

Maciej KOZAK*
Tomasz PIASECKI*

WYBRANE ZAGADNIENIA STEROWANIA UKŁADEM MIKROPROCESOROWYM DSP-FPGA PRĄDNIC PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH PRACUJĄCYCH RÓWNOLEGLIE W SIECI OKRĘTOWEJ

W pracy przedstawiono założenia teoretyczne i wyniki działania rzeczywistego układu eksperymentalnego prądnic przekształtnikowych pracujących równolegle w sieci okrętowej. Układ elektromaszynowy składający się z dwóch prądnic asynchronicznej klatkowej i synchronicznej szczotkowej włączony jest do sieci dystrybucyjnej poprzez przekształtniki. W układzie pracującym równolegle realizowany jest proces rozdziału mocy czynnej i biernej po stronie falowników sieciowych poprzez sterowanie układem DSP-FPGA.

SŁOWA KLUCZOWE: prądnice elektryczne, falownik maszynowy, falownik sieciowy, praca równoległa przekształtników

1. CEL STOSOWANIA PRĄDNIC PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH W ROZWIĄZANIACH OKRĘTOWYCH SYSTEMÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH

1.1. Wstęp

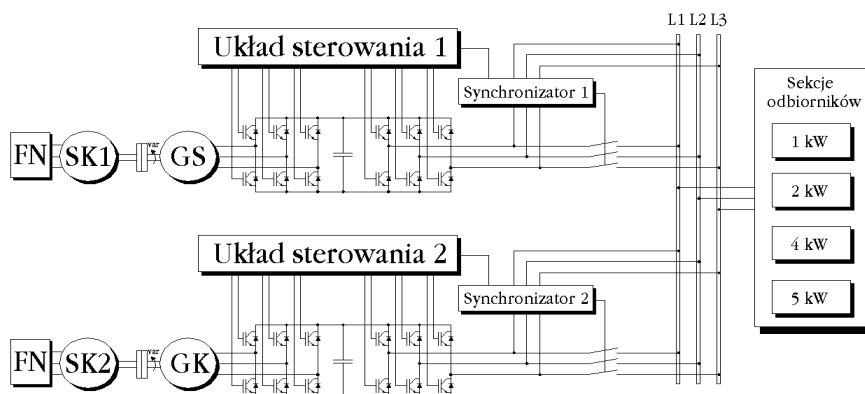
W związku z koniecznością ograniczania zużycia paliwa okrętowego i redukcji emisji spalin ważnym elementem rozwoju techniki okrętowej jest tworzenie i rozwój układów pozwalających na współpracę nowoczesnych źródeł energii elektrycznej. Takimi źródłami są m.in. prądnice różnych typów pracujące ze zmieniającą się w dużym zakresie prędkością obrotową. Do tej pory w okrętownictwie stosowano przede wszystkim układy z prądnicami synchronicznymi i przekształtnikami tyrystorowymi. W pracy podjęto próbę praktycznego sprawdzenia możliwości współpracy prądnicy synchronicznej i klatkowej wraz z przekształtnikami i standardowymi, okrętowymi układami synchronizacji. W chwili obecnej na statkach morskich pojawiają się pierwsze tego typu układy i należy się spodziewać, że w najbliższej przyszłości będzie implementowanych coraz więcej tego typu rozwiązań.

* Akademia Morska w Szczecinie.

W niniejszej pracy przedstawiono koncepcję układu energoelektronicznego, który w większej skali może być zastosowany zarówno w rozwiązaniach morskich jak i lądowych. Zaprezentowano wybrane wyniki badań eksperymentalnych uzyskanych w czasie badań przeprowadzonych w laboratorium powstałym w wyniku realizacji projektu o nazwie „Zielona Energetyka” w Akademii Morskiej w Szczecinie.

1.2. Koncepcja układu pracy równoległej dwóch źródeł napięcia zmiennego

Najważniejszym problemem powstającym przy łączeniu źródeł energii elektrycznej prądu zmiennego do pracy równoległej celem zwiększenia mocy oddawanej do odbiorników jest konieczność dopasowania ich parametrów tak, by możliwa była kontrola rozdziału mocy czynnej i biernej generowanej przez poszczególne źródła. Właściwy rozdział mocy czynnej umożliwia prawidłowe obciążanie silników spalinowych napędzających prądnice i właściwy dobór ich punktu pracy celem zmniejszenia zużycia paliwa i ograniczenia emisji spalin. Aby zapewnić takie możliwości należy zastosować prądnice elektryczne współpracujące z przekształtnikami energoelektronicznymi.



Rys. 1. Schemat blokowy badanego układu

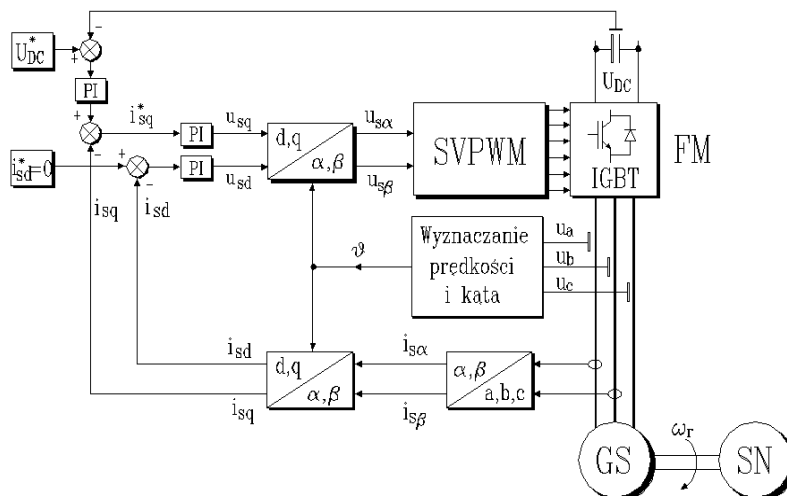
W zaprezentowanym układzie źródłami energii elektrycznej są odpowiednio samowzbudna prądnica synchroniczna oznaczona na schemacie jako GS oraz generator klatkowy (GK). Prądnice napędzane są przez silniki indukcyjne klatkowe (SK1 i SK2) zasilane z przemienników częstotliwości (FN). Taki sposób zasilania umożliwia swobodną zmianę prędkości obrotowej w szerokim zakresie i pozwala na badanie charakterystyk układów maszynowo-energoelektronicznych w różnych stanach pracy. Przekształtniki maszyn połączone są w układzie back-to-back co czyni je szczególnie przydatnymi do pracy dwukierunkowej.

2. STEROWANIE PRĄDNICAMI I PRZEKSZTAŁTNIKAMI ENERGOELEKTRONICZNYMI

Aby w pełni wykorzystać możliwości proponowanego układu należy zastosować odpowiednio oprogramowany układ przekształtnikowy pracujący w czasie rzeczywistym. Układ ten powinien utrzymywać odpowiednią wartość napięcia stałego w obwodzie pośredniczącym i generować energię w postaci napięcia sinusoidalnie zmiennego w części obwodu załączonego do sieci dystrybucyjnej.

2.1. Sterowanie samowzбудną prądnicą synchroniczną

Sterowanie samowzbudną prądnicą synchroniczną polega na zastosowaniu algorytmu FOC (field oriented control), który pozwala na niezależne sterowanie prądem czynnym i_{sq} ładującym kondensator obwodu pośredniczącego oraz prądem biernym i_{sd} równym w przypadku prądnicy samowzbudnej 0. Nadrzędną pętlą sterującą jest układ kontroli napięcia kondensatora obwodu pośredniczącego.

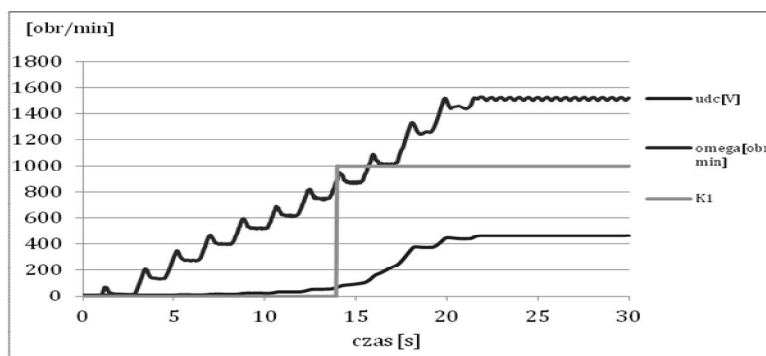


Rys. 2. Schemat układu sterowania samowzbudną prądnicą synchroniczną

W przedstawionym układzie sterowania informacje na temat wartości prędkości obrotowej i bieżącego kąta położenia wirnika pochodzą z pomiaru napięć sinusoidalnie zmiennych na wyjściu prądnicy (u_a, u_b, u_c). Badając przejścia wartości napięć przez zero uzyskuje się informacje o częstotliwości i prędkości obrotowej generatora. Z tego powodu nie ma potrzeby stosowania dodatkowych środków obliczeniowych w postaci symulatorów programowych

lub obserwatorów stanu maszyny. Działanie układu energoelektronicznego z prądnicą synchroniczną w skrócie przedstawiono poniżej.

Aby można było załączyć i wysterować synchroniczną prądnicę przekształtnikową należy wstępnie naładować kondensatory obwodu pośredniczącego falownika. Żeby było to możliwe musi załączyć się łącznik sterowany odpowiednio wysoką wartością napięcia stałego U_{DC} .

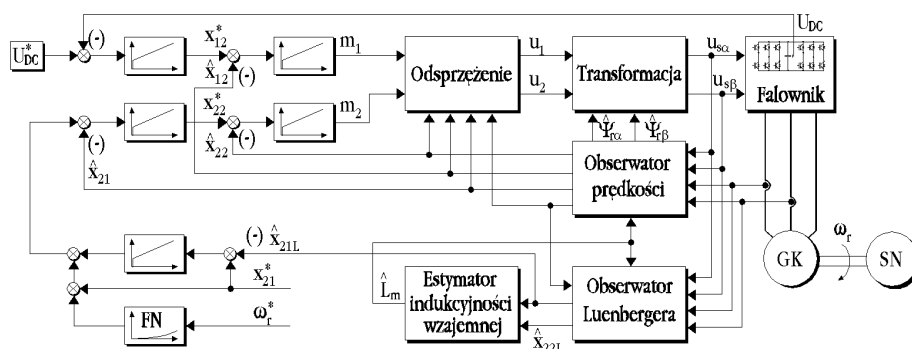


Rys. 3. Proces ładowania kondensatorów obwodu pośredniczącego DC przekształtnika dwukierunkowego współpracującego z prądnicą synchroniczną

Stan pracy łącznika oznaczono na rysunku 3 jako K1. Przyjęto, że wartość informująca o stanie załączenia łącznika w stanie otwartym wynosi 0, a w stanie zamkniętym 1000. W analizowanym układzie stycznik załącza się, gdy prędkość obrotowa prądnicy synchronicznej osiąga około 885 obr/min. Wraz ze zwiększaniem prędkości wirowania prądnicy, zwiększeniu ulega również wartość napięcia stałego obwodu pośredniczącego oznaczona jako u_{dc} . Poprzez odpowiedni algorytm sterowania wykonywany w procesorze DSP i układzie Altera FPGA, możliwe jest podniesienie napięcia stałego do ok. 690 V od momentu załączenia stycznika ładującego kondensatory obwodu pośredniczącego. Istotną zaletą omawianego układu jest brak ładowania wstępnego kondensatorów ze źródeł zewnętrznych.

2.2. Sterowanie prądnicą asynchroniczną klatkową

Do prawidłowej pracy w układzie równoległym asynchroniczna prądnica klatkowa wymaga odpowiedniej metody sterowania. W proponowanym układzie wykorzystano model multiskalarny maszyny indukcyjnej klatkowej działający bezczujnikowo [3]. Model ten został zaimplementowany w programie procesora DSP i jest główną częścią obserwatora stanu maszyny klatkowej pracującym współbieżnie z generatorem indukcyjnym. Główną zaletą stosowania zmiennych multiskalarnych jest fakt, że są one niezależne od wybranego układu współrzędnych.



Rys. 4. Schemat układu sterowania prądnicą asynchroniczną opracowany w oparciu o model multiskalarny

Nadrzędnym zadaniem układu sterowania prądnicą klatkową jest utrzymanie stałej, zadanej wartości napięcia stałego w obwodzie pośredniczącym. W tym celu konieczne jest odsprężone sterowanie maszyną tak, by w sposób niezależny sterować składową bierną prądu (magnesującą silnik) i składową czynną odpowiedzialną za ładowanie kondensatorów obwodu pośredniczącego. Osiąga się to poprzez wykorzystanie zmiennych multiskalarnych, które pozwalają na wyznaczenie niemierzalnych zmiennych stanu maszyny co pozwala na wyznaczanie prędkości obrotowej i kąta obrotu wirnika.

Wartość napięcia stałego w obwodzie pośredniczącym przekształtnika dwukierunkowego jest porównywana z wartością wynikającą z pomiaru przez czujnik napięcia LEM. Sygnał różnicy trafia do regulatora prędkości, który na wyjściu określa zadaną wartość x_{12} proporcjonalną do momentu elektromagnetycznego. Wartość zadana przez regulator jest porównywana z wartością obliczoną przez obserwator a różnica sygnałów trafia do regulatora, który na wyjściu wypracowuje sygnał o wartości m_1 . Jest to wartość sterująca w odsprężonym podsystemie mechanicznym. Wartość x_{21} jest z kolei kwadratem strumienia wirnika. Sygnał różnicy wartości zadanej i rzeczywistej kierowany jest do regulatora strumienia. Ten wypracowuje sygnał zadany x_{22} , który jest iloczynem skalarnym wektorów strumienia magnetycznego wirnika i prądu stojana. Różnica wartości zadanej x_{22} i wartości rzeczywistej trafia do regulatora, który wypracowuje sygnał m_2 , która podobnie jak m_1 jest wartością sterującą w odsprężonym podsystemie mechanicznym. Wielkości u_1 i u_2 sterują nieliniowymi podsystemami i po transformacji otrzymuje się składowe wektora napięcia wyjściowego falownika w układzie α - β .

W przypadku maszyny asynchronicznej niezbędne jest wstępne naładowanie kondensatora obwodu pośredniczącego ze źródła zewnętrznego takiego jak np. samowzbudna prądnica synchroniczna.

Wielkości użyte do sterowania multiskalarnego opisane są poniższymi zależnościami [3]:

$$\begin{aligned}x_{11} &= \omega_r \\x_{12} &= \psi_{rx} i_{sy} - \psi_{ry} i_{sx} \\x_{21} &= \psi_r^2 \\x_{22} &= \psi_{rx} i_{sx} + \psi_{ry} i_{sy}\end{aligned}\quad (1)$$

gdzie: ω_r - prędkość obrotowa wału prądnicy, ψ_{rx} - strumień wirnika w osi x, ψ_{ry} - strumień wirnika w osi y, i_{sx} - prąd stojana w osi x, i_{sy} - prąd stojana w osi y.

Dodatkowe równanie ruchu mechanicznego uzupełnia matematyczny opis maszyny, który w formie zdyskretyzowanej zakodowany jest w algorytmie obserwatora Luenbergera i odpowiada za wyznaczanie wartości prędkości obrotowej oraz wartości kąta położenia wirnika generatora w układzie bezczujnikowym.

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - T_L) \quad (2)$$

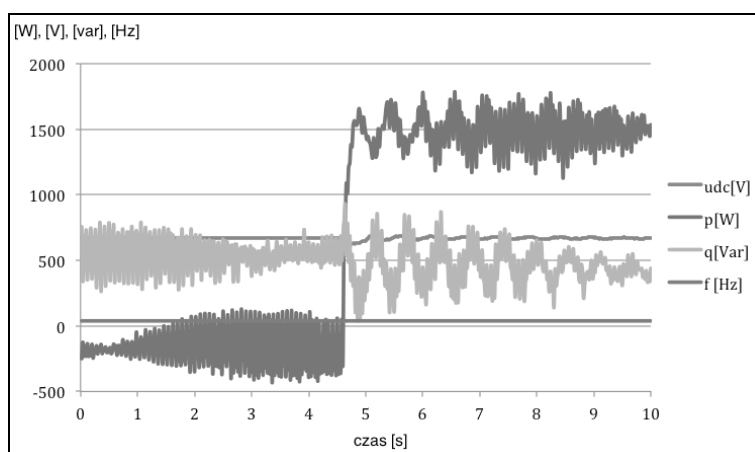
gdzie: J - moment bezwładności wirnika, T_e - moment elektromagnetyczny, T_L - moment na wale maszyny.

Ze względu na konieczność stosowania sterowania odsprężonego nie jest możliwe zastosowanie prostych metod pomiarowych służących do wyznaczania prędkości obrotowej wału. Powoduje to konieczność stosowania różnego typu metod sterowania wektorowego lub multiskalarnego prądnicy asynchronicznej klatkowej. Dostępne są również inne skuteczne metody sterowania prądnicą asynchroniczną takie jak np. FOC z obserwatorem stanu.

2.3. Sterowanie przekształtnikami sieciowymi

Falowniki przekazujące energię z kondensatorów obwodów pośredniczących falowników maszynowych do okrętowej sieci elektroenergetycznej zapewniają pracę w dwóch trybach pracy. W przypadku pracy pojedynczej prądnicy falownik sieciowy ma za zadanie kontrolę i regulację amplitudy i częstotliwości napięcia. W momencie gdy zaistnieje potrzeba załączenia i zsynchronizowania kolejnej prądnicy do pracy równoległej algorytm ulega zmianie. Częstotliwość falownika sieciowego prądnicy dołączanej regulowana jest w sposób automatyczny tak by zrównać swoją wartość z częstotliwością prądnicy (lub prądnic) włączonych na szyny. Podobnie dzieje się z amplitudą napięcia wyjściowego. Gdy zostają spełnione warunki synchronizacji następuje załączenie włącznika prądnicy i układ prądnica-przekształtnik zaczyna pracować równoległe z innymi źródłami załączonymi do sieci. W chwili załączenia

algorytm sterujący pracą przekształtnika zmienia się pod wpływem sygnału informującego o załączeniu na szyny i układ zaczyna pracować w programie realizującym rozdział mocy czynnej i biernej. Do prawidłowego działania regulatorów rozdziału mocy niezbędna jest ciągła informacja o częstotliwości napięcia w sieci. W prezentowanym rozwiązaniu do kontroli częstotliwości użyto programowego układu pętli fazowej PLL. W wyniku działania algorytmu PLL procesor sygnałowy uzyskuje informację o częstotliwości i kącie fazowym napięcia co pozwala na regulowanie wartościami amplitudy i przesunięcia fazowego napięcia wyjściowego.



Rys. 5. Przebiegi przedstawiające załączenie obciążenia czynnego w czasie pracy równoległej prądnicy asynchronicznej klatkowej (master) i synchronicznej (slave) i przejęcie obciążenia

Wartości mocy czynnej i biernej zadawane są przez program sterujący wykonywany przez procesor sygnałowy w czasie rzeczywistym w pracy równoległej. Prądnica „slave” realizująca procedurę rozdziału mocy przejmuje na siebie z góry założoną wartość obciążenia podczas gdy pozostała część (jeśli występuje) zabezpieczona jest przez drugą prądnicę oznaczoną jako „master”.

3. WNIOSKI KOŃCOWE

Zaprezentowany układ pozwala na swobodny rozdział mocy czynnej i biernej i długotrwałą współpracę źródeł energii elektrycznej takich jak generatory elektryczne różnych typów pracujące ze zmiennymi prędkościami obrotowymi. Badania prowadzone w Akademii Morskiej w Szczecinie obejmują również testy symulacyjne proponowanego układu prowadzone w środowisku języka C++. Dalsze prace obejmą badania stabilności prezentowanych układów w warunkach szybkich zmian obciążeń w całym zakresie mocy.

LITERATURA

- [1] Orłowska-Kowalska T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2003. ISBN 83-7085-738-8.
- [2] T4500 Auto Synchronizer [online]. SELCO A/S [dostęp 29 grudnia 2014]
Dostępny w Internecie:
<http://www.dijkman.com/bestanden/bijlagen/t4500_data_sheet.pdf>
- [3] Krzemiński Z., *Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi*, Gdańsk, ely.pg.gda.pl, 2000 [dostęp 05.01.2015]. Dostępny w Internecie:
<<http://www.ely.pg.gda.pl/kane/Monografia.pdf>>
- [4] Self-regulating alternators series btp3 Operating and maintenance instructions [online]. Mecc alte, 2011 [dostęp 01.01.2015]. Dostępny w Internecie:
<http://www.meccalte.com/send_file.php?fileid=BTP3%20manuale>
- [5] Przemiennik częstotliwości MMB005 IM, instrukcja użytkownika, Gdańsk 2014, MMB Drives Sp. z o.o.
- [6] Fatu M., Blaabjerg F., Boldea I., Grid to Standalone Transition Motion-Sensorless Dual-Inverter Control of PMSG With Asymmetrical Grid Voltage Sags and Harmonics Filtering, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume 29 Issue 7, pages 3463 – 3472, ISSN 0885-8993.
- [7] Kozak M., Zawirski K., Starting Operation of Induction Squirrel Cage Generator Rotating with Variable Speed, 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010, Ohrid, September, 2010.

SELECTED ISSUES RELATED TO DSP-FPGA CONTROLLED INVERTERS AND ELECTRICAL GENERATORS CONNECTED IN PARALLEL TO SHIP'S ELECTRICAL GRID

The paper covers theoretical background and chosen experimental results for solid-state converters working in parallel with two different kind of electrical generators connected to ship electrical grid. Asynchronous cage generator along with synchronous generator are connected with ships grid throu line side VSC inverters. Appropriate control algorithm of digital signal processor DSP and field-programmable gate array FPGA is used to achieve active and reactive power distribution.