

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Control of a Hybrid Oscillating Water Column – Offshore Wind Turbine

Payam Aboutalebi

For obtaining the academic degree of

DOCTOR (*Dr.*)

Doctoral Program

Control Engineering, Automation and Robotics

Automatic Control Group

Faculty of Engineering of Bilbao

University of the Basque Country (UPV/EHU)

Supervisors

Prof. Aitor J. Garrido

Prof. Izaskun Garrido

University of the Basque Country (UPV/EHU)

January 2022

Payam Aboutalebi

Control of a Hybrid Oscillating Water Column – Offshore Wind Turbine
Supervisors: Aitor J. Garrido and Izaskun Garrido

University of the Basque Country (UPV/EHU)

Automatic Control Group—ACG

Institute of Research and Development of Processes—IIDP

Department of Automatic Control and Systems Engineering

Po Rafael Moreno no3

48013 Bilbao (Spain)

Abstract

The wind energy sector is spreading its wings all over the world and wind power is gradually displacing fossil fuels. Due to the impacts of climate change and global warming, renewable energy resources such as wind and wave power are gaining popularity. It is essential to construct wind and wave supply infrastructure in order to tackle these challenges. Floating Offshore Wind Turbines (FOWT) have played a game-changing role in gathering more clean, renewable wind and wave resources and producing more power.

Offshore energy machines offer greater potential than onshore machines due to larger capacity factors, more accessible area, and less visible effects. Oscillating Water Columns (OWCs) may be incorporated into the FOWTs' platform for harnessing both wind and wave power supply. The integrated system of FOWT-OWCs has the potential to significantly reduce system costs by leveraging shared operation and maintenance and common grid infrastructure. It can also improve the system's smoothed power output and efficiency. However, one of the difficulties that lies ahead is the stability of FOWTs in order to reduce unwanted platform vibrations and capture as much energy as feasible. These undesirable movements diminish aerodynamic efficiency, limit tower fatigue life, and raise loads on blades, rotor shaft, yaw bearing, and tower base. As a result, it is vital to keep the FOWT's platform movements within a reasonable range.

In this thesis, four oscillating water columns have been integrated into the FOWT's barge platform to decrease the system's oscillations. To analyse the behavior of the hybrid system, Response Amplitude Operators

(RAO) have been evaluated. Using RAOs, a switching control method have been introduced to manage the transition between closing and opening OWCs' valves. The controller reduces the oscillations in a barge-based FOWT supporting 5 MW wind turbine. The considered environmental conditions consist of various sea states with low-rated, rated and above-rated wind speeds.

The results show that the considered switching control strategy has been able to reduce the oscillations in the barge-based FOWT efficiently. Consequently, this oscillation reduction lead to decrease the fluctuations in the generated power output. Also, the results illustrate that the average power output increases in low-rated wind speeds

These results have been obtained using the MultiSurf, WAMIT, FAST, and MATLAB-Simulink tools. Finally, to assess the performance of the suggested technique, a comparison has been made between the controlled OWCs-based barge and the traditional barge-based platforms.

This thesis work is structured as follows: the first chapter provides an overview of FOWT types and wave energy converters. It also discusses the advantages and disadvantages of the hybrid FOWT-oscillating water columns. The second chapter summarizes the current state of the art in FOWT stabilizing methods. The problem statement and thesis goals are then explained. Chapter 3 describes the performance of OWCs in barge-based FOWTs for various sea conditions. In chapter 4, a switching control method is presented to reduce oscillations in the hybrid FOWT-OWCs system when wind power is absent. Chapter 5 develops a switching control approach to decrease system oscillations in diverse sea conditions and wind speed scenarios. In addition, the performance of the controlled OWCs-based barge platform in terms of generated power has been examined in this chapter. Finally, in chapter 6, the findings of the thesis and future works are summarized.

Resumen

El sector de la energía eólica está extendiéndose en la actualidad por todo el mundo, desplazando gradualmente a los combustibles fósiles. Así, debido principalmente a los efectos del cambio climático y el calentamiento global, los recursos de energía renovable como es el caso de la energía eólica y marina undimotriz están avanzando de manera notable en su despliegue tecnológico. En este sentido, resulta fundamental construir infraestructuras adecuadas de suministro eólico y undimotriz para hacer frente a estos desafíos. A modo de ejemplo, las turbinas eólicas flotantes marinas (FOWT) han jugado un papel revolucionario permitiendo un aumento en la producción de energía en base al incremento en la oportunidad de recolección de recursos eólicos marinos. De igual modo, la energía undimotriz está llamada a jugar un rol importante en estos desarrollos.

La energía marina ofrece un enorme potencial debido a factores de capacidad más grandes, un área potencial más extensa y efectos menos visibles. Además, en el caso de la energía eólica marina, es posible incorporar sistemas de columnas de agua oscilante (OWC) en la plataforma FOWT para así aprovechar el suministro de energía tanto eólica como undimotriz.

En este sentido, el sistema integrado de FOWT-OWC tiene el potencial de reducir significativamente los costos del sistema al aprovechar procesos de operación y mantenimiento compartidos y una infraestructura de red común. De este modo, también puede mejorar la potencia extraída y la eficiencia del sistema. Sin embargo, una de las dificultades a resolver en

los sistemas FOWT es el control de su estabilidad al objeto de reducir vibraciones no deseadas de la plataforma y capturar la mayor cantidad de energía posible. Esta dinámica no deseada disminuye la eficiencia aerodinámica, limita la vida útil de la torre por fatiga al aumentar las cargas en las palas, en el eje del rotor, el cojinete de guiñada y en la base misma de la torre. Como resultado, resulta fundamental mantener el movimiento de la plataforma del FOWT dentro rangos adecuados, para lo cual la integración de sistemas OWC puede resultar de gran ayuda.

En esta tesis, se han integrado cuatro columnas de agua oscilante OWC en plataformas FOWT tipo barcaza de del FOWT para reducir las oscilaciones del sistema. Para analizar el comportamiento del sistema híbrido, se han evaluado operadores de amplitud de respuesta (RAO) del mismo. Mediante el estudio de los citados RAO, se ha desarrollado un método de control de conmutación para regular de manera adecuada la transición entre el cierre y la apertura de las válvulas de los sistemas OWC. Al objeto de probar el esquema de control, se ha considerado un sistema FOWT basado en barcaza con una turbina eólica de 5 MW. Para ello, se han tenido en cuenta condiciones ambientales consisten en diferentes estados de mar y velocidades de viento bajas, nominales y altas. Todo ello se ha implementado mediante la integración de las herramientas MultiSurf, WAMIT, FAST y MATLAB-Simulink.

Los resultados muestran que la estrategia de control de conmutación implementada es capaz de reducir las oscilaciones de la plataforma de manera eficiente. Asimismo, se observa una disminución de las fluctuaciones en la producción de energía generada. Además, se puede ver cómo la producción de energía promedio aumenta en velocidades de viento bajas.

Por último, y al objeto de evaluar el rendimiento de la estrategia planteada, se ha realizado una comparación entre la barcaza controlada basada en OWC y una plataforma tradicional.

La estructura del presente trabajo de tesis doctoral es el siguiente: El pri-

mer capítulo proporciona una descripción general de los tipos de FOWT y los convertidores de energía de las olas, además de analizar las ventajas y desventajas de sistemas de columnas de agua oscilante híbridos FOWT. En el segundo capítulo se resume el estado actual de los métodos de estabilización de sistemas FOWT. A continuación se expone el planteamiento del problema y los objetivos planteados en la tesis. El Capítulo 3 describe el desempeño del sistema OWC sobre FOWT tipo barcaza planteado en diversas condiciones del mar. En el Capítulo 4, se presenta el esquema de control de conmutación diseñado para reducir las oscilaciones en el sistema híbrido FOWT-OWC en ausencia de generación eólica. El Capítulo 5 desarrolla la estrategia de control de conmutación propuesta para disminuir las oscilaciones del sistema en diversos escenarios consistentes en diferentes condiciones del mar y velocidades del viento. Además, en este capítulo se analiza el rendimiento de la plataforma basada en OWC en términos de la potencia generada. Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan los principales resultados obtenidos del trabajo desarrollado a modo de conclusión, así como posibles trabajos y líneas futuras de investigación.