dynamic Simulation and Analysis of Parallel Self-Excited Induction Generators for Islanded Wind Farm Systems*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 4.
- Revanth, B., Ramesh, M., Jenish, P., 2013, *Simulation of Isolated Wind-Hydro Hybrid System Using Cage Generator and Battery Storage*, International Journal of Environmental Science: Development and Monitoring (IJESDM), vol. 4, no. 2.
- Seyoum, D., 2003, *The Dynamic Analysis and Control of a Self-Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine*, The University of New South Wales, School of Electrical Engineering and Telecommunications, Ph. Thesis.
- Sikorski, A., Kuźma, A., 2009, *Cooperation of Induction Squirrel-Cage Generator with Grid Connected AC/DC/AC Converter*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, vol. 57, no. 4.
- Thomsen, B., Guerrero, J., Thøgersen, P., 2014, *Faroe Islands Wind-Powered Space Heating Generator Microgrid Using Self-Excited 220 kW Induction Generator*, IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 4.

- Thongam, J.S., Beguenane, R., Okou, A.F., Tarbouchi, M., Merabet, A., Bouchard, P., 2012, *A Method of Tracking Maximum Power Points in Variable Speed Wind Energy Conversion Systems*, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Sorrento, Italy.
- Trapp, J.G., Farret, F.A., Fernandes, F.T., Correa, L.C., Wechenfelder, C.M., 2012, *Variable Speed Wind Turbine Using the Squirrel Cage Induction Generator with Reduced Converter Power Rating for Stand-Alone Energy Systems*, Industry Applications (INDUSCON), 10th IEEE/IAS International Conference.
- Wojciechowski D., 2010, *Układ sterowania równoległym filtrem aktywnym ze sprzęgającym obwodem LCL*, „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 2.