

# 離岸浮動式風波雙能發電系統之創新開發與研究

蘇煒程\* 楊舜涵\*,\*\*1

\*國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系  
\*\*國立臺灣大學 臺大能源中心

關鍵詞：混合能源系統，浮動式離岸發電系統，運動與結構響應，均化能源成本

國科會計畫編號：NSTC 111-2222-E-002-010-MY3

## 摘要

由於全球可再生能源需求大增，海洋再生能源系統獲得更多關注。為了提升海域發電場址之單位面積發電量，本研究設計一混合能源系統，結合波浪發電機組與浮動式風力發電機組，以克服單一發電系統的裝置容量限制。本研究將針對臺灣特定海域之海況，進行混合能源系統之設計。將透過 HydroD 獲得水動力係數，並於 SIMA 中建立風波雙能發電系統之模型。在完成運動響應分析後，預估波浪發電機組之發電功率與均化能源成本。最終研究設計之波浪發電機組在  $H_s=0.25m$  下，最大發電功率可達 3.3kW，波浪能之均化能源成本約為 550TWD/kWh。本計畫建立風波雙能發電系統用於臺灣特定海域之評估方法，期許此次研究可供混合能源系統於臺灣海域之設計參照和經濟性評估。

## 前言

### 1. 研究動機與文獻回顧

由於全球暖化及能源自主性，各國積極發展可再生能源，包含離岸風電與波浪發電等。文獻[1]中提及浮動式離岸風電與波浪發電兩者，現階段技術尚未成熟，雖具有可觀之能源潛能，卻仍有高開發風險與經濟可行性等問題，為了提高單位面積之發電量，進而降低開發成本與風險等原因，已有許多學者提出將離岸風電與波浪能結合之混合能源系統(以下稱之為風波雙能發電系統)作為解決方法，透過結合二種能源為一併之發電系統得以加速尚未成熟的浮動式風力發電及波浪能發展。

為了加速模型驗證過程及優化設計，文獻[2]中也透過數值模擬進行風波雙能發電系統模型於不同設計負載下之運動響應分析，以節省縮驗證過程，並獲得系統全面之性能評估，並得出其設計之波浪發電機組於主週期之最大發電功率介於 2~16kW 間，且不同放置位置將影響波浪發電之效率。

### 2. 研究目的

因應台灣第三階段區域開發，許多開發商皆提及使用浮動式離岸風力發電，且目前台灣尚未有相關完整之風波雙能發電系統設計與評估方式，故本研究旨在開發適用台灣特定海域之風波雙能發電系

統，並透過數值模擬，評估該系統之運動響應及經濟可行性評估。

## 研究方法

本研究將根據下列流程圖進行。

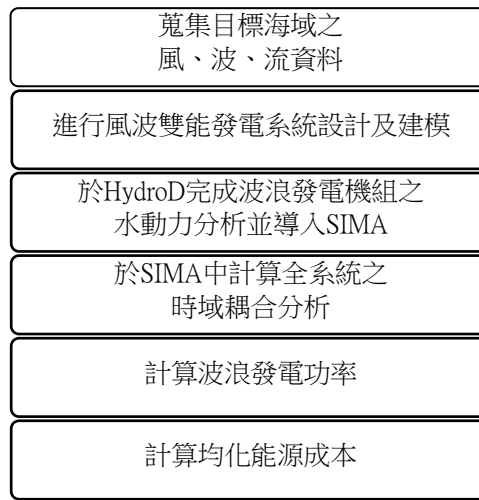


圖 1 研究流程圖

### 1. 目標海域

本研究主要探討臺灣特定海域離岸浮動式平台型式，經篩選安裝港口距離，海域水深及繫纜條件後，選用新竹外海作為目標海域進行設計及分析。

<sup>1</sup> 聯絡作者 楊舜涵 (hedysyang@ntu.edu.tw)

其風、波、流參考中央氣象局新竹浮標[3]自2020年4月至2023年10月間，總資料數為26262筆之資料庫進行設計負載條件，如表1所示，風速定義高度為 $z=150\text{m}$ ，海流以海平面 $z=0\text{m}$ 為定義高度。

表1 目標海況之設計負載條件

Case (-)	Hs (m)	Tp (s)	Wind speed (m/s)	Current speed (m/s)
1	0.25	3.5	4.13	0.31
2	0.25	4.5	3.59	0.31
3	0.75	4.5	3.57	0.31
4	1.25	4.5	7.97	0.31

負載條件是由原始數據進行統計整併，選擇出現波浪發生機率大於10%之海況，並以中間值代表此區間，如表2所示。

表2 海況發生機率分布

Hs(m) \ Tp(s)	3~4	4~5	5~6	6~7.5
0.2~0.5	11%	15%	3%	0%
0.5~1	8%	17%	5%	0%
1~1.5	1%	10%	7%	0%
1.5~2	0%	3%	9%	1%
2~2.5	0%	0%	6%	1%
2.5~3	0%	0%	2%	1%
3~3.5	0%	0%	0%	0%

## 2. 模型設計

風波雙能發電系統可大致分為四大部分，分別為半潛式浮台、繫泊系統、風力發電機組、及波浪發電機組(含波能轉換器與輔助功率輸出裝置)，如圖2所示。本研究將根據目標海域之海況進行各部分設計。

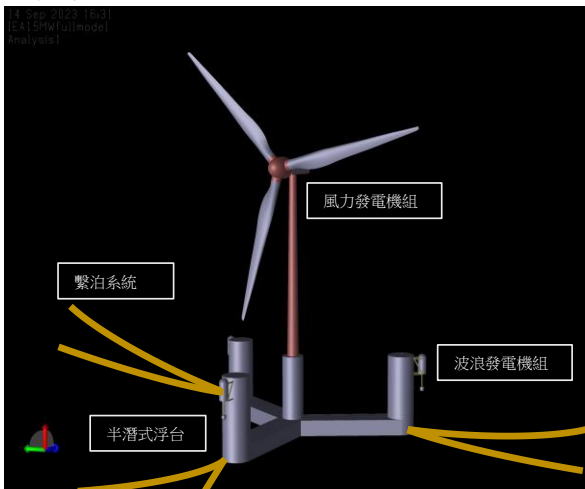


圖2 風波雙能發電系統各系統示意圖

### 2.1 半潛式浮台

本研究之半潛式浮台設計，參考自挪威、日本及美國緬因大學共同開發之 UMaine VoltturnUS-S Reference Platform[4]，該浮台中心柱搭載風力發電機組，浮台中心等角輻射三個旁柱，旁柱外側加裝波浪發電機組，中心柱與旁柱間透過浮橋與支柱進行連結。

### 2.2 繫泊系統

繫泊系統用於將浮台固定在一定範圍內，其設計參考文獻[5]，以每個旁柱兩條鐵鍊組成懸鏈式繫泊系統進行繫留，各鐵鍊之單位直徑為185 mm，並在佈設方面遵循國際規範。

### 2.3 風力發電機組

風力發電機組主要由葉片、塔柱、機艙及輪鼓組成，其設計參考國際能源署公布之15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine[6]，該風機之額定功率為15 MW，於10.6 m/s達到額定功率，並在25 m/s時停止運轉，避免發生結構損害。

### 2.4 點吸收式波能轉換器

本研究將選用點吸收式波能轉換器作為波能擷取之裝置，其結構幾何將參考文獻[7]進行設計，過程將根據目標場址之海況設計適合該海域之浮球，並考慮與半潛式浮台結合所面臨的問題，最終以半徑1m之圓柱加上相同半徑之半圓球作為浮球之幾何外型，並使用連桿裝置進行波浪能與機械能之傳遞。初步設計系統中具有三台波浪發電機組位於旁柱外側進行發電。

### 2.5 線性電機式輔助功率輸出裝置

輔助功率輸出裝置是波浪發電系統中用於機械能與電能的轉換機構，本研究之設計參考了英國 Trident Energy 公司所開發之線性電機式輔助功率輸出裝置 PowerPod[8]。該設計利用磁鐵與線圈之相對運動產生應電流，進行轉換電能輸出。而透過發電特性、受力特性之定義，可在獲得系統運動響應後進行發電量之預估。本研究初步以30kW做為波浪發電機組之設計裝置容量，其相關特性參數如表3所示。

表3 特性參數表

Parameters	unit	value
EMF constant, $K_e$	V/(m/s)	297
Peak current, $I_c$	Apk	144

Peak force                  kN                  30

---

### 3. 數值模擬軟體及方法

本研究將先使用 Sesam HydroD [9]進行水動力分析，而後將相關浮體之水動力係數導入 Sesam SIMA[10]中進行全域不規則波之耦合計算，以獲得風波雙能發電系統於實際海況下之運動及受力響應，進而計算出其發電功率及均化能源成本。

#### 3.1 頻域水動力分析

本研究為了初步了解設計之波浪發電機組與獲得後續計算之水動力係數，利用軟體計算頻域水動力統域方程式(式 1)，以獲得波浪發電機於頻域下之運動及受力響應振幅因子，並於該方程式中加入輔助功率輸出裝置之影響。

$$\begin{aligned} & ([M_D] + [M_{pto}] + [A(\omega)])\ddot{\delta} + \\ & ([B_D] + [B_{pto}] + [B(\omega)])\dot{\delta} + \\ & ([K_{hydro}] + [K_{pto}])\delta = F_{wave}(\omega) \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $[M_D]$  為浮球質量矩陣、 $[M_{pto}]$  為輔助功率輸出裝置質量矩陣、 $[A(\omega)]$  為波浪發電機組之六自由度附加質量矩陣、 $[B_D]$  為浮球阻尼矩陣、 $[B_{pto}]$  為輔助功率輸出裝置阻尼矩陣、 $[B(\omega)]$  為波浪發電機組之輻射阻尼矩陣。而  $[K_{hydro}]$ 、 $[K_{pto}]$  兩者分別為浮球之靜水剛度矩陣與輔助功率輸出裝置剛度矩陣， $F_{wave}(\omega)$  為波浪激振力， $\delta$  為頻域下浮球之位移。

#### 3.2 時域耦合分析與波浪發電機組發電功率

在時域耦合分析中，將風波雙能發電系統的大部分進行結合，並利用式 2 與式 3，分別針對浮體運動與結構（如繫纜繩、輔助功率輸出裝置等）受力進行計算。

$$\begin{aligned} & M'\ddot{x} + B'\dot{x} + \\ & D_1\dot{x} + D_2f(\dot{x}) + \\ & K(x)x = F(t, x, \dot{x}) \end{aligned} \quad (2)$$

式 2 中， $M'$  為頻域質量矩陣， $B'$  為頻域阻尼矩陣， $D_1$  為線性阻尼矩陣， $D_2$  為二次阻尼矩陣， $f$  為向量函數， $K$  為系統剛度矩陣， $F$  為激振力向量， $x$  為時域中浮體之位移。

$$R^I(r, \ddot{r}, t) + R^D(r, \dot{r}, t) + R^S(r, t) = R^E(r, \dot{r}, t) \quad (3)$$

式 3 中， $R^I$  為慣性力向量， $R^D$  為阻尼力向量， $R^S$  為結構內部反應力， $R^E$  為外部作用力， $r$  為結構物之位移。

發電功率是透過數值模擬得出浮體間相對運動與 2.5 節所設計之發電特性求得，如式 4 所示，其計算過程不同於以往計算波浪發電功率之方法，乃透過考慮電流與電壓變化之現象，使發電功率之計算更加貼近於真實發電。

$$P_t = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) \cdot Ke \cdot I_c(t) dt \quad (4)$$

式 4 中， $P_t$  為實際發電功率，單位為 kW， $T$  為計算時間，本研究為 3600s， $V(t)$  為特定時間下浮球與浮台之相對速度，單位為 m/s。

### 4. 波浪發電機組均化能源成本

而均化能源成本，如式 5 所示，是用於評估不同能源成本之重要指標。由於本研究尚未進行實際建造，故參考文獻[11]之統計回歸線，以獲得式 5 之必要參數。

$$LCoE(t) = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^N (\frac{OPEX_t}{(1+\gamma)^t})}{\sum_{t=1}^N (\frac{AEP_t}{(1+\gamma)^t})} \quad (5)$$

式 5 中， $LCoE(t)$  為均化能源成本，單位為 TWD/kWh， $CAPEX$  是資本支出，單位為 TWD， $OPEX$  是營運支出，單位為 TWD， $\gamma$  是重貼現率，其數值參考中央銀行公布之數值[12]，單位為%， $t$  為系統運轉生命週期，單位為 yr， $AEP$  為年發電量，單位為 kWh

## 研究結果

### 1. 頻域水動力係數與運動響應

由結果可看出該波浪發電機組附加質量約介於 2000 至 1000 kg 間，而輻射阻尼最大峰值約為 1200 kg/s。

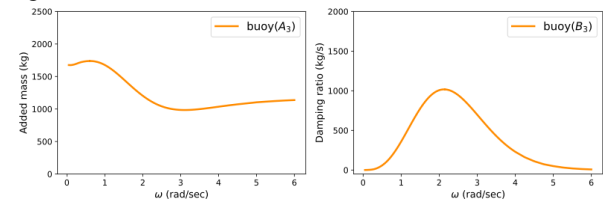


圖 3 波浪發電機組之附加質量(左)與輻射阻尼(右)而起伏波浪激振力反應振幅因子(RAO)之最大峰值約為 31000 N/m，起伏運動反應振幅因子最大值約為 1.3 m/m，其自然共振頻率約在 3s。

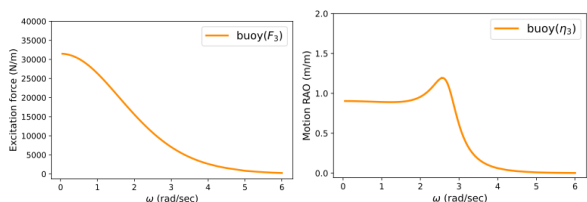


圖 4 起伏激振力 RAO(左)與起伏運動 RAO(右)

## 2. 時域下運動響應與發電功率分析

本節將以 Case 1 中的 WEC\_1 進行結果呈現，可發現於波浪振幅為  $\pm 0.2\text{m}$  的情況下，浮球約有  $\pm 0.12\text{m}$  的相對位移響應。

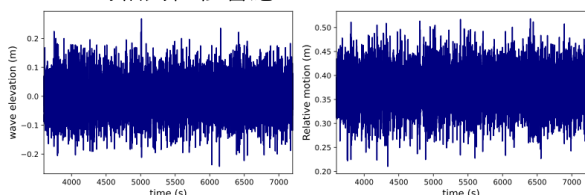


圖 5 波浪振幅(左)及浮球相對位移(右)

對於相對位移進行微分過後，可獲得相對速度，透過 3.2 節之式 4 即可獲得發電功率。而單台波浪發電功率平均約為 191W，最大瞬時發電功率為 3300W。

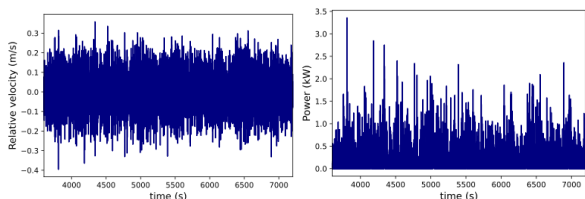


圖 6 浮球相對速度(左)及瞬時發電功率(右)

## 3. 均化能源成本

系統中有三台波浪發電機組，總平均發電功率在 Case 4 中可接近 10kW，而波浪發電之均化能源成本約為 33 TWD/kWh。

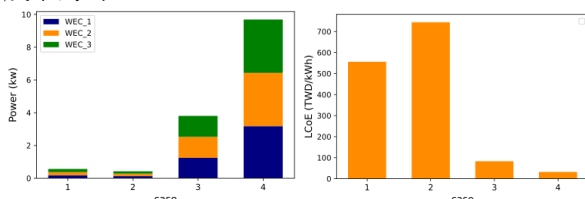


圖 7 系統總發電功率(左)及均化能源成本(右)

## 結論

本研究最終依照臺灣特定海域之海況，完成風波雙能發電系統之設計，並藉由頻域水動力分析及時域耦合分析，針對該系統進行運動響應分析及發電功率之評估，完成該系統之均化能源成本評估。

由研究結果發現目前該系統之波浪發電成本仍然過高，其原因可能為該區域之波浪潛能本身不足，且均化能源成本的計算未加入風力發電及考慮共用輸電設備所減少之效益。而本研究仍認為風波雙能發電系統在臺灣具有可行性，並能使兩種再生能源系統得以實現商業化開發。在未來可基於本研究之結果，在獲得不同海域之海況條件後，根據此流程進行風波雙能發電系統之運動響應分析及經濟可行性評估。

## 參考文獻

- Pérez-Collazo, C., D. Greaves, and G. Iglesias, "A review of combined wave and offshore wind energy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 141-153 (2015)
- Reza, D., A. Abuzar, and E. Abouzar, "Energy harvesting through an integrated design of a semi-submersible offshore platform with point absorber wave energy converters," *IJCOE*, Vol. 7, pp. 27-36 (2022)
- 中央氣象局, "浮標站與潮位站測站資料", Available from: <https://opendata.cwa.gov.tw/dataset/forecast/O-B0076-001> (2023)
- Allen, C., A. Viselli, H. Dagher, A. Goupee, E. Gaertner, N. Abbas, M. Hall, and G. Barter, "IEC wind TCP Task 37: definition of the UMaine VoltturnUS-S reference platform developed for the IEA Wind 15-megawatt offshore reference wind turbine," *Technical Report*, National Renewable Energy Lab (NREL), Golden, CO (United States) (2020)
- J.-H. Huang, S.-H. Yang, "Design and analysis of mooring system for the IEA 15-MW floating offshore wind turbine for an extreme condition," NTU, Taipei, Taiwan (2024)
- Gaertner, E., J. Rinker, L. Sethuraman, F. Zahle, B. Anderson, G. Barter, N. Abbas, F. Meng, P. Bortolotti, and W. Skrzypinski, "IEA wind TCP task37: definition of the IEA 15-megawatt offshore reference wind turbine," *Technical Report*, National Renewable Energy Lab (NREL), Golden, CO (United States) (2020)
- Riley, I., "Geometric Optimization of a Heaving Point Absorber Waver Energy Converter," Georgia Southern University, Georgia, USA.
- Trident energy, "PowerPod", Available from: <http://www.tridentenergy.co.uk/wp-content/uploads/2014/01/Trident-Energy-Linear-Generator-Datasheet.pdf> (2024)
- DNV GL, "Sesam HydroD. V6.1.2 ed.," Høvik, DNV GL AS. (2024)
- DNV GL, "Sesam SIMA. V4.4.0 ed.," Høvik, DNV GL AS. (2024)
- OES, "International Levelised Cost of Energy for Ocean Energy Technologies," *Technical Report*, Ocean Energy Systems (OES), Tecnalia, CO (Spain) (2020)
- 中央銀行, "重貼現率", Available from: <https://www.cbc.gov.tw/tw/lp-640-1-1-20.html> (2024)

## Innovative Development of Offshore Wind-Wave Energy Systems for Taiwan

W.-C. Su\* S.-H. Yang\*,\*\*

\* Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

\*\* Energy Research Center, National Taiwan University

*Keywords: hybrid energy system, floating wind turbine, integrated response analysis, levelized cost of energy*

### ABSTRACT

Driven by Net Zero goal by 2050, marine renewable energy systems have received more attentions in recent years. In order to enhance the power generation per unit space of an offshore energy farm, this study proposes a hybrid energy system that integrates wave generators and floating wind turbines, aiming to overcome the capacity constraints of single renewable energy system. The objective of this study is to design a hybrid energy system based on the sea conditions in specific offshore regions in Taiwan. After the design of the wind-wave energy system, the hydrodynamic coefficients of the system will firstly be obtained using Sesam HydroD. Then, the complete wind-wave energy system model will be established in Sesam SIMA and simulated based on the global integrated response analysis. Using the design load cases defined according to Taiwan's sea condition, the power performance of the wave-powered generators and levelized cost of energy of wave energy were calculated. The results showed that the design of the wave generator can produce up to 3.3 kW of power under the wave height  $H_s$  of 0.25 m. The average levelized cost of energy for wave energy is approximately 550 TWD/kWh. The methodology in this study has been developed for the wind-wave energy system to be used in the specific offshore sites in Taiwan. This research is expected to provide a design reference and methodology of economic evaluation of hybrid energy systems in Taiwan.