ELEKTROTECHNIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ELECTRICAL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-E/2012
ZESZYT 24
ROK 109
ISSUE 24
YEAR 109

TOMASZ WĘGIEL, DARIUSZ BORKOWSKI*

PROTOTYPOWY UKŁAD PRZETWARZANIA ENERGII DLA EFEKTYWNIEJSZEGO WYKORZYSTYWANIA POTENCJAŁU ENERGETYCZNEGO MEW

PROTOTYPE SET FOR HIGHER EFFICIENCY OF ENERGETIC POTENTIAL EXPLOITATION IN SHP

Streszczenie

Pełniejsze wykorzystać potencjału energetycznego wody jest możliwe przez zastosowanie technologii przetwarzania energii przy zmiennej prędkości obrotowej. W artykule przedstawiono koncepcję takiego systemu przetwarzania energii pod kątem zastosowania w prototypowej małej elektrowni wodnej (MEW), bazującego na generatorze z magnesami trwałymi zintegrowanym z turbiną śmigłową. Taki generator może pracować przy zmiennej prędkości obrotowej, jednak wymaga zastosowania energoelektronicznego układu przekształtnikowego w celu dopasowania parametrów produkowanej energii elektrycznej do wymagań sieci elektroenergetycznej. W artykule przedstawiono szczegółowy opis elementów prototypowych koncepcyjnej MEW, takich jak generator oraz przekształtnikowy układ generacyjny.

Słowa kluczowe: małe elektrownie wodne, turbina śmigłowa, generator z magnesami trwałymi

Abstract

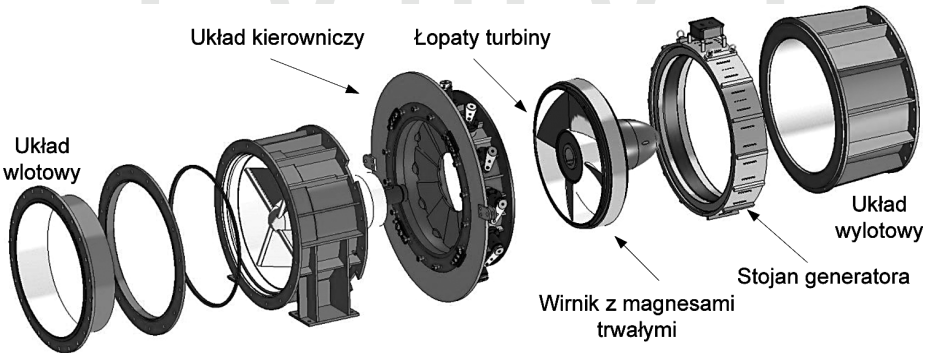
Full efficiency of energy conversion in small hydropower plants (SHP) can be achieved for power technology with generators working at a variable speed. This paper presents a concept of a energy conversion system dedicated for application in a prototype SHP which is based on a permanent magnet (PM) generators with a propeller turbine integrated with the generator rotors. These PM generators can work at a variable speed and therefore energy produced by the PM generators have to be converted by means of a power electronic unit to fit to the three-phase power grid parameters. The elements of such SHP like PM generator and power electronic unit are described in details.

Keywords: small hydropower plants, propeller turbine, PM generator

* Dr inż. Tomasz Węgiel, dr inż. Dariusz Borkowski, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Praca turbin wodnych o tradycyjnych konstrukcjach przy maksymalnych wartościach sprawności i jednoczesnym utrzymaniu stałej prędkości obrotowej dla zmieniających się warunków hydrologicznych rzeki jest możliwa dzięki specjalnym układom sterowania układem kierowniczym oraz kątem ustawienia łopat. Taki system podwójnej regulacji jest układem mechanicznym stosunkowo złożonym i kosztownym zarówno w budowie, jak i w eksploatacji. Uproszczenia mechanicznego systemu regulacji turbin przez zastosowanie jedynie pojedynczej regulacji w układzie otwarcia kierownicy, jak w turbinach śmigłowych, prowadzą do znacznego obniżenia kosztów budowy i eksploatacji, lecz nie zapewniają uzyskiwania optymalnych wartości sprawności przy fluktuacjach przepływu, jak również spadu. Rozwiązaniem tego problemu jest odejście od, przyjmowanej powszechnie w MEW, zasady utrzymywania stałej prędkości obrotowej generatora. Generacja energii elektrycznej przy zmiennej prędkości obrotowej generatorów wymaga zastosowania odpowiedniego układu energoelektronicznego dopasowującego parametry wytwarzanej energii do wymagań sieci elektroenergetycznej. Dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie w układach generacji przy zmiennej prędkości obrotowej, coraz popularniejszego i niewymagającego przekładni, wolnoobrotowego generatora z magnesami trwałymi (PMSG). Z kolei nowym korzystnym układem całego systemu przetwarzania energii jest hydrozespół, w których turbina śmigłowa o ustawionych na stałe łopatach jest zintegrowana z wirnikiem generatora o umieszczonych powierzchniowo magnesach trwałych. Tego typu aplikacje obecnie mają charakter eksperymentalny [1].



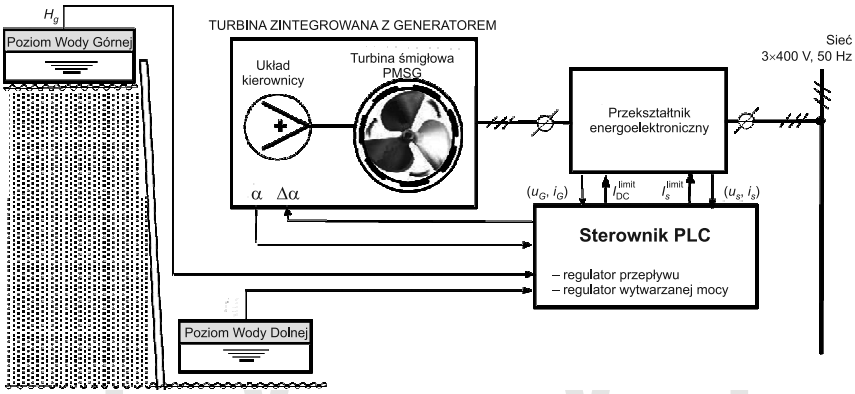
Rys. 1. Główne elementy zintegrowanego hydrozespołu

Fig. 1. Main elements of integrated hydro-set

Zintegrowany hydrozespół (rys. 1) składa się z dwóch zasadniczych elementów, tj. turbiny śmigłowej oraz generatora synchronicznego z magnesami trwałymi. W rozwiązaniach tego typu wirnik generatora z magnesami trwałymi jest nabudowany bezpośrednio na zewnętrznym pierścieniu turbiny i pracuje w całkowitym zanurzeniu w wodzie. Magnesy trwałe chronione są przed wodą za pomocą tulei niemagnetycznej, natomiast wodoszczelny od wewnątrz stojan generatora ma klasyczną budowę i umieszczony jest w obudowie całego hydrozespołu na zewnątrz głównego kanału przepływu wody. Turbina hydrozespołu jest

projektowana na zasadach indywidualnego dopasowania do warunków naturalnych rzeki. Podstawą doboru parametrów turbiny jest tzw. krzywa sum czasów trwania przepływów, wyznaczona na podstawie danych hydrologicznych dla danej lokalizacji. Jedynym elementem kontrolującym przepływ wody jest układ kierowniczy sterowany tak, aby zapewnić maksymalną produkcję energii, niezależnie od prędkości obrotowej. Kąt otwarcia aparatu kierowniczego zależy od aktualnych możliwości hydrologicznych, czyli bieżącej wartości przepływu Q.

Tego typu hydrozespoły w połączeniu z nowoczesnymi układami przekształtnikowymi dają możliwość przetwarzania energii przy dużej zmienności prędkości obrotowej [2–7], co ma szczególne znaczenie dla podniesienia ogólnej sprawności MEW (rys. 2) o niskich spadach pracujących na ciekach wodnych o dużych fluktuacjach przepływu.



Rys. 2. Główne elementy toru przetwarzania energii prototypowej MEW

Fig. 2. Main elements of power conversion for prototype SHP

W artykule przedstawiono wyniki prac związanych z opracowaniem i przebadaniem toru elektrycznego przetwarzania energii opartego na innowacyjnym rozwiązaniu generatora synchronicznego z magnesami trwałymi, dedykowanego dla planowanej przez Politechnikę Krakowską eksperymentalnej małej elektrowni wodnej (MEW) na rzece Dłubnia koło Krakowa.

2. Generator dla zintegrowanego hydrozespołu

Generator z magnesami trwałymi dla potrzeb integracji z turbiną śmigłową wymaga indywidualnego podejścia do procesu projektowania ze względu na specyficzne warunki pracy w wodzie oraz narzucone przez projektanta turbiny wymiary wewnętrzne wirnika. Rozwiązania podobne do opisywanego powyżej rozwijają firmy Turbinowa AS pod nazwą YETI [8] oraz VA TECH HYDRO pod nazwą Straflo Matrix. Są to najnowsze rozwiązania pozostające ciągle w fazie testów oraz instalacji prototypowych [1].

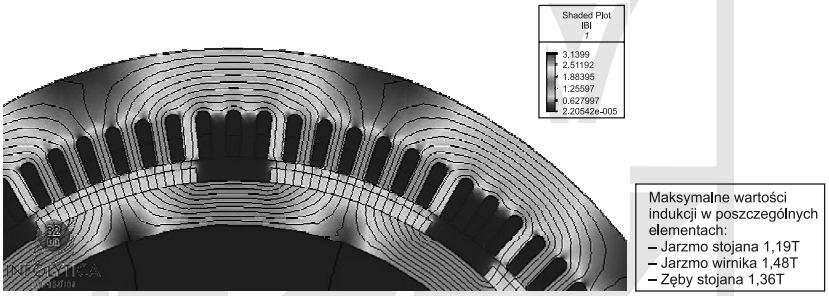
Z warunków hydrologicznych jazu, na którym ma powstać w przyszłości MEW firma CEDI oszacowała, że wymagany do zainstalowania generator wzbudzany magnesami trwa-

łymi powinien posiadać moc znamionową 30 kW przy prędkości obrotowej 600 obr/min., a obwód magnetyczny wirnika tego generatora powinien być nabudowany na pierścieniu w celu osadzenia turbiny śmigłowej o zewnętrznej średnicy 560 mm.

Prace projektowe miały charakter badawczo-rozwojowy i były prowadzone we współpracy Politechniki Krakowskiej z zespołem projektantów z EMIT Żychlin oraz CEDI. W wyniku tych prac zaprojektowano główne dane konstrukcyjne generatora:

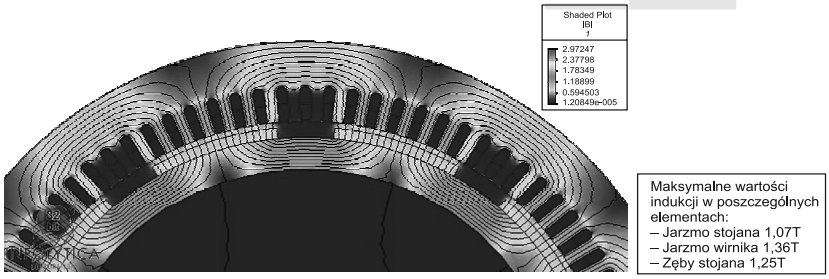
– średnica zewnętrzna stojana 850 mm,
– średnica wewnętrzna stojana 670 mm,
– liczba par biegunów $p = 5$,
– szczelina powietrzna nad magnesem 6 mm,
– długość pakietu 90 mm,
– 90 żłobków stojana (skos żłobków o 1 podziałkę żłobkową stojana),
– $Ns = 150\ zw$ ($U_N = 500$ V, $f = 50$ Hz),
– uzwojenie dwuwarstwowe, poskok zmienny (5, 7, 9),
– grubość magnesu 12 mm,
– rozpiętość jednego bieguna 25° (125° el.).

Ze względu na unikatową budowę generatora jego wykonanie zostało poprzedzone przeliczeniami z użyciem metod polowych w celu sprawdzenia wymiarów obwodu magnetycznego, doboru magnesów trwałych oraz określenia parametrów uzwojenia.



Rys. 3. Indukcja w stanie bezprądowym

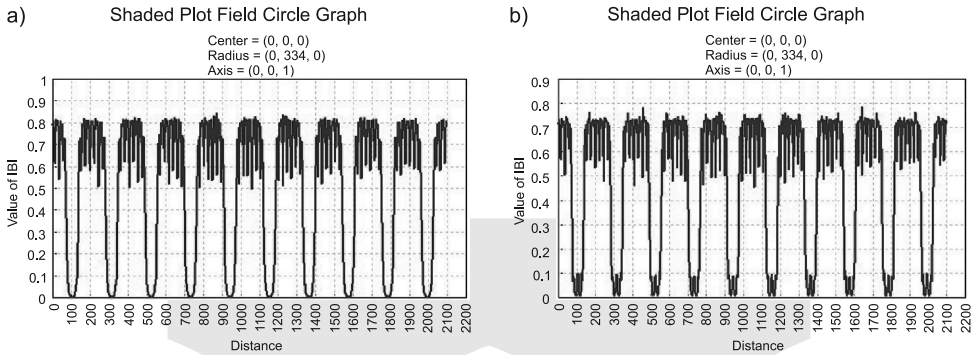
Fig. 3. Flux density for currentles conditions



Rys. 4. Indukcja w warunkach znamionowym

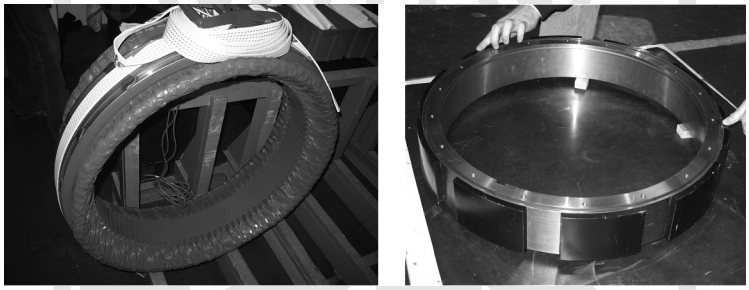
Fig. 4. Flux density for nominal conditions

Dla przyjętych następujących parametrów magnesów: Br = 1,2 T; Hc = 891 kA/m, μ_r = 1,07, przeprowadzono obliczenia polowe w celu oszacowania strumieni skojarzonych z uzwojeniami, a tym samym wartości indukowanej SEM w stanie jałowym oraz sprawdzenia wartości indukcji w elementach konstrukcyjnych maszyny (jarzma, zęby) i zbadania czy magnesy nie ulegają odmagnesowaniu w stanie znamionowym.



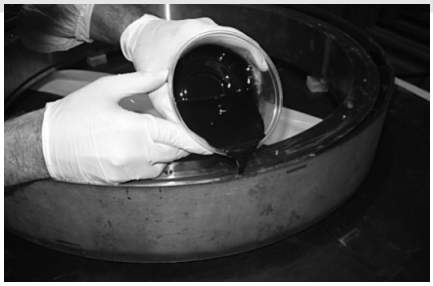
Rys. 5. Rozkład indukcji |B| w szczelinie powietrznej: a) stan bezprądowy, b) warunki znamionowe

Fig. 5. Flux density |B| in air gap: a) current-less state, b) nominal conditions



Rys. 6. Stojan i wirnik prototypowego generatora

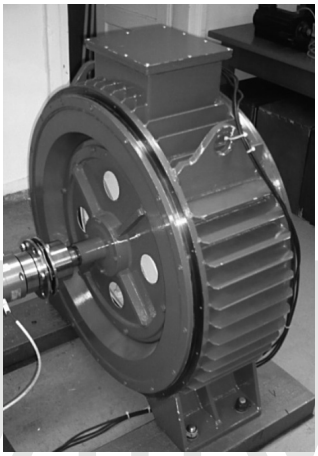
Fig. 6. Stator and rotor of prototype generator



Rys. 7. Uszczelnianie magnesów żywicą

Fig. 7. Siling of magnets by resin

Analizując wyniki symulacji polowych uzyskanych za pomocą programu MagNet, wyznaczono wartość siły elektromotorycznej (międzyfazowej) w stanie jałowym (E = 540 V) i udowodniono, że wartości indukcji w elementach konstrukcyjnych generatora (rys. 3, 4) mieszczą się w granicach prawideł projektowych maszyn elektrycznych i nie będzie dochodzić do znacznego odmagnesowania magnesów pod wpływem oddziaływania twornika (rys. 5).



Rys. 8. Złożony generator przygotowany do badań
Fig. 8. Assembled generator ready to tests

Generator został wykonany w fabryce maszyn elektrycznych EMIT w Żychlinie, a podczas procesu produkcyjnego należało się zmierzyć z pewnymi nietypowymi zagadnieniami dotyczącymi klejenia magnesów oraz uszczelnienia.

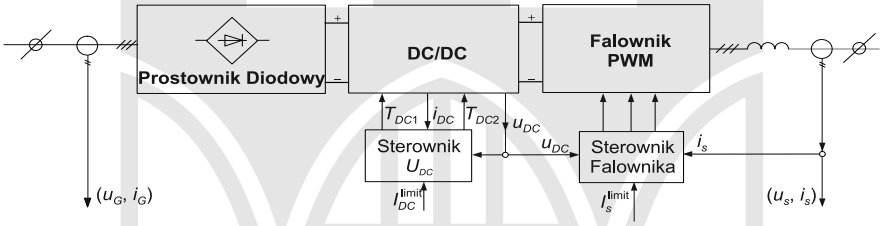
3. Przekształtnikowy układ generacyjny

Zintegrowany hydrozespół jest przewidziany do pracy przy prędkościach obrotowych zmiennych w stosunkowo dużym przedziale od 40% do 130% prędkości znamionowej. W takich warunkach wytwarzana zostaje energia elektryczna o zmiennej częstotliwości oraz zmiennej wartości napięcia stąd powstaje konieczność zastosowania układu przekształtnikowego, aby dopasować parametry produkowanej energii do wymagań sieci elektroenergetycznej.

Na rynku istnieją gotowe rozwiązania układów energoelektronicznych, przekształcających parametry energii elektrycznej, które mogą być wykorzystane w MEW. Jednym z takich układów jest opracowany przez firmę TWERD przekształtnikowy układ generacyjny (rys. 9) złożony z prostownika diodowego (AC/DC), układu podwyższająco-obniżającego napięcie (DC/DC) oraz falownika PWM (DC/AC) [2, 3].

Zadaniem sterownika U_{DC} jest wysterowanie przełączaniem tranzystorów T_{DC1} i T_{DC1} w układzie DC/DC (rys. 10) w celu podwyższenia lub obniżenia napięcia na wejściu falow-

nika PWM do poziomu ok. $U_{\mathrm{DC}}^{r} = 600\ \mathrm{V}$, gdyż minimalny poziom napięcia, jaki jest wymagany, aby umożliwić przetwarzanie i przepływ energii od strony generatora do sieci wynosi $u_{\mathrm{DC\,min}} > \sqrt{3}\sqrt{2}U_{\mathrm{ph\ sieci}}$. W układzie DC/DC przez zadawanie ograniczenia prądu $I_{\mathrm{DC}}^{\mathrm{limit}}$ w obwodzie DC jest możliwe bezpośrednie sterowanie prądem pobieranym z generatora, co jest istotnym zagadnieniem z punktu widzenia optymalizacji i dopasowania charakterystyki przekształtnikowego układu generacyjnego wraz z generatorem do punktów optymalnej mocy na charakterystyce turbiny. Zmiany napięcia wyprostowanego z generatora powodują proporcjonalną zmianę mocy oddawanej przy zadanym poziomie $I_{\mathrm{DC}}^{\mathrm{limit}}$. Po przekroczeniu napięcia wyprostowanego z generatora powyżej U_{DC}^{r} układ podbijający napięcie DC przestaje działać, a zaczyna działać układ obniżający napięcie, którego zadaniem jest również utrzymanie napięcia wyjściowego DC na poziomie U_{DC}^{r}.



Rys. 9. Schemat blokowy przekształtnikowego układu generacyjnego

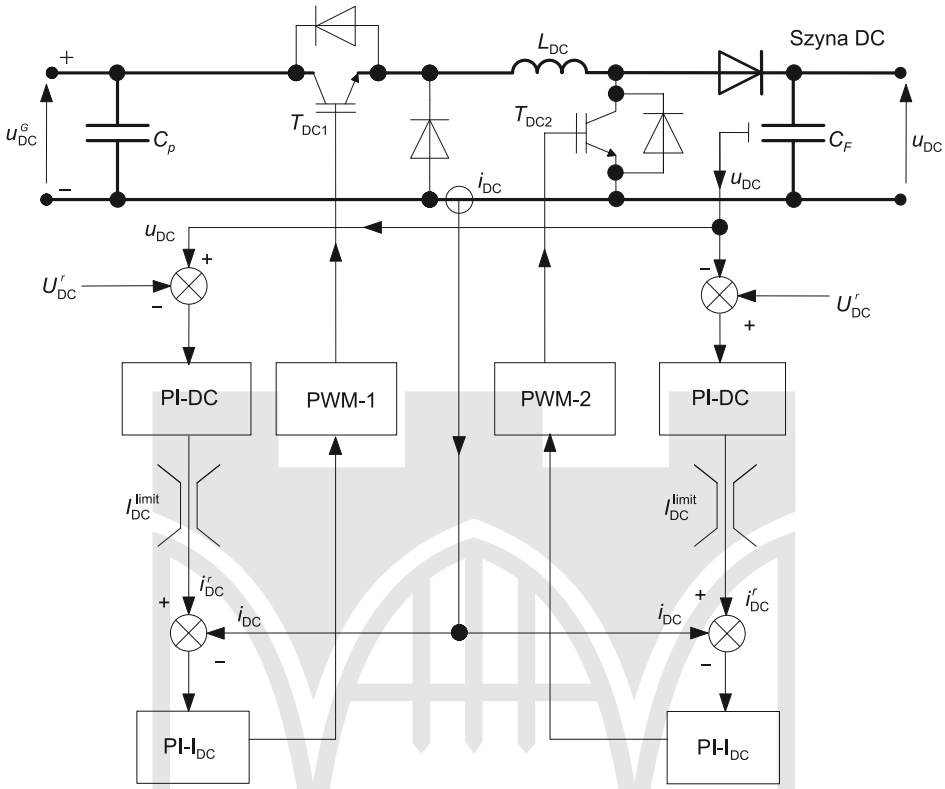
Fig. 9. Block scheme of power electronic unit

W układzie przekształtnikowym DC/AC (rys. 11) do sterowania falownikiem PWM wykorzystano algorytm DPC-SVM, czyli bezpośredniego sterowania mocą ze sprzężeniem od wirtualnego strumienia sieci (ang. *Virtual Flux – Direct Power Control*) z modulatorem SVM [2]. Algorytm ten bazuje na zamkniętej pętli regulacji chwilowej mocy czynnej i biernej i jest wykorzystywany w przekształtnikowych układach napędowych, z tym że w naszym przypadku sieć elektroenergetyczna traktowana jest jak silnik indukcyjny pracujący ze stałą prędkością obrotową. Mierzone prądy fazowe przekształcane są do układu prostokątnego αβ, zgodnie z formułą (1), które w dalszej kolejności wykorzystywane są do estymacji wirtualnego strumienia wg zależności (2) i wyznaczenia chwilowych wartości mocy p i q z użyciem formuły (3).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3}\begin{bmatrix} 3/2 & 0 \\ \sqrt{3}/2 & \sqrt{3} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \end{bmatrix} = \int\left(\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} + L\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}\right)dt = \int\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}dt + L\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \omega\begin{bmatrix} -\Psi_\beta & \Psi_\alpha \\ \Psi_\alpha & \Psi_\beta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{3}$$



Rys. 10. Schemat blokowy układu podwyższająco-obniżającego napięcie DC/DC

Fig. 10. Block scheme of boost converter DC/DC

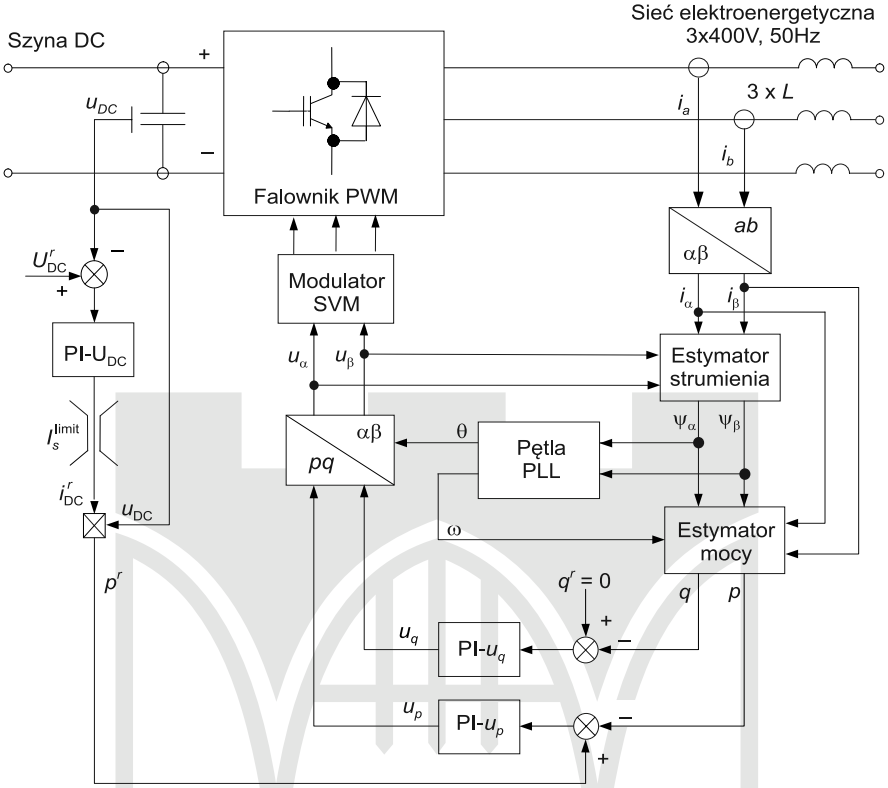
Zadana moc czynna p^r oraz bierna q^r ($q^r = 0$) są porównywane z estymowanymi wartościami chwilowymi mocy p i q, a sygnał uchybu między wartościami zadanymi i chwilowymi stanowi wejście dla regulatorów mocy czynnej PI-p oraz biernej PI-q. Sygnały wyjściowe z tych regulatorów po przetransformowaniu do układu stacjonarnego αβ wg zależności (4) stanowią zadany sygnał wejściowy dla modulatora SVM.

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta & -\cos\theta \\ \cos\theta & -\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p \\ u_q \end{bmatrix} \tag{4}$$

Wartość chwilowa kąta fazowego pomiędzy wirującym układem dq a stacjonarnym αβ ustala się dzięki pętli synchronizacji PLL działającej zgodnie ze schematem wg rys. 12.

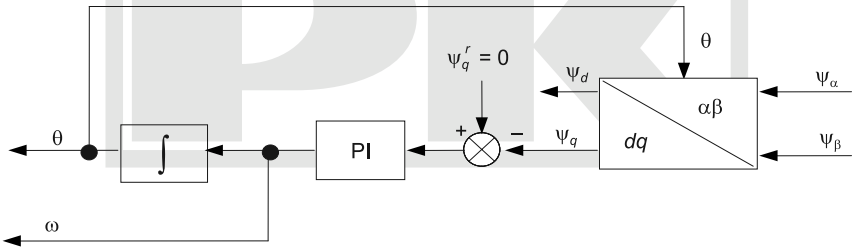
W układzie DC/AC poprzez zadawanie ograniczenia prądu I_s^{limit} jest możliwe bezpośrednie sterowanie prądem sieciowym, a tym samym regulowana jest moc przekazywana z układu DC do sieci.

Z punktu widzenia przepływu mocy z generatora do sieci, przekształtnikowy układu generacyjnego można traktować jako układ czarnej skrzynki o określonej sprawności.



Rys. 11. Schemat blokowy układu DC/AC realizującego algorytm DPC-SVM

Fig. 11. Block scheme of DC/AC for DPC-SVM control algorithm



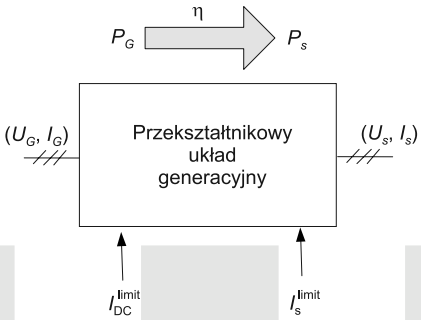
Rys. 12. Schemat blokowy układu PLL

Fig. 12. Block-diagram of PLL block

Zakładając, że układ przekształtnikowy pracuje na sieć, utrzymując współczynnik mocy cosφ = 1 oraz przyjmując, że moc generatora przenoszona jest głównie przez podstawową harmoniczną prądów i napięć będących w fazach ze względu na pracę z prostownikiem diodowym, zależność dla mocy czynnych przekazywanych z generatora do sieci można, zatem zapisać następująco:

$$P_G(n) = \sqrt{3}\,U_G(n)\;I_G = U_{\mathrm{DC}}^{G}(n)\;I_{\mathrm{DC}} = \sqrt{2}\,U_G(n)\,I_{\mathrm{DC}} \tag{5}$$

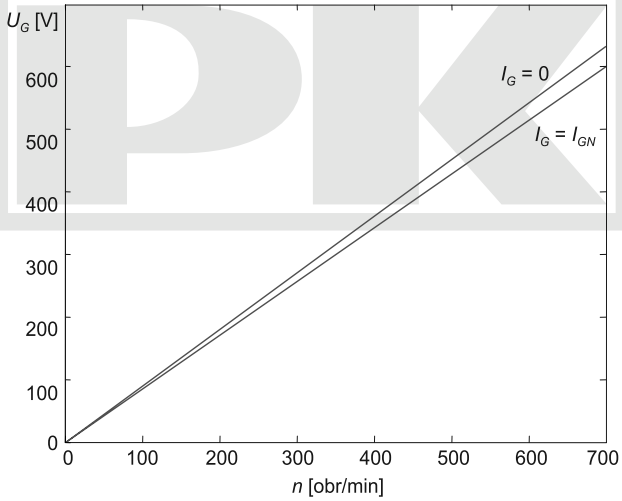
$$P_s = \sqrt{3}\,U_s\,I_s \tag{6}$$



Rys. 13. Schemat blokowy ilustrujący przepływ energii przez przekształtnikowy układ generacyjny
Fig. 13. Block scheme for illustration of energy flow through power electronic unit

Ponieważ oddziaływanie twornika w generatorze z magnesami trwałymi jest stosunkowo niewielkie, dlatego można przyjąć uproszczoną aproksymację zmienności napięcia pod wpływem obciążenia dla generatora opisanego w rozdziale 2 wg rys. 14, zgodnie z zależnością:

$$U_G(n) = k_u n \quad \text{gdzie} \quad k_u = \frac{U_{NG}}{n_N} \tag{7}$$



Rys. 14. Zmiany napięcia generatora dla stanu jałowego oraz obciążenia prądem znamionowym
Fig. 14. Generator voltage for no-load state and nominal current load

Moc czynna przekazywana z generatora do sieci spełnia relację $P(n) = \eta P_G(n) = P_s$, więc bilans ten można zapisać zgodnie z poniższą zależnością:

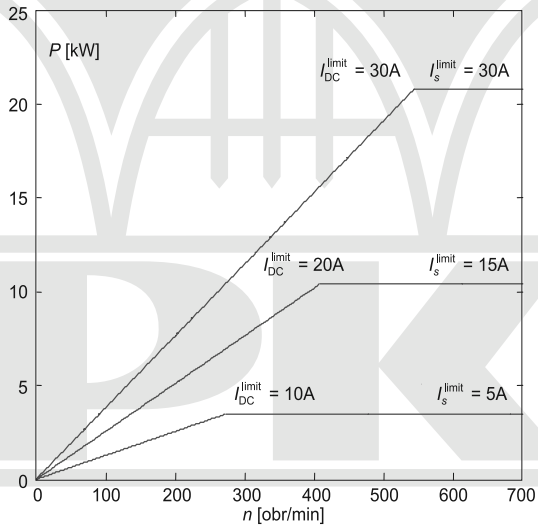
$$P(n) = \eta \sqrt{2}\, \frac{U_{GN}}{n_N}\, n\, I_{\mathrm{DC}}^{\mathrm{limit}} = \sqrt{3}\, U_s\, I_s^{\mathrm{limit}} \tag{8}$$

gdzie:

η – sprawność całego układu energoelektronicznego.

Na podstawie zależności (8) można wyznaczyć przebiegi mocy przekazywanej z generatora oraz momentu elektromagnetycznego generatora przy zadanych wartościach prądów $I_{\mathrm{DC}}^{\mathrm{limit}}$ oraz I_s^{limit} podczas zmieniających się obrotów generatora. Charakterystyki te mają szczególne znaczenie dla przyjmowanych strategii sterowania całego hydrozespołu pod kątem stabilności oraz optymalizacji procesu przetwarzania energii wody dla zadanych charakterystyk turbin.

Na poniższych rysunkach zamieszczono charakterystyki transferowanej mocy z generatora oraz momentu obciążenia generatora w zależności od prędkości obrotowej dla wybranych zadanych wartościach prądów układu przekształtnikowego $I_{\mathrm{DC}}^{\mathrm{limit}}$ oraz I_s^{limit}.

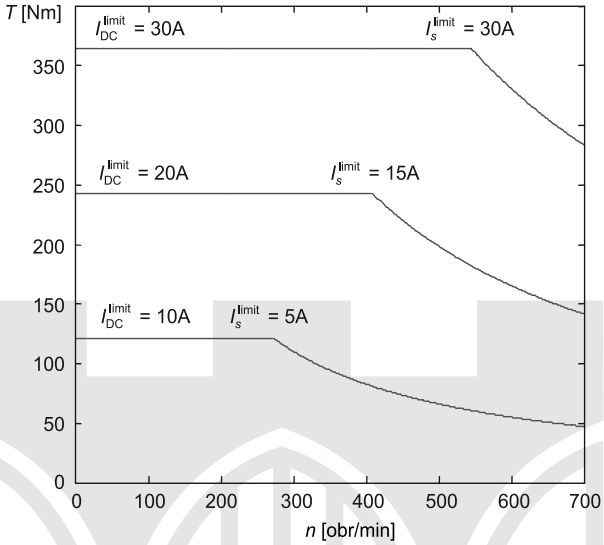


Rys. 15. Charakterystyki mocy przekazywanych z generatora

Fig. 15. Characteristics of power transferred from generator

Z charakterystyk mocy (rys. 15) widać, że liniowy przyrost mocy wraz ze zmianą prędkości obrotowej generatora występuje do momentu osiągnięcia zadanego poziomu mocy limitowanego wartością prądu I_s^{limit} i jest uzależniony od zadanej wartości prądu $I_{\mathrm{DC}}^{\mathrm{limit}}$. W ten sposób jest możliwe łatwe kształtowanie charakterystyk momentu (rys. 16). Wartości zadawanych prądów są uzależnione od parametrów znamionowych odpowiednio generatora oraz układu przekształtnikowego i nie powinny wychodzić poza zakresy:

$$I_{\mathrm{DC}}^{\mathrm{limit}} \leq \sqrt{3/2}\, I_{N\,\mathrm{Generatora}} \qquad I_{s}^{\mathrm{limit}} \leq I_{N\,\mathrm{Falownika}} \tag{9}$$

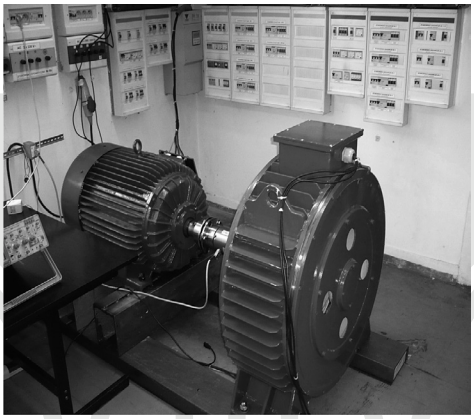


Rys. 16. Charakterystyka momentu obciążającego generatora
Fig. 16. Characteristics of generator torque load

Rys. 17. Złożony układ przekształtnikowy
Fig. 17. Assembled power electronic unit

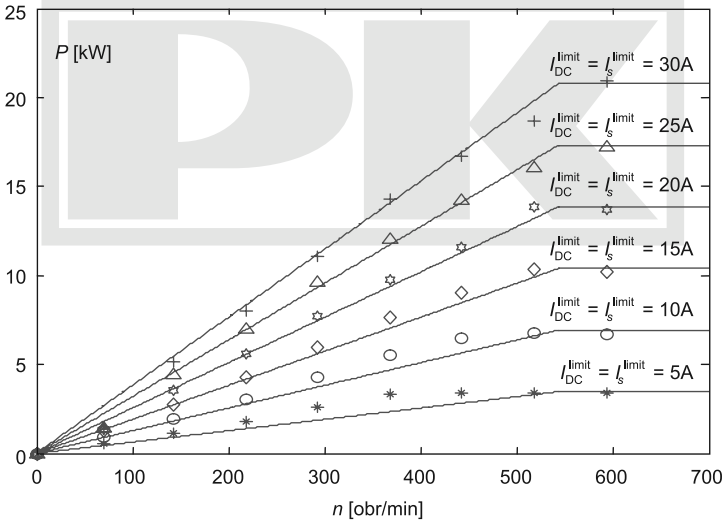
4. Wyniki testów laboratoryjmych

Testy laboratoryjne zostały wykonane na stanowisku badawczym przygotowanym dla omówionego w rozdziale 2 generatora GM 500S10 o danych znamionowych P_{NG} = 30 kW, U_{NG} = 500 V, I_{NG} = 35 A, n_N = 600 obr/min, f = 50 Hz oraz przedstawionego w rozdziale 3 przemiennikowego układu generacyjnego PZG-30kW/10 o mocy 30 kW. Do celów testowych wykonano specjalnie układ mocowania wirnika wraz z wałem, który został sprzęgnięty przez układ pomiarowy momentu, z układem napędowym składającego się z silnika asynchronicznego zasilanego z falownika (rys. 18).



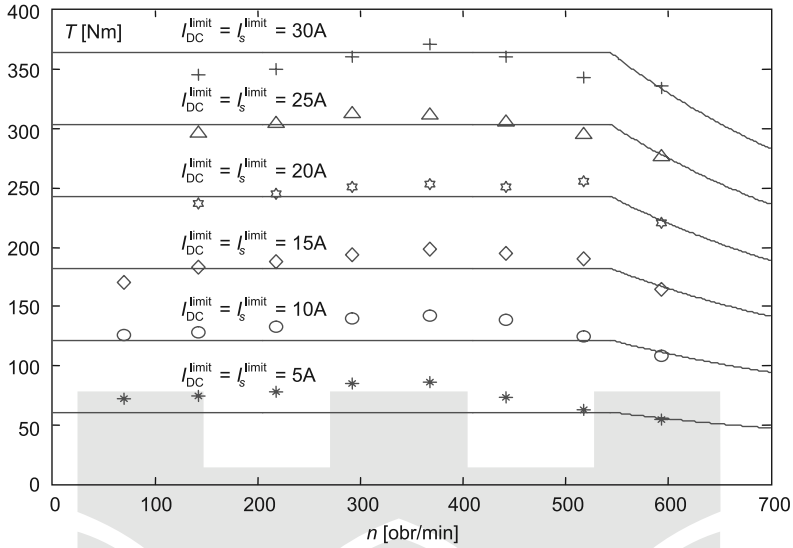
Rys. 18. Laboratoryjne stanowisko badawcze

Fig. 18. Laboratory stand



Rys. 19. Charakterystyki mocy przekazywanych z generatora

Fig. 19. Characteristics of power transferred from generator



Rys. 20. Charakterystyka momentu obciążającego generatora

Fig. 20. Characteristics of generator torque load

Przedstawione pomiary testowe dotyczyły sprawdzenia sposobu regulacji przekazywanej mocy z generatora do sieci zasilającej oraz momentu obciążenia generatora dla zadanych wartości limitów prądowych w układzie DC (I_{DC}^{limit}) oraz limitów prądowych w układzie falownika sieciowego (I_s^{limit}). Badania prowadzone były przy założeniu równości tych limitów $I_{DC}^{limit} = I_s^{limit}$, co w konsekwencji prowadziło do ustalenia się jednej i tej samej prędkości, dla której moc przekazywana z generatora do sieci przestawała rosnąć, a moment obciążenia zaczynał maleć. Na poniższych rysunkach linie ciągłe odpowiadają przeliczonym wartościom idealnym zgodnie z zależnością (8), natomiast zaznaczone punkty odpowiadają wartościom pomiarowym. Otrzymane wyniki pomiarowe w zadawalającym stopniu są zbieżne z rezultatami uzyskanymi teoretycznie z użyciem stosunkowo uproszczonego modelu.

5. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych analiz własności toru przetwarzania energii elektrycznej można stwierdzić, że przez zadawanie limitów prądów I_{DC}^{limit} oraz I_s^{limit} dla przemiennikowego układu generacyjnego przy ograniczeniach jedynie parametrami znamionowymi przekształtnika i generatora jest możliwe praktycznie dowolne kształtowanie charakterystyk momentu obciążenia generatora, a tym samym sterowanie mocą przekazywaną przez turbinę generatora do sieci elektroenergetycznej. Zagadnienie to jest szczególnie ważne podczas opracowywania kompleksowego projektu układu regulacji całej MEW oraz optymalizacji przetwarzania energii pod kątem uzyskiwania maksymalnych sprawności przetwarzania [7].

Zaprezentowany w artykule opis toru przetwarzania energii dla prototypowej MEW o mocy 30 kW może być przydatny i z powodzeniem wykorzystany do opracowania elementów układu przetwarzania energii elektrycznej MEW o znacznie większych mocach.

Literatura

[1] Binder A., Schneider T., *Permanent magnet synchronous generators for regenerative energy conversion – a survey*, Proc. of 11th European Conf. on Power Electronics and Applications, Dresden 2005.

[2] Kaźmierkowski M., Krishnan R., Blaabjerg F., Irwin J., *Control in Power Electronics*, Academic Press, 2003.

[3] Boldea I., *The Electric Generators Handbook*, vol. II: *Variable speed generators*, CRS Press, Taylor & Francis Group, 2006.

[4] Koczara W. i inni, *Theory of the adjustable speed generation systems*, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 27, issue 5, 2008, 1162-1177.

[5] Morimoto S., Nakamura T., Takeda Y., *Power Maximization Control of Variable-Speed Wind Generation System Using Permanent Magnet Synchronous Generator*, IEEE Transaction. on Power Electronics., vol. 123-B, No. 12, 2003, 1573-1579.

[6] Carrasco J.M., Franquelo L.G., Bialasiewicz J.T., i inni, *Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, 2006, 1002-1016.

[7] Borkowski D., Węgiel T., *Optymalizacja przetwarzania energii dla małych elektrowni wodnych z generatorami pracującymi ze zmienną prędkością obrotową*, Zeszyty Problemowe, Maszyny Elektryczne, Nr 92/2011, 121-126,

[8] Norway Patent No 323150: *Integrert vannturbin og generator uten nav*, owner – TURBINOVA AS.