

Projekt i charakterystyka regulacyjna turbiny przeznaczanej do pracy w niskociśnieniowych układach UWCAES

Design and control characteristics of a low pressure UWCAES turbine

PIOTR KLONOWICZ
ŁUKASZ WITANOWSKI
PIOTR LAMPART *

Materiały z XX SKWPPWiE, Jurata 2016 r.
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.150

W pracy przedstawiono przykładowy projekt układu przepływowego turbiny małej mocy przeznaczanej do odzyskiwania energii z niskociśnieniowego zasobnika UWCAES. Opisano założenia projektowe i zaprezentowano wyniki obliczeń.

SŁOWA KLUCZOWE: magazynowanie energii, CAES, UWCAES, turbiny

The work presents an example of the flowpath design of a small-scale turbine dedicated to energy recovery from a UWCAES system. The design assumptions along with the computation results have been described.

KEYWORDS: energy storage, CAES, UWCAES, turbines

Powszechnie uznaje się, że żadna technologia magazynowania energii elektrycznej nie jest w stanie poradzić sobie z wszystkimi wymaganiami systemu elektroenergetycznego (SEE), takimi jak: szybkość odpowiedzi, jakości energii (np.: odpowiednia częstotliwość), pojemność, czas rozładowania [1]. W polskim SEE rolę magazynów energii elektrycznej pełnią elektrownie szczytowo-pompowe, których łączna moc zainstalowana wynosi 1767 MW. Obecnie budowa nowych instalacji tego typu nie jest możliwa ze względu na uwarunkowania techniczno-środowiskowe. Aktualnie poszukiwane są nowe rozwiązania magazynowania energii elektrycznej. Wysoką sprawnością oraz pojemnością magazynowania poza PHES odznacza się technologia CAES oraz rozwijana w ostatnich latach UWCAES.

Układ UWCAES opera się na dojrzałych rozwiązaniach CAES. Podstawowy system składa się z kompresora, turbiny, magazynu ciepła i zasobnika powietrza, który zakotwiony jest na dnie zbiornika wodnego. Systemy UWCAES ze względu na stałe ciśnienie w zbiorniku pozwalają na pracę kompresora oraz turbiny w projektowym punkcie pracy. Co więcej, zastosowanie systemu wielopoziomowego umożliwiłoby jeszcze lepszą regulację sieci elektroenergetycznej [3]. Układy te mogą pracować w pobliżu odnawialnych źródeł energii, takich jak elektrownie wiatrowe, powodując wzrost efektywności [2]. Pierwszy komercyjny układ UWCAES wybudowała firma Hydrostor na dnie jeziora Ontario w Kanadzie. Instalacja składa się z sześciu balonów, które zajmują powierzchnię 400 m². System wybudowany w Toronto pozwala na zmagazynowanie energii elektrycznej na poziomie 1320 kWh [9].

Studium przypadku

Założono, że niskociśnieniowy układ UWCAES mógłby pracować w rejonie Zatoki Gdańskiej, która jest właściwie jedyną możliwą morską lokalizacją tego typu instalacji w Polsce (można rozważyć też niektóre jeziora). Pozostała część wód terytorialnych ma zbyt małą głębokość. Rozkład głębokości Zatoki Gdańskiej sugeruje, że najlepszą lokalizacją lądową

dla takiego systemu byłyby Półwysep Helski. Dla dość długiego fragmentu linii brzegowej Helu dostępne są głębokości na poziomie 70 m w odległości około 7 km od brzegu.

Przykładowa instalacja mogłaby być zlokalizowana na tej właśnie głębokości i miałaby postać zbiorników o pojemności 100 m³. Można przyjąć, że zbiorniki miałyby kształt zbliżony do cylindrów, a ich wysokość wynosiłaby 10 m. Należy zauważyć, że uśrednione w czasie ciśnienie panujące w zbiornikach byłoby niższe niż ciśnienie hydrostatyczne panujące bezpośrednio na dnie, ponieważ poziom wody w zbiorniku zmienia się w zależności od stopnia jego napełnienia. Można zatem przyjąć, że średnie ciśnienie odpowiadałoby wysokości około 0,5 zbiornika – 5 m od dna. Do tej wartości powinno się też doliczyć odległość potrzebną na zakotwienie zbiornika, która mogłaby wynosić około 2 m. Głębokość zastępcza takiego układu jest zatem równa 63 m, co odpowiada ciśnieniu względnemu równemu 6,3 bar.

Układ napełnia się poprzez zastosowanie sprężarki adiabaticznej, a ciepło sprężania jest magazynowane, by w cyklu rozładowania układu być wykorzystane przez turbinę.

Sprężone powietrze pobierane jest ze zbiorników, a następnie podgrzewane przez magazyn ciepła i kierowane na turbinę, która napędza generator elektryczny.

Dobór turbiny

W niniejszej pracy przedstawiono przykład turbiny dedykowanej do tego typu systemu. Założono, że maksymalna moc turbiny to około 270 kW, co jest wartością podobną do tej osiągniętej przez pilotażowy układ firmy Hydrostor [4]. Magazyn ciepła jest w stanie podgrzać powietrze przed turbiną do 204 °C.

Przyjęto, że turbina powinna charakteryzować się z jednej strony wysoką sprawnością, a z drugiej – możliwie prostą konstrukcją, zwłaszcza dla tak niewielkiej mocy. Rozwiązaniem spełniającym te wymogi jest stopień promieniowo-osioowy, który bywa stosowany tam, gdzie potrzebna jest kompaktowa konstrukcja, np. w turbodoładowarkach silników spalinowych. Stopień tego typu charakteryzuje się wysoką sprawnością, a ze względu na dobre właściwości strukturalne geometrii promieniowo-osioowego koła wirnikowego możliwe jest obciążenie go znacznym spadkiem entalpii [5, 6].

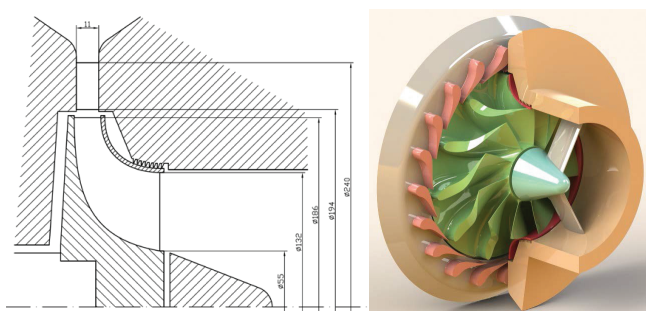
Obliczenia projektowe zero-wymiarowe przeprowadzono z wykorzystaniem środowiska programistycznego Matlab w wersji 2015b. Prędkość obrotowa równa 44 000 obr/min została tak dobrana, aby zapewnić wartość wyróżnika szybkości bliską optymalnej – około 0,09. Należy podkreślić, że tak wysoka prędkość obrotowa wymaga zastosowania specjalnego, szybkoobrotowego generatora elektrycznego oraz inwertera częstotliwości. Wymiary główne omawianego urządzenia pokazano na rys. 1.

Dla zadanych parametrów projektowych uzyskuje się dość wysoką wartość prędkości unoszenia u_1 , która wynosi około 430 m/s. Wartość ta narzuca konieczność przyszłej analizy wytrzymałościowej koła wirnikowego.

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

Geometrię układu przepływowego – zarówno wieńca kierowniczego, jak i wirnikowego – przygotowano w programie Ansys BladeGen. Zastosowano zbieżne kanały kierownicze, ponieważ przepływ na wylocie z wieńca stacjonarnego jest wprawdzie nadźwiękowy, ale średnia liczba Macha jest względnie niska (ok. 1,1).

Po przygotowaniu geometrii przeprowadzono trójwymiarowe obliczenia sprawdzające w punkcie projektowym. Dyskretyzację domen kierownic i wirników przeprowadzono w programie Ansys TurboGrid, który jest w stanie efektywnie generować wysokiej jakości siatki heksahedralne dla kanałów międzyłopatkowych.



Rys. 1. Wysokosprawny stopień turbiny odpowiadający zaprezentowanemu przykładowi zasobnika UWCAES

W obliczeniach wykorzystano komercyjny kod CFD. Obliczenia typu RANS wykonywano przy zastosowaniu przestrzennej dyskretyzacji drugiego rzędu. Zastosowano model turbulencji k- ω SST z automatyczną funkcją ścianki. Na podstawie badań eksperymentalnych można stwierdzić, że to podejście daje satysfakcjonujące wyniki w zastosowaniach inżynierskich [13].

Jako warunki brzegowe zastosowano parametry projektowe i dodatkowo intensywność turbulencji na poziomie 5%. Równania ciągłości, zachowania pędu i energii bilansowały się dostatecznie (poziom niezbilansowania nie przekraczały 0,01% średnich wartości). Średnie rezydualne wartości (RMS) zawsze osiągały poziom poniżej $1e-4$.

Obliczenia sprawdzające pokazują, że stopień ten charakteryzuje się wysoką sprawnością wewnętrzną, która jest równa 92,6%. Wartość ta nie uwzględnia przecieków i dodatkowych strat mechanicznych. Potwierdza to jednak wysoki potencjał sprawnościowy, a dzięki obliczeniom optymalizacyjnym wynik ten można jeszcze poprawić.

Charakterystyka regulacyjna

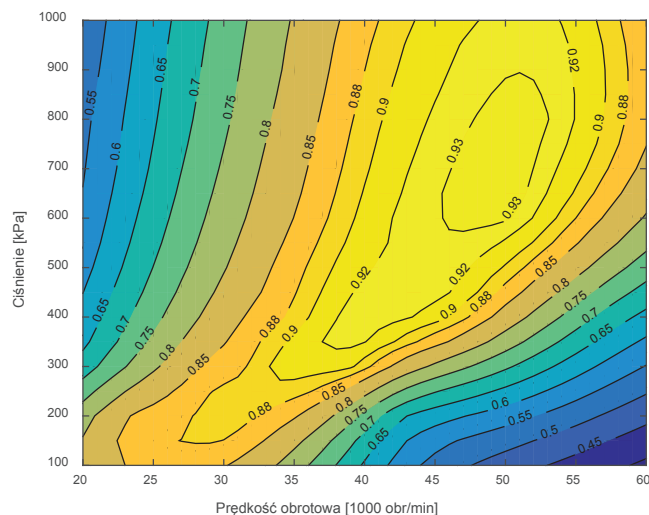
W przypadku, gdy zasobnik energii działa w układzie wyśpym, z reguły konieczna będzie praca urządzeń przy częściowym obciążeniu. W przypadku turbiny należy wtedy wybrać sposób jej regulacji. Najprostszym rozwiązaniem jest zastosowanie zaworu regulacyjnego, który będzie ograniczał parametry przed samą turbiną poprzez tzw. dławienie izentalpowe. Takie rozwiązanie wiąże się jednak ze stratami, które zwłaszcza dla niskich obciążeń mogą być znaczne.

W pierwszej kolejności przeprowadzono obliczenia CFD omawianego stopnia turbinowego dla różnych wartości ciśnienia wlotowego oraz różnych wartości prędkości obrotowej (wskaźnika prędkości). Otrzymana charakterystyka pracy turbiny została zaprezentowana na rys. 2.

Zakładając zmienną prędkość obrotową dla każdego ciśnienia zasilania, można znaleźć optymalną jej wartość, która odpowiada najwyższej sprawności. Następnie funkcję maksymalnej sprawności od ciśnienia zasilania można wykorzystać przy tworzeniu charakterystyki regulacyjnej.

Dysponując przedstawioną charakterystyką sprawnościową i znając wydatek (strumień masy) urządzenia w zależności od ciśnienia, można sporządzić funkcję wiążącą sprawność oraz

produkowaną moc z uwzględnieniem dławienia izentalpowego. Można stwierdzić, że im mniejsza produkowana moc, tym mniejsza sprawność urządzenia, a poniżej pewnej wartości tendencja ta nabiera gwałtownego charakteru. W związku z tym praktyczny zakres zastosowania urządzenia to 60% mocy, czyli pole, w którym sprawność utrzymuje się powyżej 80%.



Rys. 2. Charakterystyka sprawnościowa turbiny w zależności od prędkości obrotowej i ciśnienia zasilania

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono koncepcję turboekspandera przeznaczonego do pracy w systemach magazynowania energii wykorzystujących sprężone powietrze (UWCAES). Zaprojektowany układ przepływowy charakteryzuje się wysoką sprawnością w punkcie projektowym. Sprawność ta ulega znacznemu pogorszeniu w przypadku pracy przy częściowym obciążeniu, co wynika ze znacznej ilości dyssypowanej energii w zaworze regulacyjnym.

W przypadku układu pracującego często przy niskich obciążeniach być może lepiej sprawdziłyby się stopnie akcyjne, które mogą być regulowane poprzez zastosowanie częściowego zasilania. Wprawdzie sam stopień akcyjny jest mniej sprawny w punkcie projektowym od turbiny promieniowo-osiowej, jednakże ma potencjalnie szersze pole pracy. Alternatywnie istnieje możliwość zastosowania zmiennej geometrii wieńca kierowniczego, co niewątpliwie podniosłoby sprawność dla niskich obciążeń, jednakże wiąże się z koniecznością zastosowania mechanizmu zmieniającego kąt ustawienia łopatek.

* * *

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

LITERATURA

- 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) 511-536.
- Wang Z., Ting D.S.-K., Carriveau R., Xiong W., Wang Z. "Design and thermodynamic analysis of a multi-level underwater compressed air energy storage system". *J. Energy Storage*. 5 (2016) 203-211.
- Cheung B.C., Carriveau R., Ting D.S.-K. "Multi-objective optimization of an underwater compressed air energy storage system using genetic algorithm". *Energy*. 74 (2014) 396-404.
- Hydrostor, (2016). <http://www.hydrostor.ca/>.
- Mueller L., Alsalihi Z., Verstraete T. "Multidisciplinary Optimization of a Turbocharger Radial Turbine". *J. Turbomach.* 135 (2012) 021022.
- Binder N., Le Guyader S., Carbonneau X. "Analysis of the Variable Geometry Effect in Radial Turbines". *J. Turbomach.* 134 (2012) 041017.
- Menter, F.R. "Zonal two-equation k- ω turbulence model for aerodynamic flows". *AIAA Paper* 1993-2906, 1993.