



離岸風場之海底陣列電纜

研究與應用

蘇郁琇／國立成功大學水利及海洋工程系 碩士生

楊瑞源*／國立成功大學水利及海洋工程系 教授

台灣近來致力於發展離岸風能產業，以期能產生乾淨、環保的綠色能源，而在離岸風場中，海底電纜扮演電力輸送的重要角色，如何更有效率的輸送電力一直是值得深耕的方向，無論是固定式風場還是未來的浮動式風場，如何佈放及安裝電海底電纜都是風場建置不可或缺的一部份。因此，本文將介紹海底電纜的參數特性、形狀配置，並說明如何以力學角度來進行電纜的初步設計，最後將以三種配置來進行極端條件模擬並比較其結果。

關鍵詞：浮動式風場、陣列電纜、動態電纜

Recently, Taiwan has been dedicated to develop offshore wind industry to generate green energy. In offshore wind farms, cable system plays an important role in transporting the electricity for both fixed and floating foundation. Therefore, how to install the cable system is a crucial part when constructing a wind farm. In this research, the feature and configuration of cable system would be covered to express the way of conducting a cable design. Numerical simulation of three cases under extreme conditions will also be included to offer a general concept through cable system.

Keyword: Offshore wind farm, Inter-array cable, Dynamic cable

前言

近年來由於能源議題興起及 2050 年淨零碳排政策，綠色能源如風能、太陽能等被大力提倡。其中台灣海峽因天然地形條件，形成極具發展離岸風電之潛力場址，如下圖 1 所示^[1]。2019 年，台灣位於苗栗外海之第一座離岸風場海洋風電（Formosa 1）正式商轉。由於台灣海峽風能密度較高之處多位於水深 60 ~ 90 米，但建置固定式風場的成本亦會隨著水深而增加，故近年來亦陸續規劃西部外海之浮動式風場開發，經濟部能源局已於 2023Q1 召開浮動式風場示範規劃說明會議，預計於今年 Q4 完成選商，並於 2028 年完工併網。

在離岸風場中，電纜系統扮演著致關重要的角色，風機運轉所產生之電能需藉由電纜傳輸並整合至

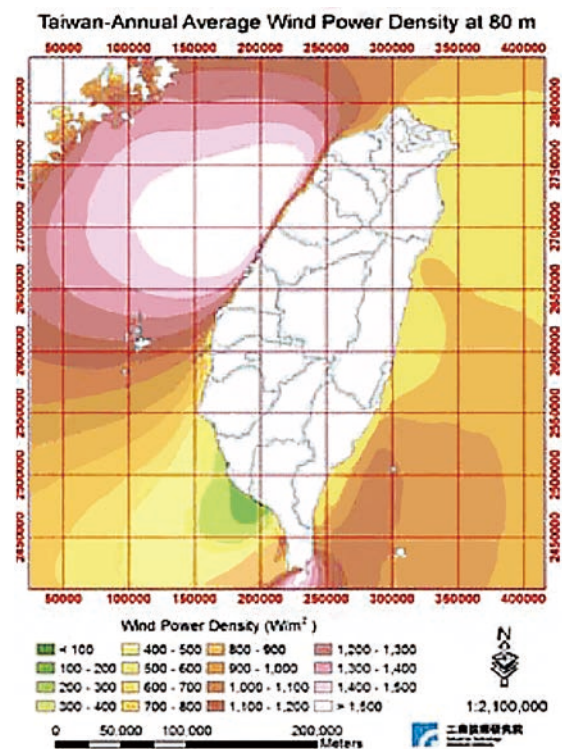


圖 1 台灣海峽風能密度圖

（圖片來源：陳美蘭、胡哲魁^[1]）

* 通訊作者，ryyang@mail.ncku.edu.tw

電網或變壓裝置。然在離岸風場中的海底電纜，可分為陣列電纜（Inter-array cable）以及輸出電纜（Export cable），如圖 2 所示^[2]，陣列電纜負責風機間及風機與變電設施間之電力輸送，出口電纜則負責變電設施到岸端之電力傳輸。

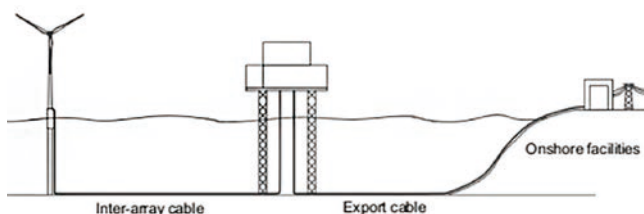


圖 2 離岸風場電纜系統示意圖
(圖片來源:Srinil^[2])

就力學角度而言，在設計時常針對電纜之長度及上升段之形狀配置來進行考量。而距離部分，電纜長度與連接物的間距呈正相關，然風機間距須考慮尾流效應來做設計，電纜長度建議值約略為風機間距之 1.1 倍左右^[3]；而連接變電設施之電纜長度則較不受限，端看使用需求而定。形狀配置部分最常見的則為懸垂式 Catenary 及 Lazy wave 形式，如圖 3 所示，然仍需參考諸多因素來考量，例如建置成本、複雜性、當地風流條件等等來做出因地制宜的選擇，故本文將針對長度與形狀配置需考慮的不同因素來做介紹與探討。

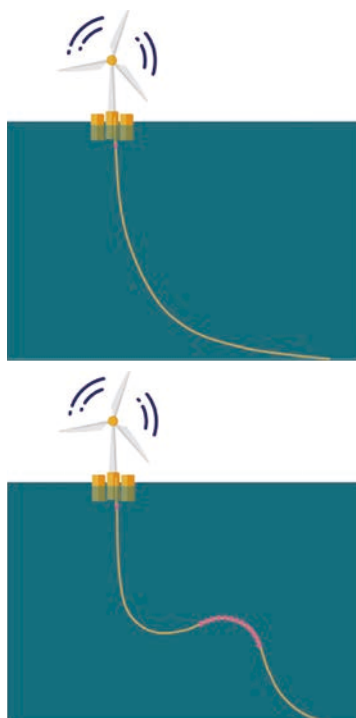


圖 3 Catenary (上) 及 Lazy wave (下) 示意圖
(圖片來源: COREWIND^[3])

離岸風場之海纜材質參數

電壓

為了減少在電力傳輸過程中所產生的能量損失，故通常會採取高電壓低電流的方式來進行電力輸送。因此在離岸風場中的建置亦是如此，一般來說，風機運轉所產生之電力會在塔架內先進行初步升壓，早期多為 33 kV，然隨著科技進步，為了尋求更有效率的傳輸電力方式，近期亦開始將風機之升壓裝置提升至 66 kV 再匯入陣列電纜系統。

以台灣電力公司離岸風力發電第二期計畫為例^[4]，即是採用輸出電壓為 66 kV 之 Vestas 9.5 MW 離岸風力發電機組，透過陣列電纜傳輸至海上變電站並升壓至 161 kV，再藉由輸出電纜將電力傳送至陸上設施。

電纜參數及材質

電纜外面由絕緣層保護，並可依照導線數量分為單芯電纜以及三芯電纜，若輸送電壓在 132 V 以下，多採用三芯電纜；反之若輸送電壓高於 132 kV，則較適用單芯電纜。同樣以台電二期為例，該場址分別採用 66 kV/131 kV 之三芯電纜分別作為風機間陣列電纜與輸出海纜，海纜構造如圖 4 所示，電纜參數如表 1 所列。



圖 4 三芯海纜構造圖
(圖片來源:台灣電力公司^[4])

表 1 電纜規格資料表

項目	規範值	單位
額定電壓	66	kV
心數	3/C	-
導體截面積	630	mm ²
銅導體直徑	29.8	mm
絕緣體厚度	9.0	mm
絕緣體直徑	50.6	mm
鉛絕緣層厚度	2.0	mm
完成外徑	157.0	mm
電容量	0.32	uf/km
充電電流(每相)	3.7	A/km
電感量	0.33	mH/km
電纜重量	52.0	kg/m

(資料來源:台灣電力公司^[4])

靜態電纜與動態電纜

由於近岸風場會漸趨飽和，未來勢必會往更深水區域發展，隨著水深漸增，若同樣採用固定式風場的電纜佈放方式來進行埋設、鋪設，除了成本增加、施工較為不易，日後若需要進行修繕也是極大的困難。故 Lerch *et al.* [5] 中，針對觸地段使用靜態電纜與動態電纜（如圖 5）來進行各方面的比較，而兩者的差異在於有無使用 Joint 來對電纜進行固定、以及埋設作業的差異。

圖 6 數據為每公尺的靜態與動態電纜的成本與能量損失比較圖，藍色代表於觸地段採用靜態電纜、而紅色則代表採用動態電纜。根據分析顯示，因為靜態電纜需在觸地段兩端加裝 Joint 來做固定並且進行埋設的工項，所以在採購及安裝項目的費用都高於動態電纜。然在其他方面的成本與能量損失兩者則相同，此研究結果顯示動態電纜在成本上會比靜態電纜更有發展潛能，故本文接下來將針對動態電纜來進行更多介紹。

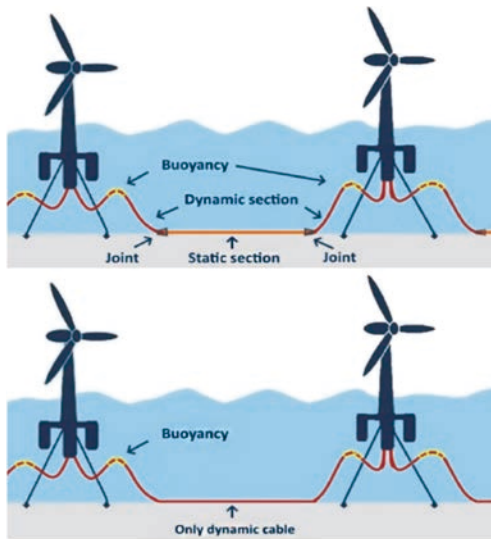


圖 5 靜態電纜（上）與動態電纜（下）示意圖
（圖片來源：Lerch *et al.* [5]）

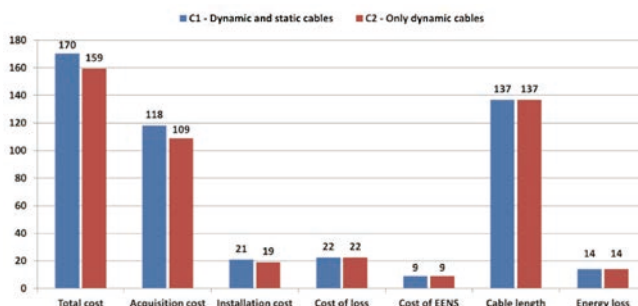


圖 6 靜態與動態電纜成本及損耗比較圖
（圖片來源：Lerch *et al.* [5]）

電纜長度設計

尾流效應（Wake Effect）

在離岸風場中尾流效應係指當風經過位於上游處的風機後，造成風速下降並在葉片後方形成紊流區，致使下游區的風機發電效率降低的現象，如下圖 7 所示 [6]，因此風機機組佈放的間距需考慮此效應來做設計，以免下游處風機發電效率不彰，大幅影響風場的運作及效益。



圖 7 尾流效應示意圖
（圖片來源：Vattenfall [6]）

機組間距與葉片直徑

風機機組間的距離與風機的大小息息相關，通常會參考的指標是風機的葉片直徑（Rotor Diameter, DR），為葉片運轉的圓直徑，即是葉片長度的兩倍，如圖 8 所示。此數值會隨著風機的機組容量提高而變大，以 6 MW 的風機為例其 DR 約為 150 m，15 M 風機則約 240 m。

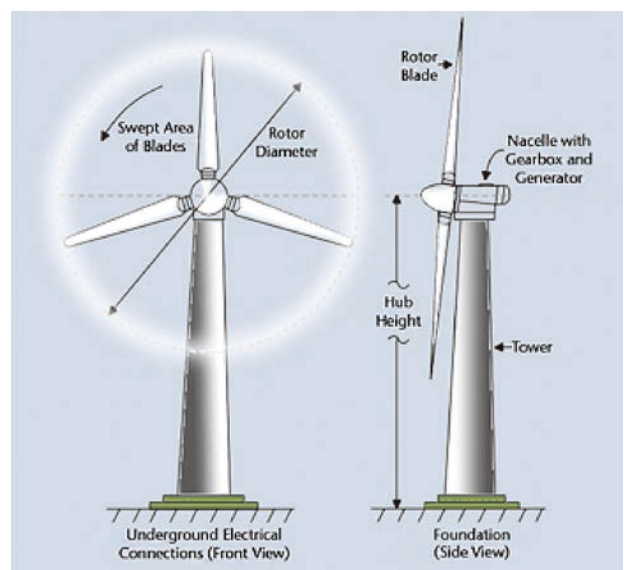


圖 8 葉片直徑示意圖
（圖片來源：Courtesy of ESN [7]）

根據 Ahmad^[8] 指出，在盛行風向下，風機間距建議為 DR 的 7 倍，而非盛行風向至少為 DR 的 4 倍方能使尾流效應所造成的能量損失降至 20% 以下，由此可知 DR 為設計離岸風場時很重要的參考數據，若以 15 MW 的風機為例，機組間距則會高達 1,500 公尺以上。

電纜長度

機組間距決定了之後，設計適當的電纜長度仍是重要的關鍵，若長度過長或過短容易造成過大的張力、能量損耗增加或成本方面的問題。因此根據 Corewind 指出，電纜的最大長度不應超過機組間距的 1.1 倍，故進行電纜設計時可以此作為一個參考依據。

動態電纜設計與形狀配置

增設浮球段

由於電纜若以自身重量垂放至海床，容易在連接風機平台處（Fairlead）以及觸地點（Touchdown point）形成較大張力以及曲率，在長期受外力條件作用下，容易累積疲勞，提高電纜的損壞機率。

因此若在電纜上增設浮球段，可以藉由浮球於水中所產生之浮力，改善 Fairlead 及 Touchdown point 的張力曲率，延長電纜之使用年限。

動態電纜設計檢核與規範

由於目前尚未有針對動態電纜之設計規範，故目前設計電纜時，通常會對電纜之最小破斷力（Minimum Breaking Load, MBL）以及其最大允許曲率（Maximum Allowable Curvature, MAC）來進行檢視，而此兩數值會因電纜的材質、外徑而有所不同，若電纜的在外力作用下的張力與曲率超過自身之 MBL 及 MAC，則電纜遭到損害的機率將大幅提高，故進行動態電纜設計

及數值模擬時常針對此兩項參數來進行檢視。

動態電纜常見型式

現今國際上較常見之動態電纜型式約有以下將介紹的幾種型式，其中又以 Catenary 與 Lazy wave 更為常見，電纜配置會依據當地的風浪條件、安裝複雜度、成本考量等因素來決定適合的方案。

Free Hanging (Catenary) 懸垂式

懸垂式（如圖 9）是常見的電纜型式之一，無須額外增設浮球段，即以自身電纜重量垂放置海床上，因此，最大的優點即為施工上較為簡單，成本也較低。但隨著水深若變深，長度變長重量也隨之加重，容易在連接浮台處（Fairlead）以及觸地點（Touchdown point）產生較大張力值，且也容易隨著浮台運動產生曲率過大的情形，因此容易累積疲勞，減少使用年限。

Lazy wave

Lazy wave 亦是目前被廣泛運用的電纜型式，如圖 10 所示，相較於 Catenary 型式，Lazy wave 在電纜的中間增設浮球段來提供浮力，以防電纜因本身自重而造成過大的張力及曲率，也因此更適合運用於深水區域。但由於整體電纜呈現彎曲形狀，因此於不連續材質連接處容易出現較高曲率值，故會藉由防彎器、限彎器等相關配件來維持電纜之形狀；且佔用之海域空間範圍也較 Catenary 型式來的大，故採用 Lazy wave 型式時須更加注意是否會影響船隻行經範圍，占用生物棲地等議題。

Steep wave

Steep wave 與 Lazy wave 有著相似的設計概念，都是藉由增設浮球段來增加浮力，減輕因電纜自重而產生的張力，兩者之差異在於觸地點之角度（如圖 11 所示），Steep wave 較趨於垂直、而 Lazy wave 較趨於平緩。因此

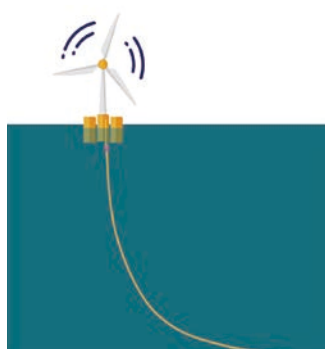


圖 9 Free Hanging (Catenary) 示意圖
(圖片來源: COREWIND^[3])

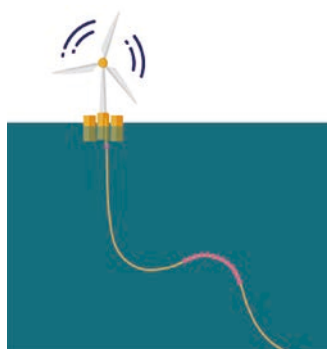


圖 10 Lazy wave 示意圖
(圖片來源: COREWIND^[3])

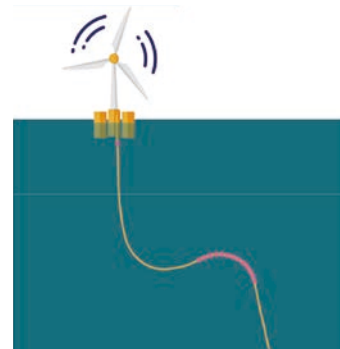


圖 11 Steep wave 示意圖
(圖片來源: COREWIND^[3])

Steep wave 可以減少電纜占用的海域空間，但需額外增設限彎器等配件來維持此形狀，施工成本及工項較多。

其他型式

其他型式像是 Lazy S 或是 Tethered wave (如圖 12)，都屬於針對電纜特定部分做增強設施的配置，像是在觸地段或電纜中間段增加支撐固定，可以防止觸地段過度淘刷、避免電纜懸垂段過重、抵抗側向流能力較強等。

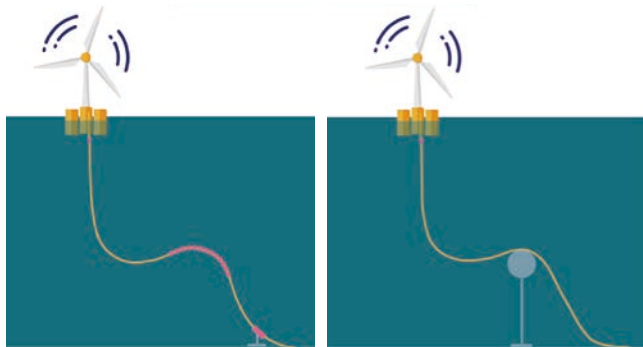


圖 12 Lazy S (左) Tethered wave (右) 示意圖
(圖片來源: COREWIND [3])

新型動態電纜配置

然近年來亦有其他新型提出的動態電纜概念，Srinil, N. [1] 於 2016 提出如圖 13 所示之 W 型配置。此種配置藉由增設一段或多段浮球使整條動態電纜浮於水體中，其優點在於無須於海底床進行鋪設、埋設等施工作業，因此可以減少施工噪音，同時亦保護海底床之生物棲地，正因其無須於海底床進行電纜安裝作業，故也不受水深之限制，因此若運用於深水區時，亦不會因電纜延伸至海底床而增加過多安裝成本。

然而仍需注意因為此種配置整段浮於水體中，會占用較多海域空間，因此可能需要視當地海域使用需求來訂定電纜與海面及海底床之最小距離，方能避免生物纏繞，妨害船隻行進等問題。

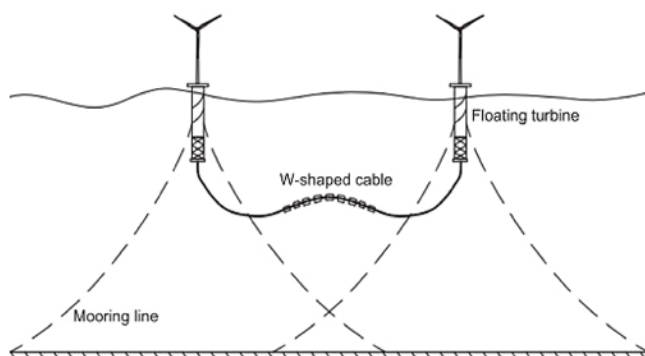


圖 13 W shape 動態電纜示意圖
(圖片來源: Srinil, N. [2])

然 Ruan *et al.* [9] 提及與 Lazy wave 型式相似的 Multiple Lazy wave 型式，即增加第二段浮球段 (如圖 14 所示)。由於隨著使用年限增加，電纜的彎曲剛度減小時會再觸地段累積更多疲勞，然根據其分析指出此種型式比起 Lazy wave 可更有效減少觸地段的疲勞累積，因此長久下來的電纜抗疲勞表現可能會優於 Lazy wave 型式。

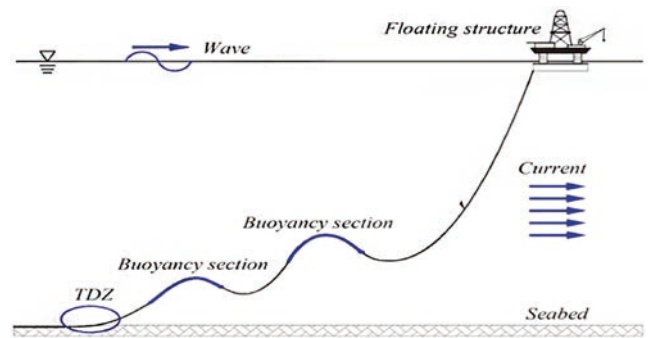


圖 14 Multiple Lazy wave 示意圖
(圖片來源: Ruan [9])

數值模擬案例分析

綜上所述，本研究將使用 Ansys AQWA 以及 Orcina Orcaflex 兩套數值軟體來進行數值分析，模擬中平台為多項外力耦合計算，包含環境外力、平台水動力、繫纜繩拉力對平台的作用力、動態電纜的受力與彎曲情形等。因此平台之水動力參數需於 ANSYS AQWA 中先完成頻率域上求解，再把數據導入 Orcina OrcaFlex 中進行時域上求解。

水動力理論與計算

ANSYS AQWA 透過有限元素或邊界元素法進行勢能流水動力數值求解。計算流程為輸入浮台模型參數，設定環境參數如水深、波高、週期、浪向後並進行計算平台水動力參數，而浮台的運動方程式可表示為：

$$M(p, a) + C(p, v) + K(p) = F(p, v, t)$$

式中： $M(p, a)$ 為浮台之慣性力， $C(p, v)$ 為浮台之阻尼力， $K(p)$ 為浮台的剛度力， $F(p, v, t)$ 為浮動式結構物所受之外力， p 、 v 、 a 則分別為位置、速度向量、加速度向量， t 為模擬時間。

時域計算與分析

時間域上的數值模擬將使用 Orcina OrcaFlex 來進行分析，該模式以非線性有限元素法模擬繫纜運動，可計算每構件彎曲、位置與張力，目前已被廣泛運用

於船體穩定性評估與錨碇系統設計（如船舶、浮動風機、波浪發電系統、鑽油平台等）。

若以重心位置代表整個平台，其運動方程式可表示為：

$$m\ddot{X} = F_{wext}(t) + F_{hyd}(t) + F_{me}(t) + F_{damp}(t) + F_{cable}(t)$$

其中 m 為浮體質量矩陣； $\ddot{X}$ 為浮體位移與轉動加速度向量； F_{wext} 為波浪作用力與扭矩向量； F_{hyd} 為浮體重力/浮力與扭矩向量； F_{me} 為莫里森力與扭矩向量； F_{damp} 為非黏性阻尼力與扭矩向量； F_{cable} 為繫纜繩的作用力與扭矩向量。

案例配置及計算結果

本次研究選用 Catenary、Lazy wave、Multiple Lazy wave 三種型式來做比較，分析三種配置的張力及曲率結果，配置圖如圖 15。

此次模擬採用新竹外海浮標資料，並以 50 年回歸期之風波流極端條件、水深 100 米來進行分析，浮台則選用緬因大學（UMaine University）所設計開發之半潛式平台搭載 15-MW 風機^[10]，由於電纜的最大張力值通常發生在與平台的連接處，因此本次研究將針對連結兩個平台的 End A 及 End B（位置如圖 16 所示）來探討三種配置對於張力的差異，分析結果如下。

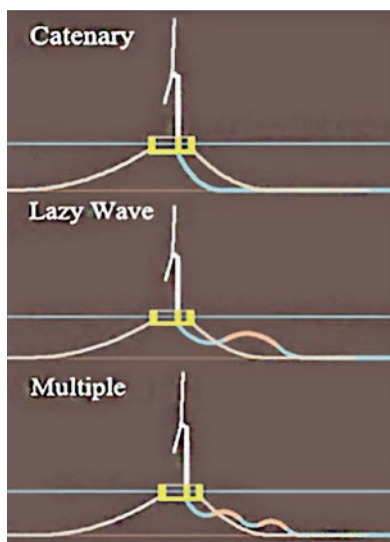


圖 15 三種方案配置圖



圖 16 浮式機組間動態電纜配置圖

從圖 17 及圖 18 中可以看到在同樣的外力條件下，在兩個連接平台的接點處，Catenary 的張力表現都極度震盪，且多次超過電纜的最小破斷力（MBL），因此可推斷較不適用於較深水之海域，或者需要其他設備配件來減輕因電纜自重而引起的張力。

而 Lazy wave 及 Multiple 型式相較之下的張力表現則穩定的多，兩者皆未超過電纜之最小破斷力，且 Multiple 型式的張力表現最佳，因此可推論將浮球段分段來安裝可能會更有效率的減緩連接平台處的張力。

然在曲率部分，本研究將檢視電纜上升段在整個模擬期間的最大曲率是否超過電纜的最大允許曲率（MAC）。下列對照圖中，黑色線條為電纜在模擬期間的平均位置側視圖，藍色線條則為其對應位置所發生的最大曲率。

如圖 19 至圖 21 所示，三種配置皆遠小於電纜之最大允許曲率 0.5 rad/m，而 Lazy wave 在曲率的表現上略優於其他兩者，另可發現在不連續材料面前後、觸地點是較容易產生較大曲率的位置，故如何減少觸地點的疲勞累積，是在日後設計及佈放海底電纜時需多加注意的地方。

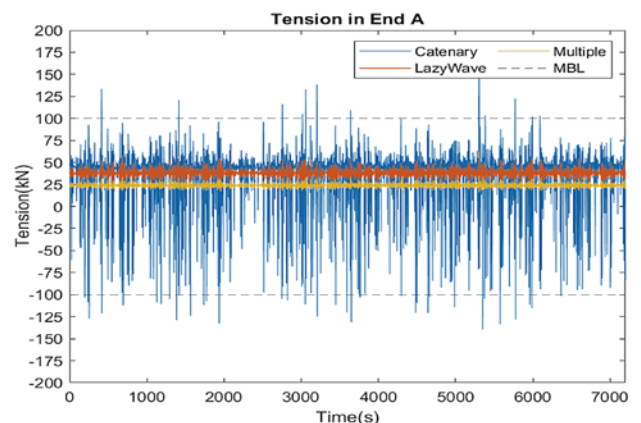


圖 17 End A 張力時序列比較圖

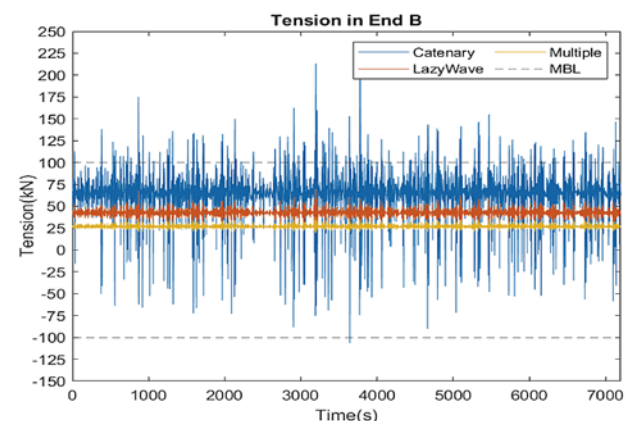


圖 18 End B 張力時序列比較圖

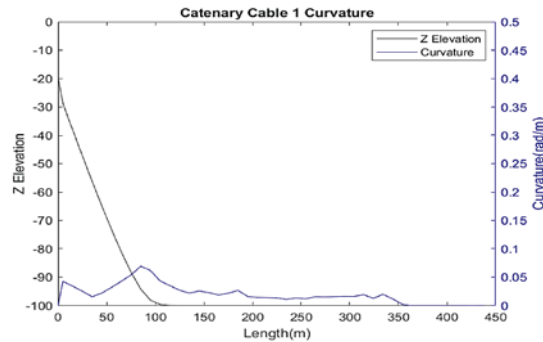


圖 19 Catenary 最大曲率對照圖

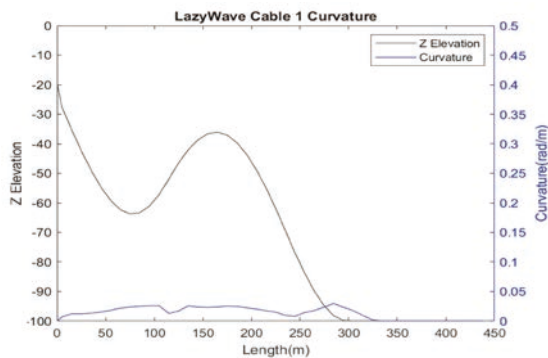


圖 20 Lazy wave 最大曲率對照圖

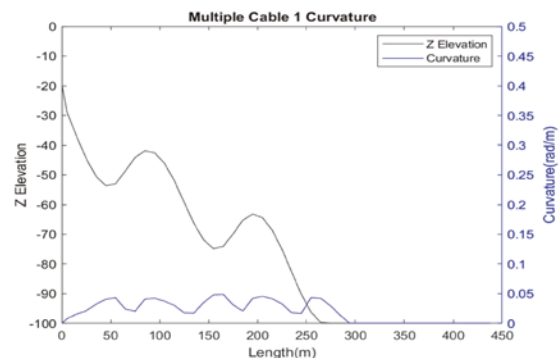


圖 21 Catenary 最大曲率對照圖

結論與未來展望

隨著國際上對於能源議題愈加重視，台灣也致力於運用本身的地理條件優勢來發展離岸風能產業，從陸上風機到海上風機；從固定式風場到如今浮動式也已嶄露頭角。如何更加安全、有效率地來發展台灣的風能產業、建立本土化的技術與經驗是當前所面臨的課題。

故本研究以海底動態電纜為主要研究對象，介紹其材質、配置以及實際佈設於風場時會面臨的情形，並以三種配置分別為 Catenary、Lazy wave、Multiple Lazy wave 來進行模擬並比較在極端條件下三者在張力及曲率上的差異，由分析結果可得出以下結論：

1. 電纜的最大張力通常發生在與平台連接處，而三種配置的張力表現以 Multiple Lazy wave 最佳，Lazy wave 表現次之，而 Catenary 則容易超過電纜的最小破斷力。
2. 電纜的最大曲率通常發生於不連續面、觸地點，而曲率表現以 Lazy wave 略優於其他兩者，但三種配置的表現接近，皆遠小於電纜的最大允許曲率。
3. 在安裝總長度相同的浮球段下，分段安裝（Multiple）的表現可能比單一浮球段（Lazy wave）來的好。

因此在未來的研究，可以針對台灣的海域特性，來挑選適合台灣的動態電纜配置，並加入常態海況、

東北季風海況等條件來進行模擬，使模擬情況更貼近實際海況，作為國內建置離岸風場的參考依據。

參考資料

1. 陳美蘭、胡哲魁（2014），台灣地區風能評估與離岸風電開發潛能分析，No.103, 38-49.
2. Srinil, N. (2016). Offshore Wind Farms Technologies, Design and Operation. Cabling to Connect Offshore Wind Turbines to Onshore Facilities, 419-440. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081007792000131>
3. Corewind. (2020). Review of the State of the Art of Dynamic Cable System Design.
4. 台灣電力公司（2018），離岸風力發電第二期計畫可行性研究。
5. Lerch, M., de-prada-gil, mikel, and Molins, C. molins a. (2021). A Metaheuristic Optimization Model for the Inter-Array Layout Planning of Floating Offshore Wind Farms. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 131, 107-128.
6. (N.d.) VATTENFALL. <https://group.vattenfall.com/>
7. (2016). DavidDarling. https://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/AE_swept_area.html
8. Ahmad, I. B. (2022). Optimisation of Suspended Inter-Array Power Cable Configurations for Floating Offshore Wind Turbines.
9. Ruan, W., Shi, J., Sun, B., and Qi, K. (2020). Study on Fatigue Damage Optimization Mechanism of Deepwater Lazy Wave Risers Based on Multiple Waveform Serial Arrangement. Ocean Engineering, 228 (108926).
10. Allen, C., Viselli, A., Dagher, H., Goupee, A., Gaertner, E., Abbas, N., Hall, M., and Barter, G. (2020). Definition of the UMaine VoltturnUS S Reference Platform Developed for the IEA Wind 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine. Technical Report. 