

出國報告(出國類別：實習)

赴丹麥學習離岸風力併網規劃出國報告

服務機關： 台灣電力公司

姓名職稱： 林彥均 工程師

莊一麟 工程師

派赴國家： 丹麥

出國期間： 107年9月15日至107年9月30日

報告日期： 107年12月5日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：赴丹麥學習離岸風力併網規劃出國報告

頁數：84 頁含附件：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)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

林彥均/系統規劃處/工程師/02-2366-5068

莊一麟/系統規劃處/工程師/02-2366-6912

出國類別：實習

出國期間：107 年 9 月 15 日至 107 年 9 月 30 日

出國地區：丹麥

報告日期：107 年 12 月 5 日

分類號/目

關鍵詞：再生能源、離岸風場、同步調相機、丹麥電網

內容摘要：(200~300 字)

本次出國計畫核定前往國家為丹麥，丹麥為全世界風力發電發展數一數二的國家，1991 年全世界第一個離岸風電場即設置於丹麥，本次出國計畫希望能從三個面向學術(丹麥技術大學 Technical University of Denmark)、產業(沃旭能源 Ørsted、Siemens Gamesa)及公部門(Energinet)面深入了解整個丹麥再生能源發展的情形，提出報告與建議，供本公司電力系統規劃、調度、設計施工及運轉維護人員參考。

本報告內容共分四章

壹、計畫說明

貳、參訪機構介紹

參、重要資訊說明

肆、結論

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

目錄

目錄.....	i
表目錄.....	ii
圖目錄.....	iii
壹、計畫說明.....	1
一、出國緣由與目的.....	1
二、出國行程.....	6
貳、參訪機構介紹.....	7
一、丹麥技術大學 Technical University of Denmark.....	7
二、Siemens Gamesa.....	13
三、沃旭能源 Ørsted.....	16
四、Energinet.....	21
參、重要資訊說明.....	25
一、歐洲同同步調相機運用.....	25
二、歐洲電網檢討分析說明.....	37
三、丹麥能源轉型目標及策略.....	44
四、再生能源併網.....	57
五、離岸風場開發.....	65
肆、結論.....	81

表目錄

表 2.2.1：出國行程表.....	6
表 3.1.1：各模擬情境系統慣量 $H(s)$ 與 ROCOF(Hz/s) 模擬結果.....	35
表 3.2.1：東丹麥及西丹麥系統.....	38
表 3.2.2：丹麥電網目前運轉中的 HVDC 輸電線.....	41

圖目錄

圖 1.1.1：台灣離岸風電開發策略.....	2
圖 1.1.2：台灣 106 年再生能源裝置情形.....	3
圖 1.1.3：台灣 114 年再生能源目標裝置情形.....	3
圖 2.1.1：DTU 校區及研究場所分佈圖	8
圖 2.1.2：DTU 創校者及創校宗旨	8
圖 2.1.3：CEE 的三大研究方向	11
圖 2.1.4：CEE 各領域系所研究簡要說明	11
圖 2.1.5：與 DTU 有合作關係之學校與企業	12
圖 2.2.1：Siemens Gamesa 三大業務部門	13
圖 2.2.2：Siemens Gamesa 服務據點	14
圖 2.2.3：Siemens Gamesa SG8.0-167DD 型離岸風機.....	15
圖 2.3.1：沃旭能源.....	16
圖 2.3.2：沃旭能源哥本哈根分部實景.....	17
圖 2.3.3：沃旭能源哥本哈根辦公室平面圖.....	18
圖 2.3.4：沃旭能源風場開發示意圖.....	19
圖 2.3.5：大型離岸風場開發情況.....	20
圖 2.3.6：離岸風場方式.....	20

圖 2.4.1 : ENERGINET 公司架構	21
圖 2.4.2 : ENERGINET 調度台	21
圖 2.4.3 : ENERGINET 系統	22
圖 2.4.4 : 丹麥電網公司 ENERGINET 外觀	23
圖 2.4.5 : 丹麥電網公司 ENERGINET 建築內部	23
圖 2.4.6 : 與丹麥電網公司 ENERGINET 成員合影	24
圖 3.1.1 : 同步調相機運轉特性	26
圖 3.1.2 : 同步調相機定子電流與激磁電流(場電流)關係圖	26
圖 3.1.3 : 丹麥境內 7 台同步調相機	28
圖 3.1.4 : 丹麥 400kV 電力系統單線圖	29
圖 3.1.5 : 軟硬體系統整合示意圖	30
圖 3.1.6 : RTDS 硬體架構建立示意圖	30
圖 3.1.7 : 人機介面	31
圖 3.1.8 : 即時數位電力系統模擬器(RTDS)	32
圖 3.1.9 : 西丹麥系統模擬情境	34
圖 3.1.10 : Case (a)模擬結果	35
圖 3.1.11 : 與 DTU 教授合影	36
圖 3.1.12 : DTU 研發參加電動車馬拉松比賽的車	36
圖 3.2.1 : 丹麥輸電系統簡圖	37

圖 3.2.2：丹麥電力系統.....	38
圖 3.2.3：西丹麥電力系統.....	40
圖 3.2.4：ENERGINET 各時間長度所使用的分析軟體.....	42
圖 3.3.1：丹麥再生能源裝置情形.....	44
圖 3.3.2：丹麥 2017 年負載需求能量來源.....	45
圖 3.3.3：丹麥 2017 年再生能源佔一半以上負載需求	46
圖 3.3.4：丹麥能源轉型目標示意圖.....	46
圖 3.3.5：丹麥風電收購價格.....	47
圖 3.3.6：丹麥風電收購價格.....	48
圖 3.3.7：歐洲地區停電概況.....	49
圖 3.3.8：大歐洲電網傳輸概念.....	51
圖 3.3.9：丹麥大型傳統火力發電變化.....	52
圖 3.3.10：丹麥電力交易市場.....	53
圖 3.3.11：丹麥 Esbjergvaerket 汽電共生發電廠.....	54
圖 3.3.12：風力發電預測.....	55
圖 3.3.13：零排碳能源政策方向.....	56
圖 3.3.14：能源轉型.....	56
圖 3.4.1：丹麥再生能源併網流程.....	57
圖 3.4.2：丹麥電力系統規範.....	58

圖 3.4.3：丹麥頻率控制規範.....	59
圖 3.4.4：丹麥電壓持續運轉規範.....	60
圖 3.4.5：丹麥檢討考量情境.....	60
圖 3.4.6：丹麥輔助服務.....	61
圖 3.4.7：丹麥再生能源併網測試流程.....	62
圖 3.4.8：歐洲各國併網測試.....	63
圖 3.4.9：沃旭能源諧波實測範例.....	63
圖 3.5.1：歐洲各國離岸風場責任分界點.....	65
圖 3.5.2：開發歐洲離岸風場開發期程.....	66
圖 3.5.3：開發台灣離岸風場開發期程.....	67
圖 3.5.4：離岸風場設計單線圖.....	68
圖 3.5.5：離岸風場 N-1 因應	68
圖 3.5.6：離岸風場主要設備.....	69
圖 3.5.7：海上變電站.....	71
圖 3.5.8：丹麥海上變電站建置期程.....	72
圖 3.5.9：海浪衝擊離岸風場海上設施.....	72
圖 3.5.10：Anholt 離岸風場陸上運維點.....	73
圖 3.5.11：Anholt 離岸風場地點示意圖.....	74
圖 3.5.12：Anholt 離岸風場風機.....	75

圖 3.5.13 : Anholt 離岸風場備品及訓練室.....	75
圖 3.5.14 : Anholt 離岸風場工作船.....	76
圖 3.5.15 : Anholt 離岸風場工作船內部.....	77
圖 3.5.16 : Anholt 離岸風場.....	77
圖 3.5.17 : Anholt 離岸風場海上變電站.....	78
圖 3.5.18 : POWER LINK ISLAND 概念示意圖	80

壹、計畫說明

一、出國緣由與目的

台灣地區風力資源優良，依國際顧問公司 4C Offshore 調查，台灣西部沿海，其風力發電條件於全世界名列前茅，經濟部能源局亦將西部沿岸離岸風電潛力開發場址區域進行公告供各界參考。

105 年 6 月立法院經濟委員會第 24 次全體委員會議大部報告再生能源開發目標，期望 2025 年達到 27.423GW 再生能源裝置容量。近來配合西部沿岸離岸風電開發，離岸風力 2025 年開發目標預期增加為 5.5GW。台灣離岸風電開發主要分成三個階段，第一階段為示範風場階段，設置目標量以示範風場為主，藉由示範獎勵以鼓勵再生能源業者建置離岸風場，本階段離岸風電設置目標量為 109 年達到 520 MW 裝置容量；第二階段潛力場址階段，採先遴選 3.5 GW，接著競價 2GW 方式辦理，而先遴選部份包含 109 年 0.5GW 及 110~114 年遴選 3.0GW 容量，本階段遴選結果經濟部能源局已於 107 年 4 月 30 日公布，109 年~114 年預計開發 3.386GW 離岸風電，競價結果於亦已 107 年 6 月 23 日出爐，114 年預計再開發總裝置容量約 1664MW 離岸風電；第三階段區塊開發階段，本階段詳細具體作為尚規劃中，主要以水深 50m 以上海域作為離岸風電開發場域，預計開發時程未定。

◆台灣離岸風電開發策略

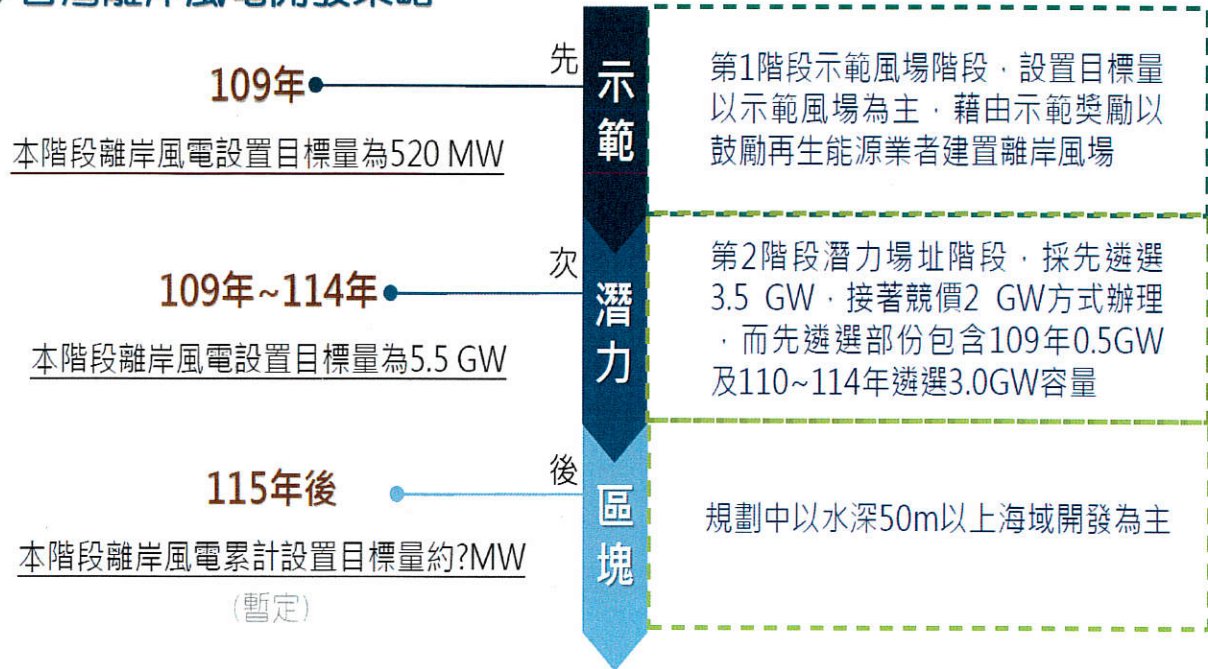


圖 1.1.1：台灣離岸風電開發策略

截至 106 年台灣再生能源裝置容量約為 4.792GW，已可控的慣常水力為大宗，而 2025 年再生能源裝置容量目標超過 20GW，以間歇性的太陽光電及風力發電為主，台灣電力系統架構將呈現新風貌，且間歇性再生能源與以往傳統電源特性有所差異，尤其是近年來才開始大量發展的離岸風電，其規劃上與傳統電源差異更大，需強化這些新興能源併網對電力系統所造成衝擊之研討及因應作為，若能從再生能源已高度開發國家學習其再生能源發展經驗，將有助於未來針對再生能源開發相關因應作為的擬定。

106年再生能源裝置容量

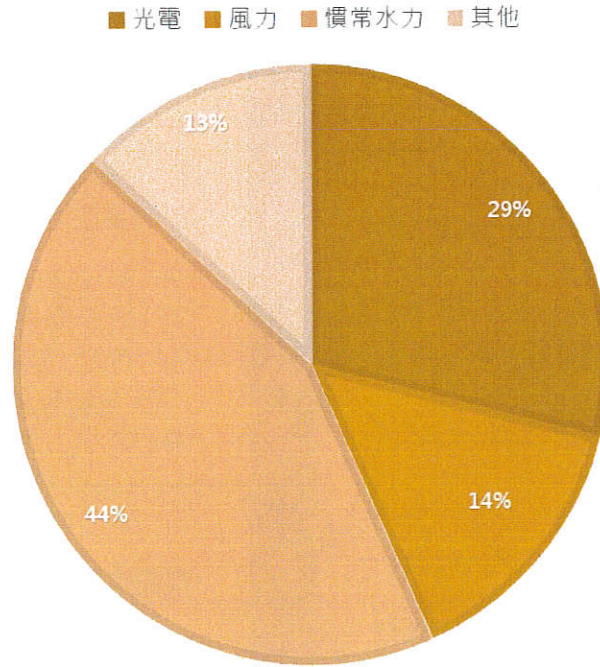


圖 1.1.2：台灣 106 年再生能源裝置情形

114年目標再生能源裝置容量

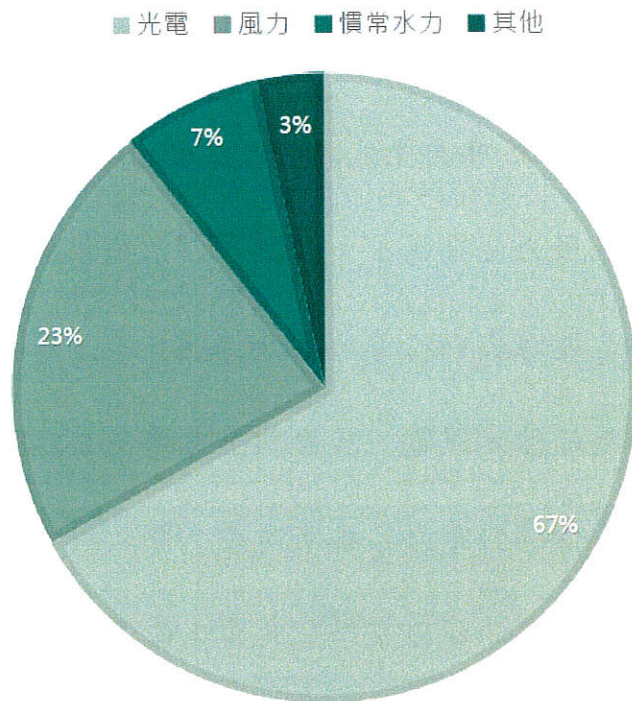


圖 1.1.3：台灣 114 年再生能源目標裝置情形

歐洲是全球再生能源發展的翹楚，本次出國計畫核定前往國家為丹麥，丹麥為全世界風力發電發展數一數二的國家，1991 年全世界第一個離岸風電場即設置於丹麥，本次出國計畫希望能從三個面向學術(丹麥技術大學 Technical University of Denmark)、產業(沃旭能源 Ørsted、Siemens Gamesa)及公部門(Energinet)面深入了解整個丹麥再生能源發展的情形。

丹麥技術大學是丹麥培養理工技術人員的重要要學府，本次拜訪 Arne Hejde Nieslen 教授及 Guan gya Yang 教授為綠能相關領域的專家學者，透過其經驗分享，有助於了解丹麥因應大量再生能源併網相關因應作為。Siemens Gamesa 與丹麥技術大學有產學合作，本次亦將拜訪其位在丹麥技術大學的辦公室，已深入了解風力發電機相關技術能力。沃旭能源為丹麥政府持股超過 50%的發電公司，其離岸風電開發規模全世界數一數二，離岸風電開發經驗超過 25 年，此次安排與專家學習離岸風電規劃，建置，營運及後續運轉經驗。丹麥 1970 年代即開始其能源轉型計畫，Energinet 為丹麥輸電網公司，負責丹麥輸電系統的建置、運轉及調度，有機會能與擁有數十年能源轉型經驗的專家請亦是相當難得寶貴的經驗。

未來再生能源大量併網電力系統勢必衍生出來種種技術性問題，都必須重新檢視或調整制定，藉由參與上述討論會議可獲取歐洲再生

能源併網推動相關經驗、新知及實務作法，有助於未來綠能併網之系統規劃層面、電網瓶頸改善應用及思索高佔比再生能源併網因應對策等事宜。再生能源推動下且能同時確保電網供電安全，對台電、再生能源業者及全民而言，才是公平可行及大家共同受惠的狀態。

二、出國行程

本次出國計畫共計 16 天(含交通時間)，行程概要如表 2.2.1。

表 2.2.1：出國行程表

日期	起訖地點	工作紀要
107/9/15	台北-荷蘭(轉機)-丹麥	去程
107/9/16-107/9/28	丹麥	丹麥技術大學 Siemens Gamesa 沃旭能源 Energinet
107/9/29-107/9/30	丹麥-荷蘭(轉機)-台北	返程

貳、參訪機構介紹

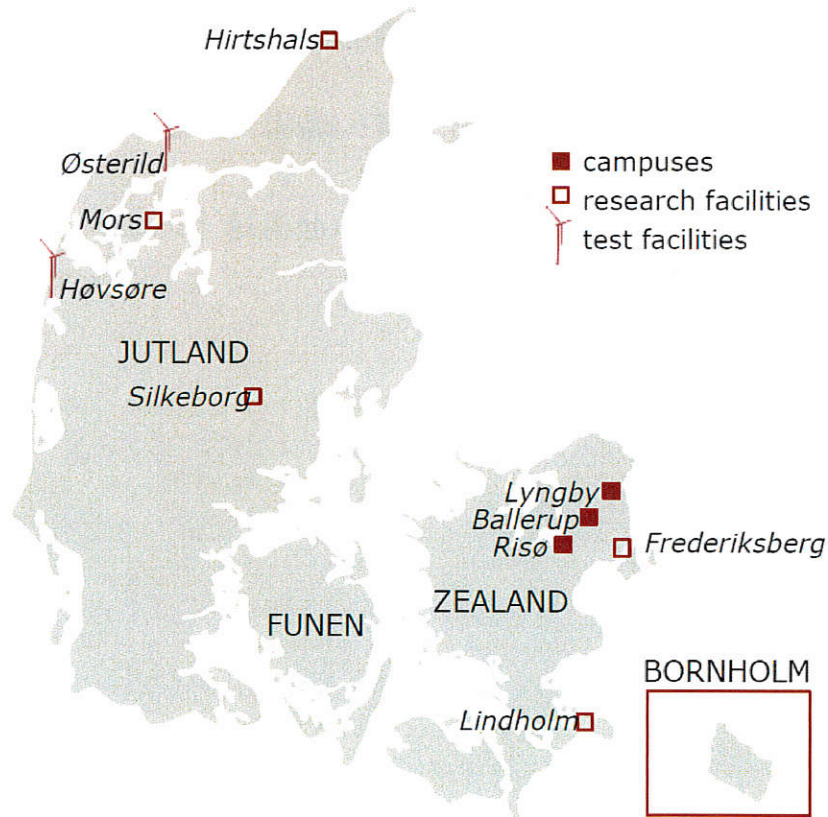
一、丹麥技術大學 Technical University of Denmark

我們第一站拜訪丹麥技術大學(Technical University of Denmark, DTU)，行前與我們聯繫接洽的是 Guangya Yang 教授，Guangya Yang 教授是丹麥再生能源領域的專家，目前主要研究包含同步調相機、智慧電網及智慧變流器，對於風力發電亦有所涉略，另外亦與 Arne Hejde Nieslen 教授進行經驗及意見交流，Arne Hejde Nieslen 教授於丹麥技術大學任教數十年，從丹麥開始進入能源轉型即參與其中，經驗相當豐富，藉由與兩位教授即其博士班學生的簡報說明和實際系統模擬，可深入了解丹麥電力系統。

(一)丹麥技術大學簡介

本次參訪的是丹麥技術大學靈比(Lyngby)校區，位於丹麥首都哥本哈根北方近郊，另外 2 個校區也在附近。丹麥技術大學是丹麥培養理工技術人員的重要學府，其創校人丹麥知名科學家 Hans Christian Ørsted，更是寄望丹麥科技大學可利用科學貢獻社會，研究是丹麥技術大學發展重點之一。目前有 11,000 名學生，包括 1,500 名碩士生及 1,300 名博士生，據 2016 年統計資料，DTU 國際學術論文發表量為 5,744 篇，該校排名在北歐五國是第 1 名，全歐洲則排名第 21 名，是

非常具有競爭力的一所學校。

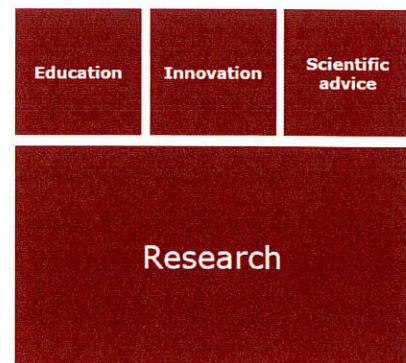
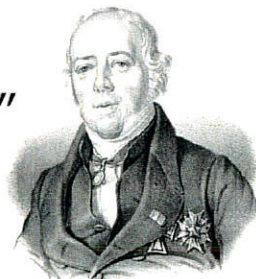


Data source: Technical University of Denmark

圖 2.1.1 : DTU 校區及研究場所分佈圖

"DTU will develop and create value using the natural sciences and the technical sciences to benefit society."

H.C. Ørsted
Founder of DTU in 1829



Data source: Technical University of Denmark

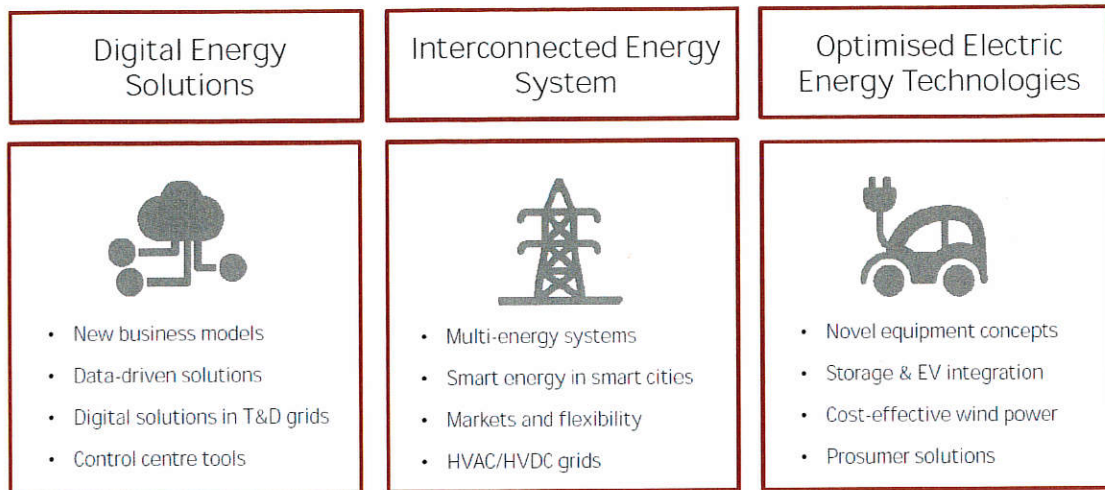
圖 2.1.2 : DTU 創校者及創校宗旨

在智慧電網研究方面，丹麥技術大學更是走在全歐洲的最前面，根據 2014 年統計資料，丹麥技術大學著手進行的智慧電網相關研究，在歐盟成員國所有企業體裡面最活躍，擁有 45 個，共 2.5 億歐元的研究計畫，與丹麥技術大學合作的企業也高達 180 個。

(二) 丹麥技術大學電力及能源研究中心

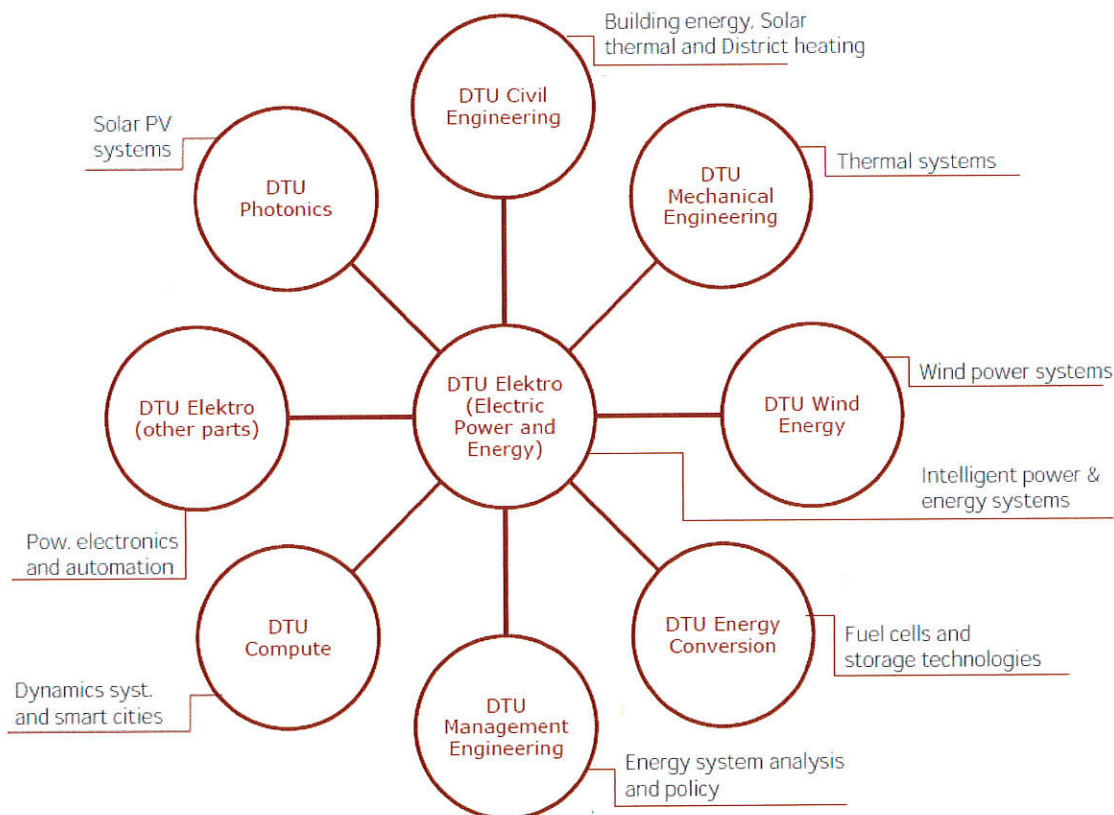
Guangya Yang 教授所屬系所是電力及能源研究中心(Center for Electric Power and Energy, CEE)，該系所研究目標為在具經濟效益的前提下，以數位科技及再生能源為基礎，發展一個有市場機制的彈性能源系統。該中心成員約 100 人，其中包含 30 個博士生。

丹麥技術大學電力及能源研究中心的三大研究方向：數位能源技術、互聯能源系統、電力能源科技最佳化。數位能源技術，主要探討新的商業模型，如何利用大數據的技術解決問題，數位系統在輸配電網路的應用，控制中心所使用的分析工具研發；互聯能源系統，主要研究系統能源多樣化，如何由智慧電網發展智慧城市，電力市場及電網韌性，HVAC/HVDC 電網；電力能源科技最佳化，則主要探討新的設備概念，儲能系統及電動車如何整合，如何使風場更具經濟效益，在電力系統中兼具發電及受電角色的用戶於系統檢討時如何考量。



Data source: Technical University of Denmark

圖 2.1.3 : CEE 的三大研究方向



Data source: Technical University of Denmark

圖 2.1.4 : CEE 各領域系所研究簡要說明

丹麥技術大學的電力及能源研究中心內各領域的系所，包括土木工程、機械工程、風能、太陽能、計算機等科系，各科系之間電力系統知識與技術的交流，讓丹麥技術大學能夠進行更全面的再生能源研究。

與丹麥技術大學學術合作的學校，以及產學合作的企業眾多(如圖 2.1.5)，依 2016 的統計資料，計有超過 80 所學校，超過 100 家企業，其中業界包括丹麥電網公司 ENERGINET、沃旭能源 Orsted、西門子公司 SIEMENS 等知名業者，由此可看出丹麥技術大學不只在丹麥國內，在國際上的知名度及競爭力都是非常高的。



Data source: Technical University of Denmark

圖 2.1.5：與 DTU 有合作關係之學校與企業

二、Siemens Gamesa

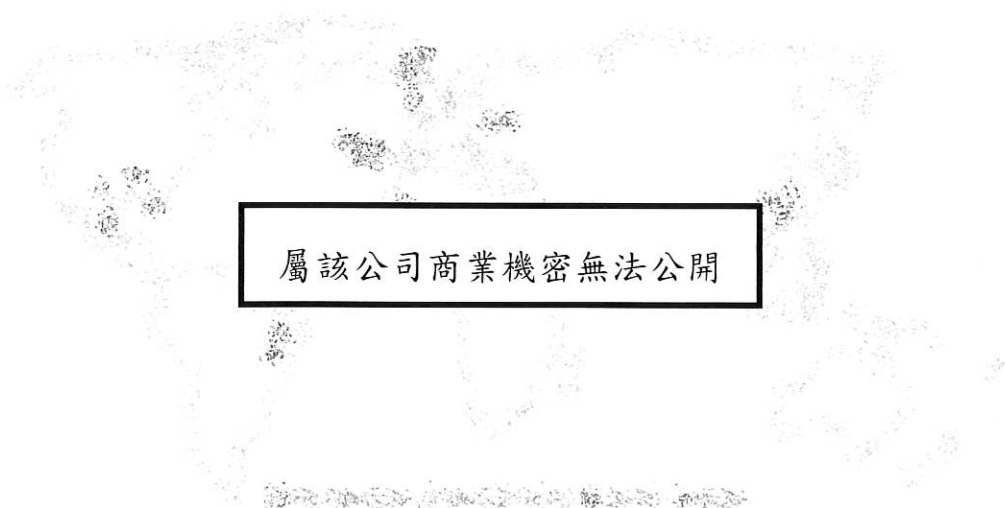
Siemens Gamesa 為 Siemens 公司與西班牙 Gamesa 公司於 2017 年 4 月合併所成立的，屬於西門子集團中的一個獨立部門，Siemens Gamesa 目前有三個主要的業務部門包含陸域風機、海上風機及運維服務，主要負責陸上及海上風力發電機的製造建置，並提供後續運轉維護的服務。



Data source: <https://www.siemensgamesa.com/en-int>

圖 2.2.1：Siemens Gamesa 三大業務部門

目前 Siemens Gamesa 所生產製造的風力發電機及其提供的技術服務已擴展至 90 多個國家和地區，其所生產的風力發電機總容量超過 84GW，員工人數約為 25,000 人，為世界數一數二的大型風力發電公司。

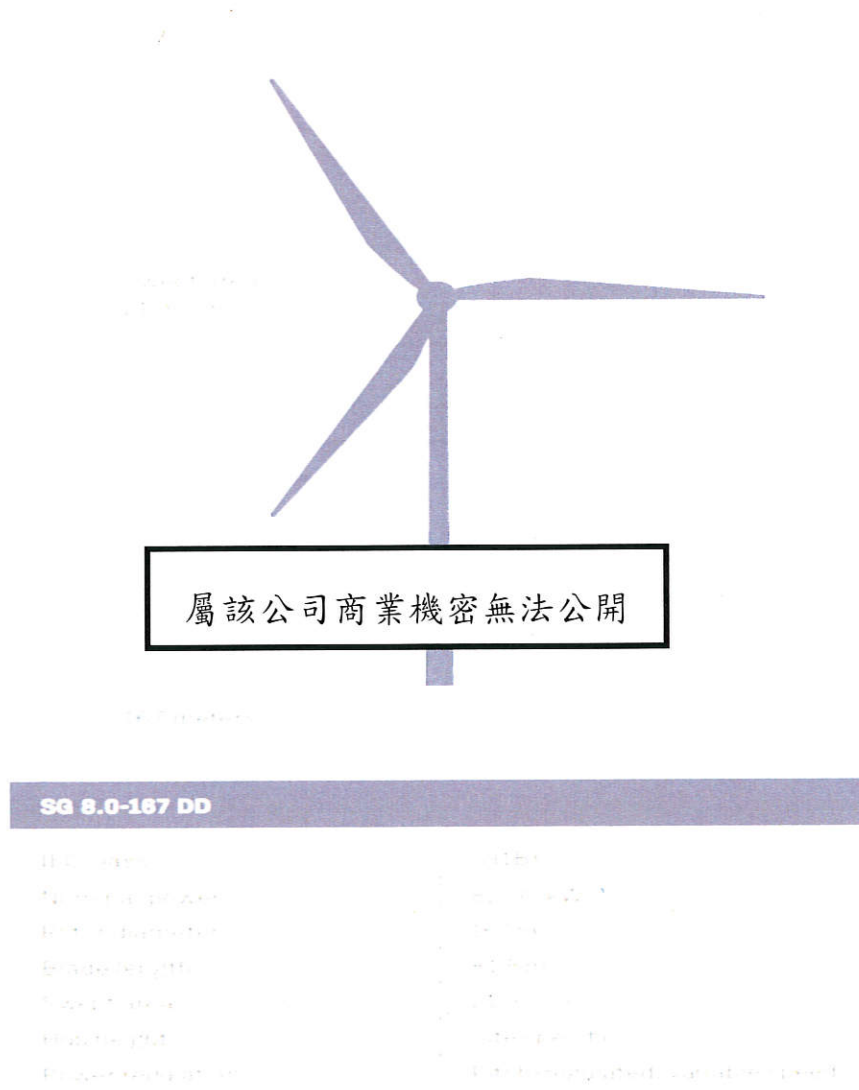


Data source: <https://www.siemensgamesa.com/en-int>

圖 2.2.2：Siemens Gamesa 服務據點

本次參訪的 Siemens Gamesa 分部位於丹麥技術大學(Technical University of Denmark)內的一間辦公室，主要業務負責風機性能的測試，例如風機電壓穿越能力，並將測試出來的數據以電力分析軟體呈現，另因 Siemens Gamesa 的風機外銷世界各地，必須符合當地的電網規範，包含風機電壓穿越能力、頻率穿越能力、電壓頻率控制等功能，可視風場開發商需求選購，惟本次參訪因相關資訊屬其商業機密未獲得前述簡報資訊。

Siemens Gamesa 目前最大離岸風機為 8MW，西門子亦提供風力發電機相關檢討參數可運用於電力分析軟體進行模擬和檢討，台灣亦有許多離岸風場開發商風機採購方案中包含此機型風機。



Data source: <https://www.siemensgamesa.com/en-int>

圖 2.2.3：Siemens Gamesa SG8.0-167DD 型離岸風機

三、沃旭能源 Ørsted

沃旭能源原為東能源公司(DONG Energy,丹麥石油與天然氣公司)，因應能源轉型計畫於 2017 年改名為沃旭能源(Ørsted)，期望能達到零燃煤使用之綠能目標。沃旭能源總部位於丹麥，丹麥政府持股比例達 50.1%，與台電公司相同，政府為主要股東，也主導整個公司發展的方向。2016 年營收為 610 億丹麥幣，約有 5,600 名員工，沃旭能源主要有 3 個事業部，包含風力發電、配售電及生質能&火力發電。風力發電事業部以離岸風電開發為主，目前已建置完成容量約為 3.8GW，至 2025 年期望能將整個離岸風場裝置容量擴展至 11~12GW；配售電事業部主要提供末端一般用戶及工業用戶用電服務，並致力於推廣節約能源等措施；生質能&火力發電事業部主要負責將既有的傳統火力發電廠轉型為生質能電廠，並進行儲能系統相關業務。



Data source: 沃旭能源

圖 2.3.1：沃旭能源

本次拜訪位於丹麥哥本哈根的辦公室，辦公室採用綠建築的設計理念，利用大量的自然光線減少電燈的使用需求，開始簡報前沃旭能源先提供一張建築整體平面設計圖，並宣導若發生緊急事故時的逃難方向和集合地點，相當重視緊急事故時的應變能力。

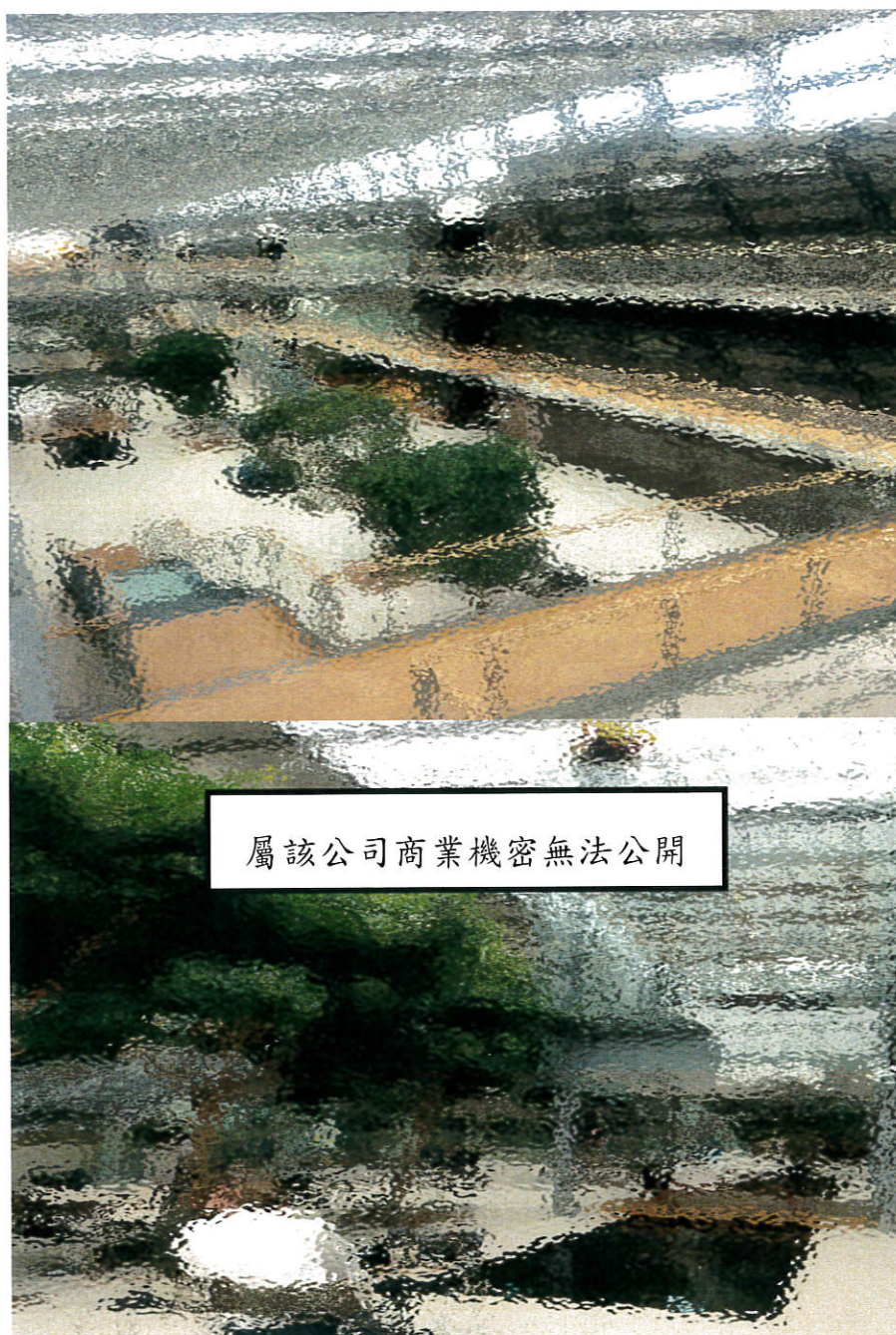


圖 2.3.2：沃旭能源哥本哈根分部實景



Data source: 沃旭能源

圖 2.3.3：沃旭能源哥本哈根辦公室平面圖

本次拜訪沃旭能源的風力發電事業部，沃旭能源所建置的風力發電場遍布各地，主要開發地集中在北歐地區、英國、德國及荷蘭，目前其離岸風電開發計畫也擴展到美國及台灣，沃旭能源目前也在台灣設立辦公室進行台灣離岸風電的開發，目前沃旭能源於離岸風場的開發規模為全世界第一大，含已建置運轉中的離岸風場及未來計畫興建的離岸風場總共有 8.8GW。

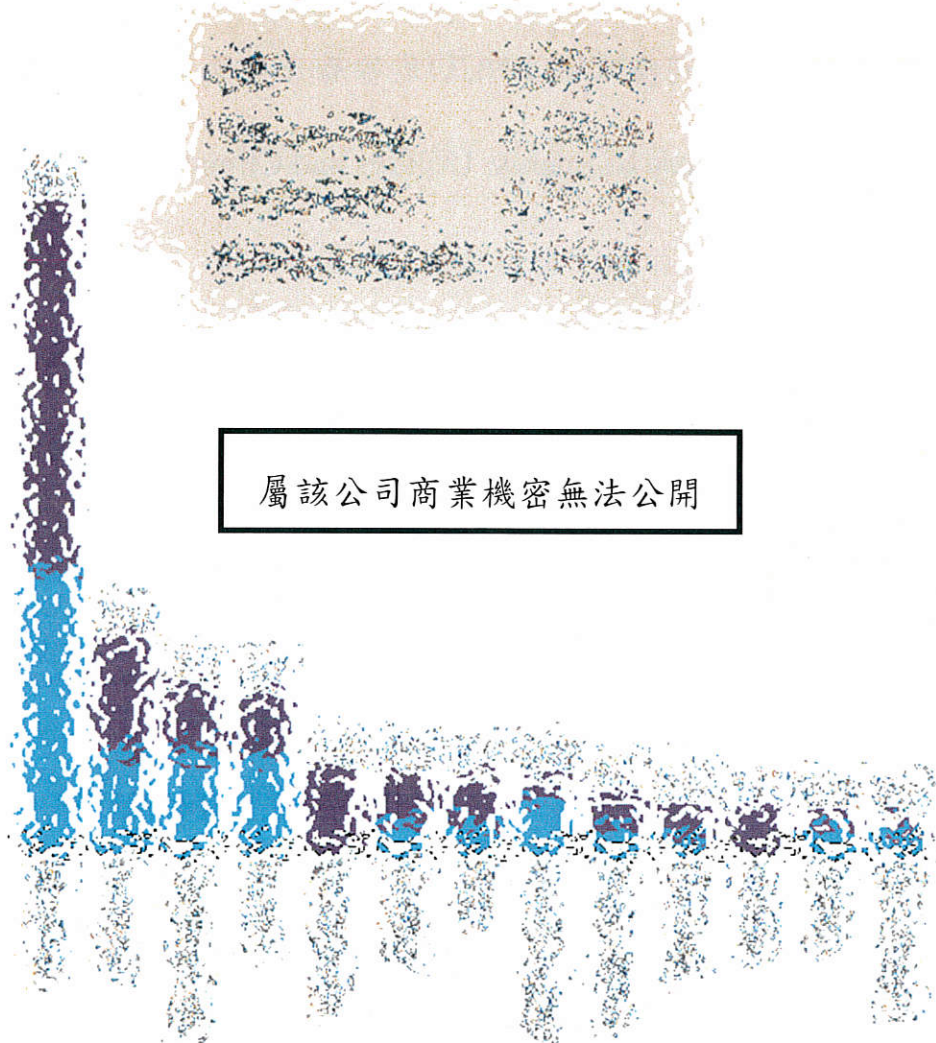
Our geographic
footprint

屬該公司商業機密無法公開

Data source: 沃旭能源

圖 2.3.4：沃旭能源風場開發示意圖

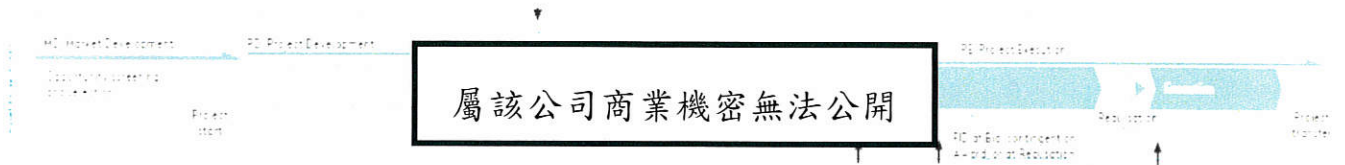
從傳統的傳統火力發電公司逐步轉型為百分之百的綠能發電公司，整個技術及營運方向有非常大的差異，原有的商業投資模式都需要因應這些新型能源不斷調整更新，沃旭能源在離岸風場的開發上已有 25 年的經驗，此次拜訪沃旭能源亦得到諸多離岸風場開發寶貴經驗談，將於下一章節中統整說明。



屬該公司商業機密無法公開

Data source: 沃旭能源

圖 2.3.5：大型離岸風場開發情況



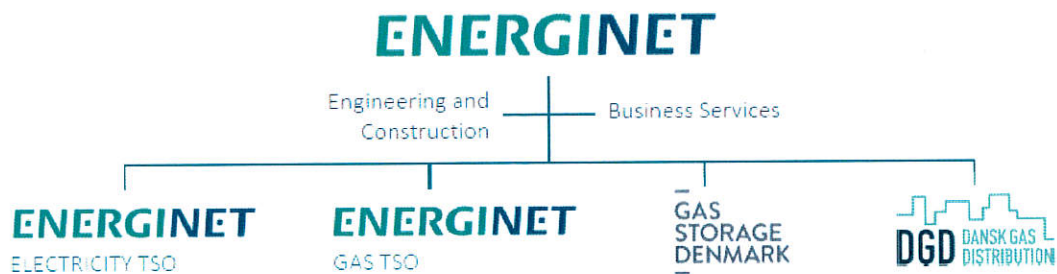
屬該公司商業機密無法公開

Data source: 沃旭能源

圖 2.3.6：離岸風場方式

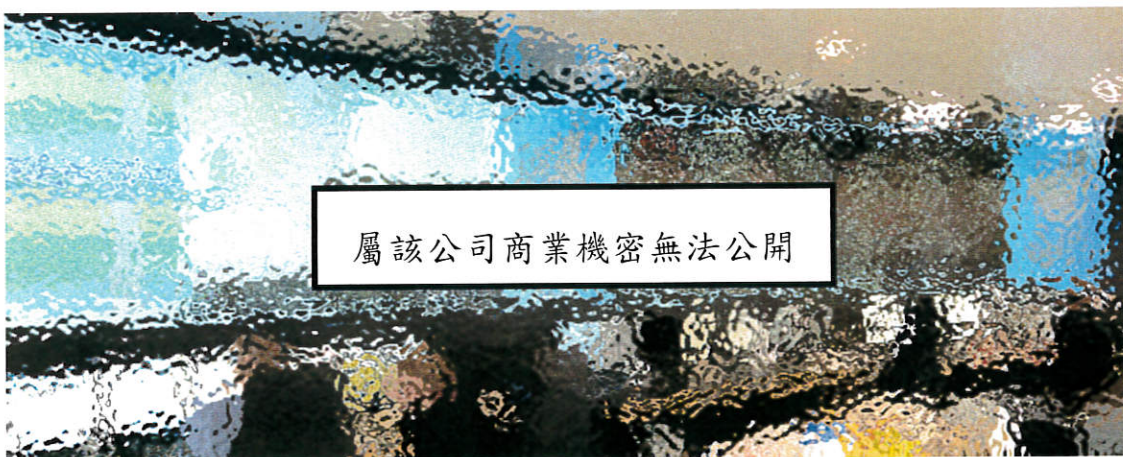
四、Energinet

丹麥國家電網公司(ENERGINET)是隸屬丹麥能源公共設施及氣候署(the Danish Ministry of Energy, Utilities and Climate)的企業體，公司員工約 1,250 人，由四個子公司組成 (如圖 2.4.1)：丹麥電網調度中心、丹麥天然氣網調度中心、丹麥天然氣儲存公司、丹麥天然氣配售公司，掌管著丹麥境內天然氣與電力輸送網路，主要工作為確保天然氣穩定供應、電力系統供電安全與穩定。



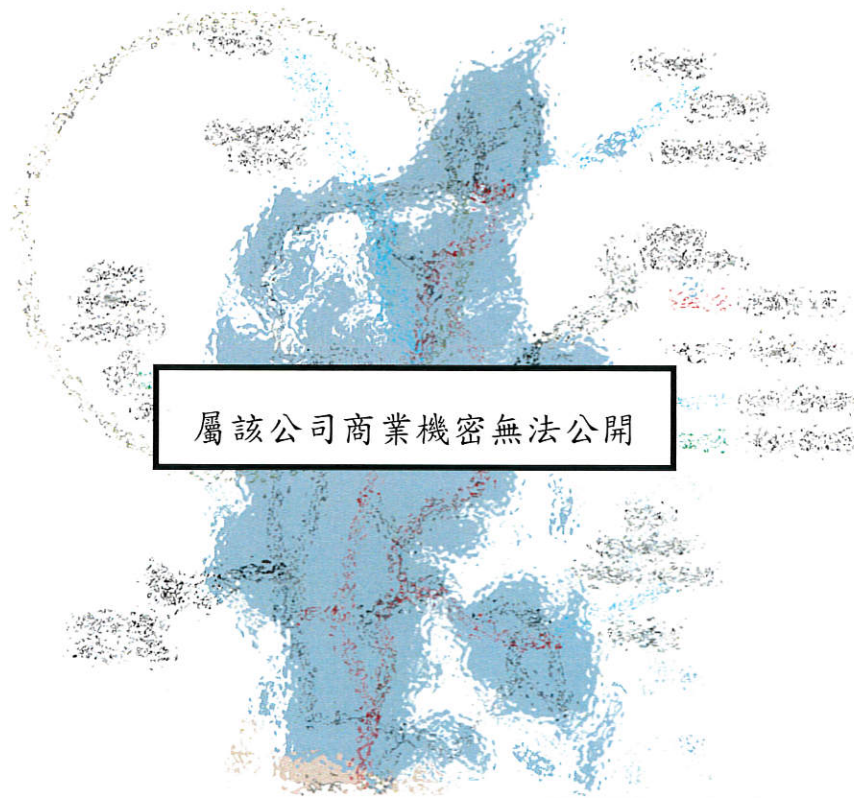
Data source: Energinet

圖 2.4.1：ENERGINET 公司架構



Data source: Energinet

圖 2.4.2：ENERGINET 調度台



Data source: Energinet

圖 2.4.3：ENERGINET 系統

ENERGINET 辦公室建築讓人印象很深刻，像是呼應丹麥的綠能發展方向，其辦公室整體採綠建築的概念設計精神，因為建築外圍建材以玻璃為主體，可利用自然光作為電力來源，剛好參訪當天的天氣不錯，所以採光十分良好，在大廳基本上是不需要電燈的。

ENERGINET 擁有 TSO 跟 ISO，負責確保整個輸電系統規劃、建置、調度及後續運維，丹麥電網調度中心(ENERGINET Electricity TSO)是歐洲共 41 個電網調度中心裡面的其中一個，透過與丹麥電網調度人員的交流，可以學習在再生能源蓬勃發展的情境下，丹麥電網公司如何進行丹麥電力系統的規劃與運轉。



圖 2.4.4：丹麥電網公司 ENERGINET 外觀



圖 2.4.5：丹麥電網公司 ENERGINET 建築內部

ENERGINET 安排了各領域的專家，包含電力調度、系統規劃、電力品質、工程建置及能源政策領域的專業人士為我們說明在這幾十年間丹麥如何從石化燃料為主的電力系統逐步轉為綠能為主的電力系統，此次參訪經驗相當寶貴。

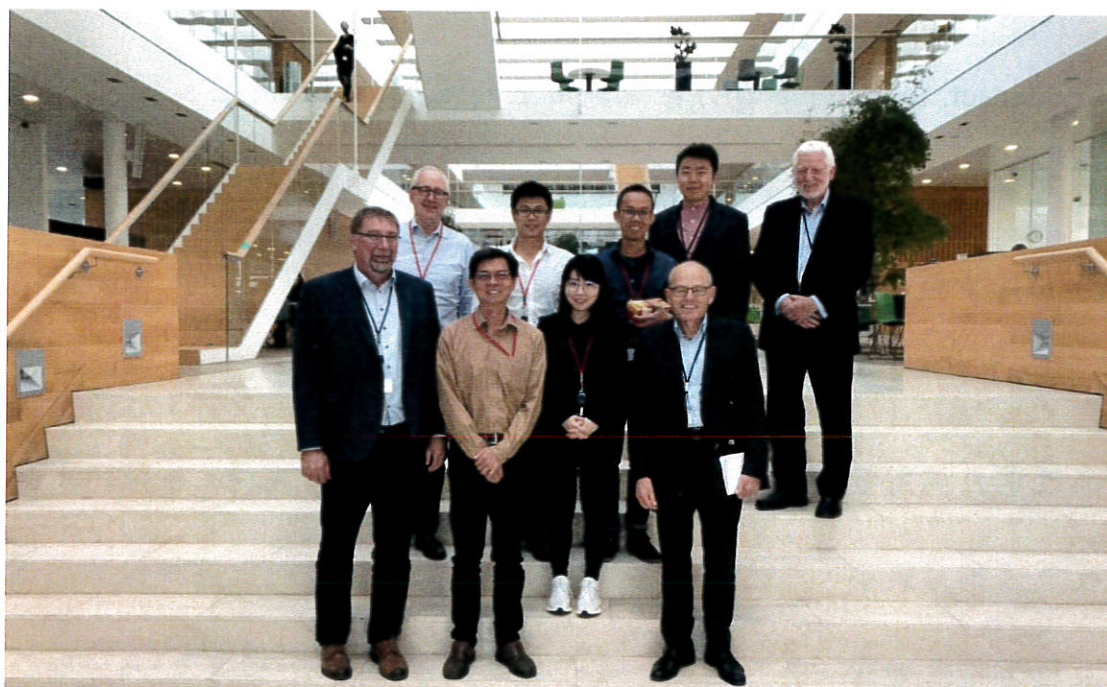


圖 2.4.6：與丹麥電網公司 ENERGINET 成員合影

參、重要資訊說明

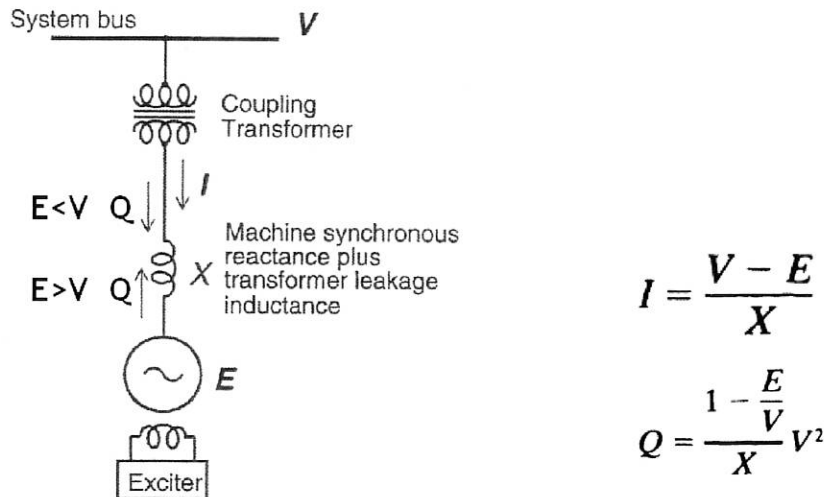
一、歐洲同同步調相機運用

此次拜訪丹麥技術大學 Guangya Yang 教授分享目前在北歐相當熱門的一項電器設備-同步調相機(Synchronous Condenser, SC)，在 Guangya Yang 教授實驗室中可學習到同步調相機(Synchronous Condenser, SC)在丹麥電力系統應用上的模擬與實作成果。

(一) 同步調相機原理

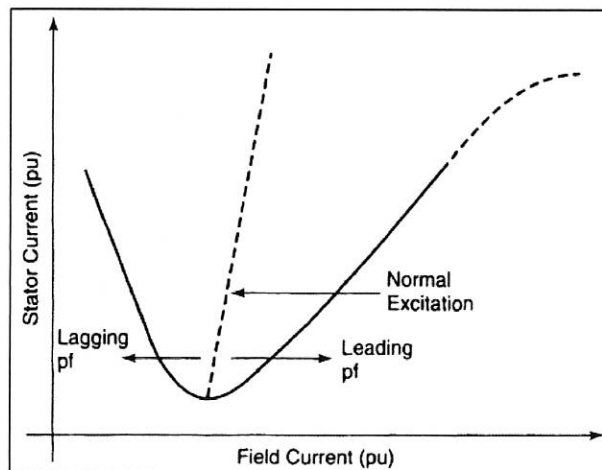
在 1970 年代，同步調相機是電力系統中唯一能夠完全獨自控制無效電力補償量的設備，同步調相機是一台同步發電機，其輸出或吸收無效電力大小，可藉由調整其激磁電流來控制。同步調相機的結構及運轉特性如圖 3.1.1 所示，定子電流與激磁電流(場電流)關係圖如圖 3.1.2 所示，當同步調相機欠激磁時，其端電壓低於系統電壓，呈現電感特性，可由系統吸收無效電力；當同步調相機過激磁時，其端電壓高於系統電壓，呈現電容特性，可輸出無效電力至系統，調節系統電壓。要注意的是，若同步調相機要提供或吸收純虛功，其端電壓與系統併接點系統電壓必須同相。(如圖 3.1.1 所列公式)

同步調相機通常是透過一自耦變壓器與系統互連，平常電力系統穩定運轉時，同步調相機是正常激磁，其端電壓會控制保持與系統電壓相等，故跟系統之間不會交換無效電力。至於其響應速度，因時間常數較大，同步調相機的對於控制指令的響應不快，約 0.1~0.5 秒。



Data source: N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, IEEE Press, 2000.

圖 3.1.1：同步調相機運轉特性



Data source: N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, IEEE Press, 2000.

圖 3.1.2：同步調相機定子電流與激磁電流(場電流)關係圖

同步調相機在電力系統的應用有以下幾種：因為本身為不發實功的發電機組，可增加全系統短路容量，且可提高系統慣量，使系統在受到擾動後可較快回到穩定運轉點；適時提供及吸收無效電力，可調節系統電壓。

(二) 同步調相機於西丹麥電力系統的運用

在風力發電佔比越來越高的丹麥，如何做好電壓及無效電力控制，確保大量風力發電加入系統後，系統電壓能保持穩定，是很關鍵的一項課題，這是 DTU 的楊教授目前研究領域中很重要的一個項目。

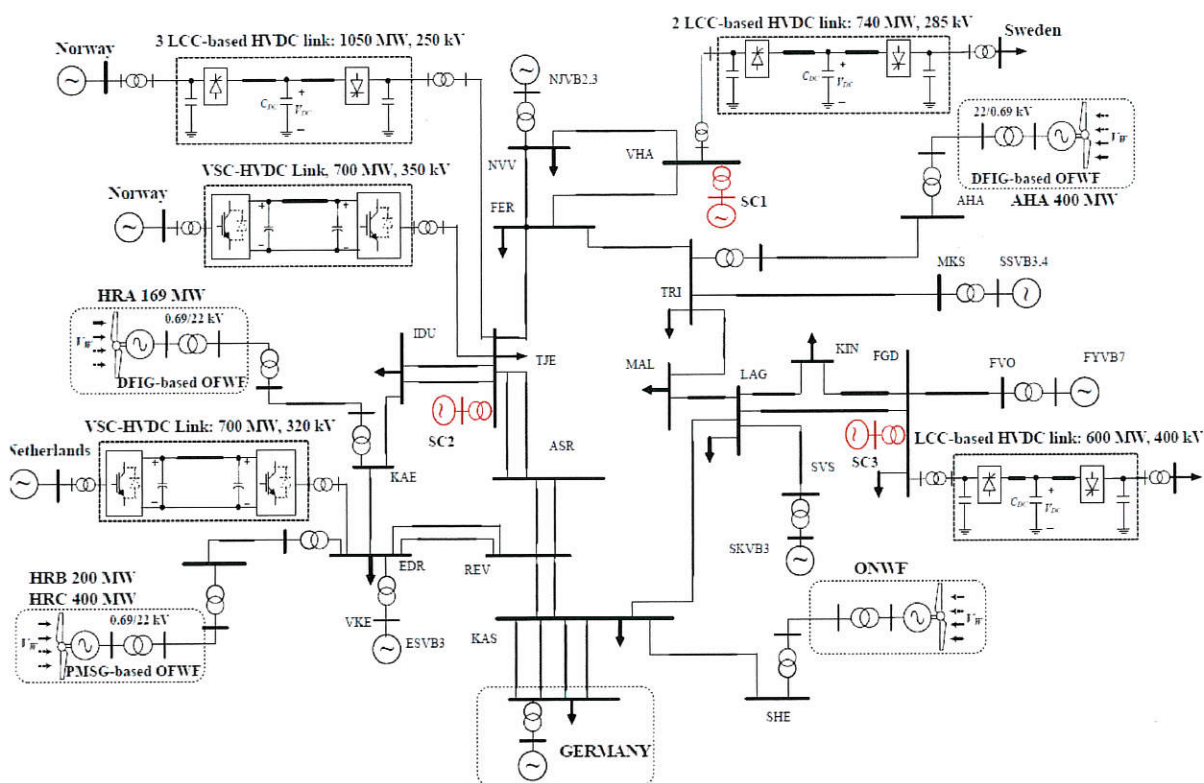
丹麥目前系統中既設有 7 台同步調相機，皆裝設於 LCC HVDC 換流站，其相對位置、電壓等級、裝置容量及商轉年度如圖 3.1.3 所示，其中 5 台為丹麥電網調度中心 ENERGINET Electricity TSO 所有，2 台為私人企業所有。經詢問 DTU 楊教授，一台 270MVar 的同步調相機，包含其變電站，佔地大約一個足球場的面積。



Data source: Energinet

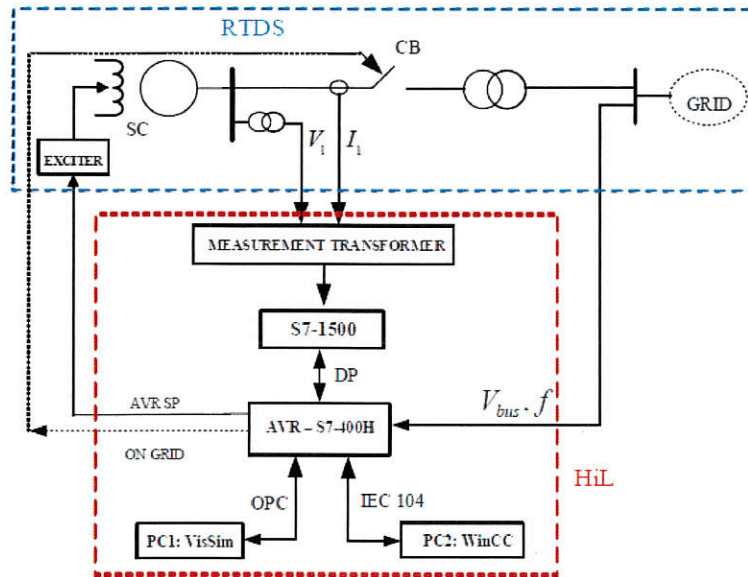
圖 3.1.3：丹麥境內 7 台同步調相機

為了證明同步調相機對於調整系統電壓有所助益，楊教授針對西丹麥電力系統，利用系統建模軟體建立了 2020 年西丹麥 400kV 的電力系統，以即時數位電力系統模擬器(Real Time Digital Power System Simulator, RTDS)實作此系統，系統單線圖如圖 3.1.4 所示。電腦透過通訊協定，與 RTDS 互連，透過電腦人機介面，以電腦下指令對系統進行各種電磁暫態分析，如圖 3.1.5，觀察系統狀態，瞭解同步調相機對系統的影響。



Data source: H. T. Nguyen, G. Yang, A. H. Nielsen and P. H. Jensen, "Combination of Synchronous Condenser and Synthetic Inertia for Frequency Stability Enhancement in Low Inertia Systems," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*.

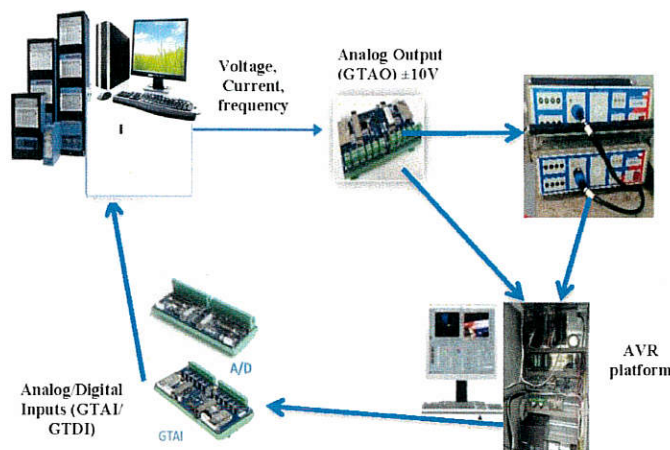
圖 3.1.4：丹麥 400kV 電力系統單線圖



Data source: H. T. Nguyen, G. Yang, A. H. Nielsen and P. H. Jensen, "Combination of Synchronous Condenser and Synthetic Inertia for Frequency Stability Enhancement in Low Inertia Systems," in IEEE Transactions on Sustainable Energy.

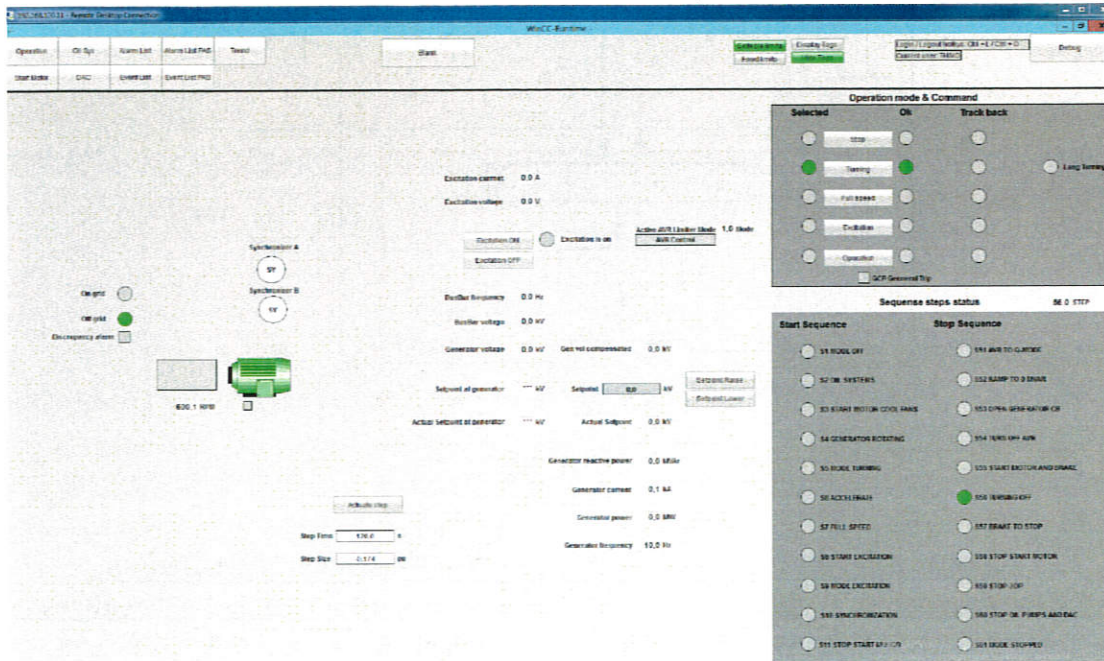
圖 3.1.5：軟硬體系統整合示意圖

西丹麥 400kV 電力系統硬體架構建立示意圖如圖 3.1.6，藉由電腦螢幕的軟、硬體人機介面(圖 3.1.7)下指令，可調整、控制 RTDS 系統上各個元件。RTDS 實體如圖 3.1.8 所示。



Data source: Technical University of Denmark

圖 3.1.6：RTDS 硬體架構建立示意圖



Data source: Technical University of Denmark

圖 3.1.7：人機介面

同步調相機加入系統後，除電磁暫態響應用 RTDS 實作確認外，其他特性是否符合系統需求，則須透過電力系統模擬軟體驗證，此部份將於下一小節說明。

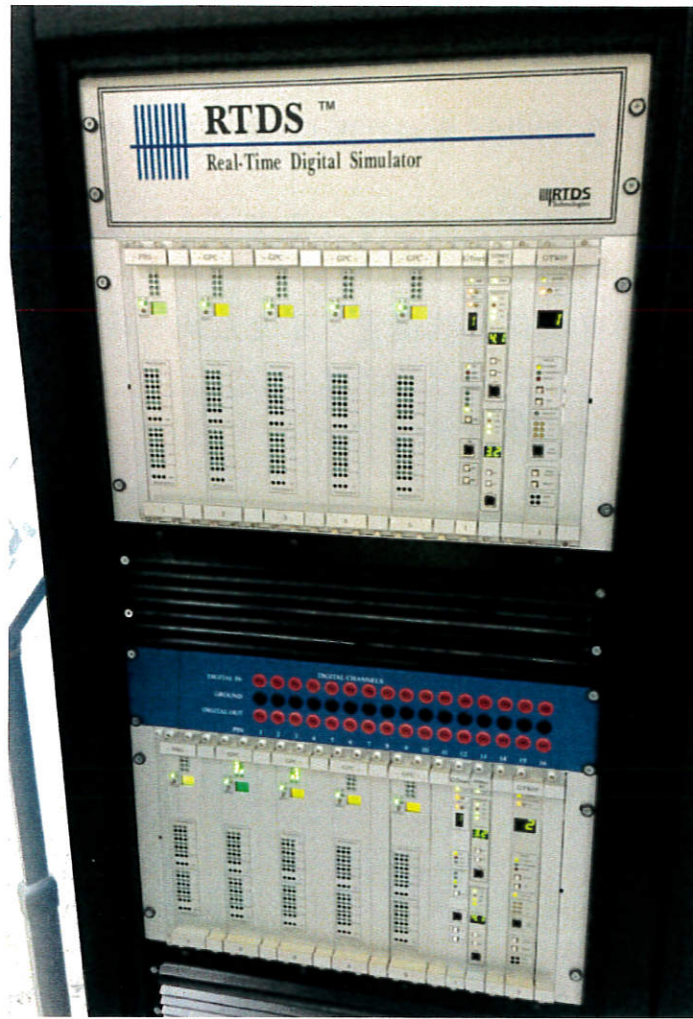


圖 3.1.8：即時數位電力系統模擬器(RTDS)

(三) 模擬情境與結果

透過分析西丹麥 400kV 系統(DK1)，建立不同模擬情境(如圖 3.1.9)，探討同步調相機在這些系統情境下，是否對系統有所助益。經模擬發現，同步調相機因有提供系統慣量，可使系統頻率每秒變化率縮小，有助提升系統暫態穩定度。

針對西丹麥 400kV 電力系統，Base Case (Case (a))能源負載結構為傳統火力發電 873MW，風力發電 3269MW，負載 2936MW；Case (b)能源負載結構為高風力發電高負載，傳統火力發電降至 750MW，風力發電維持 3269MW，負載提升至 3957MW；Case (c) 能源負載結構為同樣是為高風力發電高負載，惟傳統火力發電降至 0MW，風力發電與負載維持與 Case (b)一樣；Case (d) 能源負載結構同樣是為高風力發電高負載，與 Case (c)一樣，惟 Case (c)係由西丹麥系統輸出電力至挪威系統，Case (d)則調整由挪威系統輸入電力至西丹麥系統；Case (e)能源負載結構為為低風力發電低負載，傳統火力發電 0MW，風力發電 2395MW，負載 2055MW。

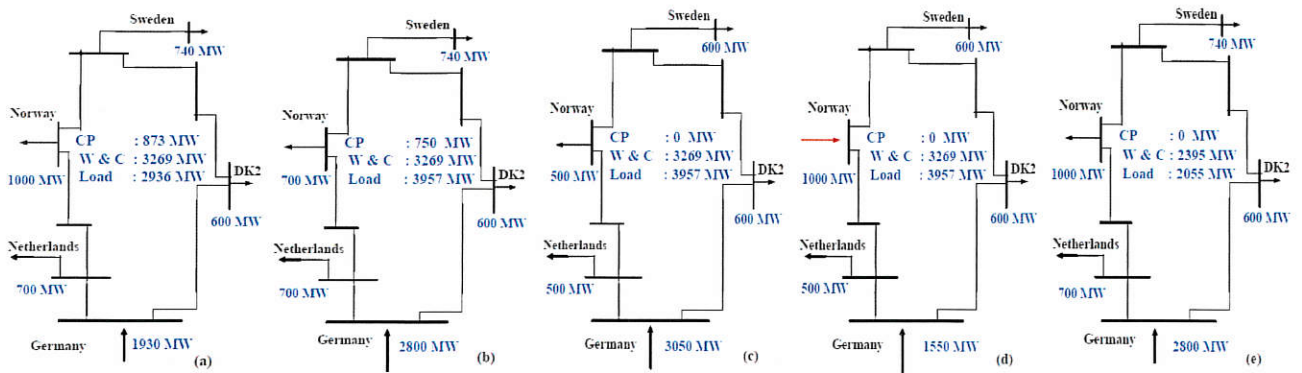


Fig. 6. Case-study scenarios (CP: central production. W & C: wind and coastal production). (a) Base case. (b) HLHW with 3 SGs. (c) HLHW no SGs, exporting to Norway. (d) HLHW no SGs, importing from Norway. (e) LWLL.

Data source: H. T. Nguyen, G. Yang, A. H. Nielsen and P. H. Jensen,
"Combination of Synchronous Condenser and Synthetic Inertia for Frequency
Stability Enhancement in Low Inertia Systems," in IEEE Transactions on
Sustainable Energy.

圖 3.1.9：西丹麥系統模擬情境

經模擬分析發現，在各種情境下，有同步調相機的電力系統，系統慣量較無同步調相機的電力系統大，系統的頻率響應較平穩，頻率變化率也較小，系統暫態穩定度表現也較佳。

圖 3.1.10 為 Case (a) 的西丹麥系統在擾動發生後系統頻率響應、ROCOF 及同步調相機輸出功率響應，表 3.1.1 為各情境系統慣量 $H(s)$ 與 ROCOF(Hz/s) 的模擬結果。

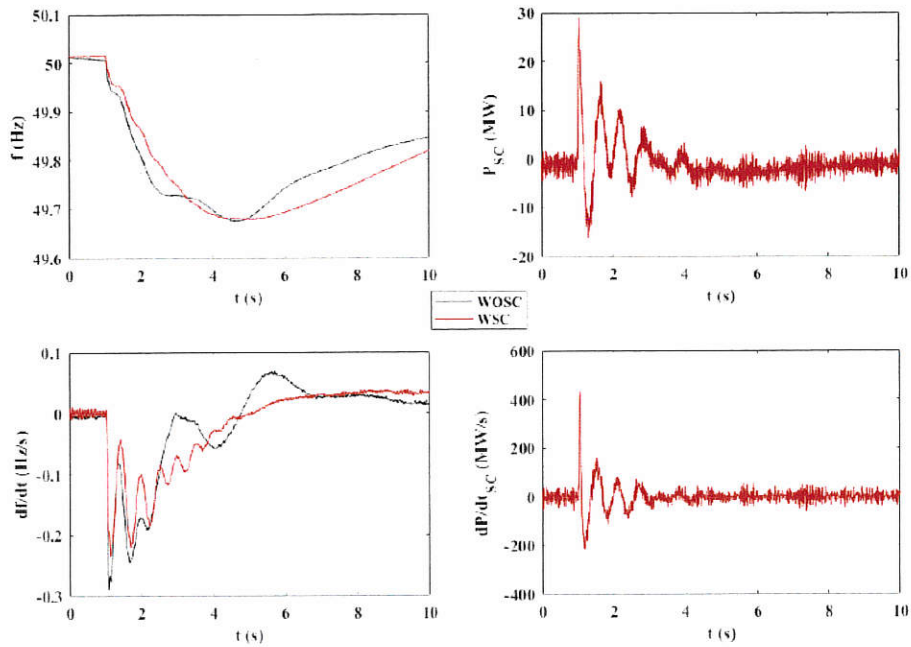


Fig. 7. System frequency, ROCOF, and SC responses during a disturbance of base case.

Data source: H. T. Nguyen, G. Yang, A. H. Nielsen and P. H. Jensen, "Combination of Synchronous Condenser and Synthetic Inertia for Frequency Stability Enhancement in Low Inertia Systems," in IEEE Transactions on Sustainable Energy.

圖 3.1.10：Case (a)模擬結果

表 3.1.1：各模擬情境系統慣量 H(s)與 ROCOF(Hz/s)模擬結果

Data source: H. T. Nguyen, G. Yang, A. H. Nielsen and P. H. Jensen, "Combination of Synchronous Condenser and Synthetic Inertia for Frequency Stability Enhancement in Low Inertia Systems," in IEEE Transactions on Sustainable Energy.

-	Cases	(a)	(b)	(c)	(e)
H (s)	WOSC	6.53	5.42	4.54	8.76
	WSCs	7.46	6.1	5.52	10.63
ROCOF (Hz/s)	WOSC	-0.26	-0.45	-0.56	-0.43
	WSCs	-0.23	-0.41	-0.45	-0.36



圖 3.1.11：與 DTU 教授合影

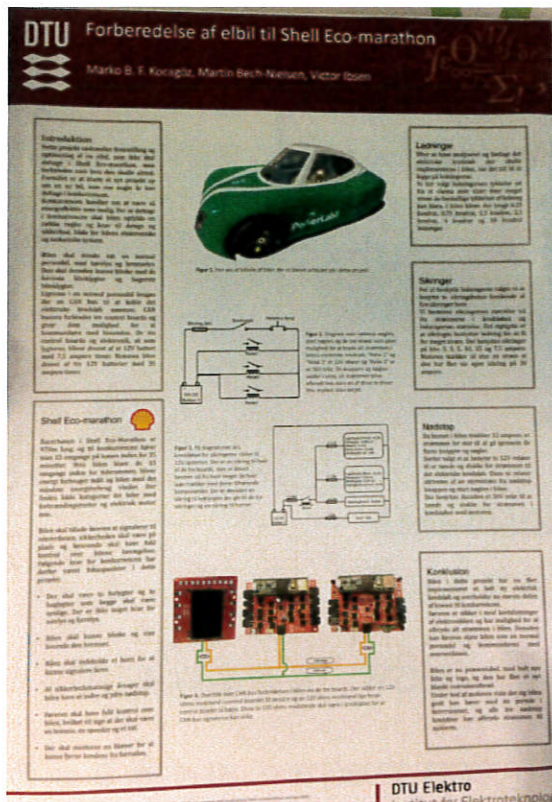


圖 3.1.12：DTU 研發參加電動車馬拉松比賽的車

二、歐洲電網檢討分析說明

(一) 丹麥電力系統簡介

丹麥境內交流輸電線路電壓等級有 60kV、132kV、150kV、220kV 及 400kV 共五種，所有輸電網路總長度合計共 6,913 公里，與鄰近國家互聯點有 5 個，如圖 3.2.1 所示。



Data source: ENERGINET

圖 3.2.1：丹麥輸電系統簡圖

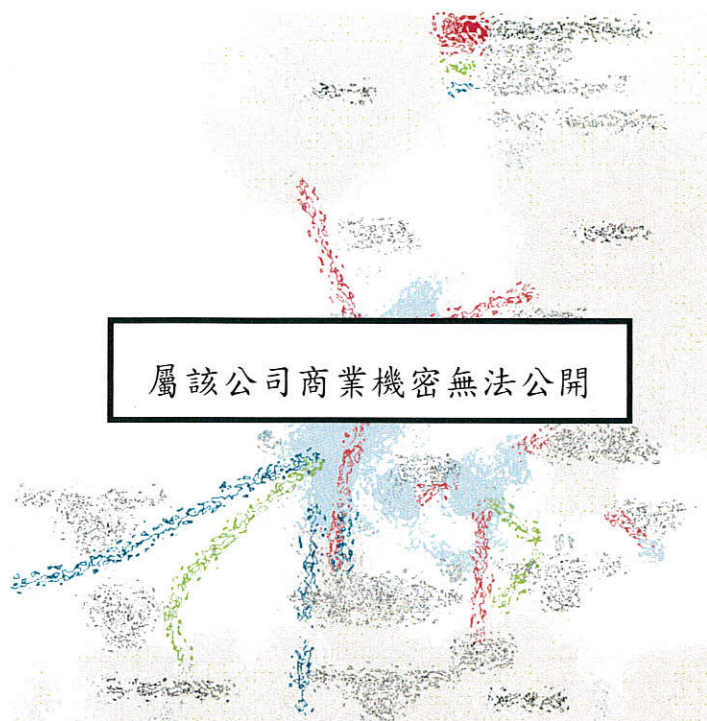
如表 3.2.1，丹麥全國裝置容量約 13.15GW，東丹麥約 4.75GW，西丹麥約 8.4GW。東丹麥負載約 0.9GW~2.5GW，西丹麥負載約 1.4GW~3.5GW，較東丹麥重，兩者合計尖峰負載約 6GW(冬季)。

表 3.2.1：東丹麥及西丹麥系統

Data source: Technical University of Denmark

DK west	DK east
Central power plants 2250 MW	Central power plants 2900 MW
Local CHP plants 2000 MW	Local CHP plants 650 MW
Wind turbines 3700 MW	Wind turbines 1000 MW
Photovoltaic 450 MW	Photovoltaic 200 MW
Consumption 1400 - 3500 MW	Consumption 900 - 2500 MW

丹麥國土面積與台灣接近，如圖 3.2.2 所示，跟台灣最大的不同是其電網與鄰近國家有互聯，可透過電力交易市場進行電力買賣，另因丹麥的家庭及公司沒有吹冷氣的習慣，尖載係發生於冬季大家在室內開暖氣的時候。



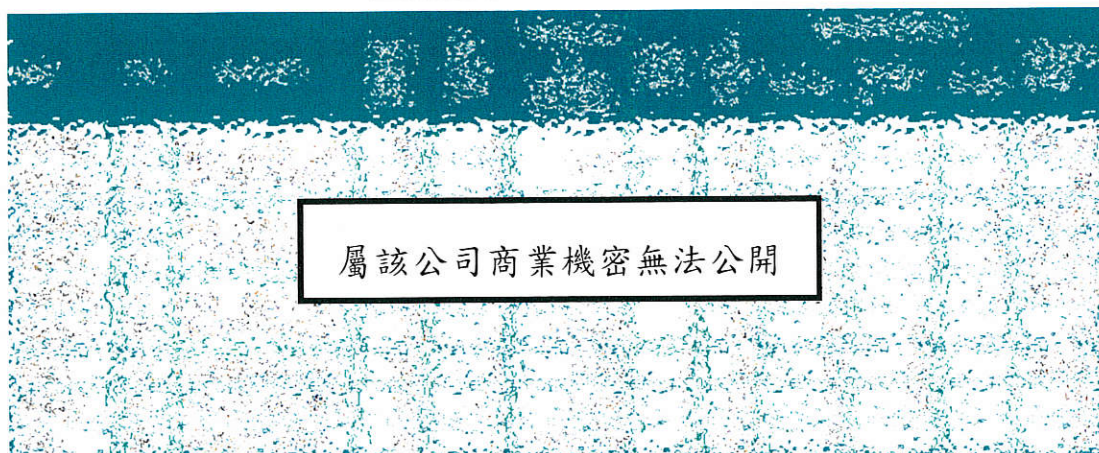
Data source: ENERGINET

圖 3.2.2：丹麥電力系統

丹麥電力系統頻率為 50Hz，由兩個子系統構成：西丹麥與東丹麥，西丹麥電力系統如圖 3.2.3 所示，係由日德蘭半島與菲因島組成，其電網與北歐的挪威及瑞典以 HVDC 輸電線互聯，與歐洲的德國以 400kV 的 HVAC 輸電線互聯，故屬於歐洲大陸系統，另有與英國及與荷蘭互聯的輸電線路正規劃中；東丹麥主要由西蘭島構成，丹麥首都哥本哈根即位於東丹麥，其電網與歐洲的德國以 HVDC 輸電線互聯，與北歐的瑞典以 400kV 的 HVAC 輸電線互聯，故屬於北歐(NORDEL)區域系統；東丹麥與西丹麥則以 HVDC 輸電線互聯。表 3.2.2 為丹麥電網目前所有運轉中的 HVDC 輸電線。

表 3.2.2：丹麥電網目前運轉中的 HVDC 輸電線

Data source: ENERGINET



丹麥風力發展得很快，從 1987 年開始發展風力發電，1991 年完成第 1 座陸域風場，2001 年開始發展離岸風場，以下列出幾個里程碑：2013 年 12 月 21 日，風力發電佔比達負載的 102%；2014 年 1 月，風力發電佔比達負載的 63.3%；2015 年 7 月 9 日的某一小時，風力發電佔比高達負載的 140%；2017 年，風力發電竟佔了總發電量的 43.4%，逼近總發電量的一半。有了這些實績，丹麥政府對未來再生能源發展，訂定了更大的目標：在 2020 年以前，風力發電必須能供應系統 50% 的負載；在 2030 年以前，風力發電必須能供應系統 55% 的負載；在 2050 年以前，丹麥必須不再仰賴化石燃料發電。

為因應這麼大量的風力發電，電網公司在電網規劃及運轉上必須要有更充分的準備，以下介紹丹麥電網規劃所使用的電力系統分析軟體及其規劃方式。

(二) 丹麥電網規劃

跟本公司類似，ENERGINET 也有規劃單位及調度單位，亦依循其電源併網規範及電源電網運轉操作準則等相關法規，進行系統檢討，另其電力市場機制則已非常成熟，可作為其電力調度上的運轉籌碼。

其規劃部門所使用的電力系統分析軟體 DIgSILENT PowerFactory，該軟體可與線上系統整合同步，結合系統模擬與實際情境，進行秒、分、小時等各種時間長度的分析(如圖 3.2.4)。

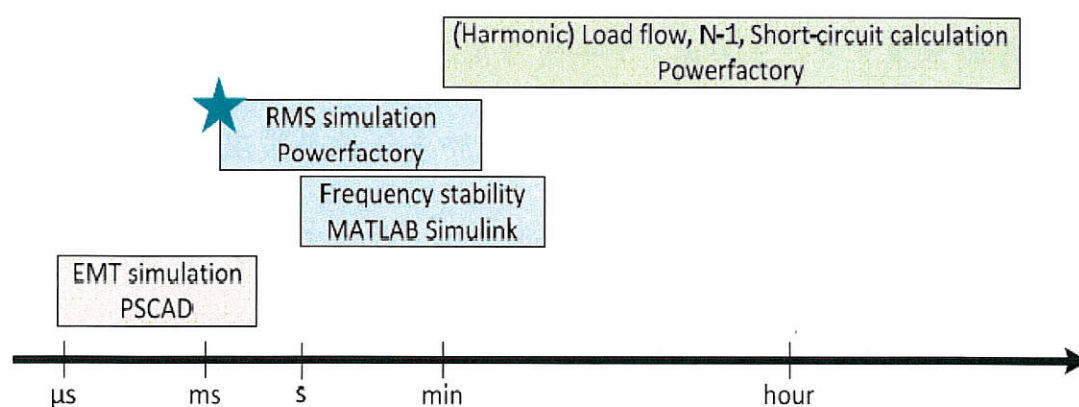


圖 3.2.4：ENERGINET 各時間長度所使用的分析軟體

Data source: ENERGINET

DIgSILENT PowerFactory 可用來建立與實際系統接近的虛擬系統，變電所的斷路器及隔離開關 DS 都有直接可以用的模組，所以模擬結果非常貼近系統實際狀態。該軟體俱備公司使用的 PSS/E 電力系統分析軟體功能，可用來分析系統電力潮流、短路電流、事故模擬、穩定度等項目，不同的是，因該軟體與實際系統有通訊連結，故該軟體執

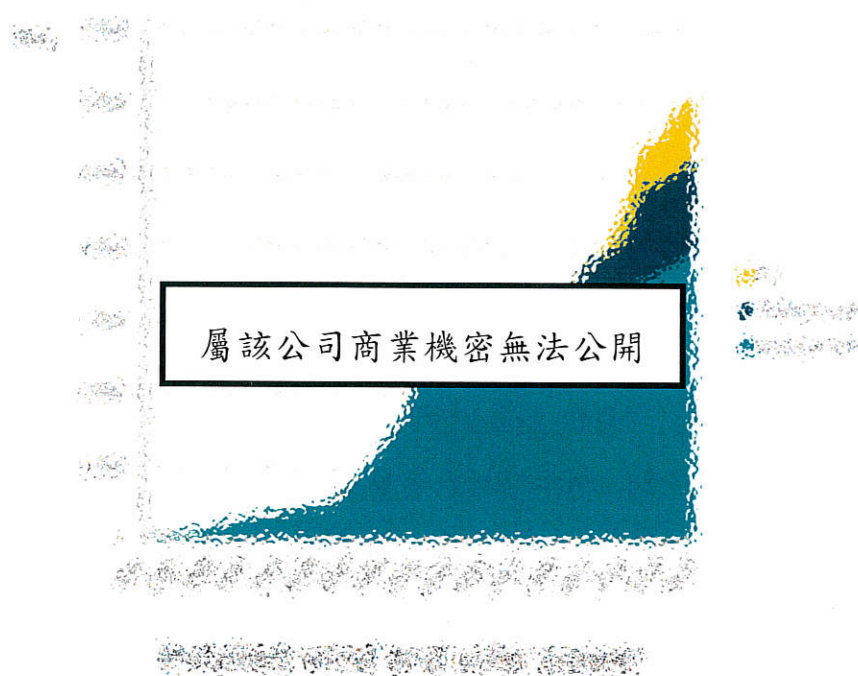
行分析時，亦可藉由偵測目前系統狀態，判斷是否需轉到其他軟體來執行更短時間的分析，例如系統發生短路故障時，該軟體可自動切換至其他動態或暫態分析軟體執行分析，待故障清除後再切回 DIgSILENT PowerFactory，模擬結果可直接供調度人員參考，有助於調度人員更了解系統狀態，輔助其下達更正確的操作指令。

在檢討新加入的風場併網對丹麥電力系統的影響時，ENERGINET 的電網分析人員從風場加入系統當年度開始，利用 DIgSILENT PowerFactory 對丹麥電力系統進行全年每小時的掃描分析，確認未來 1 年、2 年後、5 年後乃至於 10 年後，該風場併入丹麥電力系統後系統是否可穩定運轉，而對於系統中既設風場之出力假設，係利用風場出力歷史實績及風能預測系統，以設定每小時風場出力。

三、丹麥能源轉型目標及策略

(一)丹麥能源發展目標

丹麥位於北歐緯度較高，冬季時其日照狀況並不優良，因此丹麥再生能源一開始的發展主要以風力發電為主，截至 2017 年底丹麥的風力發電裝置容量已超過 5GW，目前已裝設風力發電以陸域風電為主，近年來離岸風電裝設占比快速增加，而由於太陽光電技術進步及發電效率提升，丹麥也開始建置太陽光電，截至 2017 年底其裝置容量接近 1GW，惟丹麥以設置之太陽光電案場規模較小，目前丹麥地區所有太陽光電案場皆併接於配電系統，尚無併接輸電系統案例近期也無併接輸電系統之太陽光電案場計畫。



Data source: ENERGINET

圖 3.3.1：丹麥再生能源裝置情形

2017 年丹麥電力系統供應能量來源中風力發電佔了約 43%，太陽光電也佔了負載需求的 2%，為首次再生能源發電佔比超過火力電廠出力，部分時段其風力發電量甚至已可超過一半的負載需求，再生能源已成為丹麥電力的重要供應來源。

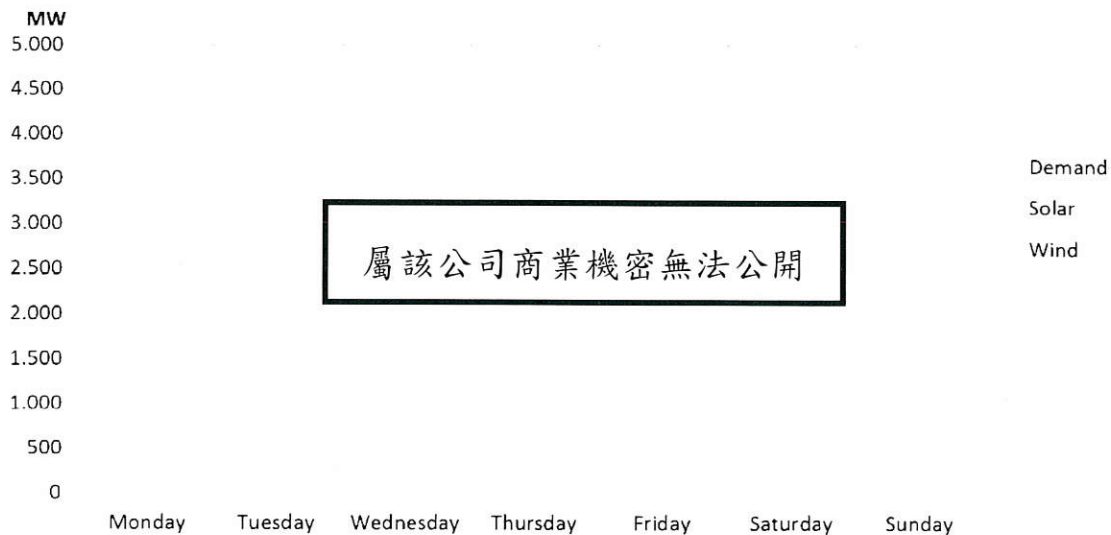


Data source: ENERGINET

圖 3.3.2：丹麥 2017 年負載需求能量來源

A WEEK IN SEPTEMBER

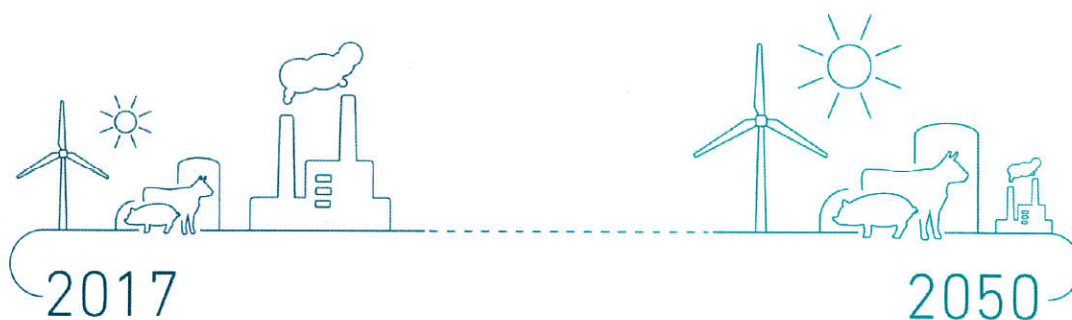
— ENERGY DEMAND —



Data source: ENERGINET

圖 3.3.3：丹麥 2017 年再生能源佔一半以上負載需求

但丹麥在綠能的推動上仍持續前進，2018 年丹麥政府出版 Energy-for a green Denmark，報告中說明了政府的綠能目標，丹麥政府期望在 2030 年能達到 55% 的電力需求能源來自再生能源，甚至在 2050 年時能使所有的電力需求全部 100% 都從再生能源取得。



Data source: ENERGINET

圖 3.3.4：丹麥能源轉型目標示意圖

隨著風機技術的提升及其開發成本的下降，風力發電所生產的電能越來越具有競爭力，風機保證收購價格價格也從2010年的每度1.05克朗/度(øre/kWh)，2016年降至0.37克朗/度(øre/kWh)。



Data source: ENERGINET

圖 3.3.5：丹麥風電收購價格

風機的建置成本逐年降低，陸域風電的建置成本甚至已低於傳統火力發電的建置成本，雖然目前離岸風電及太陽光電的建置成本仍比傳統火力發電的建置成本高，但傳統火力發電須考量空氣汙染成本、燃料成本等等，而再生能源則是另外要考慮是電力平衡的成本，綜合考量下來在丹麥建置再生能源所需要花費的成本可低於傳統火力發電廠，雖然目前離岸風場的建置成本仍偏高，但隨著技術不斷的精進，及傳統火力發電所帶來空氣汙染成本的提升，未來離岸風電的建置費用也將越來越具有競爭力。



屬該公司商業機密無法公開

Data source: ENERGINET

圖 3.3.6：丹麥風電收購價格

綜上述，若再生能源的成本低於傳統火力發電，電力市場機制將可大力協助丹麥於能源轉型上儘快將所有排碳的傳統火力電廠於電力能量來源中淘汰，而丹麥輸電網營運公司 Energinet 如何在高佔比再生能源電力系統中維持其供電穩定，以及在面對未來百分之百皆為再生能源的電力系統該如何因應，以下將進行說明。

(二)丹麥能源發展策略

雖然丹麥間歇性再生能源佔比高，但其供電品質仍相當可靠，過去 10 年來每個用戶每年停電時數小於 50 分鐘，此表現在歐洲算是名列前茅，Energinet 將其長期能源轉型的成功經驗歸納成下列四點，未來面對百分之百零排碳的電力系統該如何因應，也將持續從這四個面向進行更深入的努力。

1. 強健的電力網路
2. 互聯的電力交易市場
3. 靈活且可控的發電系統
4. 專精的發電預測及完善的調度系統



Data source: ENERGINET

圖 3.3.7：歐洲地區停電概況

1.強健的電力網路

首先第一點是相當關鍵的，前面章節已提及丹麥為互聯電力系統，目前丹麥有多個與鄰國電力系統互聯的長程輸電線路，包含挪威、瑞典、德國及荷蘭皆有與丹麥互聯的輸電線路，利用這些輸電線路可將所需或多餘的電力進行輸送，如丹麥的鄰國挪威，其發電系統以水力發電為主，透過這些長程輸電線路，可以供給鄰近國家即時所需的電力調節服務，互聯的電力系統越大，可調度傳輸的電能就越多，於高佔比再生能源電力系統頻率控制上難度也較低。

而 Energinet 表示未來面對百分之百的再生能源電力系統，除了目前既有的跨國互聯輸電線路外，更期待未來能建置一個更大的，跨全歐洲的電力網路，透過這樣的大型電網，可利用再生能源發電的差異性，如北歐地區主要的再生能源為風力發電或是挪威的水力發電、南歐的太陽光電以及中歐的生質能，透過這樣的大型電力網更有效地將全歐洲的再生能源進行運用。如此大規模的電力網路，勢必需要耗費極大的成本，但 Energinet 表示若能妥善運用整個歐洲的再生能源，且維護供電可靠度，這樣的電網投資是值得的。

屬該公司商業機密無法公開

Data source: ENERGINET

圖 3.3.8：大歐洲電網傳輸概念

丹麥兩年前仍會希望電力系統中能保有大型傳統火力電廠併網，然而並非是為了實功的需求，其實功需求可透過互聯電網滿足，主要是因為大量再生能源併網系統慣量降低，且多個長程輸電線路於投切時需要足夠的短路容量，舊的風力機組將吸收大量虛功，為了在不使用傳統火力電廠的情況下因應此狀況，同步補償器開始設置於這些長程輸電線路周邊，可改善前述問題並可協助電力系統穩定，因此大型傳統火力電廠維持運轉的必要性降低，其電能收購價格也不斷降低，2017 年大型傳統火力電廠不再 24 小時內皆維持併網。



屬該公司商業機密無法公開

Data source: ENERGINET

圖 3.3.9：丹麥大型傳統火力發電變化

2.互聯的電力交易市場

丹麥自 1985 年開始大量開發再生能源，當時丹麥仍是綜合電業，歷經數十年其電力交易市場及制度已趨完善，可透過電力交易市場向鄰國購買及販售電能，丹麥的即時電價有兩個系統分為東部和西部，在部分電力過剩的情況下會產生負電價，若此時發電業者繼續發電將需要支付費用給電網公司，丹麥前一日電力交易市場(Day ahead)大概有 500TWh 的電力交易量，前 45 分鐘的電力交易市場大概有 2TWh 的電力交易量。透過這樣的電力交易市場，可購買到所需要的電能及輔助服務，確保電力系統的運轉調度安全。

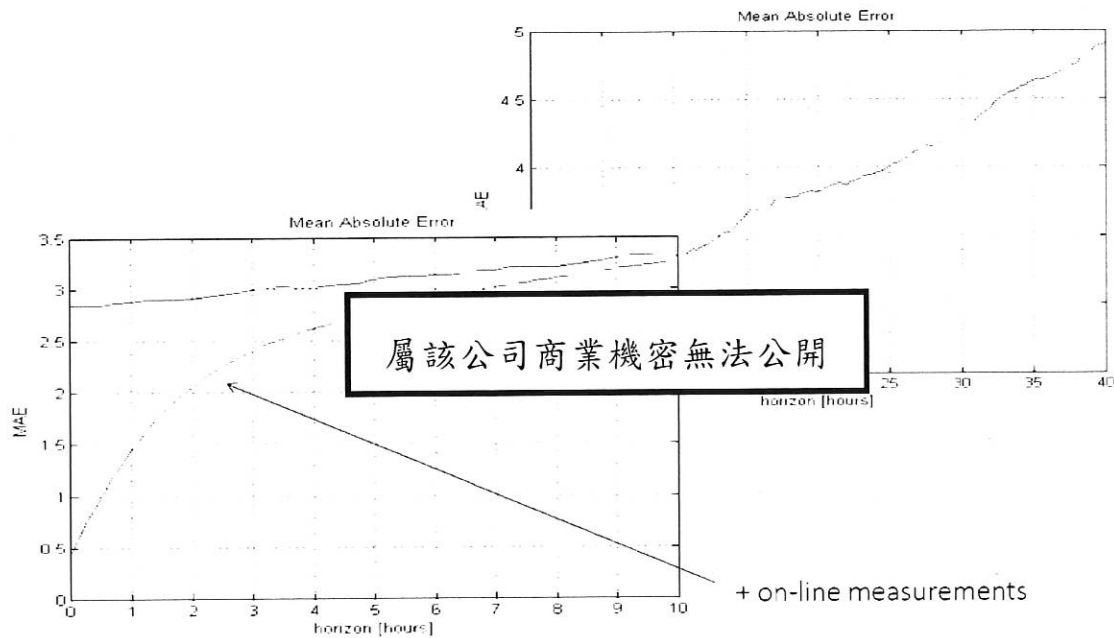


Data source: ENERGINET

圖 3.3.11：丹麥 Esbjergvaerket 汽電共生發電廠

4. 專精的發電預測及完善的調度系統

丹麥目前 40 分鐘前的出力預測誤差大概是 5%，配合使用即時的運轉資訊來做出力預測的微調，可降低其出力預測誤差，主要預測的是全國風力發電的一個預測狀況，丹麥預留的備轉容量約為 700MW，主要是因應電系統發生 N-1 情況下，少一台發電機的時候的頻率調節，透過這樣的預測系統調度人員可提早知道可能會有的電力過剩及電力缺口狀況，並透過電力市場交易提早取得需要的且較便宜的電力，若時間越接近交易時間才進行電力的買賣，價格通常會較為昂貴。



Data source: ENERGINET

圖 3.3.12：風力發電預測

藉由上述四點可確保目前電力能量來源約一半來自再生能源之電力系統穩定，此為水平整合，但未來要達到未來零排碳的能源政策，可能還要做一個垂直的整合，包含儲能系統、即時智慧化的電力市場交易、新的電力市場交易模型、不同能源的整合(包含電力瓦斯等)，甚至深入用戶端進行電力整合。零排碳的電力系統是全新且充滿挑戰的，即使如同丹麥這樣大型的互聯電網仍舊充滿著許多挑戰需要克服，解決對策歸納為更有效率的能源整合，不論是同類別不同區域的電能整合或是不同類別的能源整合，以及更有智慧的電力系統，將可協助運轉人員進行更有效率的運轉調度作業，未來充滿著不確定性但也充滿著各種可能。

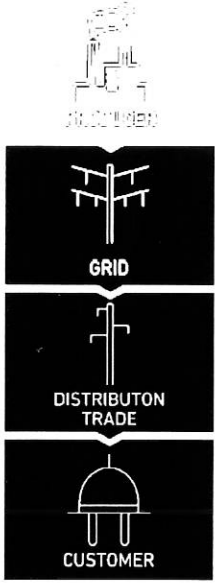
屬該公司商業機密無法公開

- The energy value chain is transforming
- The energy value chain is transforming
- The energy value chain is transforming
- The energy value chain is transforming
- The energy value chain is transforming

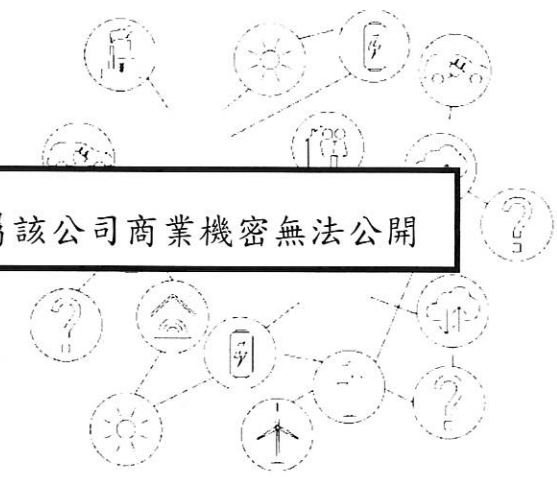
Data source: ENERGINET

圖 3.3.13：零排碳能源政策方向

THE ENERGY VALUE CHAIN IS TRANSFORMING



屬該公司商業機密無法公開



Data source: ENERGINET

圖 3.3.14：能源轉型

四、再生能源併網

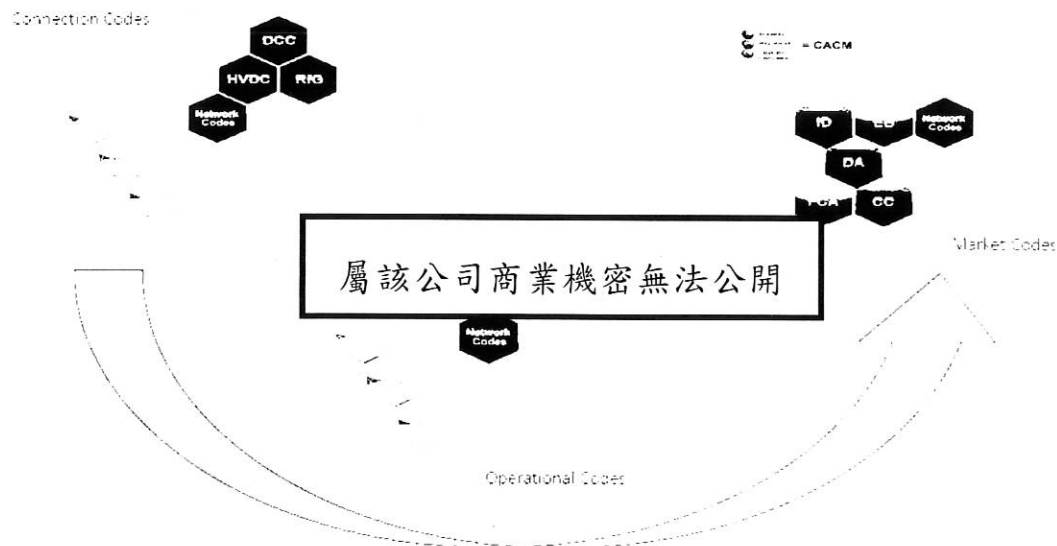
於丹麥若欲開發再生能源案場，則再生能源開發商需提交詳細電廠開發計畫給電網公司，包含設置場地資料、發電機組資料、相關電器設計、保護電驛設計資料、設備驗證資料等，電網公司將評估其可併網的期程及所需要的成本，這部分跟台灣再生能源申請併網有部分差異，因以離岸風場開發案為例，其海上拼接點(海上變電站、輸出電纜)由電網公司統一規劃設計及建置，因此需要由電網公司提出所需的成本及完工時間，而在台灣除非有需要加強電力網的再生能源併網案件，若電力系統已有併網欲度，則可是再生能源開發商的期程規劃，彈性決定其預計併網商轉的時間。



圖 3.4.1：丹麥再生能源併網流程

而從前面的併網申請概述上可發現少了再生能源案場併網審查這一部份，原因主要是丹麥有相當完整的併網規範，且併網規範不主要是依據併網電壓層級而有不同的規定，不論是再生能源還是傳統電源，併網的規範要求是相同的，除了講述技術面的併網技術規範(HVDC、DCC、RfG)厚達數百頁，各規範要求及設計方式皆已明確說明外，電力市場法規(電力市場一日前市場，整個北歐電網的電力市場交易制度)及運轉規範(怎麼運轉調度之類的)皆訂定的相當完善，因此再生能源開發商只需要依據相關規範進行其再生能源案場設計，即可確保其再生能源岸場併網可維持電力系統的穩定。

Grid Codes – Ensuring flexibility and grid support

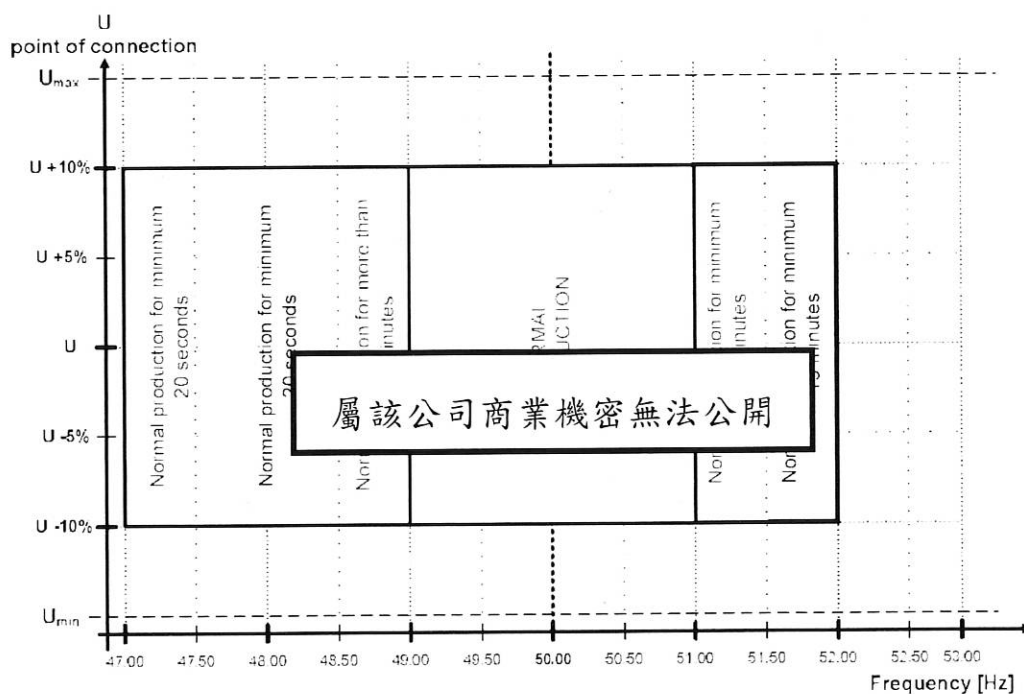


Data source: Energinet

圖 3.4.2：丹麥電力系統規範

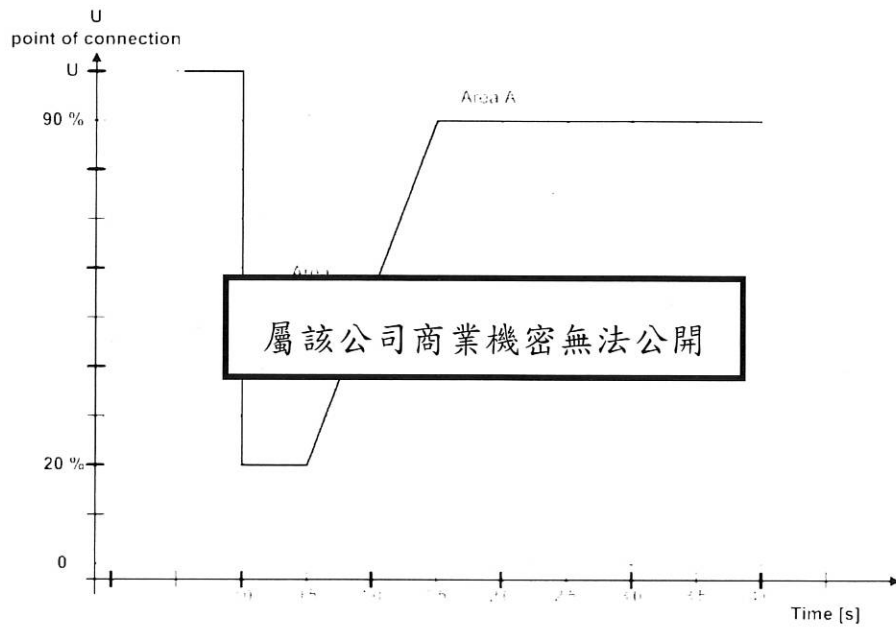
但並非發電設備併網都不需要進行詳細的電力系統檢討評估，最主要的是根據該發電設備的併網容量，在檢討上有不同的方式，而在用戶負載需求檢討上也是依據用戶用電需求容量進行檢討，目前依據發電設備併網容量大小/用戶用電需求容量，有下述四個個層級，包含：

(1) 0.8kW~125W、(2) 150kW~3MW、(3) 3MW~25MW、(4) 超過 25MW，基本上超過 25MW 通常是併接在輸電系統，都需要有更進一步的檢討分析報告，而併網規範只是最低至少要遵守的標準實際運轉上通常會有更為嚴格的要求，例如電壓變動於規畫面可能允許到 10% 的變化，但在實際運轉面則只允許 2% 的一個變動。



Data source: Energinet

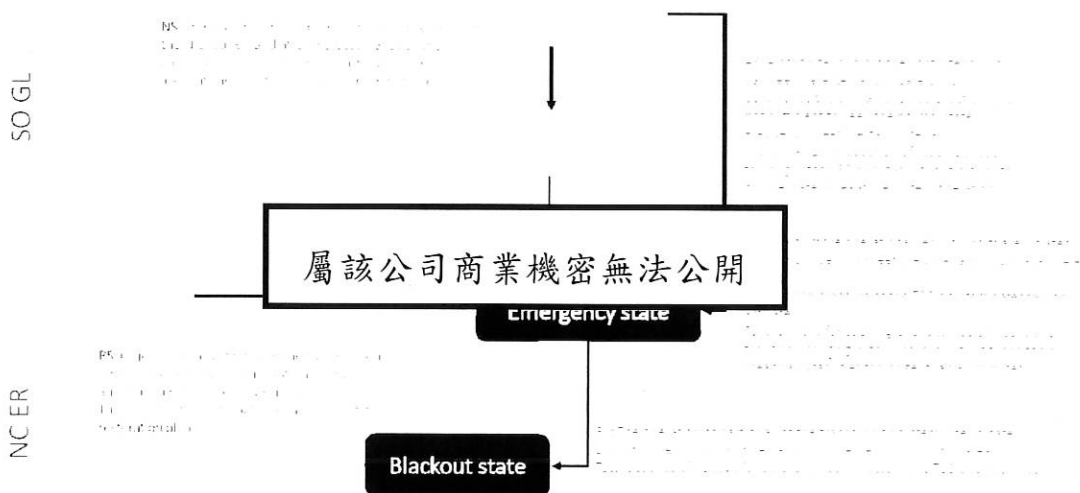
圖 3.4.3：丹麥頻率控制規範



Data source: Energinet

圖 3.4.4：丹麥電壓持續運轉規範

而再生能源或是其他發電設備併網時，電網公司考量的情境除了一般穩態的情境外，還有全黑事故及緊急狀況等共五種情境需要考量。



Data source: Energinet

圖 3.4.5：丹麥檢討考量情境

另外由於丹麥有健全的電力市場交易制度，因此透過電力市場及時電價的改變，或是從電力市場可購買到的輔助服務，利用價格確保電力系統中存在其需要的商品，即確保其運轉上所需要的調度空間，Energinet 表示為了使電力市場更具競爭力及配合其能源轉型目標，耗費幾十年的時間從綜合電業轉化成一個制度完善的電力交易市場成員之一，這對原有電力調度及電網規劃人員將有非常大的改變，且將有更多的問題需要被克服，但一個成功的且足夠多元的電力交易市場是可以做為解決電力系統問題的手段之一，像是透過電力市場的實功交易可改變電力系統潮流方向和系統頻率，因此即使丹麥是高佔比的電力系統，在電力系統的頻率控制上卻不是丹麥電力調度人員最為擔心的問題，因為他們整個電力市場是市場自由化的，藉由輔助服務來確保發電和用電需求間的平衡，如：初級控制、次級控制、手動、其他輔助服務系統慣量和全黑啟動等。

ANCILLARY SERVICES

Ancillary services ensures reliability in supporting the transmission of electricity (active power) from generation facilities to customer loads.

Market products	屬該公司商業機密無法公開
Primary reserves	Active & reactive power reserves
Secondary reserves	Reactive power control – fixed Q, PF, Auto PF, Voltage control
Manual reserves	Short-circuit power
Regulating power	Inertia (future requirement) Black start capability

Data source: Energinet

圖 3.4.6：丹麥輔助服務

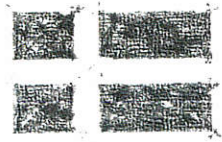
但由於其是全面性開放的電力系統，確實掌握整個電力系統的狀況，將有助於其電力系統整體的運轉安全，諸多的併網規範有大部分都是需要等到實際併網後，透過這些即時傳輸設備監控其發電廠是否可符合相關規範，若不符合將不允許其繼續輸送電能，因此對於再生能源發電廠與電網公司的即時資訊傳輸亦是相當重要的。

當再生能源業者或是其他發電設備業者施工完成，準備併網前，都需要進行完整的併網前測試，測試分成好幾個階段，包含無發電設備併網的情況，少數發電設備併網的情況，或是大於 95%以上發電設備併網的情況。另外因為各國責任分界點都有所差異，因此在電力品質等地測試項目也會有所差異。



Data source: 沃旭能源

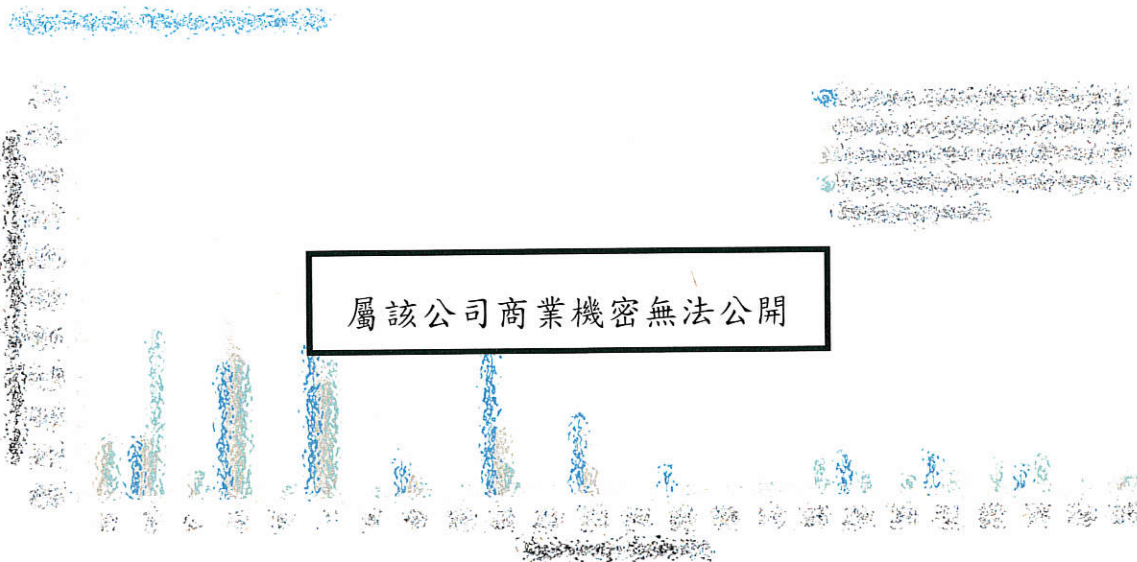
圖 3.4.7：丹麥再生能源併網測試流程



屬該公司商業機密無法公開

Data source: 沃旭能源

圖 3.4.8：歐洲各國併網測試



屬該公司商業機密無法公開

Data source: 沃旭能源

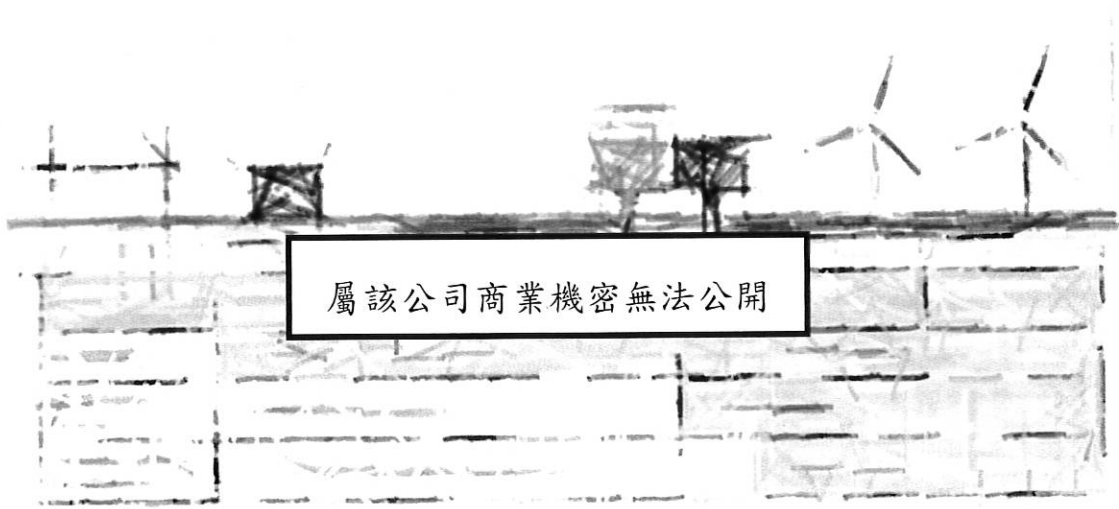
圖 3.4.9：沃旭能源諧波實測範例

隨著再生能源的占比逐年提升，丹麥電網公司或是其能源部，也會固定檢視既有的電網規範，一般來說是四年，但修訂時間從 2 個月~5 年都有可能，最近一次併網規範的修訂約在一年前。而在丹麥要提報一個新的法規，不論是技術類的併網規範或是一些即時運轉的調度規範也需要通過其能源部的核准，如同在台灣提報併聯技術要點的修訂，能源部也會找一些學術專家、再生能源或傳統火力開發商、電器設備商或發電設備製造商共同商討，檢視新提報規範修訂的影響及實際面該如何因應，電網公司需要準備詳細的檢討報告或資料供與會的人員參考。Energinet 表示在提報併網相關規範的修訂上也容易遇到開發商的抗議，因為有時候為了電力系統的運轉安全而設定的規範有增加投資的狀況，站在開發商投資成本的立場通常不希望有過多的法規限制，但為了整體電力系統供電的可靠度，有時候仍需要努力與各方進行溝通。

五、離岸風場開發

(一)離岸風場規劃

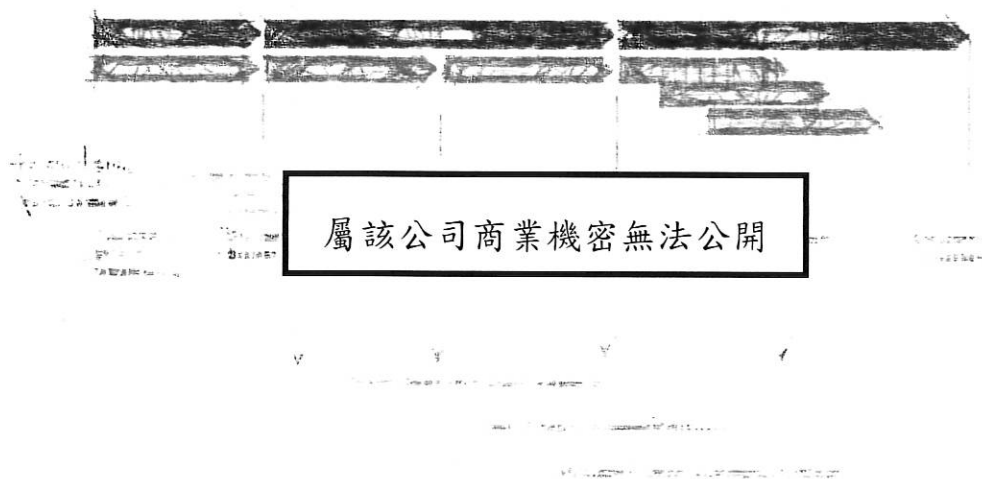
歐洲各國對於離岸風場的責任分界點皆有所差異，丹麥由電網公司負責海上變電站至陸上併接點的工程，離岸風場開發商負責建置離岸風機及陣列海纜，將海纜拉至由電網公司建置的海上變電站低壓側，在英國則是由離岸風場開發商負責建置海上風機、陣列海纜(Array Cable)、輸出海纜(Export Cable)及併接至陸上變電站陸纜，但當建置完成後，海上變電站至陸上併接點將由第三方營運，此部分與台灣較為不同，台灣的責任分界點位在陸上變電站，由離岸風電業者負責由海上至陸上的規劃、建置及後續的營運。



Data source: 沃旭能源

圖 3.5.1：歐洲各國離岸風場責任分界點

在責任分界點上的差異將影響整體離岸風電規劃方向，但離岸風場於開發時主要可分為三個階段，第一階段為分析階段(Analysis)，提出計畫檢視當地併網規範、開發場域情況及電力系統併網可行性並提出初期開發需求，以台灣開發情況來看，系統衝擊檢討分析併通過電力公司審核屬本階段須完成之任務；第二階段為成熟階段(Maturation)此時會針對離岸風場進行細部的設計，若責任分界點在海上變電站則其細部配置設計僅包含風機形式確立、風機排列及陣列海纜(Array Cable)鋪設方式，若責任風界點位於陸上變電站則需考量海上變電站設計方式、輸出海纜(Export Cable)路徑及上岸方式，以台灣開發狀況因責任分界點位於陸上，因此需考量至陸上責任分界點所需之詳細設計工程，若業者電壓與併接點電壓有差異，亦須考量陸上變電站之設計和規劃；第三階段則為實際建置和後續實際併網測試。



Data source: 沃旭能源

圖 3.5.2：開發歐洲離岸風場開發期程

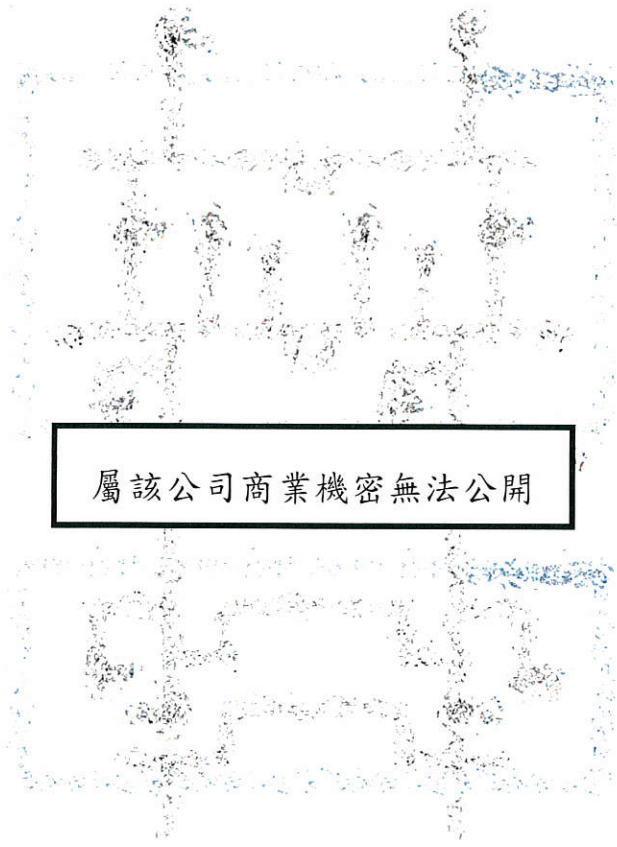


屬該公司商業機密無法公開

Data source: 沃旭能源

圖 3.5.3：開發台灣離岸風場開發期程

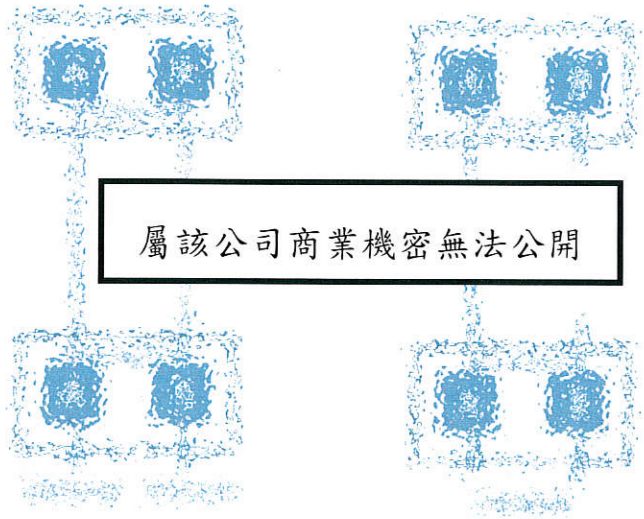
因離岸風場需於海面上建置發電及所需之輸變電設備，海上的建置費用相當昂貴，若希望採用的設備越多，相對也會導致所需承受重量較重，重量是海上電力設施設置的一個重要考量，越大的重量所需耗費的建置費用也越高，此部分與陸上變電站的建置考量差異較大，因此海上電力設施的設計思維與陸上有所差異，基本上海上電力設施在設計上較難以 N-1 做考量，以海上變電站為例，其通常使用單匯流排設計而非雙匯流排，雙匯流排將導致雙倍的承載需求。但海上電力設施若有損壞或是異常狀況而導致無法發電，又將導致大量的營收損失，在不增加過多硬體設備的情況下，離岸風場於設計時會考量若部分電力設施故障，可透過運轉手段，即開關的投切，隔離故障點後亦將電能由另一正常運轉的部分輸送，增加離岸風場運轉的可靠度，因此其電力設備容量考量通常會比額定裝置容量更大，即為因應此種狀況。



屬該公司商業機密無法公開

Data source: 沃旭能源

圖 3.5.4：離岸風場設計單線圖



屬該公司商業機密無法公開

Data source: 沃旭能源

圖 3.5.5：離岸風場 N-1 因應

(二)離岸風場建置

離岸風場主要包含陸上變電站 (Onshore substation)、陸纜、輸出海纜(Export Cable)、海上變電站 (Offshore substation)、陣列海纜(Array Cable)與風機。



Data source: 沃旭能源

圖 3.5.6：離岸風場主要設備

其中海上變電站可分為 4 個部分，Topside、Jacket、J-tube 及 Pile。

1.Topside：

為海上變電站主體，各主要輸變電設備將設置於此處，包含開關設備、變壓器、電抗器、緊急發電機等，而海上變電站在後續運為上難度也較陸上變電站更高，為了能即時抵達海上變電站，以因應特殊突發狀況，通常會於上層甲板設置直昇機停機坪，部分海上變電站也會設置

短期可供運為人員休憩的空間。

2.Jacket :

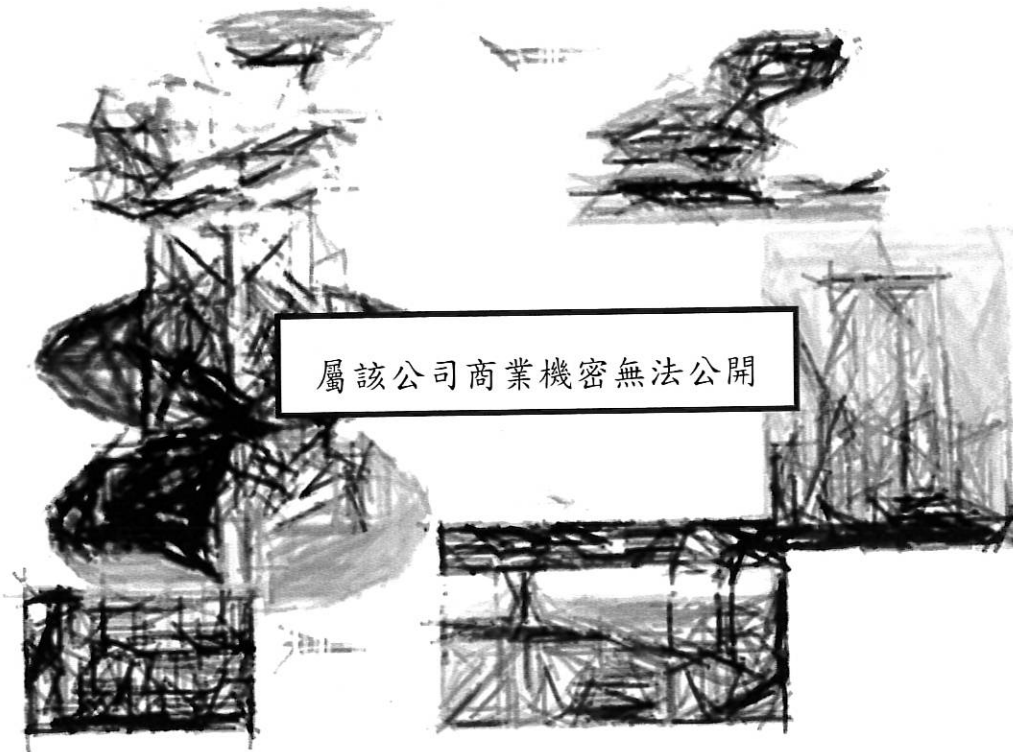
為海上變電站支撐的基礎設施，因海上變電站容易受到強大風力及海流影響，固基礎建置的穩定性相當重要，並且需評估若部分支撐基礎建設受到自然或人為破壞時，如何不衝擊整體結構安全亦是相當重要。

3.J-tube :

像是英文字母J的導管為海纜引接管道，用來確保到海上變電站的海纜能免於受到外在大自然環境的影響。

4.Pile :

為海上變電站打在海床的基樁，需能承受整個海上變電站的重量，且必須能抵上海底水平面造成的水平張力，設置點土質及海流件將對此設計有極大影響。



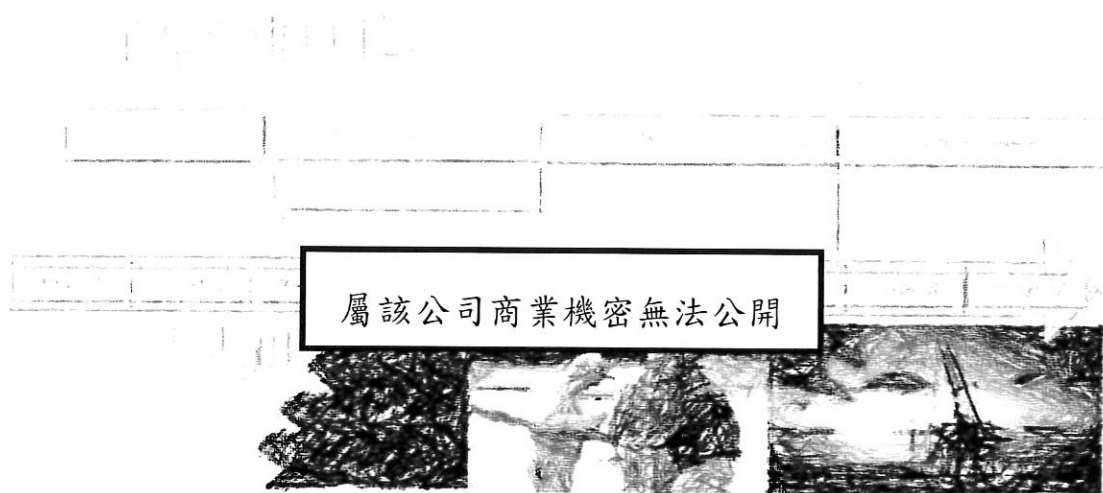
Data source: 沃旭能源

圖 3.5.7：海上變電站

離岸風場的設置通常是先在陸上進行基本的組裝後再將設備利用大型運輸船拖到海上進行建置，因離岸風場的建置其相當依賴海運，因此組裝工廠通常位於碼頭，以方便後續運輸作業，而建置離岸風場包含非常多的設備，這些設備並不會都在相同地點生產和製造，會依造各個零組件的設置進度，由各個區域匯集至最終的組裝廠。

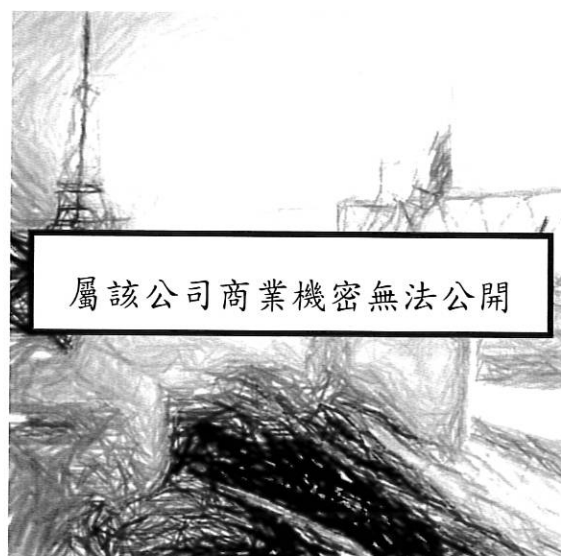
以丹麥電網公司角度其主要負責海上變電站至陸上變電站的工程，當政策拍板定案一個離岸風場計畫後，其約需 1~2 年的時間進行分析及規劃作業，約 2 年的時間取得相關建置同意許可及設備採

購，建置時間約需耗費3年，不過此部分需要是施工地點自然環境和狀況而定，待完成後離岸風電廠海上併網點後，再開始進行離岸風場的併網座及建置作業，一切順利一個離岸風場的建置約需要9年的時間，然而後續的運維問題亦是一個更大的挑戰。



Data source: Energinet

圖 3.5.8：丹麥海上變電站建置期程



Data source: 沃旭能源

圖 3.5.9：海浪衝擊離岸風場海上設施

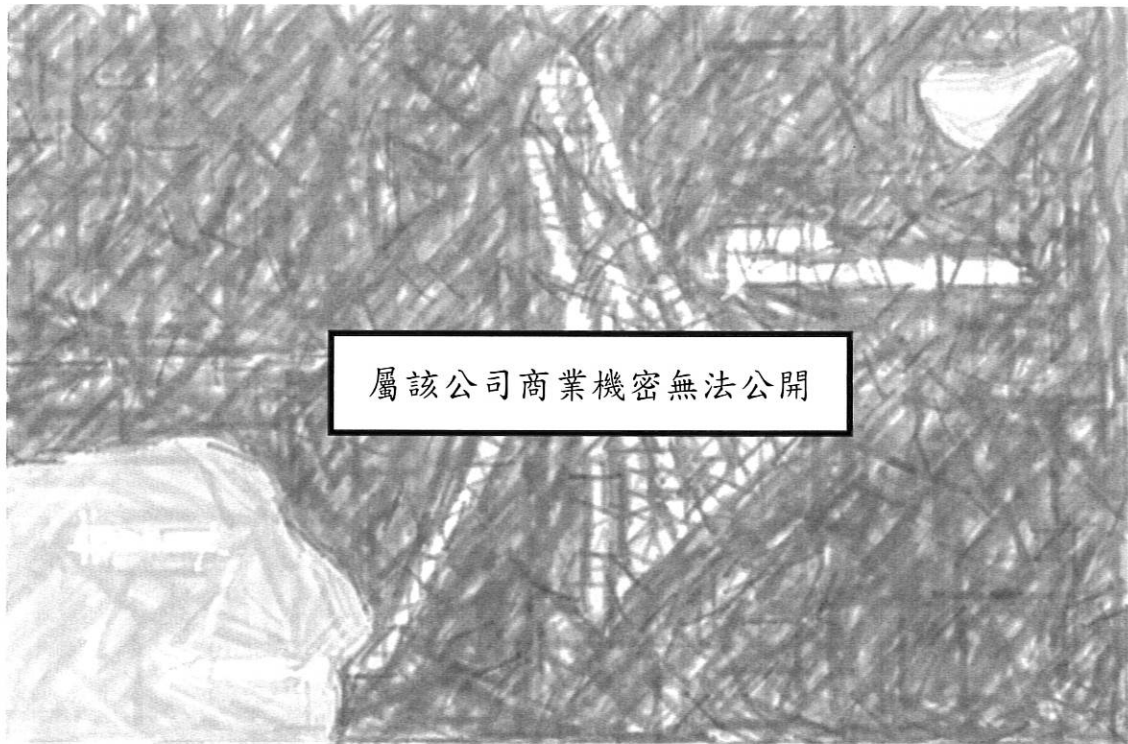
(三)離岸風場實例

這次前往丹麥另一個最重要的目的是希望能參訪已經有充分運轉經驗的離岸風場，本次參訪的是由沃旭能源(持股 50%)、Pension Danmark (丹麥勞工退休基金，持股 30%) 及 PKA (丹麥最大退休基金，持股 20%) 持有 20%共同營運的 Anholt 離岸風電廠，除了沃旭能源外的另外兩個大股東主要是提供該風場資金，主要營運仍交由沃旭能源處理，沃旭能源於離岸風場的開發上大多採這種方式辦理，沃旭能源負責前期的開發建置作業，待離岸風場完工後出售該風場 50%股份，沃旭能源保有 50%持股，且負責後續離岸風場的整體運維作業，獲得的資金可以繼續開發新的離岸風場，沃旭能源認為此經營方式可帶來長期穩定獲益及開發能量。



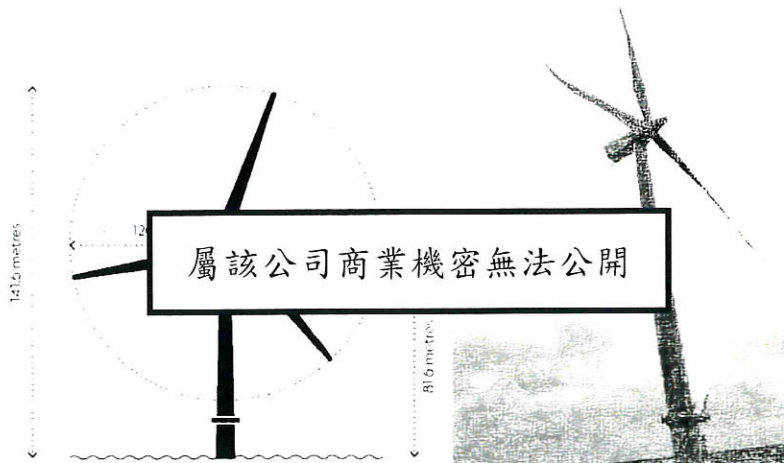
圖 3.5.10：Anholt 離岸風場陸上運維點

Anholt 離岸風電廠建置於丹麥的 Djursland 和 Anholt 島之間，開發面積約 144 平方公里，水深約 5 公里，距離陸上約 15 公里遠，此離岸風場採用 Siemens Gamesa SWT3.6-120 型風機，風機單機裝置容量為 3.6MW，風扇直徑為 120 米，共設置 111 台，風場最大裝置容量約為 400MW，風場可利用率高達 97.5%，Anholt 離岸風電於 2012 年~2013 年建置並於 2013 年夏天正式商轉啟用，其所產生的電能可提供丹麥約 40 萬一般家庭用戶用電。



Data source: 沃旭能源

圖 3.5.11：Anholt 離岸風場地點示意圖



Data source: 沃旭能源

圖 3.5.12：Anholt 離岸風場風機

Anholt 離岸風場鄰近岸邊有沃旭能源的運維站，站內存放離岸風場所需之備品(如備用海纜等)及維修器材並以工具箱裝妥，有需要時可快速直接搬運至船上，另為了提供運維人員良好的訓練，亦於陸上運維站設置訓練塔，可供作業人員定期進行培訓，訓練塔內除了可訓練風機塔內的攀爬訓練外亦包含健身器材，提供員工提升其身體機能。

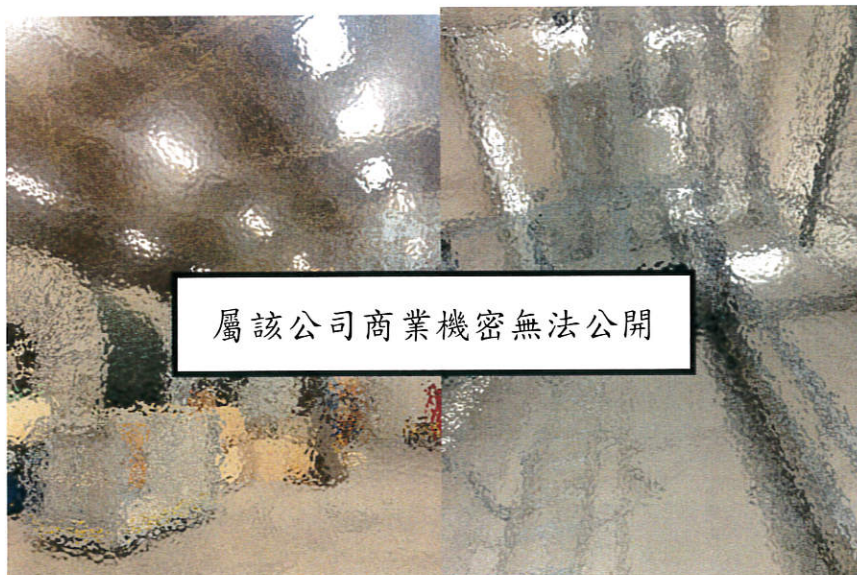


圖 3.5.13：Anholt 離岸風場備品及訓練室

因應離岸風電廠的運為需求，Anholt 離岸風電廠亦備有 3 艘巡修

船，可進行日常所需的維維作業，本次亦實際搭乘此參巡修船前往 Anholt 離岸風電廠參觀，巡修船內相當乾淨且備有小的休憩空間可供運維人員休息，與現場人員交談後得知離岸風電廠運維檢修人員亦可能有暈船現象，出訪當日風象極佳，海上的浪也相當高，船在前進時並不平穩，此次參訪可以體會在海上進行施工及作業難度相當高，且風機於海上裝設、或是要到海上變電站時，若過大的浪不平靜的海象狀況都會影響其作業，甚至使檢修船難以靠近海上變電站，運維人員於海上的安全是相當重要的。

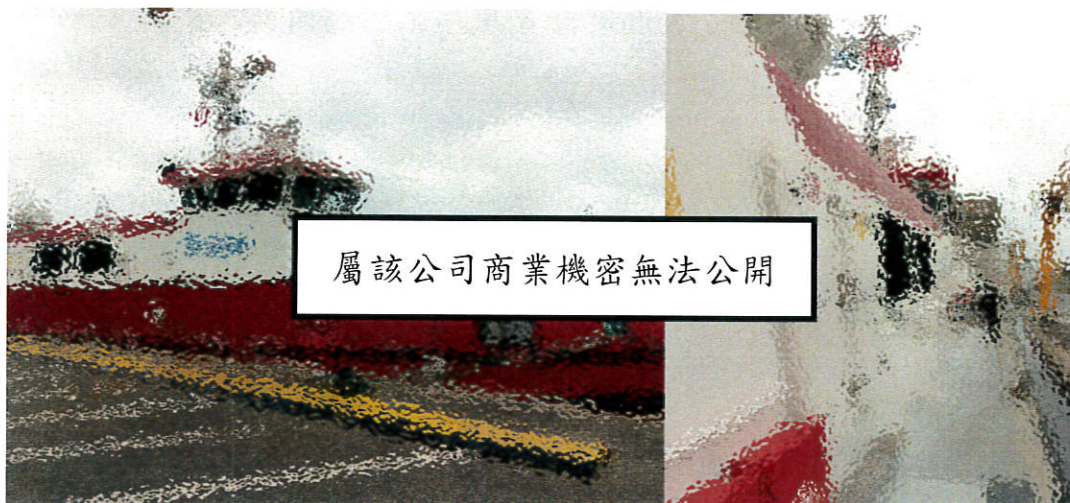


圖 3.5.14：Anholt 離岸風場工作船



屬該公司商業機密無法公開

圖 3.5.15：Anholt 離岸風場工作船內部



屬該公司商業機密無法公開

圖 3.5.16：Anholt 離岸風場

本次參訪參訪有實際一睹海上變電站風貌，剛好也看到高浪拍打在海上變電站基礎設施的狀況，此外海上變電站上有非常多的鳥類停留休息，部分人士可能擔心海上變電站的設立會衝擊自然環境，但 Anholt 離岸風電廠表示此海上變電站設立後鳥類在此區域數量反而增加，因其提供了海上一處休息空間，但海上變電站的運維人員對於大量停靠的鳥可能就不是這麼歡喜，因為如此一來將影響到其維護作業，而 Anholt 離岸風電廠實際商轉約 5 年時間但其海下基礎設施已出現腐蝕狀況，腐蝕問題亦為後續運維的一大挑戰。

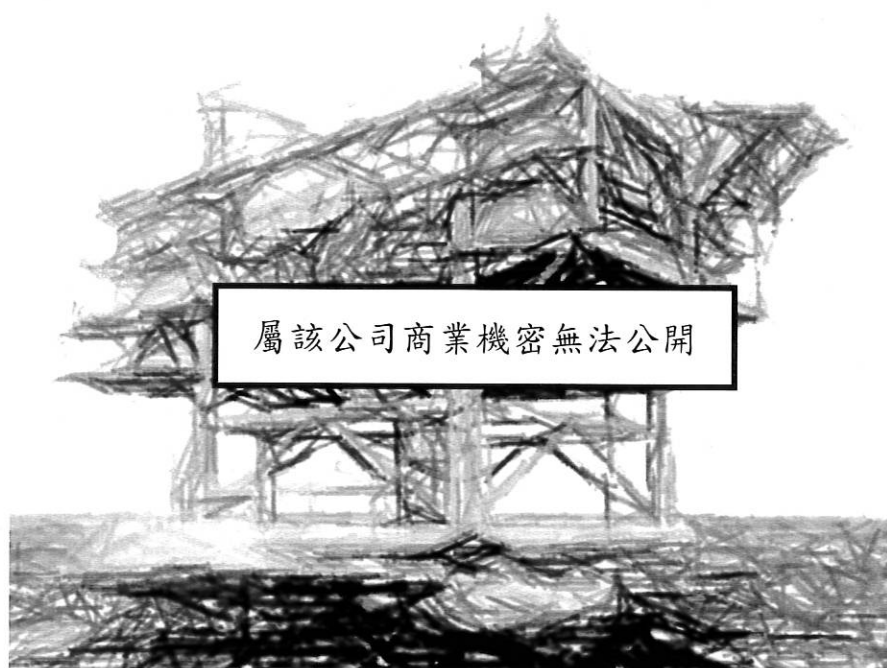


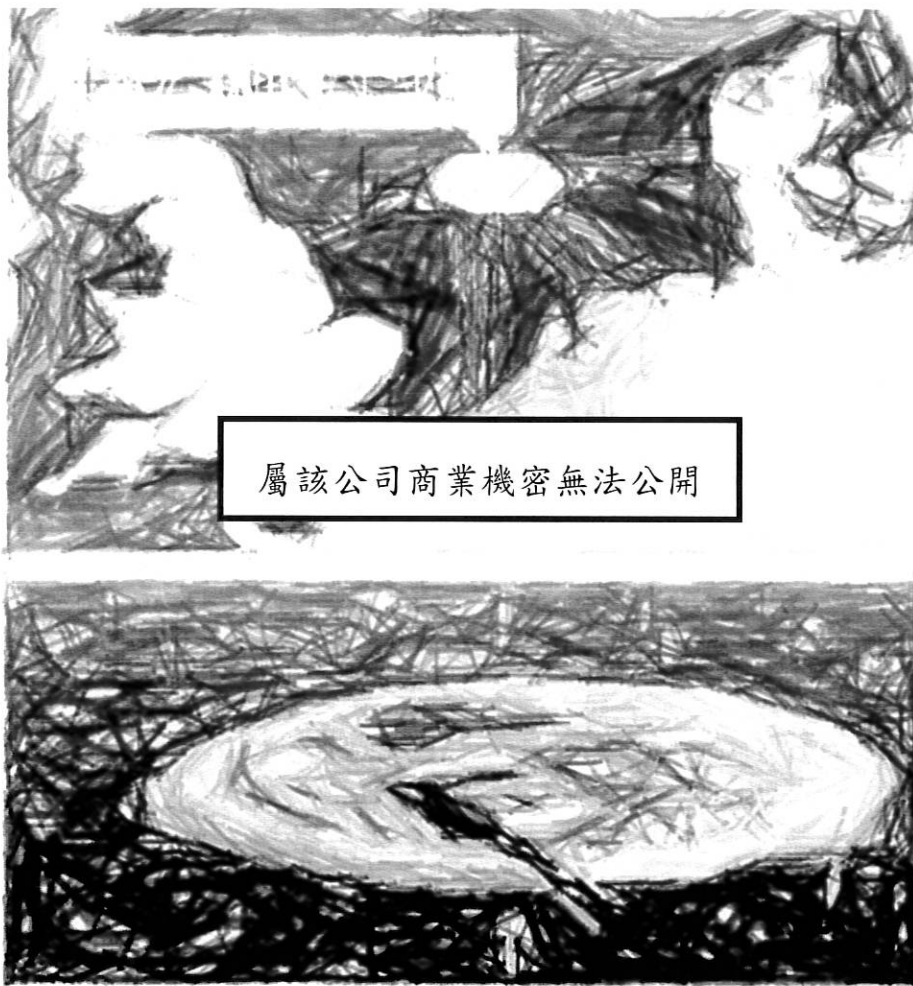
圖 3.5.17：Anholt 離岸風場海上變電站

(四)離岸風場新概念

從丹麥長期的離岸風電廠建置及營運經驗發現最大的挑戰除了海上工程建置難度高外，後續的運維問題亦充滿挑戰，海上風場、海纜鋪設、海上變電站的施工以及部分維修時程並非短短數小時或數日可完成，施工及運維人力的調配上，若每次都需要從陸上與海上往返，交通所耗時間及對相關工作人員精力的耗費將影響整個施工及運維效率，通常已建置好的海上變電站都備有可供短期的臨時宿舍，但因空間有限無法作為大量人力及中長期的休息場所，且建置裝的計畫亦無足夠的空間供工作人員休息，沃旭能源計畫打造大型的郵輪，提供施工及運維人員一個完善的休憩空間，盼能提升整體建置和運維的效率，並提供員工更舒適的工作環境。

另外建置海上變電站成本極高，且海上變電站置於高風險的自然環境中，隨時可能受到海洋環境而有嚴重衝擊，且如前章節所述建於海上的海上變電站難以用 N-1 進行規劃考量，若有設備損壞將影響離岸風電整體送電狀況，Energinet 提出一個相當新穎的概念，他們正在評估於北海，各離岸風電廠的中心設置一個海上的小島-POWER LINK ISLAND，如此一來其變電站的建置將可比照陸上變電站，施工及運維人員亦可避免海上作業帶來的不適感，且可匯集各區域的離岸風電廠電能，不過此計畫仍屬於非常早期的評估階段，Energinet 需要

了解究竟是在海上直接蓋一座島並於島上建置輸變電設備的成本及環境影響較低還是以目前既有方式於海上建置海上變電站所耗費的成本較低，而沃旭能源-離岸風場開發商對於此計畫仍保持觀望態度，若此計畫成功執行將是全球第一個專為電力書社而建置的小島計畫。



Data source: Energinet

圖 3.5.18：POWER LINK ISLAND 概念示意圖

肆、結論

首先，感謝系統規劃處的處長、兩位副處長及公司長官給我們這個機會到丹麥學習離岸風場併網規劃，不管在理論及實務上都獲益良多。以下是我們此次實習的心得彙整。

響應環保意識崛起及能源自主目標，近年來台灣政府大力推動再生能源，除了太陽光電外，台灣西部沿海豐沛的風力資源更是發展風力發電的絕佳場所，配合離岸風電第二階段推動計畫，預計 2025 年在西部沿海地區將有 5.5GW 的離岸風電併網。

目前台灣電力系統的電能來源仍舊是傳統水火力及核能發電為主，依照能源政策發展，未來預期會有大量的再生能源併網，此與已往的電力系統有極大差異，勢必對未來電力系統造成極大衝擊，尤其是新興的離岸風電，其建至於海面上，與以往建置於陸域的發電設施差異在哪？於系統規劃上是否有其他不同的地方？未來的電力系統該如何因應並容納這麼多的再生能源？種種問題已成為台灣電力系統迫在眉睫的考驗。

歐洲一直以來是再生能源發展的先驅，這次有幸能參訪綠能大國丹麥的能源電力機構進行意見交流，世界第一座的離岸風電廠更是建置於丹麥，透過這次的參訪行程，更深刻體會到未來台灣在面對高佔

比再生能源的考驗勢必難度更高。自 1985 年原本仍是綜合電業的丹麥在歷經數十年的時間才達到電力需求有將近一半來自綠能，而台灣目前能源目標是在不到十年的時間快速建置大量的再生能源，且歐洲多為互聯網路，台灣唯一孤島電力系統未與其他大型電網互聯。

從這次的參訪與丹麥當地專家學者討論可了解目前北歐電力系統頻率控制上並非其最擔憂的問題，因為透過大型的互聯網路及完善的電力交易制度，可從鄰國購買到電能，當然在這樣的電力系統中，資訊的傳輸是相當重要的，完善的資訊傳輸系統是完善電力交易市場的重要基礎，在電力系統頻率控制上北歐地區較為擔心的是瞬間系統慣量不足的問題，而若以傳統大型火力電廠維持低載運轉，將需要耗費大量的成本，且難以滿足其未來零排碳的能源目標，這樣的背景下 1970 年代即出現的同步調相機(Synchronous Condenser, SC)於近年再度活躍於北歐的電力系統中，而台灣電力系統屬孤島系統，未來面對大量間歇性再生能源併網，足夠的實功備轉容量仍是相當關鍵的因素，因此同步調相機(Synchronous Condenser, SC)對於未來高佔比再生能源的台灣電力系統幫助有限。

目前丹麥已與多個鄰國有互聯的電力系統，未來更計畫透過一個超大型歐洲電網更有效運用全歐洲的綠能資源，台灣電力系統若能與其他大型電力系統互聯，且在健全電力交易機制及完善資通訊系統

的基礎下，才更能確保外來高佔比再生能源的電力系統中有穩定且良好的供電品質，但大型的互聯長程輸電線路除了成本非常高外，亦容易牽涉到諸多非科學因素。

面對未來高佔比再生能源的電力系統，分析技術的提升亦有其必要性，本次有幸能與 Energinet 電力系統分析專家請益，因應再生能源及不斷變動的電力市場，丹麥地區進行的電力系統分析是時序性，而非單獨針對特定時間點的模擬，透過 DIgSILENT PowerFactory 這套軟體，Energinet 電力分析人員能夠快速檢討各種電力系統狀況，且這套分析軟體可與實際調度資訊同步整合，電力系統檢討分析的結果將能更貼近實際電力系統情況，這次拜訪一直希望能夠從中了解甚麼樣的情境甚麼樣的電網假設條件是在高佔比再生能源分析必備的，而丹麥的專家學者表示這必須取決於本身電網特性較為擔心的狀況，以及當地各能源特性，當然最好的方法就是透過大量的模擬，若能將定點的模擬改為時序的分析，將比較能考量到各種突發情境。

丹麥已具備相當完善的併網規範及相關制度，發電設備的併網不視其能源類別來進行規範的區分，而是依據其發電設備的併網容量來做為判定的標準，如此將可簡化併網前的各種各案討論所需耗費時間，在併網法規上我們仍需要持續努力和精進，在併網規範的修訂上丹麥一樣會面臨開發商的壓力，若能加強溝通站在共同維護電力系統安全

的角度上，才可創造電網、能源業者及人民的三贏空間。