

Mała elektrownia wodna z wysokosprawnym generatorem synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi

Streszczenie. W artykule zaprezentowano koncepcję nowych wysokosprawnych zespołów prądowców przeznaczonych do małych hydroelektrowni oraz przedstawiono korzyści z zastosowania wysokosprawnych zespołów prądowców z generatorami wzbudzonymi magnesami trwałymi. Zaprezentowano model obliczeniowy hydrogeneratora o mocy 160 kW. Przedstawiono charakterystyki napięcia, prądu i sprawności zespołu w funkcji mocy obciążenia. Przeanalizowano wyniki badań zespołu prądowczego przeznaczonego do pracy w małej elektrowni wodnej.

Abstract. This paper deals with the new concept of the highly efficient hydroelectric generating sets dedicated to application in small hydropower station. The advantages of new hydropower unit built on basis of permanent magnet synchronous generator are discussed. The computational model of hydro generator with permanent magnets is presented. The characteristics of output voltage, phase current and efficiency vs. load power are shown as well as the benefits of using permanent magnet synchronous generators in small hydropower plants. (**Small hydropower station with permanent magnets generator**)

Słowa kluczowe: elektrownia wodna, generator z magnesami trwałymi, hydrogeneratore, zespół prądowczy.

Keywords: small hydropower station, permanent magnet generator, hydrogenerator, hydropower unit.

Wstęp

Obecnie na światowym i krajowym rynku produkcji energii elektrycznej obserwuje się rozwój energetyki w dziedzinie niekonwencjonalnych źródeł energii gdzie wykorzystywane są jej odnawialne zasoby. Jednym z obszarów pozyskiwania takiej energii jest energetyka wodna. Pomimo, iż warunki hydrologiczne w Polsce nie są korzystne (w porównaniu np. do Szwecji), to ze względu na bardzo słabe wykorzystanie istniejących zasobów rzecznych pod względem hydroenergetycznym, istnieje duży potencjał wykorzystania tych zasobów poprzez budowę nowych mikro i mini hydroelektrowni. W Instytucie KOMEL opracowano wysokosprawny zespół prądowczy nowej generacji, przeznaczony do pracy w małych elektrowniach wodnych. Nowy hydrozespół powstał w ramach projektu badawczo - rozwojowego pt: „Wysokosprawne zespoły prądowcze dla małych hydroelektrowni”, realizowanego w konsorcjum naukowym.



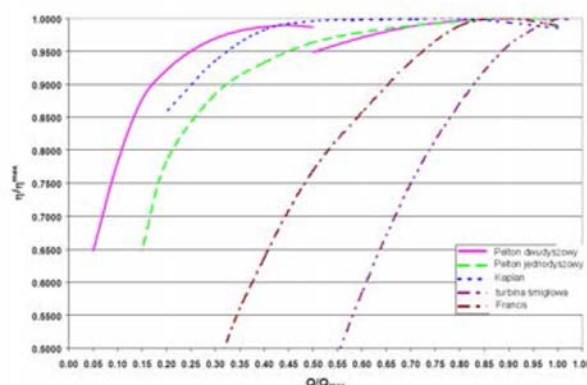
Rys. 1. Przykład typowej turbiny śmigłowej wykorzystywanej w małych elektrowniach wodnych

Wymagania i założenia dla nowego hydrozespołu

W nowobudowanych lub modernizowanych małych elektrowniach wodnych, z uwagi na stosunkowo niski koszt

zakupu, instalacji i obsługi, najbardziej opłacalne jest stosowanie tzw. turbin śmigłowych (rys. 1). Są to stosunkowo proste konstrukcyjnie turbiny, podobne do turbin Kaplana, a ich cechą jest brak możliwości regulacji kąta nachylenia łopatek (stała geometria łopatek turbiny), co jest głównym czynnikiem obniżającym koszt turbiny.

Moc i sprawność turbin wodnych są uzależnione od trzech parametrów: prędkości obrotowej turbiny, wysokości spadu wody oraz natężenia przepływu wody.



Rys. 2. Typowe sprawności małych turbin wodnych [1]

Turbiny śmigłowe, przy zadanej prędkości obrotowej, uzyskują wysoką sprawność tylko przy ściśle określonych wartościach spadu wody i natężenia przepływu [1, 2]. Już stosunkowo niewielkie odchyłki któregoś z tych parametrów od wartości optymalnych dla danej prędkości powodują znaczny spadek sprawności turbiny (rys. 2). Jak wykazały prace badawcze prowadzone w krajach zachodnich, turbiny śmigłowe mogą zapewnić wysoką sprawność przetwarzania energii w szerokim zakresie zmian wysokości spadu i natężenia przepływu, jednak w tym celu konieczne jest zapewnienie możliwości regulacji prędkości obrotowej turbiny, stosownie do aktualnych warunków wodnych.

Regulacja prędkości obrotowej turbiny wodnej nie jest możliwa do zrealizowania w przypadku klasycznego, najczęściej spotykanego w Polsce rozwiązania małej hydroelektrowni, w którym wykorzystywany jest generator asynchroniczny klatkowy podpięty prostym odłącznikiem bezpośrednio do sieci elektrycznej. W tym rozwiązaniu warunkiem generowania mocy do sieci jest uzyskanie prędkości obrotowej wirnika w generatorze większej od jego tzw. prędkości synchronicznej. Ze względu na strome narastanie charakterystyki mechanicznej maszyny asynchronicznej w jej strefie roboczej, prędkość obrotowa napędzanego turbiny wodną i włączonego bezpośrednio w sieć generatora asynchronicznego jest praktycznie stała, niezależnie od aktualnych warunków wodnych w rejonie hydroelektrowni i niezależnie od wartości mocy oddawanej do sieci. Prędkości obrotowe turbin wodnych w małych hydroelektrowniach mieszczą się zwykle w zakresie $75 \div 400$ obr/min. Prędkość obrotowa synchroniczna wirników w generatorach asynchronicznych wynosi zwykle 750, 1000 lub 1500 obr/min. W celu wzajemnego dopasowania prędkości obrotowych turbiny i generatora, wykorzystuje się przekładnie mechaniczne, pełniące funkcję multiplikatorów prędkości. Stała prędkość obrotowa wirnika w generatorze jest więc równoznaczna ze stałą prędkością turbiny wodnej. Przykład klasycznego rozwiązania małej hydroelektrowni o stałej prędkości turbiny i generatora zaprezentowano na rys. 3.



Rys. 3. Przykład małej elektrowni wodnej, w której maszyna asynchroniczna (indukcyjna) jest napędzana turbiną wodną poprzez przekładnię pasową

Dotychczasowe rozwiązania małych hydroelektrowni mają szereg cech niekorzystnych. Stosowane w nich przekładnie mechaniczne zmniejszają sprawność wytwarzania energii, są istotnym źródłem hałasu w hydroelektrowniach oraz stwarzają niebezpieczeństwo skażenia wody środkami smarującymi stosowanymi przy ich eksploatacji. Kolejną niedogodnością dotychczasowych rozwiązań jest to, iż w polskich warunkach hydrologicznych, z uwagi na brak odpowiednio dużych zbiorników gromadzących wodę pozwalających na produkcję energii elektrycznej w hydroelektrowniach w sposób ciągły (stałe zasilanie wodą kanału, w którym znajduje się turbina wodna), istnieje konieczność częstych łączeń generatorów asynchronicznych do sieci. Częste łączenia powodują odkształcenia i asymetrię napięć w sieci. Obecnie wykorzystywane zespoły nie zapewniają autonomicznej pracy na wydzieloną grupę odbiorców bez konieczności poboru mocy biernej z sieci lub instalacji baterii kondensatorów.

W celu wyeliminowania wad dotychczasowych rozwiązań małych elektrowni wodnych opracowano rozwiązanie, które zakłada wykorzystanie turbin śmigłowych, napędzających wysokosprawnego generatora synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi, pracującego na sieć elektroenergetyczną poprzez specjalnie zaprojektowany przetwornik częstotliwości. Taki układ zapewnia:

- pracę turbiny wodnej śmigłowej ze zmienną prędkością

obrotową, stosownie do aktualnie panujących warunków wodnych;

- możliwość programowego sterowania współczynnikiem mocy $\cos \phi$ i pracy generatora z $\cos \phi = 1$;
- bezproblemowe przyłączanie generatora do sieci przesyłowej (wyeliminowanie problemów związanych z koniecznością synchronizacji generatora z siecią);
- możliwość programowej kontroli i ograniczenia zawartości harmonicznych w napięciu wyjściowym przetwornika;
- możliwość pracy hydroelektrowni na „słabej” sieci oraz autonomicznie w sieciach wydzielonych (zamkniętych).

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki obliczeń zaprojektowanego i fizycznie wykonanego generatora synchronicznego z magnesami trwałymi o mocy 160 kW, przeznaczonego do pracy w małych elektrowniach wodnych oraz wyniki badań całego zespołu prądotwórczego przeprowadzonych na stanowisku badawczym. Po przeprowadzeniu badań, nowy zespół zamontowano w elektrowni wodnej i pracuje on aktualnie w układzie bezpośredniego połączenia wału generatora z wałem turbiny wodnej (bez przekładni mechanicznej). Pracą całego zespołu prądotwórczego steruje dedykowany przetwornik częstotliwości, zaprojektowany i wykonany w ramach zrealizowanego projektu.

Wyniki obliczeń

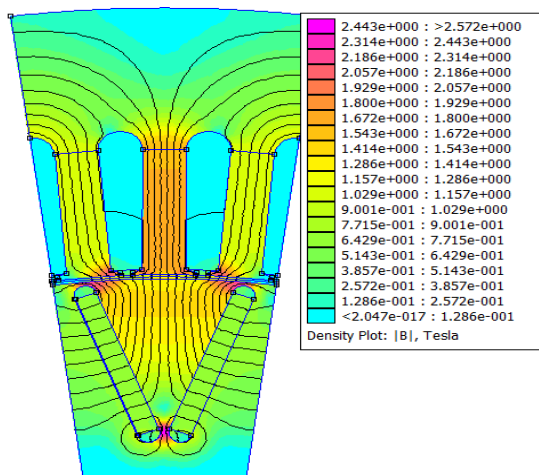
Zakres prędkości obrotowej turbiny wodnej współpracującej z generatorem w hydroelektrowni wynosi 150 do 200 obr/min. W tym zakresie prędkości obrotowej generator powinien charakteryzować się najwyższą sprawnością przetwarzania energii. W celu dostosowania prędkości obrotowej generatora do wymaganego zakresu, koniecznym było zaprojektowanie obwodu elektromagnetycznego o odpowiedniej liczbie biegunów magnetycznych. Parametry znamionowe analizowanego generatora przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry znamionowe generatora z magnesami trwałymi o mocy 160 kW, przeznaczonego do pracy w małej elektrowni wodnej

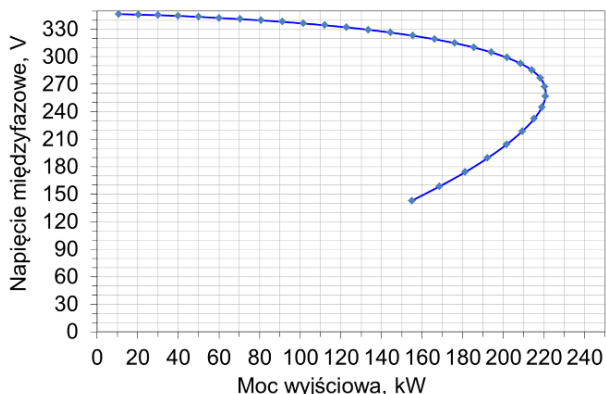
Parametry hydrogeneratora o mocy 160 kW		
Parametr	Jednostka	Wartość
Moc znamionowa	kW	160
Napięcie międzyfazowe	V	320
Prąd fazowy	A	289
Prędkość znamionowa	obr/min	190
Częstotliwość znamionowa	Hz	38
Sprawność	%	95.5
Moment znamionowy	N m	8420
Współczynnik mocy, $\cos \phi$	-	1
Liczba biegunów	-	24
Zmiennosc napięcia	%	14
Prędkość maksymalna	obr/min	200

Nietypowa wartość napięcia międzyfazowego wynika z konieczności współpracy generatora z dedykowanym przetwornikiem częstotliwości, który może pracować w odpowiednim zakresie napięć wejściowych. Wartość indukowanego napięcia na zaciskach generatora zależy linowo od prędkości obrotowej, więc maksymalna wartość napięcia na zaciskach generatora jest uwarunkowana maksymalną prędkością obrotową przy której generator ma pracować. Przekrój poprzeczny obwodu elektromagnetycznego dla jednego bieguna, wraz z liniami strumienia magnetycznego i wartościami indukcji magnetycznej w poszczególnych częściach rdzenia maszyny, zaprezentowano na rysunku 4. Model obliczeniowy opracowano w środowisku FEMM, a obliczenia polowo-obwodowe przeprowadzono z

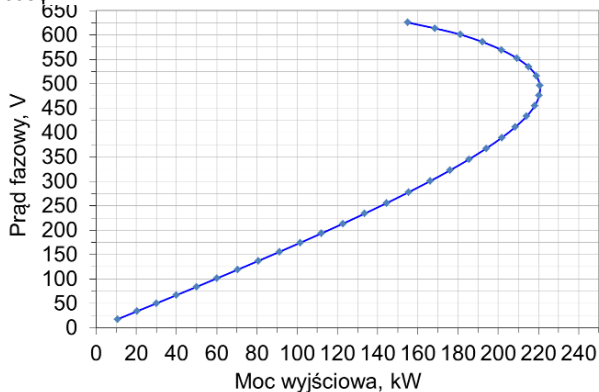
wykorzystaniem 2-wymiarowej, magnetoostatycznej metody elementów skończonych (MES 2D) [6, 7, 8]. Na podstawie opracowanego modelu polowego zaprojektowanego generatora przeprowadzono obliczenia polowo-obwodowe, a otrzymane wyniki obliczeń zaprezentowano w postaci charakterystyk na rysunkach 5 ÷ 7. Jak widać na rysunku 4, wirnik analizowanego generatora jest konstrukcją z magnesami umieszczonymi wewnątrz rdzenia wirnika (ang. Interior Permanent Magnet - IPM), a każdy biegun ma dwa magnesy umieszczone względem siebie pod odpowiednim kątem, tak że tworzą one tzw. układ „V” [4, 5].



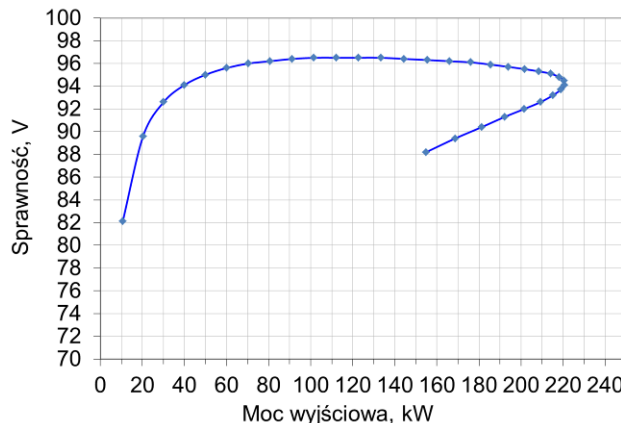
Rys. 4. Fragment przekroju poprzecznego obwodu elektromagnetycznego wraz z liniami ekwipotencjalnymi strumienia magnetycznego i wartościami indukcji magnetycznej w poszczególnych częściach rdzenia maszyny



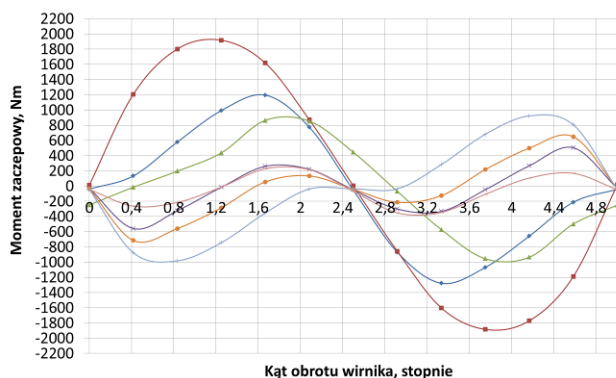
Rys.5. Charakterystyka napięcia międzyfazowego w funkcji mocy obciążenia generatora, przy prędkości obrotowej 190 obr/min, $\cos\varphi=1$



Rys. 6. Charakterystyka prądu fazowego w funkcji mocy obciążenia generatora, przy prędkości obrotowej 190 obr/min, $\cos\varphi=1$



Rys. 7. Charakterystyka sprawności w funkcji mocy obciążenia generatora przy prędkości obrotowej 190 obr/min, $\cos\varphi=1$



Rys. 9. Przebiegi momentów zaczepowych hydrogeneratora o mocy 160 kW dla kilku wartości kąta pomiędzy magnesami w obrębie jednego bieguna maszyny

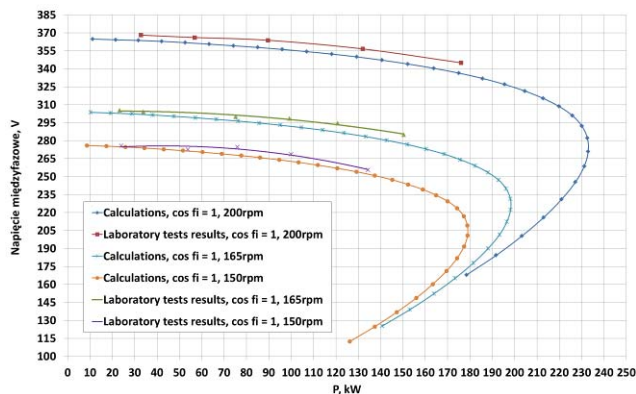
Odpowiednie ułożenie magnesów trwałych względem siebie ma znaczący wpływ na wartość tzw. momentu zaczepowego, który w maszynach wzbudzanych magnesami trwałymi jest istotnym aspektem z punktu widzenia eksploatacyjnego maszyny. Zbyt duża wartość momentu zaczepowego jest powodem wzbudzenia nadmiernych drgań w maszynie, dlatego ważne jest aby zjawisko to zminimalizować.

Na rysunku 8 przedstawiono przebiegi momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wirnika w zakresie jednej podziałki żłobkowej stojana, dla kilku wartości kąta pomiędzy magnesami w układzie „V”.

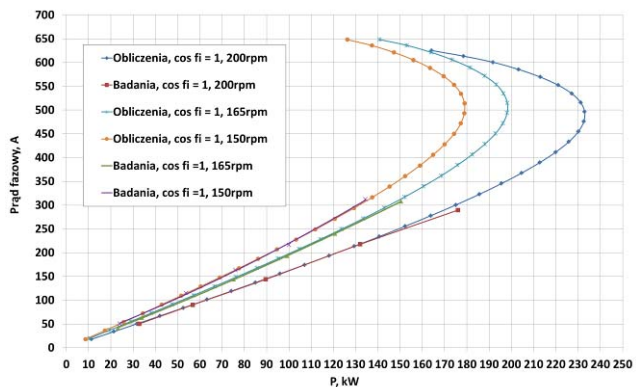
Wyniki badań

Szeroki zakres prędkości obrotowej w jakim generator pracuje warunkuje optymalną pracę przy różnych prędkościach obrotowych. W celu weryfikacji parametrów generatora nie tylko dla punktu znamionowego, badania generatora wykonano dla trzech prędkości obrotowych, a wyniki badań zaprezentowano na rysunkach 10 ÷ 14 w postaci charakterystyk. Na rysunku 10 zaprezentowano charakterystykę napięcia międzyfazowego w funkcji mocy obciążenia generatora, dla trzech prędkości obrotowych. W celu przeprowadzenia analizy porównawczej, na charakterystyce tej umieszczono również charakterystyki uzyskane drogą obliczeń elektromagnetycznych. Różnice pomiędzy wartościami zmierzonymi a obliczonymi są praktycznie pomijalne (rys.10), co dowodzi poprawności zastosowanych metod obliczeniowych. Lekko opadająca charakterystyka napięcia wyjściowego jest podyktowana koniecznością współpracy generatora z przemiennikiem częstotliwości.

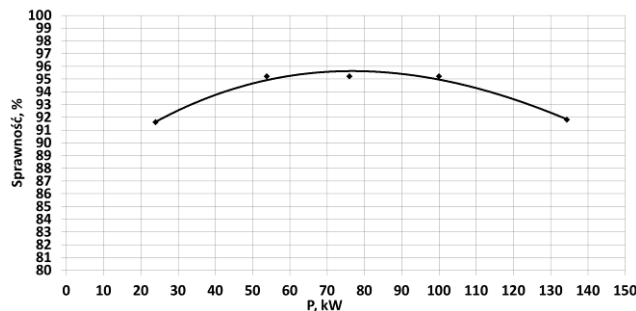
Na rysunkach 12 ÷ 14 zaprezentowano charakterystyki sprawności samego generatora dla trzech badanych prędkości obrotowych, bez współpracy maszyny z przetwornikiem częstotliwości.



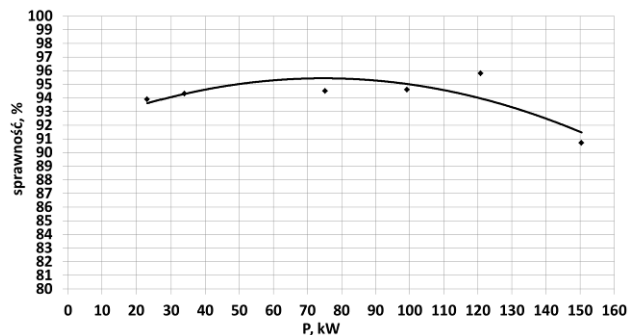
Rys. 10. Obliczone i zmierzone w czasie badań charakterystyki napięcia międzyfazowego w funkcji mocy obciążenia generatora, dla trzech prędkości obrotowych 200, 165 i 150 obr/min, $\cos\varphi=1$.



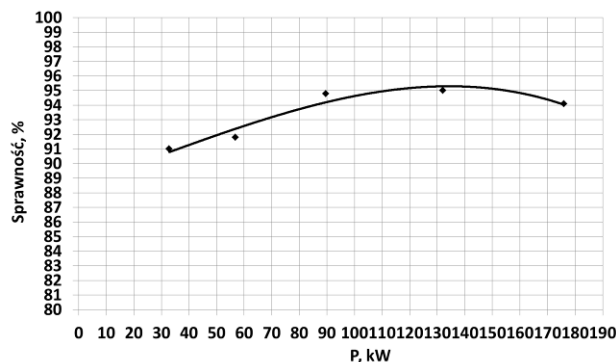
Rys. 11. Obliczone i zmierzone w czasie badań charakterystyki prądu fazowego w funkcji mocy obciążenia generatora, dla trzech prędkości obrotowych 200, 165 i 150 obr/min, przy $\cos\varphi=1$



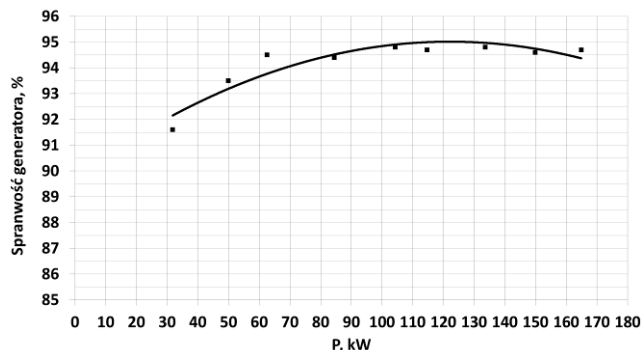
Rys. 12. Charakterystyka sprawności w funkcji mocy obciążenia generatora dla prędkości obrotowej 150 obr/min, przy $\cos\varphi=1$



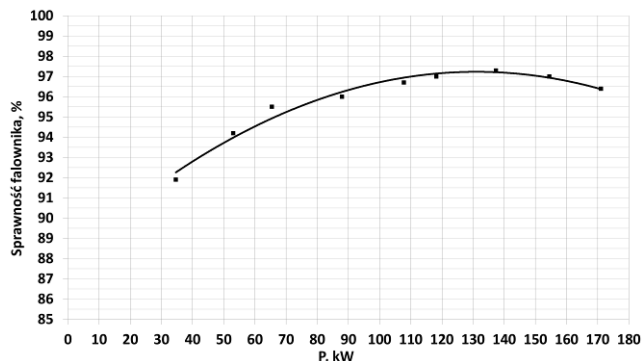
Rys. 13. Charakterystyka sprawności w funkcji mocy obciążenia generatora dla prędkości obrotowej 165 obr/min, przy $\cos\varphi=1$



Rys.14. Charakterystyka sprawności w funkcji mocy obciążenia generatora dla prędkości obrotowej 200 obr/min, przy $\cos\varphi=1$



Rys. 15. Charakterystyka sprawności generatora w funkcji mocy obciążenia dla prędkości obrotowej 183 obr/min, przy $\cos\varphi=1$, współpraca z falownikiem, praca na sieć elektroenergetyczną

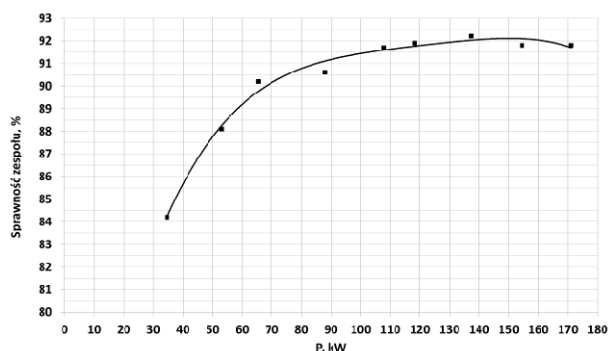


Rys. 16. Charakterystyka sprawności falownika w funkcji mocy obciążenia dla prędkości obrotowej generatora 183 obr/min, przy $\cos\varphi=1$, praca na sieć elektroenergetyczną

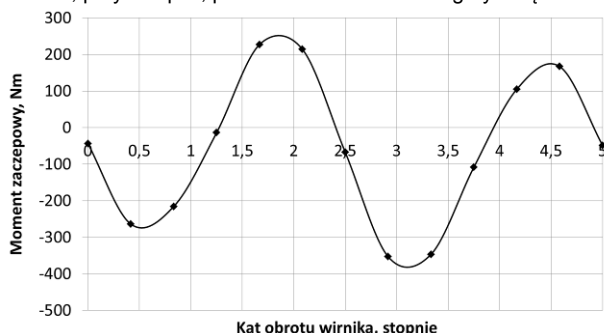
Najistotniejszym parametrem w elektrowni wodnej jest sprawność przetwarzania energii elektrycznej w zespole prądotwórczym, który w tym przypadku tworzy generator z dedykowanym przetwornikiem częstotliwości. Sprawność przetwarzania energii turbiny nie była analizowana. Na rysunkach 15 ÷ 17 zaprezentowano kolejno sprawności generatora, przetwornika częstotliwości oraz całego zespołu prądotwórczego przy pracy na sieć.

W maszynach wzbudzanych magnesami trwałymi, szczególnie w maszynach wielobiegunowych, istotnym aspektem jest minimalizacja niekorzystnego zjawiska jakim jest moment zaczepowy. Moment zaczepowy jest powodem wzbudzania nadmiernych drgań maszyny podczas eksploatacji. W wyniku przeprowadzenia obliczeń optymalizacyjnych ukierunkowanych pod kątem minimalizacji momentu zaczepowego przeprowadzono wielowariantowe obliczenia polowo-obwodowe. Optymalną konstrukcję obwodu magnetycznego dla którego wartość momentu była najmniejsza wybrano jako konstrukcję końcową - optymalną.

Na rysunku 18 zaprezentowano przebieg momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wirnika w zakresie jednej podziałki żłobkowej stojana dla konstrukcji optymalnej.



Rys. 17. Charakterystyka sprawności zespołu prądowłórczego w funkcji mocy obciążenia dla prędkości obrotowej generatora 183 obr/min, przy $\cos\phi=1$, praca na sieć elektroenergetyczną



Rys. 18. Charakterystyka momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wirnika w zakresie jednej podziałki żłobkowej stojana (przy braku skosu w generatorze)

Maksymalna wartość momentu zaczepowego wyniosła 340 N·m, co stanowi ok. 4,1 % momentu znamionowego hydrogeneratora. Przebieg momentu zaczepowego w zakresie jednej podziałki żłobkowej stojana ma 2 okresy, co jest poprawnym (pożądanym) rozwiązaniem w maszynie wolnoobrotowej charakteryzującej się liczbą żłobków na biegun i fazę $q=1$. Generator z takim przebiegiem momentu zaczepowego (rys. 18) będzie miał ponad pięciokrotnie mniejszą wartość amplitudy tego momentu w stosunku do generatora z tym samym obwodem magnetycznym stojana i jednookresowym przebiegiem momentu zaczepowego.

Podsumowanie

W Polsce jest wiele małych rzek i strumieni wodnych, na których można instalować małe hydroelektrownie wodne. W celu skrócenia okresu zwrotu inwestycji, modernizowane bądź nowo instalowane małe elektrownie wodne powinny być budowane przy minimalnych nakładach inwestycyjnych, z wykorzystaniem tanich (w stosunku do chociażby turbin z regulowanym kątem łopat) turbin śmigłowych.

Generatory asynchroniczne pracujące w obecnych małych elektrowniach wodnych nie pozwalają na pracę turbin śmigłowych ze zmienną prędkością obrotową, co w przypadku tych turbin jest warunkiem koniecznym uzyskania wysokiej sprawności przetwarzania energii.

Omawiany w artykule hydrozespół, składający się z turbiny śmigłowej, generatora synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi, współpracującego z dedykowanym przemiennikiem częstotliwości, zapewnia pracę małej elektrowni wodnej przy zmiennej prędkości obrotowej, stosownie do zmian warunków hydrologicznych. Generator synchroniczny z magnesami trwałymi zaprojektowano za pomocą opracowanych, autorskich algorytmów obliczeniowych. Przeprowadzone badania

potwierdziły, że generator będzie pracował z założonymi parametrami eksploatacyjnymi (rys. 10 ÷ 18). Optymalnie zaprojektowany generator pozytywnie wpłynie na sprawność całego hydrozespołu.

Dzięki współpracy hydrogeneratora z dedykowanym przemiennikiem częstotliwości, możliwe będzie wyeliminowanie przekładni mechanicznej, co zmniejszy koszty eksploatacyjne o koszty obsługi przekładni, podwyższa niezawodność pracy elektrowni i eliminuje ryzyko zanieczyszczenia wody środkami smarnymi.

W artykule przedstawiono projekt obliczeniowy modelowego generatora o mocy 160 kW, 183 obr/min, który spełnia wymagania stawiane maszynie współpracującej z przemiennikiem częstotliwości i zapewnia optymalną pracę małej elektrowni wodnej przy zmiennej prędkości obrotowej turbiny śmigłowej. Przedstawione na rysunkach 10 i 11 porównanie charakterystyk obciążenia $U = f(P_2)$ oraz $I_1 = f(P_2)$ generatora pracującego samotnie na odbiornik R, obliczonych opracowaną metodą polowo-obwodową z charakterystykami uzyskanymi w czasie badań, wykazuje bardzo dobrą zgodność wyników. Jedynie przy obciążeniach bliskich mocy maksymalnej P2 uwidaczniają się różnice wyników obliczeń i badań, nie przekraczają jednak one 2,5 %.

Praca finansowana ze środków publicznych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, w ramach projektu nr PBS1/B4/4/2012 pt. „Wysokosprawne zespoły prądowłórcze dla małych hydroelektrowni.”

LITERATURA

- [1] Praca zbiorowa, Jak zbudować małą elektrownię wodną? Przewodnik inwestora, *European Small Hydropower Association (ESHA2010)*, Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Bruksela, Gdańsk 2010.
- [2] Borkowski D., Węgiel T., Analiza sprawności toru przetwarzania energii małej elektrowni wodnej ze zintegrowaną turbiną pracującą przy zmiennej prędkości obrotowej, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 100/2013 cz.I. Wydawnictwo Komel 2013.
- [3] Lewandowski W. M., „Proekologiczne źródła energii odnawialnej”, *Wydawnictwo Naukowo Techniczne*, Warszawa 2002.
- [4] Glinka T.: „Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi” *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice 2002.
- [5] Bernatt J.: „Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi” *Wydawnictwo BOBRME KOMETL*, Katowice 2010.
- [6] Rossa R., Pistelok P., Dąbrowski A., „Projekt prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi do odnawialnych źródeł energii.” *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, nr 3/2012, Katowice 2013.
- [7] Rossa R., Wolnik T. „Obliczenia charakterystyk obciążenia prądnicy synchronicznych z magnesami trwałymi – porównanie wyników szybkiej metody polowo-obwodowej z wynikami analizy MES dla stanów przejściowych”. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Nr 66 Politechniki Wrocławskiej*, Studia i Materiały Nr 32, Wrocław 2012
- [8] Rahaman M. A. , Zhou P., Determination of Saturated Parameters of PM Motors Using Loading Magnetic Fields, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. MAG-27, No. 5, pp. 3947-3950, Sep. 1991.

Autorzy:

dr hab. inż. Jakub Bernatt, prof. KOMETL, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMETL, al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice, e-mail: dyrekcja@komel.katowice.pl;
 dr inż. Robert Rossa, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMETL, al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice, e-mail: r.rossa@komel.katowice.pl;
 mgr inż. Paweł Pistelok, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMETL, al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice, e-mail: p.pistelok@komel.katowice.pl.