

Abstract

As Horizontal-Axis Wind Turbines (HAWTs) have developed rapidly over recent decades, wind energy has grown rapidly in many parts of the world. This development was preceded by the efforts of scientists and inventors worldwide. This has resulted in HAWTs becoming a mature invention from the perspective of aerodynamics, aeroelasticity, durability, control, and power engineering.

Competitors to these classical solutions are Vertical-Axis Wind Turbines (VAWTs). The most well-known example is the Darrieus turbine, patented in 1926, which shows that this is by no means a new concept for harvesting wind energy. From the offshore application perspective, this type of turbine offers several significant advantages. These include a low-lying center of gravity, accessibility of a massive generator at the waterline, independence from wind direction, a shorter aerodynamic wake enabling denser turbine placement within a wind farm, and a subjectively lower visual impact on the landscape. However, their maximum power coefficient is lower compared to Horizontal-Axis Wind Turbines. In this context, due to still-imperfect modelling approaches for VAWTs, there remains considerable potential to improve their efficiency and generated power.

This dissertation focuses on the analysis of phenomena occurring in the blade boundary layer of Vertical-Axis Wind Turbines and their impact on aerodynamic loads, wake characteristics, and the turbine power coefficient.

The influence of the laminar-turbulent transition location and laminar separation bubbles on the aerodynamic characteristics of turbine blades was investigated. The study was conducted under wind-tunnel conditions representative of the TU Delft facility, characterized by low Reynolds numbers (up to 200,000) and low turbulence intensity levels

(up to 0.5%). Aerodynamic forces obtained under such laboratory-scale conditions differ significantly from those occurring in real flow conditions around full-scale turbine blades. The effect of zigzag tapes is also considered, as their use is common in wind-turbine experiments due to their ability to control flow separation and suppress laminar separation bubbles.

To analyze boundary-layer phenomena on turbine blades at low Reynolds numbers, computational fluid mechanics methods were employed, in particular the Unsteady Reynolds-Averaged Navier–Stokes (URANS) approach. The study focused on the $\gamma - Re_\theta$ turbulence model for simulating laminar–turbulent transition in the boundary layer. The obtained results were compared with wind-tunnel measurements available in the literature, as well as with experimental data generated within the framework of the journal publications.

The results obtained during this doctoral thesis provide a foundation for the development of numerous simulation methods for Vertical-Axis Wind Turbines. They provide insight into turbine behavior at low Reynolds numbers and under varying turbulence levels, reflecting conditions encountered in experimental wind tunnel studies.

The dissertation is constituted by a series of publications, of which the author of the doctoral thesis is a co-author.

Keywords:

Vertical-Axis Wind Turbine, Computation Fluid Dynamics, aerodynamics, laminar-to-turbulent transition, laminar separation bubble

Streszczenie

W wyniku gwałtownego rozwoju turbin wiatrowych o poziomej osi obrotu (Horizontal-Axis Wind Turbines – HAWT) w ciągu ostatnich dekad, energetyka wiatrowa doznała szybkiego wzrostu w wielu miejscach na świecie. Ten rozwój poprzedził wysiłek naukowców i wynalazców na całym świecie. Wskutek tego siłownie wiatrowe o poziomej osi obrotu stały się dojrzałym wynalazkiem z punktu widzenia aerodynamiki, zagadnień aeroelastyczności, wytrzymałości, sterowania czy elektroenergetyki.

Konkurentami dla tych klasycznych rozwiązań są siłownie o pionowej osi obrotu (Vertical-Axis Wind Turbines – VAWT). Najbardziej znanym przykładem jest wiatrak typu Darrieusa opatentowany w 1926 roku – nie jest to zatem nowy pomysł na pozyskiwanie energii wiatrowej. Z punktu widzenia zastosowań offshore, ten typ turbin ma wiele istotnych zalet. Charakteryzuje się on nisko położonym środkiem ciężkości, dostępnością masywnego generatora z poziomu lustra wody, niezależnością od kierunku wiatru, krótszym śladem aerodynamicznym pozwalającym na gęstsze usytuowanie turbin na farmie czy subiektywnie mniejszym wpływem na krajobraz. Jednak, ich maksymalny współczynnik mocy jest niższy w porównaniu z turbinami o poziomej osi obrotu. Tutaj, ze względu na wciąż niedoskonałe metody modelowania tych turbin, jest nadal przestrzeń do poprawy ich sprawności i generowanych mocy.

Poniższa praca skupia się na analizie zjawisk występujących w warstwie przyściennej łopat turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu oraz ich wpływu na obciążenia aerodynamiczne, ślad aerodynamiczny oraz współczynnik mocy turbin.

Przeanalizowano wpływ położenia przejścia laminarno-turbulentnego oraz bąbla laminarnego na charakterystykę aerody-

namiczną łopat turbin. Badania przeprowadzono dla warunków występujących w tunelu aerodynamicznym w TU Delft, takich jak niska liczba Reynoldsa (do 200 000) oraz niskie wartości intensywności turbulencji (do 0,5%). Siły aerodynamiczne uzyskiwane w takich warunkach, tj. w skali laboratoryjnej, różnią się znacząco w porównaniu z rzeczywistymi warunkami przepływu wokół łopat pełnoskalowych urządzeń. Rozważany jest również wpływ taśm turbulizacyjnych (zigzag), których stosowanie jest popularne we wszystkich eksperymentach badających pracę turbin wiatrowych ze względu na możliwość kontroli oderwania i redukcji bąbli laminarnych.

Do analizy zjawisk w warstwie przyściennej łopaty w zakresie niskich liczb Re wykorzystano metody numeryczne mechaniki płynów, w szczególności metodę Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS). Skupiono się na modelu turbulencji $\gamma - Re_\theta$ modelującego zjawisko przejścia w warstwie przyściennej. Otrzymane wyniki porównano z wynikami badań tunelowych dostępnych w literaturze i przeprowadzonych w ramach prac nad artykułami.

Wyniki otrzymane w toku pracy doktorskiej są fundamentem do rozwoju wielu metod symulacji turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu. Dają obraz zachowania się turbin w zakresach niskich liczb Reynoldsa oraz przy różnych poziomach turbulencji, co odpowiada warunkom spotykanym w eksperymentach w tunelach aerodynamicznych.

Praca składa się z cyklu artykułów, którego autor pracy doktorskiej jest współautorem.

Słowa kluczowe:

turbina wiatrowa o pionowej osi obrotu, obliczeniowa mechanika płynów, aerodynamika, przejście laminarno-turbulentne, bąbel laminarny