

MÔ HÌNH HÓA BỘ CHUYỂN ĐỔI NĂNG LƯỢNG SÓNG BIỂN DẠNG PHAO NỔI THEO PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH MIỀN THỜI GIAN

TIME DOMAIN MODELING FOR A FLOATING-POINT ABSORBER WAVE ENERGY CONVERTER

Nguyễn Thị Kim Loan¹, Phan Thành Long^{1*}, Lê Minh Tiến¹

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

*Tác giả liên hệ: ptlong@dut.udn.vn

(Nhận bài: 17/4/2021; Chấp nhận đăng: 25/5/2021)

Tóm tắt - Năng lượng sóng biển là một trong những nguồn năng lượng sạch có tiềm năng nhất vì có nhiều ưu điểm hơn các dạng năng lượng khác. Việc thu nhận năng lượng sóng biển và chuyển sang điện năng được thực hiện thông qua một bộ chuyển đổi (WEC), trong đó bộ chuyển đổi dạng phao nổi được sử dụng phổ biến nhất. Chính vì vậy, trong nghiên cứu này, đặc tính làm việc của một thiết bị chuyển đổi năng lượng sóng biển thành điện năng dạng phao nổi được mô hình hóa theo phương pháp miền thời gian. Kết quả mô phỏng cho phép đánh giá các thông số thủy động lực học của bộ chuyển đổi năng lượng sóng biển, và từ đó xác định các đặc tính chuyển động của bộ chuyển đổi theo đặc điểm sóng khu vực Biển Đông của Việt Nam. Kết quả mô phỏng cho thấy, thiết bị có thể chuyển động theo phương thẳng đứng lên độ cao 1 m so với mức nước tĩnh ban đầu. Công suất đầu ra trung bình của thiết bị được xác định khoảng 52 kW.

Từ khóa - Bộ chuyển đổi năng lượng sóng biển; mô phỏng trên miền thời gian; đặc tính sóng biển

1. Đặt vấn đề

Năng lượng sóng biển có mật độ năng lượng cao hơn so với các nguồn năng lượng tái tạo phổ biến khác như năng lượng mặt trời và năng lượng gió. Tuy nhiên, so với việc khai thác năng lượng mặt trời và gió, việc khai thác năng lượng sóng biển còn gặp nhiều khó khăn, vì các bộ chuyển đổi năng lượng sóng biển thành điện năng (WEC) vẫn đang ở giai đoạn nghiên cứu và phát triển [1]. Trong đó, có vài nghiên cứu đã tiến hành thử nghiệm một số mẫu mô hình thu nhỏ của các bộ WEC trên các vùng biển thực tế [2]. Các nghiên cứu này cho phép đánh giá đặc tính kỹ thuật của các bộ chuyển đổi năng lượng, tuy nhiên, việc thương mại hóa các sản phẩm này còn cần thêm nhiều giai đoạn phát triển nữa. Điều này cho thấy, việc phát triển các bộ chuyển đổi năng lượng sóng biển vẫn đang được tiếp tục, và điều này phụ thuộc rất nhiều vào các mô hình mô phỏng số, cũng như việc thử nghiệm mô hình thực tế để hoàn thiện các thiết kế.

Trong thực tế, có nhiều phương pháp mô hình số đã được phát triển để mô phỏng các bộ WEC, gồm có phương pháp phân tử biên theo cách tiếp cận miền tần số, phương pháp miền thời gian để giải các phương trình chuyển động, phương pháp giải phương trình chuyển động Morrison hoặc phương pháp động lực học chất lỏng tính toán (Computational Fluid Dynamics - CFD). Phương pháp mô phỏng CFD cho độ tin cậy cao, được sử dụng để mô hình hóa các tương tác phi tuyến phức tạp giữa sóng biển và bộ

Abstract - Ocean wave energy is one of the most potential sources of renewable energy, and it has more advantages than other forms of energy sources. The capture of wave energy and conversion to electricity is carried out using a converter (Wave Energy Converter - WEC), of which the floating-point absorber converter is the most used. Therefore, in this study, the performance of a floating-point absorber wave energy converter is evaluated using time domain numerical method. The displacement characteristics of the device are determined for the ocean wave conditions of the Vietnam Sea. The simulation results show that, the device can move vertically to a height of 1 m above the initial still water level. The average output power of the device is estimated to be approximately 52 kW.

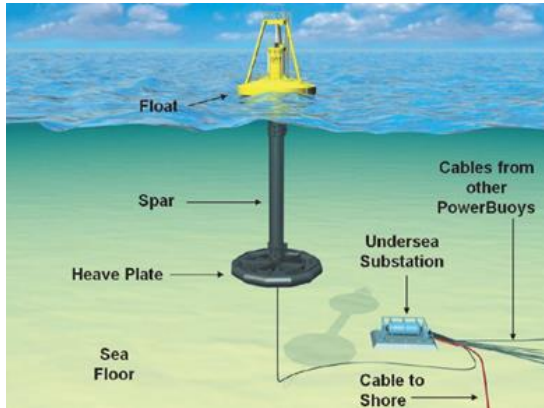
Key words - Wave Energy Converter (WEC); time domain simulation; ocean wave characteristics

WEC, đặc biệt trong các trường hợp trạng thái mặt biển cực đoan [3-4]. Tuy nhiên, phương pháp này rất phức tạp và đòi hỏi tốn nhiều tài nguyên tính toán. Trong khi đó, các phương pháp có độ tin cậy thấp hơn, ví dụ phương pháp miền thời gian để giải bài toán động lực học hệ nhiều vật của bộ WEC, dựa trên các thông số thủy động lực học được xác định bằng phương pháp miền tần số, kết hợp với phương trình chuyển động của Cummins [5-6]. Phương pháp này được sử dụng để đánh giá công suất đầu ra của các bộ WEC trong các điều kiện trạng thái biển tuyến tính. Trong thực tế, mặc dù các bộ WEC được thiết kế để hoạt động trong các điều kiện mặt biển cực đoan và tuyến tính, nhưng việc thực hiện mô phỏng CFD cho tất cả các trường hợp hoạt động của bộ WEC là không hiệu quả và tốn nhiều chi phí cũng như thời gian. Chính vì vậy, các mô hình mô phỏng dựa trên các phương pháp có độ tin cậy trung bình, ví dụ như phương pháp miền tần số và miền thời gian, thường được sử dụng để đánh giá các thiết kế của bộ WEC, trong các điều kiện làm việc khác nhau, thậm chí cả trường hợp trạng thái mặt biển cực đoan, đặc biệt trong giai đoạn đầu của việc thiết kế và phát triển các bộ WEC [7].

Trong bài báo này, phương pháp miền thời gian được sử dụng để đánh giá khả năng làm việc của bộ WEC thông qua phần mềm mã nguồn mở WEC-Sim của Phòng thí nghiệm Quốc gia Sandia, Hoa Kỳ [8]. Việc mô phỏng này được thực hiện trên mô hình bộ chuyển đổi năng lượng sóng biển dạng phao nổi RM3 (Reference Model 3) [9],

¹ The University of Danang - University of Science and Technology (Nguyen Thi Kim Loan, Thanh-Long PHAN, Le Minh Tien)

trong điều kiện sóng biển khu vực ven biển của Việt Nam. So với các dạng thiết bị WEC khác, thiết bị WEC dạng phao nổi (Floating Point Absorber – FPA WEC) có thiết kế đơn giản nhưng hiệu suất tương đối cao, gồm một phần phao nổi có thể chuyển động tịnh tiến theo phương thẳng đứng dưới tác dụng của sóng biển để hấp thụ năng lượng của sóng biển. Chuyển động tịnh tiến này sau đó được chuyển thành chuyển động của máy phát điện thông qua hệ thống chuyển đổi năng lượng (Power Take-Off – PTO). Thiết bị WEC dạng phao nổi có kích thước tương đối nhỏ và thường được lắp thành các dãy để thu nhận được nhiều năng lượng nhất. Nó có thể được sử dụng cho cả vùng nước sâu hoặc vùng biển gần bờ, do vậy được nghiên cứu rộng rãi nhất. Hình 1 giới thiệu một thiết bị WEC dạng phao nổi được thiết kế bởi công ty Ocean Power Technologies [10].



Hình 1. Sơ đồ thiết bị WEC dạng phao nổi

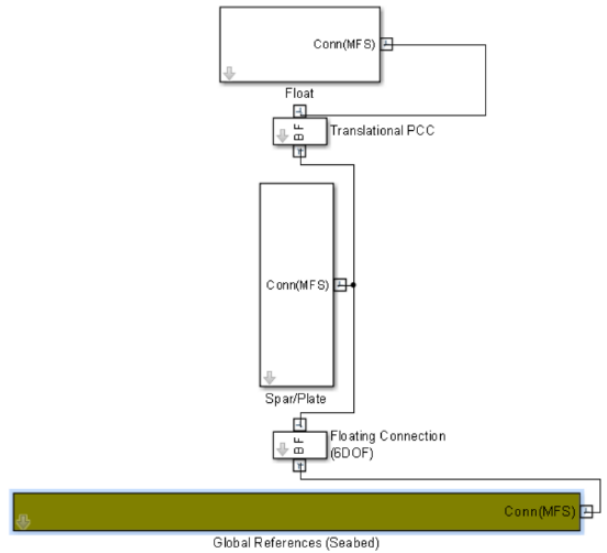
2. Phương pháp mô phỏng theo phân tích miền thời gian

Trong miền thời gian, phương trình chuyển động của bộ WEC dạng phao nổi, được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{Z}} = \mathbf{F}_{ext}(t) + \mathbf{F}_{rad}(t) + \mathbf{F}_{PTO}(t) + \mathbf{F}_v(t) + \mathbf{F}_{ME}(t) + \mathbf{F}_B(t) + \mathbf{F}_m(t) \quad (1)$$

Trong đó, $\ddot{\mathbf{Z}}$ là véc tơ gia tốc của thiết bị WEC, xét theo phương chuyển động thẳng đứng, \mathbf{m} là ma trận khối lượng, gồm khối lượng của bản thân bộ WEC và khối lượng nước kèm, $\mathbf{F}_{ext}(t)$ và $\mathbf{F}_{rad}(t)$ lần lượt là các véc tơ lực kích thích và lực bức xạ của sóng, gây ra do chuyển động của bộ WEC, $\mathbf{F}_{PTO}(t)$ là véc tơ lực của hệ thống chuyển đổi năng lượng PTO, $\mathbf{F}_v(t)$ là véc tơ lực damping, $\mathbf{F}_{ME}(t)$ là véc tơ lực tác dụng lên các phần tử Morison, $\mathbf{F}_B(t)$ là véc tơ lực hồi phục thủy tĩnh, $\mathbf{F}_m(t)$ là véc tơ của hệ thống cáp neo.

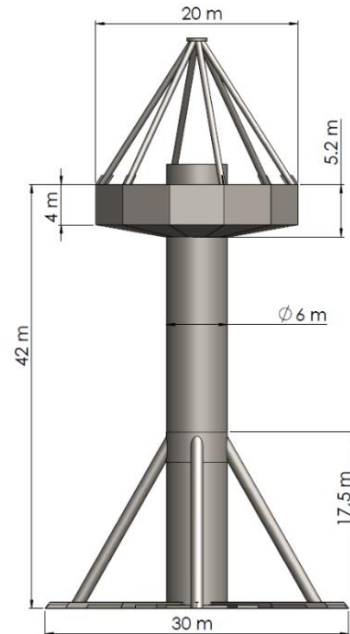
Trong nghiên cứu này, phương trình trên được giải bằng phần mềm mã nguồn mở WEC-Sim, chạy trên nền MATLAB/SIMULINK và sử dụng bộ giải Động lực học hệ nhiều vật SimMechanics [11]. Trong phần mềm WEC-Sim, các bộ phận của bộ WEC được mô hình hóa và nối với nhau thông qua các khớp hoặc ràng buộc. Hình 2 mô tả sơ đồ của Bộ WEC dạng phao nổi trong phần mềm WEC-Sim, trong đó khối “Translational PCC” đại diện cho bộ PTO từ thư viện của WEC-Sim, biểu diễn chuyển động tương đối tịnh tiến giữa phao nổi và phần đế của bộ WEC. Các kết quả mô phỏng từ phần mềm WEC-Sim đã được kiểm nghiệm từ các kết quả thực nghiệm [12].



Hình 2. Mô hình bộ WEC dạng phao nổi trong phần mềm WEC-Sim

3. Mô hình WEC dạng phao nổi RM3

Thiết bị WEC được sử dụng trong nghiên cứu này là bộ WEC RM3, sử dụng phao nổi để hấp thụ năng lượng sóng biển. Bộ WEC có thể di chuyển theo 6 bậc tự do, trong đó năng lượng được hấp thụ chủ yếu qua chuyển động theo phương thẳng đứng. RM3 là bộ WEC dạng phao nổi hai thành phần, gồm một phao nổi và một bộ thanh trụ - đế. Kích thước và các thông số của bộ WEC RM3 được biểu diễn trên Hình 3 và trong Bảng 1, 2.



Hình 3. Hình dạng bộ chuyển đổi năng lượng sóng biển

Bảng 1. Các tính chất của phần phao nổi

Trọng tâm (m)	Khối lượng (tấn)	Moment quán tính [kg-m ²]		
0,00	727,01	2,09 x 10 ⁷	0	0
0,00		0	2,13 x 10 ⁷	4,3 x 10 ³
-0,72		0	4,3 x 10 ³	3,71 x 10 ⁷

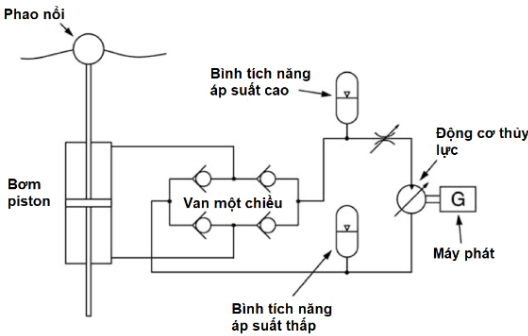
Bảng 2. Các tính chất của phần thanh trụ - đế

Trọng tâm (m)	Khối lượng (tấn)	Moment quán tính [kg-m ²]		
		9,44 x 10 ⁷	0	0
0,00	878,30	0	9,44 x 10 ⁷	2,18 x 10 ⁵
0,00		0	9,44 x 10 ⁷	2,18 x 10 ⁵
-21,29		0	2,18 x 10 ⁵	2,85 x 10 ⁷

Bộ WEC RM3 sử dụng hệ thống thủy lực để chuyển đổi từ năng lượng sóng biển thành cơ năng trên trục động cơ thủy lực (Hình 4). Động cơ thủy lực được sử dụng để quay máy phát điện. Công suất tức thời trên trục động cơ thủy lực được xác định như sau:

$$P_{PTO} = -F_{PTO} \cdot \dot{Z}_{rel} \quad (2)$$

Trong đó \dot{Z}_{rel} là vận tốc tương đối giữa phần phao nổi và phần thanh trụ - đế của bộ WEC.



Hình 4. Hệ thống chuyển đổi năng lượng (PTO) thủy lực

4. Đặc điểm sóng biển ven bờ Việt Nam

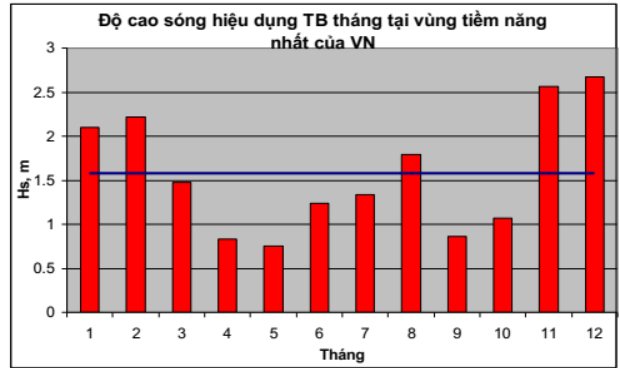
Để đánh giá khả năng làm việc của thiết bị WEC RM3 bằng phương pháp phân tích miền thời gian, thiết bị WEC RM3 được mô phỏng theo điều kiện sóng biển khu vực ven biển Việt Nam. Việt Nam là nước có bờ biển kéo dài, thuận tiện cho việc khai thác nguồn năng lượng từ sóng biển. Các kết quả đặc biệt cho thấy tiềm năng sóng biển dọc theo ven biển Việt Nam tương đối phong phú và phụ thuộc trực tiếp vào hai mùa gió đông bắc và tây nam. Tại các vùng thoáng, có đả sóng lớn theo các hướng Đông Bắc, Tây Nam và Nam đều nhận được dòng năng lượng sóng khá lớn. Các kết quả nghiên cứu đã phân vùng tiềm năng năng lượng sóng biển vùng Biển Đông của Việt Nam thành 6 vùng với các đặc trưng năng lượng sóng được biểu diễn trong Bảng 3 [13].

Bảng 3. Năng lượng sóng biển dọc theo ven biển Việt Nam

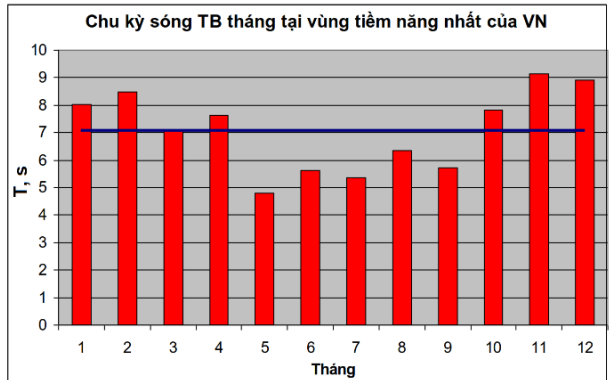
STT	Vùng	Vị trí	Năng lượng sóng trung bình [kW/m]
1	1	Móng Cái – Thanh Hóa	15
2	2	Thanh Hóa – Quảng Bình	25
3	3	Quảng Bình – Quảng Nam	10
4	4	Quảng Ngãi – Ninh Thuận	30
5	5	Bình Thuận – Mũi Cà Mau	18
6	6	Cà Mau – Kiên Giang	15

Kết quả khảo sát trên cho thấy, vùng 4 (khu vực Nam Trung Bộ) là vùng có năng lượng sóng biển mạnh nhất, trong cả hai mùa gió thịnh hành. Chính vì vậy, trong nghiên cứu này, bộ WEC được mô phỏng theo điều kiện

sóng biển của khu vực này. Sự thay đổi theo các tháng trong năm của độ cao sóng hiệu dụng H_s và chu kỳ sóng T của sóng biển khu vực Nam Trung Bộ được thể hiện trong Hình 5 và Hình 6 [14]. Dựa trên hai hình này, có thể xác định độ cao sóng hiệu dụng trung bình khoảng 1,5 m và chu kỳ sóng trung bình là 7 s. Các thông số này sẽ được sử dụng như thông số đầu vào để mô phỏng trong phần mềm WEC-Sim.



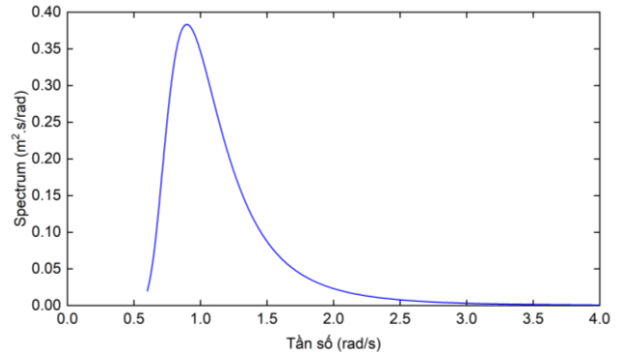
Hình 5. Độ cao sóng hiệu dụng của vùng Nam Trung Bộ



Hình 6. Biến đổi chu kỳ sóng của vùng Nam Trung Bộ

5. Kết quả và bàn luận

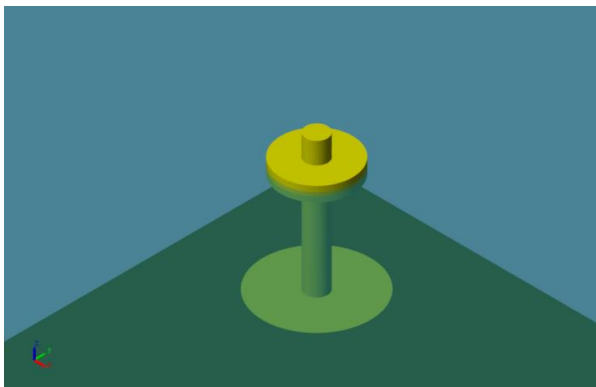
Bộ WEC dạng phao nổi RM3 được mô phỏng trong phần mềm WEC-Sim theo điều kiện sóng biển của khu vực Nam Trung Bộ của Việt Nam, với độ cao sóng trung bình là 1,5 m và chu kỳ sóng là 7s. Sóng được giả sử là phi tuyến, sử dụng mô hình phổ sóng Pierson-Moskowitz, và được biểu diễn trên Hình 7.



Hình 7. Phổ sóng PM của khu vực sóng biển Nam Trung Bộ

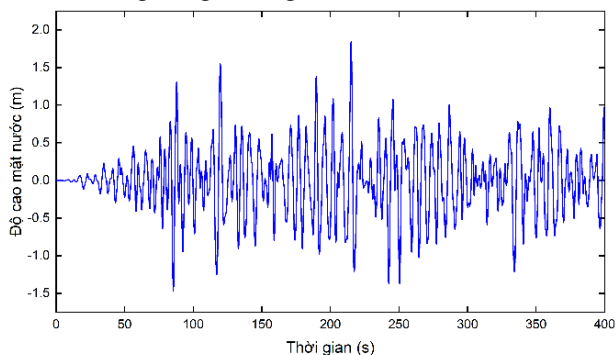
Kết quả mô phỏng được thực hiện trong khoảng thời gian 400 s, với bước thời gian 0,1 s. Hệ số tắt dần của hệ thống PTO thủy lực được khai báo với giá trị

12000 kN/(m/s). Mô hình mô phỏng thiết bị RM3 trong phần mềm WEC-Sim được thể hiện trong Hình 8.



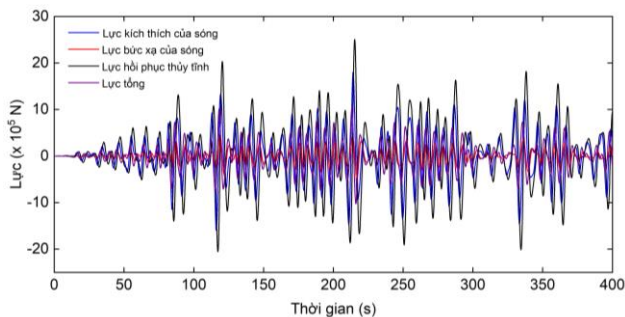
Hình 8. Mô hình mô phỏng thiết bị RM3 trong phần mềm WEC-Sim

Sự biến thiên độ cao mặt nước so với mặt nước tĩnh được biểu diễn trên Hình 9, trong đó cho thấy mặt nước biến dao động trong khoảng từ -1,5 m đến 1,8 m.



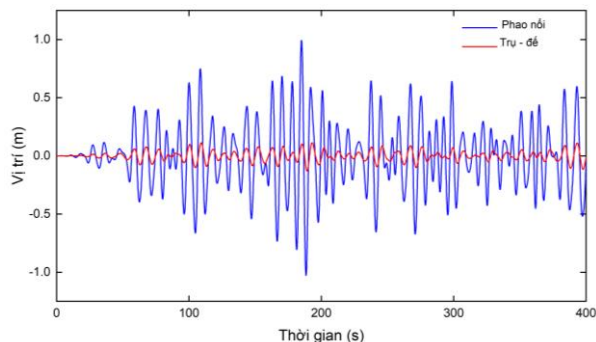
Hình 9. Biến thiên độ cao mực nước biển so với mặt nước tĩnh

Dưới điều kiện sóng biển như đã trình bày ở trên, các lực tác dụng lên phần phao của thiết bị WEC được xác định từ phần mềm WEC-Sim như trên Hình 10. Vì chuyển động chủ yếu của thiết bị WEC dạng phao nổi là chuyển động tịnh tiến theo phương thẳng đứng, do đó chỉ các lực tác dụng theo phương z được biểu diễn trên hình, trong đó các lực lớn nhất là lực kích thích và bức xạ của sóng biển, cùng với lực hồi phục thủy tĩnh. Các lực khác khá nhỏ và không được biểu diễn trên hình.

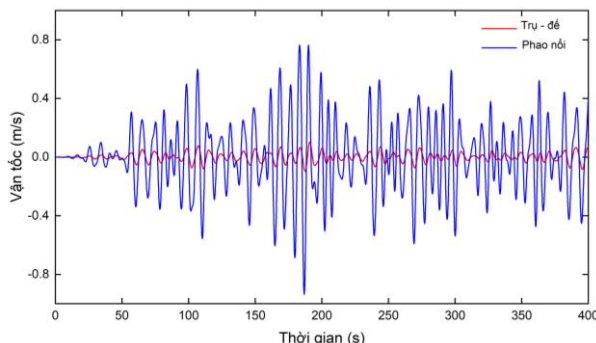


Hình 10. Lực tác dụng theo phương thẳng đứng lên phần phao nổi

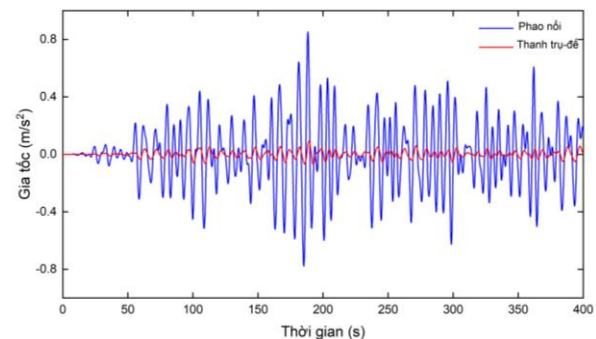
Từ các lực đã được xác định, sử dụng phương trình chuyển động (1) để xác định các đặc tính chuyển động của thiết bị WEC, gồm cả phần phao và phần thanh trụ - đế. Các Hình 11-13 biểu diễn vị trí, vận tốc và gia tốc của hai phần phao và phần thanh trụ - đế của thiết bị WEC, dưới tác dụng của sóng biển.



Hình 11. Biến thiên vị trí của phần phao nổi và thanh trụ - đế của thiết bị WEC

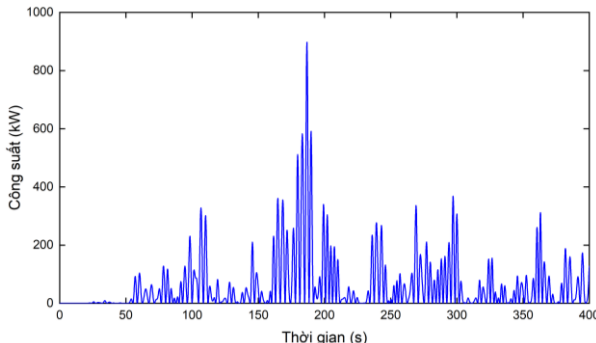


Hình 12. Biến thiên vận tốc của phần phao nổi và thanh trụ - đế của thiết bị WEC



Hình 13. Biến thiên gia tốc của phần phao nổi và thanh trụ - đế của thiết bị WEC

Các kết quả trên hình cho thấy, phần phao nổi của thiết bị WEC có thể dao động theo phương thẳng đứng từ -1m đến 1m so với mức nước tĩnh ban đầu. Vận tốc của phao nổi có thể đạt đến 0,8 m/s dưới tác dụng của sóng biển. Các đặc tính chuyển động này rất quan trọng để từ đó xác định công suất đầu ra của thiết bị WEC (Hình 14).



Hình 14. Công suất cơ học đầu ra của thiết bị WEC

Hình 14 biểu diễn công suất đầu ra tức thời của hệ thống PTO thủy lực theo thời gian. Từ kết quả trên hình cho thấy công suất của thiết bị WEC có thể đạt đến gần 900 kW. Công suất trung bình của thiết bị được xác định như sau:

$$P_{\text{ave}} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{\text{ins}}(t) dt \approx 52 \text{ kW} \quad (3)$$

6. Kết luận

Thiết bị chuyển đổi năng lượng sóng biển thành điện năng dạng phao nổi được mô hình hóa sử dụng phương pháp phân tích miền thời gian. Các đặc tính làm việc của thiết bị được đánh giá theo đặc tính sóng biển khu vực vùng biển Nam Trung Bộ, Việt Nam. Kết quả cho thấy, phần phao nổi có thể dao động theo phương thẳng đứng với biên độ 1 m so với mức nước tĩnh ban đầu, với vận tốc chuyển động lớn nhất có thể đạt được khoảng 0,8 m/s. Thiết bị WEC sử dụng hệ thống chuyển đổi năng lượng dạng thủy lực, với công suất đầu ra trung bình của bộ PTO khoảng 52 kW.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số B2019-DN02-63.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Pelc; R. M. Fujita, "Renewable energy from the ocean", *Mar. Policy*, Tập 26, Số 6, 2002, Trang 471–479.
- [2] M. E. McCormick; S. W. Surko, "An experimental study of the performance of the counter-rotating wave energy conversion turbine", *J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME*, Tập 111, Số 3, 1989, Trang 167–173.
- [3] Y-H Yu, Y. Li "RANS Simulation of the Heave Performance of a Two-Body Floating-Point Absorber Wave Energy System", *Computers & Fluids*, Tập 73, 2013, Trang 104 -114.
- [4] E. Quon, A. Platt, Y. Yu, M. Lawson, "Application of the Most Likely Extreme Response Method for Wave Energy Converters", *Tuyển tập kỷ yếu 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE, Busan, South Korea*, 2016, Trang 1-11.
- [5] A. Babarit, J. Hals, M.J. Muliawan, A. Kurniawan, T. Moan, J. Krokstad, "Numerical Benchmarking Study of a Selection of Wave Energy Converters", *Renewable Energy*, Tập 41, 2012, Trang 44–63.
- [6] W. E. Cummins, *The Impulse Response Function and Ship Motions*, David Taylor Model Basin, 1962.
- [7] Y.-H. Yu, J. Van Rij, R. Coe, M. Lawson, "Preliminary Wave Energy Converters Extreme Load Analysis", *Tuyển tập kỷ yếu 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, ASME, St. John's, Newfoundland, Canada*, 2015.
- [8] <https://wec-sim.github.io/WEC-Sim/> (truy cập ngày 15 tháng 05, 2021).
- [9] <https://energy.sandia.gov/programs/renewable-energy/water-power/projects/reference-model-project-rmp/> (truy cập ngày 15 tháng 05 năm 2021).
- [10] <http://www.oceanpowertechnologies.com/>. (truy cập ngày 15 tháng 05 năm 2021).
- [11] <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. (truy cập ngày 15 tháng 05 năm 2021).
- [12] Y.-H. Yu, M. Lawson, K. Ruehl, C. Michelen, "Development and Demonstration of the WEC-Sim Wave Energy Converter Simulation Tool", *National Renewable Energy Laboratory (NREL) & Sandia National Laboratories (SNL)*, 2014, Trang 137 - 170.
- [13] Nguyễn Mạnh Hùng và Dương Công Điền, *Năng lượng sóng biển khu vực Biển Đông và Vùng Biển Việt Nam*, NXB Khoa học và Công nghệ, 2014.
- [14] Phùng Văn Ngọc, *Nghiên cứu thiết bị biến đổi năng lượng sóng - điện ứng dụng cho khai thác năng lượng sóng tại vùng biển Việt Nam*, Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, 2019.