

Paweł Pistelok, Robert Rossa
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

GENERATORY SYNCHRONICZNE Z MAGNESAMI TRWAŁYMI DEDYKOWANE DLA MAŁYCH ELEKTROWNI WODNYCH

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATORS DEDICATED TO SMALL HYDROPOWER STATIONS

Streszczenie: W artykule zaprezentowano koncepcję nowych wysokosprawnych zespołów prądowórczych przeznaczonych do małych i mini hydroelektrowni. Istotnymi cechami nowego rozwiązania zespołu prądowórczego są możliwość regulacji prędkości obrotowej turbiny wodnej stosownie do zmian warunków hydrologicznych w miejscu jej pracy oraz wyeliminowanie przekładni mechanicznej między turbiną a generatorem. Przeprowadzono analizę pracy hydrozespołów obecnie stosowanych w małych elektrowniach wodnych. Przedstawiono korzyści zastosowania wysokosprawnych zespołów prądowórczych z generatorami wzbudzanymi magnesami trwałymi. Zaprezentowano model obliczeniowy do obliczeń elektromagnetycznych oraz wyniki tych obliczeń dla modelowego hydrogeneratora o mocy 20 kW. Pokazano m.in. rozkład linii ekwipotencjalnych pola magnetycznego na przekroju poprzecznym maszyny oraz obwodowy rozkład przestrzenny indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej maszyny. Przedstawiono charakterystyki napięcia międzyfazowego na zaciskach generatora i prądu fazowego w funkcji mocy obciążenia, przy różnych wartościach współczynnika mocy obciążenia $\cos \varphi$.

Abstract: This paper deals with the new concept of the highly efficient hydroelectric generating sets dedicated to application in small hydropower stations. The main features of a new hydroelectric generating set solution are a variable speed operation of water turbine according to actual hydrological conditions in the hydropower station and no need for gearbox between turbine and generator. The operating conditions of generating sets which are currently used in small hydroelectric power plants are analyzed. The benefits resulting from the use of modern high efficiency generating sets with permanent magnet generators in small hydropower stations are discussed. The computational model for electromagnetic calculations and the results of these calculations carried out for a model of permanent magnet hydro generator with nominal power of 20 kW are shown. The distribution of equipotential lines of the magnetic field over the cross-section of generator is shown, as well as a spatial distribution of magnetic flux density in the air gap of generator. The characteristic curves of output voltage and phase current vs. output power are shown for a variety of values of load power factor.

Słowa kluczowe: elektrownia wodna, generator z magnesami trwałymi, magnesy trwałe, energetyka wodna, odnawialne źródła energii

Keywords: hydro power plant, permanent magnet synchronous generator, permanent magnets, water energy, renewable power source

1. Wstęp

Obecnie na światowym i krajowym rynku produkcji energii elektrycznej obserwuje się szybki rozwój energetyki w dziedzinie niekonwencjonalnych źródeł energii, gdzie wykorzystywane są jej odnawialne zasoby. Jednym z obszarów pozyskiwania energii odnawialnej 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 nadal duży potencjał wykorzystania tych zasobów poprzez budowę nowych mikro i mini hydroelektrowni (ogólnie zwanych w artykule „małymi”) lub modernizację starych, charakte-

ryzujących się niską sprawnością pozyskiwania energii. W Instytucie KOMEL prowadzone są prace nad opracowaniem wysokosprawnego zespołu prądowórczego do małych hydroelektrowni nowej generacji, który powstaje w ramach projektu badawczo - rozwojowego pt.: „Wysokosprawne zespoły prądowórcze dla małych hydroelektrowni.”

2. Koncepcja zespołu prądowórczego hydroelektrowni o zmiennej prędkości obrotowej turbiny

W zdecydowanej większości aktualnie działających w kraju małych hydroelektrowniach stosowane są generatory asynchroniczne klatkowe,

podłączone do sieci energetycznej bezpośrednio prostym odłącznikiem. W tym rozwiązaniu, warunkiem generowania mocy do sieci jest uzyskanie prędkości obrotowej wirnika generatora większej od jego tzw. prędkości synchronicznej. Ze względu na strome narastanie charakterystyki mechanicznej maszyny asynchronicznej, w jej strefie roboczej, prędkość obrotowa, napędzanej turbiną wodną i włączonego bezpośrednio w sieć generatora asynchronicznego, jest praktycznie stała, nieco większa od prędkości synchronicznej wirnika, niezależnie od aktualnych warunków wodnych w rejonie hydroelektrowni i niezależnie od wartości mocy oddawanej do sieci.

Prędkość obrotowa synchroniczna wirników w generatorach asynchronicznych klatkowych wynosi najczęściej 750, 1000 lub 1500 obr/min, zależnie od liczby par biegunów uzwojenia stojana. Prędkości obrotowe turbin wodnych w małych hydroelektrowniach mieszczą się zwykle w zakresie $75 \div 400$ obr/min. W celu wzajemnego dopasowania prędkości obrotowych turbiny i generatora, konieczne jest, w obecnych rozwiązaniach małych hydroelektrowni, stosowanie przekładni mechanicznych, pełniących funkcję multiplikatorów prędkości. Z uwagi na stały współczynnik przełożenia przekładni, prędkość obrotowa turbiny wodnej, w tych rozwiązaniach hydroelektrowni, jest stała. Przykład małej hydroelektrowni z generatorem asynchronicznym pracującym bezpośrednio na sieć, przekładnią mechaniczną pasową i o stałej prędkości obrotowej turbiny wodnej zaprezentowano na rysunku 1.

Przekładnie mechaniczne zmniejszają sprawność wytwarzania energii w hydroelektrowni. W całym układzie prądotwórczym przekładnia, charakteryzuje się najniższą niezawodnością i koniecznością stosunkowo częstego przeprowadzania przeglądów technicznych. Przekładnie mechaniczne są także istotnym źródłem hałasu w hydroelektrowniach oraz stwarzają niebezpieczeństwo skażenia wody środkami smarującymi stosowanymi przy ich eksploatacji. Warunki hydrologiczne w Polsce sprawiają, że działające w kraju małe hydroelektrownie nie są wyposażone w odpowiednio duże zbiorniki gromadzące wodę, które pozwoliłyby na produkcję energii elektrycznej w sposób ciągły. Wiąże się z tym kolejna istotna wada zespołów prądotwórczych z generatorami asynchronicznymi pracującymi bezpośrednio na sieć – ko-

nieczność przeprowadzania częstych przyłączeń generatorów asynchronicznych do sieci.



Rys. 1. Przykład małej elektrowni wodnej, gdzie generator asynchroniczny jest napędzany turbiną wodną poprzez przekładnię pasową, generator i turbina pracują ze stałą prędkością obrotową, niezależnie od aktualnych warunków wodnych w rejonie hydroelektrowni

Częste przyłączenia objawiają się przepływem prądów rozruchowych, a to wiąże się z chwilowymi znacznymi: spadkami, odkształceniem i asymetrią napięć w sieci. Ponadto, zespoły prądotwórcze z generatorami asynchronicznymi nie zapewniają autonomicznej pracy na wydzieloną grupę odbiorników, gdyż wymagają dostarczenia mocy biernej z sieci lub baterii kondensatorów. W nowobudowanych lub modernizowanych mini i mikro hydroelektrowniach, z uwagi na stosunkowo niski koszt zakupu, instalacji i obsługi, najbardziej opłacalne jest stosowanie tzw. turbin śmigłowych (rys. 2). Są to stosunkowo proste konstrukcyjnie turbiny, podobne do turbin Kaplana, a ich cechą jest brak możliwości regulacji kąta nachylenia łopat (stała geometria łopat turbiny).

Moc i sprawność turbin wodnych są uzależnione od trzech parametrów: prędkości obrotowej turbiny, wysokości spadu wody oraz natężenia przepływu wody. Turbiny śmigłowe, przy zadanej, stałej 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. Przy często zmieniających się stanach wód w rzekach, co ma miejsce w polskich warunkach hydrologicznych, zastosowanie prostych i korzystnych ekonomicznie turbin śmigłowych, napędzających

ze stałą prędkością obrotową generatory asynchroniczne pracujące bezpośrednio na sieć, skutkuje niską sprawnością wytwarzania energii elektrycznej.



Rys. 2. Przykład turbiny śmigłowej wykorzystywanej w małych hydroelektrowniach

Z tego powodu, w dotychczasowych krajowych rozwiązaniach małych hydroelektrowni, dla osiągnięcia satysfakcjonującej sprawności wytwarzania energii, konieczne jest stosowanie skomplikowanych i drogich turbin z kierownicami strumienia wody i możliwością regulacji kąta nachylenia łopatek turbiny – np. turbin Kaplana. Tymczasem turbina śmigłowa może zapewnić wysokosprawną pracę zespołu prądotwórczego hydroelektrowni, przy zmiennych w szerokim zakresie warunkach hydrologicznych, pod warunkiem zapewnienia możliwości odpowiedniej regulacji jej prędkości obrotowej. W celu wyeliminowania wyżej wymienionych wad, w dotychczas stosowanych w kraju rozwiązań małych elektrowni wodnych, podjęto prace badawczo-rozwojowe mające na celu opracowanie nowoczesnego, wysokosprawnego zespołu prądotwórczego, w którym wykorzystywana jest turbina śmigłowa, napędzająca z regulowaną prędkością obrotową wysokosprawnego generatora synchronicznego wzbudzany magnesami trwałymi, przyłączany do sieci elektroenergetycznej poprzez specjalnie zaprojektowany przemiennik częstotliwości. Nowo opracowywany zespół prądotwórczy ma zapewnić:

- bezprzekładniowe sprzęgnięcie generatora z turbiną;
- pracę turbiny śmigłowej ze zmienną prędkością obrotową, stosownie do aktualnie panujących warunków wodnych;
- możliwość programowego sterowania współczynnikiem mocy $\cos\varphi$ obciążenia generatora, z uwzględnieniem pracy generatora przy $\cos\varphi = 1$;
- bezproblemowe przyłączanie generatora do

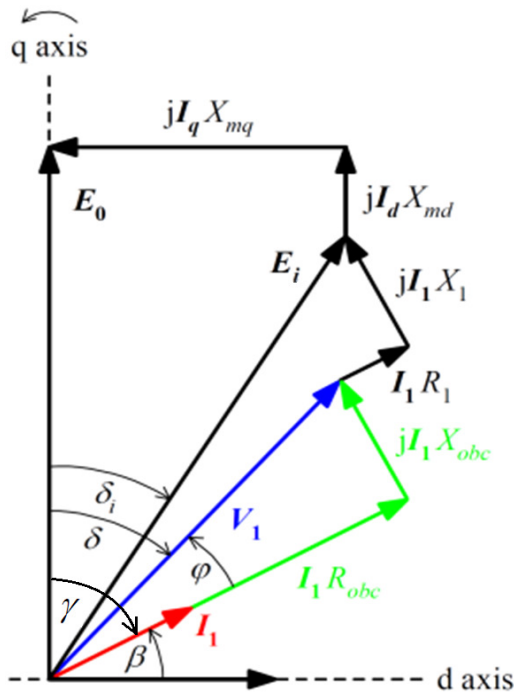
sieci przesyłowej (wyeliminowanie problemów związanych z koniecznością synchronizacji generatora z siecią);

- możliwość programowej kontroli i ograniczania zawartości harmonicznych w napięciu wyjściowym przemiennika;
- możliwość pracy hydroelektrowni na „słabe” sieci oraz autonomicznie, w sieciach rozdzielonych (zamkniętych).

Realizowany projekt wysokosprawnych zespołów prądotwórczych dotyczy wykonania hydrogeneratora modelowego, przeznaczonego do szybkiego badania stanów dynamicznych oraz poprawności działania i funkcjonalności systemu z dedykowanym przemiennikiem częstotliwości. W dalszej części pracy zaprezentowano model obliczeniowy, jak również wyniki obliczeń zaprojektowanego hydrogeneratora o mocy 20 kW.

3. Algorytm obliczeniowy

W celu umożliwienia szybkiego projektowania generatorów synchronicznych z magnesami trwałymi, dedykowanych do pracy w odnawialnych źródłach energii o mocy do ok. 100 kW, opracowano i zaimplementowano w środowisku GNU Octave algorytm obliczeniowy do szybkich, zautomatyzowanych obliczeń charakterystyk obciążenia generatorów tzw. metodą polowo-obwodową obciążeniową [8, 9, 10]. Obliczenia polowe wymagane w algorytmie są realizowane z wykorzystaniem analizy stałoprądowej MES 2D rozkładu pola magnetycznego w maszynie. Algorytm obliczeniowy omówiono w niniejszej pracy i zaprezentowano uzyskane za jego pomocą wyniki obliczeń. Charakterystyki obciążenia generatora są, wg opracowanego algorytmu, obliczane w oparciu o klasyczne równania maszyny synchronicznej, wynikające z jej wykresu wskazowego dla układu współrzędnych $d-q-0$ (rys. 3). Wielkości zaznaczone na wykresie wskazowym, mające zasadniczy wpływ na charakterystyki obciążenia maszyny: reaktancje magnesujące X_{md} , X_{mq} oraz moduł wskazu napięcia E_0 indukowanego w fazie uzwojenia twornika przez wirujące magnesy trwałe, obliczane są oddzielnie dla każdego z analizowanych punktów pracy hydrogeneratora. Przy obliczaniu w/w parametrów skupionych uwzględniana jest ich zależność od aktualnego poziomu nasycenia w rdzeniu magnetycznym generatora, który zależy z kolei od aktualnego obciążenia maszyny synchronicznej.



Rys. 3. Wykres wskazowy generatora synchronicznego z magnesami trwałymi do analizy charakterystyk obciążenia przy zadanym współczynniku mocy obciążenia $\cos \varphi$

Idea algorytmu obliczeniowego wykorzystanego w niniejszej pracy (rys. 4) polega na możliwości obliczenia, oddzielnie dla każdego punktu pracy generatora, przy wykorzystaniu odpowiednio przygotowanego modelu MES 2D generatora (rys. 5) z właściwie zdefiniowanymi wymuszeniami prądowymi (innymi dla każdego punktu pracy), następujących wielkości występujących na wykresie wskazowym maszyny:

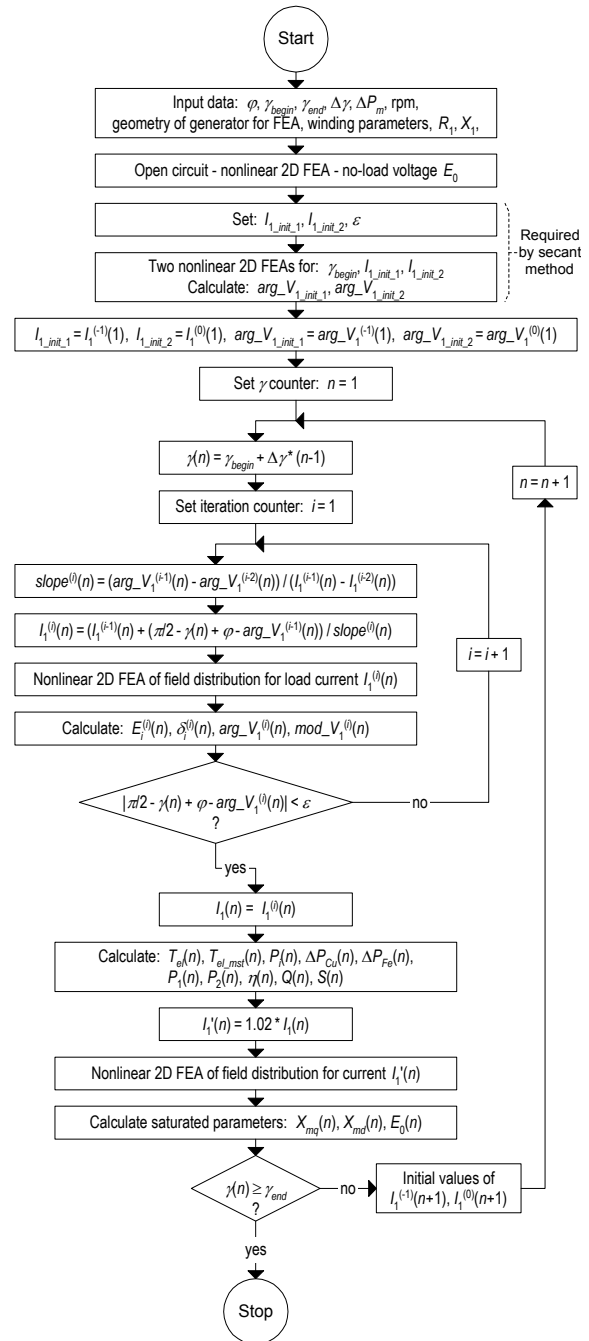
- modułu wektora wypadkowego strumienia głównego Φ w szczelinie powietrznej,
- modułu wskazu napięcia szczelinowego E_i ,
- kąta fazowego δ_i wskazu E_i .

Powyższe wielkości obliczane są dla każdego punktu pracy z uwzględnieniem specyficznego dla tego punktu rozkładu pola elektromagnetycznego w generatorze. Dla ustalonego z góry współczynnika mocy odbiornika $\cos \varphi$, punkt pracy określony jest przez wartości modułu I_1 i kąta fazowego γ wskazu prądu obciążenia I_1 (rys. 3), które to wielkości przeliczane są odpowiednio na prądy fazowe w uzwojeniu twornika i zadawane w modelu 2D MES prądnicy.

Przy poszukiwaniu rozwiązania układu równań wynikających z wykresu wskazowego prądnicy pracującej samotnie na odbiornik R lub RL z wykorzystaniem opisywanego w pracy algo-

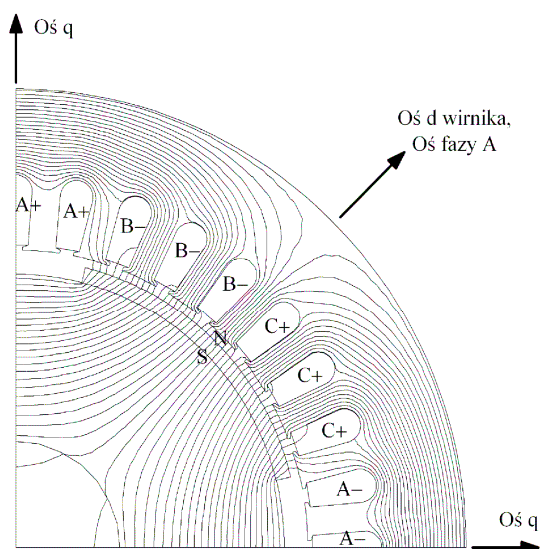
rytmu obliczeniowego (rys. 5), wielkościami zadanymi są:

- zakres kątów fazowych $\gamma_{begin} \div \gamma_{end}$ wskazu prądu I_1 , odpowiadający pełnemu zakresowi prądów obciążenia prądnicy;
- współczynnik mocy obciążenia $\cos \varphi$, stały w całym zakresie prądów obciążenia.



Rys. 4. Algorytm do obliczania charakterystyk obciążenia generatorów z magnesami trwałymi pracujących na odbiorniki typu R i RL, górne indeksy „i” oznaczają kolejne iteracje prądowe metodą siecznych, „n” to kolejne wartości kąta γ z zakresu $\gamma_{begin} \div \gamma_{end}$

W algorytmie założono także, że wszystkie zależności matematyczne opisujące pracę samotną prądnicy na odbiornik R lub RL są, dla zadanych kątów γ i $\cos \varphi$, spełnione jednocześnie tylko przez jedną wartość modułu I_1 wskazu prądu fazowego I_1 , tzn. zwiększeniu kąta γ odpowiada zwiększenie modułu I_1 . Właściwa wartość modułu I_1 nie jest początkowo znana i jest obliczana iteracyjnie. Obliczenia iteracyjne zrealizowano w algorytmie z zastosowaniem tzw. metody siecznych.



Rys. 5. Przykładowy obwód magnetyczny generatora synchronicznego przygotowany wg wymagań opracowanego algorytmu obliczeniowego, wykorzystującego metodę połowo obwodową obciążeniową 2D

4. Wyniki obliczeń dla modelowego generatora 24-biegunowego, o mocy 20 kW

Generatory synchroniczne z magnesami trwałymi charakteryzują się najwyższą sprawnością spośród wszystkich rodzajów maszyn elektrycznych wirujących [3 ÷ 7]. Wysoką sprawność generatory te utrzymują w szerokim zakresie prędkości obrotowych, co stanowi jedną z głównych zalet tych maszyn. Szczególnie przy prędkościach turbiny pracującej poniżej swojej prędkości znamionowej, sprawność generatora z magnesami trwałymi może być wyższa o ok. 4% od sprawności podobnego generatora asynchronicznego [2].

Niska prędkość znamionowa wielobiegunowych generatorów synchronicznych z magnesami trwałymi (75 ÷ 400 obr./min.) umożliwia eliminację przekładni mechanicznej (multiplikatora prędkości) pomiędzy turbiną a generatorem. Generator może być wówczas montowany

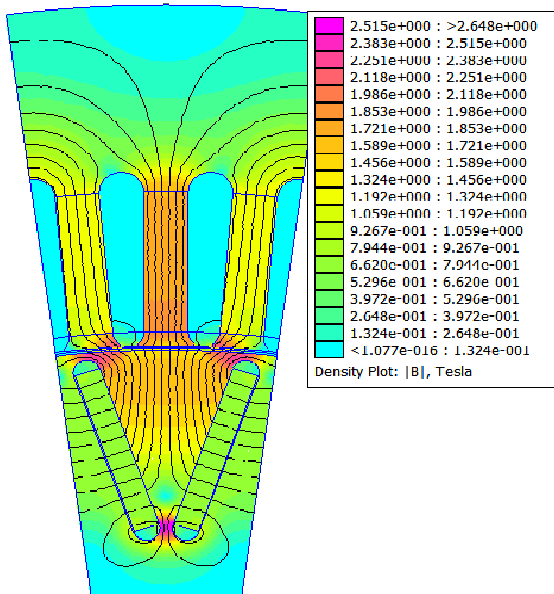
na jednym wale wraz z turbiną. Dzięki zastosowaniu przemienników częstotliwości sterowanych wg odpowiedniego, nowo opracowanego algorytmu, możliwa będzie praca na sieć przy zmiennej prędkości obrotowej turbiny, co zapewni wysoką sprawność przetwarzania energii elektrycznej za pomocą nowego zespołu przy współpracy z turbiną śmigłową. Regulacja prędkości obrotowej turbiny wodnej będzie możliwa w szerokim zakresie, stosownie do aktualnych zmian warunków wodnych, w jakich pracuje turbina.

Tabela 1. Parametry generatora synchronicznego z magnesami trwałymi do współpracy z falownikiem w małych hydroelektrowniach

Parametry modelowego hydrogeneratora		
Moc znamionowa	kW	20
Napięcie międzyfazowe	V	365
Prąd fazowy	A	31,6
Prędkość znamionowa	obr./min.	250
Częstotliwość znamionowa	Hz	50
Moment	Nm	811
Sprawność	%	94,2
$\cos \varphi$	-	1
Liczba biegunów	-	24

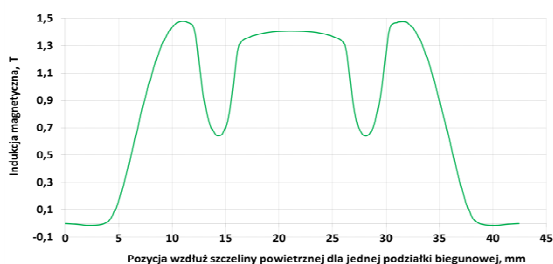
W tabeli 1 zaprezentowano parametry znamionowe generatora o mocy 20 kW, dedykowanego do pracy w małych elektrowniach wodnych. Generator współpracujący z przemiennikiem częstotliwości musi spełniać nietypowe wymagania. Napięcie na zaciskach generatora, w zakładanym zakresie prędkości obrotowych, nie może przekroczyć dopuszczalnej wartości. Wartość ta jest determinowana parametrami: zaworów (tranzystorów), elementów filtrujących w torze przetwarzania energii oraz elementów pośredniczących w przemienniku częstotliwości. Im wyższa wartość napięcia na zaciskach generatora, tym większy gabaryt będzie miał tenże przemiennik. Z uwagi na uwarunkowania techniczne i wymagania stawiane maszynie synchronicznej współpracującej z przemiennikiem częstotliwości, generator zaprojektowano tak, aby wartość międzyfazowego napięcia wyjściowego nie przekroczyła 390 V (bieg jałowy, rys. 8), stąd też, wartość znamionowego napięcia międzyfazowego hydrogeneratora przy obciążeniu wynosi 365 V (tabela 1). Po stronie sieci energetycznej, napięcie wyjściowe przemiennika częstotliwości, pracującego w układzie AC-DC-AC, będzie miało wartość 400 V i częstotliwość 50 Hz. Na

rysunku 6 przedstawiono przekrój poprzeczny obwodu magnetycznego generatora 20 kW, rozkład linii strumienia magnetycznego oraz skalę wartości indukcji magnetycznej w tym generatorze, przy pracy na biegu jałowym.



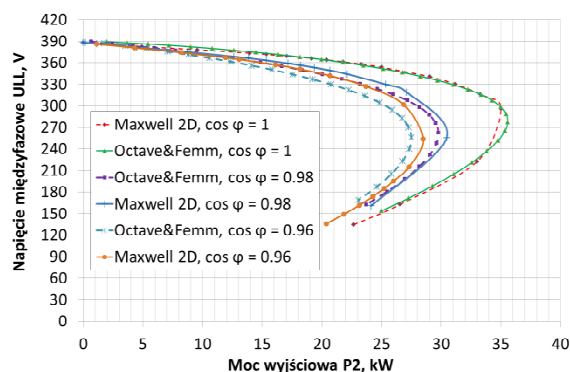
Rys. 6. Rozkład linii strumienia magnetycznego oraz skala wartości indukcji magnetycznej na jednej podziałce biegunowej modelowego hydrogeneratora $2p=24$, 20 kW

W oparciu o wyniki obliczeń elektromagnetycznych, na rysunku 7 pokazano rozkład obwodowy indukcji magnetycznej wzdłuż obwodu szczeliny powietrznej generatora 20 kW, odpowiadający jednej podziałce biegunowej maszyny. Dzięki zastosowaniu rozmieszczenia magnesów trwałych w wirniku skutkującą tzw. koncentracją strumienia wzbudzenia, osiągnięto wysokie wartości indukcji w szczelinie powietrznej wytworzonej przez magnesy trwałe (amplituda 1-jej harmonicznej obwodowej indukcji 1.4 T). Przekłada się to korzystnie na parametry generatora, sprawność i osiąganą moc maksymalną.



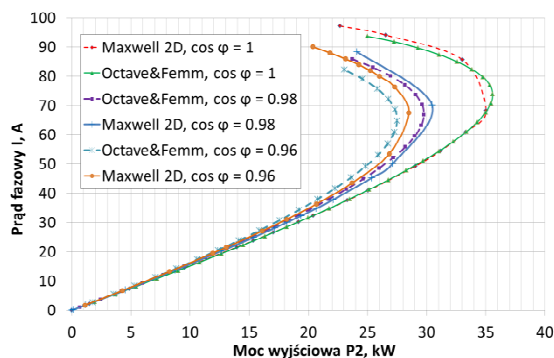
Rys. 7. Rozkład obwodowy indukcji magnetycznej jednego bieguna w połowie grubości szczeliny powietrznej hydrogeneratora 20 kW

Wykorzystując zbudowany obliczeniowy model połowy generatora 20 kW, przeprowadzono obliczenia charakterystyk obciążenia generatora przy różnych wartościach współczynnika mocy obciążenia $\cos\phi$. Dla weryfikacji poprawności opracowanej szybkiej metody połowo-obwodowej, te same charakterystyki obciążenia obliczono z wykorzystaniem precyzyjniejszej metody obliczeniowej, opartej na analizie rozkładu pola w maszynie z wykorzystaniem MES dla stanów przejściowych, w środowisku obliczeniowym Maxwell 2D. Na podstawie wyników obliczeń otrzymanych dwoma różnymi metodami, wykreślono charakterystyki napięcia międzyfazowego U_{LL} i prądu fazowego I_1 w funkcji mocy obciążenia generatora P_2 , pokazane na rysunkach 8 i 9.



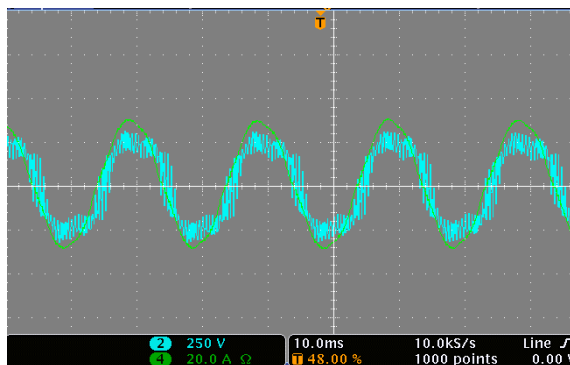
Rys. 8. Charakterystyka napięcia międzyfazowego w funkcji mocy obciążenia modelowego hydrogeneratora 20 kW przy $n=250$ obr./min.

Jak widać na rysunku 8, charakterystyka $U_{LL} = f(P_2)$ generatora jest „lekką” opadającą, a wartość skuteczna napięcia, zgodnie z założeniem, nie jest większa od 390 V. Opadanie charakterystyki było podyktowane wymaganiami stawianymi maszynie współpracującej z pręmiennikiem częstotliwości.



Rys. 9. Charakterystyka prądu fazowego w funkcji mocy obciążenia hydrogeneratora 20 kW dla $n=250$ obr./min.

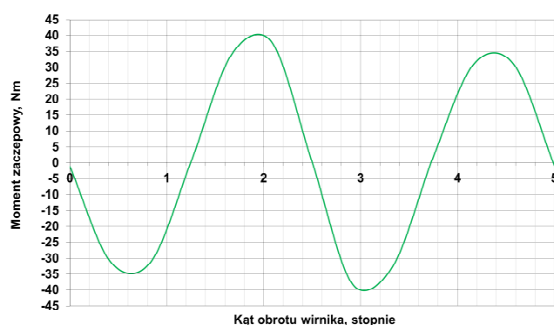
Dokładność obliczeń elektromagnetycznych zrealizowanych za pomocą obydwu zastosowanych metod jest wystarczająca do poprawnego wykorzystania tych metod do projektowania generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi przeznaczonych do pracy w małych elektrowniach wodnych.



Rys. 10. Przebiegi napięcia fazowego (niebieski przebieg odkształcony) i prądu (kolor zielony) modelowego generatora 20 kW podczas współpracy z dedykowanym przemiennikiem częstotliwości w punkcie obciążenia znamionowego

Jak widać na rysunkach 8, 9 i 10, zaprojektowany modelowy generator we współpracy z dedykowanym przemiennikiem częstotliwości, pracuje ze współczynnikiem mocy zbliżonym do jedności, w szerokim zakresie zmian mocy obciążenia P_2 .

Na rysunku 11 zaprezentowano obliczony dla modelowego generatora 20 kW przebieg tzw. momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wirnika w zakresie jednej podziałki żłobkowej stojana.



Rys. 11. Charakterystyka momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wirnika w zakresie jednej podziałki żłobkowej stojana (bez skosu)

Jak widać na rysunku 11, maksymalna wartość momentu zaczepowego wynosi ok. 40 N·m, co stanowi 4,9 % momentu znamionowego hydrogeneratora. Przebieg momentu zaczepowego w zakresie jednej podziałki żłobkowej stojana

ma 2 okresy, co jest poprawnym rozwiązaniem w wielobiegunowej maszynie wolnoobrotowej, charakteryzującej się liczbą żłobków twornika na biegun i fazę $q = 1$. Generator z takim przebiegiem momentu zaczepowego (rys. 11) będzie miał ok. pięciokrotnie mniejszą wartość amplitudy momentu zaczepowego w stosunku do generatora z tym samym obwodem magnetycznym stojana i jednookresowym przebiegiem momentu zaczepowego (co może wystąpić np. przy zastosowaniu innego sposobu rozmieszczenia magnesów trwałych w wirniku).

5. Podsumowanie i wnioski

Pomimo niekorzystnych warunków hydrologicznych w Polsce (stosunkowo mała ilość rzek), z uwagi na niski stopień wykorzystania dostępnych zasobów wodnych, nadal jest duży potencjał do rozwoju mikro i mini hydroelektrowni. Przy budowie nowych lub modernizacji istniejących mikro- lub mini- elektrowni wodnych, najbardziej opłacalne (stosunkowo krótki czas zwrotu inwestycji) jest stosowanie prostych konstrukcyjnie turbin śmigłowych. Aby zagwarantować wysoką sprawność pracy hydroelektrowni z turbiną śmigłową konieczne jest jednak regulowanie prędkości obrotowej tejsze turbiny, stosownie do zmian warunków wodnych w miejscu jej zainstalowania. Generatory asynchroniczne pracujące w obecnych małych elektrowniach wodnych bezpośrednio na sieć, nie pozwalają na pracę turbin śmigłowych ze zmienną prędkością obrotową.

Omawiany w artykule hydrozespół prądotwórczy, składający się z turbiny śmigłowej, generatora synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi, współpracującego z przemiennikiem częstotliwości, zapewnia optymalną pracę małej elektrowni wodnej przy zmiennej prędkości obrotowej turbiny, stosownie do zmian warunków hydrologicznych. Przedstawiony generator synchroniczny z magnesami trwałymi o mocy znamionowej 20 kW i prędkości obrotowej znamionowej 250 obr/min., zaprojektowany z wykorzystaniem nowo opracowanych algorytmów obliczeniowych, spełnia wymagania stawiane maszynie elektrycznej współpracującej z przemiennikiem częstotliwości (rys. 8, 9, 11). Optymalnie zaprojektowany generator pozytywnie wpłynie na sprawność całego hydrozespołu.

Dzięki współpracy hydrogeneratora z dedykowanym przemiennikiem częstotliwości, możliwe będzie wyeliminowanie przekładni mecha-

nicznej, co zwiększa sprawność hydroelektrowni, zmniejsza koszty eksploatacyjne o koszty obsługi przekładni, podwyższa niezawodność pracy elektrowni i eliminuje ryzyko zanieczyszczenia wody środkami smarnymi.

Przedstawione na rys. 8 i 9 porównanie charakterystyk obciążenia $U_{LL} = f(P_2)$ oraz $I_1 = f(P_2)$ generatora pracującego samotnie na odbiornik R lub RL, obliczonych opracowaną metodą polowo-obwodową oraz z wykorzystaniem analizy MES dla stanów przejściowych, wykazuje bardzo dobrą zgodność wyników obu metod dla szerokiego zakresu obciążeń mocą P_2 . Jedynie przy obciążeniach bliskich mocy maksymalnej P_2 dla danego $\cos\phi$ uwidaczniają się różnice w wynikach obliczeń z dwóch metod, nie przekraczające jednak 3,5 %. Zaletą nowego algorytmu polowo-obwodowego jest krótki czas obliczeń charakterystyk obciążenia, który dla jednej wartości $\cos\phi$ nie przekracza 15 min. Obliczenie tych samych charakterystyk za pomocą analizy MES dla stanów przejściowych zajmowało ok. 8 godz. (analizowano tą samą liczbę punktów na charakterystykach, dla każdego punktu obliczano dwa okresy elektryczne przebiegów czasowych).

Literatura

- [1]. Lewandowski W. M.: „Proekologiczne źródła energii odnawialnej”, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2002.
- [2]. Borkowski D., Węgiel T.: „Analiza sprawności toru przetwarzania energii małej elektrowni wodnej ze zintegrowaną turbiną pracującą przy zmiennej prędkości obrotowej”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 3/2013, Katowice 2013.
- [3]. Glinka T.: „Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [4]. Bernatt J.: „Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi”, Wydawnictwo KOMEL, Katowice 2010.
- [5]. Pistelok P., Rossa R.: „Generator z magnesami trwałymi do pracy w agregacie prądotwórczym”, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Po-
- miarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 66, Studia i Materiały nr 33, str. 176-181, tom 1.
- [6]. Rossa R., Pistelok P., Dąbrowski A.: „Projekt prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi do odnawialnych źródeł energii”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 3/2012, Katowice 2013.
- [7]. Rossa R., Wolnik T.: „Obliczenia charakterystyk obciążenia prądnic 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 Politechniki Wrocławskiej, nr 66, Studia i Materiały nr 32, Wrocław 2012.
- [8]. Rahman 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.
- [9]. Rahman M.A., Zhou P.: „Field-Based Analysis for Permanent Magnet Motors”, IEEE Trans. On Magnetics, Vol. MAG-30, No. 5, pp. 3664-3667, Sep. 1994.
- [10]. Rahman M.A., Zhou P., Jabbar M.A.: „Field Circuit Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-30, No. 4, pp. 1350-1359, July 1994.

Autorzy

mgr inż. Paweł Pistelok
e-mail: p.pistelok@komel.katowice.pl

dr inż. Robert Rossa
e-mail: r.rossa@komel.katowice.pl
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych
KOMEL, 40-203 Katowice
Al. Roździeńskiego 188

Projekt współfinansowany ze środków publicznych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Tytuł projektu: „Wysokosprawne zespoły prądotwórcze dla małych hydroelektrowni”.

Nr projektu: 178313.

Nr umowy: PBS1/B4/4/2012.