

出國報告（出國類別：實習）

## 學習離岸風場管理

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：徐文科（策略發展組長）

周孟儀（運轉分析專員）

派赴國家/地區：德國

出國期間：107年12月8日至12月21日

報告日期：108年2月18日

## 出國報告審核表

出國報告名稱：學習離岸風場管理

出國人姓名 (2人以上，以1人為代表)	職稱	服務單位
周孟儀	運轉分析專員	再生能源處
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input checked="" type="checkbox"/> 實習 <input type="checkbox"/> 開會 <input type="checkbox"/> 其他_____ (請依出國任務填列，例如業務接洽、海外承攬、駐外等)	

出國期間：107年12月8日至107年12月21日 報告繳交日期：108年2月18日

出國人員 自我檢核	計畫主辦 機關審核	審核項目
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.依限繳交出國報告
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3.無抄襲相關資料
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.內容充實完備
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5.建議具參考價值
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6.送本機關參考或研辦
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7.送上級機關參考
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8.退回補正，原因：
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 不符原核定出國計畫
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(4) 抄襲相關資料之全部或部分內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(5) 引用相關資料未註明資料來源
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(6) 電子檔案未依格式辦理
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9.本報告除上傳至公務出國報告資訊網外，將採行之公開發表：
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 辦理本機關出國報告座談會(說明會)，與同仁進行知識分享
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 於本機關業務會報提出報告
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 其他_____
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10.其他處理意見及方式：

報告人：  
(2人以上，  
得以1人代表)



單位  
主管



主管處  
主管



總經理  
副總經理



說明：

- 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「公務出國報告資訊網」為原則。

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：學習離岸風場管理

頁數 23 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/陳德隆/(02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

徐文科/台灣電力公司/再生能源處/策略發展組長/(02)23668666

周孟儀/台灣電力公司/再生能源處/運轉分析專員/(04)26580151

出國類別：1 考察2 進修3 研究 4 實習5 其他(國際會議)

出國期間：107年12月8日至12月21日

出國地區：德國

報告日期：108年2月18日

分類號/目

關鍵詞：離岸風力、運維中心

內容摘要：

為配合國家再生能源發電佔比提高及發展離岸風力發電之政策，台電公司目前已積極進行離岸一期與二期計畫。其中一期計畫之裝置容量為110 MW，預計於109年商轉；離岸二期之裝置容量約300 MW，預計於114年商轉，因此未來必須面對離岸風場之相關管理與運轉維護作業等問題。由於風場之管理與運維策略好壞攸關其付出之成本及發電收益，故藉著本次出國計畫，期待能參考並汲取國際知名公司之離岸風場管理經驗，適度提升公司在離岸風力發電面向上與運轉維護及管理有關之知識與能力，並能落實在未來離岸風場建置完成後具備績效顯著的營運能力，長遠期望能進一步厚植國家發展再生能源之實力。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

## 摘要

為配合國家再生能源發電佔比提高及發展離岸風力發電之政策，台電公司目前已積極進行離岸一期與二期計畫。其中一期計畫之裝置容量為 110 MW，預計於 109 年商轉；離岸二期之裝置容量約 300 MW，預計於 114 年商轉，因此未來必須面對離岸風場之相關管理與運轉維護作業等問題。由於風場之管理與運維策略好壞攸關其付出之成本及發電收益，故藉著本次出國計畫，期待能參考並汲取國際知名公司之離岸風場管理經驗，適度提升公司在離岸風力發電面向上與運轉維護及管理有關之知識與能力，並能落實在未來離岸風場建置完成後具備績效顯著的營運能力，長遠期望能進一步厚植國家發展再生能源之實力。

本次派赴出國主要前往德國 EnBW 公司之離岸風力建置中心、風場運維中心及能源轉型辦公室，了解有關風力發電建置期間與商轉後運維方面之實務經驗，以及面對能源轉型目標時所採取的因應策略。

# 目次

壹、 目的.....	1
貳、 過程.....	1
一、 行程概要.....	1
二、 ENBW 公司簡介 .....	2
(一) EnBW Hamburg 離岸風力建置中心 .....	3
(二) EnBW Barhöft 離岸風力運維中心 .....	3
(三) EnBW Berlin 能源轉型辦公室 .....	6
三、 離岸風力運維概念.....	6
四、 離岸風力運維工作範疇.....	10
五、 德國能源轉型時期之再生能源政策.....	19
參、 心得及建議.....	21
一、 心得.....	21
二、 建議.....	22

## 壹、目的

我國近年來為配合國際上減少溫室氣體排放之趨勢，已訂定能源轉型政策，大幅提高再生能源發電佔比，其中又因台灣海峽具有天然優異之風場，故加強推動離岸風力建置，以達到未來對於高污染性化石燃料發電需求降低之目標，然而離岸風力發電工程及運維特性，在各種再生能源發電種類之中最具挑戰性，除投入金額甚巨之外，海上施工以及未來的運轉維護皆是前所未有的技術問題，且無前例可循。因此借鏡國外公司在離岸風力發電的實務經驗，必定是台灣在此方向發展上所必經之路。然而此專門知識無法立即性且全面性地掌握，故利用此次短期實習機會，來獲得國外知名廠家關於離岸風場運維技術的經驗與關鍵概念，以做為未來更深入細部離岸運維架構的基礎，以及融入台灣地域特性之需要，用於本公司未來離岸風力發電運轉維護工作之參採，以提升離岸風電之產出並增加發電效益。

## 貳、過程

### 一、行程概要

本次出國主要拜訪德國巴登-符騰堡能源公司(EnBW, Energie Baden-Württemberg AG)，該公司亦已於台灣設立分公司來發展亞太地區相關能源事業，本次主要參訪該公司位於德國漢堡(Hamburg)的離岸風力建置中心，以及位於漢堡東北方約 220 公里，波羅的海(Baltic Sea)旁一處名為巴爾霍夫(Barhöft)港口的離岸風力運維中心，最後前往位在柏林(Berlin)的能源轉型辦公室(表 1)。

表 1

日期	行程摘述
107/12/08 107/12/09	去程：台北→德國漢堡
107/12/10 107/12/12	於 EnBW Hamburg 離岸建置中心，針對離岸風電工程建設、商業服務以及運轉維護技術進行交流。
107/12/13 107/12/14	於 EnBW Barhöft 離岸運維中心研討風場控制及運維排程技術。

107/12/15	於 EnBW Hamburg 離岸建置中心，針對離岸風場實地及個人安全設施管理進行探討。
107/12/16	
107/12/18	於 EnBW Berlin 能源轉型辦公室進行能源轉型議題及進階技術研討，併拜會駐德國代表處。
107/12/19	
107/12/20	返程：德國柏林→台北
107/12/21	

## 二、EnBW 公司簡介

EnBW 公司為德國和歐洲大陸中較大規模的能源供應企業之一，公司名稱中的 Baden-Württemberg 意指位於德國西南部的巴登-符騰堡邦，其總部座落在卡爾斯魯爾 (Karlsruhe)，全公司約有 2 萬名員工，業務涵蓋電力、天然氣、水和能源等相關產品，為 550 萬客戶提供服務。而電力事業則包括發電、電力交易採購以及輸配售電等業務。其中發電業務部份具備不同類型的發電方式，包括水力、太陽光電、生質能、陸域及離岸風力、傳統火力與核能(圖 1)，其公司形態與規模與本公司相近，唯其相較於本公司在離岸風電之發展更早於本公司之投入，因此具備我們向其學習有關離岸風力之相關課題與經驗，這也是我們選定洽 EnBW 實習的主要原因之一。

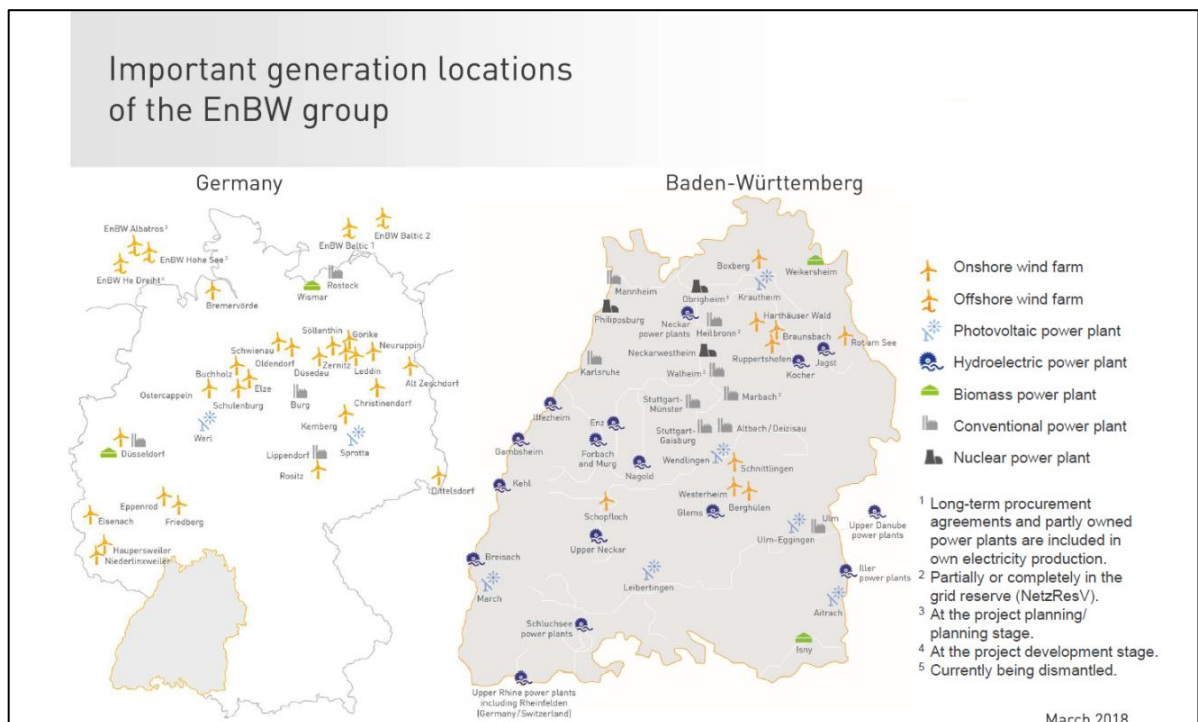


圖 1 EnBW 公司的各類型發電廠



### (一)EnBW Hamburg 離岸風力建置中心

本次實習乃專注於離岸風力之運轉維護項目，因此前往 EnBW 公司之離岸風力相關部門為主要行程。其中，離岸風力建置中心辦公室位於漢堡，一棟名為 Chilehaus 的歷史建築物內(圖 2)，約有 65 名專門人員，負責相關離岸風力發電規劃、設計、發包招標作業、施工階段業務、海事船隻監視與協調，一直到風場商轉等工作，人員涵蓋的專業領域有電力、電機、通訊控制、土木、大地、海事工程、機械、材料、焊接、後勤供應、風險管理、海洋生物以及職業安全衛生等。



圖 2 EnBW 公司位於漢堡 Chilehaus 的離岸風力建置中心

目前該公司之離岸風力發電業務，已有兩處風場正在營運中，兩處尚在興建中，以及一處尚處於規劃階段。另外基於亞洲離岸風力發展之前景，選擇在台灣成立安能亞太公司(EnBW Asia Pacific)，以其豐富的離岸風電經驗為基礎，與國內上緯國際投資控股公司及國際澳洲麥格理資本公司，規劃共同開發彰化外海的海鼎風電(Formosa III) (圖 3)。

### (二)EnBW Barhöft 離岸風力運維中心

EnBW 公司現有兩處運轉中之離岸風場，皆位在德國北部的波羅的海，因此名為 EnBW Baltic 1 及 EnBW Baltic 2(圖 4)。基於此二風場的維修需求，該公司在距離漢堡東北方 220 公里處靠近斯特拉爾松(Stralsund)附近，一處名為巴爾霍夫(Barhöft)的小港口，利用一座前東德廢棄軍營營舍，改建成離岸風力運維服務中心，包含控制室與簡易備品倉庫，鄰近波羅的海的港口尚設有專屬碼頭。其中控制室位於 2 樓，設置與風場控制有關之通信與電腦系統，這部份設備即投資了約 200 萬歐元。控制室配置 12 名技術人員，以輪值的方式，執行全年、每日 24 小時無休的風場監控任務，並



隨時與服務供應商、電網調度人員保持聯繫，除此之外，尚監視風場附近海空域之航海航空狀況，以防誤闖風場事件發生(圖 5)。而專屬碼頭除包含一般港口設施外，另配備了 5 公噸左右之起重機，並 24 小時停泊人員運輸船(CTV, Crew Transfer Vessel) (圖 6)，可確保能夠隨時動員維護技師，以海上運輸方式快速前往風場維護。一般來說，運維碼頭的選擇主要考量為前往維護目標的可到達性，除了與風場的距離外尚須考量後勤支援的方便性、碼頭水深、潮汐情形與氣象等等。

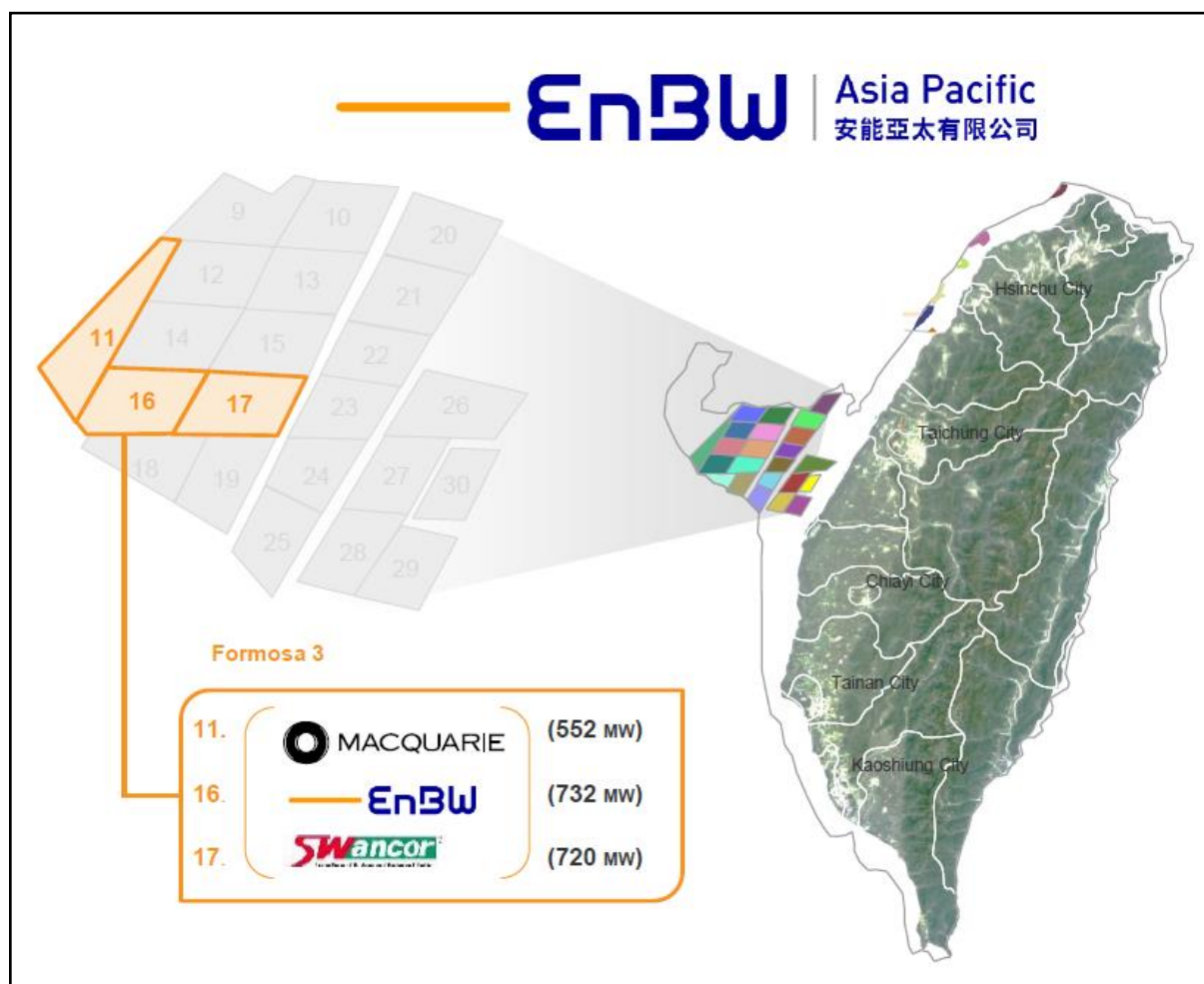


圖 3 EnBW 公司參與台灣離岸風力建設現況

EnBW 公司於此處建立了運維中心，同時也重視與當地居民保持良好關係，除了增加地方稅收之外，也雇用了 50 名在地員工，帶來就業機會與消費。另外亦出資贊助動物保護協會興建觀察生態的高塔，以展現對環境友善的態度。而且為建置此運維中心所投資的光纖、通信與港口設備，居民也可免費使用。



圖 4 EnBW Baltic 1、Baltic 2 風場與 Barhöft 位置圖



圖 5 EnBW 公司位於 Barhöft 的控制室與運維中心



圖 6 人員運輸船靠泊情形及碼頭起重設施

### (三)EnBW Berlin 能源轉型辦公室

由於德國已經訂定國家能源轉型 2.0(德文: Energiewende 2.0)的目標,內容涵蓋電業電網、交通運輸及暖氣供應等跨領域項目,因此 EnBW 公司早在 2005 年即於首都柏林設立代表處(圖 7),主要進行推廣再生能源以及開發智能能源產品等與能源轉型相關之業務。同時為因應能源轉型,EnBW 公司積極推動許多措施,諸如增加再生能源競爭力與市場整合、技術創新及引入新商業模式、數位化及智慧電網之解決方案、滿足個別客戶需求和交易簡便性等,這些措施將直接影響整體收益並對市場經濟結構產生變化,此部份亦為該辦公室之主要研究課題。



圖 7 EnBW 公司柏林辦公室

### 三、離岸風力運維概念

EnBW 公司目前自有營運中、施工中及規劃中的離岸風場共有 5 處(表 2),兩處營運中的風場位於波羅的海(Baltic 1, Baltic 2),其他皆位於北海(英文: North Sea, 德文: Nordsee) (圖 8),其中 Baltic 1 為德國第一處商轉之離岸風場。而相較於我國去年(2018 年)競價結果(約 2.5 元/kWh),因歐洲地區離岸風電發展成熟,EnBW 公司的 He Dreiht 風場則為德國及 EnBW 公司的第一個無補貼(Zero subsidy bid)之離岸風場。

表 2

	總裝置容量	風機機型	風機數量	商轉日
運轉中				
Baltic 1	48.3 MW	Siemens SWT-2.3-93	21	2011 年
Baltic 2	288 MW	Siemens SWT-3.6-120	80	2015 年

施工中				
Hohe See	497 MW	Siemens SWT-7.0-154	71	預計 2019 年底
Albatros	112 MW	Siemens SWT-7.0-154	16	預計 2019 年底
規劃中				
He Dreiht	約 900 MW	未定	約 119	未定

離岸風力從專案規劃開始，經過工程施工階段，到工程完畢後開始商轉並運轉維護，全生命週期通常會超過 30 年，其中運維時程可達 20 至 25 年甚或更長，運維期間將面臨許多運維上可能遭遇的狀況，與設計或工程階段中所面對的問題具有相似與衍生性。因此了解前期階段的流程及組織架構，有益於運轉維護概念的建立。EnBW 公司對於離岸風場計畫的進行，先從設計的準備到認證，再來尋求供應商到位，最終投資決策確立後，即進入製造階段，包含基礎、離岸變電站、風場內電網、變壓器模組、風機機艙等，再來施作基礎、變電站、風場內電網與沖刷防護，最後進行安裝。待全數安裝完畢則進入運轉階段。

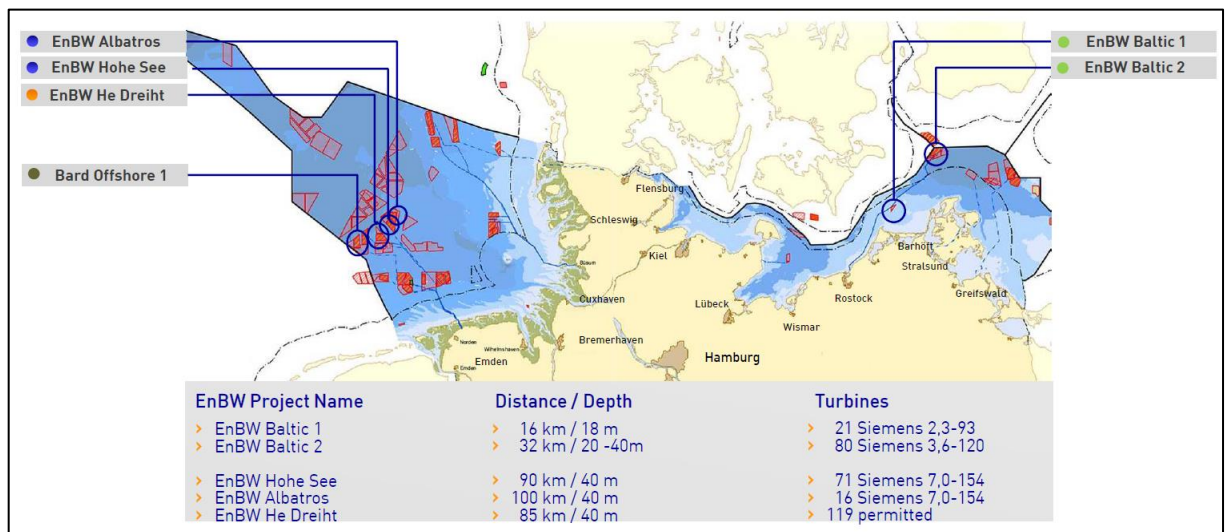


圖 8 EnBW 公司離岸風力發電發展現況

由於整個離岸風場計畫相當龐大且複雜，EnBW 公司以各項風場專業進行分工，組成各個專業團隊，並聯合所有團隊合作推動計畫進行，各團隊在該公司組織架構中以 T 開頭之代碼做識別(表 3)。



表 3

團隊名稱	主要任務	人員專門領域
風機與風場內電網電纜 T-BTOA	風機與風場內電纜相關之招標文件製作、合約協調，設計製造與安裝商轉階段之管理，風機與施工技術發展之研究。	電力，電機，控制
電氣工程與通訊系統 T-BTOE	離岸變電站與風機中高壓輸電設備、低壓及附屬設備、控制系統、SCADA、通訊系統、電網法規遵循(Grid compliance)及系統研究，從招標設計到製造安裝商轉等全工程面向參與。	電力、儀電、控制、通訊
土木工程與大地工程技術 T-BTOI	現場底土與海洋氣象數據評估、基本設計，未爆物(UXO)探勘，與基礎及變電站之鋼結構施工有關的資本支出(CAPEX)評估、招標文件準備及邀標、合約協調、設計製造與安裝商轉之控制與管理。	土木、大地工程、海事工程

品質稽核、職業安全衛生、環境與施工管理 T-BTOQ	從合約準備到設計、製造、安裝、商轉有關的施工、安全、衛生、環境的管理與品質，安全與品質之稽核與檢視，安全保護的概念與準備，施工現場協調。	土木、材料、焊接、機械、工業工程、安全工程、船長
後勤物流、許可與認證 T-BTOZ	海事及後勤協調之運轉中心及其招標文件準備，海事擔保調查(MWS, Marine warranty survey)之配合，直升機飛行及降落點問題，設計基本的更新認證，離案風場環境衝擊評估及核准程序。	船長、後勤物流、跨領域工程科學、地球科學、海洋生物學

從離岸風力設計與工程階段的組織架構與分工細項，延伸到商轉後的運轉維護面向，EnBW 公司對於離岸風力的運轉維護策略，以六個方向來考量(表 4)。

表 4

<b>獲益能力</b>	可用率最佳化，成本最小化。
<b>資產品質</b>	保證生命週期期間平順運轉至少 25 年。
<b>價值鍊</b>	從專案發展、施工及運轉維護中獲取效益。
<b>避免長期依賴供應商</b>	轉移營運中風場被供應商壟斷之風險。
<b>安全衛生與環境</b>	根據同類標準保障最佳的安全與衛生措施，並確保最大限度地減少對環境的衝擊與危害。
<b>投資風險掌握</b>	在不同的市場環境下發展均衡且低風險之投資組合。

#### 四、離岸風力運維工作範疇

EnBW 公司在離岸風場完工後，前五年由原風機製造商負責運維(此部分與本公司離岸風電當下計畫規畫一致)，並派遣技師團隊同時間參予前五年的運維工作，藉以獲取相關知識，至第六年起則接手自行運轉維護，原製造商變更為協力支援廠家，以做為備品的供給來源。目前 EnBW 公司擁有超過 140 位專家級人力投入離岸風力之運維，從早期設計到施工，皆積極參與，以確保實際商轉後可符合運轉維護方面的需求，其關於維護的整體目標為：以最適當的成本在風場生命週期期間內維持資產的完整性。其中藉由幾種不同類型的維護來達到此目標(表 5)。

表 5

<b>條件基礎維護</b> Condition based maintenance	使用狀態監測系統(CMS)對風機及離岸變電站進行偵測，以判斷是否有維修需求。
<b>時間基礎維護</b> Time based maintenance	由原廠家訂定的定期維護。
<b>反應性維護</b> Reactive maintenance	無法預知的損壞或故障所必須進行的維護。
<b>外部維護</b> External maintenance	由電網營運商進行的維護。

而對風場內各風機以及變電站運轉狀況的掌握，若僅由原本的 SCADA 系統，僅能取得每 10 鐘的運轉紀錄資料，以及事件發生時之故障代碼與當下時刻，較無法由這些資料來更深入分析故障狀況。而風機內部的控制器則可以達到每秒 1 筆到 50 筆的記錄頻率，但因風機內部現場並無可供儲存大量資料的資料庫軟硬體，只能存放短期資料以供風機控制使用。所以 EnBW 公司另外採用狀態監測系統(CMS, Condition monitoring system)。將 CMS 安裝於現場設備上，包括大量感測器及傳輸設備，另配有後台的數據記錄與分析系統。通過對所擷取的數據進行分析，了解所監測部件的健康狀況，並以此做為是否進行下一步維護的決策基礎，其中要考慮的方向除了人力、工具、備品、運輸載具、海洋氣象、造成多少停機時間、以及花多久時間可以完成等，甚至可以與



SCADA 及資產管理系統整合，讓維修人員在各部件失效前即發現問題，並考慮安排在低風速期進行檢查或維修，除了減少維修成本以及降低機組不發電的損失之外，尚可回饋系統問題點予設計團隊。一般情況下，CMS 的數據取樣頻率可達每秒 50,000 次，同時監測 1,000 處以上之監測點，包含風機驅動鏈(drive chain，包含轉子、主軸變速箱、發電機)與塔架結構等，常見監測或量測的物理量有溫度、溼度、壓力、音頻、影像、油品乾淨度、應變、加速度、位移、轉速與電力電氣等資料。若是針對塔架量測，則可使用較低之每秒 5 次的頻率來記錄應變、沖刷與腐蝕狀況。

然而 CMS 的安裝成本不低，且並非所有故障類型皆可由這套系統鑑別出來，比如疲勞(fatigue)現象屬於一種緩慢變化，不容易由 CMS 判斷，另外關於各部件故障的根本原因，也無法完全藉由 CMS 找出，因此對於這類問題的分析仍有其限制性。市面上已有數家公司提供 CMS 的全套系統服務(圖 9)，但各家系統的量測點位不完全相同，因此 EnBW 公司採用自行開發的方式，將風機運轉資料導入其自有的 CMS 並監控(圖 10)。

Condition monitoring: What is measured		Temperature	Humidity	Pressure	Acoustic emission	Cleanliness (oil)	Electrical	Strain	Accelerometer	Displacement	Tachometer	Video	Rotor	Drivetrain	Tower
<b>Company</b>	<b>System</b>														
Areva/01db-Mettravib	OneProD	✓			✓			✓	✓				✓		
Bently Nevada (GE)	WT-CMS Adapt.wind							✓	✓				✓		
Beran Instruments	PlantProtech				✓			✓	✓				✓	✓	
Brüel & Kjær Vibro	WTAS - Type 3651	✓		✓	✓			✓	✓				✓	✓	✓
Eickhoff	E-GOMS				✓			✓	✓				✓		
Emerson Process Management	epro MMS	✓						✓	✓				✓		
FAG	FAG WiPro	✓			✓			✓	✓				✓	✓	✓
Gamesa	SMP-8C							✓	✓				✓		
Global Maintenance Technologies	E-Sentry System	✓	✓	✓				✓					✓		
Gram & Juhl	TCM®							✓	✓	✓			✓	✓	✓
Holroyd Instruments	AE Systems				✓				✓				✓		
IGUS ITS	BLADEcontrol®							✓					✓		
Insensys	RMS							✓	✓				✓		
Prüftechnik Condition Monitoring	VibroWeb XP	✓			✓			✓	✓				✓		
Rovsing Dynamics	Winergy CDS				✓			✓	✓				✓		
Siemens Wind Power AS	FLENDER CM						✓		✓				✓	✓	✓
SKF	WindCon				✓	✓							✓	✓	✓
Vatron	DriveMon Wind	✓				✓							✓		
WindSL	WT-HUMS	✓			✓	✓		✓	✓				✓	✓	✓
μ-SEN	Ω-Guard®				✓				✓				✓		

圖 9 不同公司的風機 CMS 產品

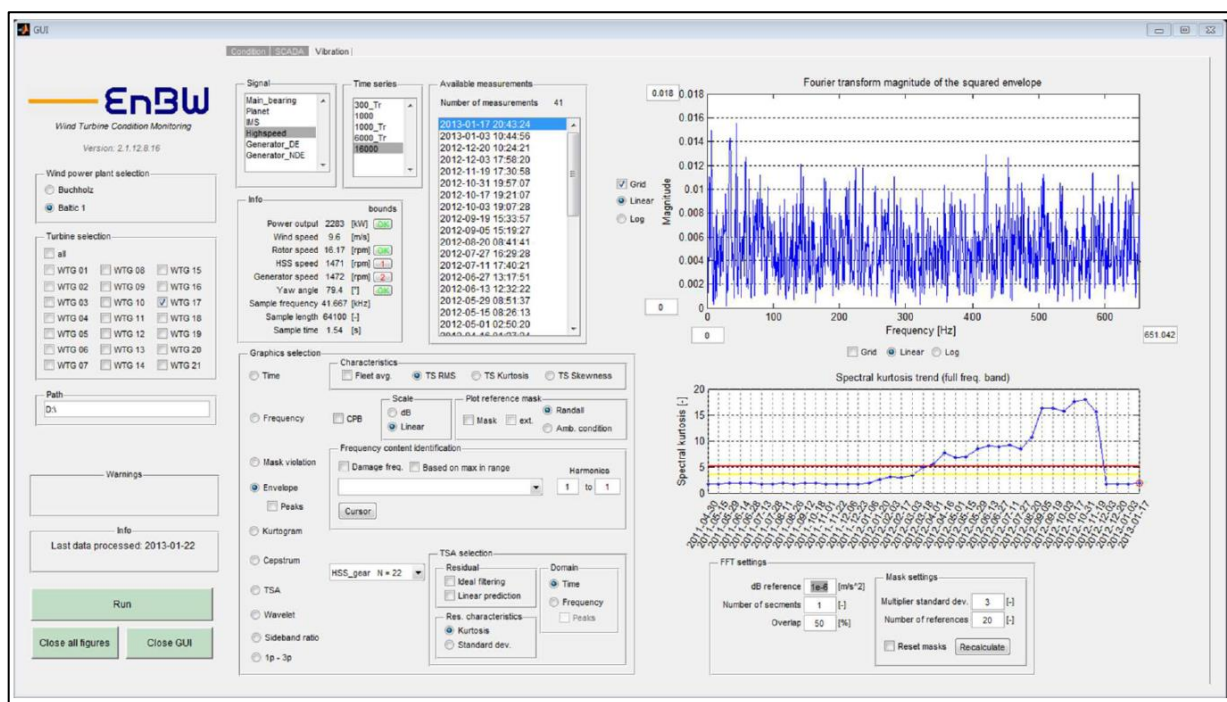


圖 10 EnBW 公司自行開發之離岸風場 CMS

所以風機的維修作業，由原本計畫中的定期維護，以及遇到因故障而停機所須進行的維修，在加入 CMS 後，可以某程度預知零件的壽命，並及時提早安排更換或維修作業，來降低非預期故障。但離岸風場受限於物料動員、載具、航程耗時、天候與實際可維修時間，再考量交通所付出的成本，確實須要經過計算評估，才得以將停機時間降到最少。

基於維修服務上的需求，其策略可分為陸上服務及海上服務(表 6)。由不同維護概念的組合，來最佳化團隊抵達風場的時間，並以 CTV、OSV 等船隻對風機故障做出快速反應，或使用 OSV 上的 Walk-to-Work 系統(具備動態補償功能之系統)(圖 11)，讓維修人員可在較嚴苛的海象環境下以更安全容易的方式自船上登上風機塔架，增加到達性，減少服務等待時間，來達成可用率以及產能最佳化的目標。

表 6

<p><b>陸上服務</b></p> <p>Land based service</p>	<p>使用人員運輸船(CTV, Crew Transfer Vessel)或直升機，自專屬碼頭搭載人員前往現場。</p>
	<p>陸上服務站，可提供人員進駐以及材料存放。</p>

<p style="text-align: center;">海上服務</p> <p style="text-align: center;">Sea based service</p>	<p>使用離岸服務船(OSV, Offshore Service Vessel)或直升機，自海上搭載人員前往現場。</p>
	<p>離岸服務船(OSV, Offshore Service Vessel)提供人員進駐以及材料存放。</p>
	<p>將離岸變電站多功能使用，成為運轉操作平台並提供人員進駐。</p>



圖 11 OSV 上的 Walk-to-Work 系統

基於風場裝置容量的大小以及風場距離服務港口的遠近，可選擇較適當的服務策略以降低運維成本。目前 EnBW 公司之 Baltic 1 風場因距離岸邊港口較近且裝置台數不多，故以陸上服務為主，採配置 CTV(Crew Transfer Vessel)模式來運輸人員與維修器材；而 Baltic 2 以及北海風場計畫，則距離維修港口較遠且台數較多，則選擇海上服務較為有利。實際上離岸風場的經營狀況，總運維成本尚要考慮風機數量、離岸遠近、服務策略、浪高與氣象、風機可靠度以及電力價格等因素。以其中的服務策略為例，要選擇何種運輸工具，必須更細部去研究每種載具的可出勤時段、花費價格、搭載人數及載重限制、實際可進行維護時間以及人員如何進入塔架等特性(表 7)。依本公司現有離岸風電計畫以及國家現有運維碼頭規畫(彰化漁港)，因本公司場域鄰近彰化海岸線，因此目前亦規劃採與 EnBW 公司之 Baltic 1 風場相近之陸上服務(Land based service)模式。

表 7

	人員運輸船 CTV (Crew Transfer Vessel)	離岸服務船 OSV (Offshore Service Vessel)	直升機
可到達性 Accessibility	最大浪高 1.5m 使用登船梯進入 僅白天可操作	最大浪高 2.5m 使用動態平衡平台進入 全年無休	無浪高限制 使用機上絞輪吊掛 進入 僅白天可操作
可操作時間 (扣除天候不 佳、夜間時段、 航行時間)	約 2,533 小時/每年	約 7,195 小時/每年	約 4,015 小時/每年
搭載人員數	12	45	6
材料吊送限制	<400kg, 15m 吊臂	<3ton, 20m 吊臂	極少量運輸
價格	約 500 歐元/小時	約 980 歐元/小時	約 2,400 歐元/小時

當然實際上使用的載具可選擇分類更細之船型，再假設付出之價格尚可分為單次租用、長期租約、或自行擁有，其影響成本支出的結構就更為複雜，若將全數選項列入考慮，對於工程科學而言即是屬於數學分析中最佳化研究的應用課題。

一般來說，風機運轉維護的目標在於要求可用率(Availability)最大化以及發電損失最小化。相對於陸域風機，離岸風機的可用率受更多因素影響，一般總括為三大類因素(表 8)。

表 8

可用率	可靠性(Reliability)	技術系統
	可維護性(Maintainability)	
	後勤支援性(Logistic supportability)	後勤支援系統

其中風機的可靠性是指風機可以依照原廠設計的性能曲線，在當時風速條件下產生相對應功率電力的能力，而影響可靠性的因素有零件品質、環境條件、結構與應力、與再次故障的機率等，風機製造商會針對離岸風機所處的環境，特別加強零件品質以提升零件可靠性。衡量可靠性的指標一般以平均故障間隔(MTBF, Mean time between failure, 單位為小時)，或是以平均故障間隔的倒數，稱之為故障率(Failure rate, 單位為每小時之故障次數)來描述。通常故障率並非固定值，這種故障率隨著時間變化的情形常遵循一種稱為浴缸曲線(Bathtub curve) (圖 12)的模式，在初期，因為安裝與製造的瑕疵常造成較高故障率，在這些瑕疵被排除之後，即可維持長時期的低故障率，最後則常因老化或磨損等因素，造成故障率再次上升。

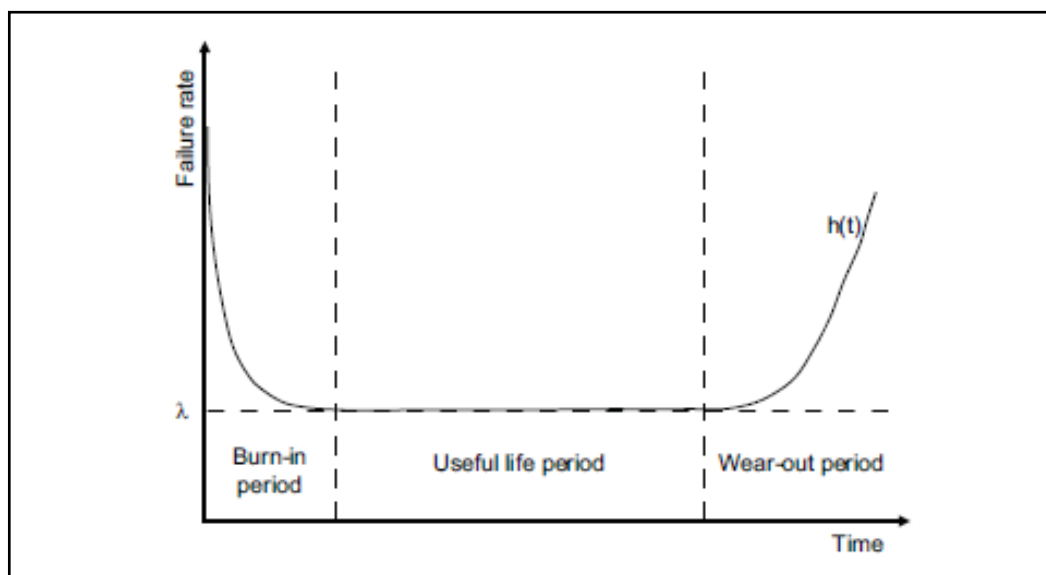


圖 12 浴缸曲線

有關風機的可維護性，常使用平均修復時間(MTTR, Mean time to repair)來衡量，亦即修復故障所要花的時間，與其他可靠度分析所研究的對象不同，風機的平均修復時間在此定義中並未包含後勤準備時間，而影響可維護性的因素包含故障鑑別診斷過程、可到達性(Accessibility)以及實際修復時間。

離岸風場常常因為週期性的海象及氣象因素影響，造成無法到達現場進行維護工作，此問題常使用可到達性來評估，以可到達風機的時間百分比來表示，除了天候因素以外，選擇何種運輸方式和使用何種設備也是影響因素，因此正確的當時天氣資訊以及足夠準確的天氣預報，包括浪高、風速、風向及能見度等，才有辦法選擇適當的

方式載送人員與器具前往現場。實務上常常可見某些風場，每年有長達兩個月的時間無法使用運輸船或直升機靠近，這將大大影響該風場之可到達性。

另外有關後勤支援性，指的是能提供所要求的資源以完成維護工作的支援能力，一般可以用平均等待時間(MWT, Mean waiting time)來衡量，其包含了平均後勤延誤時間(MLDT, Mean logistics delay time)及管理延誤時間(ADT, Administrative delay time)兩項，平均等待時間指的是資源的等待時間，比如物品之待料；管理延誤時間指的是組織好維護資源的所需時間，比如集合物品、人員的耗費時間等。

實際上要維持可靠性、可維護性以及後勤支援性，其背後都有相對應的成本支出，且對風機而言，不同次系統有不同的故障率，但其造成長期停機的時間也不同(表 9)，因此從整體考量風場運轉績效指標，其中一個項目為運維成本，可由下式計算：

$$\text{總運維成本} = \text{運維直接成本} + \text{發電損失成本}$$

以可用率觀點來檢查，當可用率越高則停止發電的損失便減少，亦即發電損失的成本降低；反之，若可用率變低時，則因未發電所致的發電損失成本就變高。另一方面，為保有極高可用率，所投入的直接運維成本必定升高，假設運維直接成本與發電損失成本對可用率之關係不會太複雜(圖 13)，則可發現在某個可用率數值之下，總運維成本會有最小值，這表示對風場管理經營者來說，一味地追求高可用率，反而未必有較佳的成本結構。

表 9

風機次系統	故障頻率 (Failure frequency)	停機時間 (Downtime)
電氣系統 (Electrical system)	0.064 次/年	105 小時
感測器 (Sensors)	0.060 次/年	48 小時
葉片旋角系統 (Blade/Pitch system)	0.053 次/年	90 小時



液壓系統 (Hydraulic systems)	0.051 次/年	40 小時
控制系統 (Control system)	0.049 次/年	182 小時
齒輪箱 (Gearbox)	0.045 次/年	258 小時
迎風轉向系統 (Yaw system)	0.028 次/年	260 小時
發電機 (Generator)	0.021 次/年	206 小時
結構 (Structure)	0.006 次/年	121 小時
機械煞車 (Mechanical brakes)	0.005 次/年	105 小時
主軸及軸承 (Main shaft and bearing)	0.004 次/年	285 小時
輪轂 (Hub)	0.001 次/年	11 小時

此外備品的庫存策略也是須要考慮的因素，基於備品數量的限制，以及採購所耗費的時間，某種程度上也影響整體維護時程的安排，特別是屬於重件裝備如葉片、齒輪箱、發電機、軸承等，另外依據 EnBW 公司實際運維的經驗，預先存有敏感與特殊的零件備品除了可以讓故障發生時縮短修護時間以提高機組可用率外，另外亦可明顯降低離岸風場相關之重要保險支出，因此零件庫存的品項與數量將會攸關離岸風場的運維績效與收益。

整個風場的短時間與長時間成本結構與獲利預期，將受到前述的各種影響因素左右，所以採用電腦軟體進行模擬分析與規劃，較能計算出何種運維策略較佳並且可行。



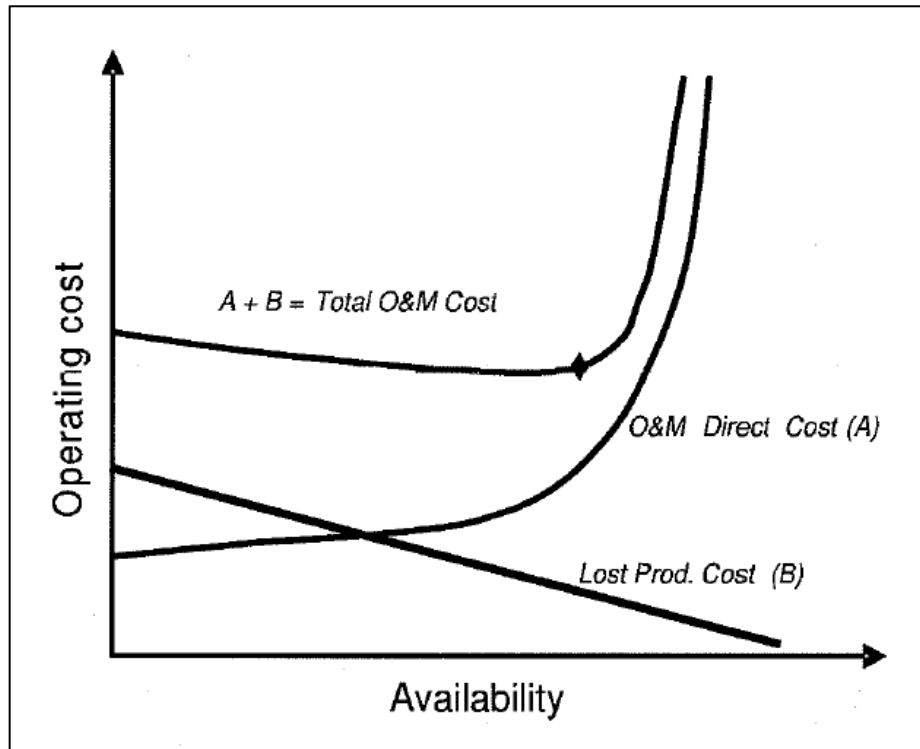


圖 13 成本與可用率之關係

雖然有許多協助運轉維護的軟體規劃工具可供使用，但因風速在短期間內具有隨機性，以及其他不可預期事件等意外狀況發生，這類風險則須要另外討論。在 EnBW 公司之下的 T-PNS/O 部門對於離岸事業方面提供全方面的專案服務，包含專案功能、報告產出及文件管理、資訊安全管理、合法性諮詢及執照取得、時程安排及專案協調、風險管理與保險、品質管理與知識學習系統等，該部門對於風險管理採取三個步驟：風險定義、風險控制與評估以及風險報告，而此三者可組成完整循環，反復並持續對風險進行評估與管理(表 10)。

表 10

<p>風險定義 (Risk identification)</p>	<p>對可能的風險因子加以定義，並尋求測量方法。</p>
<p>風險控制與評估 (Risk control and evaluation)</p>	<p>以隨機性演算法對風險進行模擬。</p>
<p>風險報告 (Risk reporting)</p>	<p>產出對任務目標影響之報告</p>

由於風險的不確定性特質，因此其評估即含有機率性，EnBW 公司在對風險項目定義之後，亦一併產生了量測方法，針對其專案或合約內每一項任務進行蒙地卡羅模擬 (Monte Carlo simulation)，並每月進行討論，特別著重於對維修時程安排的影響以及是否會增加業主額外成本，同時在採取適當反應措施後再次進行評估。

因為風險將對業主產生額外支出或收入損失，基於不確定性，使得保險成了規避風險的主要手段，EnBW 公司的 T-PNS/O 部門針對離岸風場施工階段與運維階段都有相對應的保險作為。在施工階段，保險範圍即涵蓋雇主與承包商，以及因施工延遲所造成的損失；而在運轉階段，則涵蓋了風場組件的損壞，以及不可預期的商業上的中止等。

風場營運以商業利潤為目的，透過這些維護工作的協同合作，在某個程度上確保了可預期的獲利，並以此基礎驗證實際風場的產出與收入，並可做為未來尋求更好風場設計及更佳運轉模式的研究基礎。

## 五、德國能源轉型時期之再生能源政策

當今德國已訂下能源轉型目標，要求在 2050 年將溫室氣體 (GHG, Greenhouse gas) 排放量降低 80%，並於 2022 年停用核能，以及達到全面去碳化並引入新技術等等，預期在 2050 年由再生能源提供 80% 的電力來源，而整體電力的穩定供應則由天然氣發電支援，另外將廣泛使用電動交通工具，且為配合大量再生能源裝置供電與電動交通工具的用電需求，輸配電之電網分佈與建置將比現有系統呈現更巨量的擴張。而暖氣供應也極大部份轉由電力來供應，如此將使整體電力消耗量更為增多，故能源效率將進一步提升。為達此頗具野心的目標，德國再生能源發電裝置未來預期將有 100GW 的太陽能發電、140GW 的風力發電、以及約 6GW 的水力發電的分配(圖 14)。

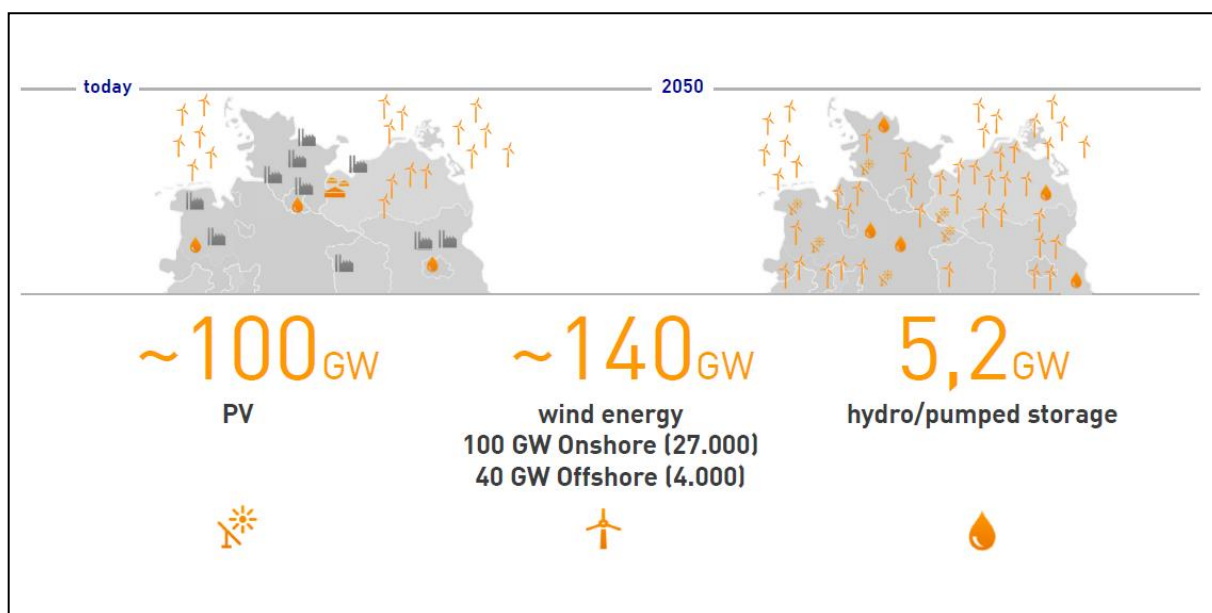


圖 14 德國於 2050 年再生能源發電裝置容量目標

若達到這個能源配比，必定造成能源價格、消費行為以及企業競爭力變動等等的社會經濟問題，EnBW 公司為配合此變化，除了著重經濟面上的研究外，公司也大幅調整商業模式來因應，除了逐步降低傳統火力發電，並增加再生能源類發電來源外，另將採取增加電網建設以及提高售電量等措施，但這些商業模式的改變，將使該公司的收入結構產生變化。由於再生能源的建置與營運成本偏高，該公司之未計利息、稅項、折舊及攤提前的利潤(EBITDA, Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization)從 2012 年至 2016 年呈現逐年遞減趨勢，並在 2016 年達到最低，但自 2017 年即開始回升，預期現今施工中及規劃中的離岸風場陸續完工並加入商轉後，獲利將可持續上揚(圖 15)。

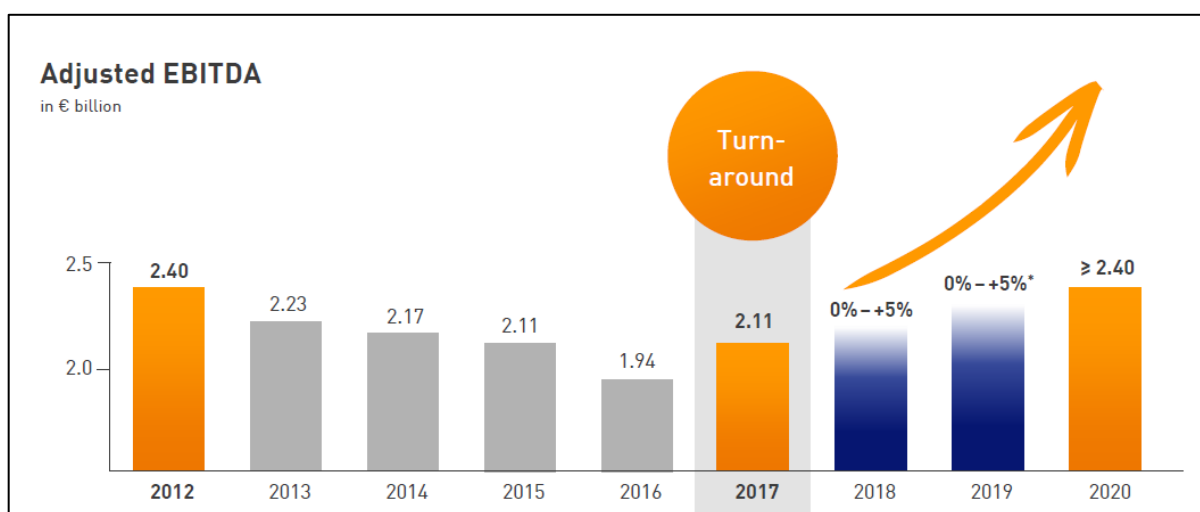


圖 15 EnBW 公司歷年 EBITDA 及未來預期

德國的能源轉型不僅僅是以再生能源取代傳統發電的過程，還包括了廣大的電網架設，雖然技術上不成問題，但面對居民的不同意見往往才是最大的障礙。畢竟德國民眾普遍對於能源轉型表示支持，但沒有人願意自家後院附近出現電力設施，這點與國內電力基礎設施之建設遭遇地方抗爭的問題相同，而這部份將成為德國能源轉型上較有難度的課題，也是 2050 年能否達成其目標的關鍵之一。

## 參、心得及建議

### 一、心得

實際上 EnBW 公司目前在風力發電業務上與台電公司並無接觸，因此有機會能與德國優良之離岸風電營運業者研討相關技術，實屬難得。藉著與風力開發團隊的討論，對於實際運維技術的概念，能建立更高的視野與觀點來掌握風場營運的關鍵(圖 16)。

雖然離岸風力的運轉維護策略，仍一直有不同的營運模型被提出及研究，但實際可用來運作風場的可行方法，涉及眾多離岸風場營運商各自現行的運維監控技術，且屬於各廠家的商業機密，無法輕易取得，當然也無法在此次短短天數的實習中完全熟悉更細部的運作技術，因此僅能由容易取得之文件，以及參考其他公開的關於離岸風場運維策略方面資料，建立整個離岸風力營運的概念。



圖 16 與 EnBW 公司離岸風力專案團隊合影

世界上商用風力發電技術發展到今日，大到風場如何配置，細到風機內部設計，所牽涉到的電力、電機、機械及控制等項目，在業界上皆算已成熟的技術，但其衍生的運轉維護問題，除了實際的維修專業以外，尚有備品庫存、物流管理、零件壽命、可靠度分析、場址外在環境條件、在地公共基礎建設與成本經濟等項目，這些都不是傳統的工程科學可以掌握。實際上與風場相關的運轉維護問題，並非工程界單一個案，很多主題在工業工程管理領域已有深入研究，並擅長透過工程分析的方法，來對資源運用做最佳的整合，因此若能借重工業工程的專才知識，參與全案從一開始的場址選擇，裝置容量或風機類型的決定，到實際施工，以及商轉後的運轉維護，來進行精確的成本分析，從而提供判斷方法或對策來因應突發狀況所造成的投資損失，並基於計算的基礎上提出有力的數據來說明，採用何種運維策略可在最少成本支出情況下，獲取最大收益，相信對於離岸風電這類的巨大金額投資案中，可協助達到利潤極大化的目的。

另外從運轉維護的角度回頭來檢視風場的調查及規劃，值得思考的一個問題，就是單一風機的裝置容量是否愈大愈好？尤其在亞太地區屬於具有颱風與地震威脅的區域，如僅就停機所造成的發電損失而論，一般而言考量大裝置容量的風機若遭遇停機事故，馬上會呈現大量的發電量損失；反之若採用裝置容量稍小的風機，則或許因故障而停機的發電量損失反而比較小，因此實際上離岸風場選用什麼裝置容量的風機也是值得研究的課題。

## 二、 建議

離岸風力發電在未來將是台灣發電的來源之一，因此整體知識體系如何來架構，以及技術人力應如何訓練，來滿足龐大的維修需求，相信是目前的當務之急。其實對於營運商而言，在風場的初始規劃到施工，即須要受過良好訓練的、未來實際的運維人員持續參與，同時制訂一切與運維有關作業程序及詳盡教學說明文件，其中教學文件的完整建立也與技術人力的充份訓練習習相關。另同時建議建立證照制度，讓所有參與不同領域工作的運維人員皆須經過檢定，來確認其足以勝任所執行之工作。除此之外，從規劃、施工以至實際商轉後的流程應詳細記錄並妥善保存，畢竟整個案場的完成過程是無比珍貴的經驗。同時為了能夠妥善並持續進行知識庫建立及人力訓練，

完整並嚴謹的分工以及制度的建立也是整體營運的重要關鍵，相信依此方向並以可驗證的方式來完成整個計畫，對於台灣風力發電的經營水平將能大幅提升。

為了開發新興離岸風力作為以後台灣電力的主要來源，未來將會大量使用台灣鄰近海域，因此除應盡早做好與在地利害關係者的溝通與聯繫外，更需要考量後續有關漁民轉置的議題，本次參訪 EnBW 公司，其在運維中心周邊區域相關利害關係者的聯繫、轉置與共享的作為頗值得我方借鏡，因此建議應導入更多可與在地漁民共榮共享的調適做法，諸如將人員運輸船普遍採用之年租用方式，改依維修季(春夏兩季)與搶修季(秋冬季兩季)分別洽船隻供應商租用或請在地漁民提供船隻服務，其中人員運輸船依「維修季」與「搶修季」分別採專用人員運輸船或經漁船改裝之人員運輸船，來降低非高峰使用期之人員運輸船支出。將漁船改裝使用於非維修尖峰期的做法，除可以明確降低維護成本支出外，主要在於提升在地工作機會，讓熟識場域特性的在地漁民能融入離岸風場開發後的運維工作，帶來風場營運與在地共榮的契機，然而此部分的調適做法仍尚待相關部會建立管理機制方可達成。