

Optymalizacja turbiny promieniowo-osiovej pracującej w systemie UWCAES

Optimization of a radial-axial turbine working in a UWCAES system

ŁUKASZ WITANOWSKI
PIOTR KLONOWICZ
PIOTR LAMPART *

Materiały z XX SKWPWiE, Jurata 2016 r.
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.213

W pracy przedstawiono metodę optymalizacji geometrii wirnika turbiny powietrznej pracującej w układzie UWCAES. Opisano obiekt poddany modyfikacjom, budowę funkcji celu oraz użyte algorytmy. Na końcu porównano otrzymane wyniki z geometrią wzorcową. Przedstawiony sposób zwiększania sprawności jest możliwy do zastosowania w innych turbinach ciepłych.

SŁOWA KLUCZOWE: optymalizacja, turbina, UWCAES, magazynowanie energii, sprawność

The work presents an optimization method of rotor blade geometry of an air turbine working in an UWCAES system. The modified object, the objective function and the used algorithms have been described. Finally, the results of the optimization process have been compared with the original case. The presented method of the efficiency improvement can be used in other thermal turbines.

KEYWORDS: optimization, turbine, UWCAES, energy storage, efficiency

Magazyny energii elektrycznej UWCAES (*underwater compressed air energy storage*) stanowią obiecującą alternatywę dla powszechnie stosowanych elektrowni szczytowo-pompowych [1]. Obecnie budowa nowych elektrowni opartych o turbiny wodne jest trudna w realizacji ze względu na restrykcyjne prawo chroniące środowisko naturalne oraz wysokie koszty inwestycyjne. Istnieje wiele innych technologii magazynowania energii elektrycznej (np.: superkondensatory, akumulatory, koła zamachowe), które jednak póki co w wielkiej skali nie są w stanie konkurować z systemami wykorzystującymi technologię CAES [2].

Integralnym elementem układu UWCAES jest turbina, która rozpręża powietrze zmagazynowane w balonie (zbiorniku ciśnieniowym) zainstalowanym na dnie zbiornika wodnego. W celu osiągnięcia wysokiej sprawności konwersji energii układu UWCAES potrzebna jest sprawna i poprawnie pracująca maszyna energetyczna.

W przepływie czynnika roboczego przez turbinę występują straty, które uniemożliwiają całkowitą konwersję energii cieplnej na energię mechaniczną. W celu ograniczenia poziomu strat i podwyższenia sprawności przepływowej można zastosować współczesne techniki optymalizacyjne [3-5]. Optymalizacja pozwala na uzyskanie wymiernych korzyści, które mogą wynikać z niewielkich zmian, np.: w geometrii udoskonalanego obiektu. Końcowy efekt procesu ulepszenia związany jest ściśle z odpowiednim przygotowaniem parametryzacji obiektu, wyborem algorytmu optymalizacyjnego oraz poprawnym określeniem funkcji celu i funkcji kary [6].

Opis przypadku

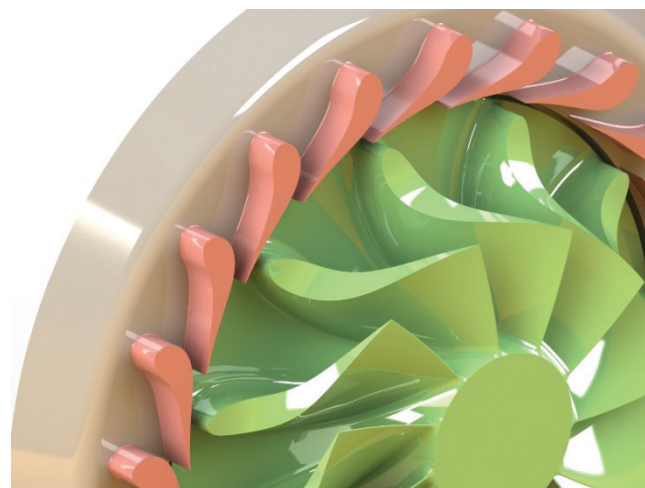
Parametry projektowe turbiny powietrznej pracującej w systemie UWCAES przedstawiono w tabl. I. Obliczenia 0D zrealizo-

wano w środowisku Matlab 2015b z wykorzystaniem biblioteki NIST Refprop 9.0 [8]. Sprawność przepływowa turbiny (bez uwzględnienia strat związanych z przeciekami) wynosi 93% przy mocy 270 kW.

TABLICA I. Parametry projektowe turbiny UWCAES

Prędkość obrotowa	44000 obr/min
Ciśnienie wlotowe	701.54 kPa
Temperatura wlotowa	476.95 K
Ciśnienie wylotowe	101.33 kPa
Strumień masy	1.48 kg/s
Moc turbiny	270 kW

Optymalizowana turbina posiada 20 łopatek kierowniczych oraz 11 łopatek wirnikowych. Średnica koła wirnikowego wynosi 194 mm. Model 3D został przedstawiony na rys. 1.



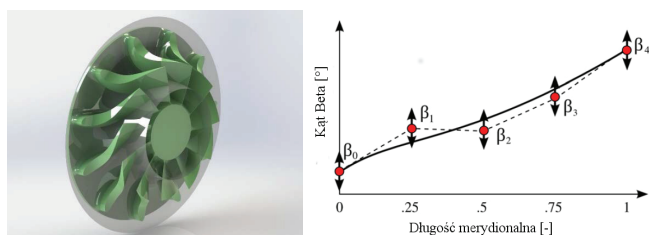
Rys. 1. Model 3D optymalizowanej turbiny pracującej w systemie UWCAES

Metodologia

Parametryzacja trójwymiarowej geometrii prezentowanej turbiny promieniowo-osiovej polega na zmianie rozkładu kąta beta (kąta łopatkowego) wzdłuż linii szkieletowej łopatki. Rozkład został zdefiniowany na podstawie krzywej Béziera opisaną 5 punktami kontrolnymi (krzywa 4. stopnia), zaczynając od krawędzi natarcia, a kończąc na krawędzi spływu. Zmiany dokonywano na 3 wysokościach łopatki wirnika (trzech przekrojach). Przykładowy rozkład przedstawiono na rys. 2.

Proces optymalizacji zawarto w 8 etapach. Etapy I-V obejmują część iteracyjną procesu. W każdej iteracji w wyniku działania algorytmu optymalizacyjnego modyfikowano kształt łopatki wirnikowej, wykorzystując program Ansys Blade Modeler

* Mgr inż. Łukasz Witanowski (lukasz.witanowski@imp.gda.pl); dr inż. Piotr Klonowicz (pklonowicz@imp.gda.pl); dr hab. inż. Piotr Lampart (lampart@imp.gda.pl) – Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk.



Rys. 2. Po lewej – geometria wirnika wraz z rysowaną przykładową powierzchnią (połowa wysokości kanału), na której dokonywano zmian rozkładu kąta łopatkowego; po prawej – przykładowy rozkład kątów łopatkowych na danej powierzchni [9]

16.0 w trybie wsadowym (etap II). W etapie III dyskretyzowano obszar obliczeniowy, korzystając z programu Ansys Turbogrid 16.0, który dzieli domenę na elementy heksahedralne. Liczbę elementów siatki obliczeniowej wieńca wirnikowego zdefiniowano na poziomie 300 tys. węzłów (co zgodnie z doświadczeniem autorów jest rozsądnym kompromisem pomiędzy dokładnością obliczeń i szybkością ich wykonywania). W trakcie optymalizacji jakość każdej siatki była monitorowana. W etapie IV przeprowadzono obliczenia CFD nowo powstałej domeny. Stacjonarne obliczenia typu RANS wykonywano przy zastosowaniu przestrzennej dyskretyzacji drugiego rzędu. Trójwymiarowe, ściśliwe przepływy powietrza rozpatrywano w pojedynczych układach łopatkowych z zastosowaniem warunków periodyczności. Pomiedzy nieruchomymi i wirującymi domenami zastosowano interfejs „Frozen Rotor”. Zastosowano model turbulencji k-w SST oraz automatyczny krok czasowy. W ostatnim etapie części iteracyjnej wykorzystano program ANSYS CFD POST 16.0 w celu określenia parametrów przepływu oraz zbierania danych do dalszej analizy. Generowano również rzut 3D turbiny powietrznej ze zmienioną geometrią.

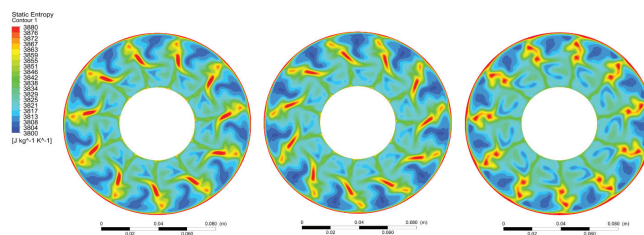
Etapy VI-VIII wchodziły w skład weryfikacji otrzymanej geometrii. Zbudowano siatkę obliczeniową zawierającą 2,5 mln elementów, wykonano obliczenia i porównano otrzymane wyniki z geometrią wzorcową. Jako funkcję celu przyjęto sprawność liczoną z momentu otrzymanego na kole wirnikowym. Zdefiniowano również funkcję kary obejmującą udział dynamiczny wirnika. W procesie optymalizacji wykorzystano dwa algorytmy, które zostały zaimplementowane w środowisku Matlab. Pierwszym algorytmem jest deterministyczna metoda sympleksu Nelder-Meada zaproponowana przez Lagarias [10]. Drugim z zastosowanych algorytmów jest filtrowanie niejawnie, którego twórcą jest Tim Kelly [11].

Wyniki i weryfikacja obliczeń

Wyniki obliczeń optymalizacyjnych zestawiono w tabl. II. Osiągnięto poprawę sprawności z 0,930 do 0,935 a więc o 0,5 punktu procentowego. Parametry pracy turbiny takie jak moc, masowe natężenie przepływu oraz ciśnienie za kierownicą pozostały bez większych zmian. Na rys. 3 pokazano zmianę rozkładu entropii, na której widoczne są ślady załopatkowe pochodzące od wieńca wirującego oraz przyrosty entropii w środku kanału przepływowego, które można przypisać przepływom wtórnym.

TABLICA II. Wyniki obliczeń optymalizacyjnych

Opis	Sprawność Total to static	Sprawność Total to total	Moc	Masowe natężenie przepływu	c1	p1
	[-]	[-]	[kW]	[kg/s]	[m/s]	[kPa]
OR	0.93087	0.95179	282.62	1.4805	458.77	282.46
ZIF	0.93515	0.95348	283.59	1.4788	448.64	295.29
ZDS	0.93181	0.95269	282.92	1.4806	458.57	283.12



Rys. 3. Porównanie rozkładu entropii za wieńcem wirnika – kolejno od lewej: oryginalny, uzyskany przy zastosowaniu metody filtracji niejawnie, uzyskany przy zastosowaniu metody poszukiwania bezpośredniego

Podsumowanie i wnioski

Otrzymane wyniki obliczeń potwierdzają, że w przypadku dobrze zaprojektowanej turbiny cieplnej można uzyskać niewielką poprawę sprawności w wyniku zmiany profilu łopatek wirnikowej. Nie przesądza to jednak o słuszności prowadzenia badań optymalizacyjnych, gdyż nawet nieznaczna poprawa pracy turbiny w okresie długoterminowym może przynieść wymierne korzyści finansowe, tym bardziej, że zmiana wprowadzana w ten sposób nie wpływa na koszty inwestycyjne, a zatem uzyskany niewielki efekt sprawnościowy uzyskuje się niejako „za darmo”.

W celu uzyskania zdecydowanie lepszych wyników, należy poszerzyć dziedzinę poszukiwań, tzn. zmieniać prędkość obrotową, obrys kanału przepływowego, ustawienia łopatek, średnice oraz złożone pochylecia wieńca wirnikowego. Należy również znaleźć skuteczny algorytm, który pozwoli w szybkim czasie osiągnąć zamierzone cele.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr 2015/17/N/ST8/01782 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

Praca została wykonana z wykorzystaniem Infrastruktury PL Grid oraz na licencji Matlab 2015b otrzymanej z Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej.

LITERATURA

- Li B., DeCarolis J. F. „A techno-economic assessment of offshore wind coupled to offshore compressed air energy storage”. *Appl. Energy*, 155, 2015, pp. 315÷322.
- Luo X., Wang J., Dooner M., Clarke J. „Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation”. *Appl. Energy*, 137, 2014, pp. 511÷536.
- Klonowicz P. „Optymalizacja turbin przeznaczonych do pracy w niskotemperaturowych obiegach ORC (Organic Rankine Cycle)”. Lodz University of Technology, 2012.
- Lampart P., Hirt Ł. „Complex multidisciplinary optimization of turbine blading systems”. *Arch. Mech.*, 64(2), 2012, pp. 153÷175.
- Witanowski Ł., Klonowicz P., Lampart P. „Optymalizacja kształtu łopatek wirnika turbiny osiowej pracującej na czynniku MDM”. *Mechanik*, 7, 2015, pp. 959÷970.
- Yang B., Xu Q., He L., Zhao L. H., Gu C. G., Ren P. „A Novel Global Optimization Algorithm and its Application to Airfoil Optimization”. Volume 1A: *Aircraft Engine; Fans and Blowers*, ASME, p. V01AT10A001, 2014.
- Chodkiewicz R. „Ćwiczenia projektowe z turbin cieplnych”. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2008.
- Lemmon E., Huber M., McLinden M. „REFPROP”. National Institute of Standards and Technology, 2010.
- Mueller L., Alsalihi Z., Verstraete T. „Multidisciplinary Optimization of a Turbocharger Radial Turbine”. *J. Turbomach.*, 135(2), 2012, p. 21÷22.
- Lagarias J., Reeds J., Wright M., Wright P. „Convergence Properties of Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions”. *SIAM J. OPTIM.*, 9, 1998, pp. 112÷147.
- Kelley C. T. „Implicit Filtering Book”. North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, 2011.