

Tomasz Węgiel, Dariusz Borkowski
Politechnika Krakowska, Kraków

DOŚWIADCZENIA Z EKSPLOATACJI MEW O ZMIENNEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ

EXPLOITATION EXPERIENCES OF VARIABLE SPEED SHP

Abstract: Electrical generators for today's Small Hydropower Plants (SHP) are designed for a constant rotation speed. Changes of energy provided by water depend on water flow, which is very unreliable for small rivers. Therefore, full efficiency can be achieved for power technology with generators working at a variable speed. This paper presents a concept of a energy conversion system optimization for application in a 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 are described. Due to non-linear turbine characteristics it is necessary to formulate a suitable control algorithm for the whole system of energy conversion therefore the control system principles for optimal power production and hydro-set operation in stable way are discussed.

1. Wstęp

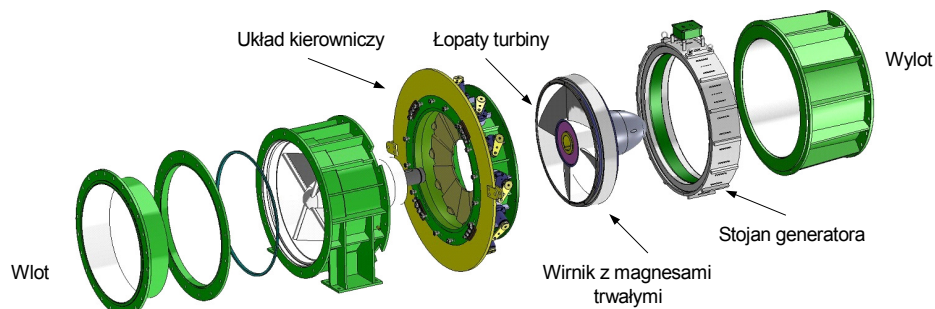
Odejście od, przyjmowanej powszechnie w Małych Elektrowniach Wodnych (MEW), zasady utrzymywania stałej prędkości obrotowej generatora pozwala zapewnić uzyskiwanie optymalnych wartości sprawności turbin przy fluktuacjach przepływu, jak i również spadu [1], [2], [4]. Zagadnienie to jest szczególnie istotne w przypadku MEW, gdzie stosuje się, ze względu na obniżenie kosztów, turbiny śmigłowe, w których występuje jedynie możliwość regulacji w układzie otwarcia aparatu kierowniczego. Jednym z eksperymentalnych rozwiązań opisanym w pracy, jest zastosowanie niewymagającego przekładni, generatora wolnoobrotowego z magnesami trwałymi (PMSG), w którym turbina śmigłowa o ustawionych na stałe łopatach jest zintegrowana z wirnikiem generatora (Rys. 1) [3], [10]. W rozwiązaniu tym wirnik generatora z naklejonymi powierzchniowo magnesami trwałymi jest nabudowany bezpośrednio na zewnętrznym pierścieniu turbiny i pracuje w całkowitym zanurzeniu w wodzie. Stojan generatora posiada klasyczną budowę z tym, że jest od wewnątrz wodoszczelny 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 na podstawie danych hydrologicznych [1].

Elementem kontrolującym przepływ wody jest układ kierowniczy, sterowany tak, aby zapewnić maksymalną produkcję energii, niezależnie od prędkości obrotowej. Kąt otwarcia aparatu kierowniczego uzależniony jest głównie od aktualnych możliwości hydrologicznych, czyli bieżącej wartości przepływu [1].

Generacja energii elektrycznej przy dużej zmienności prędkości obrotowej generatorów wymaga, jednakże zastosowania odpowiedniego przekształtnikowego układu energoelektronicznego dopasowującego parametry wytwarzanej energii do wymagań sieci elektroenergetycznej [5], [6], [7].

W artykule zaprezentowano budowę toru przetwarzania energii dla rzeczywistej MEW wyposażonej w zintegrowane hydrozespoły o mocy 75kW. Praca przedstawia również strategię sterowania mocą hydrozespołu pozwalającą na stabilną pracę całego układu oraz uzyskiwanie optymalnych sprawności przetwarzania energii.



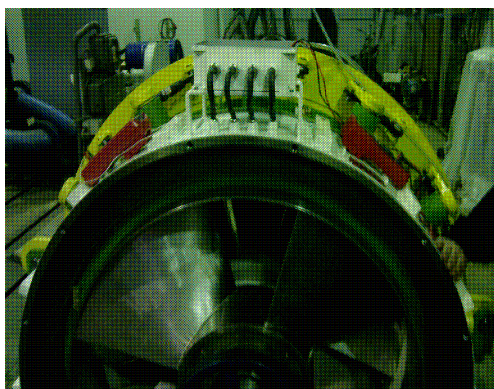
Rys. 1. Główne elementy hydrozespołu

2. Tor przetwarzania energii

Projekt i wykonanie generatora z magnesami trwałymi zintegrowanego z turbiną śmigłową wymaga indywidualnego podejścia z uwagi na specyficzne warunki pracy w wodzie oraz narzucone przez projektanta turbiny wymiary wewnętrzne wirnika.



Rys. 2. Widok zmontowanego hydrozespołu

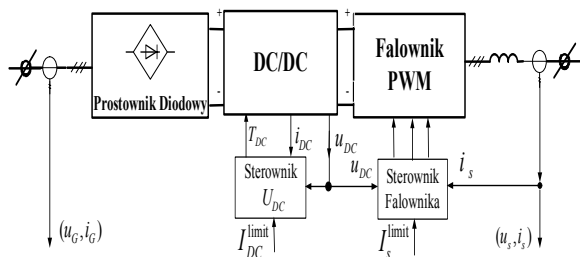


Rys. 3. Widok hydrozespołu od strony wlotu



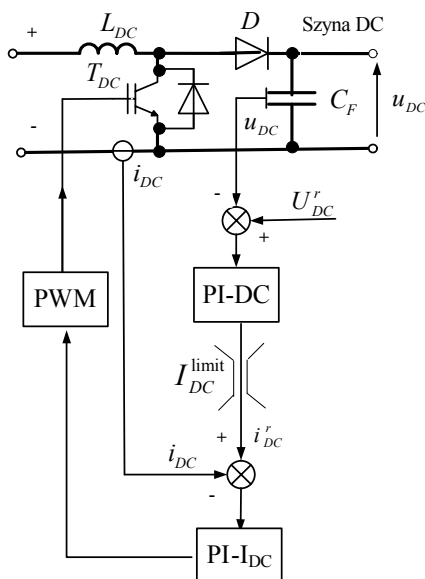
Rys. 4. Widok hydrozespołu od strony wylotu

Dane znamionowe generatora: $P_{NG}=75\text{kW}$, $U_{NG} = 500\text{ V}$, $n_N=300\text{ rpm}$. Zmiany prędkości obrotowej prowadzą do proporcjonalnych zmian częstotliwości oraz wartości napięcia generatora z magnesami trwałymi stąd niezbędnym jest zastosowanie układu przekształtnikowego dopasowującego parametry generowanej energii do wymagań sieciowych. 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 (PUG) PZG-75kW złożony zgodnie z Rys. 5, z prostownika diodowego (AC/DC), układu podwyższającego napięcie (DC/DC) oraz falownika PWM (DC/AC) [9].



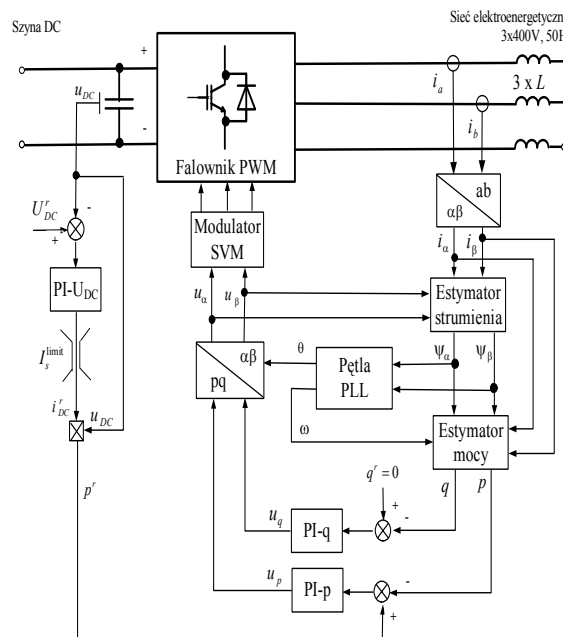
Rys. 5. Schemat blokowy przekształtnikowego układu generacyjnego

Zadaniem sterownika U_{DC} jest wysterowanie przełączaniem tranzystora T_{DC} w układzie DC/DC (Rys. 6.) w celu podwyższenia napięcia na wejściu falownika PWM do poziomu np. $U_{DC}^r = 650V$, gdyż minimalny poziom napięcia, jaki jest wymagany, aby umożliwić przetwarzanie i przepływ energii od strony generatora do sieci wynosi $u_{DCmin} > \sqrt{3}\sqrt{2}U_{ph\ sieci}$. W układzie DC/DC poprzez zadawanie ograniczenia prądu I_{DC}^{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_{DC}^{limit} .



Rys. 6. Schemat blokowy układu podwyższającego napięcie DC/DC

W układzie przekształtnikowym DC/AC (Rys. 7) 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 [5]. Algorytm ten bazuje na zamkniętej pętli regulacji chwilowej mocy czynnej i biernej, i jest wykorzystywany w przekształtnikowych układach napędowych.

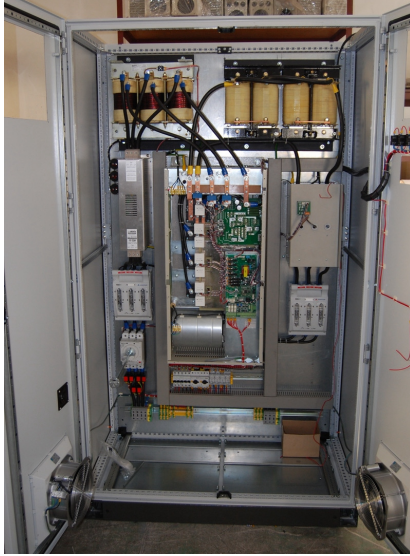


Rys. 7. Schemat blokowy układu DC/AC realizującego algorytm DPC- SVM

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.



Rys. 8. Wygląd zewnętrzny dwóch PUG



Rys. 9. Wygląd wewnętrzny szafy PUG

Moc czynną przekazywaną z generatora do sieci można zapisać następująco:

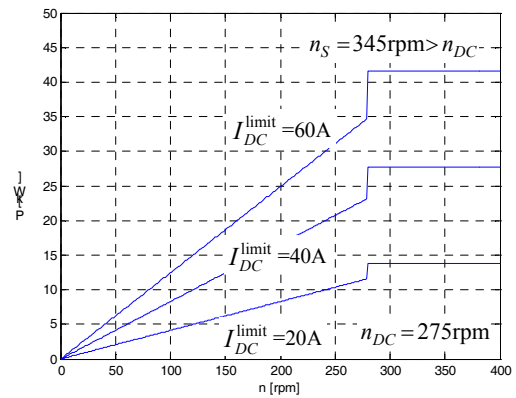
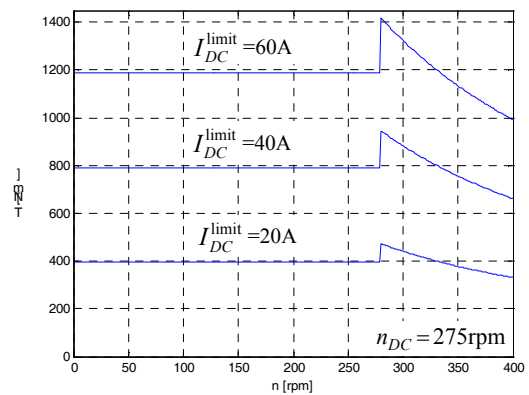
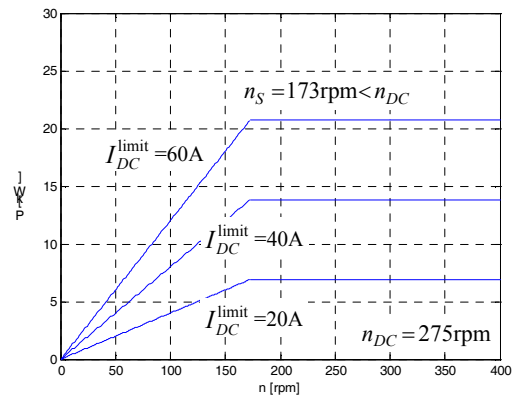
$$P(n) = \begin{cases} \eta \sqrt{2} \frac{U_{NG}}{n_N} n I_{DC}^{limit} & \text{dla } n < n_{limit} \\ \sqrt{3} U_s I_s^{limit} & \text{dla } n \geq n_{limit} \end{cases} \quad (1)$$

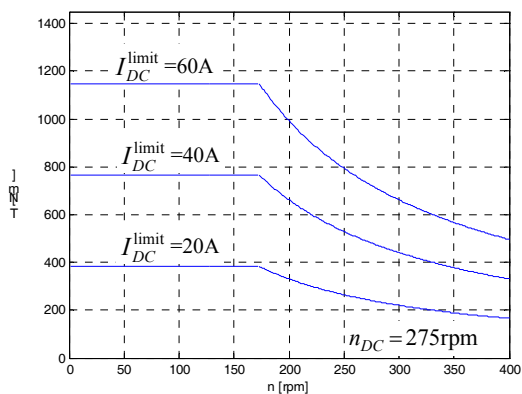
$$n_{limit} = \begin{cases} n_S & \text{gdy } n_S < n_{DC} \\ n_{DC} & \text{gdy } n_S > n_{DC} \end{cases} \quad (2)$$

$$n_S = n_N \frac{U_s}{\eta U_{NG}} \frac{I_s^{limit}}{\sqrt{2/3} I_{DC}^{limit}} \quad (3)$$

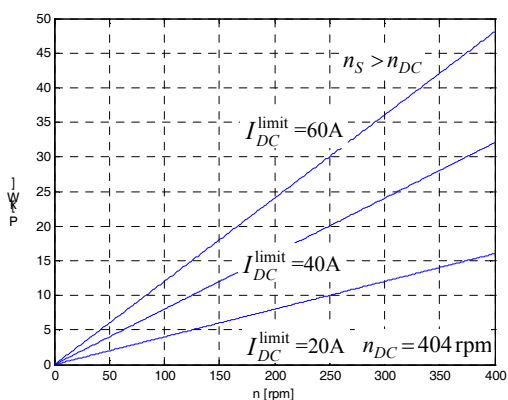
$$n_{DC} = n_N U_{DC}^r / \sqrt{2} U_{NG} \quad (4)$$

gdzie: η jest sprawnością układu energoelektronicznego, a n_{DC} jest prędkością, przy której układ DC/DC przestaje podbijać napięcie. Z zależności (1) można wyznaczyć przebiegi mocy $P(n)$ przekazywanej z generatora oraz momentu elektromagnetycznego $T(n)$. Przykładowe charakterystyki prezentują poniższe rysunki.

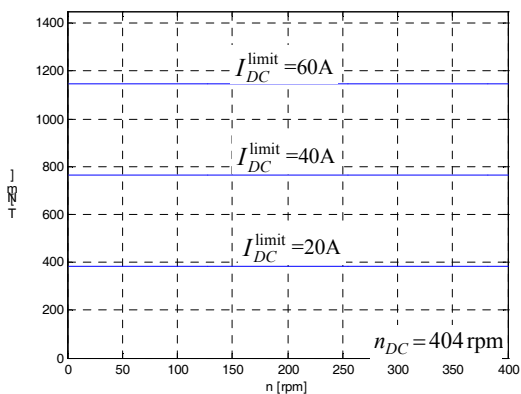
Rys. 10. $P(n)$ dla $U_{DC}^r = 650V$; $I_s^{limit} = I_{DC}^{limit}$ Rys. 11. $T(n)$ dla $U_{DC}^r = 650V$; $I_s^{limit} = I_{DC}^{limit}$ Rys. 12. $P(n)$ dla $U_{DC}^r = 650V$; $I_s^{limit} = \frac{1}{2} I_{DC}^{limit}$



Rys. 13. $T(n)$ dla $U_{DC}^r = 650V$; $I_s^{limit} = \frac{1}{2} I_{DC}^{limit}$



Rys. 14. $P(n)$ dla $U_{DC}^r = 950V$; $I_s^{limit} = I_N = 100[A]$



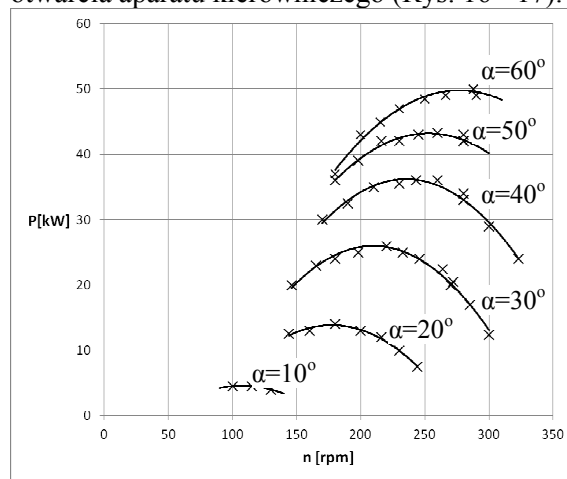
Rys. 15. $T(n)$ dla $U_{DC}^r = 950V$; $I_s^{limit} = I_N = 100[A]$

Kształtowanie charakterystyk poprzez zadawanie w układzie przekształtnikowym wartości limitów prądów (I_{DC}^{limit} , I_s^{limit}) oraz referencyjnego napięcia obwodu DC (U_{DC}^r) podczas zmieniających się obrotów generatora ma szczególne znaczenie dla przyjmowanych strategii sterowania całego hydrozespołu pod kątem stabilności oraz optymalizacji procesu przetwarzania energii wody przy zadanych charakterystykach turbin [1].

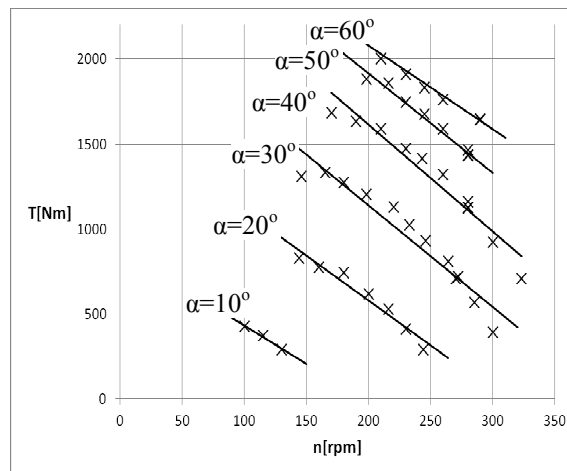
3. Rzeczywiste charakterystyki hydrozespołu

Pomiary rzeczywistych charakterystyk przeprowadzono dla MEW o spadzie nominalnym 3m, w którym zainstalowano zintegrowane hydrozespoły o mocach znamionowych 75kW pracujące na przepływie do 3m³/s. Dzięki zastosowaniu dwóch jednostek wytwórczych oraz zmiennej prędkości obrotowej elektrownia ta może pracować w szerokim zakresie zmiany wartości przepływu od 1 do 6 m³/s. Znamionowa prędkość turbin to 300 rpm, natomiast realny zakres pracy wynosi od 100 do 320 rpm.

Podstawowym wykresem obrazującym właściwości oraz możliwości regulacyjne hydrozespołu jest rodzina charakterystyk mocy oraz momentu od prędkości dla różnych kątów otwarcia aparatu kierowniczego (Rys. 16 - 17).



Rys. 16. Charakterystyki mocy turbiny $P(n)$ dla zadanych kątów otwarcia kierownicy



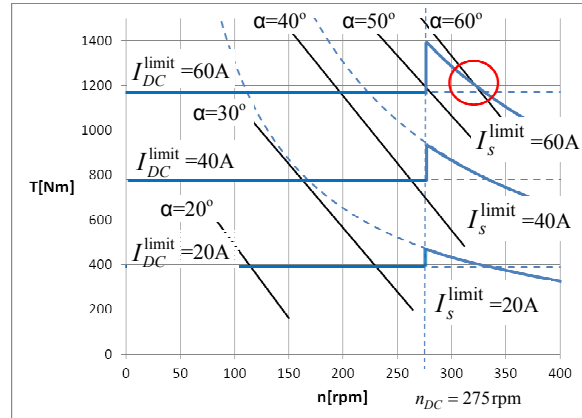
Rys. 17. Charakterystyki momentów turbiny $T(n)$ dla zadanych kątów otwarcia kierownicy

Zadaniem podstawowym aparatu kierowniczego turbiny jest kontrola przepływu wody zgodnie z aktualnymi możliwościami hydrologicznymi [1]. Kąt otwarcia kierownicy α stanowi dodatkowo podstawowy parametr regulacyjny, który umożliwia kontrolę prędkości obrotowej turbiny (maksymalna wartość mocy uzyskiwana jest przy kącie kierownicy $\alpha=60^\circ$). Drugą grupę parametrów prowadzących do regulacji prądu obciążenia generatora stanowią wymuszone przez układ przekształtnikowy zadane wartości U_{DC}^r , I_s^{limit} , I_{DC}^{limit} , które bezpośrednio pozwalają na regulację momentu obciążenia turbiny. Odpowiedni dobór tych dwóch grup parametrów pozwala na pracę turboszespołu w dowolnym punkcie obszaru objętego rodziną charakterystyk (Rys. 16-17). Wybór punktu pracy hydrozespołu jest kluczowym zadaniem mającym wpływ na poprawność pracy systemu, jego sprawność oraz wykorzystanie dostępnej wody.

4. Sterowanie przepływem mocy hydrozespołu

Opracowana strategia zarządzania przetwarzaniem energii została zaimplementowana w rzeczywistym obiekcie MEW. Zgodnie z zaproponowaną metodologią regulator kierownicy (przepływu) pracuje na zadany poziom wody górnej z podziałem przepływu pomiędzy dwie turbiny [8]. Obciążenie poszczególnych generatorów realizuje regulator obciążenia poprzez zmianę wartości ograniczenia prądu w obwodzie pośredniczącym I_{DC}^{limit} , który odpowiada wartości prądu generatora oraz przez zmianę wartości ograniczenia prądu sieciowego I_s^{limit} , który limituje maksymalną oddawaną moc. Wartości obciążenia turbiny, poprzez prąd generatora sterowany za pomocą układu przekształtnikowego dobiera się tak, aby punkty pracy znajdowały się na charakterystyce optymalnej pracy [8].

Na rys. 18 zostały przedstawione rzeczywiste charakterystyki pracy turbiny z rys. 17 oraz naniesiono przykładowe charakterystyki obciążenia generatora wymuszone za pośrednictwem przemiennikowego układu generacyjnego dla warunków, gdy $U_{DC}^r = 650\text{V}$ oraz $I_s^{\text{limit}} = I_{DC}^{\text{limit}}$.



Rys. 18. Zestawienie charakterystyk momentów turbiny oraz generatora z PUG

Analizując miejsca przecięć charakterystyk turbiny z charakterystykami obciążeń generatora wymuszonych przez PUG, zauważa się niekorzystne punkty (oznaczenie na rys. 18 za pomocą okręgu). W miejscach tych występują wahania prędkości turbiny spowodowane małym momentem dynamicznym, co stanowi problem dla utrzymania stabilnej prędkości przez układ regulacji.

5. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych analiz własności toru przetwarzania energii elektrycznej można stwierdzić, że ze względu na specyficzne kształty charakterystyk turbin wodnych, praca układu powinna odbywać się w zakresie utrzymywania stałego momentu obciążenia. Realizowane jest to poprzez ustawienie w PUG wartości prądu I_s^{limit} na poziomie nominalnym oraz regulację momentu przez zmiany prądu I_{DC}^{limit} . Takie sterowanie pozwala precyzyjnie ustalać punkty pracy turbiny na wyznaczonej charakterystyce optymalnej pracy [8]. Wiąże się to jednak z koniecznością pracy układu DC/DC w zakresach podbijających napięcie DC falownika. Z tego względu można na etapie projektu obniżyć napięcie znamionowe generatora (np. do poziomu 400V), zakładając ciągłą pracę układu DC/DC podwyższającego napięcie. Prowadzi to do uproszczenia układu DC/DC, gdyż w przeciwnym razie wymagane byłoby zastosowanie dodatkowego układu obniżającego napięcie. Ponadto, uzasadnionym jest rozważenie możliwości obniżenia napięcia po stronie niskiego napięcia transformatora, do którego przyłączony jest PUG z uwagi na konieczność i tak zastosowania transformatora podwyższającego napięcie, gdyż oddawanie

energii do sieci elektroenergetycznej odbywa się na średnim napięciu rzędu 15kV. Działania te mogą mieć wpływ na obniżenie kosztów budowy przekształtnikowego układu generacyjnego, z uwagi na fakt, że tranzystory na niższe klasy napięć są znacznie tańsze, mimo zwiększenia ich prądu znamionowego.

31-155 Kraków, ul. Warszawska 24

* tel. +48 12 628-26-21

email: pewegiel@cyfronet.pl

** tel. +48 12 628-26-59

email: dborkowski@pk.edu.pl

6. Literatura

- [1]. Krzyżanowski W.: *Turbiny wodne - konstrukcja i zasady regulacji*, WNT, Warszawa 1971.
- [2]. Merino J.M., Lopez A.: *ABB Varspeed generator boosts efficiency and operating flexibility of hydropower plant*, ABB Review 3/96. pp. 33-38.
- [3]. 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.
- [4]. Fraile-Ardanuy J., Wilhelmi J.R., Fraile-Mora J.J., Perez J.I.: *Variable-Speed Hydro Generation: Operational Aspects and Control*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no. 2, June 2006.
- [5]. Kaźmierkowski M., Krishnan R., Blaabjerg F., Irwin J.: *Control In Power Electronics*, ACADEMIC PRESS, 2003, ISBN: 0-12-402772-5.
- [6]. Koczara W., Chłodnicki Z., Ernest E.: *Theory of the adjustable speed generation systems*. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 27(5): 1162-1177, 2008.
- [7]. Mazgaj W., Szular Z., Węgiel T., Sobczyk T.: *Small Hydropower Plant with variable speed PM generator*. Przegląd Elektrotechniczny, R.87 Nr 5/2011, str. 282-287.
- [8]. 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, pp. 121-126.
- [9]. Sobczyk T., Mazgaj W., Szular Z., T. Węgiel, Kopchak L., Kopchak B., Jacukowicz R., Twerd M.: *Power Electronic Conversion System For Small Power Plants Based on Renewable Sources*, Naukowo-Techniczne Czasopismo, Uniwersytet w Odessie, nr 03(79)/2011, str. 367-370.
- [10]. Norway Patent No 323150 - TURBINOVA AS.

Autorzy

Dr inż. Tomasz Węgiel *

Dr inż. Dariusz Borkowski **

Politechnika Krakowska

Wydział Inżynierii Elektrycznej

i Komputerowej

Instytut Elektromechanicznych Przemian

Energii