

Design and Fabrication the Control Mechanism to Improve the Wave Energy Converter's Efficiency

Cong Binh Phan^{1*}, Nhut Phi Long Nguyen¹, Xuan Thanh Ho¹, Tien Si Do²

¹Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam

²FPT Polytechnic, FPT University, Vietnam

*Corresponding author. Email: binhpc@hcmute.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 03/07/2024
Revised: 20/07/2024
Accepted: 22/08/2024
Published: 28/10/2024

KEYWORDS

WEC;
ANSYS AQWA;
Modeling;
Simulation;
Test rig.

ABSTRACT

This article presents a design and fabrication of a control mechanism of a wave energy converter (WEC). Survival level and the overall efficiency of the WEC are significant factors in the wave energy harvesting field. Trying to face these challenges, an innovative conceptual design is proposed to minimize the influence of work environment and possibly to improve performance of the WEC. First, a device structure is presented to describe the working mechanism. Based on the geometric parameters of the floating buoy, hydrodynamic parameters are obtained in the frequency domain by using the wave interaction software ANSYS AQWA. Then, the time domain simulation program is performed by the use of MATLAB/Simulink software. Next, the test rig is fabricated and installed in the wave maker. Finally, experimental results under different wave conditions are carried and compared with that of the analytical model. These results show that the analytical model is in good agreement with experimental results. Moreover, the overall efficiency is significantly improved by adjusting the position of the center of mass.

Thiết Kế và Chế Tạo Cơ Cấu Điều Khiển để Nâng Cao Hiệu Suất Thiết Bị Chuyển Đổi Năng Lượng Sóng

Phan Công Bình^{1*}, Nguyễn Nhựt Phi Long¹, Hồ Xuân Thành¹, Đỗ Tiến Sĩ²

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Cao đẳng FPT Polytechnic, Đại học FPT, Việt Nam

*Tác giả liên hệ. Email: binhpc@hcmute.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 03/07/2024
Ngày hoàn thiện: 20/07/2024
Ngày chấp nhận đăng: 22/08/2024
Ngày đăng: 28/10/2024

TỪ KHÓA

WEC;
Ansys;
Mô hình hóa;
Mô phỏng;
Hệ thí nghiệm.

TÓM TẮT

Bài báo trình bày tính toán, thiết kế và gia công cơ cấu điều khiển nâng cao hiệu suất của thiết bị chuyển đổi năng lượng sóng (WEC). Trong lĩnh vực thu hồi năng lượng sóng thì khả năng tồn tại và hiệu suất thiết bị là hai vấn đề cần được quan tâm. Để giải quyết vấn đề này, một ý tưởng thiết kế được đề xuất để giảm thiểu ảnh hưởng của môi trường làm việc và khả năng cải thiện hiệu suất thiết bị. Trước hết, kết cấu của thiết bị được trình bày để mô tả nguyên lý làm việc của WEC. Căn cứ vào thông số hình học của phao, các thông số thủy động lực cũng được tính toán trong miền tần số sử dụng phần mềm mô phỏng tương tác sóng ANSYS AQWA. Tiếp theo một chương trình mô phỏng trong miền thời gian được thực hiện bằng phần mềm MATLAB/Simulink. Sau đó, mô hình thiết bị được gia công và lắp đặt để thử nghiệm trong hồ tạo sóng. Cuối cùng, kết quả thí nghiệm trong các điều kiện sóng khác nhau được thực hiện và so sánh với mô hình phân tích. Kết quả cho thấy mô hình phân tích phù hợp với kết quả thực nghiệm. Ngoài ra, hiệu suất tổng thể của thiết bị được cải thiện đáng kể nhờ vào điều chỉnh vị trí trọng tâm các đối trọng.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2024.1616>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

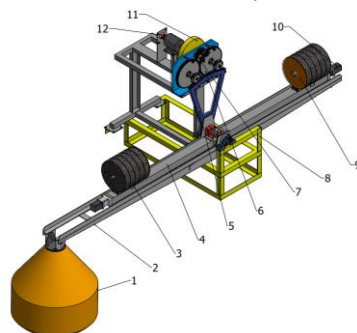
Ngày nay việc khai thác và sử dụng năng lượng tái tạo đã trở thành một trong những chủ đề cấp thiết vì các biến động môi trường như: biến đổi khí hậu, hiệu ứng nhà kính, khủng hoảng dầu mỏ,... Trong đó, năng lượng sóng là một trong những nguồn năng lượng tái tạo có nhiều tiềm năng nhờ vào bề mặt rộng lớn của đại dương. Đặc biệt Việt Nam sở hữu đường bờ biển dài 3260km nên có tiềm năng rất lớn trong việc khai thác năng lượng sóng biển [1]. Sự phát triển của các thiết bị năng lượng sóng đã được tác Antonio F. de O. Falcao phân tích trong [2]. Bên cạnh đó, nhóm tác giả Yongxing Zhang đã trình bày một số nguyên lý chuyển đổi năng lượng sóng trong [3] với nội dung bao gồm nguyên lý hoạt động và đánh giá hiệu suất của hệ thống chuyển đổi năng lượng. Thông thường vị trí lắp đặt của hệ thống WEC trên biển được chia làm địa điểm chính: ngoài khơi, gần bờ và trên bờ [4], mỗi địa điểm có một đặc thù và mật độ năng lượng sóng riêng. Đối với khu vực xa bờ và gần bờ, thiết bị hấp thụ điểm WEC có ưu điểm hơn nhờ phao hình cầu nên có thể khai thác nhiều hướng sóng khác nhau. Ngoài ra, thiết bị có thể thiết kế tích hợp với nhiều hệ thống chuyển đổi năng lượng PTO (Power take-off) khác nhau như: PTO thủy lực sử dụng chuyển động lên xuống của piston để làm quay động cơ thủy lực hoặc dẫn động trực tiếp máy phát dạng trượt tĩnh tiến PTO [5]-[6].

Ngoài ra, tác giả cùng các cộng sự đã thực hiện một số nghiên cứu về thiết bị WEC sử dụng phao nổi [7]-[10]. Trong đó, một thiết kế của bánh đà sử dụng năng lượng thủy lực có thể thay đổi quán tính VIHF (Variable inertia hydraulic flywheel) để điều khiển tần số tự nhiên của PTO trong [7]. Bên cạnh đó, ý tưởng cơ cấu điều chỉnh độ cứng đàn hồi đã được đề xuất trong [8] và thiết kế tối ưu hóa đã được nghiên cứu trong [9]. Chương trình mô phỏng của thiết bị nổi được xây dựng và thực nghiệm kiểm chứng của tác giả ở [10]. Các nghiên cứu đã có những đóng góp rất lớn trong việc tính toán thiết kế và mô phỏng cũng như ý tưởng cải thiện hiệu suất thu hồi. Tuy nhiên, để phát triển thiết bị tiến gần triển khai thực tiễn cần một nghiên cứu thiết kế, chế tạo, mô phỏng và thực nghiệm cơ cấu điều khiển nâng cao hiệu suất thiết bị.

Để giải quyết vấn đề này, một ý tưởng thiết kế mới được đề xuất để cải thiện hiệu suất thông qua cơ cấu điều khiển. Trước hết, kết cấu của thiết bị được đưa ra để mô tả nguyên lý làm việc của WEC. Sau khi lựa chọn thông số hình học, các thông số thủy động lực được tính toán và mô phỏng trên miền tần số từ phần mềm mô phỏng tương tác sóng ANSYS AQWA. Sau đó, chương trình mô phỏng trong miền thời gian được thực hiện bằng phần mềm MATLAB/Simulink. Dựa trên kết quả tính toán, mô hình thiết bị được thiết kế, chế tạo và lắp đặt để thử nghiệm trong hồ tạo sóng. Cuối cùng, dữ liệu kết quả thử nghiệm trong các điều kiện sóng khác nhau được thu thập và so sánh với mô hình phân tích. Kết quả so sánh cho thấy mô hình phân tích phù hợp với kết quả thực nghiệm và hiệu suất thiết bị được cải thiện đáng kể nhờ vào điều khiển vị trí trọng tâm các đối trọng của thiết bị.

2. Thiết kế ý tưởng

Tổng quan về ý tưởng thiết kế được trình bày trên Hình 1.



- 1-Phao; 2-Cần;
- 3-Đối trọng; 4-Thanh dẫn tạ;
- 5-Cung răng; 6-Bánh răng;
- 7-Hộp số chuyển đổi; 8-Khung;
- 9-Giá; 10-Motor bước;
- 11-Bánh đà; 12-Máy phát điện

Hình 1. Tổng quan về thiết kế WEC

Dưới sự tác động của sóng, phao nổi (1) bị dẫn động lên xuống nên cần (2) được cố định vào phao nổi được quay quanh trục chính. Tiếp theo cung răng (5) được lắp cố định vào cần (2) quay quanh trục chính dẫn động hộp số chuyển đổi (7) bằng cách truyền chuyển động cho bánh răng (6). Hộp số (7) được lắp trên khung (8) có chức năng biến đổi chuyển động quay hai chiều của hai bánh răng (6) thành chuyển động quay một chiều của trục ra. Khung (8) được định vị trên nền cố định. Giá đỡ (9) sử dụng lắp đặt các đôi trọng (3) được cố định trên các bộ đỡ trên đai ốc của cơ cấu truyền động vít me đai ốc 4. Vị trí các đôi trọng (3) được điều khiển nhờ vào động cơ bước (10) để thay đổi quán tính của cơ hệ. Cuối cùng, trục ra được nối với bánh đà (11) để làm đều chuyển động quay máy phát điện (12).

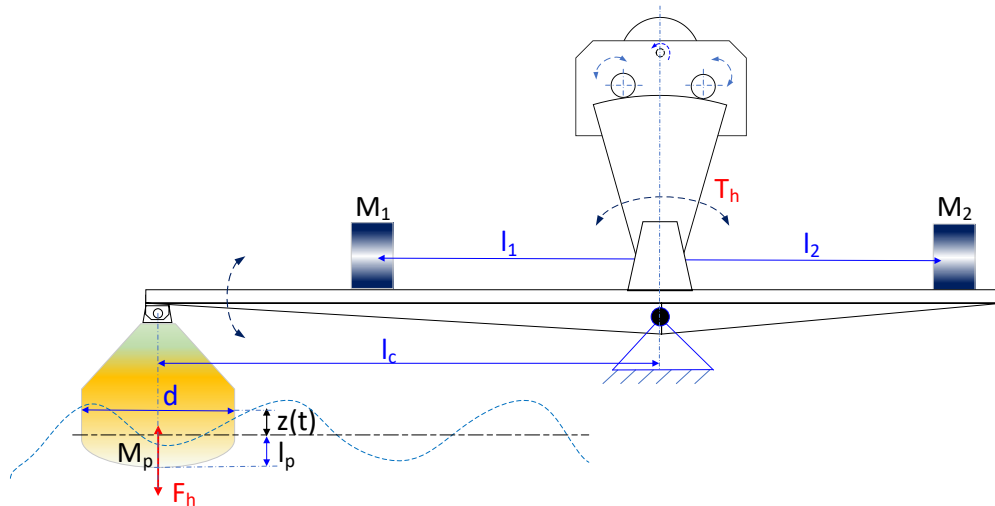
3. Mô hình toán học

Trong điều kiện sóng điều hòa thì li độ sóng được thể hiện như sau:

$$\eta = A \sin \omega t \quad (1)$$

trong đó A là biên độ sóng (m), ω là tần số sóng (rad/s)

3.1. Mô hình lực thủy động học phao



Hình 2. Sơ đồ truyền động của hệ thống WEC

Lực thủy động học tác động lên phao bao gồm các thành phần như phương trình (2) được trích dẫn từ [10] như sau:

$$F_h = F_e + F_r + F_v + F_s \quad (2)$$

Các lực thành phần được xác định cụ thể như sau:

F_e là lực kích thích sóng bằng tổng lực Froude-Krylov và lực nhiễu xạ:

$$F_e = f_3 A \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

với f_3 là hệ số biên độ lực và φ là độ lệch pha của sóng và lực kích thích.

F_r là lực cản bức xạ được tạo ra bởi các dao động điều hòa của phao trong nước như sau:

$$F_r = -m_a \ddot{z} - R_r \dot{z} \quad (4)$$

trong đó, m_a là khối lượng tăng thêm và R_r là hệ số giảm dần bức xạ.

F_v là lực giảm chấn nhớt tác dụng lên vật chuyển động trong nước:

$$F_v = -\frac{1}{2} \rho C_d A_0 (\dot{z} - \dot{\eta}) |\dot{z} - \dot{\eta}| \quad (5)$$

với C_d là hệ số nhớt và A_0 là diện tích mặt cắt ước của phao ở trạng thái cân bằng.

F_s là lực thủy tĩnh (Acsimet) đưa phao nổi về trạng thái cân bằng thủy tĩnh:

$$F_s = -S_b z \quad (6)$$

trong đó S_b là hệ số cứng thủy tĩnh được tính theo công thức sau:

$$S_b = \pi \rho g r^2 \quad (7)$$

với ρ là mật độ chất lỏng, g là trọng lực và là r bán kính phao.

3.2. Mô hình toán PTO

Trở lực kỹ thuật từ hệ thống PTO của hệ thống được xác định như sau:

$$F_{PTO} = F_{mp} + F_{ms} + F_{qt} \quad (8)$$

trong đó, F_{mp} là lực tạo ra từ máy phát điện và bánh đà; F_{ms} là lực ma sát và F_{qt} là lực tăng thêm gây ra bởi khối quán tính thêm vào.

Trở lực kỹ thuật từ máy phát F_g đã được tính toán trong tài liệu [10] và được trình bày ở hệ phương trình (9):

$$F_{mp} = \begin{cases} \frac{(T_{bd} + T_{mp})}{l_c} \times u_{hs}, & \text{khi } n \geq \dot{\theta} \\ 0, & \text{khi } n < \dot{\theta} \end{cases} \quad (9)$$

$$n = \frac{\dot{z}}{l_c} \times u_{hs} \quad (10)$$

trong đó T_{bd} mô-men xoắn được tạo ra bởi quán tính quay của bánh đà l_c là chiều dài của cần; mô-men xoắn của máy phát là T_{mp} ; $\dot{\theta}$ là vận tốc vòng sinh ra của máy phát; n là vận tốc tức thời tương đương của trục máy phát và u_{hs} là tỷ số truyền từ bánh răng đầu vào đến trục ra của hộp số.

Lực ma sát F_{ms} có thể được mô hình hóa bằng phương pháp do Brian Armstrong đề xuất:

$$F_{ms} = \left(F_c + (F_{br} - F_c) e^{-c_F |\dot{z}|} \right) \text{sign}(\dot{z}) + f_v \dot{z} \quad (11)$$

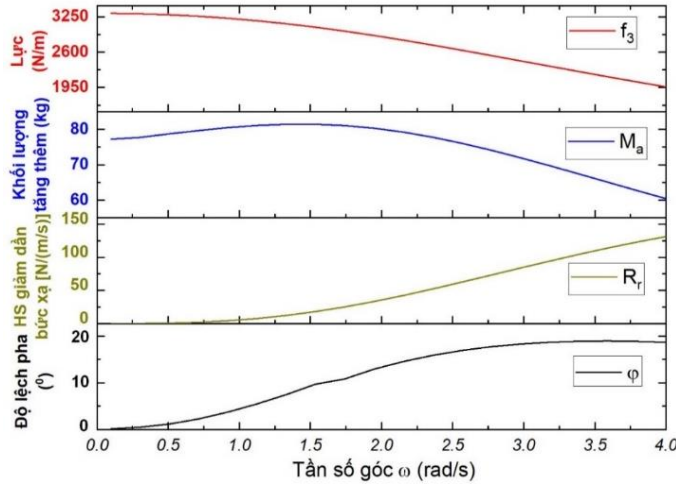
trong đó f_v hệ số ma sát nhớt, F_{br} là lực ma sát tĩnh ở vận tốc bằng 0, và c_F là hệ số xấp xỉ chuyển tiếp được sử dụng để tính gần đúng sự chuyển tiếp giữa ma sát tĩnh và ma sát Coulomb. F_c là lực ma sát Coulomb cản trở chuyển động với một lực không đổi ở bất kỳ vận tốc nào.

Lực quán tính F_{qt} được tính bằng hệ phương trình sau:

$$F_{qt} = -\frac{I_{qt}}{l_c} \times \ddot{z} \quad (12)$$

trong đó I_{qt} là mô men quán tính do đối trọng sinh ra

3.3. Tính toán thông số thủy động học



Hình 1. Thông số thủy động lực học trong phương z của phao; phân chìm = 0.275 m; chiều sâu nước $h = 1$ m

Các thông số hình học của phao trên Hình 2 được sử dụng để khai báo đầu vào trong phần mềm ANSYS AQWA.

Kết quả tính toán trong miền tần số cho các hệ số f_3 , M_a , R_r và φ sẽ được vẽ lại trên Hình 3.

3.4. Mô hình toán hoàn chỉnh của phao

Chuyển động của phao được xác định theo định luật 2 Newton ở phương trình (13):

$$M_b \ddot{z} = F_h + F_{PTO} \quad (13)$$

trong đó M_b là khối lượng của phao.

Từ phương trình (2), (3), (4), (6) và (13), chuyển động của phao được xác định như sau:

$$\left(M_b + M_a + \frac{I_{qt}}{l_c}\right) \ddot{z} + R_r \dot{z} + S_b z = f_3 A \sin(\omega t + \varphi) - F_{mp} - F_{ms} - F_v \quad (14)$$

4. Hiệu suất chuyển đổi năng lượng

Công suất sóng trung bình tác động lên phao được xác định trong [10] như sau:

$$P_p = P_s d \quad (15)$$

trong đó d là chiều rộng của phao có thể lấy bằng đường kính phao.

P_s là công suất trung bình của sóng được tính như sau:

$$P_s = EC_g \quad (16)$$

Mật độ năng lượng sóng E được xác định theo công thức (17):

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (17)$$

trong đó H là chiều cao của sóng tới

Vận tốc nhóm C_g cho độ sâu không đổi được xác định như sau:

$$C_g = \frac{1}{2} \frac{g}{\omega} D(kh) \quad (18)$$

Năng lượng sóng tương tác lên phao được xác định như sau:

$$E_p = \int P_p dt \quad (19)$$

Năng lượng chuyển đổi được dẫn động máy phát được tính trong phương trình (20):

$$E_g = \int P_{mp} dt \quad (20)$$

trong đó công suất thu hồi được trên trục máy phát điện P_{mp} trên lý thuyết tuyến tính:

$$P_{mp} = T_{mp} \dot{\theta} \quad (21)$$

5. Thực nghiệm hệ thống WEC trong hồ tạo sóng

5.1. Lắp đặt hệ thí nghiệm

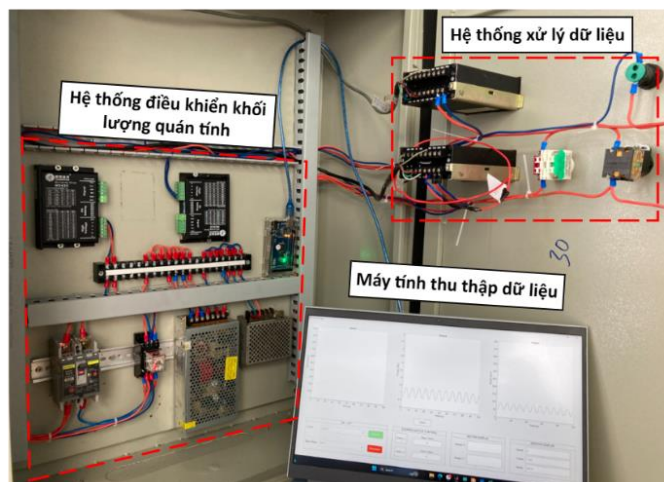
Hệ thí nghiệm WEC bao gồm hệ thống cơ khí Hình 4 và hệ thống xử lý tín hiệu đo được lắp đặt như Hình 5.

Hình 4 thể hiện các thiết bị đo được lắp đặt để thu thập kết quả thí nghiệm. Bộ mô phỏng mômen xoắn (giả lập máy phát điện) được sử dụng để tạo ra mô men trở lực kỹ thuật từ máy phát điện. Một bộ mã hóa tốc độ và bộ chuyển đổi mô-men xoắn được áp dụng để đo tốc độ và mô-men xoắn tương ứng của máy phát.

Hệ thống điện trên Hình 5 dùng để thu thập dữ liệu đo và gửi tín hiệu điều khiển đến động cơ bước để di chuyển tạ đến vị trí mong muốn.



Hình 2. Tổng quan hệ thống WEC triển khai trong hồ tạo sóng ở các góc nhìn khác nhau



Hình 5. Hệ thống điện xử lý tín hiệu, dữ liệu

5.2. Thông số thí nghiệm

Trước khi tiến hành các thí nghiệm, thông số kỹ thuật hệ thống PTO đã được đo trực tiếp và thống kê trên Bảng 1. Điều kiện sóng điều hòa trong các thí nghiệm được trình bày trong Bảng 2.

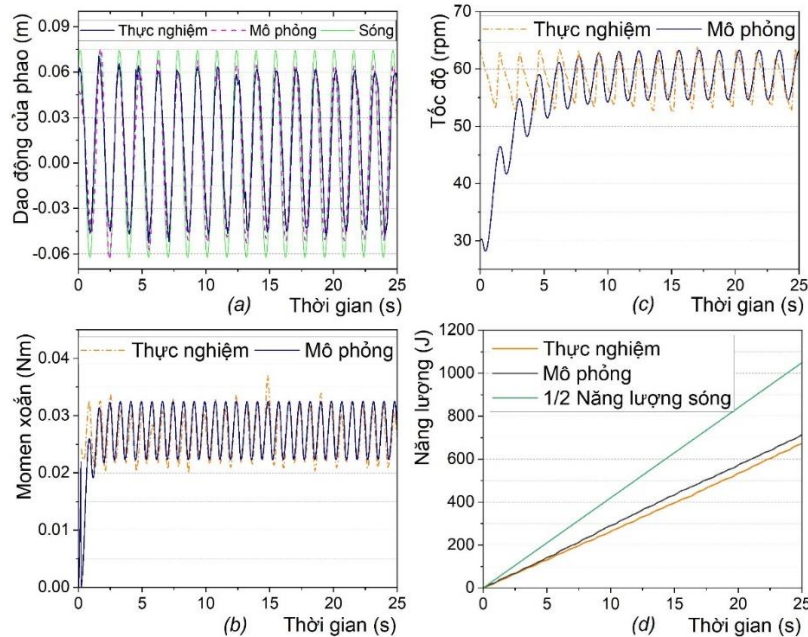
Bảng 1. Thông số kỹ thuật hệ thống PTO

Thông số	Giá trị
Đường kính phao (m)	$d=0.65$
Khối lượng phao (kg)	$M_b=15$
Giá trị quán tính ban đầu (kg.m^2)	$I_0=85$
Giá trị quán tính PTO (kg.m^2)	$I_{qt}=88.5$
Giá trị quán tính bánh đà (kg.m^2)	$I_f=0.25$
Chiều dài cần (m)	$l_c=1.5$
Tỷ số truyền chung của hệ	$i_{hs}=49$

Bảng 2. Thông số điều kiện sóng khi thí nghiệm

Tần số sóng ω (rad/s)	Chiều cao sóng H (m)	Số sóng k (rad/m)
3.6	0.14	1.27

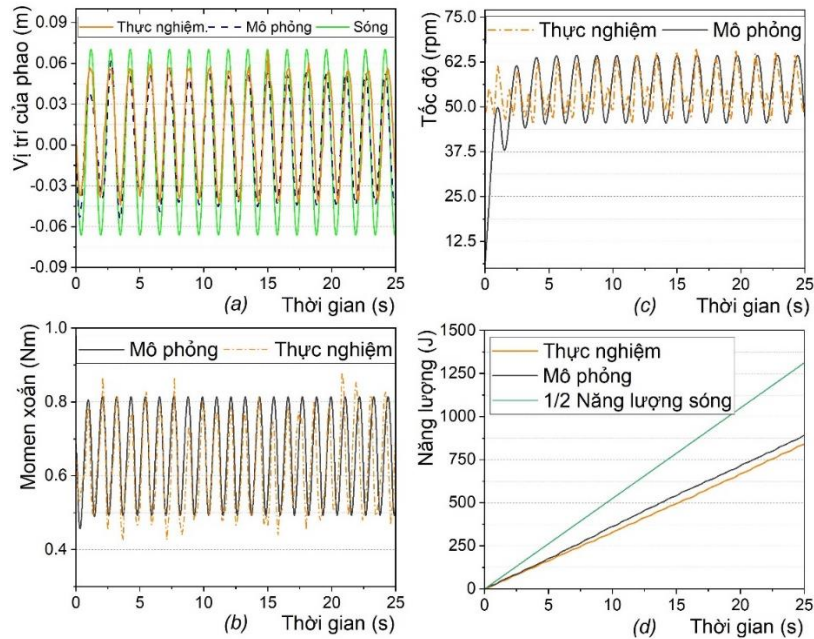
5.3. Kết quả và bàn luận



Hình 6. Kết quả so sánh giữa giá trị mô phỏng và thực nghiệm trường hợp không bổ sung quán tính cho: (a) vị trí phao; (b) momen xoắn; (c) tốc độ; (d) năng lượng

Các thử nghiệm được tiến hành trong hai trường hợp không có quán tính bổ sung I_0 và có quán tính bổ sung I_{qt} như thể hiện lần lượt trên Hình 6 và Hình 7. Trước hết, dữ liệu sóng được đo trực tiếp trên hồ tạo sóng cùng với vị trí phao thực nghiệm đo được và kết quả mô phỏng vị trí của phao được ghi nhận và minh họa trên Hình 6-(a) và Hình 7-(a). Momen xoắn của máy phát được tính toán mô phỏng và thực nghiệm đo được hiển thị trên Hình 6-(b) và Hình 7-(b). Tốc độ sinh ra của máy phát cũng được

tính toán và so sánh với giá trị thực nghiệm ở Hình 6-(c) và Hình 7-(c). Và cuối cùng, năng lượng thu hồi được tính toán bằng tích phân của mômen xoắn và tốc độ cũng được vẽ minh họa trên Hình 6-(d) và Hình 7-(d). Trong cả hai trường hợp thử nghiệm, kết quả thử nghiệm chỉ ra rằng dù có một số điểm sai lệch nhưng không đáng kể, phần lớn kết quả so sánh có sự tương đồng cao giữa mô hình mô phỏng và kết quả thực nghiệm. Ngoài ra, trong cùng điều kiện sóng nhưng với khối lượng quán tính thêm vào đã kéo tần số dao động riêng của hệ PTO về gần vùng cộng hưởng hơn nên biên độ chuyển động phao, cũng như vận tốc máy phát cao hơn và dẫn đến năng lượng thu được cũng cao hơn giữa Hình 6 xấp xỉ 28 W và Hình 7 xấp xỉ 31 W.



Hình 7. Kết quả so sánh giá trị mô phỏng và thực nghiệm trường hợp bổ sung quán tính cho: (a) vị trí phao; (b) momen xoắn; (c) tốc độ; (d) năng lượng

6. Kết luận

Bài báo này đã đề xuất một cơ cấu điều khiển nâng cao công suất thu hồi của thiết bị chuyên đổi năng lượng sóng. Các thông số thủy động học đã được tính toán bằng phần mềm ANSYS AQWA dựa trên các thông số hình học của phao và điều kiện làm việc của thiết bị. Mô hình toán các lực thủy động học được phân tích đầy đủ trong miền thời gian. Chương trình mô phỏng đã được thực hiện trong phần mềm Matlab/Simulink. Thiết bị cơ khí cũng được gia công và lắp đặt thử nghiệm thành công trong hồ tạo sóng. Thiết bị đo và hệ thống thu thập dữ liệu cũng được triển khai lắp đặt hoàn thiện. Kết quả thí nghiệm cho thấy sự phù hợp giữa mô hình phân tích và kết quả đo được của các dữ liệu về vị trí phao, momen xoắn, vận tốc và cả năng lượng được tính toán được. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy công suất thu được khi có sự điều khiển khối quán tính tăng lên xấp xỉ 10% (từ 28W lên 31W).

Lời cảm ơn

Bài báo này thuộc Đề tài cấp trường mã số T2023-109 được tài trợ kinh phí bởi Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành Phố Hồ Chí Minh

Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

Tuyên bố dữ liệu sẵn có

Dữ liệu hỗ trợ cho các khám phá của nghiên cứu này khi độc giả yêu cầu một cách hợp lý sẽ được tác giả liên hệ cung cấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D. N. Quynh, "Assessment of Vietnam's Marine Energy Potential," (in Vietnamese), *Institute of Science and Technology of Vietnam, Project Summary Report*, 2002-2003, Hanoi, 2004.
- [2] A. F. de O. Falcão, "Wave energy utilization: A review of the technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 3, pp. 899–918, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.11.003.
- [3] Y. Zhang, Y. Zhao, W. Sun, and J. Li, "Ocean wave energy converters: Technical principle, device realization, and performance evaluation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 141, p. 110764, May 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110764.
- [4] M. M. Ahmad, A. Kumar, M. Sarfaraj Alam. "Harnessing of Wave Energy as Renewable Energy: An Overview", Volume. 4 Issue. 8, - 2019, *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*, www.ijisrt.com. ISSN - 2456-2165, PP:- 71-88.
- [5] S.-J. Kim, W. Koo, and M. J. Shin, "Numerical and experimental study on a hemispheric point-absorber-type wave energy converter with a hydraulic power take-off system," *Renewable Energy*, vol. 135, pp. 1260–1269, May 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.09.097.
- [6] N. T. K. Loan, P. T. Long, L. M. Tiên, "TIME Domain Modeling for A Floating-point Absorber Wave Energy Converter." *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 19, no. 5, 2021, pp. 1-5.
- [7] P. C. Binh and K. K. Ahn, "Performance optimization of dielectric electro active polymers in wave energy converter application," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 17, no. 9, pp. 1175–1185, Sep. 2016, doi: 10.1007/s12541-016-0141-6.
- [8] T. D. Dang, C. B. Phan, and K. K. Ahn, "Design and Investigation of a Novel Point Absorber on Performance Optimization Mechanism for Wave Energy Converter in Heave Mode," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 477–488, Mar. 2019, doi: 10.1007/s40684-019-00065-w.
- [9] T. D. Dang, M. T. Nguyen, C. B. Phan, and K. K. Ahn, "Development of a Wave Energy Converter with Mechanical Power Take-Off via Supplementary Inertia Control," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 497–509, Mar. 2019, doi: 10.1007/s40684-019-00098-1.
- [10] P. C. Binh, N. M. Tri, D. T. Dung, K. K. Ahn, S. Kim, and W. Koo, "Analysis, design and experiment investigation of a novel wave energy converter," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 2, pp. 460–469, Feb. 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0821.



Phan Công Bình received his B.S. degree in Mechanical Engineering from HCMC University of Technology and Education, Viet Nam in 2005, and the M.S. degree from Hochiminh City University of Technology in 2009 and the Ph.D. degree from Ulsan University in 2015. He worked in mechanical engineer with over 15 years of expertise in machine design, fabrication and maintenance. Among, over six years' experience at university in teaching machine design subjects at HCMC University of Technology and Education from 2017. His expertises involve in finding new conceptual design and simulate the wave energy converter. He accomplished academic background with 14 journal papers, 9 patents and 20 international conferences during doctoral studies at University of Ulsan in Korea from 2011 until present. He has experience in fabricating test bench for doing experiments. Moreover, he has worked as a consultant for kaizen machine and maintenance techniques in factories. He is currently a Lecturer in Mechanical Engineering in HCMC University of Technology and Education. His research interests involve in mechanical structural design and optimization, wave energy converter modeling using hydraulic and mechanical power take-off system and Maintenance In Industry. Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=6FQx-AUAAAAJ&hl=en>

Email: binhpc@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9137-2227>



Nguyen Nhut Phi Long received the B.Sc. and M.Sc. degrees in machine manufacturing technology and the Ph.D. degree in engineering mechanics from the HCMC University of Technology and Education (HCMUTE), Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2004, 2007, and 2021, respectively. He is currently with the Faculty of Mechanical Engineering, the HCMUTE, Ho Chi Minh City, Vietnam. His research interests include Engineering Mechanics, Materials in Engineering, and Machinery Manufacturing Technology. Scholar: https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=tZSIz4sAAAAJ&view_op=list_works&sortby=pubdate

Email: longnnp@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2303-5989>



Ho XuanThanh currently works at the Faculty of Mechanical Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Viet Nam. Degree of master machinery manufacturing technology, given under the seal of HCM city University of Technology and Education Viet Nam in 2012. His skills and expertise are Design Engineering, CAD, Mechanical Processes, Manufacturing Process Mechanics, machining. His research interests include Engineering Mechanics, Machinery Manufacturing Technology.

Email: thanhx@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3972-7547>



Do Tien Si was born on January 15, 1995, in Dong Nai, Vietnam, is a passionate engineer and researcher. His expertise lies in the fields of Machine Design and Computational Mechanics. In 2018, He graduated from Ho Chi Minh City University of Technology with a Bachelor's degree in Mechanical Engineering. Continuing his quest for knowledge, he pursued a Master's degree in Mechanical Engineering at the same university, successfully obtaining it in 2019.

Currently, he is a PhD candidate at Ho Chi Minh City University of Technology (since April 2024) and is lecturer in the Electrical-Mechanical department at FPT Polytechnic, FPT University. His interests include *Finite Element Analysis*, *Deep Learning*. Email: sidt.ncs@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6548-7396>