

Mikrosieć okrętowa dla jednostek z napędem żaglowym

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję mikrosieci okrętowej DC-AC dla jednostek żaglowych integrującej kilka lokalnych generatorów energii, na które składają się: generator zespolony z napędem pomocniczym jednostki, generatory napędzane turbinami wodną i wiatrową oraz współpracujący z panelem fotowoltaicznym. Zakłada się, że projektowane rozwiązanie systemu zasilania charakteryzować się będzie wysokim stopniem automatyzacji oraz znaczną niezawodnością pracy. Autorzy rozpatrują również możliwość zastosowania w charakterze napędu pomocniczego jednostki wolnobieżnego silnika elektrycznego PMSM napędzającego śruby (śruby okrętowe) pracujące w układzie przeciwbieżnym. W artykule przedstawiono strukturę sieci oraz scharakteryzowano niektóre rozwiązania szczegółowe zastosowane dla jej realizacji.

Abstract. The article presents the concept of a ship DC-AC microgrid designed for sailing units and integrating several local power generators in the form of: a generator combined with auxiliary drive of the ship, generators powered by wind and water turbines and a generator using photovoltaic panel. The proposed solution is characterized by a high degree of automation of operations and significant reliability of work. The authors also examine the possibility of using as an auxiliary drive unit low-speed PMSM driving thrusters (screw propellers) working in an opposite mode. The paper presents the structure of network and characterizes some of specific solutions used for its implementation. (**A ship microgrid for sailing vessels**).

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii (OZE), napęd elektryczny, przekształtnik, żaglowe jednostki pływające.

Keywords: converter, electric drive, renewable energy sources, sailing vessels.

doi:10.12915/pe.2014.09.12

Wstęp

Wszystkie większe jednostki pływające wymagają posiadania elektrycznej sieci okrętowej służącej zasilaniu urządzeń wykorzystywanych do realizacji różnorodnych zadań, tj.: nawigowania i sterowania jednostką, realizacja napędu (pomocniczego) czy też funkcji związanych z usprawnieniem życia codziennego załogi. Szczególnym typem jednostek pływających są te, które, wykorzystując energię wiatru, służą żeglowności. Specyfika realizacji zasilania sieci elektrycznej polega tutaj na wykorzystaniu pokładowej baterii akumulatorów ładowanej w czasie działania napędu pomocniczego jednostki – np. silnika spalinowego, z którym zespolona jest określonego typu prądnica (np. w przypadku mniejszej wymaganej mocy – alternator). Istnieją wprawdzie rozwiązania wspomagające proces ładowania baterii [3] w czasie nie działania napędu pomocniczego w postaci minigeneratorów wiatrowych lub bazujących na fotowoltaice lecz rzadkością są rozwiązania umożliwiające wykorzystanie do ładowania baterii jednocześnie wszystkich aktualnie dostępnych na akwenach wodnych tzw. odnawialnych źródeł energii (OZE) – wiatru, promieniowania słonecznego i wody (w czasie ruchu jednostki).

Przedmiotem artykułu jest mikrosieć okrętowa integrująca wszystkie elementy wytwarzające energię elektryczną, bazująca na aktualnie dostępnych OZE oraz generatorze elektrycznym sprzężonym z silnikiem napędowym jednostki. Energia ta magazynowana jest następnie w lokalnej baterii akumulatorów i wykorzystywana do zasilania odbiorników. Okrętowa sieć prądu stałego rozszerzona jest o 1- lub 3-fazową (ew. specjalną) sieć prądu przemiennego. Rozpatruje się również zastosowanie w jednostce, jako napędu pomocniczego, silnika elektrycznego. Zarządzanie pracą poszczególnych elementów systemu zintegrowane jest w centralnym module sterowania.

Omawiane rozwiązanie jest przedmiotem prac prowadzonych w Zakładzie Energoelektroniki i Sterowania Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej PP.

Struktura sieci

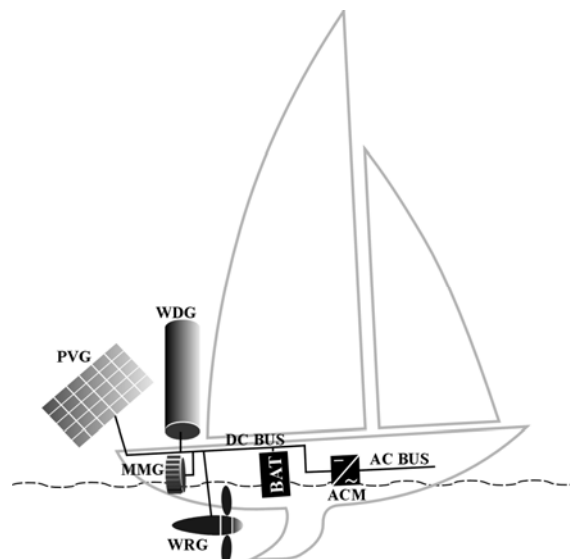
W odniesieniu do struktury sieci autorzy rozpatrują dwa główne warianty jej rozwiązań – zależne od typu napędu pomocniczego jednostki – w postaci:

a) silnika spalinowego – rozwiązanie stosowane dominująco na jednostkach pływających,

b) silnika elektrycznego – rozwiązanie jeszcze stosunkowo rzadko spotykane [5, 8].

W odniesieniu do p. a) na całkowitą strukturę sieci składają się następujące elementy (rys. 1):

- sieć prądu stałego (DC BUS) – sprzęgająca wszystkie elementy systemu generujące energię elektryczną,
- moduł generatora (MMG) sprzężonego z silnikiem napędowym jednostki,
- moduł generatora (WDG) sprzężonego z turbiną powietrzną przy czym preferowane jest rozwiązanie turbiny z pionowym wirnikiem,
- moduł generatora (WRG) sprzężonego z turbiną wodną [7, 9, 14],
- moduł fotowoltaiczny (PVG),
- bateria akumulatorów (BAT) – opcjonalnie uzupełniona o superkondensator,
- moduł przekształtnika (ACM) dla realizacji sieci prądu przemiennego (AC BUS).



Rys.1. Poglądowe rozmieszczenie poszczególnych elementów sieci elektrycznej na jednostce żaglowej

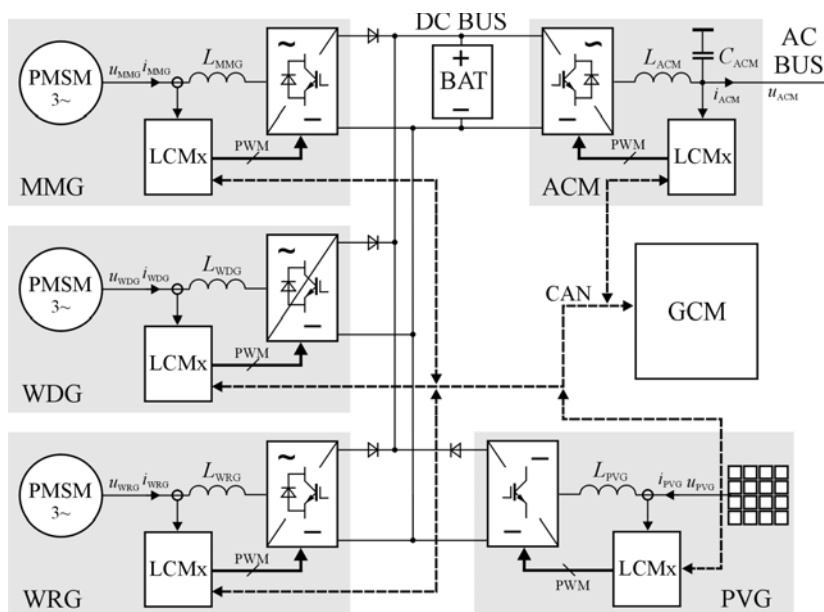
W przypadku rozwiązania podanego w p. b) silnik napędowy pełni – w czasie żeglowności – rolę generatora, realizując funkcję bloku MMG. W czasie wykorzystywania do napędu jednostki silnika jego źródłem energii staje się

bateria akumulatorów. W przypadku mniejszych jednostek (np. jachtów pełnomorskich typu zbliżonego do Bavaria Cruiser 56 [11]) sieć prądu przemiennego realizowana jest, jako 1-fazowa (230 V/ 50 Hz), a w przypadku jednostek większych, jako 3-fazowa ew. przybrać ona może jeszcze inną złożoną formę.

Rozwiązania szczegółowe zastosowane do realizacji sieci

Ogólny schemat blokowy sieci pokazano na rys. 2. Poszczególne bloki odpowiadają funkcjonalnie elementom wymienionym w rozdziale poprzednim.

W blokach MMG, WDG i WRG w roli generatorów zastosowano maszyny typu *permanent magnet* [1, 10,13]. Ich wykonanie (ACM, DCM) zależy m.in. od projektowanej mocy wyjściowej bloku. Wszystkie bloki posiadają lokalne



Rys. 2. Schemat blokowy sieci

sprężenia zwrotne od określonej wielkości wyjściowej bloku (tj. prądu lub napięcia). Sposób sterowania przekształtnikami w blokach MMG, WDG, WRG i PVG jest tego typu, że realizują one funkcję sterowanych źródeł prądu [6]. Przekształtniki w blokach MMG, WDG, WRG w przypadku zastosowania maszyny PMG w wykonaniu ACM są prostownikami aktywnymi. Do współpracy z panelem solarnym służy przetwornica DC/DC typu boost, pracująca w konfiguracji *interleaved converter*. Wyjścia poszczególnych bloków dołączone są, poprzez indywidualne diody, do wspólnej szyny (dodatniej) obwodu DC.

Przekształtnik zastosowany w bloku ACM realizuje funkcje sterowanego źródła napięcia [6] o quasi-sinusoidalnym napięciu wyjściowym. Wszystkie przekształtniki pracują w trybie PWM. W przypadku większych jednostek przewiduje się zastosowanie modułu PV z automatycznym pozycjonowaniem wobec źródła energii promienistej – słońca.

Poszczególne bloki posiadają lokalne moduły sterowania (LCMx) przekształtnikami znajdującymi się w danym bloku. Globalny moduł sterowania i nadzoru (GCM) realizuje funkcje nadrzędnego algorytmu sterowania poszczególnymi blokami systemu, wykorzystując (zasadniczo) różne warianty algorytmów MPPT [7, 9, 15]. Blok ten realizuje również funkcję sterowania procesem ładowania baterii akumulatorów.

Wymiana danych pomiędzy blokami LCMx, a modulem GCM odbywa się poprzez sieć CAN.

Zastosowanie napędu elektrycznego

Intensywny w ostatnich latach rozwój technologii morskich, wykorzystywanie nowych materiałów oraz coraz ostrzejsze kryteria dotyczące ochrony środowiska – zwłaszcza na mniejszych i zamkniętych akwenach wodnych – narzucają konieczność zastępowania klasycznych napędów spalinowych napędami elektrycznymi. Mają one istotną zaletę polegającą na posiadaniu dużo większej sprawności energetycznej od napędów spalinowych. Barierą w ich rozpowszechnianiu są natomiast jeszcze stosunkowo ograniczone pojemności zasobników energii elektrycznej jakkolwiek, od wielu lat uwidacznia się i tutaj znaczący postęp techniczno-technologiczny, zmniejszający wagę tej niewątpliwiej niedogodności napędu elektrycznego.

Skrajnym przykładem ultranowoczesnego rozwiązania jednostki pływającej z napędem elektrycznym i zasilaniem bazującym na OZE, jakkolwiek nie posiadającej napędu żaglowego, może być MS *Tûranor PlanetSolar* – jeden z największych na świecie katamaranów z zasilaniem fotowoltaicznym (rys. 3) [12], który zaprojektowano na Nowej Zelandii. Wyposażono go w 38 tysięcy ogniw słonecznych, których łączna powierzchnia wynosi 537 metrów kwadratowych. Produkowana przez nie energia zasila cztery silniki elektryczne, dzięki którym katamaran może uzyskać prędkość do 14 węzłów (ok. 26 km/h). Prędkość marszowa wynosi 7,5 węzła (ok. 14 km/h). Przykład ten pokazuje ogromne możliwości niekonwencjonalnego zasilania i napędu jednostek pływających.

Obecnie (2014) MS *Tûranor PlanetSolar* użytkowany jest przez Uniwersytet w Genewie, jako pływające laboratorium badań morskich.

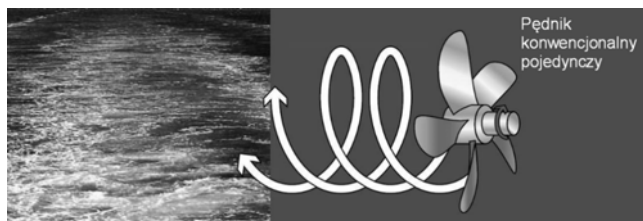
Zakres prowadzonych przez autorów artykułu prac przewiduje zastosowanie do realizacji napędu pomocniczego jednostki żaglowej mającego wiele zalet 3-fazowego wolnoobrotowego silnika elektrycznego typu PMSM z (quasi-)sinusoidalnym przebiegiem sem. (np. [4]). Zalety te okupione są, co prawda, dużą złożonością algorytmu sterowania (np. [2]) jednak, przy zastosowaniu wydajnego obliczeniowo układu sterującego dedykowanego ponadto aplikacjom w energoelektronice (np. [16]), nie stanowi to istotnego problemu technicznego ani ekonomicznego.



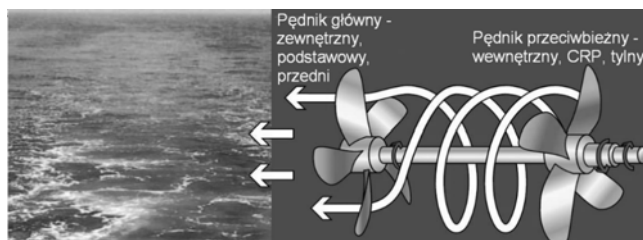
Rys.3. MS *Tûranor PlanetSolar*

Docelowo przewiduje się również badania napędu w wersji z pędnikami (śrubami) pracującymi przeciwbieżnie. Przykład rozwiązania napędu tego typu pokazano na rys. 4b.

a)



b)



Rys.4. Ilustracja zasady działania napędu konwencjonalnego (rys. a) oraz jednego z możliwych rozwiązań napędu ze śrubami w układzie przeciwbieżnym (rys. b) – wg [8]

Daje ono m.in. wzrost sprawności mechanicznej, mniejsze negatywne oddziaływanie na środowisko wodne oraz stabilniejszy bieg jednostki pływającej – zwłaszcza o mniejszej wyporności.

Realizacja praktyczna sieci

Trwające obecnie prace studyjne dotyczą rozwiązań sieci okrętowej przy zastosowaniu maszyn elektrycznych typu *permanent magnet* zarówno w wykonaniu AC (3-fazowym), jak i DC [1, 10]. Zakładana całkowita sumaryczna moc generatorów w wersji prototypowej sieci jest rzędu 1+2 kW. Napięcie nominalne baterii akumulatorów wynosi 96 V. Jakkolwiek podane wartości nominalne parametrów sieci są, z konieczności, ograniczone to jednak przewiduje się, że zaprezentowana idea sieci może być rozszerzona na różne warianty jej realizacji (związane głównie z wielkością jednostki pływającej i niezbędną mocą jej zasilania). W tym kontekście pewne rozwiązania elementów projektowanej sieci – zastosowane w trakcie badań laboratoryjnych jej prototypu – mogą być nadmiarowe, np. w stosunku do aktualnych mocy odbiorników.

Realizacja lokalnych układów sterowania (LCMx) bazuje na nowoczesnych procesorach Analog Devices Inc. rodziny Blackfin® ADSP-BF504F [16] do zastosowań w m.in. energoelektronice. Moduł główny wykorzystuje komputer przemysłowy typu PC w wersji mini-ITX z kartą rozszerzeń funkcjonalnych w standardzie PCIe również z procesorem Blackfin.

Podstawowy wariant wykonania części silnoprądowej przewiduje zastosowanie modułów IPM IGBT MITSUBISHI ELECTRIC, a wariant docelowy – hybrydowych modułów Z-IPM [17] opartych na technologii SiC firmy CREE. Moduły te – przeznaczone do zastosowań w układach badawczo-rozwojowych i specjalnego przeznaczenia – zaprojektowano w firmie ALFINE-TIM. Zakłada się, że ich zastosowanie pozwoli podnieść sprawność, zmniejszyć gabaryty i poprawić niezawodność pracy części silnoprądowej bloków.

Podsumowanie

Zaproponowane rozwiązanie mikrosieci okrętowej dla jednostek żaglowych pozwala na efektywną integrację dostępną na akwenach wodnych źródeł bazującej na źródłach odnawialnych. Dzięki temu rośnie efektywność zaopatrywania w energię jednostki, co pozwala jej na większą niezależność tak od lokalnych warunków

meteorologicznych, jak i minimalizuje zużycie paliwa związane z koniecznością zasilania generatora zespolonego z pomocniczym napędem spalinowym.

Kolejnym krokiem ku minimalizacji niekorzystnego oddziaływania jednostki na lokalne środowisko (emisja spalin, hałas) jest zastosowanie do realizacji napędu pomocniczego silnika elektrycznego. Pozwala on na zwiększenie komfortu podróżowania jednostką i jej eksploatacji – zwłaszcza na małych akwenach wodnych. Dodatkowo, wykorzystanie pędników (śrub) w nietypowej konfiguracji pracy, tj. pracujących przeciwbieżnie umożliwia dalszą poprawę określonych parametrów jednostki.

LITERATURA

- [1] Hu W., Jiaotong X., Xian Y. W., Song X., Wang Z., Development of wind turbine simulator for wind energy conversion systems based on permanent magnet synchronous motor, *Electrical Machines and Systems, ICEMS 2008*, 2322-2326
- [2] Genduso F., Miceli R., Rando C., Galluzzo G.R., Back EMF Sensorless Control Algorithm for High Dynamic Performance PMSM, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.57, No.6 (2010), 2092-2100
- [3] Soto J. L. F., Seijo R. G., Formoso J. A., Iglesias G., Couce L. C., Alternative Sources of Energy in Shipping, *Journal of Navigation*, Vol. 63, No. 1-2 (2010), 435-448, doi:10.1017/S0373463310000111 [dostęp: 05.2014]
- [4] Rudnicki T., Czerwieński R., Fryc A., Układy sterowania silnikiem PMSM, *KOMEL: Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 90 (2011), 51-55
- [5] Spagnolo G. S., Papalillo D., Martocchia A., Makary G., Solar-Electric Boat, *Journal of Transportation Technologies*, No 2 (2012), 144-149: <http://dx.doi.org/10.4236/jtts.2012.22015> [dostęp: 05.2014]
- [6] Gwóźdź M., Power Electronics Wide Band Controlled Current and Voltage Sources Based on Multi-channel Inverters, (in polish), *Przegląd Elektrotechniczny*, No 10A (2012), 132-134.
- [7] Krystkowiak M., Gulczyński A., Budowa oraz algorytm sterowania przekształtnika energoelektrycznego zaimplementowanego w niekonwencjonalnym systemie mini elektrowni wodnej dedykowanej dla jednostek jachtowych, *Poznan University of Technology Academic Journals*, Issue 80 (2014), 27-34
- [8] SZYMCZAK P., BARAŃSKI J., WAWROWICZ M., PRAJZENDANC P., Wybrane rozwiązania energooszczędnych napędów do obiektów nawodnych i podwodnych, *Materiały VIII Konferencji – i-MITEL 2014*, Lubniewice, 09-11.04.2014
- [9] Krystkowiak M., Gulczyński A., Budowa i zasada działania modelu eksperymentalnego mini elektrowni wodnej dedykowanej dla jednostek jachtowych, *Postępy w Elektrotechnice Stosowanej PES-9 2014* (w druku)
- [10] <http://all-renewable-energy.blogspot.com/2010/02/pmsmbldc-as-generators-in-renewable.html> [dostęp: 05.2014]
- [11] <http://www.bavariayachts.com/bavaria-cruiser-56.php> [dostęp: 05.2014]
- [12] <http://www.designboom.com/technology/ms-turanor-planetsolar-worlds-largest-solar-powered-boat/> [dostęp: 05.2014]
- [13] <http://www.komel.katowice.pl/pdf/instrukcja%20JSW.pdf> [dostęp: 05.2014]
- [14] http://www.zagle.com.pl/wydarzenia/nagrody-gwozdzietargow-wiatr-i-woda-2014-przyznane,1_12338.html [dostęp: 06.2014]
- [15] <http://www.ti.com/lit/an/slva446/slva446.pdf> [dostęp: 05.2014]
- [16] Analog Devices Inc. Blackfin® processors: <http://www.analog.com/en/processors-dsp/blackfin/products/index.html> [dostęp: 05.2014]
- [17] Z-IPM, Preliminary Technical Note, ALFINE-TIM, 05.2014: <http://analog.alfine.pl/oferta/produkty-alfine> [dostęp: 05.2014]

Autorzy: dr hab. inż. Michał Gwóźdź, dr inż. Michał Krystkowiak, mgr inż. Adam Gulczyński, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: Michal.Gwozdz@put.poznan.pl; Michal.Krystkowiak@put.poznan.pl; Adam.Gulczynski@put.poznan.pl.