浮式太陽光電浮台受力分析概述

楊証皓/ 工研院 綠能所 太陽光電技術組，資深研究員

一、前言

隨著全球對清潔能源的需求日益增長，台灣政府於111年3月及12月分別公布「臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明」及「12項關鍵戰略行動計畫」，在路徑規劃電力能源以去碳化為目標，希冀總電力之60－70%佔比為再生能源，作為達成整體電力供應去碳化之重要作法，而太陽光電之設置為再生能源之重要選項。然而，傳統的地面光電系統在土地資源日漸稀缺的情況下，逐漸面臨場地選擇上的限制。特別是在土地價格高昂的地區，以及農業或城市土地資源稀缺的國家，尋找合適的太陽能電廠設置場地成為了一項挑戰。在這樣的背景下，浮式太陽光電系統（Floating Photovoltaic, FPV）應運而生，成為了太陽能光電技術的另一種可行應用形式。

浮式太陽光電系統將光電模組安裝在水面漂浮的浮台上，常見於水庫、湖泊及沿海封閉水域。這不僅節省土地資源，還利用水體的冷卻效果提升發電效率，並減少水體蒸發及抑制藻類生長。然而，這類系統需經受風力、波浪及水流等外力的考驗，尤其在極端天氣下，浮台結構可能會變形或損壞，甚至導致系統漂移或沉沒。因此，對浮台受力進行深入分析和預測是確保系統安全運行的關鍵。本報告將探討浮式太陽光電系統中浮台結構的受力分析，說明風力、波浪及水流對浮台系統施加的力學作用，分析浮台在不同環境條件下的受力行為。

二、浮式太陽光電浮台規模

浮式太陽光電系統根據其結構設計和應用場景的不同，可分為多種類型，每種類型在結構設計、安裝方式及適用環境方面各有特色。這些類型主要包括單一模組浮台、多模組浮台、連續浮台系統及浮動平台系統。上述不同浮式太陽光電皆在適應不同的環境條件和應用需求，從而最大限度地提高浮式太陽光電系統的效能和穩定性。以下就不同浮式光電系統進行說明：

1. **多模組浮台**：這種浮台擴展了單一模組的設計，允許在一個浮台上安裝多個光電模組，適合中大型光電系統，特別是水面廣闊且穩定的湖泊或水庫。多模組浮台增加了發電能力，結構更穩固，能夠有效應對中等風浪。
2. **連續浮台系統**：由多個浮台模塊組成的大型浮動平台，適用於大規模光電發電廠。此系統可擴展性強，結構更穩固，能抵抗較大的環境負荷，並能靈活配置以最大化水面利用。

Copyright 2024 ITRI 工業技術研究院

3. **浮動平台系統**：結合浮台和平台的設計，具備更高的穩定性和靈活性，適合風浪較大的開放水域，如海洋沿岸。該系統通常配有額外的浮力支撐和防波堤設施，適用於極端環境，確保長期運行的穩定性。

三、風力、波浪及水流對浮台受力之方式

浮式太陽光電系統安裝在水面上，長期暴露於自然環境中，必須應對各種環境因素的影響，特別是風力、波浪和水流這三大主要外力。這些外力對浮台結構的影響是多方面的，包括施加在浮台表面上的壓力、造成浮台晃動的動力效應，以及在水中形成的拖曳力等。理解這些外力如何影響浮台結構，是進行受力分析和設計優化的基礎。

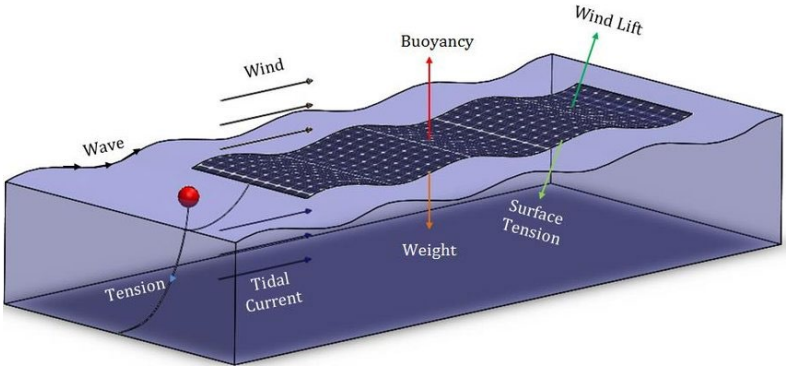


圖1. 浮式太陽能光電系統浮台受力方式示意圖 [1]

首先，風力對浮台結構的影響主要體現在風壓和風力導致的動態反應兩個方面。風速越大，浮台表面所承受的風壓就越強。這種壓力主要作用在浮台的迎風面上，導致浮台結構在水平方向上產生推力，同時也可能引起浮台的傾斜和旋轉。當風速增大到一定程度時，這種推力會超過浮台的穩定性限度，造成浮台的結構損壞或繫纜系統的破壞。此外，風力還會導致浮台產生動態反應，特別是在風向與浮台排列方向一致的情況下，這種動態反應會引起浮台的振動和搖晃，進而加大接合部位的應力集中，對結構完整性構成威脅。

其次，波浪對浮台結構的影響主要體現在垂直方向的抬升力和水平推力上。波浪的力量在浮台底部產生抬升力，使浮台隨著波浪的起伏而上下移動，這種上下運動會對浮台結構的接合部件施加周期性的壓力，導致結構疲勞和損壞。尤其是在大浪的情況下，波浪的能量會對浮台造成更大的衝擊，進一步增加浮台的垂直位移，甚至可能導致浮台的部分模組浸沒在水中，影響發電效能。除了垂直方向的抬升力，波浪還會對浮台施加水平推力，這種推力會使浮台在水平方向上發生位移，導致繫纜系統的張力增加。如果設計不當，浮台可能會發生過度漂移，甚至脫離繫纜點。

最後，水流對浮台的影響則主要表現在水平推力上。當水流速度較快時，水流會對浮台產生顯著的拖曳力，這種力會推動浮台沿著水流方向漂移。如果水流速度變化

Copyright 2024 ITRI 工業技術研究院

劇烈，浮台可能會受到不均勻的拖曳力作用，導致浮台的旋轉和位移不穩定。這種情況下，繫纜系統必須承受更大的張力，以保持浮台的位置穩定。此外，在一些特殊情況下，如洪水或湍流，水流的影響會更加明顯，可能會對浮台結構和繫纜系統造成極端的挑戰，要求在設計時考慮這些潛在的極端情況。

綜合上述說明，風力、波浪和水流這三種外力對浮式太陽光電系統的影響是複雜且多變的。在設計浮台結構時，必須綜合考慮這些外力的作用，進行詳細的受力分析，以確保系統的穩定性和安全性。尤其是在極端環境下，如強風、大浪或急流的情況下，浮台的結構設計需要具有足夠的強度和韌性，並且繫纜系統應具備一定的冗餘(Redundancy)設計，以應對可能出現的突發情況。通過對這些外力的深入理解和精確計算，能夠幫助工程師設計出更加穩固和可靠的浮式太陽光電系統。

四、浮台受力之分析

浮台受力分析是確保浮式太陽光電系統穩定運行的核心工作之一。通過精確的受力分析，我們可以預測浮台在不同環境條件下的行為，並優化設計以減少風險。在本報告中，我們基於風洞實驗、波浪實驗及現場測試數據，對浮台的受力情況進行了詳細分析，主要集中在風力、波浪對浮台結構的影響，以及繫纜系統在這些外力下的表現。

首先，從風洞實驗結果看，風力對浮台的影響非常明顯。當風速較低時，如5 m/s和10 m/s的條件下，浮台的受力情況相對穩定，接合部位和繫纜索的張力都在可控範圍內。然而，當風速達到17.5 m/s時，浮台的受力情況發生顯著變化。風速的增加導致浮台結構的風壓大幅度上升，特別是在浮台的迎風面，這種壓力會在浮台結構中引發較大的軸力和彎矩。此時，浮台的動態反應也會更加劇烈，接合部位的應力集中現象明顯增強，導致結構變形增加。如果此時接合部的材料選擇不當，浮台的結構完整性可能會受到損害。實驗結果顯示，PVC材質的接合部在高風速下表現出更高的剛性和更小的變形，顯示出其在抵抗風力作用方面的優勢。

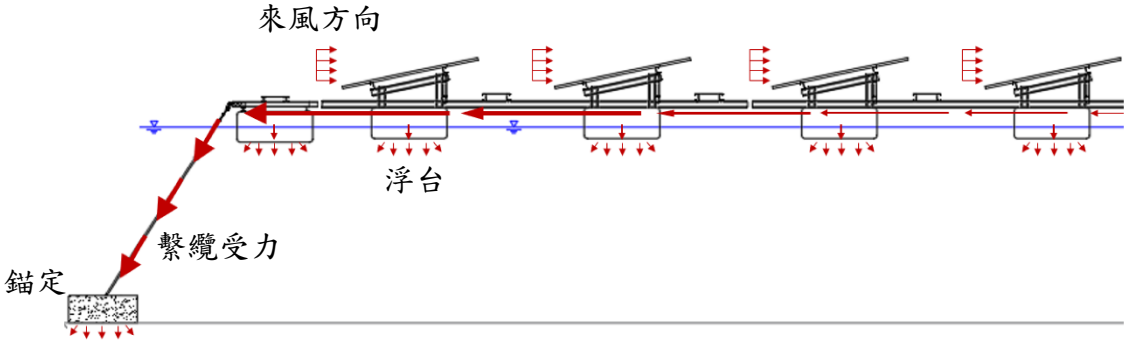


圖2. 風速對浮式光電系統之受力分佈示意圖[2]

Copyright 2024 ITRI 工業技術研究院

再者由波浪對浮台的影響在波浪實驗中得到了詳細分析。實驗顯示，波浪的影響主要體現在浮台的垂直位移和接合部的受力增強上。當波浪的波高超過5厘米時(縮尺模型)，浮台的垂直位移明顯增大，這種位移會對浮台結構的接合部件施加額外的壓力，進一步增加結構的彎矩和應力集中。波浪的周期性作用還會導致浮台在水中的上下運動，這種運動會使得浮台的接合部和繫纜索處於周期性載荷之下，容易導致結構疲勞。如果波浪的頻率較高，這種疲勞效應會更加明顯，可能最終導致接合部或繫纜索的破壞。此外，實驗還發現，波浪的水平推力對浮台的影響同樣不可忽視，特別是在大波浪條件下，浮台的水平位移增大，使得繫纜系統承受更大的張力，增加了繫纜系統損壞的風險。

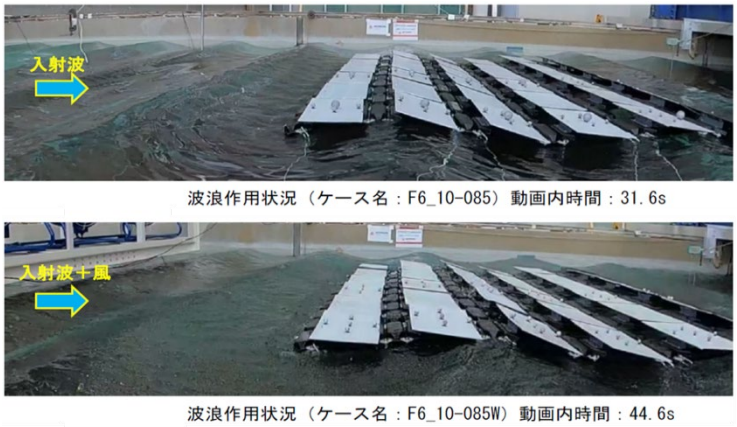
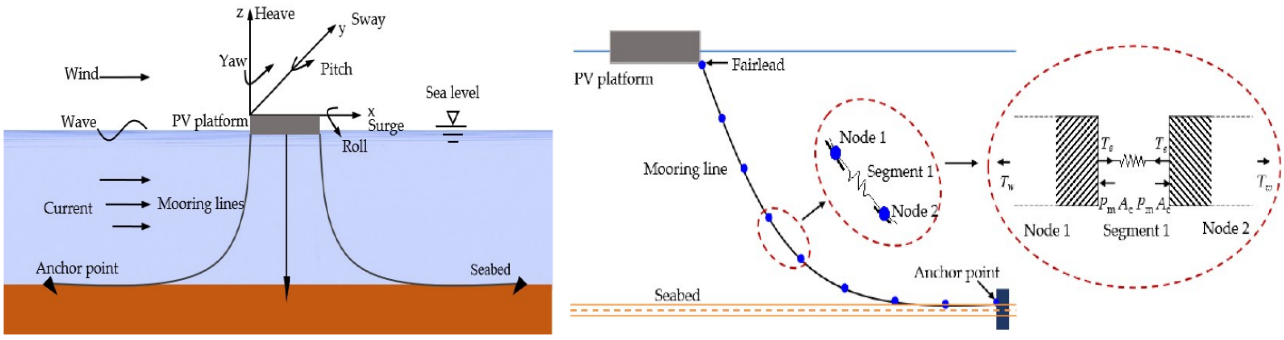


圖3. 波浪與風力對縮尺浮式光電模式受力示意圖 [3]

最後，繫纜系統的受力分析顯示，風力和波浪條件下，繫纜系統的張力變化非常顯著。尤其是在高風速和強波浪條件下，繫纜系統的張力達到了最高值。這要求在設計繫纜系統時必須考慮到極端天氣條件的影響，選擇強度足夠且具備一定冗餘的材料來確保繫纜系統的穩定性。實驗結果表明，當浮台的外周浮體注水時，浮台的穩定性有所增強，繫纜系統的張力也相應減小，這是一種有效的穩定措施。然而，這種措施並非在所有條件下都適用，因此在設計時需要根據實際的環境條件進行具體分析和優化。



(a) 風波流組合受力於繫纜系統示意　　(b) 繫纜線之受力節點示意

圖4. 風波流對浮台繫纜系統受力示意圖[4]

Copyright 2024 ITRI 工業技術研究院

由上述分析結果可得知浮式太陽光電系統在不同環境條件下的結構行為。風力、波浪和水流等外力的綜合作用對浮台結構的穩定性和安全性構成了多方面的挑戰。通過精確的受力分析，我們可以預測這些外力對浮台的影響，並進行相應的設計優化，以提高系統的耐久性和安全性。

五、結論

通過對風力、波浪及水流對浮式太陽光電系統浮台結構的受力分析，我們可以得出幾個關鍵結論。這些結論不僅有助於我們理解浮台在各種外力作用下的行為，也為浮式太陽光電系統的設計和施工提供實用指引。

1. 相比於聚氯乙烯(PVC)，高密度聚乙烯(HDPE)在浮式光電系統的浮台應用中更具耐久性和靈活性。HDPE具有更強的抗裂性和耐衝擊性，能夠在廣泛的溫度範圍內保持結構完整性，並且對化學物質和紫外線的抵抗力更強，這使得其在惡劣環境下更為可靠，並延長浮台的使用壽命。
2. 浮台設計的優化對系統穩定運行至關重要。設計時需考慮風力、波浪和水流等外力影響，並根據環境條件調整浮台的結構與排列，以減少風浪對浮台的衝擊，確保結構穩定性。
3. 繫纜系統的穩定性是防止浮台在極端環境下漂移的關鍵。在高風速和強波浪條件下，繫纜系統需承受更大的張力，因此設計時應考慮惡劣條件並增加冗餘設計。定期檢查與維護，特別是在暴風雨後，對防止意外故障至關重要。

未來隨著技術的進一步發展，我們有理由相信浮式太陽光電系統將在全球能源市場中發揮越來越重要的作用，為實現再生能源廣泛應用和能源轉型做出具體的貢獻。

Copyright 2024 ITRI 工業技術研究院

參考文獻

[1] Piedra, J., Palacios, J., & Sánchez, J. (2017). Forces acting on a floating thin-film PV array. Renewable Energy, 104, 109-121. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.070

[2] Heo, S-J., Kim, S-H., & Choi, W. (2023). *Wind Load Distribution in Float Photovoltaic System*. Applied Sciences, 13(22), 12144. https://doi.org/10.3390/app132212144

[3] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). (2023). 水上設置型太陽光発電設備の水理実験結果の概要.

[4] Song, Q., & Liu, W. (2024). *Numerical Investigation into the Dynamic Responses of Floating Photovoltaic Platform and Mooring Line Structures under Freak Waves*. Journal of Marine Science and Engineering, 12(1), 96. https://doi.org/10.3390/jmse12010096

Copyright 2024 ITRI 工業技術研究院