

doi:10.15199/48.2015.09.68

Pływająca elektrownia wodna

Streszczenie. Podano wybrane elementy teorii oraz założeń projektowych elektrowni wodnej zlokalizowanej na zakotwiczonej barce na rzece. Obliczenia podano na przykładzie konkretnej lokalizacji. Podano warianty wyposażenia elektrowni oraz sposobu przyłączenia takiej elektrowni do systemu elektroenergetycznego lub odbioru indywidualnego.

Abstract The paper presents some elements of the theory and brief foredesign of hydro-electric power station located on punt anchorage in a river. Calculation are presented for the definite power plant location. Alternative designs of the power station equipment and procedure of such a type of power station to electric power system or individual recipients connection are presented. (**Floating water – power plant**)

Słowa kluczowe: elektrownia wodna, tylnokołowiec, wyposażenie

Key words: water - power plant, sternwheeler, equipment

Wstęp

Zagadnienia rozwoju energetyki ze źródeł odnawialnych są jednymi z bardzo szybko rozwijających się obszarów działań zarówno teoretycznych, jak i praktycznych rozważanych przez wiele instytucji naukowych oraz zakładów produkujących elementy na potrzeby tej energetyki. Wśród rodzajów źródeł energii odnawialnej stosunkowo najmniej uwagi poświęca się możliwości otrzymywania energii elektrycznej z cieków wodnych.

Powodem jest bardzo skomplikowany system prawny otrzymywania zezwolenia na budowę elektrowni wodnej w tym warunki środowiskowe, ekologiczne.

Przedstawiony poniżej sposób otrzymywania energii elektrycznej z energii kinetycznej cieków wodnych nasunął się po obserwacji zasady działania statków typu tylnokołowiec. W przypadku tych statków energia silnika, najczęściej parowego, zamieniana jest na ruch łopat umieszczonych w rufie statku. Uwzględniając jedną z zasad działania maszyn elektrycznych, tę o odwracalności kierunku przepływu energii, można dojść do wniosku, że możliwe jest przetworzenie energii płynącej wody na energię elektryczną wytwarzaną przez prądnice asynchroniczną lub synchroniczną.

W artykule przedstawiono najistotniejsze podstawy teoretyczne do zbudowania elektrowni wodnej umieszczonej na barce (pontonie) przy zastosowaniu koła wodnego podsiębiernego. Podano również wyniki obliczeń dla konkretnej lokalizacji takiej elektrowni.

Energia płynącej wody

Elektrownia wodna kojarzy się z budowlą spiętrzającą wodę w zbiorniku i korzystaniem z energii kinetycznej oraz potencjalnej, szczególnie tej ostatniej, która wynika z różnicy poziomów wody w zbiorniku górnym i dolnym. Ta zasada pozostaje niezmienna zarówno dla elektrowni przepływowych, jak i szczytowo – pompowych.

Rozważając energię jednostki masy cieczy, przy uwzględnieniu całki Bernoulliego zapisanej w postaci:

$$(1) \quad \frac{v^2}{2} + g \cdot h + \frac{p}{\rho} = \text{const}$$

gdzie: v – prędkość wody, g – przyspieszenie ziemskie, h – wysokość słupa wody, p – ciśnienie, ρ – gęstość wody.

można stwierdzić, że oprócz potencjalnej energii wody wynikającej z różnicy poziomów cieków wodnych możliwe jest wykorzystanie energii wynikającej z prędkości przepływu wody. Wartość mocy mechanicznej, którą można

otrzymać z energii kinetycznej przepływu wody oblicza się z identycznego wzoru jaki jest stosowany do obliczeń elektrowni wiatrowych [1]:

$$(2) \quad P_w = C_p v^2 \rho V / 2 = C_p v^3 \rho A / 2$$

gdzie: C_p – sprawność przetwarzania mocy wody na moc mechaniczną turbiny, V – objętość przepływającej wody w jednostce czasu, A – pole powierzchni turbiny.

Wielu badaczy wiatr i strugę wody traktuje podobnie, stąd propozycje zastosowania znanych dla wiatraków rozwiązań konstrukcyjnych do przepływowych elektrowni wodnych niewymagających spiętrzania wody [1-12]. Maksymalnie możliwe wykorzystanie strugi powietrza (lub wody) obliczył Betz, współczynnik ten może wynosić co najwyżej $C_p = 0,593$. Jeżeli do wzoru (2) podstawimy się gęstość wody i powietrza to można obliczyć wartość jednostkowej mocy możliwej do uzyskania ze strug tych czynników w przypadku typowych rozwiązań kształtów turbin.

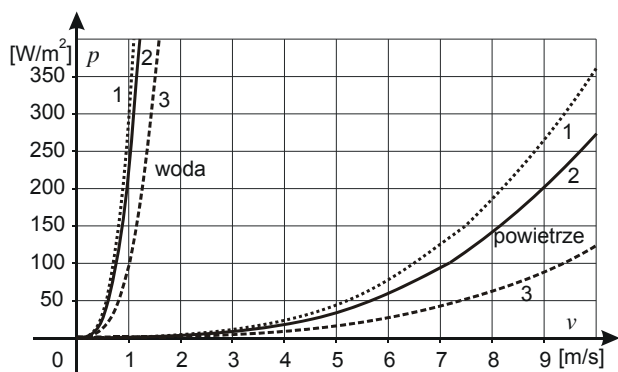
Na rysunku 1 przedstawiono porównanie możliwej do uzyskania mocy jednostkowej z turbin napędzanych wiatrem i ciekami wodnymi. Maksymalnie możliwą moc idealnej turbiny oznaczono przez (1). Turbina Darrieus'a o osi pionowej ma zbliżoną wartość sprawności C_p , przetwarzania mocy strugi na moc mechaniczną ruchu obrotowego, do klasycznych turbin trójłopatowych (2 na rys. 1). Sprawność turbiny Savonius'a (3 na rys. 1) o osi pionowej jest podobna do wiatraka o czterech ramionach znanego z holenderskich polderów [3, 14].

Zastosowanie turbin znanych z elektrowni wiatrowych do wykorzystania energii kinetycznej cieków wodnych możliwe jest zarówno w przypadku rzeki, jak i pływów oceanicznych. W tym drugim przypadku turbina zakotwiczona jest na dnie oceanu. Kierunek przepływu wody przez turbinę zmienia się cyklicznie co jest związane z przyływem i odpływem wody oceanu. Przykłady rozwiązań technicznych takich elektrowni przedstawiono w [1, 4, 7, 8, 9].

Wykorzystanie energii kinetycznej cieków wodnych w ostatnich kilkunastu latach stanowi przedmiot badań w wielu ośrodkach naukowych. Główną uwagę zwraca się na zastosowanie turbin wodnych o osi poziomej w kierunku zgodnym z kierunkiem cieków i całkowicie zanurzonych w wodzie [10, 11, 12]. Proponowane są również nietypowe rozwiązania, np. turbina ślimakowa [13].

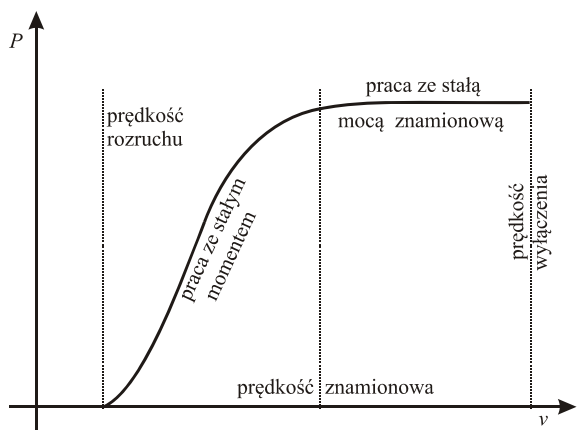
Analizowane są też możliwości wykorzystania falowania wody oceanicznej do wytwarzania energii elektrycznej. W

[2] przedstawiono możliwe lokalizacje takich elektrowni z podaniem ewentualnych do uzyskania mocy jednostkowych.



Rys. 1. Zależność jednostkowej mocy turbin od prędkości strugi. 1 – graniczna wartość wg Betz'a, 2 – turbina Darrieus'a, 3 – turbina Savonius'a

Charakterystyki prędkościowe elektrowni wiatrowych i wodnych są identyczne, różnią się wartościami prędkości rozruchu (por. rysunek 2) oraz prędkością znamionową. W przypadku cieku wodnego najczęściej prędkość rozruchu wynosi 0,4 m/s [2], natomiast w przypadku wiatraków o osi poziomej 4 m/s. Niektóre rozwiązania o pionowej osi wiatraka mają prędkość rozruchu wynoszącą ok. 1 m/s. Prędkości znamionowe dla elektrowni wodnych (przepływowych bez spiętrzenia cieku) zawierają się w przedziale (1,5 ÷ 4 m/s). Znamionowa prędkość elektrowni wiatrowych wynosi najczęściej 10 ÷ 14 m/s. Prędkość wyłączenia najczęściej stosowanych wiatraków wynosi 25 m/s, natomiast w przypadku elektrowni wodnych w istotny sposób zależy od konstrukcji elektrowni (pływająca, zakotwiczona, itp.) oraz zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych połączenia generatora z turbiną.



Rys. 2. Charakterystyka mocy typowej elektrowni wiatrowej i wodnej

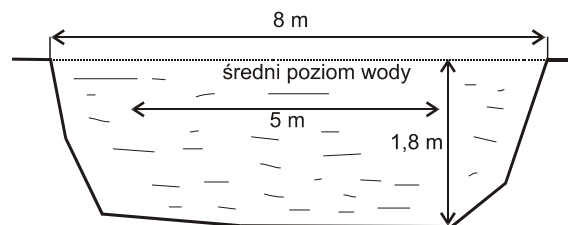
Do usytuowania pływającej elektrowni wodnej powinno się wybrać ciek wodny, którego zarówno poziom wody, jak i szybkość przepływu zmienia się w wąskich granicach. Zatem taki ciek powinien być względnie krótki i usytuowany na nizinach. Przepływy rzek górskich (nawet o krótkim biegu, np. Bystra w Zakopanem) w bardzo istotny sposób uzależnione są od warunków pogodowych. Po opadzie deszczu następuje bardzo gwałtowny przybór przepływu wody. Parametry przepływowe długich rzek (np. Wisła, Odra) również zależą w bardzo istotnym stopniu od bieżących warunków pogodowych w całym zlewisku.

Zmiana poziomu wody nie wpływa na produkcję energii elektrycznej, natomiast ma istotny wpływ na sposób przekazywania energii elektrycznej na ład. Zmiana prędkości wpływa przede wszystkim na obliczenia wytrzymałości mechanicznej elementów projektowanej elektrowni.

Wybrano ewentualne usytuowanie pływającej elektrowni wodnej na rzece, której prędkość w ciągu roku zmienia się w bardzo wąskim przedziale 1,3 ÷ 1,5 m/s. Do dalszych obliczeń przyjęto wartość średnią 1,4 m/s. Poziom wody wybranej rzeki, nawet w przypadku okresu długich opadów deszczu, zmienia się zaledwie o 30 cm. Takie parametry cieku wodnego wynikają z faktu, że zdecydowano się na usytuowanie elektrowni pływającej kilkaset metrów poniżej lokalizacji elektrowni ze spiętrzeniem.

Wybrano fragment rzeki biegnący w kierunku północ – południe, a to w celu uniknięcia prądów błądzących w przypadku zastosowania metalowej konstrukcji barki.

W wybranej lokalizacji pływającej elektrowni wodnej szerokość rzeki wynosi 8 m. Zaprojektowano centralne zakotwiczanie barki w średniej odległości od każdego brzegu rzeki wynoszącej 1,5 m. Szkieł profilu rzeki w tej lokalizacji przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Profil cieku wodnego w wybranej lokalizacji pływającej elektrowni wodnej

Wybór konstrukcji jednostki pływającej

Uwzględniając bezpieczne odstępstwa od brzegu stwierdzono, że do dyspozycji projektowanej elektrowni jest pas o szerokości 5 m niemal w środku cieku wodnego.

W przypadku zastosowania konstrukcji tylnokołowej możliwe jest zastosowanie koła wodnego o szerokości 4,5 m. By uniknąć konieczności zastosowania dwóch przekładni kątowych w celu przekazania momentu ruchu koła wodnego do prądnicy przyjęto, że na osi koła wodnego z jednej strony zostanie umieszczona tarcza z czopem w celu przekazywania momentu do prądnicy na zasadzie korbowodu. W ten sposób podniesiono spodziewaną sprawność elektrowni. W celu ograniczenia hałasu wytwarzanego przez elementy połączenia mechanicznego powinny być one wykonane ze znaczną dokładnością. Zaletą tylnokołowca jest jednakowa prędkość kątowa wirnika, a zatem nie występuje ryzyko zatarcia któregoś z osi. Dodatkowo takie rozwiązanie ma zalety ekologiczne – nie wpływa na ewentualne przepływanie ryb na tarło, nie powinno również mieć wpływu na bieg rzeki, o ile zanurzenie koła wodnego wykonanego tylnokołowca nie będzie zbyt głębokie w nurcie cieku wodnego.

W przypadku bocznokołowca możliwe jest zastosowanie dwóch kół wodnych o szerokości 1,5 m każde, przy nietypowym rozwiązaniu kształtu barki. Z powodu możliwych różnic prędkości cieku po obu stronach barki, wskazane byłoby w tym przypadku przyłączenie dwóch prądnic oddzielnie z każdym z kół wodnych. Oznacza to istotne zmniejszenie wartości energii wytworzonej przez prądnice (mniejsza powierzchnia naporu wody oraz niższa sprawność układu).

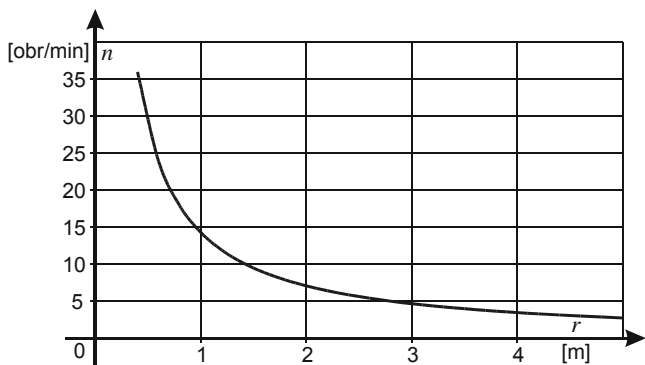
Obliczenie mocy wybranego cieką wodnego

Obliczenia możliwej mocy otrzymywanej z przepływu wody przeprowadzono dla zanotowanego przedziału prędkości wody w rzece. Przyjęto również, że tylnokołowiec będzie wyposażony w koło wodne, które składać się będzie z płaszczyzn czynnych rozmieszczonych co 20°, czyli z 18 płatów. Na wartość momentu, który można otrzymać z przepływu wody oprócz prędkości cieką ma również wpływ średnica koła wodnego. Ponieważ rozpatrywano jako źródło energii elektrycznej prądnice asynchroniczną lub synchroniczną, to wybór średnicy koła wodnego uwarunkowano możliwymi do uzyskania prędkościami synchronicznymi tych maszyn.

Obwód okręgu zakreślonego przez koło wodne wynosi $C=2\pi r$ (gdzie r – jest projektowanym promieniem koła) stąd, przy przyjętej średniej prędkości wody ($v = 1,4$ m/s) rzeki prędkość obrotową tego koła można obliczyć na podstawie zależności:

$$(3) \quad n = \frac{30v}{\pi r}$$

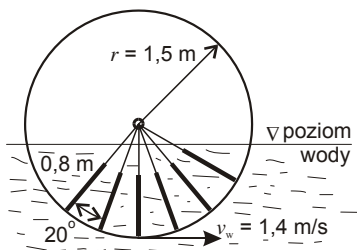
Zależność prędkości obrotowej koła wodnego od jego średnicy przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Zależność prędkości obrotowej koła wodnego od długości jego promienia

Prędkości obrotowe takiej turbiny wodnej są bardzo niskie, z tego powodu sprzężenie z prądnicą powinno zostać wykonane z zastosowaniem przekładni zwiększającej tę prędkość do wartości, które spotykane są w maszynach elektrycznych produkowanych seryjnie.

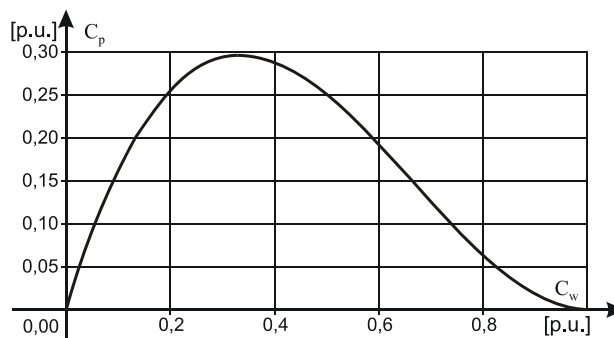
Wytworzenie maszyny synchronicznej o odpowiedniej liczbie par biegunów byłoby uzasadnione w przypadku produkcji seryjnej (por. wyniki badań przedstawione w [13]). W jednostkowych przypadkach możliwych lokalizacji elektrowni pływających takie rozwiązanie może być ekonomicznie nieuzasadnione. Z tego samego powodu nie rozważano wersji zainstalowania prądnicy asynchronicznej o odpowiedniej prędkości synchronicznej (np.: 10 obr/min).



Rys. 5. Szkic koła wodnego pływającej elektrowni wodnej

Kolejnym parametrem wyznaczającym możliwości wytwórcze pływającej elektrowni wodnej jest wartość

momentu działającego na koło wodne, którego szkic przedstawiono na rysunku 5. Płat czynny ma długość 4,5 m przy wysokości 0,8 m. Należy zwrócić uwagę, że współczynnik przetworzenia energii kinetycznej wody na energię mechaniczną, czyli współczynnik C_p (we wzorze 2) dla koła wodnego zależy od stosunku prędkości wody za kołem do prędkości wody napierającej na płat koła ($C_w = v_{od}/v_w$). Zależność tę przedstawiono na rysunku 6, prędkości wody zaznaczono na rysunku 7. Maksymalną wartość współczynnika $C_p = 0,296$ można osiągnąć przy stosunku wymienionych prędkości wynoszącym 0,33 [15]. W rozważanym rozwiązaniu technicznym kształtu płatów koła wodnego sprawność ta wynosić będzie w przedziale $0,25 \div 0,28$.



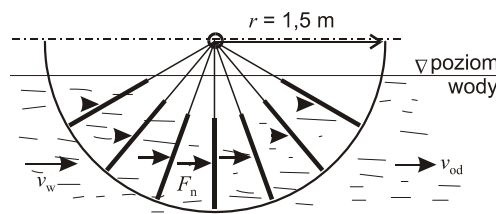
Rys. 6. Zależność sprawności koła wodnego od stosunku prędkości wody za i przed kołem

Możliwe jest dokonanie optymalizacji kształtu łopatek, która spowodowałaby podniesienie współczynnika C_p . Sprawność przetwarzania energii kinetycznej wody na energię elektryczną można podnieść przez zastosowanie płatów czynnych o innym profilu, np. zaproponowanym przez firmę Wasserrad-drehs [16].

Siła parcia wody na poszczególne płaty koła zmienia się wraz ze zmianą położenia płata w stosunku do kierunku płynącej wody. Moment maksymalny działający na łopatę (M_w), uwzględniając napór wody na nią w położeniu prostym do kierunku wody, można obliczyć jako:

$$(4) \quad M_w = mv^2$$

Istotnym wnioskiem jest brak zależności momentu na wale od promienia koła wodnego r . Od tego ostatniego parametru zależy prędkość obrotowa wału. Moment działający na wał turbiny tylnokołowca jest sumą zmieniających się sinusoidalnie momentów jednostkowych działających na poszczególne łopaty znajdujące się w wodzie. Na rysunku 7 przedstawiono wartości (jako długość wektorów) sił naporu F_n na poszczególne płaty koła wodnego znajdujące się pod powierzchnią wody.



Rys. 7. Rozkład sił naporu działających na płaty koła wodnego

Wypadkowa moc mechaniczna działająca na koło wodne w rozważanym przypadku może wynosić $P_w = 8,3$ kW w przypadku optymalnej zmiany prędkości wody za tym kołem. Zaletą takiego rozwiązania źródła energii

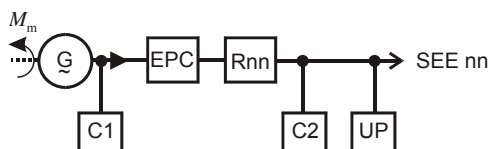
odnawialnej jest przewidywalność poziomu wytwarzanej energii oraz ciągłość pracy. Prawdopodobne przerwy w pracy wynikałyby z czasu na przeglądy, ewentualne naprawy oraz na postoje spowodowane brakiem napięcia w sieci nn (gdyby nie przewidywano pracy wydzielonej – odbiorcy indywidualni).

Dobór prądnicy

Jako źródło energii elektrycznej rozważono zastosowanie prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi lub prądnicy asynchronicznej klatkowej. Zaletą elektrowni wodnej przepływowej jest stały kierunek obracania się wirnika.

Ponieważ w obu przypadkach możliwa jest zmiana wartości prędkości obracania się wirnika wskutek zmian prędkości przepływu wody, czyli również zmiana częstotliwości napięcia indukowanego w uzwojeniach twornika prądnic, przyjęto układ elektryczny prądnic z energoelektronicznym układem prostowniczym i przekształtnikiem częstotliwości.

Przyjęty uproszczony schemat elektryczny przedstawiono na rysunku 8 [17].



Rys. 8. Szkic schematu elektrycznego elektrowni wodnej.

G – generator asynchroniczny, C1 – bateria kondensatorów z regulatorem pojemności przy pracy wydzielonej, EPC – energoelektroniczny przekształtnik częstotliwości, Rnn – rozdzielnica niskiego napięcia, C2 – bateria kondensatorów z regulatorem pojemności przy pracy w systemie elektroenergetycznym, UP – układ pomiaru energii oddanej, SEE nn – system elektroenergetyczny niskiego napięcia

W przypadku prądnicy asynchronicznej w celu samowzbudzenia układu konieczne jest włączenie po stronie generatorowej, kondensatorów o mocy umożliwiającej powstanie pola wirującego o wartości strumienia odpowiedniej do wzbudzenia w uzwojeniach twornika napięcia znamionowego. Takie rozwiązanie jest konieczne, gdy właścicielem elektrowni jest prosument, a okoliczna sieć niskiego napięcia nie może być uważana za pewną. Przez odpowiednie zaprojektowanie automatyki zabezpieczeniowej możliwe jest również sterowanie wartością współczynnika mocy w czasie pracy równoległej w systemie elektroenergetycznym.

Zdecydowano o zastosowaniu standardowej maszyny asynchronicznej. Moc instalowanej prądnicy asynchronicznej P_e jaką można zainstalować w układzie pływającej elektrowni wodnej oblicza się z zależności:

$$(5) \quad P_e = P_w \eta_p,$$

gdzie: P_w – moc cieku wodnego, η_p – sprawność przekładni podnoszącej prędkość obrotową do wartości wyższej od prędkości synchronicznej zainstalowanej maszyny asynchronicznej (0,92).

Moc elektryczną P_{el} jaką oddawać będzie pływająca elektrownia wodna określona jest zależnością:

$$(6) \quad P_{el} = P_e \eta_g \eta_{ue} \eta_T,$$

gdzie: P_e – moc prądnicy asynchronicznej (obliczona wg wzoru 5), η_g – sprawność prądnicy (0,82), η_{ue} – sprawność

układu energoelektronicznego (0,98), η_T – sprawność transformatora (0,978).

Wartości poszczególnych sprawności, które występują w powyższych zależnościach zostały przyjęte na podstawie danych katalogowych wybranych urządzeń. Na tej podstawie obliczono moc elektryczną, która może być oddawana do systemu elektroenergetycznego, $P_{el} = 6$ kW. Z tego powodu wybrano maszynę asynchroniczną klatkową o znamionowej mocy 7,5 kW i prędkości synchronicznej wynoszącej 250 obr/min. Uwzględniając niską wartość zainstalowanej mocy znamionowej, zdecydowano o przyłączeniu pływającej elektrowni wodnej do sieci niskiego napięcia.

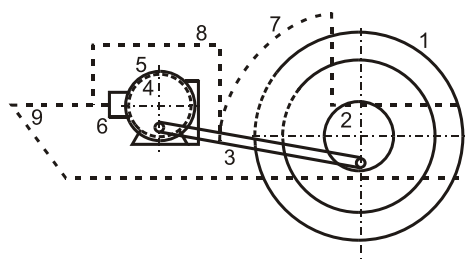
W dalszych rozważaniach, przy uwzględnieniu wzrostu zapotrzebowania na proponowane rozwiązanie otrzymywania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych, wskazane jest dokonanie dokładniejszej analizy, szczególnie ekonomicznej, zastosowania generatora synchronicznego z magnesami trwałymi. Pod warunkiem, że będzie to maszyna wolnoobrotowa (100 lub mniej obrotów na minutę).

Nośność barki

Powierzchnia zajmowana przez barkę (przy założeniu konstrukcji jednokadłubowej) zależy od jej założonej szerokości, która wynika z długości koła wodnego przy konstrukcji tylnokołowej. Nośność barki zależy od całkowitej masy urządzeń na niej umieszczonych wraz z jej masą własną. Na masę całkowitą składają się elementy wyposażenia: koło wodne wraz z układem mocowania, prądnica asynchroniczna, przekładnia mechaniczna, elementy korbowodu, kabel nn, obudowa prądnicy, obudowa koła wodnego. Wymienione elementy ważą w sumie 450 kg, co odpowiada objętości wypartej wody 0,45 m³. Przy jednostkowym rozwiązaniu tej konstrukcji barki zastosowana zostanie blacha stalowa spawana. Minimalna długość kadłuba wynika z rozmieszczenia wyposażenia elektrowni na powierzchni barki. Szkic tego wyposażenia przedstawiono na rysunku 9. Minimalna całkowita długość barki wynosi 4,5 m.

Zmiana gęstości wody w zakresie temperatur, które występują w rozpatrywanym cieku wodnym wynosi 0,18%; może być zatem pominięta w rozważaniach. Pominąć można również wyporność koła wodnego.

Zdecydowano się na barkę w postaci dwóch pływaków połączonych pokładem, na którym umieszczony jest generator wraz z przekładnią. Zarys konstrukcji obudowy i pływaków przedstawiono linią przerywaną na rysunku 9. Objętość pływaków powinna umożliwić osiągnięcie zanurzenia mniejszego niż 0,5 m.



Rys. 9. Szkic rozmieszczenia urządzeń elektrowni na barce.

1 – koło wodne, 2, 4 – tarcze do korbowodu, 3 – korbowód, 5 – prądnica, 6 – skrzynka zaciskowa prądnicy, 7 – zarys obudowy koła wodnego, 8 – obudowa układu silnik-przekładnia, 9 – zarys pływaków barki

Długość korbowodu (3 na rys. 9) powinno się dobrać tak, by środek ciężkości całej elektrowni wodnej przypadł na

środku długości pływaków. Do obliczeń zakotwiczenia należy przyjąć wartość sił naporu na pływaki oraz na zatrzymane koło wodne. Zakotwiczenie może być wykonane za pomocą dwóch lin stalowych przymocowanych do dziobów pływaków, a z drugiej strony do pachołka betonowego umieszczonego na wale ochronnym rzeki.

Sposób połączenia z systemem elektroenergetycznym

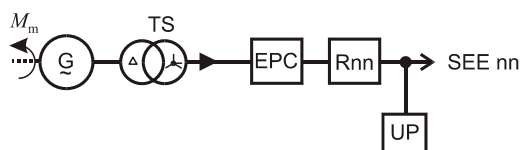
Założono, że tak usytuowana pływająca elektrownia wodna zostanie przyłączona do lokalnej sieci niskiego napięcia. Podstawowym rozstrzygnięciem jest decyzja o transformacji napięcia otrzymywanego na wyjściu energoelektronicznego przekształtnika częstotliwości do poziomu napięcia sieci elektroenergetycznej na barce pływającej elektrowni wodnej, czy na lądzie w pobliżu barki.

Układ energoelektroniczny wraz z układem pomiarowym oraz zabezpieczeniami zdecydowano się umieścić na słupie na lądzie. Połączenie elektryczne między barką i słupem nn wykonać można kablem pod wodą do wału ochronnego rzeki, a następnie pod ziemią do słupa nn.

Innym możliwym rozwiązaniem jest umieszczenie za wałem ochronnym wzmocnionego słupa, który pełniłby rolę pachołka do zakotwiczenia elektrowni wodnej. Równocześnie do niego doprowadzony byłby napowietrzny kabel elektryczny łączący elektrownię wodną z urządzeniami rozdzielni niskiego napięcia. Przy zastosowaniu słupa o wysokości nad gruntem wynoszącej 10 m, na koronie wału przeciwpowodziowego, odległość do wiszącego kabla wynosi ok. 7 m. Nie stanowi więc zagrożenia dla ludzi ewentualnie chodzących po wale.

W obu przypadkach należy zastosować takie rozwiązanie przyłącza, by w przypadku urwania się zakotwiczenia barki zerwanie linii nie powodowało zagrożenia życia, jak również nie spowodowało zwarcia ani w systemie energoelektrycznym ani w układzie elektrowni wodnej.

W przypadku zastosowania prądnicy synchronicznej wskazane jest zainstalowanie transformatora separacyjnego o grupie połączeń Dy i przekładni $K = 1$, w celu wyeliminowania możliwości niesymetrycznego obciążenia generatora [17]. Na rysunku 10 przedstawiono schemat elektryczny dla takiego wariantu elektrowni wodnej.



Rys. 10. Szkic schematu elektrycznego elektrowni wodnej z generatorem synchronicznym. G – generator synchroniczny, TS – transformator separacyjny, EPC – energoelektroniczny przekształtnik częstotliwości, Rnn – rozdzielnica niskiego napięcia, UP – układ pomiaru energii oddanej, SEE nn – system elektroenergetyczny niskiego napięcia

Podsumowanie

Zastosowanie pływającej elektrowni wodnej mimo niskiej sprawności przetwarzania energii cieku wodnego na energię elektryczną, ma istotne zalety. Jest to źródło odnawialnej energii elektrycznej o przewidywalnych parametrach. Zastosowanie energoelektronicznego

przekształtnika częstotliwości zapewnia utrzymanie stałej wartości napięcia i częstotliwości na zaciskach rozdzielni niskiego napięcia pływającej elektrowni wodnej. Odpowiednie wyposażenie elektrowni sprawia, że może być ona przyłączona do systemu elektroenergetycznego lub pracować na odbiorniki własne prosumenta.

LITERATURA

- [1] Lago L.I., Ponta F.L. Chen L., Advances and trends in hydrokinetic turbine systems, *Energy for Sustainable Development*, 14 (2010), 287–296.
- [2] Yuce M.I., Muratoglu A., Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43 (2015), 71–82.
- [3] Khan M.J., Iqbal M.T., Quaicoe J.E., Effects of Efficiency Nonlinearity on the Overall Power Extraction: A Case Study of Hydrokinetic-Energy-Conversion Systems, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 26, No. 3, September 2011, 911–922.
- [4] Khan M.J., Bhuyan G., Iqbal M.T., Quaicoe J.E., Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review, *Applied Energy*, 86 (2009), 1823–1835.
- [5] Khan M.J., Iqbal M.T., Quaicoe J.E., River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (2008) 2177–2193.
- [6] Duerr A.E.S., Dhanak R., An Assessment of the Hydrokinetic Energy Resource of the Florida Current, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 37, No. 2, April 2012.
- [7] Güney M.S., Kayguzus K., Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (2010) 2996–3004.
- [8] Zdankus N., Punys P., Zdankus T., Conversion of lowland river flow kinetic energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38 (2014) 121–130.
- [9] Vermaak H.J., Kusakana K., Koko S.P., Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29 (2014) 625–633.
- [10] Barbarelli S., Florio G., Amelio M., Scornaienchi N.M., Cutrupi A., Lo Zupone G., Design procedure of an innovative turbine with rotors rotating in opposite directions for the exploitation of the tidal currents, *Energy*, 77 (2014), 254–264.
- [11] Romero-Gomez P., Richmond M.C., Simulating blade-strike on fish passing through marine hydrokinetic turbines, *Renewable Energy*, 71 (2014), 401–413.
- [12] Mesquita André.L.A., Mesquita Alexandre L.A., Palheta F.C., Vaz J.R.P., de Moraes M.V.G., Gonçalves C., A methodology for the transient behavior of horizontal axis hydrokinetic turbines, *Energy Conversion and Management*, 87 (2014), 1261–1268.
- [13] Dąbala K., Krzemień Z., Nowatorska mikro elektrownia rzeczna, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 85, NR 9/2009, 58–61.
- [14] Halusek V., Šljivac D., Jozsa L., Exploitation of the hydrokinetic potential of rivers by combining of traditional water wheel and the Darrieus turbine, *Technički vjestnik*, 19, 3 (2012), 659–664.
- [15] Denny E., The efficiency of overshot and undershot waterwheels, *Eur. J. Phys.*, 25 (2004), 193–202.
- [16] www.wasserrad-dreus.de
- [17] Matulewicz W., *Maszyny elektryczne w energetyce i przemyśle*. Wyd. II. Gdańsk: Wyd. Polit. Gdańskiej, 2014.

Autor: dr hab. inż. Wacław Matulewicz, Politechnika Gdańska, Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych, E-mail: wacław.matulewicz@pg.gda.pl, ul. Sobieskiego 7, 80-216 Gdańsk