中國工程師學會會刊

工程

孫震 題

中華民國109年3月 Vol. 93 No. 1
http://www.cie.org.tw ISSN:1015-0773

- 工程師們向前走！全球首度慶祝世界工程日World Engineering Day
- 中國工程師學會第71屆第2次會員代表大會順利圓滿
- 組團出席2019世界工程組織聯盟（WFEO）大會
- 出席亞洲及太平洋工程組織聯盟第11屆常務理事會議
- 「工程師的實用技能講堂」系列課程
- 「三維化學元素週期表及新100元素預測」專題演講

再生能源
之展望與實務

* 辰亞阿公店水庫水面型太陽能

智慧化機電領先者

中興工程提供智慧化綠能機電/軌道核心機電/廠站大樓機電等技術服務，打造能源無虞與環保永續之綠色臺灣，實踐無限可能之幸福生活。

電氣工程團隊

中興團隊專業服務

水利、大地、電力、結構、建築、軌道、交通、系統機械、環境、海岸及港灣、都市設計、工業城鄉開發園區規劃等之規劃、設計與施工監造管理

聯絡資訊

10570 臺北市松山區南京東路五段171號

電話:(02) 2769-8388 傳真:(02) 2763-4555

E-mail : sinotech@sinotech.com.tw

https : //www.sinotech.com.tw

正派經營．品質保證．追求卓越．創新突破

中興工程顧問股份有限公司

SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.

Vol. 93 No. 1
中華民國 109 年 3 月

再生能源之展望與實務

為因應溫室氣體效應所致的極端氣候變遷，我國於2016年訂定能源轉型以展綠、增氣、減煤及非核為目標，並將再生能源發電佔比規劃於2025年達到20%。本期專輯主題為「再生能源之展望與實務」，共收錄文章九篇，期盼藉此拋磚引玉，使未來能有更多產官學界先進提出更佳的理念與創意，為未來再生能源的開發與應用，開拓出更寬廣的領域。

特別報導

02 工程師們向前走！3月4日全球首度慶祝世界工程日World Engineering Day

活動報導

05 中國工程師學會第71屆第2次會員代表大會順利圓滿
06 中國工程師學會第71屆第7次理監事聯席會議暨聯誼餐會
08 組團出席2019世界工程組織聯盟（WFEO）大會
10 出席亞洲及太平洋工程組織聯盟第11屆常務理事會議
12「工程師的實用技能講堂」系列課程
14 邀請工程先進參訪新北捷運環狀線
16「三維化學元素週期表及新100元素預測」專題演講
18 走入大學學府宣導工程師正能量與工程倫理
20「2019推動創新專案管理實務」講習班圓滿完成
22 再生能源與氣候變遷課題探討及實地參訪
24 2019學生分會資源分享營
25 2019青年工程師聯誼交流活動
26 工程師的性別與發展座談會
27 參訪桃園大溪橋工程暨機場捷運延伸線A22站軌道工程

再生能源之展望與實務

客座主編：林根勝/中興工程顧問公司 副總經理

31 臺灣能源轉型機會與挑戰/蘇金勝
39 智慧電網發展與再生能源監控實務/張忠良
50 國際ORC地熱發電機供應市場的新趨勢/俞旗文、譚志豪、雷世璋、楊智豪
63 台電公司風場運維現況及展望/陳一成、徐文科、林智彭、陳啟明、仇士愷
69 彰濱工業區水面型太陽能發電系統工程概述/胡劭德、游祥益、林根勝、余遠添、朱玉亭
77 大量再生能源併網的衝擊與電力調度因應策略/吳進忠、鄭宇軒
89 探討歐洲風電發展降低臺灣學習風險/徐瑋克
97 再生能源系統驗證與專案加值效應/張耀方、詹育禔、楊淳宇
105 離島智慧電網案例報導/ 陳朝順、李坤鍾、林志慶、許振廷、林嘉宏、 辜德典

工程與技術

122 布袋商港聯絡道路短中期交通改善策略研析/江明益、黃俊豪、胡啟文
132 量子技術於網際網路安全通信的應用/呂錫民

理 事 長：廖慶榮
常務理事：李世光 高宗正 楊宗興 楊偉甫
理 事：王錫欽 呂良正 宋裕祺 李偉賢 胡湘麟 孫以濬 涂元光 徐善慧 莫仁維 陳伸賢 陳彥伯 陳哲生 彭振聲 曾國正 黃金生 楊慶煜 廖學瑞 蒲鶴章 歐善惠 賴建信 薛文珍 薛富盛
常務監事：邱琳濱
監 事：王炤烈 李建中 郭新進 陳振川
秘 書 長：張武訓
發 行 所：中國工程師學會出版委員會
主任委員：黃慶東
委 員：李大行 林根勝 邱煌仁 孫以濬 郭重顯 張武訓 陳裕仁 廖學瑞
總 編 輯：陳沛清
客座主編：林根勝
編 輯：石昱郁 李宥萱 林秀琴 張桂瑜 梁愛倫 蔣雪芬 蔡琦姻

聯絡地址：10607臺北市大安區基隆路四段43號
電 話：(02)2733-3141轉1177、3252、6938
傳 真：(02)2730-1000
會 址：10055臺北市仁愛路二段1號3樓
電 話：(02)2392-5128
傳 真：(02)2397-3003
網 址：http://www.cie.org.tw
郵政劃撥：00059892
戶 名：社團法人中國工程師學會
編 印：英杰企業有限公司
地 址：10667臺北市大安區復興南路二段293-3號10樓之1
電 話：(02)2732-1234

行政院新聞處出版事業登記證局版臺誌0765號
中華郵政臺北誌字第721號執照登記為雜誌交寄
入會申請手續請上本會網站查詢

※版權所有，本刊圖文未經同意，不得轉載。

工程師們向前走！3月4日全球首度慶祝世界工程日World Engineering Day

中華臺北亞太工程師暨國際工程師監督委員會執行長 / 曾大仁

對工程界而言，2020年3月4日是一個歷史性的日子。這一天，全球工程界將一同祝賀世界工程日（World Engineering Day, WED）的誕生。

於1968年3月4日成立的世界工程組織聯盟（WFEO）誕生50年後，提議將其生日訂為世界工程日，以宣揚工程對社會現代化的重要貢獻。本案經聯合國教科文組織UNESCO第40屆全體大會通過決議，於2019年11月宣布將每年3月4日訂為「促進永續發展世界工程日」（World Engineering Day for Sustainable Development），期望透過全球慶祝活動，彰顯工程師和工程對當今世界的貢獻，並提升公眾對工程技術改善人類生活及推動永續發展的認知。

世界工程日的提案有其歷史背景：2015年9月，聯合國大會通過了第70/1號決議，宣布了2030年永續發展議程和17項永續發展

▲ 世界工程日標誌：17個色塊分別對應聯合國的17個永續發展目標SDGs，代表了工程師對實現2030永續發展議程的承諾。
The World Engineering Day Logo: the 17 colours of the UN Sustainable Development Goals are included in the logo and represent the commitment to the UN 2030 Agenda.

▲ 女性工程師委員會薛文珍主委介紹世界工程日
Dr. W. J. Hsueh, Chair of Committee on Women in Engineering (WiE), introduced WED to Committee members.

目標，這些目標兼顧了「經濟發展」、「社會進步」和「環境保護」三個面向，指明了未來發展的方針，不但成為各國建構永續發展策略的指南，也成為評判企業社會責任（CSR）的指標，而工程師是實現這些目標的重要關鍵，詳述如下：

- 工程師對於和平的世界至關重要，工程師將開發應用技術和系統，實現涉及水、能源、環境、永續城市、自然災害抵抗力等領域的永續發展目標。

- 工程師在應對極端氣候變化和開發韌性基礎設施扮演重要角色，特別在最易受自然風險影響的發展中國家。

- 工程師對經濟永續發展至關重要，不論是已發展國家和發展中國家，都需要工程師對公路、鐵路橋樑、水壩、廢棄物管理、供水和衛生、能源和數字網絡等基礎建設作出貢獻。

- 我們需要工程師發展包容性技術與創新，以創造更大的繁榮和更好的生活品質，且不偏漏任何一個人，尤其是確保婦女及偏鄉有同等獲取科技的機會。

世界工程日顯然提供一個討論這些重要議題的絕佳平台，可以讓更廣泛的社會大眾認識工程師和工程的貢獻，以及讓工程師討論實現聯合國永續發展目標所需要進行的工作。因此，世界工程組織聯盟（WFEO）前任會長Marlene Kanga博士提出了設立世界工程日的倡議，她說：「工程師不太善於自我宣揚工程的價值以及工程師和工程對社會的影響。世界工程日是討論這些問題的良好機會，並可讓社會大眾更加了解、參與及肯定工程師的專業。」

▲ 張武訓秘書長在青年工程師聯誼餐會介紹世界工程日
CIE SG Wu-Hsun Chang shared the key messages of WED on the occasion of young engineers networking dinner.

臺灣的工程界在爭取社會認同方面和世界各國極為相似。我們雖然不是聯合國會員，但參與一個全球共同慶祝的國際日，將是提高社會對工程界認同的契機。相信世界工程日將可促進政府和企業合作，共同長期佈局以滿足社會對工程能力和工程師質量的需求，並為永續工程擬定策略框架及發展最佳實踐典範。

World Engineering Day will be celebrated on 4 March of each year

In November 2019, the 40th General Conference of UNESCO has proclaimed 4th March of every year a World Engineering Day for Sustainable Development (WED), as proposed by the World Federation of Engineering Organizations. WED will be celebrated annually from 2020 onwards. It provides an opportunity to celebrate the contributions of engineers and engineering to sustainable development and modern life. It is also expected to provide a platform to discuss the work that needs to be done to achieve the UN 2030 Agenda for Sustainable Development and its 17 Sustainable Development Goals. Taiwan, as a part of the international engineering community, would take this chance to engage our government and industry to address the need for engineering capacity and the quality of engineers and develop strategic frameworks and best practices for the implementation of engineering solutions for sustainable development.

中國工程師學會第71屆第2次會員代表大會順利圓滿

中國工程師學會於108年12月6日假中興工程顧問股份有限公司10樓大會議室召開第71屆第2次會員代表大會，共計82位會員代表大會代表出席與會。

會議首先由廖慶榮理事長致詞，續由張武訓秘書長報告會務、黃龍德總會計進行財務報告。本次會議除通過修正本學會會員繳納會費辦法，並通過本學會107年度資產負債表、收支決算表、財產目錄、現金出納表及基金收支表，及109年度各委員會的工作計畫、收支預算等案。

本學會會員代表大會代表之名單可於學會官網查詢，倘需特定會員代表大會代表之聯絡資訊，可洽秘書處代詢其意願後另提供。

▲ 廖慶榮理事長致詞

▲ 張武訓秘書長報告

▲ 會員代表歐善惠教授提問

▲ 黃龍德總會計報告

中國工程師學會第71屆第7次理監事聯席會議暨聯誼餐會

中國工程師學會第71屆第7次理監事聯席會議暨聯誼餐會於109年1月17日假福華飯店舉行，理事、監事與各委員會主任委員及代表出席踴躍。

會議由廖慶榮理事長主持，依程序由秘書處、總會計、各分會與各委員會報告近三個月本學會國內外重要活動。秘書處並整理去年全年活動代表性照片，讓與會人員共同回顧，會後並在學會臉書專頁分享。同時就各委員會的109年工作計畫彙整成月份布告欄，公布本學會的全年活動計畫。各委員會多備有書面資料，而高雄市分會、女性工程師委員會、青年工程師委員會、中日工程技術委員會、對外關係委員會及會員委員會等另口頭報告，均獲得肯定與同意備查。

適逢新春，藉此聯誼餐會串聯北、中、南各學會齊聚一堂，並感謝理、監事與委員會代表的無私奉獻。

▲ 理監事聯席會議

▲ 廖慶榮理事長（左2）致詞

▲ 張武訓秘書長報告

▲ 張金滿會計報告

▲ 女性工程師委員會薛文珍主委報告

▲ 對外關係委員會杜俊主委報告

▲ 高雄市分會蔡匡忠秘書長報告

▲ 青年工程師委員會莫仁維主委報告

組團出席2019世界工程組織聯盟（WFEO）大會

世界工程組織聯盟（World Federation of Engineering Organizations, WFEO）於108年11月21-24日於澳洲墨爾本召開兩年一次的會員大會，來自70餘國200餘位各國工程組織之代表出席，儼然工程界的聯合國會議。本學會薛文珍理事、中華臺北亞太工程師監督委員會曾大仁委員及秘書處同仁代表出席。

▲ 薛文珍主委代表投票

WFEO於1968年創立，當時即由本學會代表我國加入為正式會員。WFEO為UNESCO外圍組織，關心工程與科技如何增進永續發展，並促進各國工程組織之合作與交流。WFEO與聯合國教科文組織UNESCO合作密切，Sustainable Development及Ca-

▲ 世界工程組織聯盟大會情形

▲ 代表團合影

▲ 參與女性工程師委員會活動

pacity Building為當前的核心議題，並於2019年獲UNESCO通過，以WFEO創建日3月4日為世界工程日World Engineering Day，將於今年舉辦相關活動，藉此展現工程專業的群體智慧以及專業領導。

WFEO是國際工程界交流與發言的平台，在UNESCO具有影響力，會長、副會長、及攸關理事席次的國家會員代表等選舉競爭激烈。澳洲籍會長Marlene Kanga女士任期結束後，由中國大陸的龔克教授接任會長，並選出新任預選會長，為葡萄牙藉的Jose Manuel Pereira Vieira，將在2021-2023年接任。中工會代表團隨即向Vieira教授表達祝賀與支持。

世界工程師大會WEC則於11月18日開始在墨爾本會議中心展開為期5天的研討活動，薛文珍理事（本學會女性工程師委員會主委）同時代表出席並參與相關議題討論，與全球工程組織領袖及重要人士互動交流。

出席亞洲及太平洋工程組織聯盟第11屆常務理事會議

亞洲及太平洋工程組織聯盟（The Federation of Engineering Institutions of Asia and the Pacific, FEIAP）第11屆常務理事會議於108年11月21日在澳洲舉行。本次會議在澳洲工程師學會（Engineers Australia）墨爾本分部召開，本學會中華台北亞太工程師監督委員會李建中主委率領曾大仁委員、蔣雪芬秘書、李宥萱幹事，並邀請行政院公共工程委員會技術處陳義昌科長前往，共5人代表出席會議。

FEIAP是1978年成立的區域性工程組織，會員多為東協成員國，旨在促進科技合作和訊息交流、工程師資格的相互認許，以及推動工程教育認證等工作。FEIAP目前有26個正式會員、2個附屬會員。最高權利機構是全體大會，每年舉行一次全體會議。休會期間由常務理事會執行具體事務。

▲ 亞洲及太平洋工程組織聯盟會議情形

▲ 全體出席代表合影

▲ 拜會澳洲工程師協會

西北工業大學常務副校長黃維博士於今年7月接任FEIAP會長後首度主持會議，首先歡迎常務理事會成員及列席參加的FEIAP會員國代表及貴賓，隨後感謝EA協助在墨爾本主辦本次會議，也特別對前任會長李建中博士致謝。秘書長Ir Dr Tan Yean Chin依照大會既定議程進行各項報告。

理事會成員聽取FEIAP組織內各委員會及工作小組的工作成果和未來推動方向，包括環境工程委員會、工程教育委員會、資通訊技術委員會、自然災害防治委員會及青年工程師發展工作小組。理事會接著討論有關工程教育訓練中心、培訓課程、財務及基金、WFEO活動參與情形、2020年工程獎章等會務事項，李主委代表中工會擔任FEIAP工程獎章評獎委員。

▲ 與澳洲工程師協會討論簽署MRA

本次活動由李主委偕同曾大仁委員、行政院公共工程委員會陳科長，以及出席WFEO會員大會順道出席FEIAP會議的中工會秘書處同仁共同出席，展現中國工程師學會（CIE）對FEIAP活動的支持，希望透過FEIAP平台一方面拓展我與東協國家的關係，進而深化我國在國際工程組織的參與。

「工程師的實用技能講堂」系列課程

中國工程師學會秘書處於108年11月13日及12月20日分別邀請東吳大學企業管理學系沈筱玲教授與國立中央大學土木工程系林子軒助理教授擔任本系列課程之一日講師。

沈筱玲教授以「如何透過財務報表分析，提升經營管理績效？」為題，傳授判讀財務報表的關鍵指標，內容精湛。來自不同領域的學員提問學校財務的相關問題、其他國家稅制問題等，沈老師也不藏私地分享自身的經驗及建議。

▲ 沈筱玲教授演講

▲ 張武訓秘書長（右）代表致贈感謝狀予沈筱玲教授（左）

▲ 張武訓秘書長（右）代表致贈感謝狀予林子軒博士（左）

▲ 與會人員合影

▲ 全體合影及宣傳世界工程日精神

林子軒助理教授則以「從物聯網到大數據分析」為題，課程內容以物聯網為基礎，延伸至大數據的應用，並介紹多個可實際應用於分析數據的雲端服務，內容實用但較為專業。本次課程報名參加的學員有多位單位首長，課中與課後提出經驗交流，認為如何使本專業課程更普羅化與市場化以協助更多工程師善加利用提升績效非常重要，建議可增加此類講堂課程。

課後秘書處宣導世界工程日精神並合影留念。

邀請工程先進參訪新北捷運環狀線

中國工程師學會於109年1月21日組團參加新北捷運環狀線試乘活動，由高宗正常務理事擔任領隊，邀請10餘位工程先進共襄盛舉。

本次係藉環狀線第一階段通車營運開放試乘機會舉辦聯誼活動，搭乘路線從板橋站出發到新北產業園區站，參訪環狀線與桃園機場捷運線並在新北產業園區站的交會與轉乘設施，瞭解乘客的一般轉乘與出入桃園國際機場的便利性。接著回到十四張站看環線與施工中的安坑線會合站，並參訪安心橋施工情形，團隊最後在景安站結束參訪行程。

感謝環狀線工程團隊，北捷局陳建宏副處長、林清森主任、古鴻坤主任、常輝庭主任、陳俊榮主任及遠揚營造公司朱之豪所長說明工程特色與克服挑戰經過，敬表佩服與

▲ 參觀十四張站合影

▲ 致贈中工會會旗

▲ 聽取主辦團隊簡報環狀線工程

▲ 宣導世界工程日精神

▲ 試乘捷運環狀線電聯車

肯定，領隊高常務理事致贈陳副處長中工會會旗與互贈禮物，以感謝北捷局的工程導覽。

「三維化學元素週期表及新100元素預測」專題演講

109年1月17日為響應「國際化學元素週期表年」，國立臺灣科技大學、中國工程師學會、俄羅斯國際工程院台灣分會假國立臺灣科技大學國際大樓，共同舉辦「三維化學元素週期表及新100元素預測」專題演講（Contemporary representation of the three-dimensional chemical elements matrix and prediction of 100 new elements），由廖慶榮理事長主持，與會專家學者出席踴躍。

活動邀請古塞夫博士（Gusev Boris）主講，古塞夫博士是俄羅斯工程院及俄羅斯國際工程院院長，為國際知名科學家。本次演講專題係為響應聯合國教科文組織

▲ 古塞夫博士演講

▲ 廖慶榮理事長（右3）與貴賓合影

▲廖慶榮理事長（右）致贈紀念品予古塞夫博士（左）

▲ 與會人員發言

▲ 專題演講

（UNESCO）為紀念元素週期表的150週年，將2019年定為「國際化學元素週期表年」，就科學共同語言，門得列夫於1969年所創新建置的二維週期表的化學元素週期表，是否可能延伸為三維，並能夠有一百個新元素進行專題預測。經過意見交流後，廖理事長特致贈紀念牌感謝古塞夫博士的精湛演講並合影留念。

走入大學學府宣導工程師正能量與工程倫理

中國工程師學會張武訓秘書長受邀至國立臺北科技大學工學院與國立臺灣大學高分子科學與工程學研究所演講，分別於108年12月10日、12月13日演說「工程師的正能量」與「工程倫理」專題講座，並積極宣導「中國工程師信條」、「工程倫理」與「世界工程日」精神。

感謝國立臺北科技大學工學院宋裕祺院長的邀請，張秘書長於12月10日與北科大約400位資訊、化工與土木工程系準工程師同學們，闡述如何以工程師的正能量看臺灣前50年（民國58年至108年）的經濟建設，並鼓勵和自己當年同齡的同學們創建台灣未來50年。

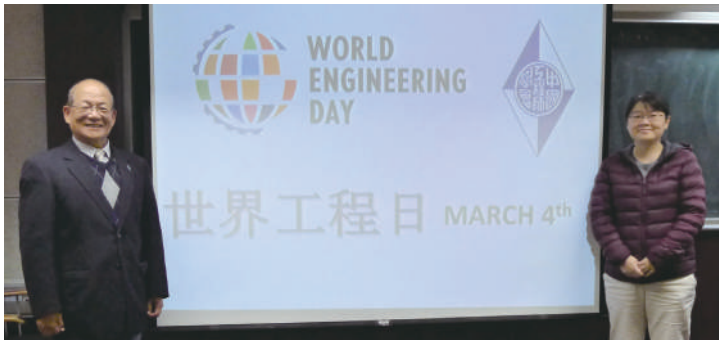
演講由登玉山享受晨曦的自然正能量，與時髦的「亂」字和可能由混亂程度創造價值的「熵」字開場。續用三個小故事鼓勵同學們肯定工程師的價值。歷時60分鐘，最後在介紹中國工程師學會及中國工程師信條後，期盼年輕學子成為工程師的骨幹。

張秘書長另於12月13日受邀到臺大高分

▲ 張秘書長於北科大講授工程師正能量

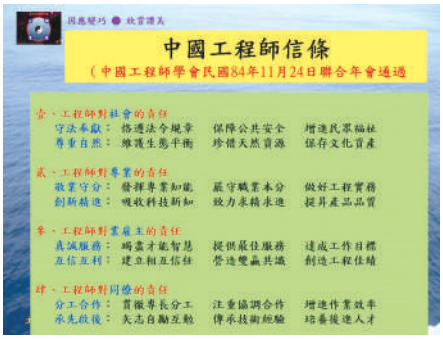
▲ 北科大演講現場情形

▲ 北科大工學院宋裕祺院長主持



▲ 張秘書長（左）於臺大高分子研究所宣導世界工程日精神

▲ 張秘書長於臺大高分子研究所講授工程倫理



▲ 宣導中國工程師信條

子科學與工程學研究所，為碩博生講授「中國工程師信條」與行政院公共工程委員會頒布的「工程倫理」，並分享面對非法律事件之衝突如何以倫理守則有系統化的分析、抉擇與協調。感謝童世煌教授與葉伊純教授全程參與，並主持意見交流與討論。

張秘書長開講時特別引述「世界工程日」主要精神之一「工程師肩負永續發展的重責大任」，提示高智商同學們聽講「工程倫理」的使命和責任。

有關「世界工程日（World Engineering Day）」，係由聯合國教科文組織（UNESCO）於2019年通過，訂定每年3月4日為世界工程日，世界工程組織聯盟（WFEO）並於2019年11月23日第50屆會員大會時宣示，並公告4項主要精神（Key Messages），分別為：

- Become an engineer and change the world
  成為工程師，改變世界
- Engineers are essential to advance the goals of sustainable development so no one is left behind
  工程師肩負永續發展的重責大任
- Engineers can create a future that we cannot imagine
  工程師能創造無限可能
- Anyone can be an engineer
  你，也能成為工程師

「2019推動創新專案管理實務」講習班圓滿完成

中國工程師學會專案管理認證委員會於108年12月19日至20日舉辦「2019推動創新專案管理實務」講習班，由中鼎工程股份有限公司、中興工程顧問股份有限公司、台灣世曦工程顧問股份有限公司承辦，委由仕新管理顧問有限公司執行講習，順利圓滿完成。

活動於中興工程顧問股份有限公司10樓大會議室舉行，開幕由專案管理認證委員會楊宗興主任委員致詞，說明講習班辦理過程及重要性，續邀請中興工程顧問股份有限公司陳伸賢董事長致歡迎詞，本學會張武訓秘書長代表廖理事長致感謝詞，感謝委員會與3家顧問公司辛苦辦理，並感謝中興工程顧問股份有限公司提供場地。

本講習班係為從事大型工程專案工程師們提供訓練，在面對設計創新及公民議題，有效面對快速變化的複雜專案，融合Agile + PMP手法，正確識別利害關係人與探索真實需求掌握動態風險，促使工程專案管理順利成功。課程特色是朝未來專案管理之主流，使用創新Agile手法融合計畫性PMP管理高價值變動性專案；由仕新管理顧問團隊授課，

▲ 楊宗興主任委員致詞

▲ 全體與會人員合影

▲ 張武訓秘書長代表廖慶榮理事長致詞

▲ 黃喆講師講授課程

▲ 學員分組研討

▲ 學員分組報告

分六組實作指導變動性專案的管理方法，以創造工程師全新價值與提昇專案績效的最佳利器。

本次分組有第一組空中智慧運輸，第二組智慧醫療運輸車，第三組智慧充電(Easy Charge)，第四組智慧床，第五組智慧路燈，第六組智慧電網。報名的55位學員來自工程界、產業界、營建業、顧問業，多為經驗豐富的主管或資深工程師，課程討論熱烈，發表成果豐碩，藉由訓練過程，由專題討論產生業務的創新共識。

再生能源與氣候變遷課題探討及實地參訪

中國工程師學會環境與能源委員會分別於108年11月14日及12月3日辦理「我國發展再生能源課題與挑戰實地觀摩與研討」與參訪「台電公司大甲溪發電廠氣候變遷調適案例」兩項活動，備受參與先進佩服與肯定。

「我國發展再生能源課題與挑戰實地觀摩與研討」在南投水里鉅工電廠與車埕明潭抽蓄電廠舉辦，由中興工程科技研究發展基金會、台灣電力公司水火力發電事業部及明潭發電廠共同主辦，本學會環境與能源委員會協辦，約80位工程人員參加。總領隊由基金會曾參寶董事長擔任、陳啟斌執行長執行，台電公司由督導水火力發電事業部的陳建益副總經理代表楊偉甫董事長接待與致詞。

參訪團實地觀摩了地面的鉅工電廠及深入地下三層的明潭抽蓄電廠，由兩位副廠長

▲ 中興工程科技研究發展基金會曾參寶董事長致詞

▲ 參訪明潭電廠全體團員合影

▲ 參訪明潭電廠之綜合座談

▲ 參訪大甲溪谷關電廠合影

▲ 參訪明潭抽蓄電廠

▲ 致贈本學會會旗

引導解說。研討會安排4場課程，讓與會者瞭解能源政策與趨勢，出席人員因此更肯定台電公司在抽蓄發電的水資源應用及設施的管理績效。

「台電公司大甲溪發電廠氣候變遷調適案例」參訪活動由本學會、台灣電力股份有限公司與財團法人中興工程科技研究發展基金會共同主辦，台電公司大甲溪發電廠與本學會環境與能源委員會共同承辦。環境與能源委員會葉欣誠副主任委員擔任領隊率團，感謝台電公司主管與同仁熱忱接待、簡報與導覽解說。本學會由張武訓秘書長代表廖慶榮理事長與葉欣誠領隊共同致贈大甲溪發電廠洪文和廠長本學會會旗敬表感謝。

本次參訪團員以電力專業工程人員為主，藉此活動讓沃旭風力發電公司、森霸電力公司、星元電力公司、和平電力公司等主管與同仁實地了解發電廠運作，並和台電專家及相關主管單位的工程師意見交流，達到認識台電公司在因應氣候變遷調適方面的努力與用心。活動除簡報後熱烈意見交流，並實地參訪大甲溪發電廠谷關分廠與馬鞍壩。參觀馬鞍壩魚梯設施，及親眼見證小魚奮勇上游情境，讓與會先進至感欽佩。

2019學生分會資源分享營

中國工程師學會學生分會於108年12月7日假國立臺灣科技大學舉行資源分享營活動，由臺科大朱瑾副校長代表廖慶榮理事長致詞。教育委員會由蘇程裕主任秘書代表王錫福主任委員致詞。

本次分享營邀請葉均蔚教授分享高熵材料的創新及經驗，以及林元生經理分享工程產業經驗。本學會張武訓秘書長談認識中國工程師學會，分享營總召集人為顏怡文教授、總主持人為蔡孟霖教授，以及與會貴賓分別頒發學生分會會務評鑑及學生工程論文競賽得獎獎狀與獎金。

活動續由彰師大學生分會、中原大學學生分會及清華大學學生分會做會務經驗分享。新加入的屏東科技大學和臺北市立大學學生分會都有代表與會，活動圓滿結束。

▲ 朱瑾副校長代表廖慶榮理事長致詞

▲ 葉均蔚教授演講

▲ 工程論文競賽頒獎

▲ 林元生委員演講

2019青年工程師聯誼交流活動

中國工程師學會青年工程師委員會於108年12月13日假暖時光咖啡舉辦「2019青年工程師聯誼交流」活動，由莫仁維主任委員邀請中華民國工程技術顧問同業公會黃一鈺秘書長與林元生主任委員、中國土木水利工程學會青年委員會謝彥安主任委員、中華民國道路工程協會青年委員會蘇育民主任委員、亞新工程顧問公司同仁、毅成建設公司王總經理、崇友實業公司唐資深協理等57位青年朋友聚集一堂，包括為發揮青年工程師團結力量，是否成立臺灣青年工程師聯盟之想法進行意見交流。

本學會前理事長邱琳濱博士應邀演講「工程職涯經驗分享及全方位工程師養成之淺見」，張武訓秘書長並宣導「2020年3月4日世界工程日元年及其主要精神」。本學會全力支持青年工程師們的熱情和努力，希望青年工程師都能善用資源、凝聚力量、無縫接軌、重視工程倫理，相互協助。

▲ 邱琳濱博士演講

▲ 現場活動交流情形

工程師的性別與發展座談會

中國工程師學會女性工程師委員會於108年12月20日假臺灣大學綜合教學館504室舉辦「工程師的性別與發展座談會」，將臺灣首次調查「工程師職涯發展與性別差異關係」的結果，提出數據分析、觀點解析，並邀請與會者就觀察到的現象進行討論並提出建議。

座談會由女性工程師委員會薛文珍主委主持。首先由本計畫主持人淡江大學工程法律中心范素玲主任就問卷調查結果與發現提出報告，說明臺灣工程與科技領域因性別差異而形成的現象與認知差異，隨後分三組進行觀點分享、成因探討，並試擬可行方案。分組討論時，由女性工程師委員會的委員們擔任與談，引導與會者深入討論，希望藉此促進更多女性成為工程師，並持續以其特質專業發揮影響力。

▲ 薛文珍主任委員致詞

▲ 現場討論交流情形

▲ 宣傳世界工程日

參訪桃園大溪橋工程暨機場捷運延伸線A22站軌道工程

中國工程師學會工程倫理委員會與交通部鐵道局於108年11月29日共同舉辦「桃園大溪橋工程暨機場捷運延伸線A22站軌道工程參訪」活動。

鑒於桃園市大溪區大溪橋第二期整修工程，因兼顧工程品質與環境保育，獲選中國工程師學會108年「工程優良獎」，實為工程典範；另鐵道局主辦之機場捷運延伸線計畫，串聯臺北、桃園捷運路網與高速鐵路及臺鐵西部幹線等城際公共運輸系統，提供無縫運輸服務，其中A22站工程位於中壢市鄰

▲ 參訪人員於捷運隧道口合影

▲ 浮式道床工程實地解說

▲ 桃園市政府養護工程處簡報

▲ 研討意見交流

近老街溪側，採用特殊工法使施工對環境衝擊降至最低，兼具實用與景觀性目的。

活動由桃園市政府養護工程處陳聖義處長，以及鐵道局北部工程處魏道佳隊長與同仁們周詳的簡報及現場說明，參加者均相當佩服且滿載而歸，活動圓滿成功。

再生能源之展望與實務－專輯序言

中興工程顧問公司副總經理 / 林根勝

工業革命以來，由於化石燃料的大量使用、大氣溫室氣體含量急劇增加，溫室氣體效應所致的極端氣候變遷，在全球各地已造成諸多災害。世界各國乃集會研商訂定排放減量規範，其中尤以能源轉型為節能減碳之首要，藉以減緩危害。聯合國環境署（United Nations Environment Programme）於2019年發表的排放差距報告（Emissions Gap Report 2019）將再生能源電力的擴展（Renewable energy electricity expansion）列為其能源轉型的五大方案之一，我國也於2016年訂定能源轉型係以展綠、增氣、減煤及非核為目標，並將再生能源發電佔比規劃於2025年達到20%，其中太陽光電裝置容量20 GW、離岸風電5.5 GW、陸域風電1.2 GW及生質能發電813 MW。

本期專輯主題為「再生能源之展望與實務」，共收錄文章九篇，第一篇–「再生能源轉型機會與挑戰」，係由統籌規劃國家能源政策的行政院能源與減碳辦公室蘇金勝主任撰文，就再生能源之發展空間、面臨的挑戰進行探討與分析，並提出達成相關目標諸多途徑的寶貴見解。第二篇–「智慧電網發展與再生能源監控實務」，則由台電公司副總經理兼輸供電事業部執行長張忠良博士主筆，闡述再生能源併入電網後可能的衝擊，以及如何藉由智慧化監控體系，達成電網的即時掌握與調控，以維持電力系統的品質、效率與可靠度。同時對於太陽光電案場之監控實務，亦多有著墨、深具參考價值。第三篇為中興工程顧問社大地工程研究中心俞旗文副主任所撰之「國際ORC（Organic Rankin Cycle,有機朗肯循環）地熱發電機供應市場的新趨勢」，俞博士為國內地熱發電領域理論與實務兼具的少數專家之一，尤其對於國外文獻蒐集、統計與分析之投入不遺餘力。本文在ORC地熱發電機的技術、應用現況、未來趨勢與展望，進行了全面性的評估，衡諸當前仍屬起步階段的國內地熱發電領域、相關資料尚屬缺乏之時，越顯彌足珍貴。中興工程顧問公司電力能源部、系統電氣部，則分別與台電公司再生能源處、辰亞能源公司撰寫了第四篇–「台電風場運維展望」及第五篇–「彰濱工業區水面型太陽能發電系統工程概述」，報導有關大型離岸風電、水面型

太陽光電案場之規劃、設計、建置與運維等實務案例，以饗讀者。基於再生能源易受天候等因素影響所造成之不易預測與供電間歇特性，電力系統運轉之平衡與穩定是再生能源加入電網後所需面對的重要課題。台電公司電力調度處吳進忠處長所撰之第六篇–「大量再生能源併網的衝擊與電力調度因應策略」為此一關鍵議題進行了深入的分析、並提出了相關的因應策略。第七篇則邀請丹麥商凱得（K2M）公司台灣分公司負責人徐瑋克先生「探討歐洲風電發展降低台灣學習風險」，現代的風力發電機是1970年代後期石油危機、丹麥研究進入商業運轉，迄2010年丹麥風電裝置容量已達3.75 GW。K2M公司在風場分析與風電案場建置顧問服務領域、於全球有為數甚多的專案經驗，期望本文所提的見解、可有效降低台灣的學習風險。第八篇–係由中國驗船中心所撰「再生能源系統驗證與專案加值效應」，離岸風電的建置與營運需要投入大量的資金，其期程往往達數拾年，為了降低風險與確保系統之品質安全與可靠，業主、政府、銀行或保險公司需要第三方的驗證與確證。值此國內再生能源大力發展階段，中國驗船中心由驗船領域的多年優良經驗與實績，為風電驗證國產化技術的建立已責無旁貸的投入。第九篇–「澎湖七美鄉微電網概述」是由義守大學陳朝順教授、高雄科大辜德典教授及健格公司提供之離島微電網建置案例。如前所述，再生能源具有不易預測與供電間歇之特性，電力系統的穩定運轉需搭配適當的區域性儲能系統與監控調度微系統，陳教授領銜的團隊於七美鄉所建置的微電網系統是國內的先趨與典範。

最後，謹此感謝各撰稿人的熱心投入，使本專輯得以順利付梓，也期盼藉此拋磚引玉，使未來能有更多產官學界先進提出更佳的理念與創意，為未來再生能源的開發與應用，開拓出更寬廣的領域。

臺灣能源轉型機會與挑戰

行政院能源及減碳辦公室主任 / 蘇金勝

關鍵字：能源轉型、太陽光電、離岸風力、再生能源

一、前言

2019年聯合國氣候變化綱要公約第25屆締約方會議（COP25）於西班牙馬德里召開之際，歐盟委員會於12月11日同步提出歐洲綠色新政（European Green Deal），規劃於2050年達成碳中和目標（即碳淨排放量降為零），並建立階段減量目標，以1990年為基準年，2020年減量20%，2030年減量50-55%，2050年則減量100%，做到淨零碳排放目標，以達成2015年巴黎協定期望在本世紀將全球平均溫度升高保持在與工業化之前水平攝氏2度至1.5度以下的目標。為實現這一目標，歐盟針對主要排碳部門採取積極行動，包括推動能源部門脫碳行動，能源生產及使用所產生的溫室氣體排放量占歐盟總排放量的75%以上；更新建築物，建築物占能源消耗的40%；推出潔淨的公共及私人交通工具，交通運輸約占總排放量的25%；同時支持綠色產業創新成為全球領導者，以發展綠色經濟。在能源方面，則以推動提高能源效率與發展再生能源為主，建立安全且負擔得起的能源供應體系，及整合互聯電網與數位化能源市場。

我國在2016年5月起推動能源轉型政策，以達成非核家園、穩定供電、降污減碳等政策目標。在轉型過程則以展綠、增氣、減煤、非核為推動方向，期於2025年再生能源發電占比由4.8%提高至20%，天然氣發電占比由32%提高至50%，燃煤發電占比由45%降至27%，既有核能電廠如期除役及核四不啟封，至2025年底進入無核能電廠運轉狀態。其政策方向與國際推動能源轉型發展綠能之大趨勢一致，其中又以再生能源發電占比擴展至20%最具挑戰性，太陽光電20GW及離岸風力5.5GW為推動主軸，同時也帶動國內綠能產業及綠色就業。

臺灣經濟發展正追上已開發國家行列，能源耗用及用電量仍然每年成長，2019年用電尖峰於7月17日創下歷史新高，瞬時尖峰負載達37,383 MW，當時再生能源發電量為3,878 MW，已超越核電的3,815 MW。各類

再生能源發電，又以太陽光電貢獻最大，高達1,726 MW，發電占比為4.62%，水力發電與抽蓄水力次之，達1,336 MW與594 MW，風力發電則為222 MW。也就是說全年用電尖峰時，太陽光電對供電能力的貢獻度已達4.62%[1]。這個比例將隨著太陽光電設置量增加而逐年增加，不僅可紓解臺灣夏季尖峰供電壓力，同時在降污及減碳方面也有顯著效果。回頭檢視政策推動過程及展望未來發展，再生能發展目標絕不是順其自然Business As Usual即可達成，可說是處處充滿挑戰，必須強而有力的政策措施及政府各部門通力合作，才能克服各種障礙達成預定目標。本文旨在探討未來再生能源還有多大的發展空間，面臨的挑戰以及達成目標的相關路徑。

二、能源轉型為永續發展必然趨勢

工業革命以來，傳統能源架構係以提供低廉及穩定的能源及電力為使命，以滿足產業發展及生活需求。但隨著傳統化石能源日益枯竭及衍生的環境問題日益嚴重，永續發展議題獲得國際社會極度重視，而能源生產及使用又是造成環境污染及二氧化碳排放的主要來源，因此能源議題轉而為以兼顧3E（EnergySecurity, Economic Development, Environmental Protection）為基調，即能源安全、經濟發展、及環境保護，這三者在當前現況互有矛盾衝突，必須謀求某程度的妥協及平衡。世界能源理事會（World Energy Council）2010年起每年與顧問公司Oliver Wyman合作，以指數方法定期編撰發布「世界能源三難指標（World Energy Trilemma Index）」，評估各國在能源安全、能源公平，以及環境永續三個指標之表現。這三個指標著重平衡及健全的發展。能源安全係評估初級能源是否自主供應及多元管理，能源基礎建設是否充足可靠，能源供給可否滿足目前及未來的需求，相關指標包括進口能源依存度、初級能源來源多元化、GDP成長與能源消費關聯性、電源配比多元化、能源安全儲存等。能源公平係評估國民取得能源普及度及價格的可負擔性，評估指標包括電力普及度、電力供應品質、城鄉能源使用品質、電力價格、汽柴油價格、天然氣價格等。環境永續係評估能源供需體系的效率、低碳及再生能源的開發，評估指標包括能源密集度、發電效率、輸配電線路損失、電力排碳係數、人均碳排放量等。此外，世界能源理事會也將國家政策推動因素納入，包括政策的延續性和可預測性、穩定的管制環境、技術研發獎勵、投資誘因、空氣汙染及對土地和水的影響等[2]。

我國最近一次納入能源三難指標排名為2015年，該年130個國家中我國總排名第30名，分別為能源安全54名、能源公平12名、環境永續96名。2013年至2015年我國表現穩定，能源安全與能源公平指標逐年進步，僅環境永續指標為退步趨勢。能源公平為我國表現最佳指標，表示我國在能源取得普及程度和價格負擔方面，為國際排名前段班。在能源安全方面，我們高度仰賴能源進口，能源自主性低，受先天資源秉賦限制表現為中段班。在環境永續方面，我國用電密集度及人均排放量均高，而被擠到後段班，整體而言，提升我國能源自主與提高環境永續，為我們推動能源轉型當務之急。

解決能源三難問題也非僅採行平衡措施

即可達成，隨著近十年來再生能源技術突破性發展，特別是太陽光電及離岸風力發電成本已接近市電價格，為解決三難問題提供了最佳良方。太陽光電等再生能源的分散化特性亦有助於擴大電力普及，在偏鄉、離島及山區提供自主電源。而分散式電源不僅可單獨自主供電，亦可透過電網相互融通發揮其最大效益。由於資通訊技術快速發展，成就了數位化及智慧化的基礎設施，智慧電表及智慧電網便在技術驅動及市場牽引下應運而生。全球能源轉型便在電源分散化、環境低碳化、及系統智慧化的潮流下，電力供需體系轉向以再生能源為主軸的發展趨勢。

三、再生能源成本大幅下降為推動能源轉型趨動力

依據國際再生能源總署（International Renewable Energy Agency, IRENA）評估資料[3]，太陽光電近年來成本大幅下降，2018年較2017年下降13%，與2010年比較則下降77%，大型太陽光電發電廠平均每度電均化成本約新臺幣2.64元（如下圖1）。臺灣嘉義鹽田太陽光電開發案由政府辦理土地變更並

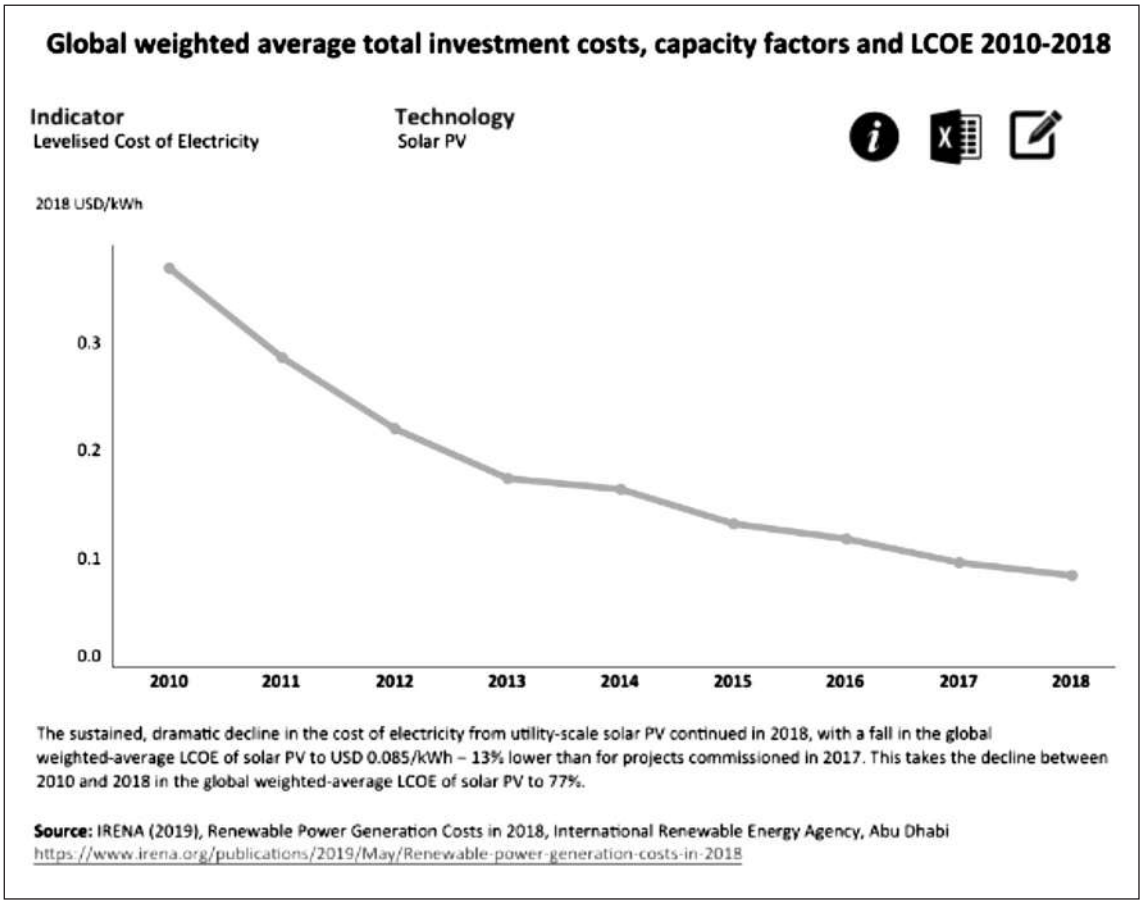


圖 1　2010-2018 年全球太陽光電均化發電成本

開放競標，最低得標躉售電價為2.6元/度。

在風力發電部分，2016年新設陸域風場發電成約在0.05美元至0.12美元/度之間，由於風力發電機價格持續下降，以及輪轂高度提高，增大掃風面積及使風力條件變佳，平均發電成本仍有繼續下降趨勢。離岸風電2014-16年度投產案場發電成本約在0.10美元至0.21美元/度之間，全球離岸風電（裝置容量截至2018年為4,500 MW）2018年成本較2017年微幅下降1%，而較2010年則下降20%，平均每度電均化成本約新臺幣3.94元（如下圖2）。臺灣預定2025年商轉的離岸風場競價價格為2.2元到2.5元，已低於台電公司對用戶平均售電價格之2.62元。歐洲近年來離岸風場競標案已大多為零補貼（即與其他電源在市場上自由競爭，無需政府補貼），或接近市電價格每度電折合新臺幣約2.0-2.5元。

依國際目前太陽光電及風力發電成本現況，其發電成本已達市電同價水準，且將來

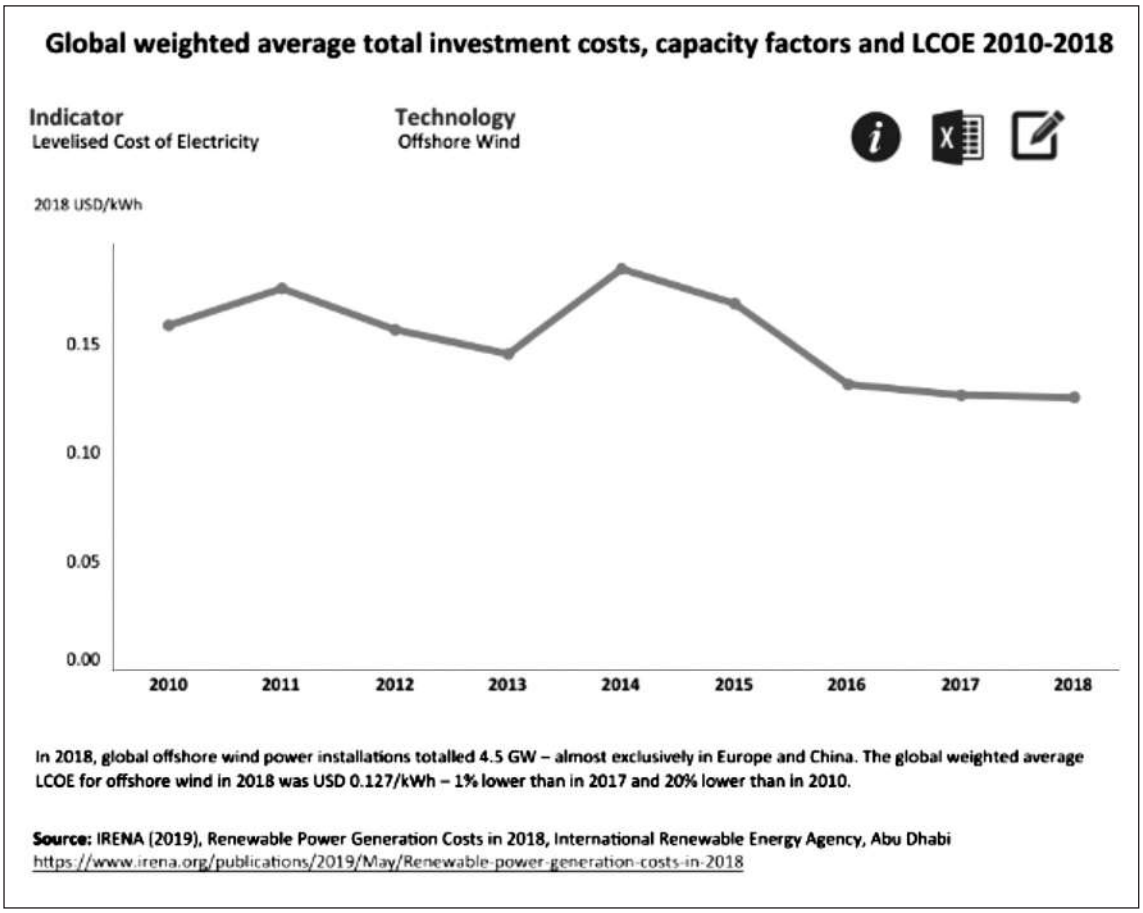


圖 2　2010-2018 年全球離岸風電均化發電成本

隨技術進步及規模經濟不斷擴增，成本仍將持續下降，因此，太陽光電及風力發電已成為全球發展再生能源的主力，亦為推動能源轉型及解決氣候變遷問題的主要項目。在可見的未來，再生能源的發展將澈底解決化石燃料使用所造成的能源問題，如化石能源枯竭、價格劇烈波動、空氣污染、氣候變遷，為地球永續發展找到解決方案，澈底擺脫當前能源三難困境之情勢。

四、再生能源發展潛力與限制

再生能源發展潛力取決於自然資源秉賦，如陽光、風力、地熱、生質能等，各地區各類別再生能源資源或有不同。為評估全球再生能源發展潛力，IRENA進行了再生能源路徑圖（Remap）計畫，以評估國家、地區以及全球擴大設置再生能源的潛力[4]。該路線圖不僅著重於再生能源發電技術，還擴展至運輸及熱能相關再生能源技術。除了各種可能的技術路徑及指標外，尚包括許多其他指標，如系統成本、投資需求、空氣污染及氣候有關的外部性、二氧化碳排放量、以及就業和經濟成長等經濟指標。目前全球每年再生能源發電新增容量已超過非再生能源發電新增容量，IRENA的分析表示，再生能源在整體能源系統（包括電力、熱能及運輸）中占比將持續加速成長。隨著新科技的發展，電力將成為主要的能源載體，至2050年全球電力供應可能會增加一倍以上。包括太陽能和風能在內的可再生能源可以滿足86%的電力需求，能源轉型將使全球國內生產總值（GDP）增長2.5%，總就業人數增長0.2%。這還將帶來更廣泛的社會和環境效益。報告指出，在30年內，與健康，補貼和氣候相關的儲蓄累計價值高達160兆美元。因此，根據對外部性的評估方式，每花費一美元用於全球能源系統的轉換，收益至少為3美元，甚至可能超過7美元。同時，再生能源將創造新的就業機會，其新增工作將高於淘汰化石燃料行業所失去的工作。

臺灣位處亞熱帶，日照充足，適合發展太陽光電，臺灣海峽風力條件優良，西部沿岸地區適合發展陸域風力，臺灣海峽適合發展離岸風力，臺灣地處環太平洋火山地震帶，富含地熱能源，降雨豐沛，可發展水力發電，四周環海，具豐富海洋能源，此外，尚可利用農林廢棄物及沼氣，可作為生質能料源。

太陽光電是臺灣最具發展潛力的再生能源類別，同時也是臺灣最具競爭能力的綠能產業。國內太陽光電設置之國產比率約為九成以上，且太陽光電產業的產值有九成以上為出口，因此產業及綠能發展具有相輔相成的效果。

臺灣中南部地區日照條件良好，年平均日（輻）射量約為1,400-1,600 kWh/m^2，推估年發電量約為1,200-1,400 kWh/kWp；中北部年平均日（輻）射量約為1,000-1,200 kWh/m2，推估年發電量約為900-1,000 kWh/kWp[5]。以太陽光電發電效率約為16%-20%估算，每千峰瓦（kWp）所需面積約為6平方公尺，考量系統設置支架及通道需求，為簡便計，本文將以10平方公尺面積設置1 kWp，每kWp年發電量1,000度（依躉購費率參數為1,250度/kWp）估計，即每公頃屋頂或土地可設置太陽光電容量為1 MWp，年發電量為100

萬度/公頃。推估結果，以臺灣可用的土地面積設置太陽光電提供自給自足的電力供應是可能的。

臺灣2018年全國用電量為2,643億度，總發電量為2,736億度，預估至2025年發電量將成長至3,132億度[6]，假設全部由太陽光電供應國內需求，則所需設置面積約為31.32萬公頃。大家都知道臺灣土地面積為3萬6千平方公里，即360萬公頃。也就是說，臺灣的土地利用10%，不管是直接使用或是複合式利用，以屋頂設置或是漁電共生、農電共生、或水面型設置，即可百分之百供應全國所需的用電量。比較各類土地的使用情形，相信只要做好規劃，太陽光電絕對是臺灣再生能源最重要的類型。依據內政部統計各類別已登記土地資料[7]

如表1，農牧用地約81萬公頃，建築用地及都市土地約55萬公頃，水利用地約6萬公頃，養殖用地約2.6萬公頃。這些土地如充分以複合使用設置太陽光電在執行面可行性是很高的，臺灣要從能源98%依賴進口到完全自給自足似乎不再是夢想，而是可實現的理想。

表 1　臺灣各類別已登記土地統計表

單位：公頃

建築用地	64,764
農牧用地	819,436
林業用地	1,364,977
養殖用地	26,989
鹽業用地	3,900
水利用地	59,968
遊憩用地	6,369
殯葬用地	8,627
特目用地	46,464
都市土地及其他	488,980
	2,890,474

臺灣第二順位具發展潛力之再生能源應為風力發電，其中陸域風力因受限土地利用，發展受限，僅在西部沿海人口稀少的海邊適合設置，估計可設容量約為1,200 MW，而離岸風力發電則具有更大的潛力，臺灣海峽水深5-20 m（淺海）面積約177,920公頃，潛能約9 GW（以每平方公里5 MW粗估），水深20-50 m（深海）面積約654,700公頃，潛能約33 GW，水深50 m-100 m（深海）面積約1,195,400公頃，潛能約60 GW。目前以打樁型離岸風力發電機組技術較為成熟且適合臺灣颱風地震環境使用，其技術適合50米以內水深，風力潛能約42 GW，如扣除保護區、禁限建區、漁業權區、航道、及其他規劃用途，可利用潛能約為10-20 GW，如以10 GW估算，全年發電量約375億度，約占2025年預估總發電量的12%。深海部分雖然尚有設置潛力，但尚須待浮動型機組技術較成熟時才能進一步發展，其可利用潛能亦約為10-20 GW。

生質能源的利用，以廢棄物焚化發電為主，目前已設置629 MW，但因垃圾減量致發電容量擴增受限；另外利用農林廢棄物發電，已設置77 MW，因料源限制及集運成本高，故可增規模不大；此外利用垃圾掩埋、畜禽場及衛生下水道等沼氣發電，已設置約20 MW，目前政府推動養豬場沼氣發電利用，臺灣總養豬頭數約600萬頭，其沼氣發電潛能約40 MW。

有關地熱發電潛力，依據工研院彙整我

國地熱區歷史調查資料及利用美國地質調查所熱儲集層法（Store heat USGS circular 790）地熱潛力區計26處，發電潛能約986 MW。依據調查資料較完整之8大地區及綠島等區域，我國地熱發電潛能約744 MW。

但要完成發展再生能源為主軸之能源轉型願景尚有諸多挑戰及限制待克服，首先是開發成本的下降，我們必須善用技術發展及規模經濟優勢，以降低總體再生能源發電成本。其次，提昇電網韌性，臺灣電網為獨立系統，電力供需要自我平衡，當再生能源發電占比提高時，併網的普及與營運調度的穩定措施，如智慧電網建置等必須同步跟進。第三，再生能源可開發資源雖然足夠，但對環境景觀的保護及土地複合利用等議題須同時兼顧，建立國人可接受的發展模式及機制，以利擴大推廣使用。最後也是最重要的，儲能系統的發展成熟度將攸關我國再生能源占比的多寡，現行雖有抽蓄水力及快速反應機組調節系統頻率，但如無普遍性的儲能系統平衡區域供需，再生能源占比終將受限在一定程度。

五、能源轉型路徑與展望

我國現行能源轉型目標於2016年訂定，規劃2025年再生能源發電占比達20%之目標，並以太陽光電及離岸發電為主要核心項目。其中太陽光電累計裝置容量為20 GW、離岸風力發電為5.5 GW，陸域風力為1.2 GW，生質能發電為813 MW。立法院於2017年1月通過電業法修正案，開放綠電先行、用戶購電選擇權，行政院於2017年4月核定修正能源發展綱領，以能源安全、綠色經濟、環境永續、社會公平為發展目標，6月啟動能源轉型白皮書撰擬，經由政府民間協作，擴大公民對話等程序，擴大地方及公民參與，以建立共識。政府並於2019年5月公布修正再生能源發展條例 ，進一步優化我國再生能源發展環境，提升政策推動的效能。

太陽光電之推廣，經由太陽光電2年推動計畫（2016. 7-2018. 6），以短期達標、長期固本原則，於2年內達成推動目標1.52 GW。後續更以中央與地方共同推動、產業園區，畜、農、漁電共生等三大主軸，建立示範，帶動設置能量，以達成中長期目標，截至2019年底太陽光電裝置容量已超過4 GW，並規劃於2020年總裝置容量達成6.5 GW目標。

離岸風電部分，2019年第一座示範風場海洋風電128 MW已於10月完成併聯運轉，包含其他已遴選及競標開發案，於2025年計裝置容量將達5.7 GW。蔡英文總統並於海洋風電落成典禮宣示將打造臺灣成為亞洲綠能發展中心，並請經濟部提出2026年到2035年，下一個十年階段的新目標。經濟部也隨即規劃2026年到2035年，10年10 GW（也就是每年1 GW）的區塊開發政策目標。

能源轉型2025年再生能源占20%目標看似艱鉅，但卻是國際的大潮流，也是我們必走的路，相信不會在2025年即停止腳步，而是將順應全球永續發展及綠能減碳的潮流持續前行，所幸臺灣再生能源蘊藏量尚有餘裕，發展為綠能主軸的電力供應體系是有可能的，因此如何在發展綠能方面建立國人共識，進一步規劃發展目標則是我們必須持續努力面對的工作。

六、結論

工業革命以來，經濟發展及民生需求加速耗竭傳統化石能源如煤碳、石油及天然氣，不僅引發多次能源危機造成能源價格高漲及物價動盪，另一方面化石燃料的使用也伴隨著污染及二氧化碳的排放，嚴重造成全球暖化現象。面對氣候變遷全球暖化議題，2015年巴黎協定決議在本世紀將大氣氣溫控制在與工業化前比較溫升不超過攝氏1.5度-2度水準，並推動國家自主貢獻機制（NDC）。根據IRENA的分析，如要達到此一目標，到2050年，與能源有關的二氧化碳排放量必須較目前減少70%。而歐盟委員會亦在COP25大會期間，提出歐洲綠色新政計畫，於2050年達到淨零碳排放目標，其中能源部門的脫碳行動是為關鍵。

我國於2015年制定溫室氣體減量及管理法，將國家自主貢獻入法，明定2050年較2005年減碳50%。2016年開始推動能源轉型，以展綠、增氣、減煤、非核為目標，於2025年達成再生能源占總發電量20%之目標。太陽光電必須由約1 GW提高至20 GW，離岸風電由無到有增加5.5 GW。政府啟動跨部會協商機制，以開發各類型潛在設置案場，克服技術及行政障礙，分階段訂定執行計畫，目前太陽光電已超過4 GW，首座離岸風場也於2019年併聯運轉，顯見政策的力道及民眾的支持是推動的關鍵。因此欲達成2025年目標，仍須持續加強政策的強度及各部門的合作。然而2025年亦僅是階段性目標，顯然離2050年國家排放自定目標或碳中和目標還有很大空間。

本文盤點臺灣自主再生能源秉賦及所需設置面積，發覺臺灣尋求以再生能源為主軸的未來電力供應體係是可行的。但在土地利用、電網建構、電力市場、複合使用及基礎設施等方面要有新的看法及共識。隨著國際綠能發展潮流，綠能成本將逐年降低，甚至低於化石燃料發電成本，所帶動的環境效益及環境永續，將是人類文明的一大進展，而我們長久以來追求的經濟成長亦將蘊含其中，這是我們未來的希望及機會，亦是你我大家共同的志業。

參考文獻

1. 台灣電力股份有限公司，https://www.taipower.com.tw/ 台電公司官網首頁 > 資訊揭露 > 電力供需資訊 > 過去電力供需資訊
2. World Energy Trilemma Index 2019, published by the World Energy Council 2019 in partnership with OLIVER WYMAN.
3. IRENA，Renewable Power Generation Costs in 2018, International Energy Agency, Abu Dhabi. 2019.
4. IRENA, Global Energy Transformation: A roadmap to 2050, 2019 edition, Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2019.
5. 經濟部能源局，各年度全天空日（輻）射量與推估年發電量統計表，101 年。
6. 經濟部能源局，107 年全國電力資源供需報告，108 年。
7. 中華民國統計資訊網，https://www1.stat.gov.tw/ct.asp?xItem=15262&CtNode=4648&mp=3

智慧電網發展與再生能源監控實務

台灣電力公司副總經理 / 張忠良

關鍵字：智慧電網、再生能源、太陽光電監控系統

摘要

現代人的生活與電力息息相關，不論是傳統產業或是高科技產業無不以電力為動力來源，電力就是經濟發展的動力。過去，各國的電力大多是以著重於供應面管理的集中式能源作規劃，然而，受到環境生態、氣候變遷、能源效率及電業市場改革等驅力影響下，電力系統將轉型為以強化需求面管理之分散式能源系統方向發展。展望未來，高占比再生能源大量併入電網將對電力系統帶來相當的衝擊，亟須加強對再生能源端的監視與控制。透過電網的數位化、智慧化和現代化，讓電力的供給與需求變化能夠即時掌握與彈性調控，使大量再生能源能融入電力系統調度運轉，達到供給端與需求端共同致力電力調控的參與及品質的維持，增進電能的使用效率，以確保供電可靠度。本文從智慧電網的發展談起，說明臺灣的電力系統概況及智慧電網的總體規劃架構與推動目標，以及現階段的推動成果。此外，政府已規劃2025年再生能源發電占比20%的目標，其中又以太陽能發電為主攻手，帶動近年太陽光電案場的普遍設置，本文將說明太陽光電監控系統的現況，並以民間業者的實務案例介紹太陽光電的監控系統。

一、前言

隨著人口成長、家庭電氣化與電動車發展，目前全世界各國大多面臨電力需求成長的問題。然而，因用電需求增加而仍使用石化燃料發電下，導致燃料短缺及汙染排放等問題，此外，溫室效應造成全球暖化使各地出現極端氣候的現象，為了降低對環境生態的衝擊，許多先進國家紛紛投入再生能源的開發及應用推廣。再生能源如：風力發電系統與太陽光電發電系統的發電受天候、時間、季節變化等的影響甚大，具相當之不確定性，導致發電出力不若傳統發電機組穩定；當大量間歇性發電的再生能源併網於現有之電力網絡，將對電力系統安全性造成衝擊。因現有電網將不足因應再生能源成長的需求，為了維持電力的供應平衡，並兼顧提

高再生能源發電占比，必須建置一套更現代化、更智慧化、更精準預測、即時調節並能充分掌握負載的智慧型電網系統，以確保電網供電安全。現今發展智慧電網已成為一種國際趨勢，臺灣電力系統受限地理位置關係屬於獨立系統，不若歐美大陸有鄰近國家之電力網可以互相支援，因此，對我國而言，電力系統以追求安全穩定供應為首要之目標[1]。

國際上大規模停電事件不時發生，且因停電事件所帶來之影響也巨大，例如：2019年7月中旬美國紐約曼哈頓市因聯合愛迪生（Con Edison）電力公司發電廠的電驛與感測器接觸不良，也就是電驛的安全保護系統失靈，無法隔離故障的電纜，從而引起大規模停電，影響近4萬戶；印尼首都雅加達2019年8月初因樹木碰觸高壓電線引發走火，大火燒斷輸配線路，造成電網電壓驟降，7座燃煤發電廠全部跳機，導致長達8小時大停電，影響高達2,130萬人。臺灣在2017年8月15日發生天然氣供氣管線的安全裝置偵測到異常而切斷供應，導致大潭發電廠機組全數跳電，全臺約12%電力來源瞬間消失。2019年8月9日英國英格蘭及威爾斯等地因2座發電機同時故障而跳脫，加大其他發電機組負荷，使電網電壓驟降，導致部分地區在尖峰時刻停電1~2小時，波及近100萬人的通勤與生活。

自2009年10月美國總統歐巴馬宣布於經濟復甦方案中投入34億美元於智慧電網相關發展，從此智慧電網成為全球電業的熱門話題之一。各國政府積極推動智慧電網，需因應各國電力系統之需求及能源政策而量身訂作，部分原因係來自於整合再生能源占比增加，但主要原因是為了解決過去傳統電網老舊、效率不佳、調控功能及韌性不足等問題，進而建立新的智慧電力調控與多元資源整合方式，提升整體輸配體系的效率、彈性、可靠度和安全度[2]。

二、智慧電網發展

（一）智慧電網定義

智慧電網（Smart Grid），係指透過資訊、通信與自動化科技，建置具智慧化之發電、輸電、配電及用戶的整合性電力網路，強調自動化、安全及用戶端與供應端密切配合，以提升電力系統運轉效率、供電品質及電網可靠度，並促進再生能源擴大應用與節能減碳之目標。智慧電網涵蓋的範圍包含發電與調度、輸電、配電及用戶等架構，推動進程為即時資訊收集、中央監控及全面系統整合等三階段。表1為現有傳統電網與智慧電網之比較，可瞭解智慧電網和傳統電網有明顯的差異，智慧電網透過整合及分析電網各處所設置的感測器所蒐集的資料，使電力公司對於電網的運轉及資產的管理有更高的掌握度，以提升電網效率、提高電力供應品質，除可增進電力公司的經營績效外，亦可使電力用戶享受較佳的服務並有多樣化的電價方案可供選擇，讓用戶能主動參與能源管理。

（二）智慧電網發展階段

2010年世界經濟論壇（World Economic Forum）將一個成功的智慧電網的計畫分為三個階段如圖1所示[3]，橫向座標軸代表的是時間的演進，縱向座標軸代表的是價值的

表 1　傳統電網 VS. 傳統電網

項目	傳統電網	智慧電網
發電方式	少數大型的發電廠	許多小型的電力供應商
地域性	集中式且侷限	分散式且無疆界
電網規模	大型電網及電纜為主	小規模區域性電力輸送
電力傳輸	單向傳輸	雙向傳輸
通訊模式	單向、由上而下	雙向流通
用戶角色	被動，僅支付帳單，為消費者	積極參與電網系統，為產銷者
方案選擇	單一	多樣化
電表種類	電子機械式，人工抄表	數位式，可遠端讀表
設備檢查	須手動檢查及測試	由遠端執行檢查及測試
故障處理	須靠人力尋找故障點並手動恢復，較耗時	自動修護，即時恢復
故障範圍	嚴重時可能發生大範圍停電	小範圍停電
用電掌握	較難預估	較易掌握並可達到即時管理

（資料來源：本研究整理）

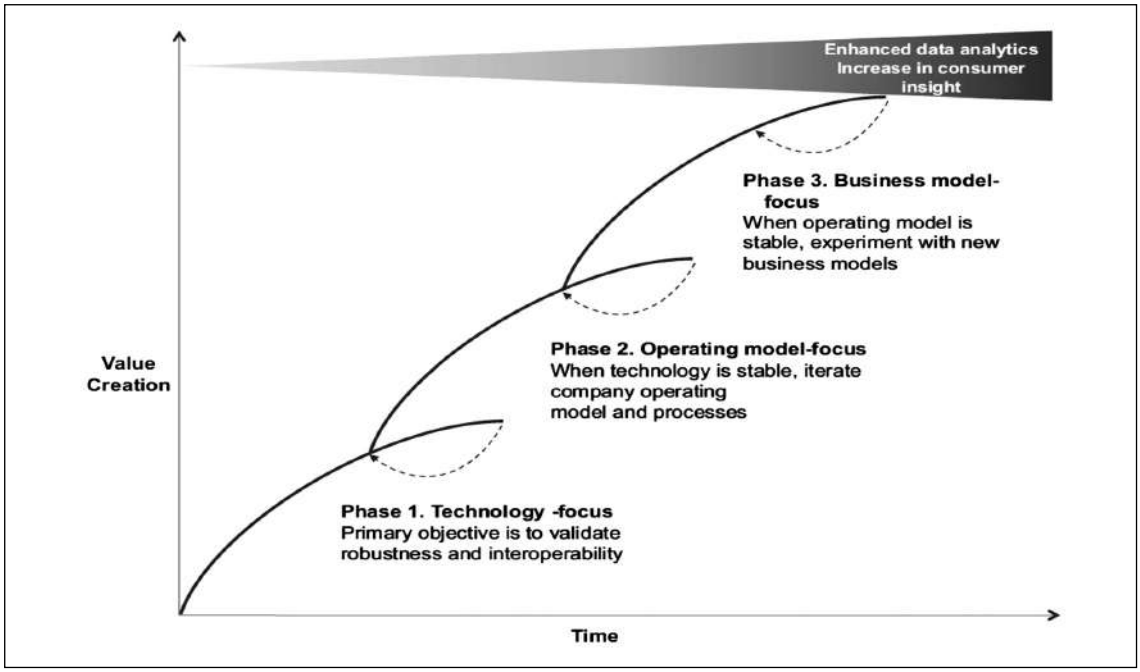


圖 1　國際智慧電網發展階段

創造，逐步強化資料分析及提高用戶的洞察力。首先，第一階段為1.0的技術導向，此階段之發展重點在於確認技術穩健性與互操作性，如資通信標準、管理平台建立及資料整理等等，目前臺灣智慧電網發展處在第二階段，也就是2.0的實務運作模式導向，此階段

為技術穩定後逐步落實業務運作與流程，以解決問題為導向擬定各項行動計畫。台電公司作為政府推動智慧電網之主要執行單位，以金門島為智慧電網建置之示範場域，同時取法金門經驗布局臺灣智慧電網，在資通訊層次的基礎建設完成後，強化所有技術與應用，尤其在電力調度上能有更多元新應用。最後，待實務運作穩定後，將邁入第三階段3.0的商業模式導向，達到電力市場交易多元化及產生電動車、儲能的商業模式。

（三）智慧電網衡量指標

國外經驗顯示，建立客觀的評估制度將有助於智慧電網的穩健發展，國際上有關智慧電網之衡量指標有美國智慧電網聯盟的評估指標以及新加坡電力集團全球智慧電網評估指標。其中，美國智慧電網聯盟（GridWise Alliance，GWA）針對智慧電網的發展程度制訂電網現代化指標（Grid Modernization Index，GMI），從政策落實、用戶參與及電網運轉層面做為發展的評估依據，透過資料蒐集及公開可取得的資訊評比美國境內50州及哥倫比亞特區（DC）智慧電網的發展。2013年首度發布GMI-1報告，接下來並分別於2014年、2016年、2017年及2018年陸續發布年度報告。GMI從3大層面包括超過75個指標，每一個指標被賦予分數，而各州在各類別中的分數加總，即為其總得分，主要衡量項目及分數配比如下圖2[4]。

圖 2　美國 GMI 指標

2018年10月29日新加坡電力集團（SP Group）發表全球第1個智慧電網指標（Smart Grid Index，SGI），SP Group前為新加坡公共事業局所屬的電力與天然氣事業部門，為新加坡超過140萬的客戶提供電力服務及液化石油天然氣的輸配等，屬國營之跨國企業，該集團致力於透過SGI帶動亞太區域智慧電網的發展，並進一步驅動全球智慧電網發展與創造新的商業模式。SGI從7個構面去衡量全球主要電力事業電網之發展程度，包括(1)監測和控制(2)數據分析(3)供電可靠性(4)分散式能源整合(5)綠色能源(6)資通安全(7)用戶參與及滿意度，如圖3所示[5]。去年新加坡電力集團採用公開資料調查35個國家45家電力事業，其分析結果可讓電力事業瞭解各構面中有哪些公司屬於最佳標竿企業，有助於電力事業發展智慧電網，朝向強化服務、節省成本的目標。2019年10月新加坡電力集團再次公布最新全球35個國家一共75家電力事業智慧電網指標評比結果，此次，參與評估之電力事業家數已較去年成長一倍，意謂此指標已成為國家能源政策發展重要之國際指標之一[6]。台電公司2018年度評比總得分為29%，並獲得2顆星，2019年台電公司總得分較去年度大幅提高至64%，且榮獲「資通安全」指標最佳實務（Best Practices），代表台電公司在智慧電網的推動及資安防護上獲得國際機構的肯定。

圖 3　新加坡 SGI 指標

（四）臺灣電力系統現況

我國電力系統屬於大型集中式的系統，有發電機組大型化及負載集中兩大特色。2018年度台電公司系統發購電量結構顯示，電力來源主要為火力（包含燃油、燃煤和燃氣）占比約82.2%，核能占比約11.4%，兩者合計約占總發購電量之93.6%，再生能源與抽蓄發電各占總發購電量之4.9%及1.4%[7]。2019年再生能源發電占總發購電量的5.9%。現有大型發電廠多集中設置，且距離電力需求中心有相當距離，為提高輸電能力並減少傳輸損失，須先提高電壓以利長距離輸送，再依用電需要逐段降低電壓，供終端用戶使用。遠距離輸電與大電網互連，固然提高電力系統的經濟性與可靠性，但偶發故障造成供電的影響相形擴大。

現有傳統電網系統為單向傳輸電力，用戶及小型再生能源發電設備，並不會向電力調度中心回報即時用電需求與發電狀態。然而，當前我國電網面臨諸多挑戰，例如：2025年高占比的再生能源併網、現有供電設備老舊如何強化以因應極端氣候、提升電力系統運轉效率等等。為解決現有傳統電網系統瓶頸，並克服現有電網所面臨之課題，須透過逐步建構兼具效能與穩定性的智慧電網，導入先進的資通訊技術與設備、再生能源管理系統、物聯網、大數據等分析技術，以建立高品質、高效率和環境友善的智慧化電網，滿足民眾對電網改善的需求，並藉此提供國內產業市場練兵機會，帶動相關產業發展，創造更高的經濟價值。

（五）臺灣智慧電網發展

2012年行政院核定之「智慧電網總體規劃方案」的推動時程共分為三階段，包括前期布建（2011~2015年）、推廣擴散階段（2016~2020年），以及廣泛應用階段（2021~2030年）。過去智慧電網的推動屬技術導向並著重於硬體的布建，即智慧型電表基礎建設（Advanced Metering Infrastructure，AMI）的布建，然而，因應政府推動能源轉型政策，2025年再生能源發電占比20%的目標；2017年1月26日電業法修正案開放再生能源發電業及再生能源售電業，亦開放用戶綠電購電選擇權等；2017年8月15日的815大停電事件等影響下，政府重新檢視「智慧電網總體規劃方案」，包含面臨問題、目標及推動重點等，並提出達成目標所需之各項行動計畫。台電公司為落實政府智慧電網的推動，採取新作法一改過去以生產流程區分方式，改以重要整合應用功能來劃分，共分為「智慧調度與發電」、「電網管理」、「儲能系統」、「需求面管理」、「資通信基礎建設」及「規章制度人力」，推動架構及構面說明如圖4[8]。透過資訊、通信與自動化科技的運用，在發電、輸電、配電，裝設電腦監控設備及系統，期能透過這些設備「雙向溝通」能力，讓供電量及用電量的數據數位化、可視化，並對其中資訊加以整合分析，達到電力資源的最佳配置，解決電力業者在電力輸送及個別用戶在電力使用可能出現的問題，提升電力系統運轉效率、供電品質及電網可靠度，並促進再生能源擴大運用與節能減碳[1]。

當前我國智慧電網推動之主要目標分別說明如下：

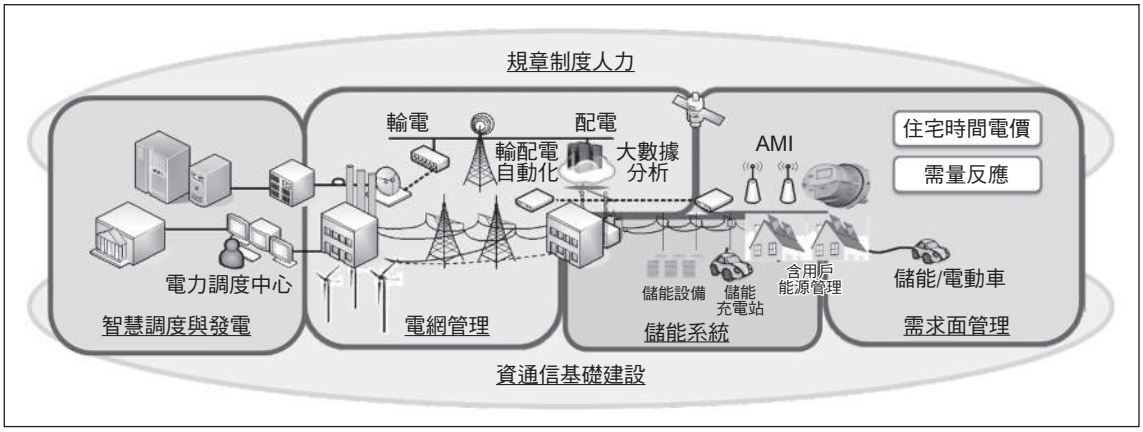


圖 4　台電公司智慧電網六大主題

1. 達成電力系統穩定運轉：為增加再生能源加入併網供電，須加強再生能源即時發電之預測，結合氣象預測及發電即時監測等資料，以增加電力調度精確性，並搭配儲能系統建置及輔助服務採購。現階段台電公司智慧電網已規劃建置再生能源發電資訊整合平台，以整合再生能源監測、推估與預測資訊，協助調度人員即時掌握全系統再生能源發電情況。

2. 提升用戶供電品質：台電公司已展開配電自動化開關建置，未來將搭配圖資系統及即時監控資訊，持續加強自動化軟硬體建置，預計2020年建立輸電設備維護管理系統及結合即時地質、氣象圖資平台，並於2027年達成饋線100%自動化，以減少停電時間，並大幅縮短復電時間，提升用戶供電品質。

3. 促使用戶節能：目前智慧電表已完成全國高壓大用戶之布建，截至2019年11月底已完成累計約33萬具低壓智慧電表安裝，預計於2020年底達成100萬戶，2024年底達成300萬戶的目標。用戶目前已能透過智慧電表查詢用電資料，並進行最適電價方案試算等，將持續加速推動AMI之布建，並加強宣導「自己的用電自己省」，達到用戶自主節電之目的。

（六）台電智慧電網推動成果

為增進智慧電網的社會溝通，台電公司透過建置智慧電網展示場，採用多樣化互動模型裝置、擴增實境（AR）技術及動畫影片，以深入淺出的方式來介紹智慧電網運作。2018年12月分別於臺北市總管理處，新北市綜合研究所樹林園區及高雄市鳳山區處三處完成智慧電網展示場，展示場內容涵蓋智慧用戶、微電網、再生能源調控、智慧電網管理、智慧調度等互動主題，並蒙蔡總統重視與肯定，親臨視導總處展示場。另外，金門島為智慧電網技術的示範場域，2019年7月30日台電公司金門智慧電網展示場落成啟用。

2019年9月，臺灣智慧城市發展協會頒發第二屆智慧城市卓越獎，此次特別將首次頒發的「智慧能源獎」頒給筆者，代表肯定台電公司在配合政府能源政策及智慧電網相關建置工作不遺餘力。近年來，台電公司積極強化與社會互動溝通，推動資訊揭露與開放資料（open data），至今已開放143個資料集，2019年10月行政院國家發展委員會頒發108年度「政府資料開放人氣獎」，排名前10名的獲獎機關中，台電公司取得第2名至第6名以及第8名殊榮，一共有6項資料集獲獎，更是國營事業中唯一上榜的公司，顯見台電公司所開放之資料集備受各界關注。台電公司累積許多豐富電力資料，惟在過去僅著重資料留存，為了使電力資料能創造更高的附加價值，自2016年起辦理台電黑客松電力開放資料創意競賽及停電預測挑戰賽。

2019年11月，台電公司首創先例舉辦首次資通月一系列活動，除了電力物聯網、智慧電網資安防護、智慧電表整合應用及5G通信相關設備及智慧城市應用等展示，亦辦理第一屆AI大數據人才發展營競賽成果發表，從臺灣在能源轉型所面臨有關環保、穩定供電、再生能源及節能共四大議題出發，分別由台電公司發電、配電、環保、電力調度、供電、再生能源及業務、綜合研究所8個單位籌組8隊相互競賽。在設備維護方面有部分隊伍就風力發電機、輸電線路絕緣設備、隔離故障電流的斷路器及變電箱中的變壓器等運用歷史運轉資料進行分析，進一步預測未來可能異常的設備，預先安排檢修或更新，以提高設備運轉時間並降低維護人力配置。另外，亦有參賽隊伍透過分析家用單位智慧電表（AMI）的用電資料，針對個別用戶的用電習慣，主動發掘、量身打造客製化的節電獎勵方案；也有隊伍以改善秋冬空污為題，分別以臺中、林口電廠運轉資料結合氣象、空污指數等資料，期藉由資料分析找出關聯性，提供電力調度最佳升降載時機的參考。透過此競賽讓巨量的電力資料能夠發揮積極效益，輔以機器學習及人工智慧等演算法進行資料分析與模型建立，以協助解決電力事業營運上所面臨的問題及挑戰。

三、太陽光電監控實務

（一）太陽光電監控系統現況

考量我國自然資源及氣候條件等因素，再生能源發展策略以技術成熟可行、成本效益導向、分期均衡發展、帶動產業發展及電價影響可接受作為五大規劃原則，據此，以太陽光電與離岸風電為主要發展項目。依據經濟部能源局能源統計資料顯示，我國再生能源裝置容量至2018年底累計達6,246.3 MW，至2019年10月底累計已達7,585.4 MW，當中又以太陽光電發展最為快速[9]。政府積極推動再生能源開發，除公告施行「再生能源發展條例」，行政院亦核定第二期「太陽光電2年推動計畫」，逐步調整再生能源推動目標，目前政府已規劃2025年再生能源裝置容量達成27 GW的政策目標，並希望能將再生能源發電占比提高至20%，其中又以太陽光電裝置容量20 GW佔最大宗，包括屋頂型6 GW及地面型14 GW，顯見政府集中資源聚焦太陽光電的設置推動，此舉也促進國內太陽光電系統設置快速蓬勃發展。以下將從實務面介紹目前民間業者太陽光電站的監控系統。

隨著太陽光電之電站設置日益普遍，各家系統之投資者，為了追求良好的報酬率與投資效益，以及縮短投資的回收年限，如何確保太陽光電系統能夠可靠、穩定、長期的運轉，及降低營運風險儼然成為重要的課題。部份業者在建置或在電廠銷售推廣時，常常將監控系統設定為選購之項目，但是，因為太陽光電系統屬分散式的電廠，且因為投入成本高，業者均希望一座發電設備可穩定發電至少20年，依不同大小之容量與型式，分佈在全臺各地的廠房、機關、農畜舍或一些偏鄉區域，一般企業以成本來考量，不可能在分布全臺各地區內的案場內，皆安排固定人員隨時監看現場狀況，而案場內的模組板、逆變器、交直流電箱等設備的種種狀況，將對發電效率有重大影響進而影響業者的收益情況，故較具規模與專業的太陽能光電系統商的維運商，大多會於各個案場裝設遠端監控系統，並透過專業的維運團隊，隨時掌握各個案場實際發電現況、每日售電收益等數據資訊，亦可利用雲端化的監控系統，針對各個案場的異常數據做出即時反應與判斷。

因應太陽光電設置容量逐年增加，各家廠商也推出不同的商品介面的監控軟硬體產品，讓業者可以更簡單、更便利的管理自己的電廠。雖然市面上的監控設備廠家眾多，但就監測的數據資料而言其實都大同小異。

（二）太陽光電監控系統實例

太陽光電監控系統主要可概分為兩大系統：1.監控系統，2.防盜保全系統。在監控系統中，案場內所裝設的每台逆變器之通訊線路彼此連接，依不同案場需求規劃，以串接、並接搭配有線或無線的方式，連結至各案場之監控箱內的資料蒐集器。另會有安置感測設備，包含日照計、模組溫度計、環境溫度計...等，透過現場的數位錶頭做訊號轉換，不僅人員可以現場即時查看數值，亦可將資料傳送到蒐集器內紀錄。日照計主要可分為電流型與電壓型兩種規格；溫度計較常見的規格為PT100，少部份則會使用K-TYPE規格；針對不同的裝置都必須搭配專屬匹配的錶頭使用。在資料傳輸的部分，各家設備多以國際標準的通訊協議“Modbus”透過RS485接口的方式做為傳輸資料的方法。資料蒐集器通常都會直接設定好一個固定的時間，以規律的方式向各個裝置請求資料，再將其所有收到的資料匯整後，透過有線網路或4G無線網路的方式將資料上傳到雲端資料庫主機存放，透過即時的運算分析後，在監控網頁上呈現出各項資訊。此外，為避免因為網路功能異常造成資料流失的情況發生，資料蒐集器內亦有暫存的空間，當網路無法連線時，先將每筆資料儲存起來，並加入了判斷對外連線失敗的網路設備重啟機制。

此外，針對案場的電信網路，亦有申請專屬的MDVPN（Mobile Data Virtual Private Network）電信企業群組（俗稱內網），此部份除了相較於一般民眾使用的4G網路更為隱密且安全之外，相關的資訊人員也可透過內網，直接遠端連線到各個案場，針對監控設備異常的狀況做處置與判斷。監控網頁背後有著完整的雲端資料庫系統，它記錄著各個案場包含發電資訊在內的所有資訊，維運團隊可透過監控網頁查看案場即時狀況，包括所有案場之日照、溫度、各台逆變器的發電

功率、電壓、電流、最大功率追蹤曲線與分析報表...等。不僅如此，每個協力廠商、統包工程單位、逆變器維護商、投資者、財務人員、地主等相關人員，都能依其需求開放個別的功能與資訊，各取所需。其數據傳送到雲端主機後，會將其長期紀錄存放於資訊庫內，可將單一案場或多個案場的歷史資訊交叉比對，甚至進行大數據之分析等應用，以進一步改善並提升效益分析。

有關防盜保全部分，許多太陽能光電案場屬分散式的電廠，分布在全臺各地，且大都屬無人看管或偏僻地段，為了維護案場設備與完整性，均會設置防盜保全系統，一方面可即時檢視現場即時影像，另一方面案場內重要設備上會加裝磁簧感測器，利用監視鏡頭記錄案場內之電錶前錶後設備、交直流箱體、逆變器或模組板的狀況，並在斷電或異常現象發生時立即通報相關值班人員。因為太陽光電系統動輒需要數百、數千萬的投入，在天災或人禍造成不可避免的損害時，若有防盜保全的監視畫面記錄，亦有利於做後續求償或保險理賠時的重要佐證資料。

（三）太陽光電監控資訊傳輸技術應用

此外，有關發電端資訊回傳方法上，因應業主的需求，目前亦有新的發展。以往傳統的有線施工方式有安全性與美觀的問題，且後續故障維護有查線不易之困難，若屋頂距離過遠更會需要裝設多台主機造成建置費用過高等問題，且若是學校及國有土地不動產使用之特殊性而常有單一案場一定區域內有數棟分散型建築物，若採用傳統有線佈線方式除了造成額外拉線距離過長造成傳輸問題，同時也增加傳輸成本。目前已有業者依據太陽光電案場監控資料資訊及建築物分散特性，選擇並開發出較低數據流量且傳輸距離較遠之低功耗廣域網路（Low-Power Wide-Area Network，LPWAN）之LoRa（Long Range）通訊架構，以有效降低成本且傳輸品質穩定精確。

「工欲善其事，必先利其器」，太陽光電的監控系統就如同維運團隊的千里眼與藏寶圖，讓管理者毋須親臨現場，也能獲得廣佈在各區案場之即時運轉資訊與設備運作情形，清楚掌握每個環節，還能透過它提供的資訊與蛛絲馬跡，找到問題點並一一排除。當前政府致力於再生能源的推動，第二期「太陽光電2年推動計畫」促使民間業者亦大舉投入設置許多太陽能光電案場，因投資成本高且回收期限長，因此，透過良好的太陽能光電監控系統設備，提升效能與增加運轉時間讓發電量達到最佳化，換言之，盡可能的讓機器設備在長時間均能維持最佳效能持續的運轉，不僅可以有效降低管理成本，更可藉由系統的彙整功能提升管理效率，提高電廠管理效率。

四、結語

各國因先天條件不同，在智慧電網規劃之發展重點亦不盡相同。美國發展智慧電網的目標在於升級老化的輸配電基礎設施，以減少停電所造成的巨額損失，同時增加即時監控能力。歐盟發展則關注於解決能源短缺及確保環境永續，因此，規劃歐洲能源與氣候綜合方案（EU Energy and Climate Package）。我國鄰近國家日本建構智慧電網

目的主要為發展再生能源，以達到低碳社會的目標，因此著重再生能源、電池應用及微電網等技術的發展；中國大陸因地域幅員廣闊、電網普及率較低，智慧電網著重在輸配電設備升級；韓國建設智慧電網主要目的為奠定低碳綠色成長，並扶植相關產業出口。我國電力屬獨立運轉系統，並無與其他國家之電力網互聯，在大量電力需求下，電力的供給量及穩定度益顯得重要，尤其當間歇型再生能源占比不斷提高的趨勢下，電力系統的運作品質及再生能源的供電狀況將是必須關注的重要議題。依政府規劃2025年再生能源發電占比20%的目標，其中，太陽光電的裝置容量目標又屬大宗，使得國內太陽光電案場如雨後春筍般地設置，然而，太陽光電案場營運效率的優劣與其監控系統關係密切，本文介紹民間業者太陽光電站監控系統的實例，說明監控系統的維運對太陽光電站案場營運成效的影響，及各個案場裝設防盜保全系統的重要性。

我國過去在智慧電網的推動著重於技術層面，自2018年起政府重新檢視「智慧電網總體規劃方案」，採取新作法以加速基礎電網智慧化改造，將過去以技術項目開發為主的策略改以解決問題為導向，完成政府2025年能源轉型政策目標並確保穩定供電。未來將繼續朝向智慧電網目標努力，透過現代化、數位化且智慧化的電網將創能、節能和儲能和智慧系統整合起來，以兼顧能源安全、綠色經濟及環境永續。

參考文獻

1. 行政院新聞傳播處，「推動智慧電網—確保電力穩定」，108 年 12 月 9 日。
2. 藍弋丰，「電網智慧化從調控電力輸配著手，加州新創事業推智慧電線」，104 年 5 月 11 日。
3. World Economic Forum,「Accelerating Successful Smart Grid Pilots」p.30，July 2010.
4. GridWise Alliance, 2017 Grid Modernization Index, July 2017.
5. SP Group, 2018 Smart Grid Index,October 2018
6. SP Group, 2019 Smart Grid Index,October 2019
7. 台灣電力公司網頁，http://www.taipower.com.tw
8. 張忠良，「跨域創新 智慧電網」，台灣電力企業聯合會年度專刊預定 109 年 3 月發行。
9. 經濟部能源局統計資料庫 https://www.moeaboe.gov.tw/wesnq

國際 ORC 地熱發電機供應市場的新趨勢

財團法人中興工程顧問社副主任 / 俞旗文
財團法人中興工程顧問社組長 / 譚志豪
財團法人中興工程顧問社正研究員 / 雷世璋
財團法人中興工程顧問社助理研究員 / 楊智豪

關鍵字：有機朗肯循環、ORC、地熱發電、廢熱回收、生質能

摘要

本文分享介紹國外產業的統計分析資訊，探討國際ORC地熱發電機供應市場的新趨勢，希望能給國內發展地熱的投資團隊，提供足夠充份的資訊，據以正確於地熱發電機的選擇上，有所依循。本文的統計分析係引用國外文獻的資料，透過其中蒐集統計了約700個ORC系統發電計畫，從而建立了全球第一個可靠的ORC系統歷年來應用於地熱發電市場演化的相關資料庫。此資料庫統計分析對應的地熱系統總發電量達到27億瓦（2.7 GW）。本文中，在介紹ORC技術的工作原理、歷史演變，與主要的應用領域後，也一併討論了目前主要ORC系統技術的市況發展現況與未來趨勢，其中也包括其對應裝置容量、歷史資訊，與大規模經濟展望的探討。最終，對於近年來地熱發電所依賴的ORC系統技術的市場走向的成長潛能與未來展望，進行了整體性的評估。附帶地，本文特別也針對工業廢熱的回收應用方面的潛能，進行了基本性的產業評估。

一、前言

有機朗肯循環（Organic Rankin Cycle, 簡稱ORC）係將熱轉換為電能的可靠技術。時下已廣泛應用於可再生能源（生質能、地熱、太陽能），與工業能源的效率提昇。ORC系統最初由極小尺度（幾個kW、瓩，或千瓦）的共生發電，逐漸發展大到幾個百萬瓦（MW或兆瓦）等級的地熱電廠。自1970年代開始，它緩慢地從一個小型的發電試驗雛型概念，發展到目前強大的商業市占

規模，主要因素在於能源成本大幅增加的經濟誘因下所使然。雖然如此，基於它的應用市場、製造方法、所在地域等不同因素，形成其技術演化差異極為廣泛的分佈範圍，因此，一般很難將此技術的發展脈絡，精準地掌握清楚。

所幸透過Tartière and Astolfi（2017）兩位加拿大與義大利的學者，經過有系統的資料蒐集更新與分析，協助統計了國際上約700個ORC系統發電計畫，分屬總共27家供應商提供的資料，從而建立了全球第一個可靠的ORC系統資料庫，包括了1980年代以來應用於地熱發電市場演化的相關資料庫。目前資料內容大致更新至2016年底，統計資料則於2017年在義大利米蘭舉行的第四屆ORC電力系統國際研討會中公開發表[1]。各種相關資料也可以在Analysis of the Organic Rankine Cycle market的網站查詢[2]。此資料庫涵蓋的系統所對應的總發電量達到27億瓦（2.7 GW），對於現階段國內再生能源發電應用領域，尤其是地熱發電方面最適發電機組的選擇，提供了極為實用的參考資訊。

（一）有機朗肯循環技術與應用

有機朗肯循環（Organic Rankin Cycle，簡稱ORC）與大多數火力發電廠用於發電的傳統蒸汽原理運作的朗肯循環（Rankin Cycle）具有相同的原理，最大的差異在於前者使用有機流體（organic fluid）代替水，作為主要工作流體。圖1所示為為ORC技術

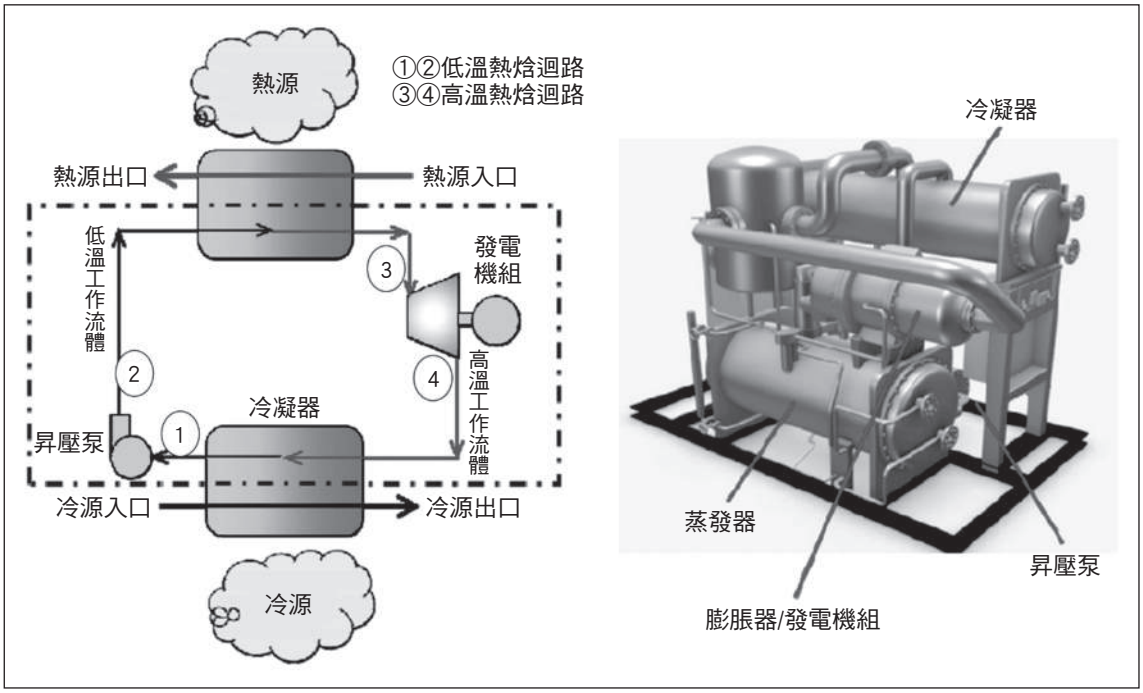


圖 1　典型有機朗肯循環的概念 [3]：（左）技術原理；（右）發電機應用

原理與簡易發電機應用的示意圖（郭啟榮，2013）[3]，系統可利用低溫沸點工作流體（俗稱冷媒）將熱源、冷源的熱能溫差轉換為電力輸出。採用ORC系統的發電方式並可根據可用的熱源和工廠規模，選擇最佳化的工作流體，提昇整體效益。此系統可能達到的多重優勢可包括：(1)更高的渦輪機械效率；(2)冷凝器真空度的限縮；(3)與蒸汽朗肯循環或氣體循環相比，具備更高性能，特別是對於80至350°C相對較低溫度下的熱源和低於20 MW的功率輸出[4, 5]。這項優勢開闢了利用原本會浪費的低等級熱量的可能性。它在新能源或現有能源密集型應用領域的能源效率提升方面，可以發揮重要作用[6]。目前比較常用的工作流體包括了：碳氫化合物（hydrocarbons）、氫氟碳化合物（hydrofluorocarbons）、矽氧烷（siloxanes），以及這些成分的混合物（mixtures）等[7]。ORC系統熱效率受工作流體的蒸發溫度及冷凝溫度間的溫差影響，溫差愈大、熱效率愈高。這些獨特的優勢使得ORC系統成為發展利用各種再生能源的熱源，將其轉換為電能時最可靠的選擇，這些熱源例如地熱，生質燃燒，工業餘熱，和太陽能等。

有關ORC技術的原理，最早係由T. Howard於1826年所建立[8]，他首先在功率循環中嘗試使用乙醚（Ether）作為工作流體。基於這個想法，Ofeldt和Esher Wyss AG等公司首先研製了幾種石腦油引擎（Naphtha engines）來作為啟動循環的動力來源。當時這些引擎仍無法建立真正具有利基的市場，主要是因為它們的測試過程發生了各種事故，因此大大地阻礙了當時ORC技術的發展。現代商業化的ORC工廠的第一個成功案例係由D'Amelio於1936年建造，該工廠基於簡單的一氯乙烷（Monochloroethane）朗肯循環，該循環由太陽能加熱並由單次脈衝渦輪機（single stage impulse turbine）提供動力。在接下來的幾年中，相同的想法被應用於分別具有2.6 kW和11 kW輸出功率的幾個低溫地熱發電廠。到了1960年代，沿襲D'Amelio的思考，以色列國家物理實驗室的研究員，包括Tabor和Bronicki兩人開始對具有潛能的各式流體進行廣泛的篩選，研究過程突顯了使用高複雜度氟利昂（freons）的優點，並定義了當今仍廣泛使用的再生飽和循環配置（Regenerative saturated cycle configuration）。在當時尚有米蘭理工大學的Angelino,Macchi,和Gaia教授也在進行類似的科學研究。

透過上述這些經驗的累積，引導出了多個原型機設計的成果，並分別促成了ORMAT（1964由Bronicki創立）和Turboden（1970由Gaia創立）這兩家公司的成立。這兩家公司至今已儼然成為了ORC市場上最大的參與者與技術供應者。這當中也有許多研究機構也曾為ORC技術的發展有所貢獻，例如芬蘭的Laapeernanta技術大學開發了小型密封式渦輪膨脹機，而倫敦城市大學則進行了容積膨脹機的研究，且定義了創新性的循環配置。近年來，許多研究機構所衍生的許多新創公司也陸續開發並實施了各自的具商業化能力的自主研發技術元件，例如Exergy公司的徑向流出渦輪機；Enertime和Enogia公司的中型至小型軸流渦輪機；TriOgen公司的直接蒸發單元；Zuccato公司的徑向流入渦輪機；還有Electratherm, Opcon, E-Rational等公司用於小

型應用的螺桿膨脹機等等。通過工業界和學術間強有力的合作下，各種研發成果項目，包括工作流體，膨脹器或循環配置，可以產生多種組合以提昇整合發電效率，目前已在市場上創建了一個充滿活力的產業。

（二）資料蒐集方法

事實上，直到今日ORC發電技術並不是很廣泛為人所知，以至於基於該技術的發電廠數量，經常被嚴重低估。這相對也造成了許多政府在政策上尋找無碳發電的解決方案時，由於資訊的不充分，而未能將ORC發電技術列入考慮，這難免也間接阻礙了其市場發展的有利機會。本研究的目的旨在以工業或產業的層次，進行廣泛市場現況的資料蒐集來研析盤點ORC國際市場現況，希望能有助於改善這個現象。

市場現況的資料蒐集過程，有些僅止於實驗室規模或未連接到電網的小型ORC工廠，並未納入蒐集資料庫內。對於非商業性但具有數百千瓦/幾MW的顯著功率輸出的示範性質工廠，則選擇納入於資料庫中。資料庫整體而言，所有的製造商數據，涵蓋包括了來自27個公司的提供的資料，已發表的文章，和商業財務報告。這些資料的整併，建立了1975年以來投入運行的所有ORC項目的準確數據庫。讀者可在文獻[9]檢索所有參考資料的所在位置的地圖。

有一些製造商則基於商業機密考量，並未能公開其參考文獻，並拒絕參加相關的研究調查。因此，此數據庫並非是100％詳盡的。截至2017年2月，研究認為拒絕參加相關的研究調查所佔的總裝機容量不超過50 MW，只佔了全部2,701 MW中的1.9％。若以現有佔大部分市場的蒸汽閃發式（Flash type）和雙循環式（Binary type）兩類的大型地熱機組項目中，研究中則僅考慮了雙循環式發電的部分。表1按字母順序列出了數據庫中包含的27個ORC製造商列表，其中包括已

表 1　2016 年底之前 ORC 業界的蒐集資料 [1] <ORC 製造商 / 已安裝的數量 / 總安裝容量 >

製造商	ORC 機組數量	裝置容量（MW）	製造商	ORC 機組數量	裝置容量（MW）	製造商	ORC 機組數量	裝置容量（MW）
ABB	2	3.8	Enogia	11	0.26	Orcan	16	0.3
Adoratec	23	16.4	Enreco	1	0.15	ORMAT	1102	1701
BEP-E-rational	20	3.6	Exergy	34	300	Rank	5	0.07
Calnetrix	50	6.3	General Elec.	6	101	TAS	17	143
DurrCyplan	6	1.2	GMK	18	5.3	TMEIC	1	1
Electratherm	55	3.14	Energy Tech	2	0.7	Triogen	37	5.2
Enerbasque	3	0.13	Johnson Control	1	1.8	Turboden	267	363
Enertime	2	1.6	Kaishan	40	27.2	UTC Power	10	2.8
Enex	1	9.3	Opcon	3	2.0	Zuccato	21	1.7

裝機的機組單元數，和截至2016年12月31日的總裝置容量。

二、ORC 系統的應用現狀和主要製造商

由表1統計可知：截至2016年12月31日，使用ORC發電技術的總裝機容量約為2,701MW，其下則實際共包括1,754個ORC發電機裝機數量（分屬約705個計畫項目）。圖2所示為總裝置容量（Installed capacity）和裝機數量（Installed plant）的統計結果。圖2（左）按應用的能源領域（生質能、地熱能、廢熱回收、太陽能）分類；圖2（右）則為按主要發電機單元供應商分類。明顯地，地熱能發電是主要的能源應用領域，佔了全球ORC裝機容量的74.8%（全部為2,701 MW）；但相對地，裝機容量對應的計畫項目，則數量相對較少。太陽能的ORC應用數量甚低，可以忽略不計，主要是因為太陽能領域的高投資成本，這使得ORC搭配集中式收集器的成本，遠比光伏板搭配蓄電池系統的成本昂貴。

總結來說，根據ORC裝機容量和裝機數量而言，不同製造商的市場實際佔比整個分析的結果顯示：總部設於以色列的美國上市公司ORMAT實居世界領先地位，佔總裝機容量的62.9%（參見圖2右側），其次是義大利的Turboden公司（13.4%）和Exergy公司（11.1%）。美國的渦輪空氣系統公司（TAS）和通用電氣（General Electric or GE）雖已有少數的大型工廠安裝實績，但目前尚不清楚它們的ORC業務是否仍在活躍。另外可以確定的是，其他的23家公司，它們的合併市場佔比僅為3.2%，且重點都注重是中小型的能源應用領域。以下就再生能源領域中地熱能、廢熱回收、生質能三個市場中ORC系統的應用現狀，分別加以探討。

（一）地熱能（Geothermal energy）

地熱發電模式依熱源條件的不同大致可分為乾蒸氣系統（Dry steam）、閃發系統（Single/Duble Flash），以及雙循環系統（Binary cycle）三大類。一般使用ORC

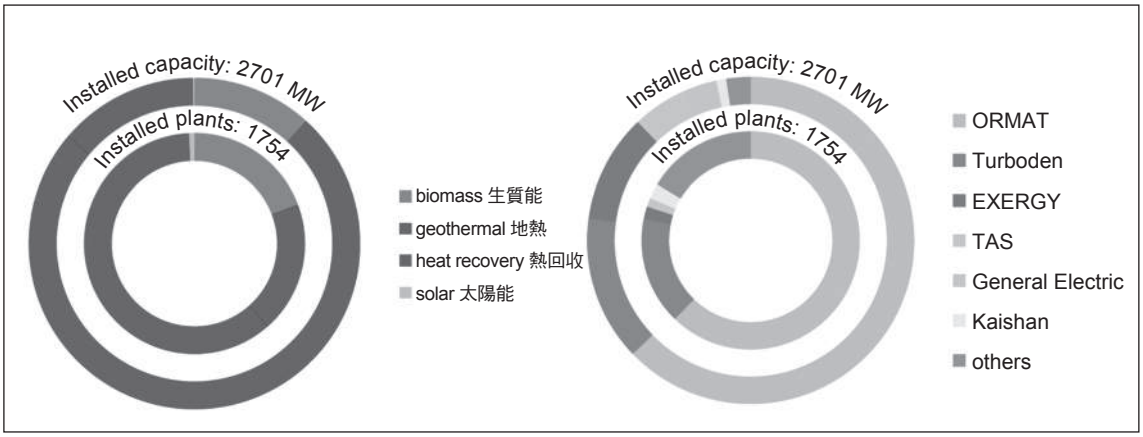


圖 2　國際 ORC 發電技術的市況統計 [1]：（左）總裝機容量；（右）製造商

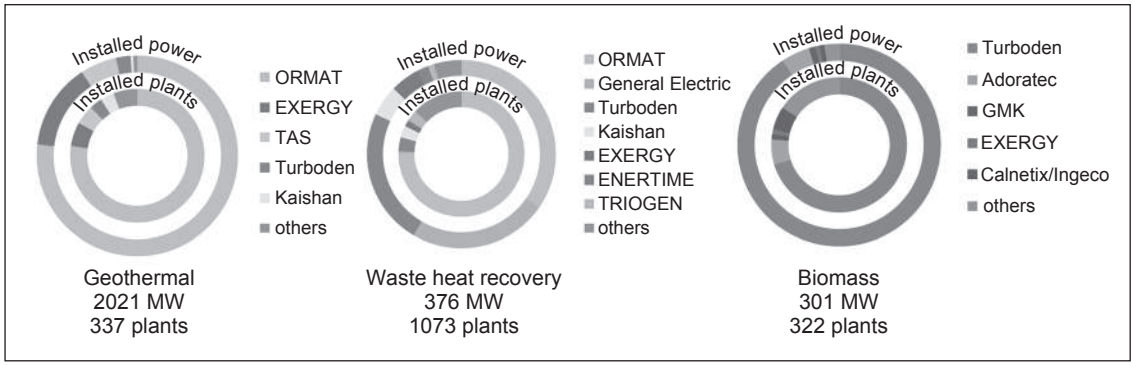


圖 3　不同能源應用領域各製造商的市場佔比統計分析 [1]

發電機的地熱系統，通稱為雙循環系統，其典型熱源溫度介於70~150°C，儲層熱焓（Reservoir enthalpy, kJ/kg）約在300~1100間，熱效率（Thermal efficiency）可達12%左右。由資料庫分析可知，全部約2,021 MW的ORC地熱能裝置容量，僅分散裝置於337個發電計畫，全部裝機機組數量達1,754個，如圖3所示。這些應用於能源領域的ORC發電裝置，在在都需要大量投資和至少MW級規模的電廠。現有製造商（供應商）市況調查的結果顯示，只有少數資本密集型、技術領先型的公司，包括ORMAT, Exergy, TAS, 和Turboden等（如圖3左側所示），才有機會寡佔瓜分主要的供應市場。統計資料顯示：以色列的ORMAT公司（紐約證券交易所上市），無疑是目前ORC發電技術領域的領導者，擁有超過75%的裝機容量和計畫項目，Exergy公司和TAS公司則緊隨其後，分別佔據了約13%和6%的市場，而Turboden公司最近也積極進入地熱市場，約佔裝機容量的2%。

（二）廢熱回收（Waste heat recovery）

廢熱回收（Waste heat recovery）是ORC技術應用的一個新興領域，對於未來無論各種規模的發電裝置，都具有一定的發展潛力。目前幾乎所有ORC發電技術領域的主要製造商都活躍在該市場上，服務對象遍及各中大型工廠，從燃氣輪機，內燃機或工業過程中回收熱量（參見圖3中央部分）。這當中也有其他製造商，只專注於發展小型廢熱回收應用，產品機組的定位規模以10 kW到150 kW為主。應用於廢（餘）熱回收的運營工廠，佔據了376 MW的裝置容量，數量大約佔整個市場的13.9%。但值得注意的是，其中約有800台是ORMAT安裝的非常小的工廠（<4 kW），用於閥門操作和偏遠地區管道沿線的陰極保護。

本階段的統計顯示，廢熱回收在全球熱裝置容量雖僅為376 MW，但是在建中（約16個項目）也有近39 MW的新增容量。雖然熱回收（Heat recovery）市場仍處於早期發展階段，但就技術發展程度，則早已跨越過去曾經長期處於原型機發展或示範階段。圖4所示為每個熱回收應用的裝機容量的市場

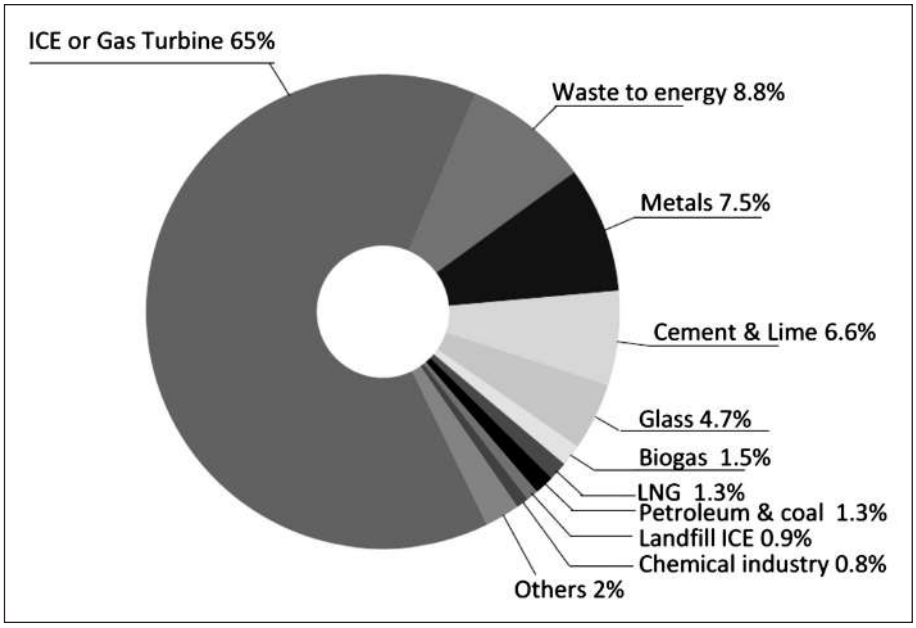


圖 4　每個熱回收應用的裝機容量的市場佔比 [1]

佔比。廢熱回收主要應用是從柴油或燃氣發動機和渦輪機回收熱量，約佔了總裝機容量的65%。ORMAT在這一領域非常地活躍，在美國和加拿大的天然氣管道上至少安裝了24座3-8 MW的電廠。Turboden緊隨其後，也建置了至少9座平均規模約為1 MW的發電廠。使用內燃機或渦輪機的廢熱回收，比一般工業餘熱回收更容易，而且長期以來一直是技術門檻較低的項目，正因為如此，隨著發動機技術成長使得其效率越來越高，在許多製定能源轉型路線圖的國家中，這類的應用已漸不被認定為是可歸類於可再生的能源領域[10]。

廢棄物資源轉化為能源（Waste to Energy）的應用領域上，在過去幾年中也經歷了快速的增長，屬於第二個較大型的廢熱回收應用，市場分布主要在法國和土耳其。自2013年以來已有19個新的計畫項目。初級金屬或人造金屬類分別所佔比例相似，約有28個計畫項目，市場主要由中國和義大利所主導。水泥和石灰工業（9個項目）和玻璃類（8個項目）行業，儘管具有明顯的熱回收潛力，但僅佔熱回收市場的一小部分，大約擁有81台機組，和總計8.9 MW的裝置容量；垃圾填埋場和沼氣發動機是許多ORC技術研發的重點領域，製造商主要提供小型ORC單元（最高200 kW）的機組，透過於不同國家的所提供的優惠政策下，得以獲利。

評估歐洲[11]，北美[12]或中國[13]的工業熱回收潛力，一般研究認為，其中存在了在這些地域許多阻礙熱回收市場的發展潛在障礙。例如法規監管的問題（Regulatory

issues）和缺乏足夠環境保護的認識等[14]。此外，由於工業資本預算有限，並且對新資本投資的競爭非常激烈，優先考慮的是與公司核心業務更接近的替代方案。若考慮進行長期投資，還得增加承擔此類項目的財務風險，並限制了獲得低成本融資的機會。最後，各發電廠普遍存在相對高比例的發電待機率（utility standby rates），通常也會打亂潛在成本節省空間。

（三）生質能（Biomass energy）

生質能（Biomass）應用的裝置量大約在301MW，相當於能源應用領域11%的佔比，如圖3右側部分，僅略低於廢熱回收佔比。其中義大利的Turboden公司是該市場上的主要參與者，擁有228多家工廠（其中大多數是CHP汽電共生裝置）以及許多其他在建工廠。

三、隨著時間的變化和新趨勢

（一）市場發展趨勢

圖5所示為近30年來各能源應用領域（地熱能，生質能，熱回收，太陽能）的安裝容量隨時間的變化，並以WTI（西德州中級）原油價格代表作為全球能源價格的參考，評比了每個能源應用項目的年安裝容量與能源價格的演變關係。圖中年份軸的最後一個標籤是指在建項目（I.C.）。即使各個國家積極推動再生能源的各種激勵措施和當地市場條件會影響能源市場發展趨勢，我們還是可以觀察到全球能源價格與新裝機容量之間存在很強的相關性。一般而言，大型能源應用項目的開發和建設，通常需要12個月以上的時間，因此年度裝機容量的變化很大程度上無可避免地會與過去幾年的經濟分析產生關聯。圖6所示為各國際主要製造商年度裝機容

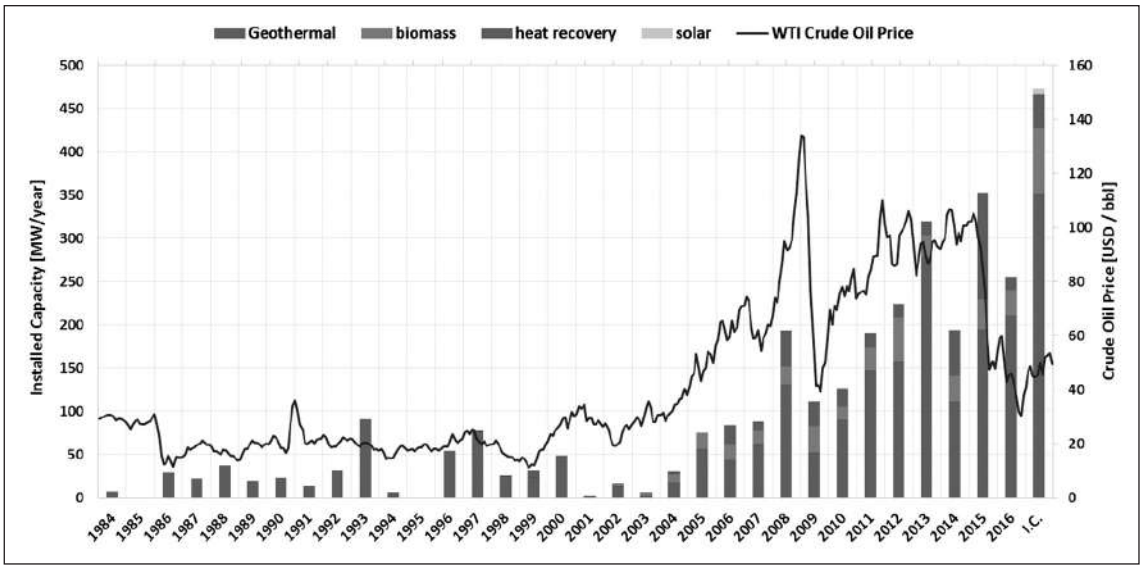


圖 5　各能源應用領域的安裝容量隨時間的變化 [1]

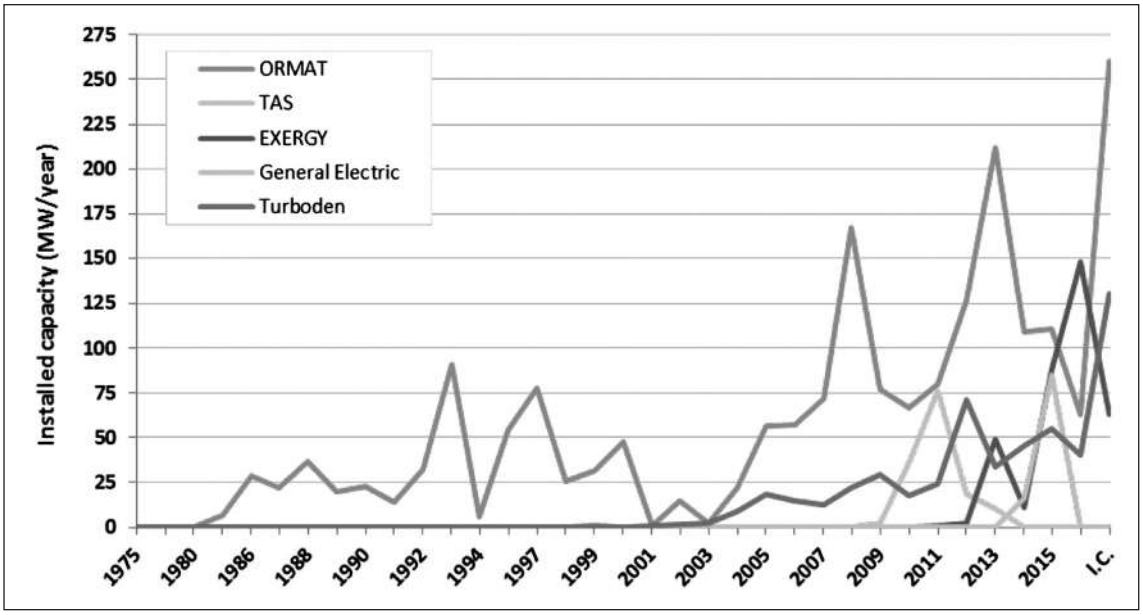


圖 6　各主要製造商裝機容量隨時間的變化 [1]

量（Installed capacity, MW）隨時間的變化。

由圖5的趨勢可看出，從1980年到2003年間，可再生能源應用領域僅侷限於地熱的應用，這之間的ORC市場發展相當地遲緩。但隨後自2000年代初以來至今（2016年），ORC市場安裝容量在能源應用領域則經歷了顯著的增長。從年平均容量在75到200 MW之間，到2015年已翻倍成長達到352 MW，這個過程地熱發電領域的強勢發展無疑扮演了最重要的角色。尤其到了2009年以後，隨著Exergy和TAS陸續進入市場競爭後，地熱發電市場更是不斷地強勁增長。其間於2003年後，生質能方面的應用也呈現快速增長，這個成長現象與Turboden公司的市場競爭有緊密的相關性，此階段Turboden每年平均安裝15至25個ORC單元，並有43個新單位也在規劃興建中。不過，儘管ORC市場發展潛力巨大，但於廢熱回收市場方面顯示在2008年至2013年之間卻有所下降，一直到2015年以後才出現新的增長。若與圖4的分析圖相比，就每個特定應用計畫而言，其裝機容量的市佔比，並未顯著隨時間變化，其中ICE和燃氣輪機的佔比，在2013年到2015年之間為68%。在同一時期，水泥行業的應用則微不足道，而金屬（11.3%）和廢棄物轉化為能源（9.3%）的佔比則有所增加。

到了2016年，所有能源應用領域新的ORC裝機容量為255 MW，與2015年相比減少了28%。這主要是由於熱回收應用的減少，統計發現：2016年的新裝機容量僅為15 MW，2014年為53 MW，而歷史最高記錄為2015年的122 MW。原因可能是電力和天然氣

價格大幅下跌，以及與其他可再生能源（例如太陽能和風能）的競爭。目前已經宣布或在建中的新裝機容量超過460 MW。這裡面包括印尼的大型Sarulla地熱項目（3組各110 MW的閃發式合併雙循環發電），該項目估計應在2019年可完成，代表新的雙循環發電可增加約150 MW的裝置容量[15]。

（二）各個應用領域的裝機容量規模的市場變化

圖7顯示了1975年到2016年間，平均ORC發電廠裝機容量規模隨時間的變化，以及各裝機容量規模下相對於發電廠數量的分佈。隨著製造商在設計和生產更大的渦輪機的能力日趨增強，地熱發電廠所使用的ORC機組的尺寸亦逐漸增加。在1980年代以後，有些地熱項目通常會涉及同時採用多組併行ORC機組單元。例如，在1987年，ORMAT公司在美國東梅薩（East Mesa）鎮的Ormesa-II地熱項目，在一個20 MW的發電廠中採用了兩個併聯組合，共20個模組化（modular）的能量轉換器[16]。另一方面，在2000年代初期，特別是在大型地熱應用中，安裝了單一模組功率超過15 MW的大型機組，位於克羅地亞的Velika Ciglena地熱項目就是一個典型的例子。該項目目前正在建設中，係由Turboden設計並裝機[17]。近年來，仍有一些公司（例如E-Rational）仍持續建造小型ORC裝置，普遍用於利用溫泉發電。

於2013年，紐西蘭的Ngatamariki地熱電廠首先突破100 MW的ORC發電容量規模，發電量可供8萬紐西蘭家戶的用電需求。在2017年以後，單一地熱電廠的ORC發電容量規模頻創新高。目前在印尼北蘇門答臘省的Sarulla地熱電廠已經來到了330 MW，發電量可供201萬印尼家戶的用電需求。電廠的全景照如圖8所示。

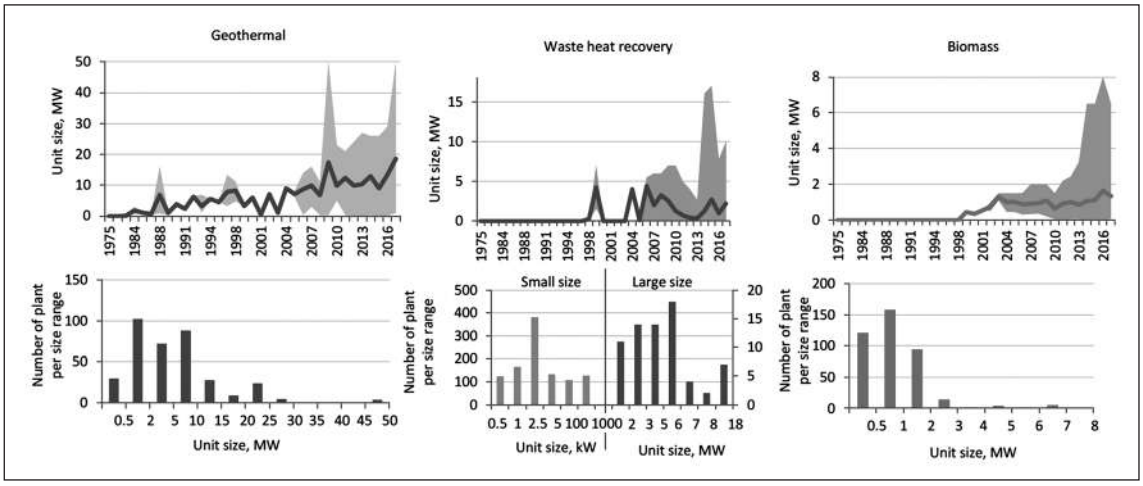


圖 7 （上）平均 **ORC** 發電廠裝機容量規模隨時間的變化 **[1]**。（下）各裝機容量規模下相對於發電廠數量的分佈。填色區域表資料分布的上下界。

圖 8　印尼北蘇門答臘省 Sarulla 的 ORC 地熱電廠（摘自 http://www.thinkgeoenergy.com）

至於ORC機組應用於熱回收市場，可概分為小型機組（<1 MW）和大型機組（最高18 MW）。在2000年至2010年之間，這個市場原先僅主要集中在大型壓縮機站的項目上，但是隨著ORC製造商（如TriOgen, Electratherm, Calnetix和Zuccato）陸續展開了許多小型工廠的建設，因此單位機組的平均規模隨後即顯著下降。

相對之下，生質能在可再生能源領域市場經歷了最穩定的發展。由於可以在不同的工廠中完全複製相同的設計，從而有利於Turboden可以將其現成的ORC技術與機組很快地進入商業化市場。此外，因為在中歐地區，推動有利於1 MW發電廠的經濟刺激措施，更使得該市場很大程度上受到正面影響。自2012年以來，大型機組（高達8 MW）也變得越來越普遍。

（三）跨臨界技術（Transcritical cycle）

跨臨界循環是工作流體在亞臨界及超臨界狀態之間工作的熱力學循環。常見的製冷劑是二氧化碳CO_2。現代的跨臨界循環是在1988至1991年之間，由挪威科學家Gustav Lorentzen（1915年至1995年）及其團隊所提出。除了由Turboden於2012年為義大利的Enel建造的500 kW機組之外[18]，跨臨界循環（Transcritical cycles）僅由TAS在美國的三個地熱項目中進行了商業化運行，包括：Neal Hot Springs（23.4 MW, 2010），San Emidio（8 MW, 2010）和Patua（76 MW, 2011）。因此，儘管業界對與熱源溫度梯度相匹配的超臨界加熱（Supercritical heating），有很強的研究興趣，但跨臨界應用的商業化開發最近這幾年以來尚無明顯成長跡象，但是在當前二氧化碳過度排放造成嚴重氣候變遷全球暖化的國際趨勢下，若能有效進行二氧化碳再利用，其技術潛力與發展，值得期待。

（四）ORC 市場財務評估

將Turboden（2002年至2010年）[19]和ORMAT（2012年至2015年）[20]兩大地熱發電巨頭的財務收入與同期的實際裝機容量進行比較，得出的平均每單位千瓦的投資比率分別為美金1410/kW（ORMAT）和美金1580/kW（渦輪增壓）。據此推估2016年ORC市場的總價值在每年3.59億美元至4.02億美元之間。這僅包括設備和直接工程服務的銷售額，尚未包括地熱工程中的補充收入，例如電力或熱力發電，地熱資源探勘和大地工程等。相對地，小型ORC每千瓦（kW）的裝置成本則要高得多，但少於500 kW的裝置所佔裝機容量不超過總裝機容量的2%，本階段可以忽略不計。可以預期的是2016年以後的國際市場，基於再生能源的需求不斷，絕對會

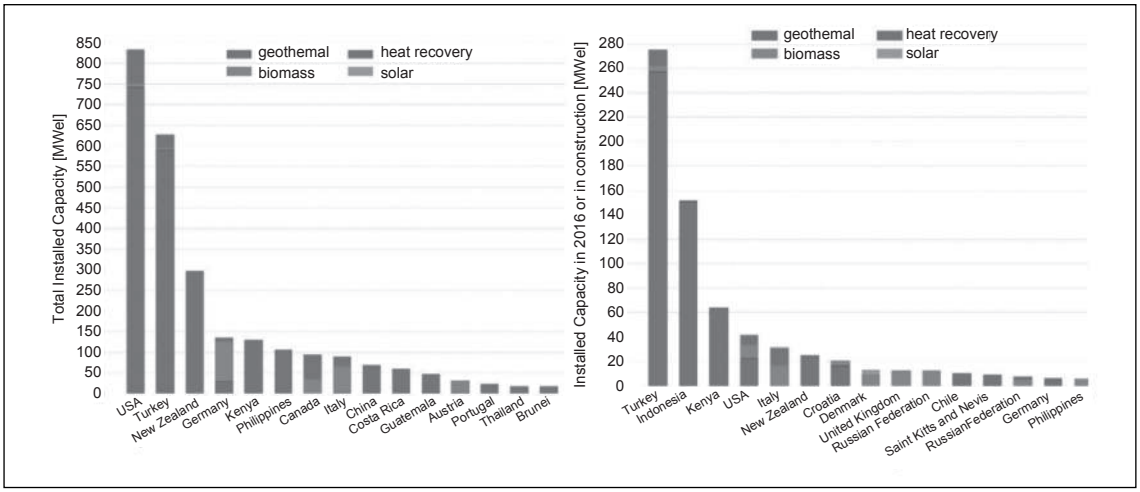


圖 9　國別分類的 ORC 總裝機容量（2016 年底）[1]：（左）2016 年底（右）在建中

有大幅成長的機會。

四、國別細分下的 ORC 市場佔比

若以國家/地區的條件細分來檢視現今ORC市場的佔比，美國裝機容量居所有再生能源發展國之最大國，其次是土耳其和紐西蘭。這三個國家主要是得益於在地豐富的地熱資源。德國，奧地利，義大利和加拿大是生質能應用中最重要的，這則是肇因於現有資源和優惠激勵措施的結合。圖9所示為以國家為單位的ORC總裝機容量，主要數據包含了2016年前累積已建成，或2016年在建中新的ORC項目。我們可以看到，大多數新的地熱開發都集中在土耳其，足足有257 MW（12個項目）之多。排名第二與第三的分別為印尼和肯亞，這兩個國家目前都還只有少數大型地熱項目，未來持續的發展可以預期。值得注意的是：義大利（20個項目），英國（9個項目）和俄羅斯（3個項目）等國家，於生質能方面的應用持續增長中。

五、結論

臺灣的地熱資源堪稱豐富。現階段我國政府設定2025年再生能源占總發電量20%為相關政策目標，其中地熱發電被列為短期發展目標之一，希望於2025年達成全臺開發出200 MW的地熱發電量。目前政府同時也突破法規開創了諸多投資誘因，包括：開發規模在10 MWe以內之投資案，可免除環境影響評估，若能成功發電併網，並可適用於躉購電價之優惠售電方案，吸引民間投資開發地熱發電。按最新版再生能源電能躉購費率及其計算公式，地熱發電每度電的收購價以新臺幣5.1956元計算。本文介紹目前最夯的地熱發電機ORC系統的國際市況發展與未來趨勢，希望藉此系統的技術發展軌跡與相關經驗，能夠給現階段臺灣仍處於投資極度匱乏的地熱市場的起步發展，提供有用的參考資訊。

參考文獻

1. Tartière Y and Astolfi M. A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market, Energy Procedia,

Volume 129, September 2017, Pages 2-9.
2. Analysis of the Organic Rankine Cycle market.（網站資料）網頁：https://orc-world-map.org/analysis.html#current_situation.
3. 郭啟榮，中低溫工業廢熱有機朗肯循環發電與其經濟效益臺灣能源期刊，第一卷，第一期，中華民國102年11月 (Journal of Taiwan Energy. Volume 1, No. 1, November 2013, pp. 71-84)。
4. Colonna P, Casati E, Trapp C, et al. Organic Rankine Cycle Power Systems: From the Concept to Current Technology, Applications, and an Outlook to the Future. ASME. J. Eng. Gas Turbines Power. 2015; 137(10): 100801-100801-19. doi:10.1115/1.4029884.
5. Macchi E., Chapter 1 - Theoretical basis of the Organic Rankine Cycle in Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications, 2016 ISBN: 978-0-08-100510-1.
6. Rettig A., Lagler M., Lamare T., Li S., Mahadea V., McCallion S., Chernushevich L. Application of Organic Rankine Cycles (ORC), World Engineers' Convention, Geneva, 2011.
7. Astolfi, M., Martelli E., Pierobon L. Chapter 7 - Thermodynamic and technoeconomic optimization of Organic Rankine Cycle systems in Organic Rankine Cycle（ORC）Power Systems: Technologies and Applications, 2016 ISBN: 978-0-08-100510-1.
8. History of ORC. Knowledge Center for Organic Rankine Cycle.（網站資料）網頁：http://www.kcorc.org/en/science-technology/history/ .
9. Tartiere T. ORC World Map. 2015.（網站資料）網頁：http://orc-world-map.org/ .
10. Bronicki L. Short Review of the Long History of ORC Power Systems. ASME ORC 2013 Conference.
11. Campana F., Bianchi M., Branchini L., De Pascale A., Peretto A., Baresi M., Fermi A., Rossetti N. Vercovo R. ORC Waste Heat Recovery in European Energy Intensive Industries: Energy and GHG savings. Energy Conversion and Management, Vol 76, pp 244-254. 2013.
12. Elson A., Tidball R., Hampson A. Waste Heat to Power Market Assessment. Oak Ridge National Laboratory. March 2015.
13. Hongyou L. Capturing the Invisible Resource: Analysis of Waste Heat Potential in Chinese Industry and Policy Options for Waste Heat to Power Generation. Berkeley National Laboratory, May 2015.
14. Rackley J., Hampson A., Fucci M. Colorado Recycled Energy Maket Overview, Final Report. Colorado Energy Office. August 2015.
15. Wolf N., Gabbay A. Sarulla 330 MW Geothermal Project Key Success Factors in Development. Proceedings Wold Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25, April 2015.
16. Sonnelitter P., Krieger Z., Schochet D. The Ormesa Power plants at the East Mesa California Resource After 12 years of operation. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000.
17. ThinkGeoEnergy. Turboden to install large 16 MW single turbine at Croatian project.（網站資料）網頁：http://www.thinkgeoenergy.com/turboden-to-install-large-16-mw-single-turbine-at-croatian-project/ .
18. Rossi N. Testing of a new supercritical ORC technology for efficient power generation from geothermal low temperature resources. ASME ORC 2013 Conference, October 2013.
19. Turboden.ORC plants for Industrial Heat Recovery. August 2011.（網站資料）網頁：http://www.turboden.eu/en/public/downloads/11-COM.P-18-rev.4_HR_ENG.pdf .
20. ORMAT. Financial reports, 2012-2015.（網站資料）網頁：http://investor.ormat.com/GenPage.aspx?IID=4087066&GKP=302737 .

台電公司風場運維現況及展望

台灣電力股份有限公司再生能源處處長／陳一成
台灣電力股份有限公司再生能源處組長／徐文科
中興工程顧問股份有限公司電力及能源工程部協理／林智彭
中興工程顧問股份有限公司電力及能源工程部技術經理／陳啟明
中興工程顧問股份有限公司電力及能源工程部計畫主管／仇士愷

關鍵字：離岸風電、營運管理、運維、台電公司、風機監測

摘要

臺灣位於大陸板塊與海洋交界處，每年強盛的東北季風使得臺灣本島沿岸及離島許多地區，蘊藏的風能相當豐富，臺灣發展風力發電得天獨厚。國內自2000年起積極推動風電開發應用，透過資源勘查、技術輔導、研究調查、示範補助與宣導推廣，已初步達成推廣成果，並帶動台電公司及民間業者相繼投入陸域風能開發。離岸風電部分，政府規劃「風力發電4年推動計畫」，以「先示範、次潛力、後區塊」之策略推動離岸風電，現已完成第2階段潛力場址5.5 GW之招商作業，我國離岸示範風場亦陸續展開施工。

在風電開發過程中，風場能否於營運期間發揮最佳效能，是衡量風場開發成敗的關鍵因素之一。因此，除考驗風機本身性能之外，營運期間內的營運及維護工作更為重要。風電運維的主要內容包括：設備管理、技術管理、安全管理及運維人員管理四大面向，缺一不可。台電除借重長期投入陸上風電已逐漸成熟之利基之外，也網羅海事、機電、土木、地質背景人才組成本土風電團隊。其中，風場維護需要大量人力，台電積極培育本土運維人才，並運用科技讓管理效率最大化。如何善用科技達到風場運維的最佳效益，並且培育「綠領」人才以因應產業未來發展，將是台電持續努力的方向。

一、前言

根據全球風能協會（Global Wind Energy Council；簡稱GWEC）於2019年4月發布的

最新統計，截至2018年底為止，全球風力發電總裝置容量約為591GW（其中陸上風機為568GW，離岸風機為23GW）；且依其預測，未來5年風力發電將以每年超過55GW新裝置容量的速度增加，開發速度較現階段將提升2.7% [1]。

截至2019年10月底，臺灣已有陸域風機347部，離岸風機2部，總裝置容量為71.1萬瓩，年總發電量約16億度，發電成效出色，347部陸域風機中，173部為台灣電力股份有限公司（以下簡稱台電）所有，台電離岸風電示範風場2018年初決標後，目前已邁進實質開發階段，21部離岸風機目標在2020年陸續加入台電的服務行列，一年將可供應超過3.6億度的綠電[2]。

被政府列為綠能重點發展目標的風電產業，目前正如火如荼地展開，風電相關之運維工作，除借鏡世界各國的成功經驗、複製歐洲規範與技術，更重要的是，根據臺灣風場特色做在地化調整，以達到風場營運之最大效益。以下茲針對台電風場運維現況及未來展望進行說明。

二、防微杜漸 即時管理

要讓風機保持在滿分的狀態，就一定要做好兩大關鍵，一個是監測，另一則是維修。為了有效監控各地風場，台電已開發再生能源監控系統，該系統整合台電各部風機的運轉資訊，並可透過3D模擬圖像顯示現場風機狀況。台電人員身處監控中心，就能即時掌握風場運作，得知各部風機處於正常發電、待機、通訊中斷、定期保養或故障等狀態，有助於風機運維作業及人員調度。

以正在進行中的離岸風場一期工程為例，當設置完成後，該監控系統將扮演舉足輕重的角色，在風機出現異狀的最初期，就必須即時通報維修人員進行處理，一方面降低設備損耗，同時也能延長風機的使用壽命，減少營運成本。

該監控系統可用來監視和蒐集訊號，即時了解風機狀況，並藉由遠端連線現場控制主機，依使用者權限下指令進行操控，進行風機啟動或停止。一般來說，風機最常因為運轉異常或進行保養維修而停機，颱風來臨時，為了避免因風速過大，造成風機損壞，也會停機保持迎風轉向的狀態，在正常運轉狀態下，假如風速超過設定安全值，風機也會啟動保護裝置自動停止。

目前監控系統的建置可分成為風機現場與監控中心，以現場來說，每部風機的控制器會即時將這些風機運轉訊號送回位於電氣室的控制主機，同時整合電氣室設備運轉狀況，藉由台電內部網路，即時將這些風機訊號傳回監控中心，以利集中監控，如圖1所示[4]。

目前台電陸域風機運維，雖然利用監控中心的即時資訊掌握風機故障訊息，但仍偏重傳統巡修模式，即派遣維修人員赴現場巡視，透過檢視、葉片異音，或高倍專業相機的拍照，以掌握風機運轉狀況。台電未來將採用不同感測器進行即時監控與故障分析，務求風機損壞最初期就能及時進場保養維修[3]。

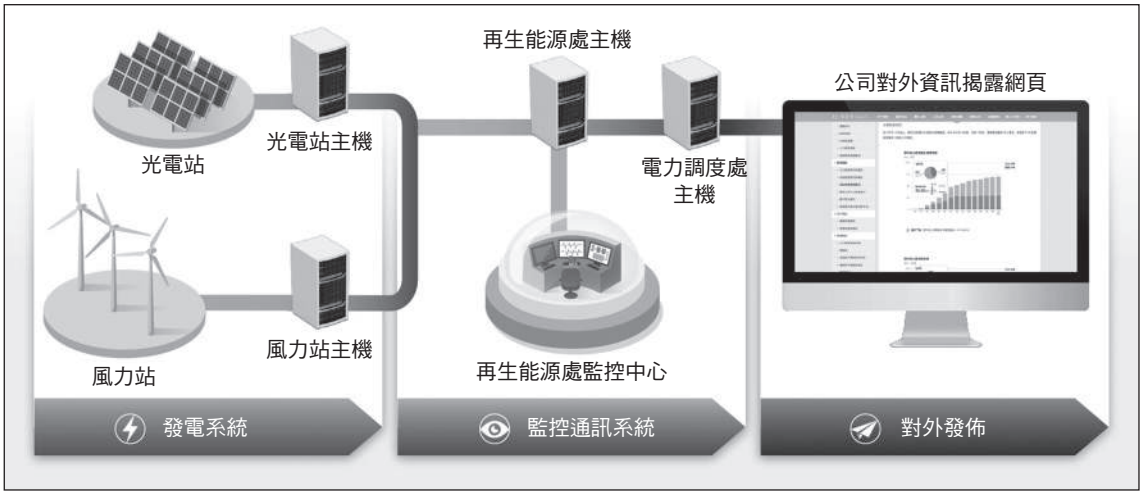


圖 1　風力及光電監控系統架構圖 [4]

監控中心獲取的數據，堪稱未來風電發展的利基，例如近年台電綜合研究所亦與學校團隊進行研究，希望能延長風機塔架20年使用年限的「塔架延壽計畫」，就必須由監控中心提供相關數據協助研究。另台電開發的預測系統，同樣依賴監控中心提供的風機資訊為基礎，結合氣象單位的資料，用以預測未來48小時的風力發電量，供台電電力調度之參考。未來離岸風機數量增加，發電量隨之變大，預測系統在電力調度扮演的角色也將變得更加重要。

完善的風機監測，還必須納入天氣與海象之監測數據，才能相輔相成。台電於2016年，在彰化芳苑王功漁港外海6公里處，設置高97公尺的海氣象觀測塔，監測包括風速、風向、氣壓、氣溫、濕度、雨量、海流、太陽日射量等多種參數，經長期蒐集資料後，透過大數據資料庫分析，不但可以用來判斷鄰近場域是否適合發展離岸風力，也可做為建置風場的參考資料，更可供未來風機運轉時運維策略使用。

三、專業培訓 厚植人力

風機運維需要大量人力，做好專業分工才能達到最佳營運效果。台電在風機運維人力上力求精實，協力廠商負責提供基礎人力以進行異常設備的修護工作，台電技術人員進行狀況監測、分析掌握設備效能的角色，雙方各司其職，等同於台電負責「資產管理」工作，以精準、高效率的管理模式謀取最大的效益

同時，為了因應再生能源重要性逐步提升，目前台電再生能源運維人力主要由土木、機械和電氣專業人員組成；但在遠端監控技術建置完成之後，大數據分析變得非常重要，因此需要系統資訊分析師提供具體可行之運維策略。

過去，臺灣在地的風電「綠領」人才，多偏重在陸域風機的運維，面對與海爭地的未來新型態，不只現有的風機運轉維護、風機葉片檢修技師等人力需求會大幅增加，還會需要海事工程技師、航運及碼頭管理人員等新興職缺，其與陸域風機運維最大不同之處在於，這批堪稱海中蛟龍的團隊，必須直接面對海上作業的變數與考驗。

由於離岸風電運維人員必須出海，具有高風險，將來要去海上執行業務有一定的危險性，未來所有相關運維人員都需要取得證照才能入行，所以台電攜手臺灣港務公司、中鋼、台船等國營及民間公司，組成「臺灣風能訓練股份有限公司」，未來將與世界風能組織（Global Wind Organization, GWO）合作，將師資及教材全面導入臺灣，提供急救、人工操作、火災感知、高空作業、海中求生等5大基礎安全訓練及認證，甚至更進一步提供直升機水中逃生訓練、風機進階技術訓練與風機商客製化訓練服務，希望能成為全方位離岸風電人才的培訓基地[4]。

四、智慧檢修 帶動產業

再生能源電力設施占地面積寬廣，且分散於各地，使得運維格外不易，目前陸域風機的維護主要依賴人工作業，未來離岸風機增加，勢必增添船隻出海的成本和風險，這時無人機偵測技術便派上用場，國外已發展出結合無人機和人工智慧的技術，將其應用於風電設備的檢測與維護，而台電公司現與中興大學進行技術合作，即希望借重其研發的無人機判讀技術，巡查幅員遼闊的離岸風場，進而定位損壞的部分，藉此推進風電產業發展。

陸域風機透過監控系統和人力巡檢做到防微杜漸，但離岸風機則必須開船巡航，耗費的人力、物力更大，為了達到控制成本、有效管理的運維模式，無人機亦可大量運用於離岸風場之運維工作。受過專業訓練的技術人員，透過無人機上配備的偵測儀器傳回即時影像或訊號，就可在陸上的監控中心進行風場管理、判讀資訊，如圖2所示；另一方面，在廣達100平方公里的離岸風場海域中，無人機還可透過GPS定位巡航，監看管制區內是否有漁民捕魚或釣魚，此外風場旁邊即是國際航道，也能藉此留意是否有商船靠近風場，或有船隻失去動力漂移，減少風機被撞擊的可能性。

離岸風電產業的發展，除了有創造就業機會、帶動產業轉型的外溢效應，因為高度依賴監控系統降低運維成本，也同時促成整合性通訊技術、無人機飛控、AI智慧等高科技研發技術的提升，未來，台電除了借重

圖 2　智慧檢修應用於風電運維作業 [4]

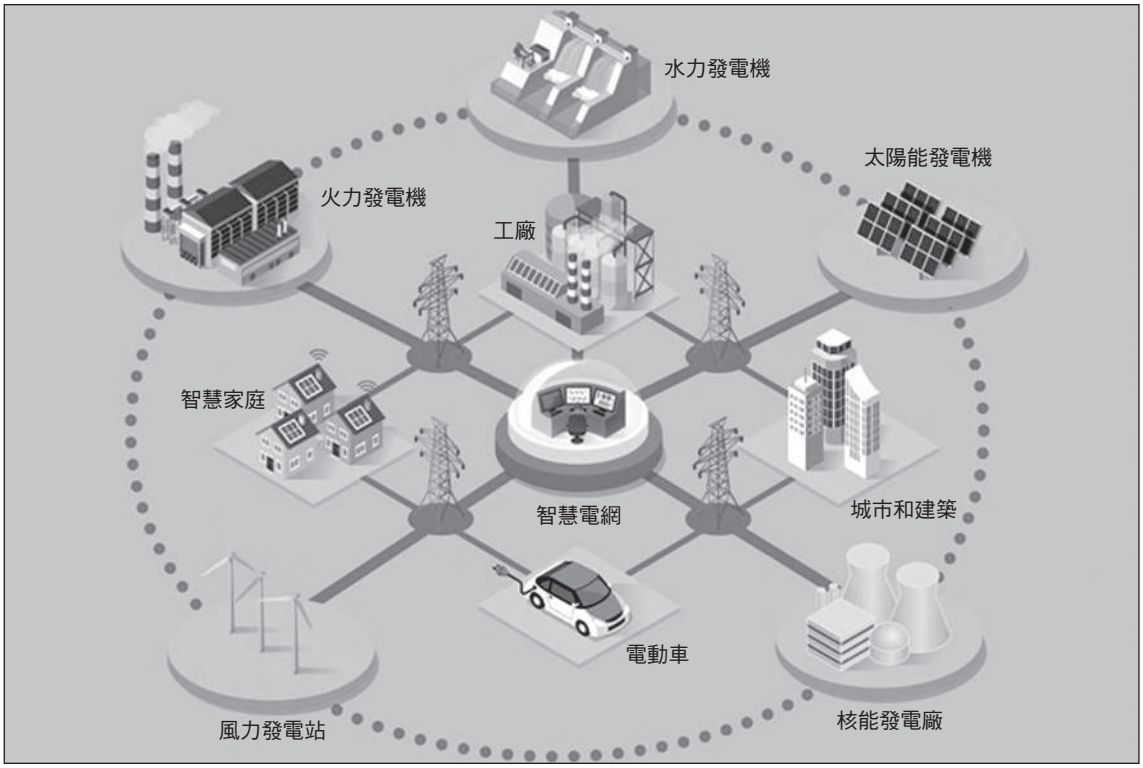


圖 3　透過智慧調度提供綠能穩定併網 [5]

國外廠商的資源和經驗，更將結合臺灣中小企業的在地優勢和創新能力，並且培訓足量且適格的風場運維人員，在公司既有的電力工程技術優勢之上，精進海事工程與監診技術，以期在本土風電產業鏈中，扮演培育在地人才及引領產業未來的要角[4]。

五、智慧調度 穩定供電

隨著各國進入低碳時代，智慧電網已成國際趨勢，其優勢在於大規模有效整合、調控、監測供電與用電情形，進而帶動節能意識與確保供需穩定平衡。在臺灣，國家擬定智慧電網政策，台電配合執行，使智慧電網的應用近年來已逐步打下穩固基礎，同時使再生能源併聯產生更大效益，迎接聰明用電的未來。

在2025年再生能源發電量占比達20%的前提下，未來，台電將結合人工智慧與大數據分析，與氣象局及業者建立電力氣象圖，提升預測再生能源發電量的準確度，讓調度員能預作準備進而穩定供電，如圖3所示。在民眾、台電和政府攜手下，智慧電網才能夠智慧的平衡調控電力，使再生能源得以有效利用，在電力供需面上有效連結整合，建構更友善用電環境，達到智慧應用能源的未來[5]。

參考文獻

1. Global Wind Energy Council (GWEC), Global Wind Report 2018, 2019.
2. 台灣電力股份有限公司，再生能源發電概況，https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=204&cid=1581&cchk=82fb957e-2fe8-49b6-90a9-b750387de936，108 年 (a)。
3. 台灣電力股份有限公司，離岸風電邁大步 在地化的運維及育才挑戰，https://tpcjournal.taipower.com.tw/article/2945，台電月刊 673 期，108 年 (b)。
4. 台灣電力股份有限公司，宏觀風電產業的運維科技 綠領人才建構綠色競爭力，https://tpcjournal.taipower.com.tw/article/2947，台電月刊 673 期，108 年 (c)。
5. 台灣電力股份有限公司，電網「新」連「心」站上智慧用電全球浪潮，https://tpcjournal.taipower.com.tw/article/2885，台電月刊 672 期，107 年。

彰濱工業區水面型太陽能發電系統工程概述

辰亞能源（股）公司董事長／胡劭德
辰亞能源（股）公司專案總監／游祥益
中興工程顧問（股）公司副總經理／林根勝
中興工程顧問（股）公司協理／余遠添
中興工程顧問（股）公司副理／朱玉亭

關鍵字：水面型太陽能電站、浮力型、基樁型

一、前言

為落實減碳目標，邁向低碳社會，政府已將綠能產業列為五大創新產業之一，全力發展低碳綠能的再生能源，以民國114年規劃再生能源發電占比達20%為目標。行政院於105年6月23日成立「能源及減碳辦公室」，協助經濟部完成「太陽光電2年推動計畫」，加速我國太陽能再生能源發電量，力拼2年內達到1.52 GW，以民國114年達成太陽光電規劃20 GW的設置目標。

經濟部工業局為推動政府「促進產業創新」、「改善產業環境」及「提升產業競爭力」等政策，爰辦理「彰化縣鹿港鎮崙海段土地出租」，提供土地承租人興辦綠能發電計畫。

辰亞能源股份有限公司經由投標程序與收購方式，分別取得崙尾東區臨1號及臨2號土地開發權，預計設置180 MW水面型太陽能電站，本計畫完成後，將成為全球最大水面型太陽能電站，預定於民國109年底完成併聯發電。

二、水面型太陽能電站之發展

太陽能電站除屋頂型、地面型或建築整合型的裝置應用之外，現階段全球亦大力推廣水面型的太陽光電系統技術，包括利用水庫、滯洪池、埤塘、魚塭、淨水場及堤防等

場域，安裝太陽光電系統。截至2018年9月全球水面型太陽能電站總裝置容量已將近1.1 GW，其中最大的設置容量案場國家為中國，其次為日本。目前全球共計約有至少157個水面型電站於25個國家被設立，而全球水面型太陽能系統商已有24家之多，又以法國的Ciel & Terre及中國的SunGrow占大部分市場。

利用水面發展太陽能電站的優點：

（一）提高發電效率

水體具有冷卻太陽能電池板的效果，與在屋頂以相同角度設置的太陽能板相比，水上太陽能板的發電量增加了14%，其原因為結晶矽型太陽能電池板在高溫時發電損失會增大、降低轉換效率，而在水面設置太陽能板發電獨具的冷卻效果將可降低發電損失。

（二）減少水的蒸發與改善水質

太陽能板在水面的遮蔽效果可以有效減少水域水體的蒸發量，還可抑制藻類等水草異常生長的作用，避免造成優養化。

（三）節約用地

土地可留作更高價值性開發，並提升水域空間的經濟價值。

三、工程規劃

本計畫工作事項包含進行電力系統衝擊分析、設置太陽能發電廠裝置容量180 MW、混凝土結構水上設備平台、161 kV變電站及併接至台電電力系統網絡。設置範圍如圖1所示。

圖 1　設置範圍

（一）設置地點環境

本計畫區位於彰濱工業區崙尾東區，現況為未填造之潮間帶，高程約EL1.12~-2.26。計畫區屬於現代沖積層，以砂性土層及沉泥層或黏土層為主，層次呈交互分佈，於深層的砂土層中則偶夾有礫石，沉泥、黏土層的層次較為複雜且不規律。

沿海之海潮流，大流速成分主要集中在南與北兩主軸方向，其中往南為東北季風風力較大期間之風驅流與退潮流合併所引起的較大流動；往北則是漲潮受洋流之帶動現象。小流速時期則涵蓋較廣，主要是對應到流向轉換時期，漲退潮之流向主要以潮水漲退所引起之東北–西南往復流動，南方之洋流

表 1　浮力型 VS. 基樁型比較表

程序	浮力型		地面基樁型	
現場水文	內海海水	√	內海海水	√
水位落差	4 米	√	4 米	√
連續延伸大小	10 MW	★★★	1 MW	★
錨定（固定）方式	水底鑽錨 鑽孔船隻	★★★	打水泥樁需重型機械	★
固定深度	<10 米	★★★	>10 米	★
纜繩需求	必須	★	非必須	★★★
組裝定位	岸邊組裝船隻拖曳 依照潮汐拖曳	★★★	全水上組裝 材料重運輸難施工難	×
抗風能力	貼近水面 模組開口風壓小	★★★	距水面較遠 水位下降時風壓增強	★
抗震能力	無須依靠地面承載 無須考慮地震因素	★★★	需依靠地面基礎樁支撐 地震震度影響基樁強度	★
維運能力	24 hr 隨時可進入 隨時由浮筒走入	★★★	水位低於 3 米無法維運 設備在高處屬高空作業	×
拆除方式	船隻拖回遷走 安裝拆除程序相同	★★★	拆除拔樁須另行考量 拆除風險高於安裝	×

會使退潮仍有大量往東北之分量。園區海域以半日潮為主，在歷年施測成果可看出近岸水域潮流呈現穩定趨勢，漲退潮水位差異不大，採用之水面型電站設備可正常運作。

（二）太陽能光電發電設施規劃

1. 浮力型電站

本案場址為內海地形，每日有兩次潮汐漲退起伏，有時潮間帶幾乎呈現乾涸，有時整片都是水域的狀況，依現地環境分析，設置太陽能電站的方式，分為施打水泥樁及水上浮力式兩種施工模式，考量長期的環境共生，本案分別就對環境的衝擊、景觀調和、氣候風險、施工技術可行性及投資效益等，做為選擇設置方式的重要指標。

經評估分析（詳表1），浮力型太陽能電站的建置方式，因為開挖較小、泥作量體較少，對於環境的衝擊較小。另就施工技術可行性而言，基於本案地質太軟及水位不深之特殊條件，浮力式水面型太陽能電站的設置，不需使用太多大型輜重設備及車輛進入案場施工之考量，較施打水泥樁方式更為可行。

模組與浮筒的組裝，預計於設置區域之岸邊搭設臨時木棧平台固定於岸上後延伸至潮間帶，並依照潮汐排班組裝，水深50公分以上時，即可派小型工作船搭配船外機將已組裝好之陣列，拖拉至預定放置位置後，直接與水底錨定鏈結，即可防止海流對陣列之偏移影響。模組及浮筒組裝示意圖如圖2及圖3所示。

2. 太陽能光電設施規劃

本案臨一地號及臨二地號案場預計分別

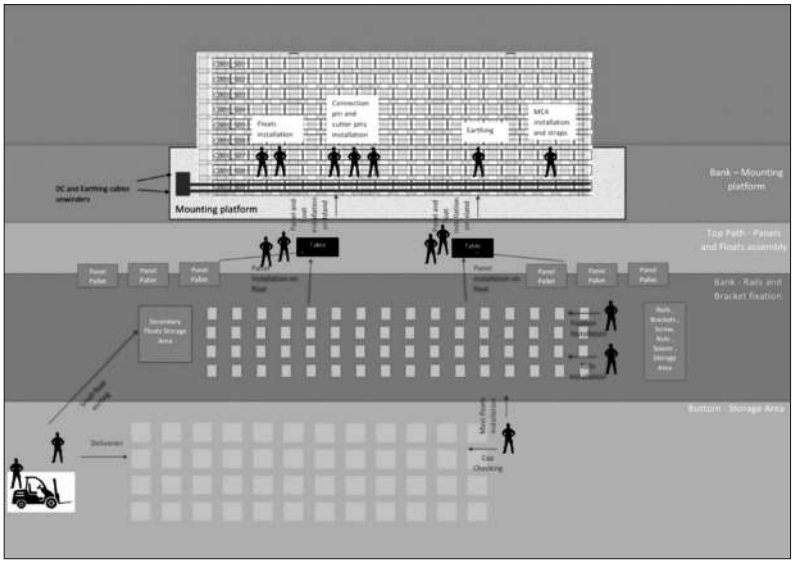


圖 2　模組及浮筒組裝示意圖

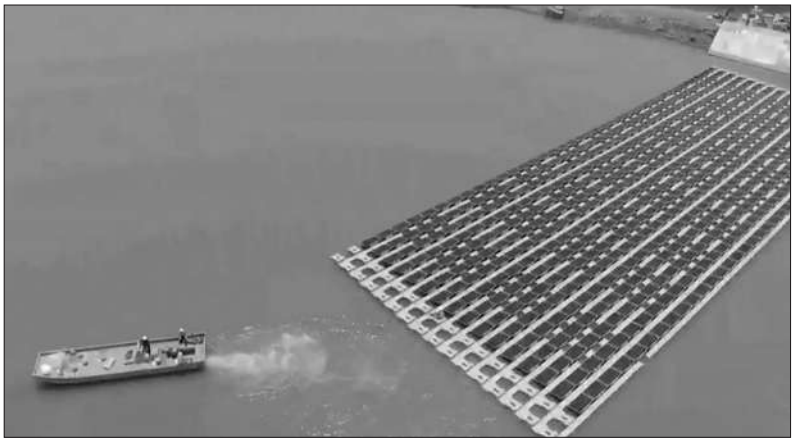


圖 3　浮筒水上拖曳作業示意圖

設置太陽能系統裝置容量為88,038.72 kW及92,979.81 kW，採用輸出功率315 W之雙玻模組，配合2套國際大廠生產的1,250 kW變流器及20呎貨櫃做為一單元，每單元負責9,856片模組運作，變流器皆放置於水上固定之設備平台上，水上模組線路串接將整併於直流轉接箱，為避免線損過高與線路過多的困難，轉接後再將線路拉至設備平台上與變流器連結。

變流器輸出端直接採用戶外油浸式變壓器，昇壓至22.8 kV，經多組環路開關連接後，引接至自設161 kV昇壓變電站後，經地下線路與台電彰濱特高壓變電所之161 kV匯

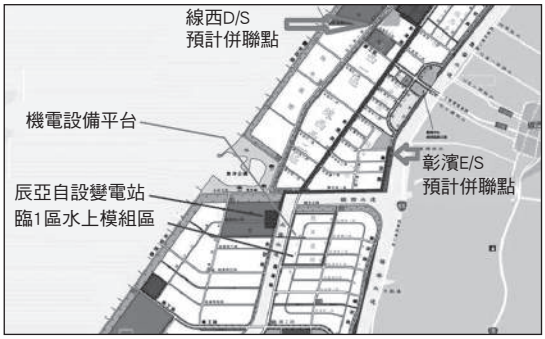


圖 4　系統配置圖

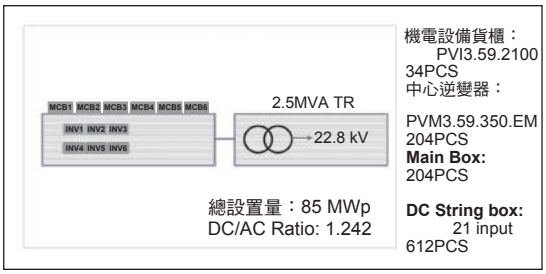


圖 5　太陽能變電設施架構圖

流排併聯，系統配置詳如圖4~圖6所示。

3.　設備平台及161 kV昇壓變電站規劃

海上設備平台之構想源自於海上鑽油平台的概念與跨海大橋的想法，主要目的即是將太陽能交直流轉換設備與高低壓變壓器放置於模組近端區域的固定平台上，除可放置上述設備外，亦可方便維修更換與車輛進出。設備平台設計為10 m寬之平台路面，兩側可供放置設備外，中間空間尚可供小型車輛進出，並於平台末端設置迴旋區域。

在設備平台上，運用基地海灘退潮時常見的地貌-微微隆起的沙痕地景及波紋，作為立面裝飾元素，並以基地內保育物種大杓鷸冬候鳥為主體意象，規劃設計設備平台之立面，進而融入當地整體景觀意象（詳圖7~8）。

圖 6　變流器整合貨櫃示意圖

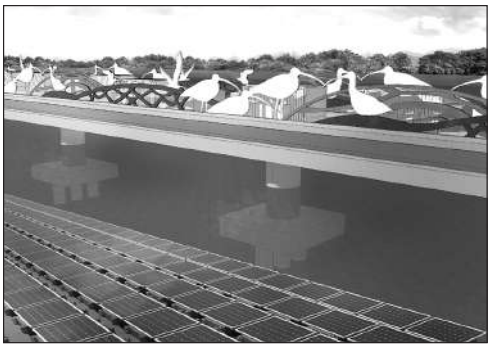


圖 7　設備平台景觀造型示意圖

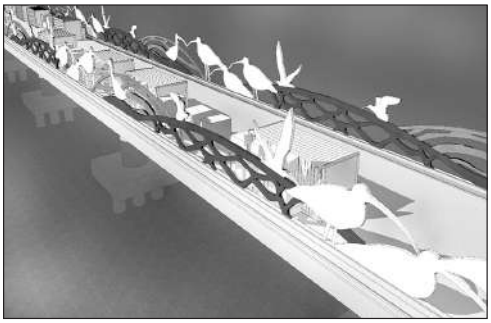


圖 8　設備平台局部景觀造型示意圖

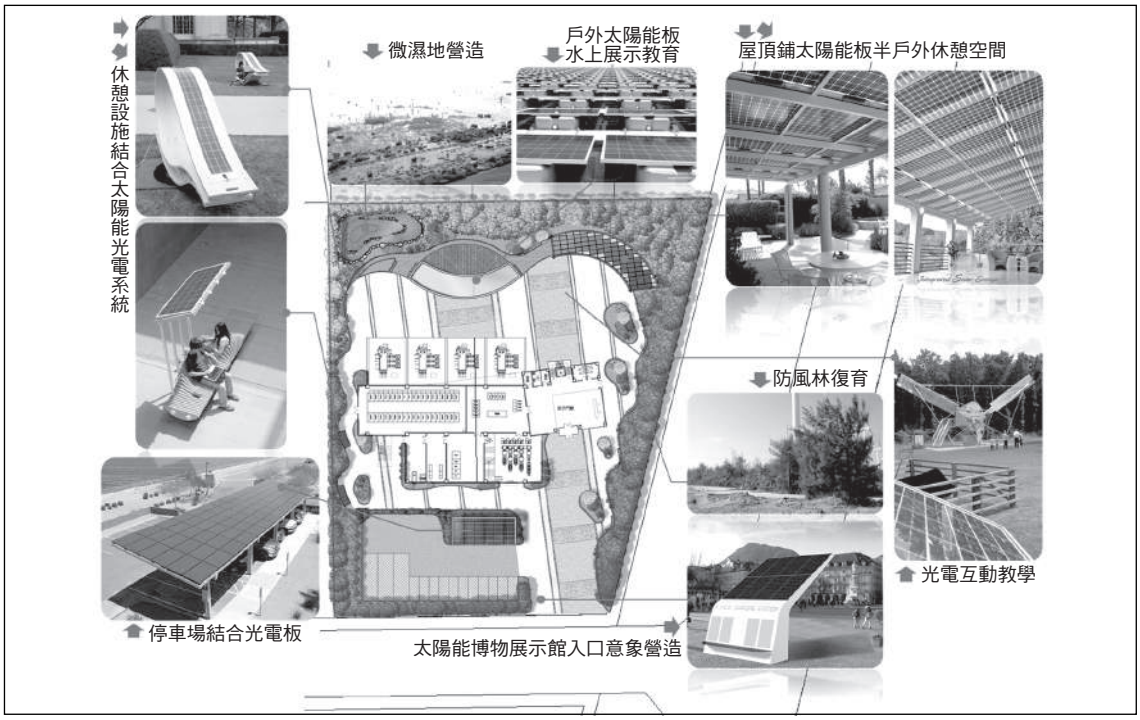


圖 9　昇壓變電站配置示意圖

昇壓變電站以具備太陽能電站教育與太陽能博物館展示之教育功能為規劃設計構想，景觀設計構想與營造理念運用「沙丘、波紋起伏」的設計語彙，結合生態有機體發展形式，營造整體景觀，融入地景。

戶外空間則以太陽能光電園區為發展核心，透過水上展示解說光電設施設計原理、光電能源教學互動，讓參觀者實際感受體驗，強化環境教育及科學技術交流的重要性。整體配置及透視如圖9及圖10所示。

圖 10　昇壓變電站透視示意圖

（三）克服環境挑戰之技術

1. 如何克服海水環境

針對海水使用的環境，除加強金屬扣件的防鏽能力，也針對不同的部品提出不同的替代方案，全面性的提昇性能與品質。

例如扣件等金屬物件採用碳鋼加上RESIN抗腐蝕層、316不鏽鋼等；另透過JIS H 8502標準之鹽霧測試結果，顯示陽極處理

厚度需大於10 μm，以確保品質無慮。

2. 如何達到最大抗風等級

本案採用提供法國C & T系統浮筒平台系統，經法國航空航天實驗室（ONERA）風洞測試結果，得出C & T浮動平台能夠抵抗瞬間風速58.3 m/s的結論。

本案浮力式太陽能發電系統之浮動平台及錨定系統結構分析，經依10年回歸期之10分鐘平均基本設計風速37.5 m/s、標的物設置地況、離地高度及用途係數等因素檢討，其相關組件及固定桿件之結構設計，符合建築法規之結構物安全設計規定。

3. 如何使潮汐對太陽能系統的衝擊損害最低

本案水面型太陽能發電系統設置地點屬於半開放海上區域，每日皆有潮汐的漲退變化，週而復始從不間斷，加上每年的颱風及東北季風影響，如採用一般的設計將逆變器及高壓設備放置於水上浮動平台上，從安全的角度，投資建設的初期可省下可觀的成本，但對未來的營運安全性而言是一大的挑戰；經過慎重評估及討論後，決定採用混凝土構造機電平台的方式設計，將主要的重要設備放置於堅固的平台上，有效避免潮汐漲退所帶來的影響，且在颱風季節及東北季風來臨時，不會因強風產生晃動導致線路及固定位置鬆動，造成系統不可回復的損壞，雖然初期的投資成本較高，但就系統長遠的安全性及營運成本角度分析，應可符合投資原則。

其次，本次浮筒錨定系統設計主要採用懸垂式繫纜型態（single point catenary mooring），從纜繩張力的觀點來看，採用懸垂式繫纜設計時，平台可以隨波浪起伏與縱移之運動，纜繩不易因發生瞬間緊拉現象導致繩索產生極大的張力而斷裂(breaking)。

四、系統發電效益

本案二案場分別預計設置太陽能系統裝置容量為88,038.72 kW及92,979.81 kW，採用輸出功率315 W之雙玻模組，經電腦模擬（詳圖11~圖14）預期發電效益如表2所示。

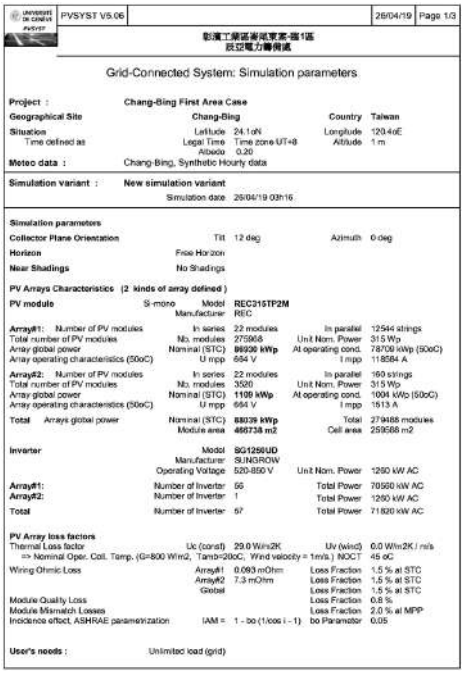
表二　系統發電效益

案場別	發電量（MWh/y）	排碳量（ton/y）	系統效率
臨 1 號	118,572	65,569	83.5%
臨 2 號	125,723	69,524	84.6%

五、結論

水面型太陽能電站的設置技術較為新穎，國人對此技術並不熟悉，但實際上，水面型太陽能電站因具備多項優勢，已受世界各國大量推廣。

本案除積極配合政府發展綠色能源政策，規劃設立太陽能發電的展示空間，提供展示產品及教育素材，並開放現有案場做為參觀教學場地，讓國人可以更加瞭解建置水面型太陽能電站的優勢，以及它兼顧環境生態維護的能力，力求對臺灣社會做最大的回饋。



PVSYST V5.06 | 26/04/19 | Page 1/3

彰濱工業區崙尾東案-臨1區
設置電力轉備處

Grid-Connected System: Simulation parameters

Project : Chang-Bing First Area Case

Geographical Site	Chang-Bing			Country	Taiwan
Situation		Latitude	24.1oN	Longitude	120.4oE
Time defined as		Legal Time	Time zone UT+8	Altitude	1 m
		Albedo	0.20		
Meteo data :	Chang-Bing, Synthetic Hourly data				

Simulation variant : New simulation variant
Simulation date 26/04/19 03h16

Simulation parameters

Collector Plane Orientation		Tilt	12 deg	Azimuth	0 deg
Horizon	Free Horizon				
Near Shadings	No Shadings				

PV Arrays Characteristics (2 kinds of array defined)

PV module	Si-mono	Model	REC315TP2M		
		Manufacturer	REC		
Array#1: Number of PV modules		In series	22 modules	In parallel	12544 strings
Total number of PV modules		No. modules	275968	Unit Nom. Power	315 Wp
Array global power		Nominal (STC)	**86930 kWp**	At operating cond.	78709 kWp (50oC)
Array operating characteristics (50oC)		U mpp	664 V	I mpp	118584 A
Array#2: Number of PV modules		In series	22 modules	In parallel	160 strings
Total number of PV modules		No. modules	3520	Unit Nom. Power	315 Wp
Array global power		Nominal (STC)	**1109 kWp**	At operating cond.	1004 kWp (50oC)
Array operating characteristics (50oC)		U mpp	664 V	I mpp	1513 A
Total Arrays global power		Nominal (STC)	**88039 kWp**	Total	279488 modules
		Module area	460738 m2	Cell area	259588 m2

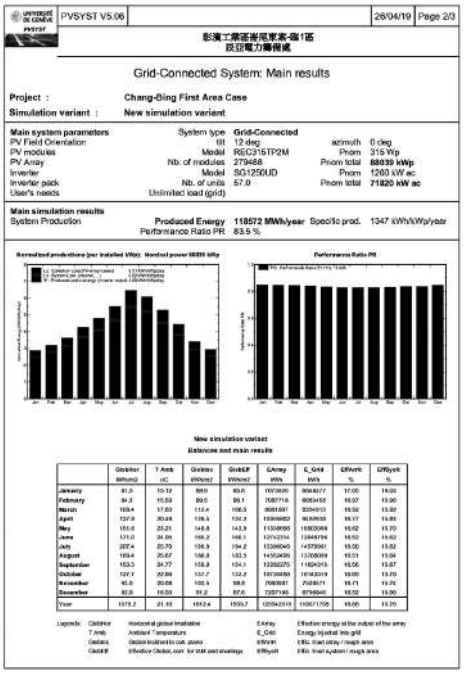
Inverter		Model	SG1250UD		
		Manufacturer	SUNGROW		
		Operating Voltage	520-850 V	Unit Nom. Power	1250 kW AC
Array#1:		Number of Inverter	56	Total Power	70000 kW AC
Array#2:		Number of Inverter	1	Total Power	1250 kW AC
Total		Number of Inverter	57	Total Power	71820 kW AC

PV Array loss factors

Thermal Loss factor		Uc (const)	29.0 W/m2K	Uv (wind)	0.0 W/m2K / m/s
=> Nominal Oper. Coll. Temp. (G=800 W/m2, Tamb=20oC, Wind velocity = 1m/s.) NOCT					45 oC
Wiring Ohmic Loss		Array#1	0.093 mOhm	Loss Fraction	1.5 % at STC
		Array#2	7.3 mOhm	Loss Fraction	1.5 % at STC
		Global		Loss Fraction	1.5 % at STC
Module Quality Loss				Loss Fraction	0.8 %
Module Mismatch Losses				Loss Fraction	2.0 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization		IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	bo Parameter	0.05

User's needs : Unlimited load (grid)

圖 11　臨 1 號案場太陽能發電模擬 (1/2)



PVSYST V5.06 | 26/04/19 | Page 2/3

彰濱工業區崙尾東案-臨1區
設置電力轉備處

Grid-Connected System: Main results

Project : Chang-Bing First Area Case
Simulation variant : New simulation variant

Main system parameters	System type	Grid-Connected			
PV Field Orientation	tilt	12 deg	azimuth	0 deg	
PV modules	Model	REC315TP2M	Pnom	315 Wp	
PV Array	Nb. of modules	279488	Pnom total	**88039 kWp**	
Inverter	Model	SG1250UD	Pnom	1250 kW ac	
Inverter pack	Nb. of units	57.0	Pnom total	**71820 kW ac**	
User's needs	Unlimited load (grid)				

Main simulation results

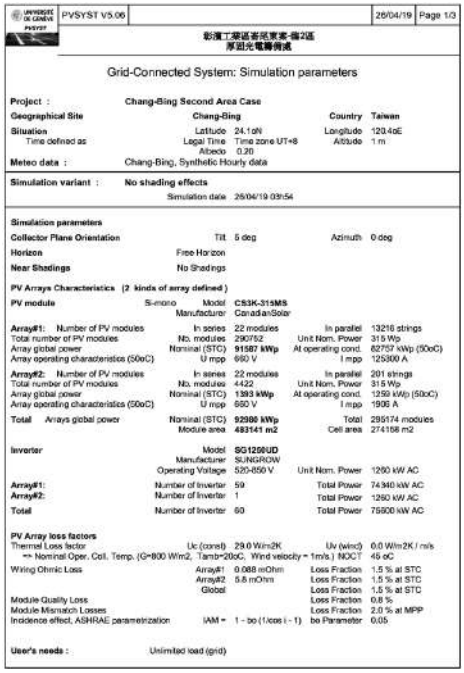
System Production	**Produced Energy**	**118572 MWh/year**	Specific prod. 1347 kWh/kWp/year
	Performance Ratio PR	83.5 %	

New simulation variant
Balances and main results

	GlobHor kWh/m2	T Amb oC	GlobInc kWh/m2	GlobEff kWh/m2	EArray MWh	E_Grid MWh	EArray %	EffSyst %
January	81.0	10.12	88.0	85.0	7073836	6964877	17.05	16.02
February	84.3	10.58	89.5	86.1	7087716	6963458	16.07	15.96
March	109.4	17.03	112.4	108.3	8081661	8004910	16.59	15.92
April	127.8	20.48	128.3	124.2	8999862	8918938	16.17	15.88
May	151.0	23.21	148.8	143.9	9936860	9853064	15.62	15.70
June	171.0	24.96	166.2	160.1	10742354	10648794	15.52	15.62
July	207.4	25.79	198.9	194.2	10966045	10870061	15.00	15.62
August	189.4	25.67	186.8	183.5	10524595	10428009	15.31	15.64
September	153.3	24.77	156.9	154.1	10280275	10185015	15.56	15.87
October	127.7	22.88	137.7	132.8	10038888	10143019	15.85	15.79
November	95.0	20.08	103.9	98.8	7980887	7908671	15.71	15.74
December	82.0	16.93	91.2	87.6	7287190	8179945	16.02	15.90
Year	1579.2	21.18	1682.4	1599.7	105943319	105071708	15.95	15.75

Legends: GlobHor Horizontal global irradiation; EArray Effective energy at the output of the array
T Amb Ambient Temperature; E_Grid Energy injected into grid
GlobInc Global incident in coll. plane; EffArr Effic. Eout array / rough area
GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings; EffSyst Effic. Eout system / rough area

圖 12　臨 1 號案場太陽能發電模擬 (2/2)



PVSYST V5.06 | 26/04/19 | Page 1/3

彰濱工業區崙尾東案-臨2區
屋頂光電轉備處

Grid-Connected System: Simulation parameters

Project : Chang-Bing Second Area Case

Geographical Site	Chang-Bing			Country	Taiwan
Situation		Latitude	24.1oN	Longitude	120.4oE
Time defined as		Legal Time	Time zone UT+8	Altitude	1 m
		Albedo	0.20		
Meteo data :	Chang-Bing, Synthetic Hourly data				

Simulation variant : No shading effects
Simulation date 26/04/19 03h54

Simulation parameters

Collector Plane Orientation		Tilt	5 deg	Azimuth	0 deg
Horizon	Free Horizon				
Near Shadings	No Shadings				

PV Arrays Characteristics (2 kinds of array defined)

PV module	Si-mono	Model	CS3K-315MS		
		Manufacturer	CanadianSolar		
Array#1: Number of PV modules		In series	22 modules	In parallel	13216 strings
Total number of PV modules		No. modules	290752	Unit Nom. Power	315 Wp
Array global power		Nominal (STC)	**91587 kWp**	At operating cond.	82757 kWp (50oC)
Array operating characteristics (50oC)		U mpp	660 V	I mpp	125300 A
Array#2: Number of PV modules		In series	22 modules	In parallel	201 strings
Total number of PV modules		No. modules	4422	Unit Nom. Power	315 Wp
Array global power		Nominal (STC)	**1393 kWp**	At operating cond.	1259 kWp (50oC)
Array operating characteristics (50oC)		U mpp	660 V	I mpp	1908 A
Total Arrays global power		Nominal (STC)	**92980 kWp**	Total	295174 modules
		Module area	483141 m2	Cell area	274158 m2

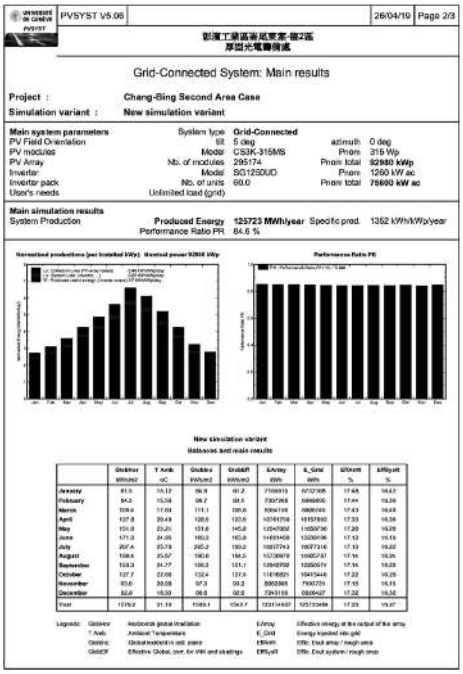
Inverter		Model	SG1250UD		
		Manufacturer	SUNGROW		
		Operating Voltage	520-850 V	Unit Nom. Power	1250 kW AC
Array#1:		Number of Inverter	59	Total Power	74340 kW AC
Array#2:		Number of Inverter	1	Total Power	1250 kW AC
Total		Number of Inverter	60	Total Power	75590 kW AC

PV Array loss factors

Thermal Loss factor		Uc (const)	29.0 W/m2K	Uv (wind)	0.0 W/m2K / m/s
=> Nominal Oper. Coll. Temp. (G=800 W/m2, Tamb=20oC, Wind velocity = 1m/s.) NOCT					45 oC
Wiring Ohmic Loss		Array#1	0.088 mOhm	Loss Fraction	1.5 % at STC
		Array#2	5.8 mOhm	Loss Fraction	1.5 % at STC
		Global		Loss Fraction	1.5 % at STC
Module Quality Loss				Loss Fraction	0.8 %
Module Mismatch Losses				Loss Fraction	2.0 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization		IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	bo Parameter	0.05

User's needs : Unlimited load (grid)

圖 13　臨 2 號案場太陽能發電模擬 (1/2)



PVSYST V5.06 | 26/04/19 | Page 2/3

彰濱工業區崙尾東案-臨2區
屋頂光電轉備處

Grid-Connected System: Main results

Project : Chang-Bing Second Area Case
Simulation variant : New simulation variant

Main system parameters	System type	Grid-Connected			
PV Field Orientation	tilt	5 deg	azimuth	0 deg	
PV modules	Model	CS3K-315MS	Pnom	315 Wp	
PV Array	Nb. of modules	295174	Pnom total	**92980 kWp**	
Inverter	Model	SG1250UD	Pnom	1250 kW ac	
Inverter pack	Nb. of units	60.0	Pnom total	**75000 kW ac**	
User's needs	Unlimited load (grid)				

Main simulation results

System Production	**Produced Energy**	**125723 MWh/year**	Specific prod. 1352 kWh/kWp/year
	Performance Ratio PR	84.6 %	

New simulation variant
Balances and main results

	GlobHor kWh/m2	T Amb oC	GlobInc kWh/m2	GlobEff kWh/m2	EArray MWh	E_Grid MWh	EArray %	EffSyst %
January	81.0	10.12	86.9	81.2	7169919	6732398	17.45	16.42
February	84.3	10.58	88.7	83.5	7207268	6866806	17.44	16.28
March	109.4	17.03	111.1	105.6	8064145	8000745	17.43	16.48
April	127.8	20.48	126.5	120.6	8916758	8835782	17.33	16.38
May	151.0	23.21	151.6	145.6	9754700	9680736	17.20	16.28
June	171.0	24.96	165.0	160.0	10409458	10250106	17.12	16.19
July	207.4	25.79	205.2	199.2	10607743	10507316	17.13	16.52
August	189.4	25.67	190.6	184.5	10372878	10267287	17.16	16.35
September	153.3	24.77	156.3	151.1	10348258	10250574	17.14	16.28
October	127.7	22.88	132.4	127.8	10180851	10413446	17.22	16.25
November	95.0	20.08	97.3	93.2	8092365	7990721	17.15	16.15
December	82.0	16.93	86.8	82.8	7243155	8026427	17.22	16.52
Year	1579.2	21.18	1584.1	1543.7	103914459	105123456	17.25	16.37

Legends: GlobHor Horizontal global irradiation; EArray Effective energy at the output of the array
T Amb Ambient Temperature; E_Grid Energy injected into grid
GlobInc Global incident in coll. plane; EffArr Effic. Eout array / rough area
GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings; EffSyst Effic. Eout system / rough area

圖 14　臨 2 號案場太陽能發電模擬 (2/2)

大量再生能源併網的衝擊與電力調度因應策略

台灣電力公司電力調度處處長 / 吳進忠
台灣電力公司電力調度處電網運用計劃專員 / 鄭宇軒

關鍵字：系統慣量、電壓 / 頻率穿越、輔助服務、調頻備轉容量、重新調度程序

摘要

為落實能源轉型，政府規劃再生能源發電佔比將於民國114年達總發電量之20%。大量再生能源併網後，將造成電網壅塞及系統衝擊等議題，其間歇性、不易預測性對電力系統供需平衡與電網運轉產生影響，是電力調度的最大挑戰，輕者會導致系統頻率不穩定、區域電網電壓變動過大；嚴重時可能導致輸電線路壅塞、區域電網電壓不穩定，若再生能源發電量瞬間變化太大，則可能造成系統頻率驟升或驟降而嚴重影響系統穩定與供電安全。本文分別從大量再生能源併網的衝擊、台電系統再生能源發電情形分析、再生能源發電與系統負載需求一致性分析、電力調度衝擊與因應策略等面向提出報告，作為未來電力調度因應策略之參考，以期降低大量再生能源對系統之衝擊。

一、前言

政府能源轉型整體目標，係確保國家電力穩定、相關能源配套措施完成下，盡力管制全國溫室氣體排放，朝向火力發電發電量占比80%（燃氣50%、燃煤27%）、再生能源發電量占比20%之目標前進，以達低碳潔淨能源發展目標。

由於國人環保意識日漸提升、地方政府環保法規日漸加嚴，擔任基載機組任務的燃煤電廠時常受到環保限制，發電量逐年下降（如臺中、興達及麥寮等燃煤電廠生煤減量限制）。此外，每年11月至隔年4月期間，常因大氣擴散情況不佳，導致臺灣西南部地區空氣品質指標（AQI）偏高，臺中電廠及興達電廠燃煤機組必須配合執行自主降載減排或友善降載減排，改以燃氣複循環機組增加發電替代。另一方面，電業法第八條規定：「輸配電業應負責執行電力調度業務，於確保電力系統安全穩定下，應優先併網、調度再生能源。」隨著再生能源裝置容量不斷成長，未

來再生能源將於某些時段取代部分燃煤機組發電量，擔任基載機組的角色。

再生能源的間歇性、不易預測性是再生能源併網與電力調度的最大挑戰，其間歇性對電力系統供需平衡與電網運轉產生影響，輕者會導致系統頻率不穩定、區域電網電壓變動過大；嚴重時可能導致輸電線路壅塞、區域電網電壓不穩定，若再生能源發電量瞬間減少太多，則可能導致系統頻率驟降，觸發低頻電驛動作卸載，影響供電可靠度。

本文分別從大量再生能源併網的衝擊、台電系統再生能源發電情形分析、再生能源發電與系統負載需求一致性分析、電力調度衝擊與因應策略等面向提出報告，以作為未來電力調度因應策略之參考。

二、大量再生能源併網的衝擊

（一）大量太陽光電併網對電力調度的衝擊

太陽光電的發電量多寡主要受日照條件、飄雲及溫度影響，要預測其發電趨勢不難，但要準確預測太陽光電的變化量卻非常困難。在夏季期間太陽光電發電量分布基本上與台電系統負載需求可匹配，惟其每天可發電時間不長，僅約10小時，發電情形最佳的時間主要集中在11:00-15:00。相反的，冬季期間的尖峰負載約在18時，太陽光電完全無法配合冬季期間的尖峰用電需求，所以大量太陽光電併網對冬季期間電力調度的衝擊最大。以114年冬季某日的負載預測及再生能源可能發電推估的情境進行分析，114年冬季台電系統負載模擬曲線如圖1所示，在此時系

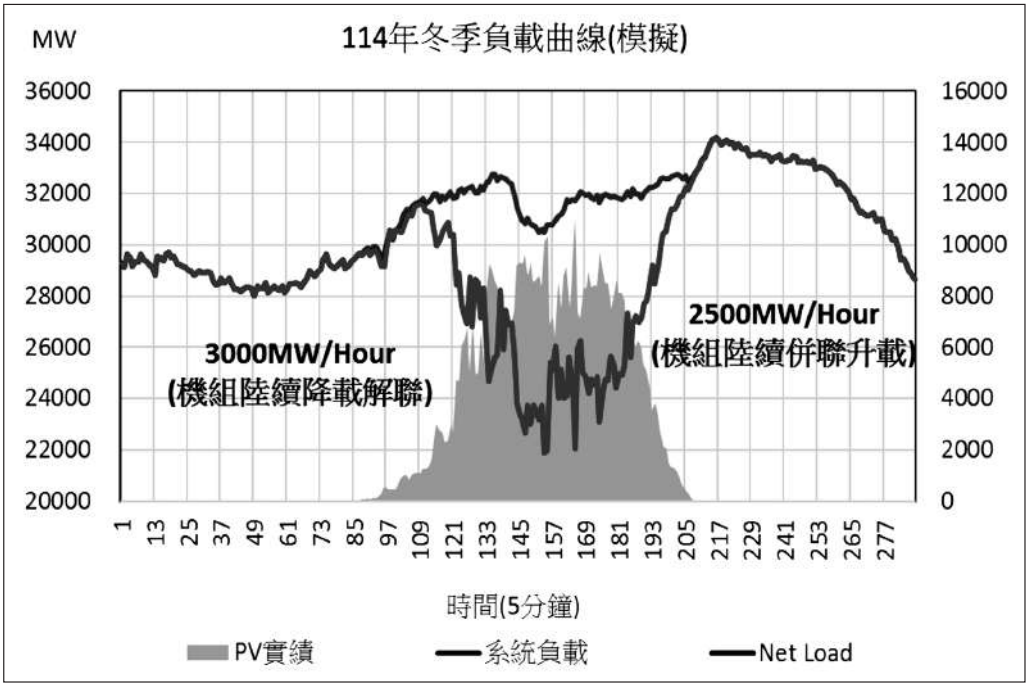


圖 1　114 年冬季台電系統負載與太陽光電模擬曲線 [1]

統的經常狀況如下：

1. 再生能源（PV）滲透率約32-35%，但完全無法支援冬天（晚上）尖峰負載需求。
2. 白天時段傳統機組（燃煤機組）出力大幅降低，部分機組（燃氣複循環機組）甚至解聯待機，導致系統慣量（inertia）不足。
3. 抽蓄機組運轉模式須調整為白天時段抽水，其他時段發電。
4. 複循環機組解併聯頻繁（早上9:00陸續降載解聯、下午3:00陸續併聯升載）。

冬季負載較低且太陽光電發電情況較佳時對系統電力調度的衝擊與影響如下：

1. 傳統機組併聯數量及發電容量均減少，造成輔助服務取得困難，影響系統安全與穩定。
2. 系統慣量不足，導致頻率響應變差，不僅頻率穩定受到影響，系統發生偶發（跳機）事故時易造成系統穩定度問題。
3. 主動式無效電力來源不足，電網發生接地故障時，造成系統電壓偏低，可能導致系統電壓不穩定。
4. 上午時段負載下降速度快（3000 MW/小時），若機組降載、解聯不及，易導致系統頻率及電壓過高。
5. 下午時段負載上升速度快（2500 MW/小時），若機組升載不及或遇跳機事故時，易導致低頻電驛動作卸載。若系統無效電力供應不足或調度不及，恐導致電壓崩潰（Voltage Collapse）。

（二）大量離岸風電併網對電力調度的衝擊

依國外風力發電及大型風場運轉經驗，風力發電取決於風速，其在短時間內的表現完全取決於當地的風力條件，因此大量離岸風電對電力系統的穩定運轉的衝擊包括出力變動更為劇烈、併網點系統衝擊變高、輸電系統壅塞、系統頻率及區域電壓變動加劇、系統穩定度與可靠度降低等。我國離岸風電未來發展呈現區域裝置容量大且高度集中併網的情形，對台電系統及併網區域（中部地區）的衝擊包括：

1. 發電出力受氣候影響更為劇烈，發電預測愈加困難：

由於近岸風速、風向變化較為劇烈，所以區域集中式各離岸風場易同時受影響，導致發電預測愈加困難，衝擊電力系統供需平衡與電網穩定運轉。

2. 區域無效電力來源不足，電壓維持能力降低：

風力發電機本身提供無效電力的能力較低，當風力發電機出力發生巨幅變化時易引起電壓變動，系統發生短路故障時也易造成電壓驟降，不僅影響電壓穩定，甚至可能導致風機跳機，進而引發系統頻率下降及系統不穩定。

3. 區域慣量不足，頻率響應變差：

風機的慣量比傳統機組的慣量小很多。當風場出力變動較大的時候，易使頻率更快偏離目標值；當遇系統發生偶發（跳機）事故時，因系統慣量減少、頻率響應變差，可能造成系統穩定度問題。

綜上所述，原本電力需求已經取決於天氣狀況，但是系統再生能源占比隨風力和太陽能的增長而提高，使電力供應面也將大部

分依賴於天氣的狀況。因此，供需平衡將具有更大的隨機變動性，導致負載/再生能源發電預測愈加困難。依國外電力系統運轉經驗，若負載/再生能源發電預測誤差過大，對電力調度、系統供電穩定與安全將產生重大衝擊，不僅影響電力系統的經濟調度，嚴重時更可能引發分區輪流限電事件[2]。

調度最大風險在於負載陡升階段又面臨再生能源出力陡降的趨勢，因此必須針對台電系統風力發電情形與系統負載需求特性進行分析比較，並研擬相關電力調度因應對策。

三、再生能源發電與系統負載需求一致性分析

再生能源除了間歇性與不易預測外，對電力調度而言，另一個併網的挑戰是再生能源發電能否與系統負載需求匹配。本文以台電系統107年全年8760小時全系統負載需求、太陽光電及風力發電等之變動情形進行定性分析。

圖2為台電系統107年全年8760小時全系統負載需求分布情形，可發現6-10月份為台電系統負載需求高峰，尤其是在此期間每天

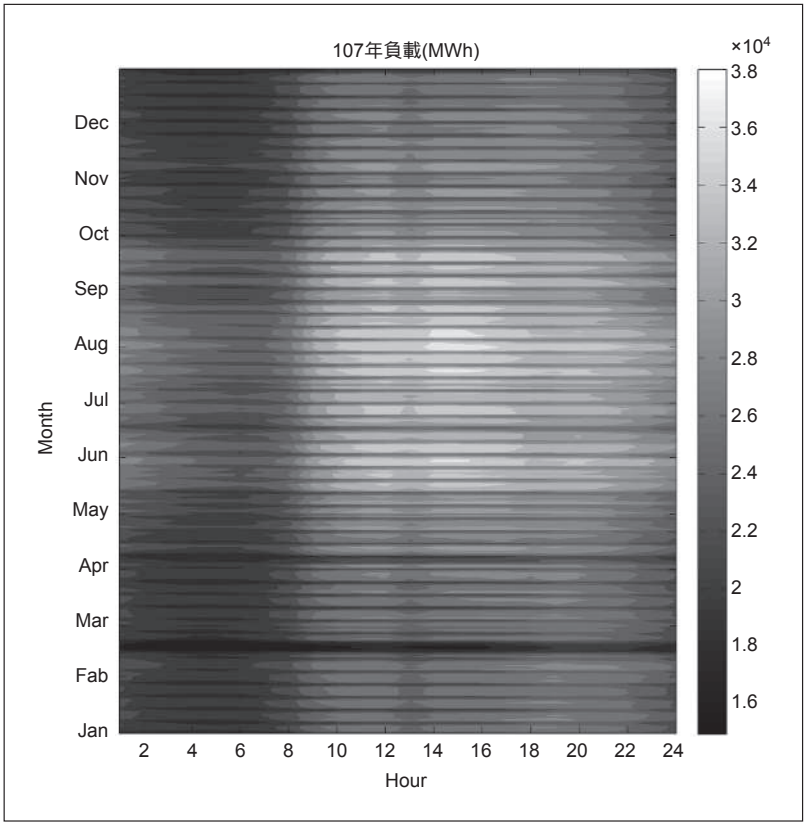


圖 2　台電系統 107 年 8760 小時負載量分布 [3]

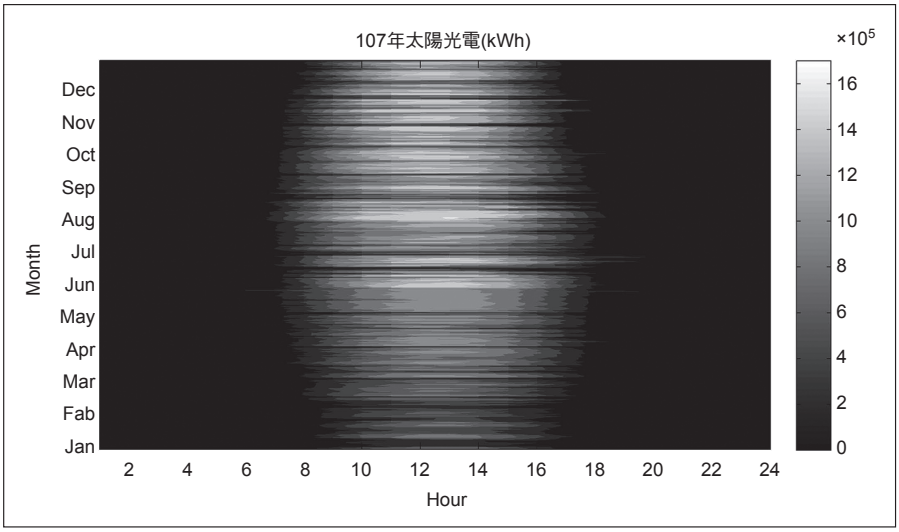


圖 3　台電系統 107 年 8760 小時太陽光電發電量分布 [4]

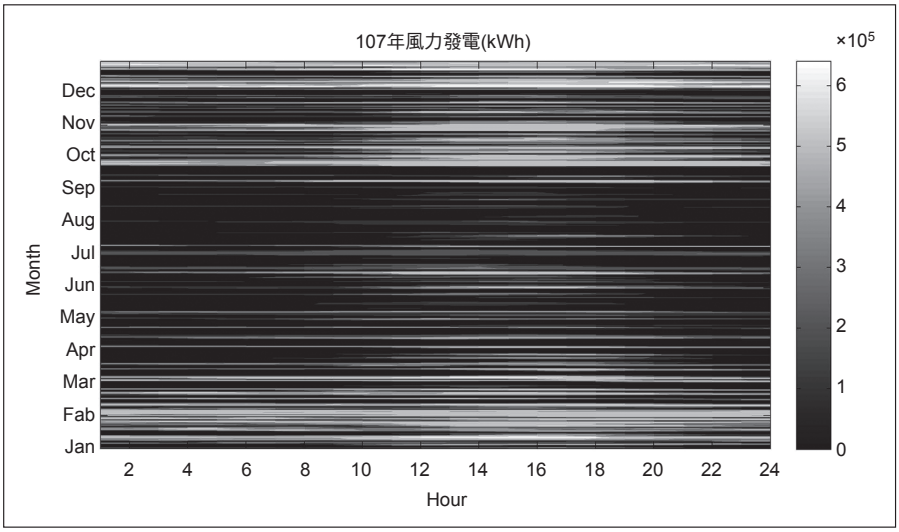


圖 4　台電系統 107 年 8760 小時風力發電發電量分布 [5]

10:00-22:00負載需求更為殷切。台電系統107年全年8760小時全系統太陽光電發電量分布情形如圖3所示，可發現太陽光電發電量分布雖然基本上與台電系統負載需求可匹配，但其每天可發電時間不長，僅約10小時（8:00-18:00），且主要集中在11:00-15:00的發電情形最佳，又台電系統冬季期間尖峰用電是在每天晚上18:30-19:30左右，此時太陽光電已完全無法發電，故無法配合冬季期間尖峰用電需求。

圖4為台電系統107年全年8760小時全系

統風力發電發電量分布情形，可發現在夏季期間風力發電量極低，主要是在冬季期間比較有發電量輸出，所以風力發電量分布與台電系統夏季尖峰負載需求基本上不匹配。

如上所述，風力發電與系統負載需求雖不匹配，但風力發電仍有其貢獻，特別是在冬季期間再生能源發電可替代火力機組發電、舒緩火力機組因空污配合環保減載的調度壓力。所以未來大量離岸風電併入電網，要確保電網運轉的安全穩定與電力調度的順遂，必須依賴準確的風電發電預測、相關併網法規要求的落實與風場營運商的配合。

四、電力調度衝擊與因應策略

大型再生能源電廠併聯審查、電網擴建計畫僅可確保在特定情境下，可符合各項系統安全準則，但並無法保證系統可於任何時間點，皆可滿足所有再生能源（特別是離岸風電）之電力傳輸需求。因此電力調度中心仍需對再生能源（特別是離岸風電）併網之衝擊與影響預作分析、研擬各項因應大型再生能源併網之穩定電力供應策略。

（一）再生能源之衝擊與影響系統穩定性的分析

1. 氣候依賴度增加，負載/發電預測愈加困難

電力需求面已經取決於天氣狀況，但是再生能源占比隨風力和太陽能的增長而提高，使電力供應方面也將大部分依賴於天氣的狀況。因此，供需平衡將具有更大的隨機變數，導致負載預測絕對誤差將增加。因應對策如下：

(1) 引進大數據分析技術，提高負載/再生能源發電預測準確度
(2) 日前再生能源發電預測分析技術（未來七天），提供符合日前安全限制機組排程（Day-Ahead Security Constraint Unit Commitment, DA-SCUC）、符合安全限制經濟調度（Day-Ahead Security Constraint Economic Dispatch, DA-SCED）及輔助服務規劃（DA-Ancillary Service Scheduling）

即時再生能源發電預測分析技術（包括未來3小時及每5或15分鐘），提供符合即時安全限制經濟調度（RT-SCED）、即時輔助服務調度及即時調度調頻輔助服務、即時備轉輔助服務

2. 系統慣量（inertia）減少，系統頻率/暫態穩定度下降

再生能源（風機和太陽光電）的慣量要比傳統機組的慣量小很多，在正常出力變動的時候，易使頻率偏離目標值，系統發生偶發（跳機）事故時，因系統慣量減少導致頻率響應變差，而造成系統穩定度問題。因應對策如下：

(1) 增加調頻備轉容量及快速反應備轉容量等輔助服務之配置
(2) 靈活抽蓄電廠之調度運轉策略，增加系統慣量
(3) 發展快速反應型需量反應（類似ERCOT的LaaR）
(4) 規範風機具備低頻穿越（Low Frequency Ride-Through）能力
(5) 設置儲能系統強化系統慣量，並提供快速反應備轉容量

3. 傳統機組的靈活性下降，輔助服務取得困難

因為環保或排放限制，又由於大量再生能源之負載因數提高（特別是離岸風機）的影響，有可能使得複循環機組解併聯機會增加（即併聯發電的時間減少），導致部分燃氣電廠競爭力下降。原先由這些機組提供的輔助服務（如備用容量、備轉容量、頻率響應和慣量）等則需要從其他機組取得。因應對策如下：

(1) 增加調頻備轉容量及快速反應備轉容量等輔助服務之配置
(2) 靈活抽蓄電廠之調度運轉策略，提供變速調頻控制
(3) 發展快速反應型需量反應（類似ERCOT的 LaaR）
(4) 要求離岸風機具備頻率反應（Frequency Response）能力，協助調整頻率
(5) 規範離岸風場升降載率（10-20%/分鐘）

4. 系統短路容量不足，電壓品質及穩定度下降

當系統發生短路故障時易造成電壓驟降，不僅影響電壓品質，甚至導致風機跳機，進而引發系統頻率下降及系統不穩定。另與傳統發電機組比較，風力發電機本身提供無效電力的能力較低，當風力發電機出力發生巨幅變化時易引起電壓變動。因應對策如下：

(1) 要求離岸風機具備低電壓穿越（Low Voltage Ride-Through）能力
(2) 鼓勵離岸風場具備虛功率補償設備（STATCOM）

（二）再生能源併網之電力調度因應措施

依國外電力調度中心運轉經驗，必須從要求再生能源配合提升各項性能及加強電力調度中心相關即時調度作業兩方面努力，方能使大量再生能源得以順利併網，並在高再生能源發電占比時可以確保電力系統的穩定度及可靠度[6-11]，分別說明如下：

1. 要求風場/風機配合加強各項性能

(1) 準確發電預測（Forecast）

一定裝置容量以上的風場即必須定時更新提供未來一段時間發電預測資訊給調度中心進行機組發電排程（通常日前發電預測為168小時、即時發電預測為3小時），國外調度中心也有要求風場必須提供氣象資訊（包括風速、風向等），再由調度中心（ISO）負責區域及全系統的風力發電預測；國外調度中心除了日前進行未來168小時的風力發電預測外，在即時運轉更要求每15分鐘更新未來3小時的風力發電預測，以利進行即時輔助服務相關備轉容量（包括即時備轉容量及補充備轉容量）。受限氣候變化，日前預測（Day Ahead Forecast）的平均絕對百分誤差（Mean Absolute Percent Error, MAPE）約為6-8%，小時前預測（Hour Ahead Forecast）的平均絕對百分誤差約為3-4%。

(2) 提高電壓支持（Voltage Support）能力，強化併接點（POI）之電壓調整能力

風力發電機被要求必須能夠提供至少10%裝置容量的無效功率（Reactive Power）、在併接點（Point of Interconnection, POI）可以在功率因數0.95超前及0.95落後範圍內運轉、且其無效功率（虛功率）容量必須是可以動態

調整。

(3) 提高頻率支持（Frequency Support）能力，風機具備類似調速機功能

風力發電機被要求必須能夠協助調整系統頻率，提供相當於傳統發電機初級頻率反應（Primary Frequency Response）功能的類似調速機反應（Governor-like）能力以因應系統頻率變動[6]，如圖5所示。

(4) 強化異常電壓/頻率穿越能力（Voltage/Frequency Ride Through）

風力發電機在系統遭遇偶發事件期間或之後的幾個週波（Cycle）瞬間必須維持與系統併聯持續供應電力（包括實功率與虛功率），不能在系統頻率偏高、偏低，或併接點電壓過高、過低而切離系統，即風機應該具有在異常電壓/頻率持續運轉的能力，如圖6及圖7所示。

(5) 規範限制升/降載率（Power Ramping）

為確保系統頻率穩定，規範再生能源電廠的升降載率，以德州電力調度中心為例，即要求風場/風機的每分鐘升降載率不能超出其銘牌額定值的20%。目前我國再生能源併聯技術要點雖未要求再生能源的升/降載率，但為確保系統穩定與安全，有必要比照國外作法規範再生能源升/降載率，建議大型再生能源電廠配置一定容量的儲能系統以符合升/降載率要求。

2. 即時電力調度方面配合加強相關調度作業

(1) 動態規劃輔助服務（Ancillary Service）

考慮每日負載型態、瞬間負載變動、發電機出力變化及機組可能故障跳機等因素而使系統發電及負載隨時都在變動，導致系統頻率變動超出許可範圍，因此調度中心必須配置適量的各類備轉容量（輔助服務）使系統發電及負

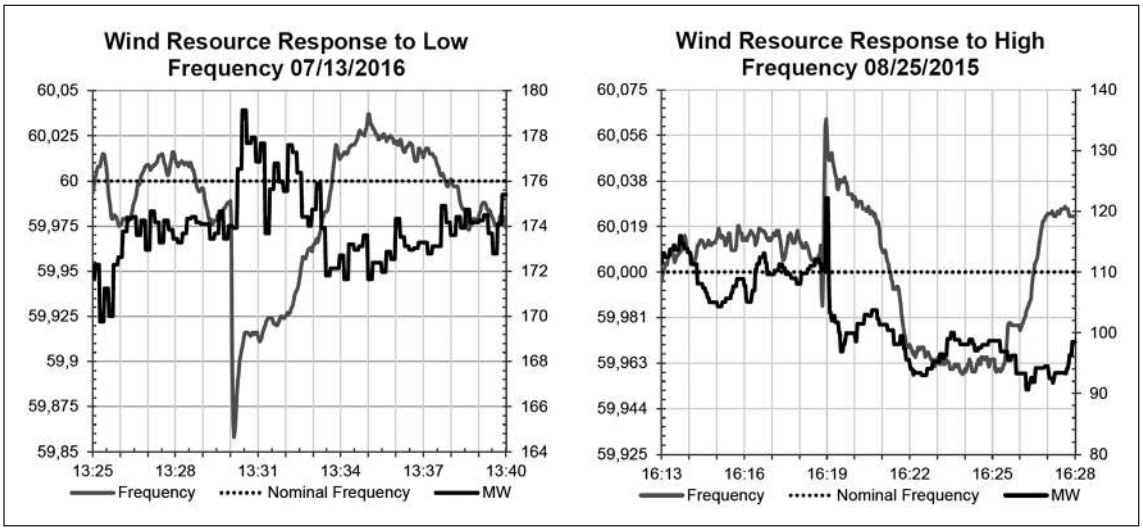


圖 5　風機具有類似調速機的頻率反應能力 [6]

說明：1. 右圖為風機的低頻反應能力，左圖為風機的高頻反應能力

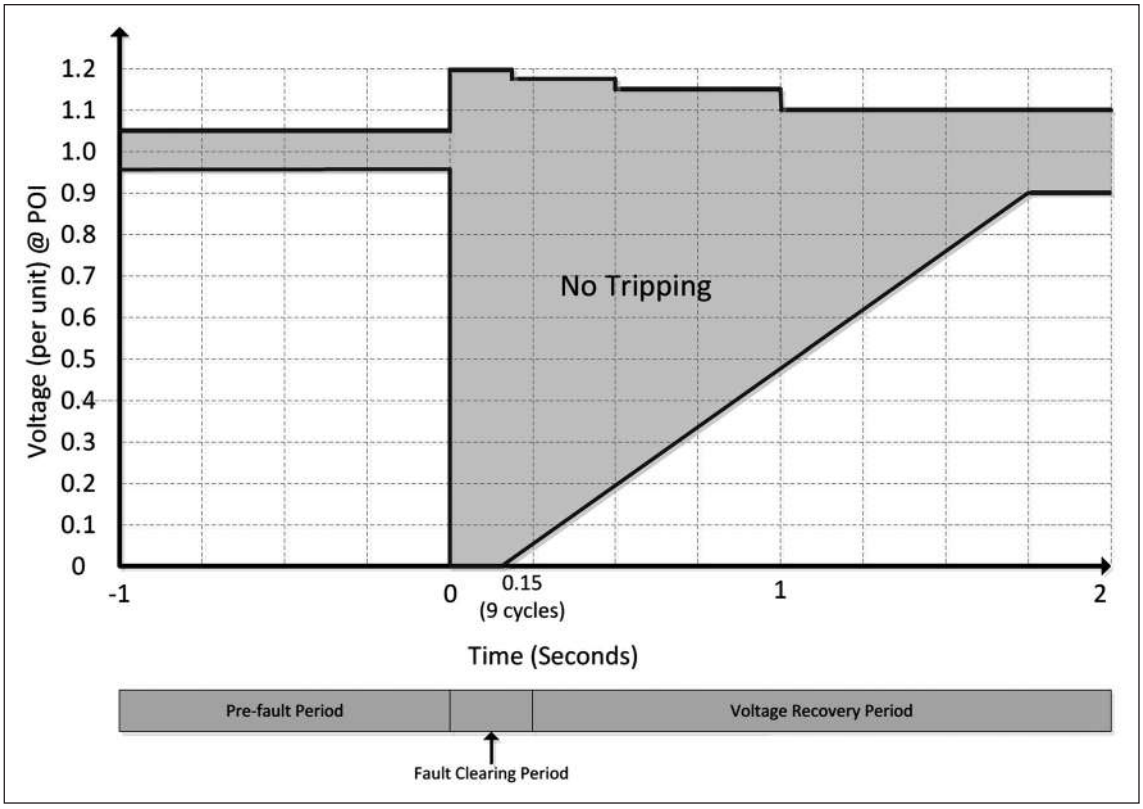


圖 6　風機應具備之電壓穿越能力 [6]

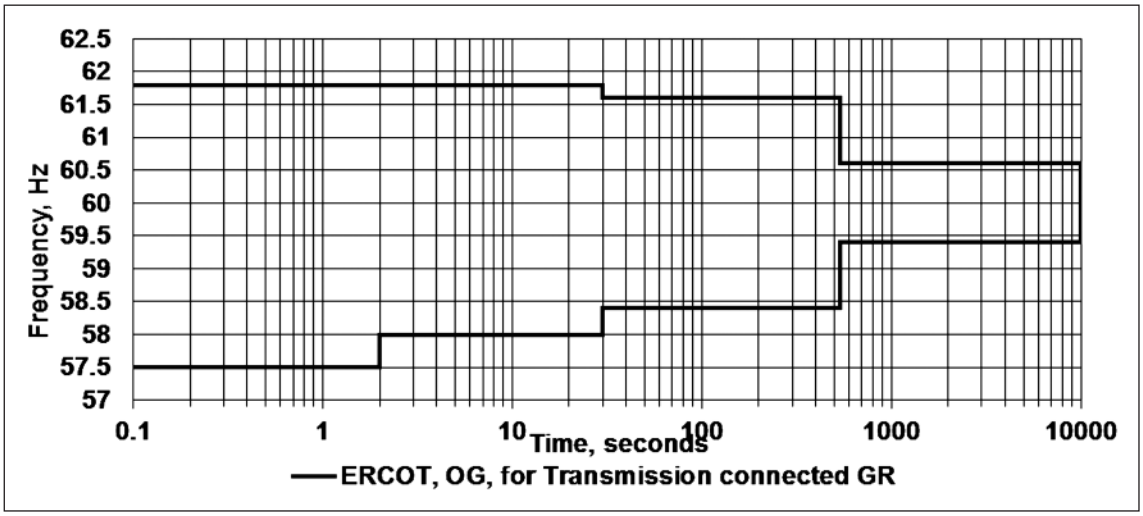


圖 7　風機應具備之頻率穿越能力 [6]

載得以維持平衡，各類備轉容量包括調頻備轉容量（Regulation Service）、即時備轉容量（Responsive Reserve Service）及補充備轉容量（Supplemental Reserve Service，亦稱Non-Spin Reserve Service）[6]。

(2) 增加調度員專責監控再生能源變動，加強即時運轉控制

針對大量風機併網所引發的各種可能風險進行定量分析、改善，並動態考慮特定的風險，包括最大可能預測誤差、淨負載變動、系統慣量偏低、輔助服務需求動態調整等[6]。

五、因應大量再生能併網台電公司調度準備工作

為確保能源轉型成功，因應大量再生能併網衝擊，確保電力系統供電穩定與安全，目前台電公司正積極推動以下幾項準備工作[12, 13]：

（一）提高風力發電預測的準確性與重新調度程序

為使風電之變動性、間歇性對系統造成之影響降至最低，參考美國ERCOT、NYISO等ISO之集中式風力發電預測作業方式，引進大數據分析技術，提高負載/再生能源預測準確度，提供Day-Ahead SCUC及Real-Time SCED使用，以改善系統整體運轉效率，並調度適足的輔助服務，維持電力系統的穩定與安全。

（二）準備充裕之各項系統備轉容量

由於再生能源短時間預測具高度不確定性，NYISO或CAISO皆以提高調頻備轉予以因應。再生能源滲透率增加後，調頻備轉需求量顯著增加，必須尋找新的供應源，如大型儲能（電池、飛輪）或需量反應等。依據台電公司委託美國電力研究院（EPRI）之研究結果，因應大量再生能源併網需額外準備再生能源裝置容量10%之備轉容量[11]。

（三）增加可快速起停之燃氣複循環機組

長期電源開發需大量增加快速起停、運轉範圍大及頻控範圍大之燃氣複循環機組。因此台電電源開發計畫105-114年規劃新增可快速起停之燃氣複循環機組包括大潭#7-#9機、新通霄#1-#3機、高原複循環機組、興達新CC#1-#2、協和複循環機組等。

（四）再生能源併聯技術法規配合修訂

藉由法規條件管制再生能源於責任分界點的負載變動率（ΔP）、電壓變動率（ΔV）、電壓/頻率穿越（Voltage & Frequency Ride-Through）、功率降載能力（Power Curtailment）、可設定之升/降載率（Ramp Rate Limitation）、調速機功能（Governor）等，並透過費率機制鼓勵再生能源業者設置適當之儲能設施。

（五）要求風場 / 風機接受調度

風場/風機應當接受由調度單位發送出之調度訊號，在系統正常符合安全限制期間，風場/風機採優先調度方式。在系統有可能不符合安全限制期間，若該風場/風機可以舒緩

安全限制，則風場/風機出力需配合調度指令降載直至可靠度問題被解決為止。

（六）強化系統調度控制

包括建置「再生能源管理系統」（包括再生能源發電預測、監控及調度管理等）、修訂「電力調度規則及相關作業程序」、建立「輔助服務市場及相關機制」、推動「自動反應型需量反應」、因應再生能源發展及負載變動情境、加強電力調度人員相關訓練等。

六、結論

未來大量再生能源加入系統是必然的結果，其對電力系統的衝擊與影響，國外均有成功的解決方案，如何選擇適合台灣電力系統的因應措施是重點，必須兼具經濟性與可執行性，並納入電力市場機制。大量再生能源併網後，電力系統對氣候依賴度增加，負載/發電預測愈加困難，再生能源的間歇性、不易預測性是再生能源併網與電力調度的最大挑戰，因應再生能源的間歇性與不確定性，必須配置足夠的各類輔助服務使系統發電及負載得以維持平衡、確保系統穩定，所以建立適當的電力市場機制或電力交易平台，取得多元且充裕提供各項輔助服務，方可積極協助大量再生能源併網，並有效抑低其可能之衝擊與影響，確保系統供電安全與穩定。僅提出兩項建議如下：

（一）再生能源併網技術法規：

建議盡速配合修訂，要求大型再生能源電廠強化設備性能提升穩定運轉能力

1. 一定容量以上的再生能源電廠必須提供發電出力預測
2. 要求大型的再生能源電廠應具備頻率響應能力
3. 要求再生能源電廠必須具備穩定電壓、補償無效電力的能力
4. 要求大型的再生能源電廠設置一定容量的儲能系統，補償實功變動

（二）電力市場機制：

建議儘速建立電力市場，電力調度中心可透過電力市場取得必要的輔助服務因應大量再生能源併網的衝擊。

參考文獻

1. 吳進忠（107 年）。「再生能源併聯運轉對電力調度的挑戰與機會」，再生能源併聯運轉研討會，臺北：財團法人中技社，107 年。
2. Ela E., Kirby B.,“ERCOT Event on February 26, 2008: Lessons Learned”, July 2008, [Online]. Available: https://www.nrel. gov/docs/fy08osti/ 43373. pdf, Accessed on: Jun. 21, 2019.
3. 台電公司電力調度處，「107 年 8760 小時系統負載量統計」，108 年。
4. 台電公司電力調度處，「107 年 8760 小時太陽光電發電量統計」，108 年。
5. 台電公司電力調度處，「107 年 8760 小時風力發電量統計」，108 年。
6. 黃舜賢（107 年），「再生能源發電併網 –ERCOT 運轉經驗」，再生能源併網運轉研討會，臺北：台灣電力股份有限公司，106 年。
7. Lannoye, E., Tuohy, A., Entriken, R.,“Wind and Solar Power and their Impact on Operating Reserves in the Taiwan Power System,”California：Electric Power Research Institute, 2015.
8. John C. Yang Stephen N. Zack,“Incorporation of Wind Power Resources into the California Energy Market,” California Independent System Operator Corporation, USA, 2005.
9. Smith, J. C.,“Renewable Energy Interconnection Requirements for the US”, IEEE Power and Energy Society Meeting, Denver, July 28.
10. NYISO,“Integration of Wind into System Dispatch.”, October 2008, [Online]. Available: https://www.

ferc.gov/Cale darFiles/20090303120334- YISO%20 Wind%20White%20Paper%20October%202008.pdf., Accessed on: Jun. 21, 2019.
11. Lannoye, E., Tuohy, A., Entriken, R., “Wind and Solar Power and their Impact on Operating Reserves in the Taiwan Power System”, 2015.
12. 吳進忠，「再生能源預測對於電力調度的重要性」，再生能源發電預測研討會，臺北：財團法人中技社，107 年。
13. 吳進忠，「離岸風電併網與電力調度」，綠色金融暨離岸風電發展之風險與前瞻國際研討會，臺北，財團法人中技社、中華經濟研究院，106 年 11 月 14 日。

探討歐洲風電發展降低臺灣學習風險

丹麥商凱得股份有限公司台灣分公司負責人 / 徐瑋克

關鍵字：風資源量測、風能分析、計算流力、風機大型化、專案風險

摘要

風電產業在經過四十年的演變，從陸域開始到近二十年的離岸風電，各項工程技術已逐步可以適應在全球各主要經濟體進行大規模的開發與營運。然而，由於氣候預估與風資源分析仍有很多的進步空間之下，如何建置風資源模型並結合當今電腦運算技術，便成為各大再生能源公司很重要的課題，以釐清風資源對於風場規劃與技術的風險，更能精準掌握財務投資方向。本公司在風電及再生能源工程顧問領域持續深耕並藉由參與全球各地風場實際經驗下，提供相關經驗與業界分享。

一、前言

近年歐洲各國紛採競價制度以降低風電發展與開發成本，各開發商面臨利潤被大幅減縮的財務壓力，以及因場址複雜而日益增加的資本支出下，均專注在計算流體力學（Computational Fluid Dynamics，下稱CFD）的應用，以釐清風資源與風機及其附屬結構的相關交互作用。CFD在過去經常被低估和忽略，卻是上述問題最為直覺且重要的解決之道。

二、風資源分析

（一）採用 CFD 於實際應用之好處

我們的研究結果顯示，CFD技術應用在風場建造前的風能分析將能提高預測準確率，影響專案投資報酬率達30倍以上。此外，CFD技術更能優化風機排列組合，並確保風資源測量儀器擺放位置的正確及適當性。

尤其在複雜地理環境情況下，CFD風能分析有利於降低場址選擇不確定性且避開潛在不利區域。一般而言，在風能分析增加CFD的投資，僅占風能分析極小比例的資本

支出，但對於風場未來表現、銀行融資條件卻有極顯著的正面影響。

假設我們要開發一個小規模、地勢相對平緩及具若干林地環繞之風場專案，現場已建置一座70公尺高之測風塔，並預計設立五架風力機組。為解釋CFD應用，對於財務假設及風險預測之影響，試將以下使用和不使用CFD的風能分析結果做比較如下。如下圖1所示，即便於地形平緩場址，利用CFD技術執行風能分析能提供顯著效益，包含降低風資源分析0.5%的不確定性，更提高了0.9%的P90／P50發電量信心指數，以額外支出4仟英鎊的CFD分析之下，專案就會因為相關融資信心指數提升而使專案額外獲益達12萬英鎊。雖然說這是一個基於歐洲在銀行熟悉風電技術與融資架構下的基本假設，然而可說明的是採用CFD分析確實會增加相關技術與財務對於專案假設的信心指數。

CFD風能分析之效益在於，隨著專案風險降低，融資銀行信心得以提升，並進一步，得到更為優惠融資條件或減少對股權結構衝擊。進一步而言，如在規模較小且平緩地勢都能具有明顯改善，更遑論於規模擴大或地勢更為複雜時，其帶來之助益則越發顯而易見。

（二）何謂 CFD 與傳統分析模型之差異

CFD分析技術能夠提供更為準確之結果，主要因其能正確地模擬風場周遭地形所產生之紊流和變化，這和傳統模型中採用大量近似值有非常顯著之區別。

並且，透過CFD建立之風場三維模型，

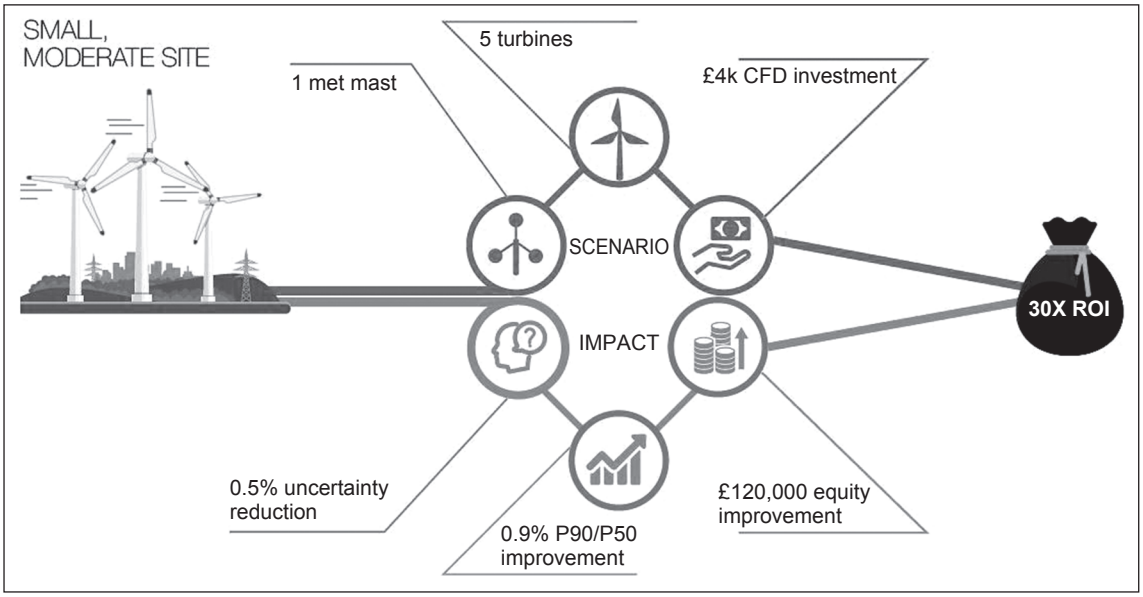


圖 1　利用 CFD 技術執行風能分析能提供顯著效益

能夠全方位地模擬風場周遭細部特性，視覺化模型的呈現方式則有利於專案利害關係人提升對於風能狀況之理解與溝通。

整體而言，CFD在風能預測和分析上優異的準確性能降低專案風險，並藉此提升專案利害關係人對於風場開發更深入的了解而大幅擴大風場開發的商業可行性。

K2 Management丹麥商凱得股份有限公司英國分公司之分析部門之研發總監Joel Manning表示：「只需幾千歐元的CFD分析就可以幫助開發商實現一個風能表現良好且穩定之風場。藉由使用雲端運算科技，我們已經能夠快速建構出一個風場專案的CFD模擬分析，這是在開發前期工作中一件不可或缺之工作項目。我們的預測模型經過多個風場且反覆可靠的驗證，並與實際運轉數據交叉比對，顯示我們所發展的CFD模型準確度非常出色。」

「在風場開發初期能夠越早使用CFD分析，對於專案效益的提升是明顯正向的，因為其不僅能夠運用於前期風資源量測的工作規劃，更能優化風機排列與佈置，進一步降低專案風險。」隨著風場專案的利潤漸為縮減，能儘早在開發前期引進CFD分析技術，無疑將為各利害關係人、開發商、融資銀行等提供更高投資報酬的機會。

三、風資源分析驗證風機性能曲線

日常生活中，在評估購買新車時，車商的油耗數據通常只會當作評估的一項特性，而那些數字往往無法在現實生活中呈現的，因為只有極少數的極理想狀態下才能達成。風機製造商提供之功率曲線也是同樣道理，因為這些數字通常是在平坦、無林蔭干擾之測試場址中測量而來。而如何預測風機表現及虛擬曲線與現實的落差，這就會需要詳盡的風能分析規劃。

全球風力發電專案已經越來越難以找到理想之風機安裝地點，因為許多優良場址早已被使用，或者由於土地租賃條件、電網併聯等問題而不適於開發。意即風機並不一定能達到其所聲稱的發電量，這些型錄上之功率曲線及後續收益估計通常較樂觀。

而要預測風機在特定地點之實際表現，其實非常困難。每個場址的風況會受到各種因素影響；樹木、山坡、陡坡、風向及大氣條件，以及高度，密度和位置所影響。

在分析超過1,000個遍布全球各地的風場場址後，K2 Management觀察到各場址中程度不一的預測誤差，即一般業界存在大約5-10%發電量高估的問題。對於一個50 MW的風場專案，意味每年將短缺13 GWh（百萬度）的發電量。而這個缺口需要透過風機模擬技術的改善，來彌補其上述缺口。

開發商如果想得到更符合現狀之數據表現，且得到更為精準之預測結果，必須將多種因素納入考慮，包括風速、紊流和風切等相關數據。 即使若干風機製造商提供特定場址情況下所產出之功率曲線，這些曲線也僅能反映出在特定條件下的性能，而無法反映實際風場條件下，風機之表現狀況。

如圖2所示，K2 Management藉由結合多

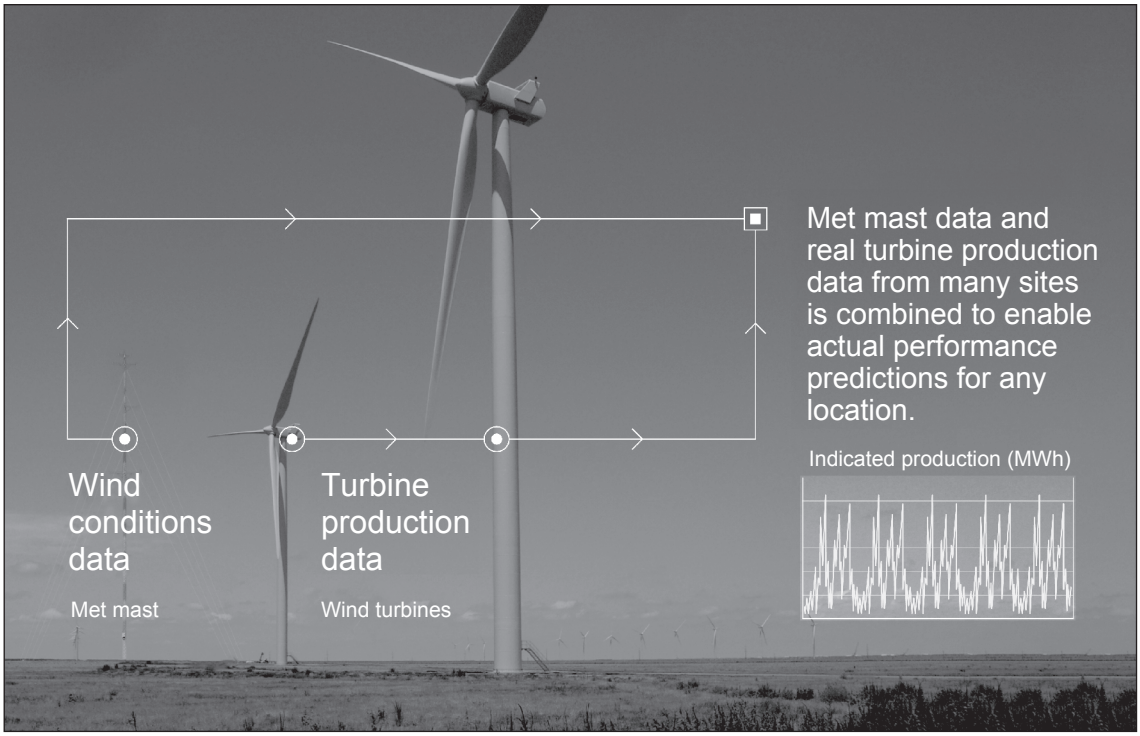


圖 2　預測模型

年實際經驗與優化分析，從風資源測量結果及風機發電數據兩方向同時累積數據並交叉進行比對，且運用空氣動力學理論，建立起一累積全球之大型資料庫之因果關係模型。至今，我們已經蒐集來自全球多個風場專案100多種形式的風機數據，並開發一個通用且準確之預測模型。隨著我們評估的專案項目越多，我們的模型也就越臻於完善。

簡言之，我們將當地風資源測量結果與CFD計算流體力學技術相結合，以了解風力在每個預定風機位置的實際表現。而後再將這些結果導入到我們的預測模型，來預測各個風機位置之發電產量，這比起單純檢視發電機之功率曲線來的更加精準。

對客戶而言，這技術通常能使發電量預估之準確度提升2%左右。而根據具體情況，其實際數據藉此向上或向下微幅調整。

如同一位我們的客戶所言：「在發電量分析上，這個業界就屬K2 Management最為傑出，或許有少數競爭者能夠稍微接近，但他們仍是業界最佳。」

然而風資源量測的數據收集，也會影響後續的分析結果。新型的風速計可顯著降低發電量預測不確定性，有時即便一個細微零件的調整都能引發巨大之變化。所以風力發電機功率曲線之驗證測試將被這項新設備改善。

為符合國際電工協會IEC之標準，風速計的技術已日趨完善，且使用之不確定性亦持續降低。這也代表風場業主在檢查風力發電機功率曲線數據時，可以藉此獲得更準確量測數字。

功率曲線驗證測試的量測，通常包含架設測風塔，並於塔上安裝風速計，接著進行至少3-4個月的觀測以收集風力數據。

然而，要能驗證風中的功率輸出仍相當困難，各種不同的條件皆會影響所收集數據之不確定性，如溫度，濕度和氣壓。因此要提高數據準確性，就需要投入更為巨量之觀測資料。

K2 Management的預測模型中包括16個參數，而在其中，風速計扮演著重要的角色。我們研究結果顯示，若選擇正確之風速計及預測模型，在P50情況下，年發電量預測（Annual Energy Production）的總體不確定性將降低至少15%，其取決於當地平均風速和地形的複雜度。

下圖3為近期我們在亞洲之陸域風電案例，您可以看到，比起現行的舊型風速計，

Average wind speed	Old class anemometer	New class anemometer		
m/s	uncertainty %	uncertainty %	difference % point	difference %
4	15.5	13.1	-2.4	-15.7
5	10.6	8.7	-1.9	-17.6
6	8.0	6.5	-1.5	-18.6
7	6.4	5.2	-1.2	-18.3
8	5.2	4.3	-0.9	-18.1
9	4.5	3.7	-0.8	-17.0
10	3.9	3.3	-0.6	-15.0
11	3.5	2.9	-0.6	-16.1

Source: K2 Management

圖 3　陸域風電案例

新型風速計之不確定性數據顯著較低，在中低風速之地區，這樣的數據差異則更加明顯。

四、風機運維風險

在風資源分析與風機表現藉由各種工具降低不確定性之後，更重要的就是如何確保風場運營之可利用率（Availability），以達到原先預估之發電目標，而對業主來說可用率一直都是一個投資收益的不安定因素。

然而，一個成功的專案取決於最後併網到電網的發電量有多少，而不是風機一年中可以正常運轉多少時間。

即便如此，大部分的風場擁有者都只在乎風機可用率數據，卻沒有對風機實際表現、其他輔助電力設施及電網之間管理給予足夠之重視。試問，如果今天變電站故障的話，這些風機還能有什麼發電能力？

隨著市場面臨躉購費率價格下降，運維指標必須改採與發電量連結之指標，以衡量專案績效。

這些案例包含以下：

1. 發電量或收益的可用率
2. 平均維修時間
3. 平均故障間隔時間
4. 備品到貨的準備時間
5. 遠端維修率
6. 維護成本/MWh

有人可能會覺得，這道理相當顯而易見。但一個所謂好的專案投資計畫需要在價值、成本和風險之間找到完美的平衡，並充分理解其長短期之投資策略目標。

最完美的假設是，再生能源專案的投資者與開發商，都能有效評估專案相關風險。而風險總以各種形式出現：技術故障、場址通行受阻、證照許可問題、紀錄不良承包商和未知的售電價格。大多數時候我們都可以透過紮實的專案管理、合約管理以及技術風險敏感性分析，來進行模擬乃至減緩風險。

然而，個案問題並不能一體適用於其他專案。大部分時候，各國設置條件差異甚大，如地緣政治風險、法律風險、貨幣風險和信用評級等都是影響融資和獲利的關鍵因素。

在為開發商和投資者提供技術服務、財務諮詢和專案管理同時，我們一次次觀察到，若能讓我們在早期即加入專案開發，就能對專案投資報酬率產生重大影響。

尤其是對於選擇個別分包策略、主導專案開發過程的開發商而言，若他們將業務由EPC統包商統一處理，便會失去降低專案工程造價的彈性空間。根據我們在全球1,000多個專案經驗，陸域風電專案會預留的緩衝準備金額，依其設置地點的不同約為1%到6%之間。

（一）風險控管

一般而言，投資者和開發商在選擇專案地點時，首重權衡政治風險，因為一個不穩定的政府，可能會藉由提出政策、法規變動等衝擊再生能源專案。在新興及發展中國

家，其低GDP成長率和匯率波動也可能對投資報酬率產生重大影響。

即便在專案融資中已經建立起多種風險控管或風險對沖之工具，但在某些情況下風險並不一定能夠完全被預測及控制。因此建議投資者和開發商在架構財務模型假設時，應預留一定之緩衝空間。

（二）以分包策略降低預留之緩衝準備金

紐約大學史騰商學院財金教授Aswath Damodaran曾提出，以調整後之信用違約交換計算該國家風險溢酬，而在風險較高的區域，可應用計算再生能源專案所需的股權溢酬。

風險與獲益間之權衡，是現代投資組合理論的簡單觀念。一個違約風險高之國家需要提供高利率來吸引投資者，否則，投資者將轉向債務記錄更為穩定的國家。穩定的國家政策方向可以降低風險，進而降低成本；另一方面，如果公共政策存在不確定性，則投資者需要使用「國家風險溢酬」來平衡。

因此，我們會推薦以分包策略進行專案開發，給予開發商或投資者更多優化和減少準備金比率的空間，而如果最後預留的準備金、各種風險溢酬沒被使用到，則對應而言，其專案之投資報酬率增加。請見下圖4各國家（地區）在風險溢酬和準備金比率的差異比較表。

五、結論

全球的風能累積裝置容量為達到500 GW+歷經了近半世紀，然而從現在起未來10年內，這數字有望進一步達到並超越1,000

The figure below outlines country and equity premiums as well as project specific contingencies.

Country	Moody's sovereign rating	Country risk premium	Equity risk premium	Onshore project risk premium (unknown-unknown)	Total project contingency
United Kingdom	Aa2	0.69%	6.65%	1 to 4%	8.34 to 11.34%
United States	Aaa	0.00%	5.69%	1 to 4%	6.96 to 9.96%
Brazil	Ba2	4.17%	10.13%	2 to 6%	16.3 to 20.27%
Germany	Aaa	0.00%	5.69%	1 to 4%	6.96 to 9.96%
Western Europe	N/A	1.51%	7.47%	1 to 4%	9.98 to 12.98%

Depending on location of your project. total project contingencies can vary from -7 to 20 percent.

Sources: Moody's. NYU Stern and K2 Management

圖 4　風險溢酬和準備金比率於各國家（地區）間之差異

GW。如此之商業規模是從前所無法想像及企及，其孕育新式商業模式、新型態夥伴關係和創新解決方案，為資產擁有者創造更好的商業機會。

隨著技術的提升，風力發電也逐步邁向傳統電力市場的競爭趨勢。在沒有化石燃料的採購風險下，對於風資源的相關分析、CFD分析風機排列下的風場，以不同的採購發包策略及運維指標，可逐步減少市場大幅擴張之下的專案不確定風險，因此對於專案之財務投資提高信心指數。

更甚者是再生能源市場已成為全球化之明星產業，各大技術、金融與能源公司均將本市場列為主要投資標的下，願意投入再生能源市場發展的臺灣公司，絕對要盡早投入，並尋找合適的夥伴與顧問，以專案風險管理心態管理投資，並獲取計畫中之技術與財務報酬。

參考文獻

1. Joel Manning. Improving project financing with CFD – a no brainer. Retrieved from https://www.k2management.com/news/improving-project-financing-with-cfd-a-no-brainer (2019)
2. Joel Manning. Predicting performance: sales power curves vs the real world. Retrieved from https://www.k2management.com/news/sales-power-curves-vs-real-world (2019)
3. Joel Manning. New generation anemometers to significantly reduce yield prediction uncertainty. Retrieved from https://www.k2management.com/news/reducing-yield-prediction-uncertainty (2019)
4. Time-based availability alone gives asset owners false security. Retrieved from https://www.k2management.com/news/false-security-for-asset-owners (2018)
5. Jesper Kranker Larsen. Project risk premiums - one size doesn't fit all. Retrieved from https://www.k2management.com/news/project-risk-premiums (2019)

再生能源系統驗證與專案加值效應

財團法人中國驗船中心企劃處處長 / 張耀方
財團法人中國驗船中心再生能源處處長 / 詹育禔
財團法人中國驗船中心再生能源處 / 楊淳宇

關鍵字：再生能源、第三方驗證、驗證方案、工業標準

摘要

再生能源在現今人類社會能源使用中占據一定比例，且依據目前的趨勢，再生能源的使用會持續增加。

再生能源的發展依賴硬體技術發展、供應鏈的完善以及相應的資金投入等要素，而這些要素都可以藉由相關的驗證活動協助達成。

型式驗證與專案驗證活動藉由工業標準確認設備與專案具備相應的安全性與品質，有助於供應鏈的完善發展；施工期間的驗證或監督活動有助於降低再生能源的施工風險，取得相關保險；盡職調查活動則能協助業者了解專案的風險，提供進行投資決策的參考依據，有助於民間資金的投入，進而促進再生能源的發展。

一、前言

石油危機的發生以及大眾意識到溫室氣體遞增對地球氣候帶來的影響，進而推動減少溫室氣體排放的一系列活動，為太陽能、風能、生質能、海洋能、地熱等各類再生能源發展的主因。

1970年代的兩次石油危機，造成世界各國無不尋求替代能源以確保各國的能源安全，也因此引起包含當今再生能源在內的各種能源技術開發。以丹麥為例，石油危機時該國能源主要仰賴石油進口，因此促成其尋求發展其它替代能源，最後其選擇風力發電作為替代方案，發展至今，丹麥的風力發電已足以支撐該國百分之五十的用電量。

為了限制溫室氣體的遞增，減緩對地球氣候的負面影響，聯合國大會設立之「政府

間氣候變化綱要公約談判委員會」，於1997通過「京都議定書」，針對包括二氧化碳在內之氟氯碳化物等六種溫室氣體，定出具體減量目標，而後更於2015年12月13日通過「巴黎協定」，由187國提出自主減碳承諾以符合現實的需求，進一步促進世界各國推廣與發展再生能源。

雖然世界各國政府礙於國內各自利益考量，難以致力於達成相應目標，甚至直接拒絕簽署或退出相關協議，為再生能源發展帶來不利影響，但民間許多單位仍支持再生能源的發展以達減少溫室氣體排放之目的，如世界氣候組織（Climate Group）與碳揭露專案（CDP）共同提出百分之百再生能源倡議行動（RE 100），要求加入之企業承諾於2050前使用之電力為百分之百的再生能源，企圖以民間的力量帶動全世界電能來源轉往再生能源發展，減少溫室氣體排放，更直接帶動再生能源的發展。目前全世界已有超過200家企業加入RE 100，涵蓋科技、資訊、汽車、銀行、保險…等各方面領域的企業，其中不乏世界知名企業，如蘋果公司（Apple Inc.）、谷歌（google）、微軟（Microsoft）、3M、swiss Re、荷蘭國際集團（ING）…等等。

目前再生能源發展以太陽能與風能發展最為迅速，除發電設備本身的技術成熟外，在政策、法規、工業標準、驗證、供應鏈與商業模式等各方面亦發展得相當成熟，相關經驗可為其它類型的再生能源發展帶來良好的示範效益。其中再生能源系統驗證已成為再生能源發展與商業化中不可或缺的一環，相關驗證活動除了確認工程技術符合相關法規與工業標準，降低工程風險外，可提高各界對於再生能源開發的信心，有助於再生能源開發案獲得各界的支持及所需的資金，為再生能源發展帶來正面的影響。

二、再生能源發展概況

目前再生能源發展在世界各國政府與民間的共同努力下已初具規模，相應的裝置容量與發電量占比逐年上升，如圖1所示，至2018年再生能源裝置容量與發電量佔比分別為21.0%與12.9%，甚至於2018年元旦當天德國全國用電百分之百來自再生能源，顯示再生能源具備提供全世界一定比例用電量的潛力。近十年來的再生能源發展如圖2所示，裝置容量以太陽光電（Solar PV）增加最多，達633 GW，其次為裝置容量增加487 GW的風能（陸域及離岸），第三則為裝置容量增加62 GW之生質能與廢棄物（Biomass & Waste）。

台灣對於再生能源的關注相當早，在1965年與1987年分別於澎湖後寮、七美等地設立試驗風場，於2000年在澎湖中屯設立台灣第一座商業風力電廠，裝置容量共計4.8 MW，由8座600 kW風力機組成[2]。太陽能發電部分則在1997年於樹林設置第一套市電併聯之太陽光電系統[3]。生質能部分，於1997年於新北市八里設置汙水處理沼氣發電廠[4]，且在1990-1995年期間政府輔導養豬戶設置沼氣發電[5]。地熱部分，在宜蘭清水於1977年進行實驗性質地熱發電試車運轉發電，之後於1980年興建一3 MW之地熱發電廠並於同年開始營運[6]。依據台電揭露的資訊，台灣目前的再生能源發展以太陽能、風能為主。

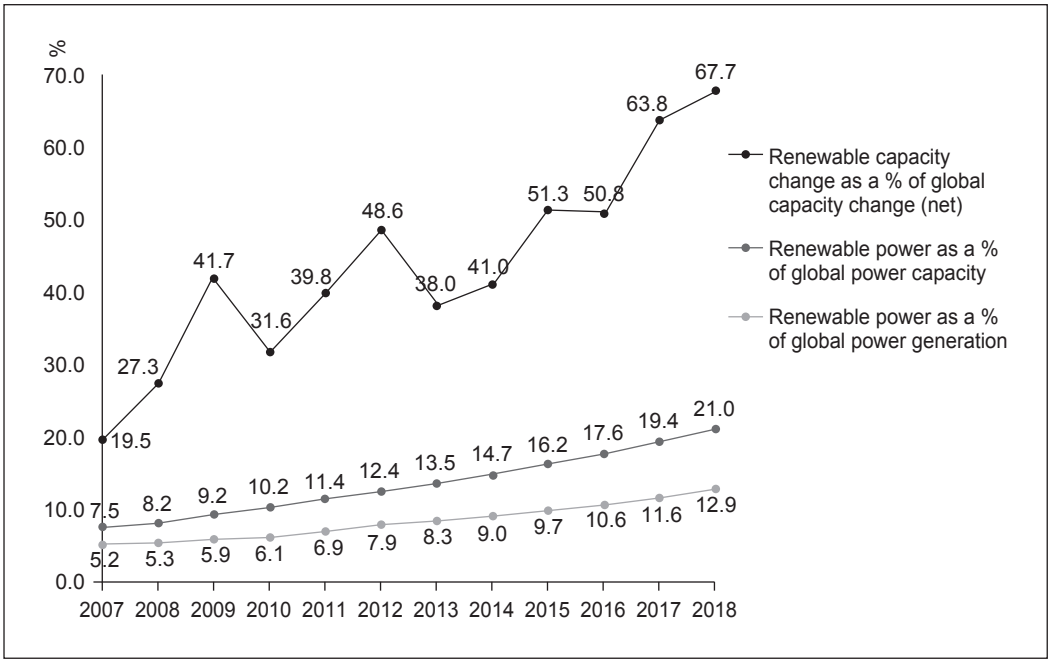


圖 1　2007-2018 年世界再生能源開發統計結果 [1]

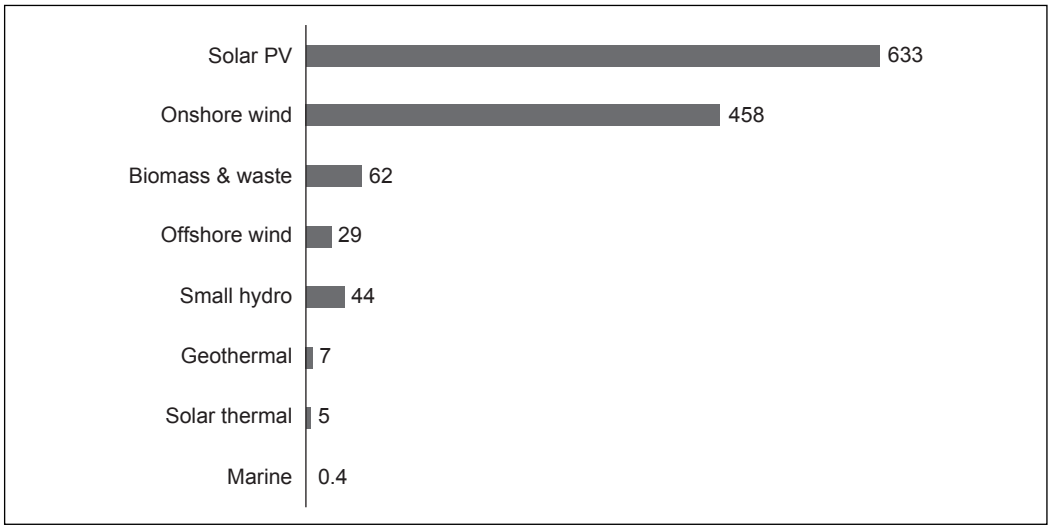


圖 2　2010-2019 年不同類型再生能源新增裝置容量統計結果 [1]

三、再生能源系統驗證與價值

太陽能與風能為目前世界上發展較為成熟且廣泛的再生能源，在發展過程中，為了確認相關再生能源系統的安全性及可行性以說服政府機構、銀行保險業者以及相關投資

者認同並投入相應的資源，第三方驗證活動相應而生。就嚴格的定義而言，驗證活動一般指型式驗證與專案驗證，但若從第三方單位執行相關審查評估工作的角度而言，則包含建造過程中的驗證監督以及業者於融資或投資期間對再生能源專案進行的盡職調查等活動在內。

以離岸風電為例，銀行或企業在融資或投資前，為確認整個再生能源專案於商業上的可行性與風險而要求進行的盡職調查（Due Diligence）、保險單位為確認相關風險而要求在設備安裝過程中進行海事保證鑑定（Marine Warranty Survey）以及相關政府單位或投資者為確認設備與系統的安全性而進行型式驗證（Type Certificate）與專案驗證（Project Certificate）等均屬於第三方驗證活動。

（一）盡職調查

離岸風電開發需要龐大的資金投入，且回收期較長，因此目前許多離岸風場開發採取專案融資方式獲取所需資金，此方式與傳統擔保融資主要差異在於專案融資的擔保品為專案本身，還款能力來自於專案本身所帶來的收益，因此融資銀行需要第三方單位依據所有與專案有關之合約、文件、計畫書等資訊，對包含專案關係人、時程、成本預算、發電量評估、購電同意書、相關合約條款、建造計畫、運維計畫、專案管理、環安衛計畫、法令政策、相關執照核可函取得、公司與專案財務模型…等等分技術、法律、保險與財務等面向進行系統性的審查評估，辨識其中的風險與風險承擔者，建議可能的緩解方式，以作為銀行進行核貸放款的決策參考依據。

其它類型的再生能源開發都需要相當的資金投入，在發展初期或許可能透過政府機構提供資金方面的支持以進行試驗性或示範性的開發，但若要發展成熟並形成商業規模，則需要民間的資金投入，而盡職調查活動能夠協助融資或投資業者釐清專案相關風險，作為投資者做決策時的參考依據，有助於提升民間企業或銀行的投資意願。

（二）海事保證鑑定

離岸風場開發需面對海上高風險的工作環境，即便是現今世界各地頻繁執行的海事工程仍舊存在操作失當之損傷。如2015年4月，Typhoon Offshore平台為執行墨西哥國家石油公司Pemex進行離岸油井管維護作業時，平台定位後執行頂昇時因其中一支樁腳故障導致平台傾斜，並造成兩名工人死亡，數十人受傷及平台內油櫃漏油影響海洋環境[8]。因此離岸風場運輸安裝等海上作業時會透過保險轉移意外狀況發生時須面臨之損失賠償議題，然而海上作業非等同陸域工程，未經完整安全訓練之人員將不允許出海作業，且相關行前與現場風險監管機制有一定技術門檻，為此歐美等海事工程發達之國家會藉由海事保證鑑定（Marine Warranty Survey, MWS）進行風險控管，並做為保險理賠與否之依據。

海事保證鑑定[9]係指透過第三方單位針對保險（再保）單位與被保險單位約定好的保險內容，確認海事操作業者執行或不執

行某項業務，或滿足某些特定項目，或者確認或否定某些特定狀態的事實。換句話說，海事保證鑑定為第三方單位協助保險業者確認相關海事工程作業的執行符合所約定的保險要求，確保相關風險，有助於降低海上作業的風險。實際執行時，第三方單位會先確認所需執行的監督範疇，接著則如圖3所示之流程，針對業主及海事操作業者所遞交之工作計畫進行評估審核，接著於現場開始作業前，進行所有重要船機之性能現場查驗工作，確保現場船機能力得以符合第一階段之評估審核結果，最後會根據現場施工準備與氣象預報之判斷，於現場階段性給予海事操作業者得以開始作業證明之核准證書

圖 3　海事保證鑑定執行流程示意圖

（Certificate of Approval, CoA），該文件可視為保險（再保）業者承認履行保險合約之重要依據。

海上作業需要保險轉移相關風險，因此對於需要海上進行作業的海洋能發展，如洋流發電等再生能源而言，海事保證鑑定成為不可少之驗證活動，同時藉此可降低相關海事工程作業的風險。實際上除了海上作業需要執行海事保證鑑定此一驗證活動外，其他陸上運輸、安裝等作業也會需要第三方單位進行驗證或監督工作，如運輸水力或地熱發電等發電設備時，由於設備體積較為龐大且單價高，同樣有驗證監督之需求，又某些陸上安裝作業難度較高，如地熱發電的相關管道鑽探與埋設，同樣會有相關的驗證活動需求。

（三）型式驗證與專案驗證

風電廠的相關設備如同一般工業產品，會進行型式驗證以確認設計、製造符合相關工業標準，確保產品的安全性與品質，尤其是發電主體-風力機更是必須進行相應的型式驗證。

此外，由於開發風場需要考量的環境參數甚多，不同風場彼此間的環境條件差異甚大，針對各個風場條件進行風力機設計將不符合成本效益，故業界統計不同風場的風速與紊流等風況條件，並依統計結果區分為數個等級（參考表1），風力機製造商再依此決定風力機設計參數。這表示目前市面上絕大多數的風力機產品並非針對各個風場本身的環境條件而設計，因此在開發風場時需要確

表 1　風力機等級 [10]

風力機等級		I	II	III	S
V_{avg}	m/s	10	8.5	7.5	設計者定義
V_{ref}	m/s	50	42.5	37.5	
	$V_{ref,T}$	57			
I_{ref}	A^+	0.18			
	A	0.16			
	B	0.14			
	C	0.12			

V_{avg}：年平均風速
V_{ref}：10 分鐘平均參考風速
$V_{ref,T}$：颱風地區之 10 分鐘平均參考風速
I_{ref}：參考紊流強度

認風力機與相關設備適合在特定風場的環境條件下正常運作，相關的確認作業可透過第三方單位執行專案驗證的方式進行。

型式驗證與專案驗證執行時，一般依據國際電工委員會（International Electrotechnical Commission, IEC）第88技術委員會（TC88）制定的風能標準IEC 61400-22[1]或IECRE-OD-501、IECRE-OD-502或相應標準規範的內容，配合政府規定，與各方約定之指南、標準或工業準則等進行審查。

依據IEC61400-22或IECRE-OD-501與IECRE-OD-502等驗證方案之規範，離岸風場技術的相關驗證可分為原型驗證（Prototype Certification）、零組件驗證（Component Certification）、型式驗證以及專案驗證，前三者主要針對風力機與其零組件的設計、測試與製造，而專案驗證則是考量整體風場。

原型驗證主要對設計基準（Design Basis）、原型機測試計畫（Prototype Test Plan）及安全與功能測試等項目進行評估。零組件驗證主要對設計基準、設計、測試與製造等項目進行評估。型式驗證對設計基準、設計、製造、型式測試與型式特性量測等項目評估後，經最終評估通過後即發給該型風力機型式驗證證書，相關流程如圖4所示。專案

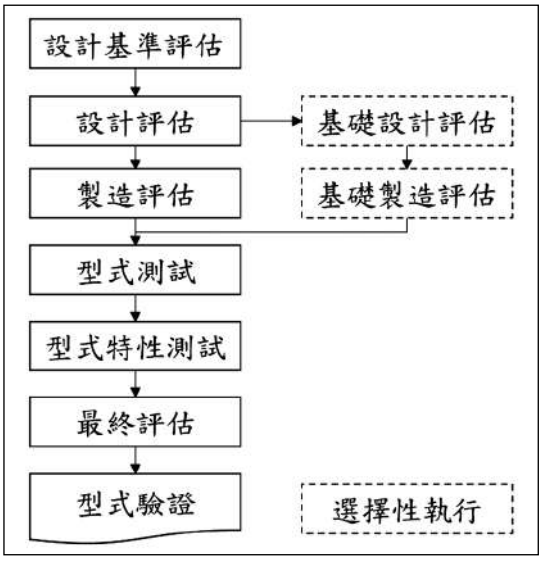


圖 4　型式驗證流程示意圖 [11]

[1] IEC61400-22 已於 2018.08 終止，並由 IECRE-OD-501 與 ICRE-OD-502 代替，兩者間差異不大，目前仍有許多形式驗證或專案驗證採用 IEC 61400-22 的驗證方案。

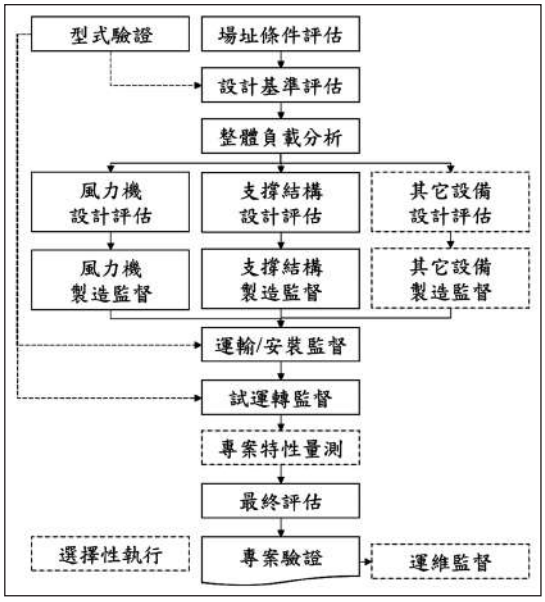


圖 5　專案驗證流程示意圖 [12]

驗證則對場址條件、設計基準、整體負載、風力機與支撐結構及其它相關設備之設計與製造、運輸安裝、及試運轉等項目進行評估或監督，經最終評估通過後即發給專案驗證證書，相關流程如圖5所示。

開發商開發風場時除了商業考量而執行專案驗證以降低風場的安全風險外，部分國家（如表2所示）已將專案驗證視為開發離岸風場之必要條件，此時離岸風場之設計、建造及營運將由當地政府授權或認可之第三方驗證單位執行、確認並出具報告與證書，藉此掌握該離岸風場之品質與安全。

上述所指之授權或認可之第三方驗證單位係指經國際認證論壇（International Accreditation Forum, IAF）所承認之認證（Accreditation）單位稽核後取得ISO/IEC 17065之驗證資格，且政府接受其驗證與發證能力之單位。

表 2　要求執行離岸風場專案驗證範例國

國家	要點
德國	• 明定離岸風場檢驗範圍與流程。 • 授權第三方驗證機構[2]執行。 • 重要開發節點驗船師(surveyor)應參與。
丹麥	• 風場專案驗證強致適用性[3]。 • 專案驗證要求項目。 • 風場開發商應取得第三方機構專案驗證證書並維持有效性。
美國	• 外大陸棚進行再生能源生產時之審核規範及章程。 • 風場開發商需藉由認可審核單位（CVA, Certified Verification Agent）確認風場設施的設計與建造工作。

型式驗證與專案驗證除了能夠確認風場與相關設備的安全性與品質外，對於風電相關產業的發展也有著不可忽略的幫助。專案驗證的相關驗證結果可作為盡職調查評估風場專案工程安全性與可靠性的佐證，降低投資者的疑慮，有助開發專案的融資取得。型式驗證活動則確認風場中的相關設備的設計、製造與品質管理系統等依循相應的標準要求，使製造商生產的相關設備具有一定的品質水準，有助於風電產業完善供應鏈的發展，使得開發商開發或營運風場時能取得適當且具有一致且一定品質要求的產品。

實際上不僅是風電產業，其它型式的再生能源系統同樣會需要型式驗證及專案驗證

[2] BSH 所授權之第三方驗證單位包含：DNV-GL, TUV Sud, TUV Rheinland, BV, DEWI-OCC 等。

[3] 離岸風場之風力機轉子掃掠面積超過 200 m^2 時適用之。

對該再生能源的設備與系統，依據相關規範與工業標準確認設備品質與系統安全性，藉以促進產業供應鏈的發展，進而吸引資金投入再生能源開發。

四、結論

再生能源的發展除了仰賴硬體技術的發展之外，供應鏈的完善、政策與大眾的支持以及相應的資金投入都是不可或缺的要素，而在其發展過程中，相關的驗證活動扮演著不可或缺的角色，對再生能源發展所帶來助益如下：

1. 型式驗證與專案驗證藉由相應標準與法規確認相關設備與專案系統在設計、製造、安裝、運維等各方面的安全性與品質，

2. 型式驗證透過工業標準要求設計生產的設備符合相應的品質與要求，進而完善產業供應鏈發展。

3. 再生能源開發施工期間配合保險或法規需求而進行的驗證監督活動（如海事保證鑑定）可確認施工的過程與方法符合設計要求與法令規定，確保再生能源系統建造期間的施工安全，降低事故風險。

4. 盡職調查為影響再生能源資金投入的重要活動，協助業者瞭解專案的實際風險狀況，作為決策時的參考依據，有助於提升民間企業或銀行的投資意願，進而促進再生能源的發展。

由上述可知驗證活動對於促進再生能源發展的重要性，加上對於我國政府所提出2025年再生能源佔我國發電容量達20%的政策目標，更是必須加以重視以及發展相關技術，以促進國內的再生能源發展。

參考文獻

1. UN Environment's Economy Division, Frankfurt School-UNEP Collaborating Center for Climate and Sustainable Energy Finance and BoolmbergNEF, Global Trends in Renewable Energy Investment, 2019.
2. 朱瑞墉，「澎湖的離島發電廠」，源雜誌，76 期，12-17 頁，98 年 7 月
3. 朱瑞墉，「細說太陽能發電」，源雜誌、70 期，4-11 頁，97 年 5 月
4. 張秀美，「台灣綠色電能發展的歷程與探討」，華南大學社會學研究所網路社會學通訊期刊，105 期，101 年 6 月
5. 郭猛德、陳志成、程梅萍與蘇進興等，「沼氣發電系統發展概況」，中技社通訊、100 期，12-17 頁，101 年 4 月
6. 朱瑞墉，「地熱發電」，源雜誌、71 期，6-13 頁，97 年 11 月
7. 林基興，「比較各種發電的利弊得失」，源雜誌、116 期，82-85 頁，105 年 11 月
8. NEAGU IONUȚ DRAGOȘ, "Risk Control - Marine Warranty Survey", Journal of Engineering Studies and Research, Vol. 18, No. 2, pp. 66-76, 2012.
9. NEAGU IONUȚ DRAGOȘ, "Risk Control - Marine Warranty Survey", Journal of Engineering Studies and Research, Vol. 18, No. 2, 2012, P.66-76.
10. IEC TC-88, "IEC61400-1 Wind Energy Generation System-Part 1: Design Requirements ed. 4 2019," International Electrotechnical Commission, 2019. 02.
11. IECRE, "IECRE-OD-501 ed. 2.0 Type and Component Certification Scheme," International Electrotechnical Commission, 2018.05.24.
12. IECRE, "IECRE-OD-502 ed. 1.0 Project Certification Scheme," International Electrotechnical Commission, 2018. 10. 11.

離島智慧電網案例報導

義守大學講座教授 / 陳朝順
健格科技股份有限公司董事長 / 李坤鍾
健格科技股份有限公司副總經理 / 林志慶
南臺科技大學教授 / 許振廷
高雄科技大學教授 / 林嘉宏
高雄科技大學副教授 / 辜德典

關鍵字：智慧電網、智慧變流器、能源管理系統、專家系統控制決策、綠能發電平滑化、削峰填谷

緒論

離島智慧電網主要目標在於導入綠能高佔比並提升獨立電網之穩定運力，但由於風力與太陽光電受到風速與日照度等氣候環境因素的影響，其發電變化相較不穩定，此外離島電力系統規模較小，其轉動慣量相對較低，當再生能源佔比逐漸增加時，其間歇性發電特性將對離島電力系統造成極大的衝擊，導致系統頻率及電壓變動過大，甚至可能影響柴油發電機組的運轉安全，如果離島系統規劃調度不當，更容易造成發電機組跳脫而造成全島大停電事故[1]。

國內澎湖、金門、馬祖、七美、望安、綠島等離島獨立電力系統，目前皆以柴油發電機組為主要供電來源，除了會增加二氧化碳排放外，由於燃油昂貴，更造成台電嚴重的營業虧損。因此必須根據離島再生能源發電潛力與系統運轉條件限制，規劃最佳化再生能源發電配比，同時考慮綠能發電變動及可能的系統大型擾動，建置適當容量與具備先進控制功能的儲能系統，強化柴油發電機穩定運轉能力，並進一步提升離島再生能源滲透率。

目前一般離島或偏鄉微電網為降低發電成本而導入大量再生能源，但必須應用綠能發電系統之輔助服務功能，於系統正常運轉時，藉由最大功率追縱控制（MPPT）以充份利用太陽光電及風能，並能配合電力系統運轉需求，執行虛功與實功輸出之即時調控輔助服務功能，而提升再生能源發電系統之可控性，並利用儲能系統於白天將多餘太陽光電加以儲存，於晚上尖峰用電時段放電而達到削峰填谷之目的。針對綠能發電因天候突

然變化造成發電量之突升或突降，由於柴油發電機配合升降載能力不足，造成系統電壓頻率供電品質劣化及柴油發電機安全運轉，藉由儲能系統之慢充慢放而維持綠能發電之平滑化功能，將可改善柴油發電機之運轉效能與安全。

當電力系統發生發電機或大型綠能發電系統故障跳脫時，則必須考慮在線運轉發電機組、儲能系統及綠能系統之響應能力，藉由專家系統快速決定儲能系統低頻觸發之放電功率，甚至須導入反應型需量反應，以確保離島電網在大型擾動後，系統具備足夠自我恢復能力（resiliency）而能維持系統電壓及頻率之穩定。

在台電公司全力配合協助下，科技部能源國家型計畫已成功建置七美離島綠能高佔比智慧電網示範系統[2]，其中包括大型太陽光電系統及儲能系統，並導入PV智慧變流器及開發儲能系統控制器與輔助服務調控功能，研發綠能高佔比獨立電網先進整合控制技術，並配合台電完成智慧電網應用功能之測試與驗証[3, 4]。

二、七美島電力系統架構 [3]

澎湖七美島人口3千人，土地面積6.9平方公里，全年用電量約800萬度，圖1為七美電力系統架構圖，七美電廠共有4部1,000 kW柴油發電機，產生電力並升壓為3.2 kV後供

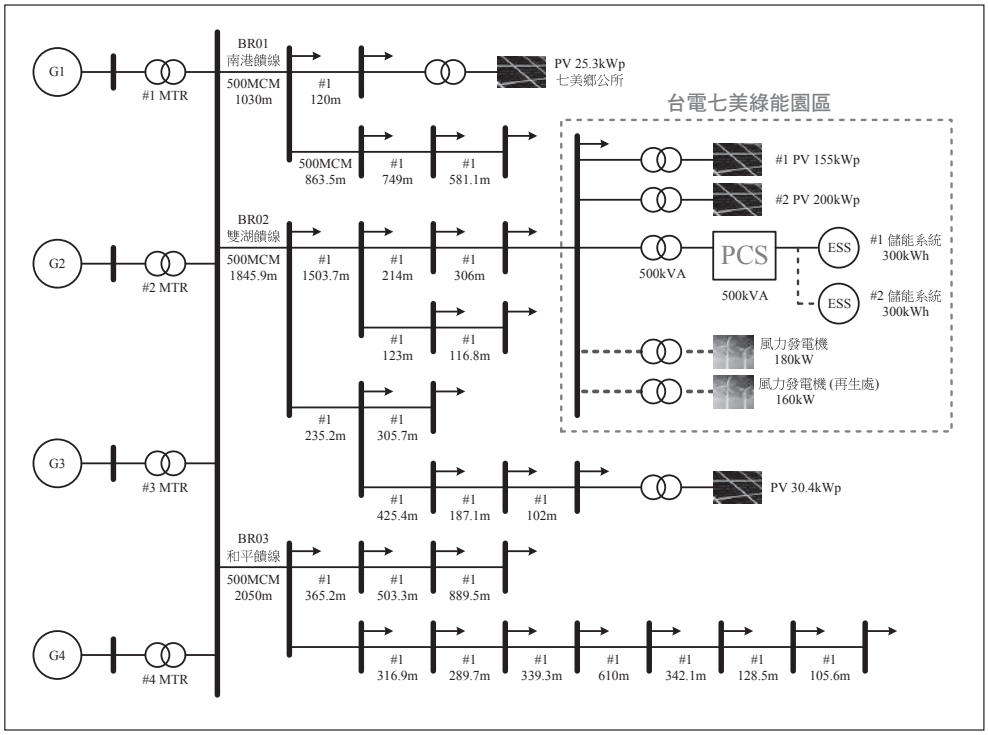


圖 1　七美島電力系統架構

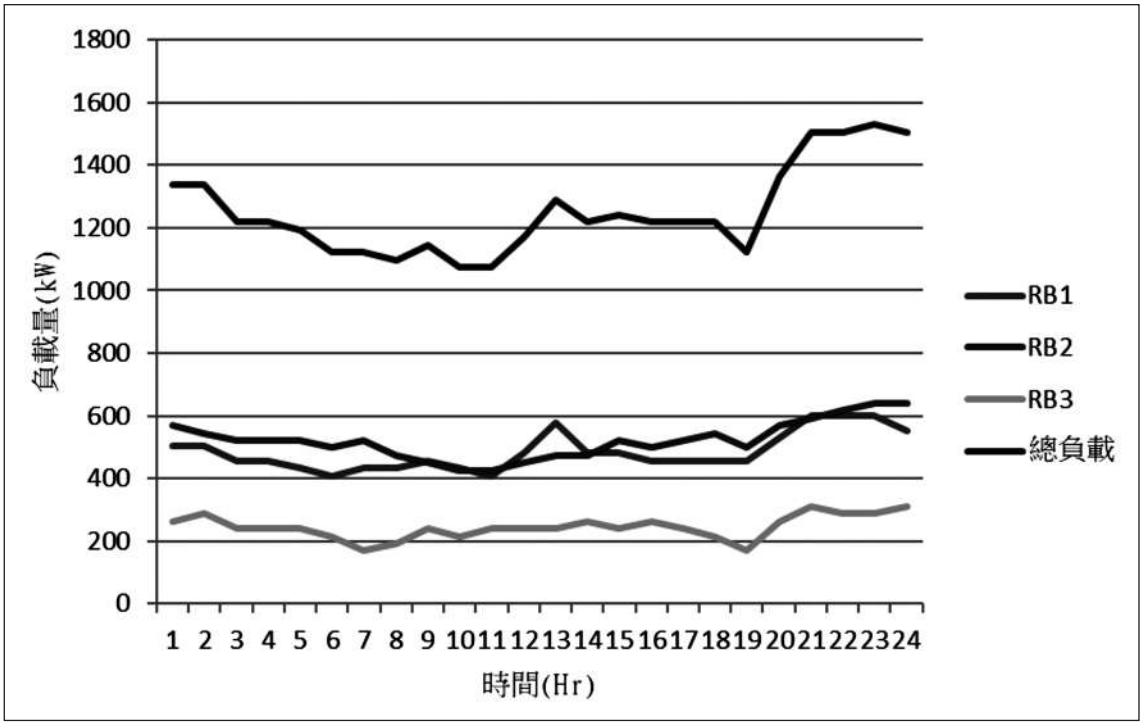


圖 2　七美島夏季日負載曲線圖

電給配電網，由於使用輕柴油發電，每度發電成本高達13元，導致台電每年營運損失超過1億元。圖2為七美島及三條饋線供電量之夏季日負載曲線，晚上8 pm尖峰用電達1,520 kW，離峰用電則約1,100 kW，冬季系統用電量為700 kW與1,100 kW之間。輕載時段運轉一部發電機，當負載量超過800 kW時，則啟動兩部發電機。為降低七美島發電成本，於七美綠能園區建置355 kW太陽光電系統，全部採用具備自主調控機制之智慧變流器，當併接點電壓超過1.05 pu時智慧變流器會自動調整功因而吸收虛功以降低電壓，當功因已調降至0.9且電壓超過1.09 pu時，則採自動降載以避免變流器因過電壓保護而跳脫。另外PV變流器亦具備過頻降載功能，當頻率超過設定值60.4 Hz時，每超過1 Hz則調降PV系統發電量40%，圖3為變流器過頻降載於七美實測結果。為避免綠能併網對七美電力系統之衝擊，並提升系統自我防禦能力，科技部分二期建置儲能系統，#1儲能系統可同時支援快速放電與慢速放電功能，其最大功率輸出限制在300 kW（1C），#2儲能系統則採慢充慢放模式運轉，藉由D/D限制其最大放電功率為180 kW（0.6C）。此二套儲能系統共用一套容量為500 kW之PCS與電網併聯作交直流功率轉換，其容量可達500 kW。本文則研發PCS控制器，內建低頻快速放電以強化系統暫態穩定度，並配合系統淨負載曲線，作儲能系統慢充慢放功能，達成削峰填谷與綠能發電平滑化功能。

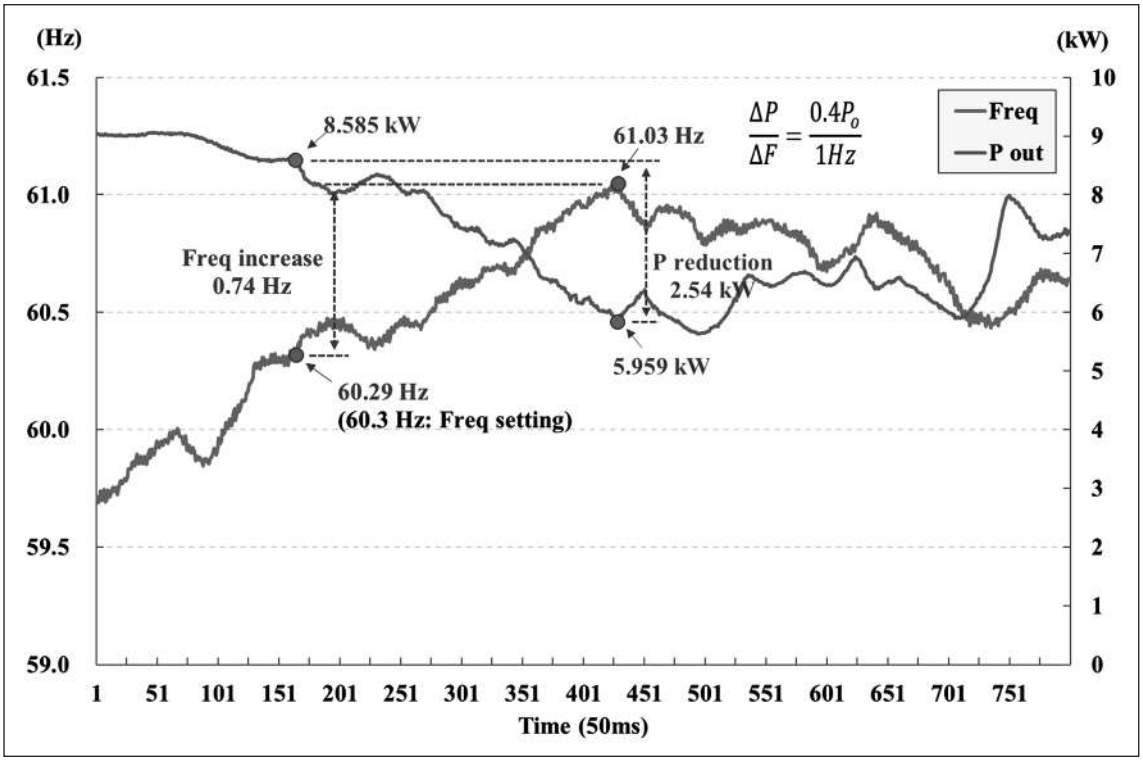


圖 3　智慧變流器過頻降載測試

三、七美能源管理系統（EMS）[5-8]

為強化七美電力系統運轉能力及維持良好之供電品質，本研究團隊於七美電廠內建置一套離島智慧電網主站系統。除收集柴油發電機運轉資料與饋線供電量，並可透過光纖通訊網路與台電綠能園區連線，收集PV案場及儲能系統之運轉資訊，同時可配合系統運轉情境，執行各種應用功能及調控決策之推導並下載至PV案場智慧變流器及儲能系統PCS控制器。另外根據系統負載量及綠能發電量預測值所產生之系統淨負載曲線，決定每小時之儲能系統儲存電能量（SOC）與對應之充電量與放電量，達成削峰填谷以提升系統負載因數及經濟調度而降低柴油發電機之發電成本。

七美能源管理系統整體架構圖如圖4所示，其中七美發電廠之柴油發電機、PV系統與儲能系統，則透過光纖通訊環路與EMS主站連線，以執行SCADA及系統應用控制功能。主站系統包括工作站及資料伺服器主機，柴油發電機及配電饋線之電力參數則藉由DTU端末單元加以收集，並以Ethernet網路回報EMS主站儲存於資料庫。七美台電綠能園區之太陽光電、風力發電及儲能系統之運轉狀態，亦回報給EMS控制主站，EMS控制主站內建各種系統調度運算軟體，可根據電網架構、負載及綠能發電系統運轉狀態之變化，推導系統控制決策，支援發電機負載頻

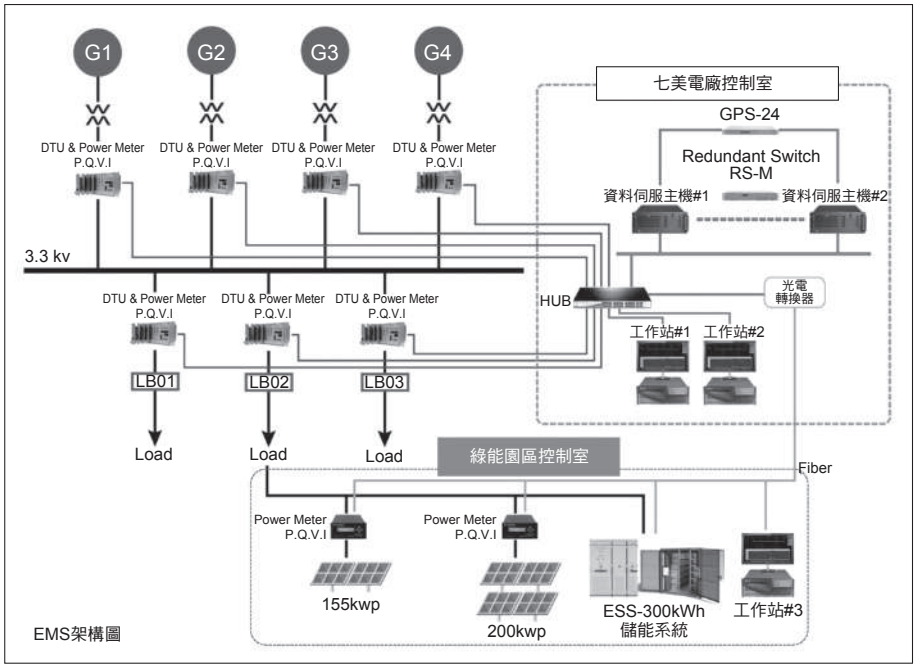


圖 4　七美能源管理系統（EMS）架構圖

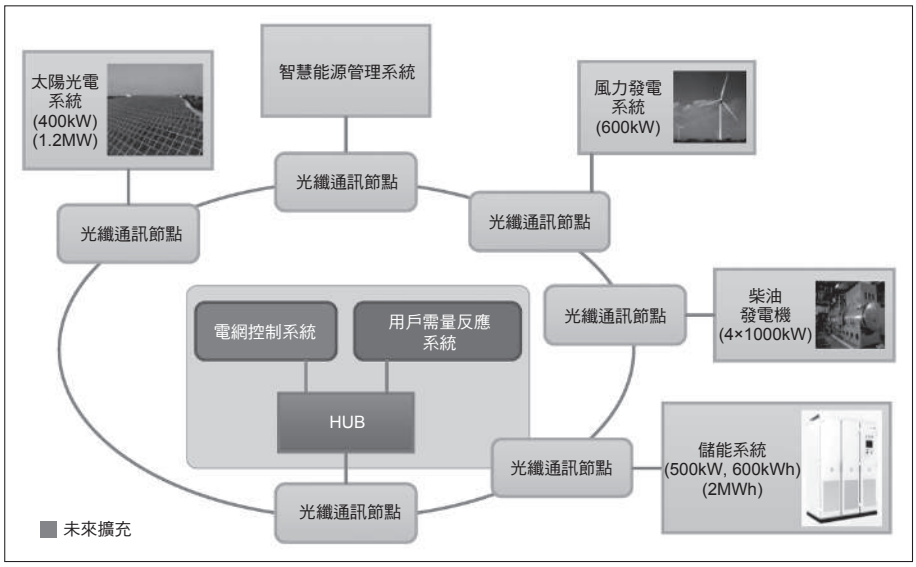


圖 5　七美電網光纖通訊系統架構圖

率控制（LFC）、儲能系統充放電控制與綠能智慧變流器之功因與實功調控。圖5為EMS系統光纖通訊系統架構圖，EMS主站藉由光纖環路與主要電力系統元件之資料端末單元

（DTU）作連結。

EMS控制主站執行應用軟體、資料儲存、編輯及其他各種介面軟體，電力系統、綠能發電與柴油發電機整合調度控制，另外EMS系統支援儲能系統最佳化充放電應用功能，並配合綠能發電運轉之情境，執行綠能發電平穩化，系統頻率穩定控制、經濟調度控制、儲能系統最佳充放電控制、綠能發電輔助服務控制及因應大型擾動之特殊防禦系統，以確保綠能充份應用及提升離島供電品質。圖6所示為EMS系統所顯示之系統運轉電腦畫面。

四、七美電網暫態穩定度分析 [9]

離島電網因規模及慣量相對較小，大型事故擾動如發電機、PV案場跳脫或線路故障，容易造成系統頻率快速下降全島大停電。本文利用柴油發電機與調器及激磁控制系統等效數學模型，並考慮儲能系統反應速度與控制系統，執行七美電力系統暫態穩定度分析，以推導最佳化系統整合系統控制策略。

（一）柴油發電機控制系統模型參數

七美發電系統主要由七美電廠四部柴油引擎發電機並聯發電所組成，發電機之激磁系統與調速系統數學模型分別如圖7與圖8所示，其中調速機型式為Woodward UG10與UG8。由於雙湖饋線RB02在裝設355 kWp太陽光電系統後，有時會發生逆送電力的現象，但考慮系統日負載曲線，柴油發電機組之電力輸出仍可維持在最低發電量限制值以上。

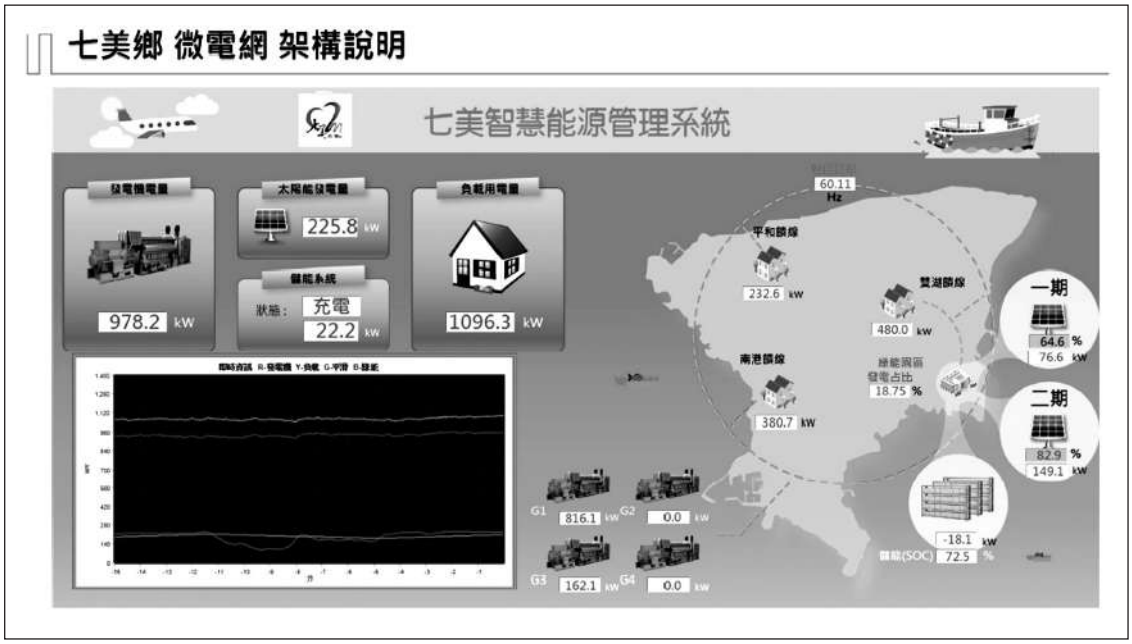


圖 6　七美微電網 EMS 監控系統

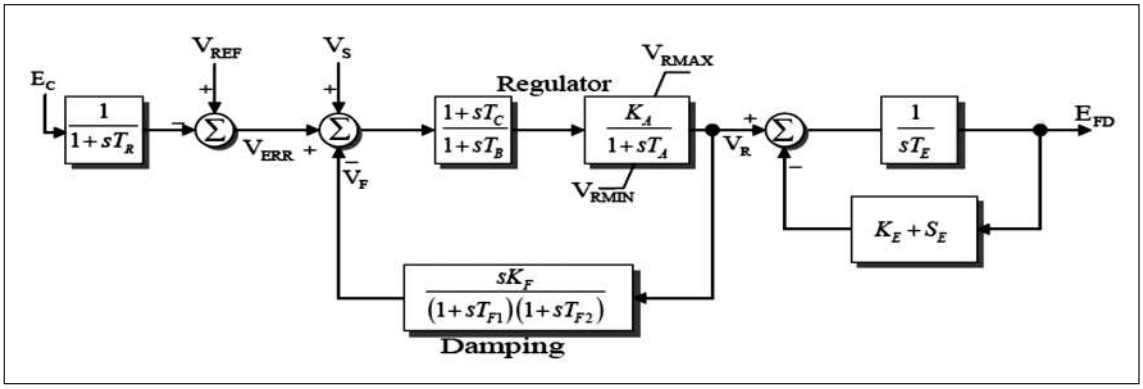


圖 7　激磁機控制模型圖

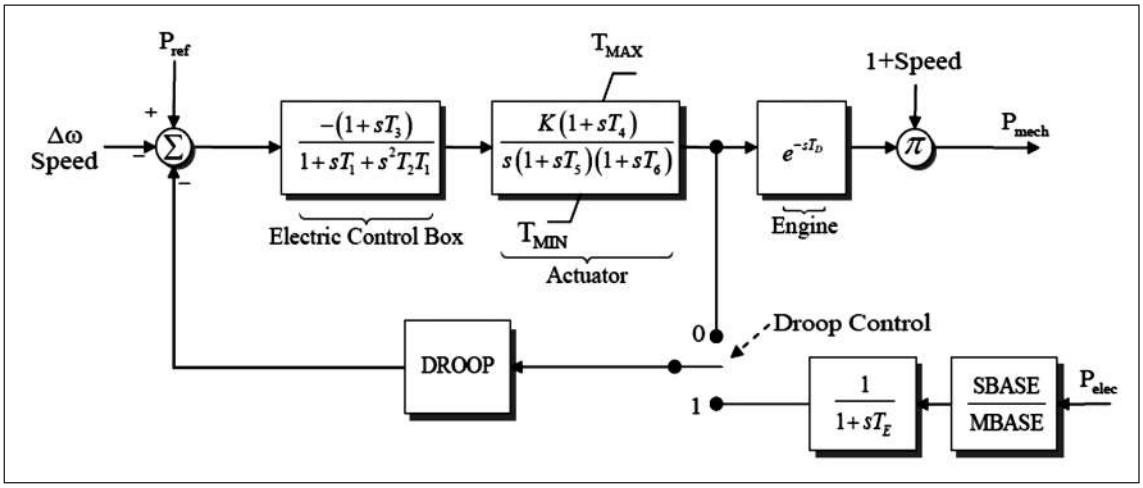


圖 8　調速機（Droop）控制模型圖

（二）七美儲能系統（BESS）及控制系統參數。

儲能系統由於利用電力電子為基礎之PCS作為電池充放電模式與功率輸出之控制，相較於傳統旋轉發電機藉由負載頻率控制（LFC），儲能系統執行實功與虛功之調控[10-15]。七美儲能系統分兩期建置，第一期BESS（300 kWh）兼作慢充慢放及快速放電控制，而第二期BESS（300 kWh）則採慢充慢放控制，此種混合式架構除滿足最大放電功率需求外，亦能延長電池之使用壽命。七美儲能系統之控制方塊圖與參數分別如圖9與表1所示。儲能系統使用兩個控制模式，分別為頻率控制與定功率控制，定功率控制主要執行儲能系統慢充慢放功能，達成綠能

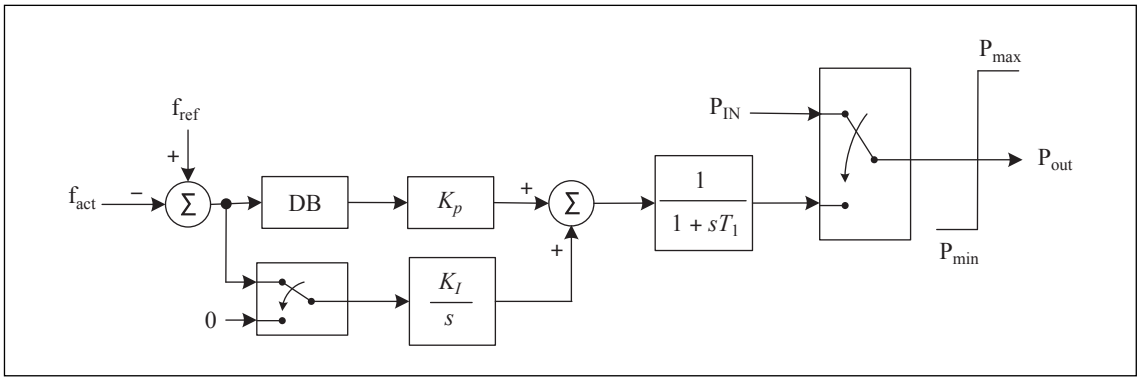


圖 9　儲能系統控制方塊圖

表 1　參數電池儲能系統控制模型參數設定值

（sec）	0.065
K_P	100
K_I	15
P_{min}（pu）	-1
P_{max}（pu）	1
Δf_{min}（pu）	0.992
Δf_{max}（pu）	1.003

平滑化及系統淨負載曲線之削峰填谷而提升系統負載因數化。頻率控制主要執行儲能系統低頻觸發緊急放電功能，以維持電力系統在大型擾動後回復穩定運轉之能力，於頻率控制模式中設定系統頻率變化Dead-Band，當系統頻率在59.5 Hz與60.2 Hz之間變動時，BESS將不執行輸出功率之調控，以延長電池使用壽命，並藉由PI控制器確保系統在進入穩態時可以達到頻率零穩態誤差。

為驗證柴油發電機的數學模型和BESS的充放電控制響應，本文進行七美儲能系統充放電現場測試，藉由改變BESS充放電模式，量測系統頻率變化，並應用柴油發電機模型，調整控制系統參數，確保模擬結果和七美電網在上述擾動時之系統頻率一致。圖10顯示儲能系統於0.5秒時從原先60 kW放電切換成60 kW充電模式，隨著BESS功率輸出突然變化120 kW，系統頻率快速降低，並在1.0秒降至最低值59.1 Hz，BESS從放電到充電的轉換過程僅需要0.2秒，其輸出功率響應遠較一般旋轉發電機更為快速，因此儲能系統之實功調控對於離島電網之穩定運轉極為重要。本文同時為利用七美柴油發電機參數及控制方塊圖，進行電腦模擬與實測之系統頻率響應作比較，充份分析儲能系統充放電模式變化所造成之系統頻率並驗証柴油發電機參數之準確性。

五、PV 系統故障跳脫之系統暫態分析

本文考慮七美電力系統在夏季尖峰時段有兩部柴油發電機投入運轉且應用儲能系統作緊急放電控制，探討PV系統突然故障之系統暫態穩定度分析，以檢視綠能系統跳脫對七美電力系統之衝擊。故障發生前系統負載

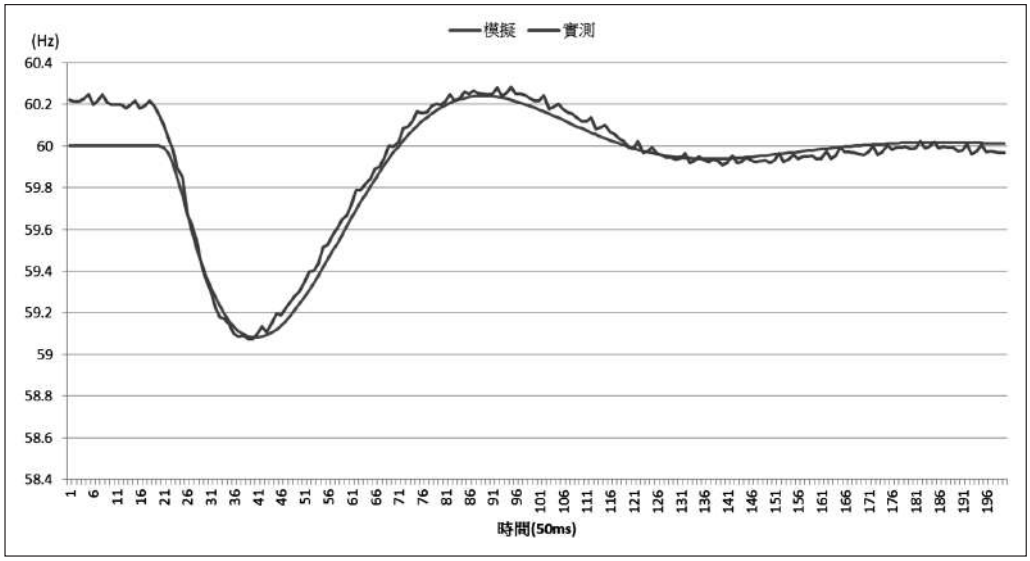


圖 10　儲能系統之充放電響應模擬對照圖

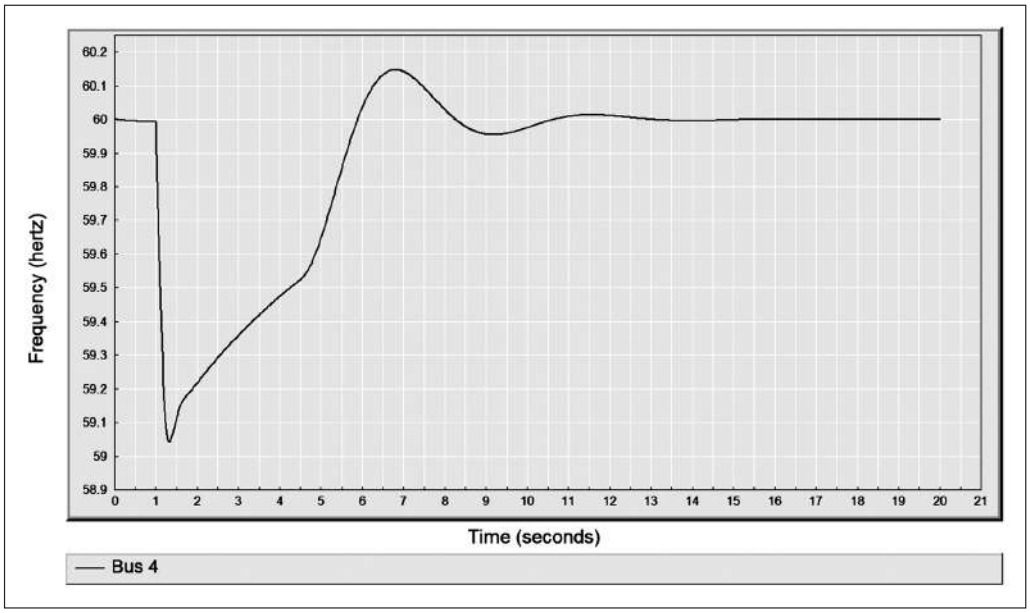


圖 11　頻率響應曲線圖

量為1530 kW，PV發電量為284 kW，系統低頻卸載設定為57.3 Hz。

圖11為電力系統發生故障擾動之頻率響應，圖12為柴油發電機組之機械功率響應曲

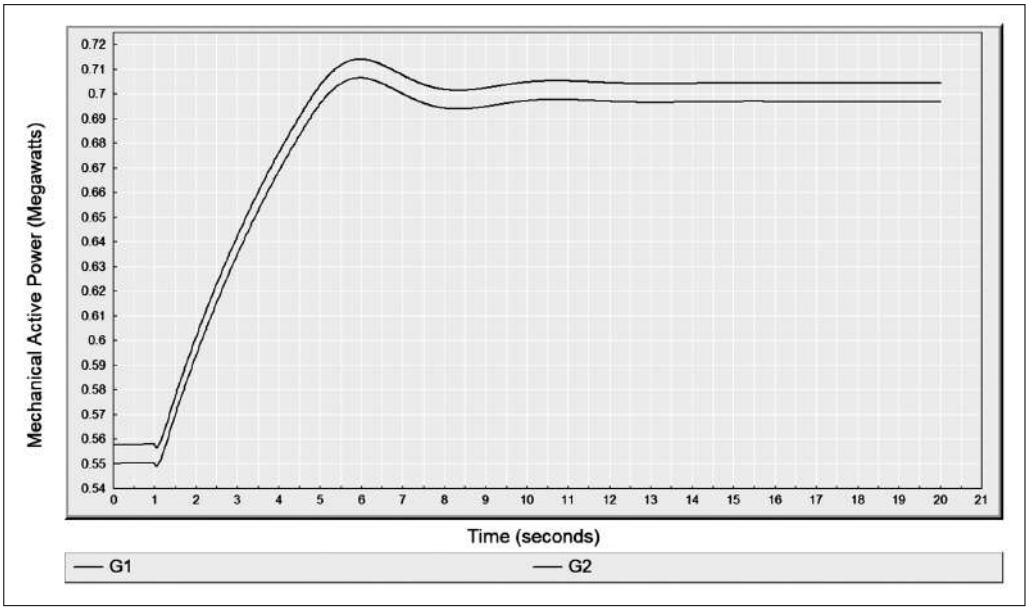


圖 12　發電機組功率響應曲線圖

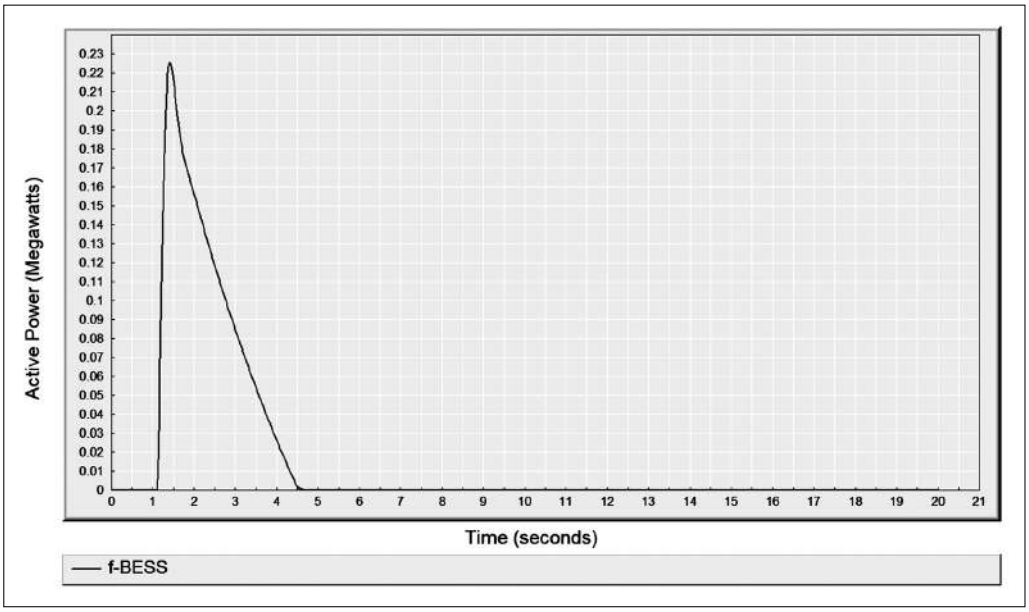


圖 13　儲能系統輸出功率響應曲線圖

線圖，圖13為儲能系統之輸出功率。藉由於儲能系統瞬間放電225 kW，系統頻率最低只跌至59.04 Hz，儲能系統因頻率逐漸回升而減少其放電量，雖然導致系統頻率回升較

慢，但藉由發電機調速器作發電功率之調控而使系統頻率回復至60 Hz。由於PV系統跳脫，發電機G1的機械功率由557 kW上升至704 kW，發電機G2的機械功率由550 kW上升至最後的696.5 kW，以彌補PV系統故障切離所造成之發電量缺口。

六、儲能系統低頻觸發快速放電決策

由於離島電力系統規模小，當其中一部發電機跳脫或線路故障時，其故障臨界清除時間可能低於1秒，若藉由EMS推導儲能系統之調控決策再下指令給PCS，其反應速度將嚴重不足。本文配合儲能系統之在地控制模式，針對綠能發電量與系統負載量不同組合情境，模擬七美電網突然跳脫一部柴油發電機時，執行電力系統暫態穩定度分析以決定儲能系統的最低快速放電功率，以確保電力系統於擾動過程其最低頻率不致低於低頻卸載之設定值57.3 Hz。圖14為儲能系統低頻觸發快速放電控制決策專家系統，首先須根據系統暫態穩定度分析結果，建立專家系統控制決策訓練資料集。圖15為儲能系統放電量與系統淨負載量與之關係曲線圖，可發現儲能系統快速放電功率與電力系統淨負載量幾乎成正比關係。根據能源管理系統收集

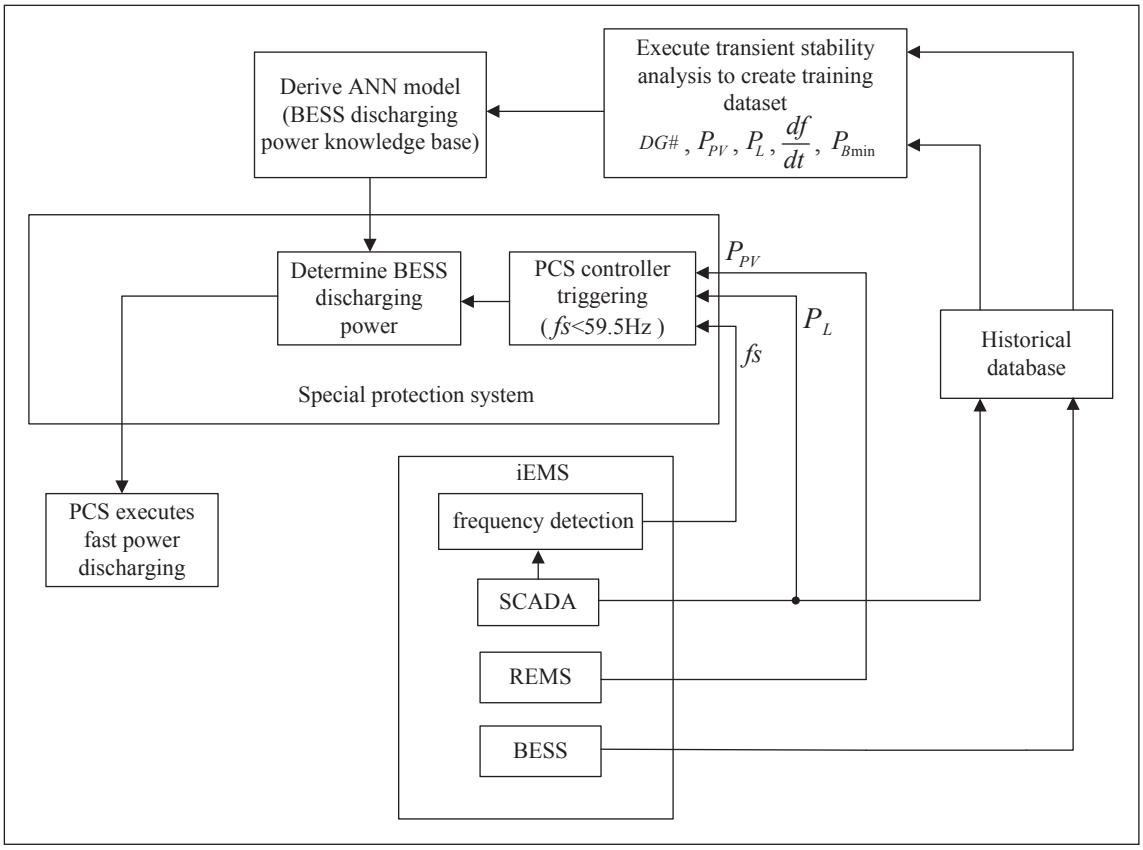


圖 14　儲能系統快速放電控制專家系統

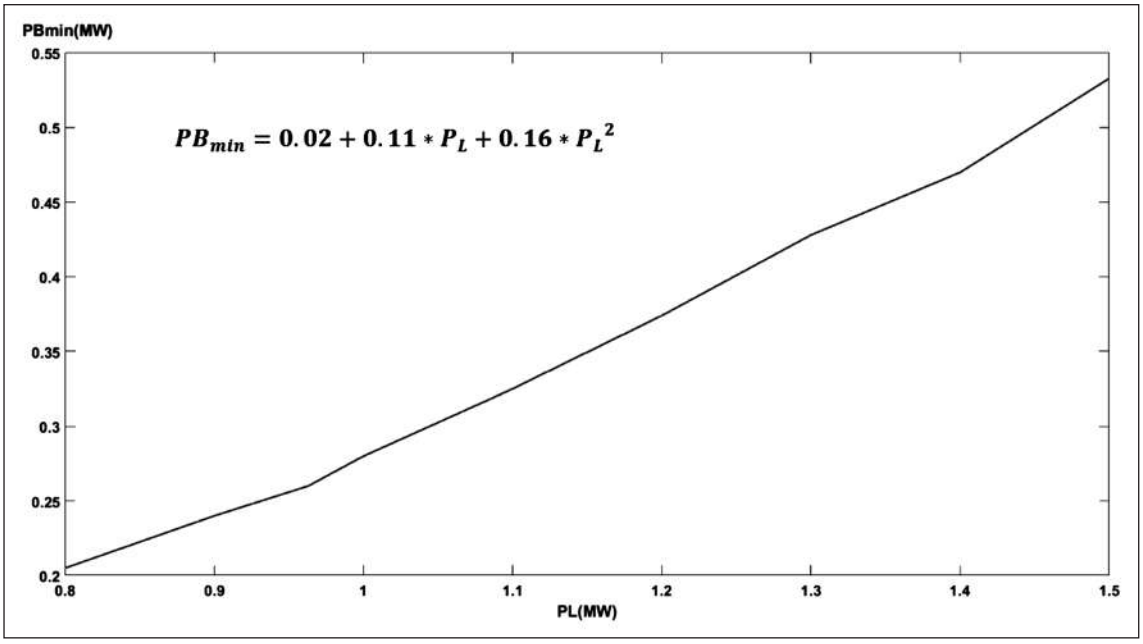


圖 15　儲能系統低頻觸發最低放電量決策

之電力系統運轉資訊，執行各種大型擾動情境之暫態穩定度分析、建立儲能系統最低放電量、PV系統發電量、系統負載量及事故擾動後之頻率下降率之資料庫，經由類神經網路訓練而建立儲能系統放電控制決策規則庫。當系統發生大型擾動並低頻觸發儲能系統PCS快速放電控制系統時，可藉由內建專家系統規則庫迅速決定儲能系統快速放電功率，以避免系統低頻卸載及柴油發電機跳脫而提升七美電力系統之穩定度。

七、儲能系統控制策略

儲能系統之功率輸出調控模式分別為（A）低頻觸發之緊急放電採在地local控制模式，當頻率突然下降至低頻設定值時作儲能系統之快速放電。（B）在地local控制模式，PCS控制器根據綠能發電功率變化作儲能系統平滑化控制。（C）EMS能源管理系統根據系統淨負載曲線推導儲能系統每小時充放電量及電池（SOC）值，執行儲能系統削峰填谷控制。

（一）緊急放電模式

儲能系統緊急放電模式主要利用PCS控制器偵測每cycle之系統頻率，當其低於低頻觸發設定值59 Hz時，根據儲能系統快速放電專家系統，決定儲能系統之放電功率，並將指令傳送至PCS執行儲能系統快速放電控制以維持系統頻率，待系統頻率回升至59.5 Hz後，儲能系統則以-10%/sec的斜率遞減其放電量，最後藉由發電機調速整合控制而恢復系統頻率。當頻率達60 Hz時再利用慢充控制

使電池SOC值能回復至故障前儲能系統之儲存電能。

當電力系統發生大型擾動柴油發電機或PV系統突然跳脫時導致發電量與負載量失去平衡時，系統頻率之變化可以搖擺方程式表示如式(1)。

$$P_G - P_L = \frac{H}{\pi f_0} * \frac{df}{dt} \quad (1)$$

由於系統轉動慣量H值相對較小，將導致系統頻率快速下降而影響供電安全。本文針對2018/08/01七美電網發生柴油發電機G1因轉速傳感器故障，導致調速機控制器執行降載，最後造成保護電驛動作而跳脫之實際系統事故模擬分析，於故障發生前，G1及G2之發電量分別為530 kW及510 kW，故障發生後系統頻率急速下降，G2 調速機隨著系統頻率之降低而調整實功輸出從510 kW增加至810 kW，但由於G2升載反應速度不足,最後藉由雙湖RB02饋線之低頻卸載保護電驛之動作（頻率設定57 Hz，延遲0.2秒），切離該饋線負載量273 kW。在執行低頻卸載後，系統頻率下降至最低值57.4 Hz後再恢復系統頻率，根據模擬分析結果發現，若不採用低頻卸載且無儲能系統提供快速放電功能時，系統頻率會跌至50.8 Hz並造成G2低頻跳脫而導致全島大停電。若藉由儲能系統緊急放電控制執行快速放電300 kW時，則系統頻率最低僅下降至57.6 Hz，同時藉由儲能快速放電及G2調速機之調控增加其輸出功率，系統頻率將逐漸回升而避免饋線低頻卸載及D2跳脫，當頻率回復至60 Hz時執行儲能系統30 kW充電量，有效回補電池於放電過程中所消耗之電能。圖16為儲能系統放電及充電響應。

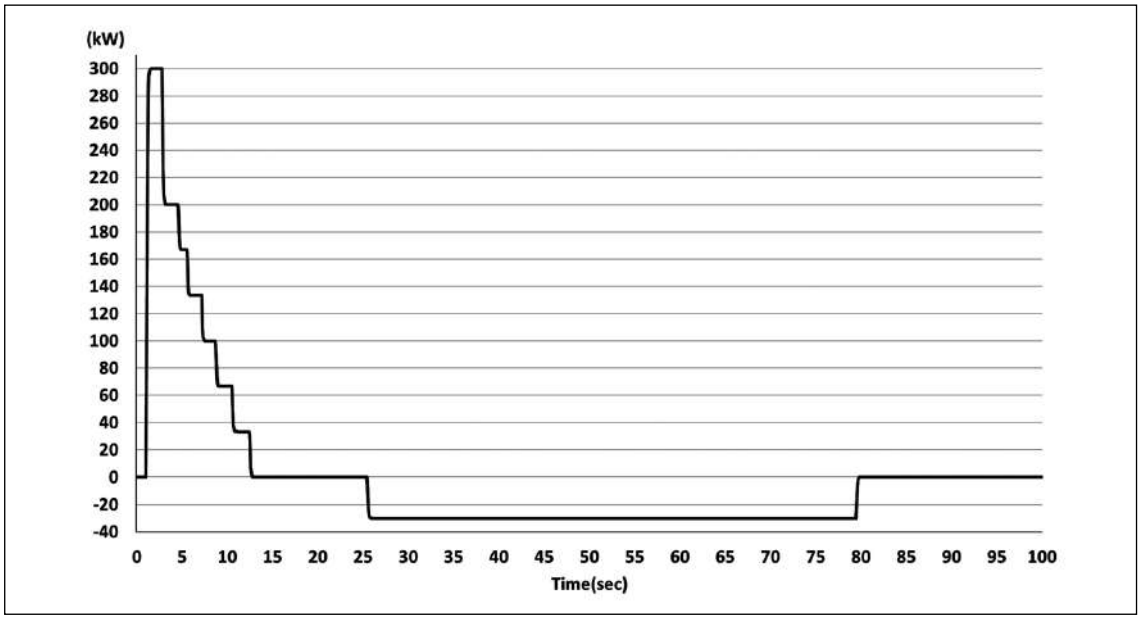


圖 16　儲能系統充放電響應圖

（二）綠能發電平滑控制模式 [11, 12]

為改善因雲層變化造成PV系統發電量突然降低或增加，影響供電品質及柴油發電機之穩定運轉，儲能系統PCS控制器根據PV系統發電量，執行功率補償達成PV系統發電量平滑化。由於七美島土地面積較小，雲層之突然變化導致PV系統發電量變化可高達（50%/秒）以上，本文利用移動平均法（Moving Average）作為儲能系統配合PV發電變化量執行充放電控制，PCS控制器會收集每秒PV系統之發電量，並和過去10秒發電量平均值作比較，若其差值超過控制deadband時，則進行儲能系統之充放電控制。圖17為2018/6/23當日的PV系統發電量與儲能系統充放電調控，顯示PV系統發電量變動經由儲能系統作充放電加以補償後變得相當平滑。圖18顯示儲能系統執行平滑化調控功能後，355 kWp PV系統發電量每分鐘變動率從121.1 kW/min（15.1%）降至2.36 kW/min（0.29%），太陽能輸出功率的平均擾動也從8 kW/min 降至 1.7 kW/min。

（三）削峰填谷模式 [13]

根據七美系統日負載曲線與PV系統全日發電變化，並考慮電池SOC運轉限制條件，推導儲能系統每小時之充放電功率控制，達成削減尖峰時段用電量，並於離峰時段進行儲能系統之充電，而提升七美電力系統之負載因數。本文應用最短路徑演算法[7, 8]推導儲能系統最佳化充放電量調度決策。為滿足

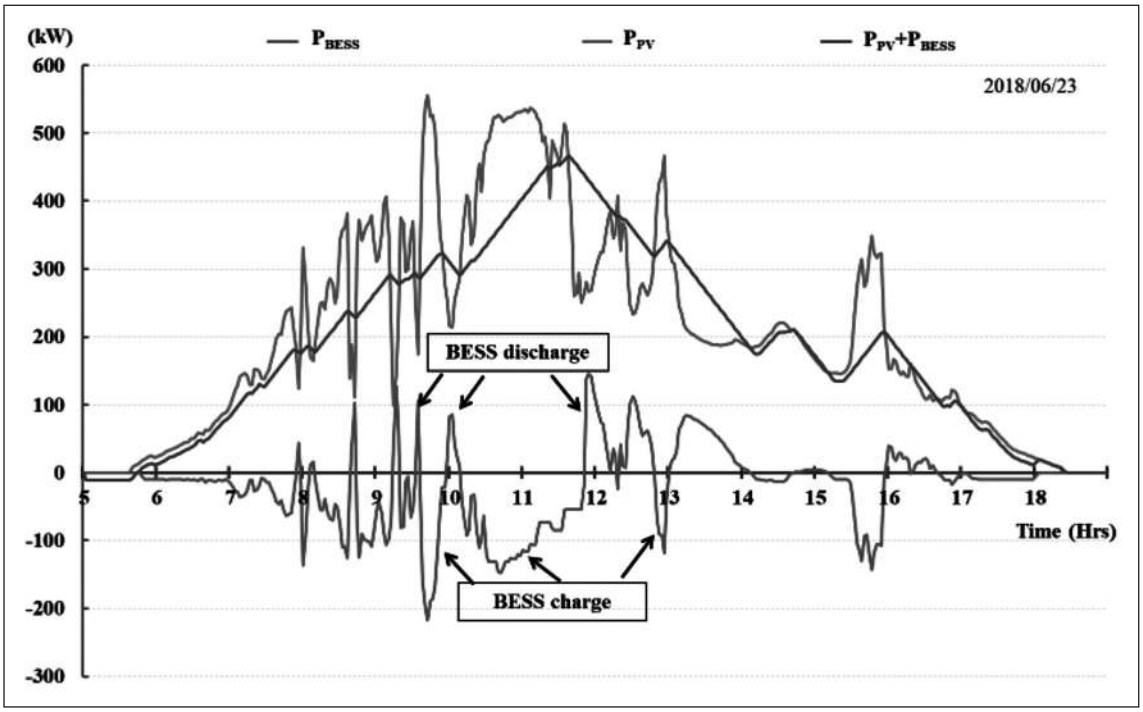


圖 17　儲能系統平滑化控制之 PV 系統升載率變化

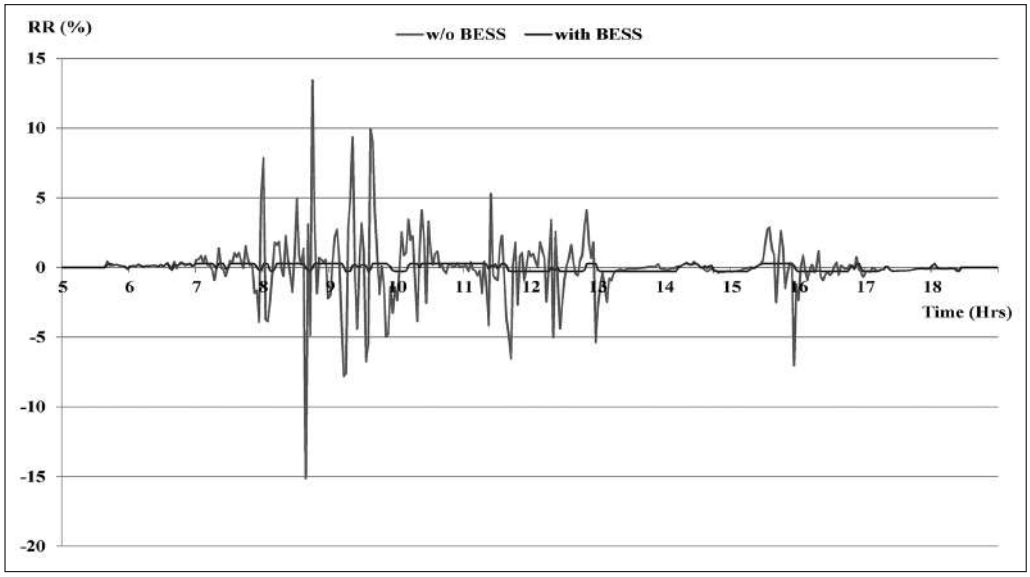


圖 18　儲能系統與太陽能系統輸出變化圖

每小時系統負載需求，七美電廠總發電量扣除PV系統發電量求得系統淨負載曲線，其中和分別為系統負載量與太陽光電發電量，淨負載則可表示為式(2)

$$P_{net}(t) = P_L(t) - P_{PV}(t) \tag{2}$$

若和分別為儲能電池之充電功率與放電功率如圖19所示，其中紅線θ為理想目標值，則其目標函數如式(3)所示

$$minP_{bat}^{ch}(t), \theta \| P_{bat}^{ch}(t) - P_{bat}^{dh}(t) + P_{net}(t) - \theta \| \tag{3}$$

儲能容量模型方程式則以式 (4) 所示

$$E_{bat}(t+\Delta t) = E_{bat}(t) + \eta \cdot \Delta t \cdot m_{ch}(t) \cdot P_{bat}^{ch}(t) - \frac{1}{\eta} \cdot \Delta t \cdot m_{dh}(t) \cdot P_{bat}^{dh}(t) \tag{4}$$

其中

$E_{bat}(t)$：儲能可利用容量。

η：儲能充放電效率。

Δt：為充放電時間。

若假設電池系統總容量為900 kWh，且其SOC必須維持在（30%-80%）範圍，則每天可供充放電之電能量為450 kWh，圖20為經由最短路徑演算法調控儲能前後之日負載曲線。於9時-16時太陽光電充足時段進行儲能系統充電，於19時-24時系統尖峰用電時段則進行儲能系統放電控制，其中最大充電量為11時之142.5 kW，最大放電量則為22時之118 kW，透過調控後七美系統之負載因數由原先之0.64提高為0.73。

八、結論

為降低離島發電成本，並提升系統供電

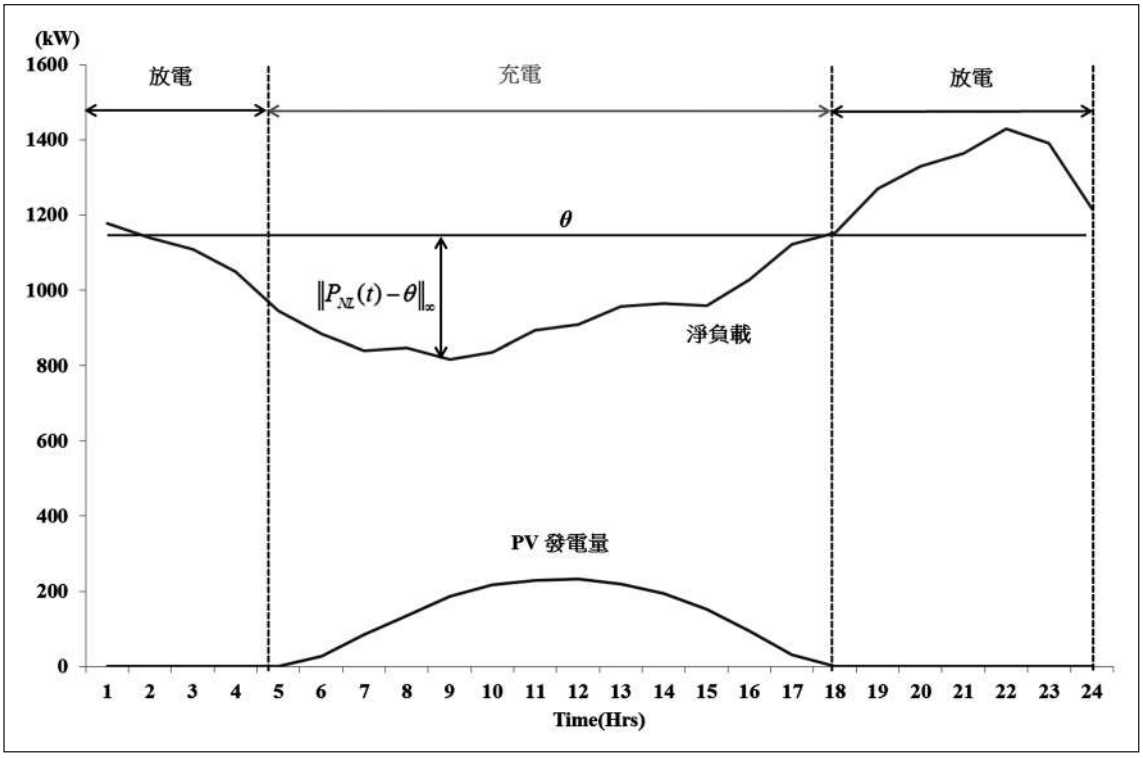


圖 19　儲能系統削峰填谷控制最佳化說明圖

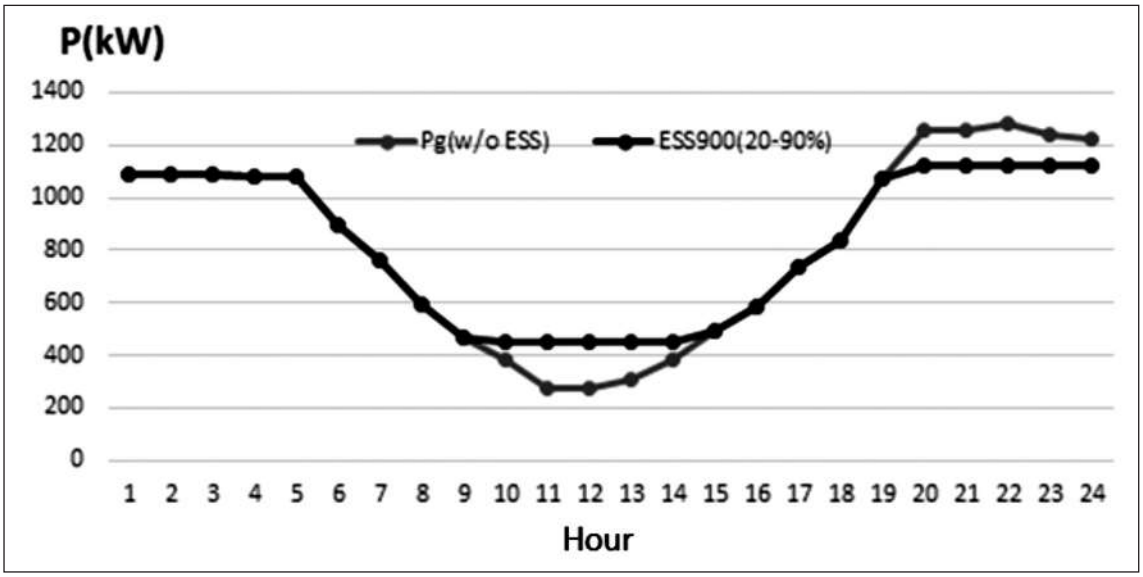


圖 20　儲能系統執行削峰填谷之日負載曲線

品質，本研究團隊在科技部及台電全力支援下，整合國內智慧電網產業，建置綠能高佔比七美智慧電網，導入PV系統智慧變流器及儲能系統，並研發綠能及儲能系統輔助服務調控策略與儲能PCS控制系統，建立儲能系統低頻觸發快速放電控制專家系統，確保大型擾動事故後七美獨立電網之暫態穩定度，應用移動平均法推導綠能發電平滑化功能，以降低天候因素造成綠能發電變化對系統運轉之衝擊，最後以最佳化理論，根據系統負載與綠能發電預測值推導儲能系統削峰填谷控制。經七美智慧電網系統之模擬分析與各種應用功能之實測，成功驗証藉由儲能系統及綠能發電系統柴油發電機作整合控制，方能有效維持綠能高佔比離島電網之電力品質與穩定運轉。未來七美將輔助服務功能，配合進一步建置風力發電系統及擴增PV系統容量，以提升綠能發電滲透率，同時將整合我國智慧電網產業，發展離島智慧電網前瞻控制技術，七美建設成能夠永續經營之真正低碳島，以作為我國其他離島建立智慧電網之推廣模型，並期能提升我國離島智慧電網之技術能力，以協助國內產業爭取國際智慧電網商機。

參考文獻

1. C. C. Yeh, C. S. Chen, T. T. Ku, C. H. Lin, C. T. Hsu, Y. R. Chang and Y. D. Lee, " Design of Special Protection System for an Offshore Island with High PV Penetration," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 53, No.2, pp.947-952, March/April 2017
2. 科技部能源國家型計畫智慧電網示範系統建置，106-108 年
3. 楊子弘，「七美離島電網儲能系統緊急調度策略」碩士論文，國立中山大學，中華民國 107 年 7 月。
4. 陳朝順、陳彥豪、李奕德，「七美與望安島微電網系統暫態穩定度分析研究」，核能研究所，106 年 3 月。
5. J. Wu, X. Xing, X. Liu, J. M. Guerrero, Z.Chen, “Energy Management Strategy for Grid-Tied Microgrids Considering the Energy Storage Efficiency,” IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 65, no. 12, pp. 9539-9549, Dec. 2018.
6. R. Zamora, A. K. Srivastava, “Energy management and control algorithms for integration of energy storage within microgrid,” IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp.1805-1810, 2014.
7. D. Reid, “EMS control of reduced energy storage capacity for ramp rate support to improve frequency regulation in islanded microgrid,” SoutheastCon, pp.1-7, 2016.
8. K. Thirugnanam, S. K. Kerk, C. Yuen, N. Liu, M. Zhang,, “Energy Management for Renewable Microgrid in Reducing Diesel Generators Usage With Multiple Types of Battery,” IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 65, no. 8, pp. 6772-6786, Aug. 2018.
9. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std. 421.5, 1992.
10. Yoash Levron and Doron Shmilovitz, "Power Systems’ Optimal Peak-shaving Applying Secondary Storage," Electric Power Systems Research, vol. 89, pp. 80-84, 2012.
11. Yichen Zhang, Alexander Melin, Mohammed Olama, Seddik Djouadi, Jin Dong and Kevin Tomsovic, "Battery Energy Storage Scheduling for Optimal Load Variance Minimization," Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, Washington D.C., USA, 2018.
12. A. Ellis, D. Schoenwald, J. Hawkins, S. Willard, “PV output smoothing with energy storage,” 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, June 2012.
13. A. Luna, N. Diaz, M. Savaghebi, et al., “Optimal power scheduling for a grid-connected hybrid PV-wind-battery microgrid system,” IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp.1227-1234, 2016.
14. Y. Zhang, A. Melin, M. Olama, S. Djouadi, J. Dong, K. Tomsovic, “Battery energy storage scheduling for optimal load variance minimization,” 2018 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Feb 2018.
15. M. Mahmoodi, P. Shamsi, B. Fahimi, “Economic dispatch of a hybrid microgrid with distributed energy storage”, IEEE Trans. Smart Grid, 6, (6), pp. 2607-2614, 2015.

布袋商港聯絡道路短中期交通改善策略研析

交通部技監室技正／江明益
交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員／黃俊豪
交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員／胡啟文

關鍵字：布袋商港、聯外道路、交通改善

前言

位於嘉義縣的布袋商港屬海埔新生地，周邊主要觀光景點為高跟鞋教堂及觀光漁市，常於假日期間引進過多車流，惟海埔新生地腹地有限，因而常常衍生停車空間不足，造成高跟鞋教堂及觀光漁市周邊的交通衝擊，本研究藉由實地瞭解當地交通問題與成因，並研提具體短中期改善策略，提供有關單位參酌採用。

一、布袋商港周邊發展現況

（一）客貨運發展

國內商港分布如圖1所示，其中布袋港位於嘉義縣布袋鎮西側之濱海地區，由臺灣港務公司高雄分公司負責管理營運，目前作為高雄港之輔助港，其主要定位為：（1）環島及離島航運之作業港、（2）兩岸直航開收港口、（3）兼具觀光及親水性港口。

布袋港貨運裝貨量係以運送離島（澎湖）貨運為主，目前有4家航商投入營運，整體貨運量自102年起逐年下降，106年貨運量僅為38.8萬噸，99至106年貨運統計情形如表1。

表 1　布袋港近年貨運量統計表

年度	貨運量（公噸）	成長率
99	515,298	-
100	521,462	1.20%
101	571,253	9.55%
102	492,366	-13.81%
103	408,971	-16.94%
104	390,808	-4.44%
105	361,950	-7.38%
106	388,758	+7.41%

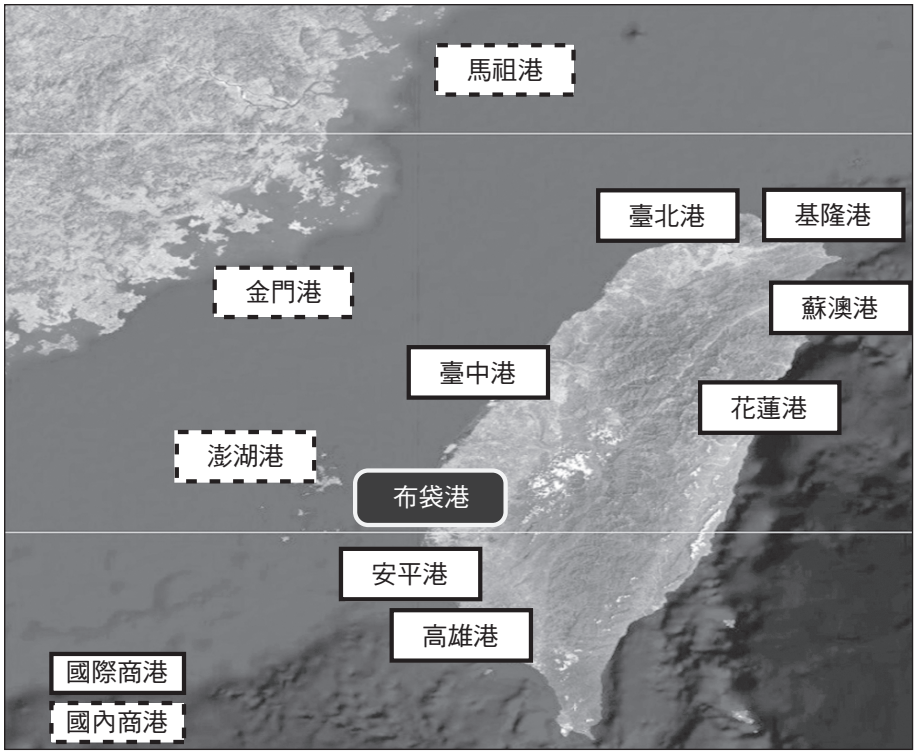


圖 1　國內商港分布圖

表 2　布袋港近年客運量統計表

年度	旅客量（人次）	成長率
99	235,973	-
100	242,318	2.69%
101	228,775	-5.59%
102	301,081	31.61%
103	360,486	19.73%
104	440,578	22.22%
105	502,696	14.10%
106	538,121	7.04%

布袋港主要客運量以「布袋-澎湖」航線旅客為主（如圖2），近年有快速成長之趨勢，目前已有6家航商（10艘客輪）投入營運，106年度運量達53萬8,121人次，99至106年客運統計情形如表2。

整體而言，在客運部分，布袋港主要以布袋-澎湖航線為主，因航程短較具競爭力，近年有快速成長之趨勢，另外雖有兩岸小三通許可，但因吸引力不足，102-106年旅客數持續掛零；在貨運部分，因受澎湖港及小三通貨運量減少影響則持續減少，彙整如表3。

（二）周邊環境發展

為促進布袋商港觀光及休憩產業發展，

表 3　布袋港客貨運綜整分析

	離　島	兩　岸　直　航
客運	布袋港主要客運量以布袋 - 澎湖旅客為主，近年有快速成長之趨勢，106 年度運量為 53 萬 8,121 人次進出本港，近三年平均成長率達 +14.45%。	大陸人士來台海運旅遊行程，考量客源集中及船班密集，大多經由基隆、台北及台中（平潭 - 台中及台北、台州 - 基隆），並以遊覽車或高鐵自由行進行全台旅遊，102-106 年透過小三通經由布袋港之旅客人數為 0。
貨運	布袋港貨運裝貨量係以運送離島貨運為主，因受澎湖港及小三通貨運量減少影響，貨運量自 102 年逐年下降，近四年平均下降率達 -5.34%。	因布袋港與鄰近台中及安平港有腹地重疊，且台中貨源集中及船班密集，102-106 年透過小三通經由布袋港之貨運量為 0。

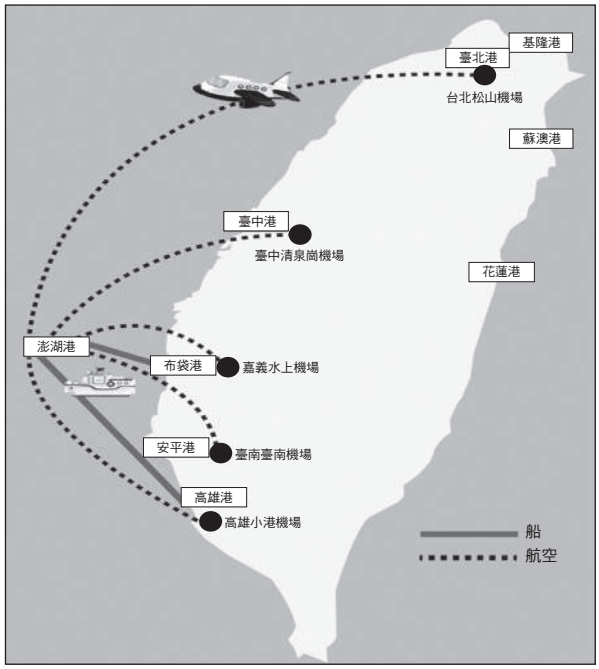


圖 2　布袋港客運航線示意圖

政府近期將展開多項建設，包括港區景觀整建、區域排水及整地等公共設施工程；另為提供更多客船停泊規劃延建碼頭，且為提供旅客更完善的客運服務品質，將啟動客運服務區設施改善工程，以創造布袋商港觀光新亮點，營造在地化景點特色。

布袋海埔新生地區對外橋梁僅唯一的布新橋，此橋梁除了供布袋地區居民進出之基本需求外，更是快速增加的布袋-澎湖旅客、高跟鞋教堂帶動的觀光遊客必經之路，加上民眾來布袋必去的布袋觀光漁市，特別造成假日人車擁擠，尤其連續假日時常回堵在「中山路-布新橋路段」，故布新橋規劃容量遠遠不夠假日的運輸量與交通量的需求。布袋港周邊道路如圖3所示。

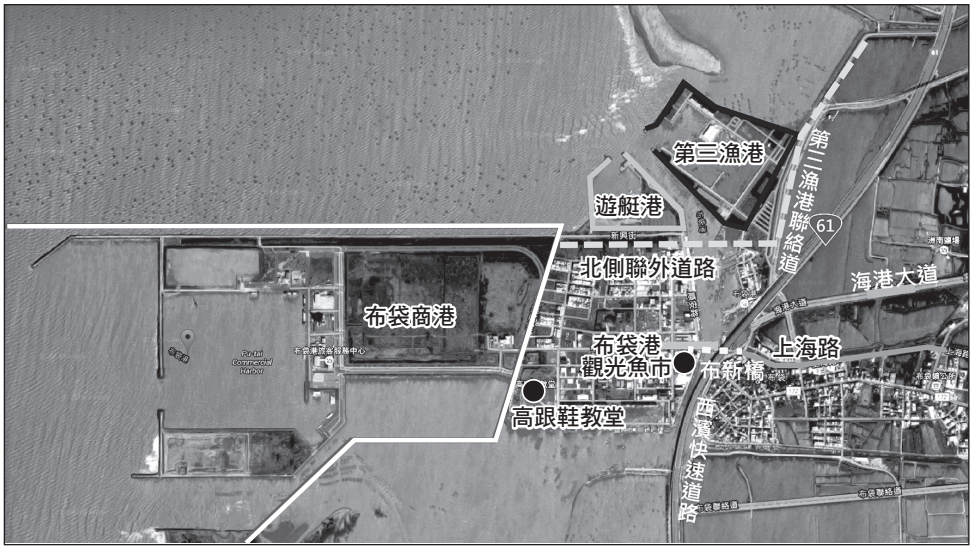


圖 3　布袋港周邊道路發展現況

二、交通課題

參考嘉義縣政府「布袋國內商港聯外道路規劃」[1]報告中，歸納計畫範圍交通問題如下：

（一）路口號誌時制設計不佳，影響車輛紓解效率

調查顯示，上海路（布新橋）/後寮路路口假日下午尖峰小時服務水準為D級，其餘路口服務水準均在C級以上，平日則均在B級以上。在路段方面，位於上海路~後寮路路口西側，銜接布新橋之中山路假日尖峰小時服務水準亦已達到D-E級，其餘路段服務水準則均在C級以上。如圖4所示。

上海路（布新橋）/後寮路路口中，假日時段上海路上下午尖峰由東往西車輛以直行為主，比例達88-91%；由西往東則以左轉後

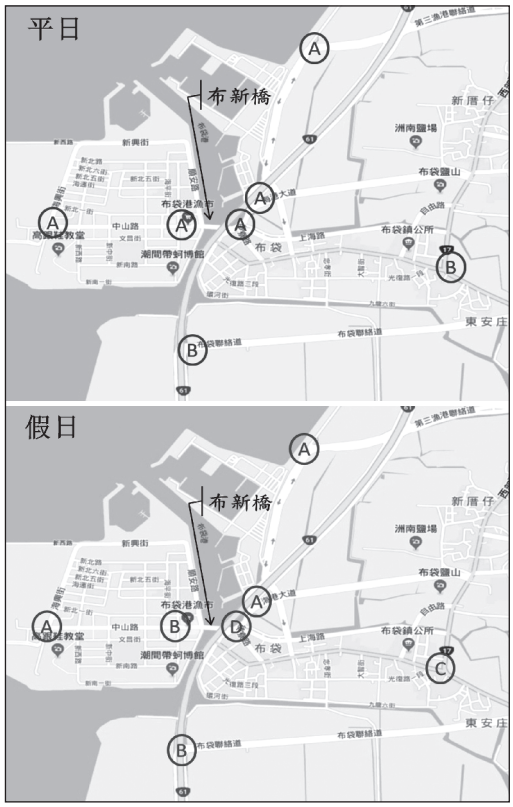


圖 4　布袋港周邊道路平假日路口服務水準

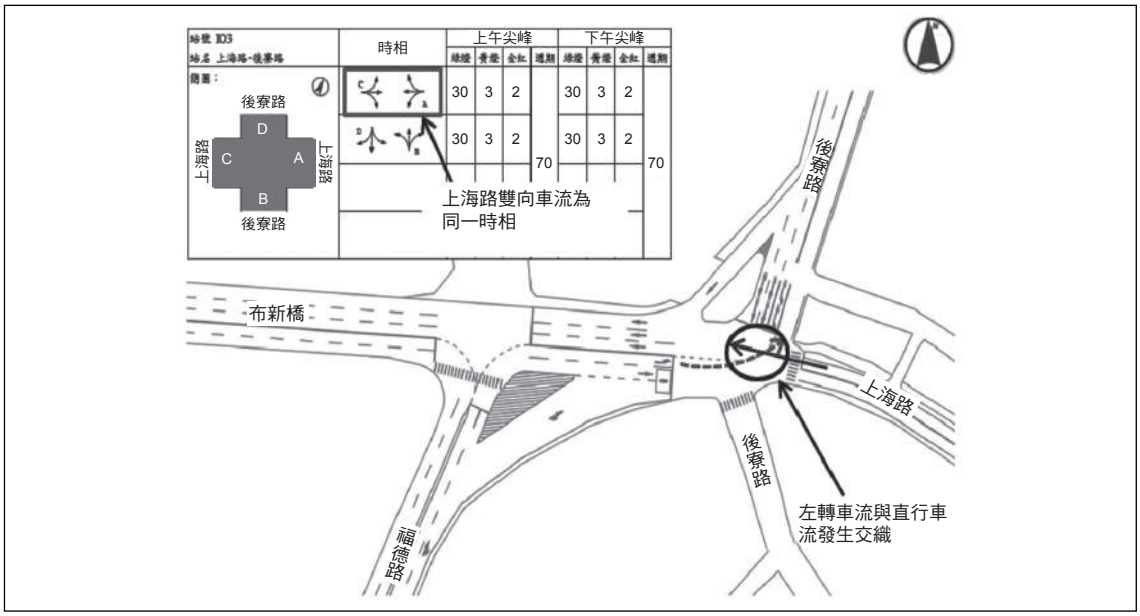


圖 5　上海路 / 後寮路路口上海路雙向車流交織說明示意圖

寮路車輛較多，比例介於56%-59%。由於上海路雙向車流屬於同一時相，在西向直行車流與東向左轉車流行車動線交織衝突之下，路口紓解效率自然不佳。詳圖5所示。

上海路（布新橋）/後寮路路口號誌時制採2時相設計，每時相綠燈時間均相同，如圖5左上圖所示，任何時段下（上、下午尖峰），東西向與南北向之紅綠燈秒數均相同，惟上海路雙向車流明顯多於後寮路，時相分配未考量車流多寡亦會影響路口服務效率無法充分發揮。

（二）車輛佔據中山路車道臨時停車，降低道路容量

布袋鎮漁會停車場入口鄰近布新橋，且距離觀光漁市較近、收費亦較週邊私人停車場低，為遊客停放車輛的首選。調查時發現車輛係佔據中山路外側車道排隊等候進入漁會停車場，加上車位有限、採人工收費致使進場速度十分緩慢，甚至有車輛直接跨越雙黃線違規左轉進入停車場。凡此情形均造成中山路道路容量降低，影響中山路車流無法順暢通行。

大型車輛，如遊覽車，隨意停放於禁止停車之路段，因車體龐大，對於中山路之交通影響甚大。如圖6所示。

（三）路口交通設施不足、指示效果不佳

中山路/海興街路口位於布袋海埔新生地西側，緊臨布袋港區，為一T字型路口，車輛

圖 6　中山路漁會停車場車輛排隊進場佔據車道及違規左轉

過布新橋、從中山路一路往西至此路口需左轉接海興街，再依目的地分別前往高跟鞋教堂或布袋港。唯前往高跟鞋教堂或布袋港之路徑為平行走向，不熟悉路況之駕駛人常因此走錯路。

路口號誌桿上目前附掛有告示牌面，以文字告知用路人前往高跟鞋教堂之行車動線，但牌面較小、須接近路口中央時才看見，故常發生車輛於路口減速觀看牌面、猶豫不定，甚至已通過路口卻發現錯誤，於路口違規迴轉之情形。此外，導引牌面主要以文字說明，指示不明確，駕駛人產生混淆，易發生欲至高跟鞋教堂卻往布袋港方向行駛，或欲往布袋港卻向高跟鞋教堂行駛之情形。如圖7所示。

往布袋港路面上繪有指示箭頭引導車輛，但往高跟鞋教堂方向之路面卻未繪製指示線。

三、改善策略

前述交通問題，本研究為有效利用現有運輸設施，藉著交通工程或管理辦法，以低成本之投入，改進運輸系統效率，提高服務

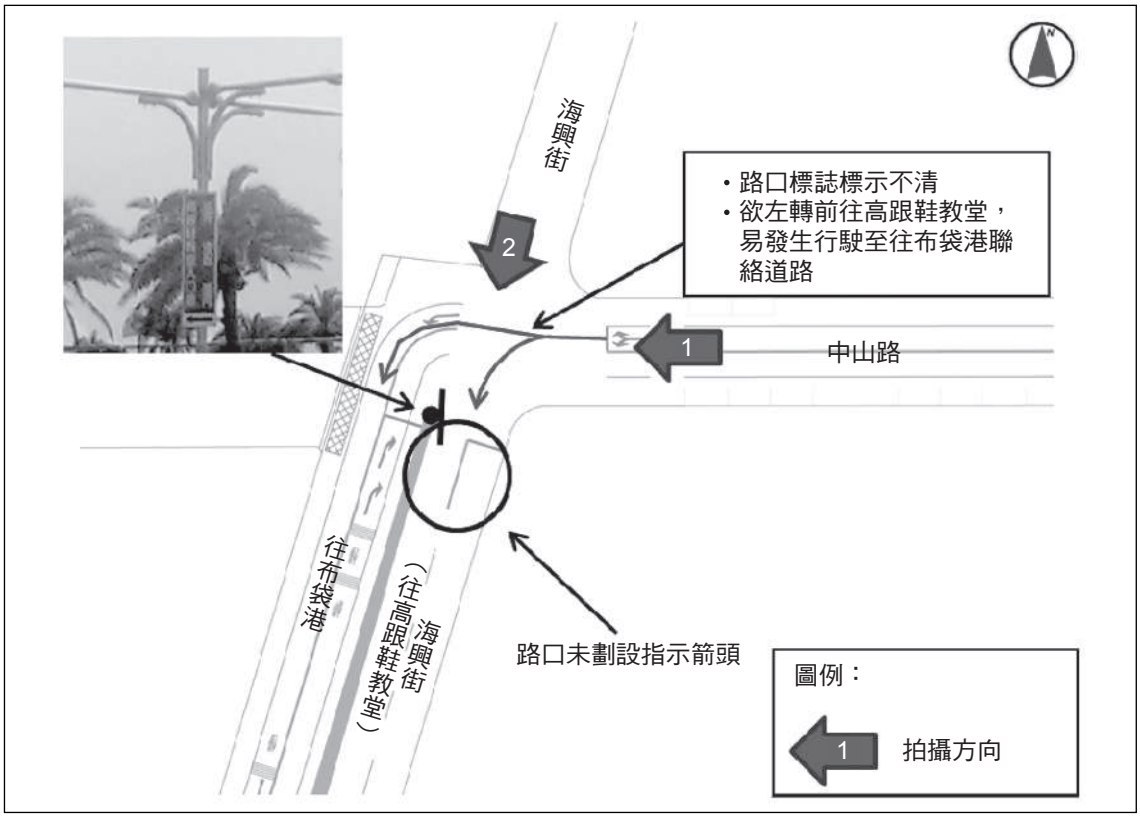


圖 7　中山路 / 海興街路口交通設施不足說明示意圖

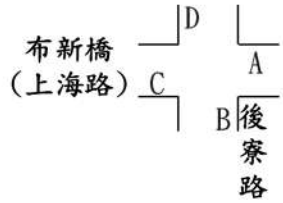
水準，並達到節約能源、減少污染、增進交通流暢與行車安全等多重目標下。提出計畫範圍內幾項可採取之短中期交通改善策略[2]，說明如下：

（一）短期 - 增加上海路 / 後寮路路口號誌東西向時制

布新橋東側的上海路/後寮路路口，匯集由台61線、海港大道、上海路、後寮路而來的車流，然後，再經中山路西行；而中山路、布新橋東向的車輛亦經由本路口往各方向疏散，其重要性不言可喻。因此，建議調整目前假日時段號誌時制（如圖8所示），依各方向車流數量適當地分配時相，增加上海路方向（即東西向）綠燈時間，同時減少後寮路方向（南北向）綠燈時間，預期在這樣的調整下，可使車流能獲得有效率的紓解，減少延滯停等，提升整體路口運作效率。

（二）短期 - 調整漁會停車場進出動線，並加強路邊取締

由計畫範圍假日交通量及車道配置觀之（如圖9所示），中正路東側之交通狀況應較西側佳，然而，東側因路邊違規停車、違



現況假日號誌時制及路口服務水準

時相	綠燈	黃燈	全紅	週期
	30	3	2	70
	30	3	2	

建議號誌時制調整及路口服務水準

時相	綠燈	黃燈	全紅	週期
	35	3	2	70
	25	3	2	

圖 8　上海路 / 後寮路路口時制調整建議

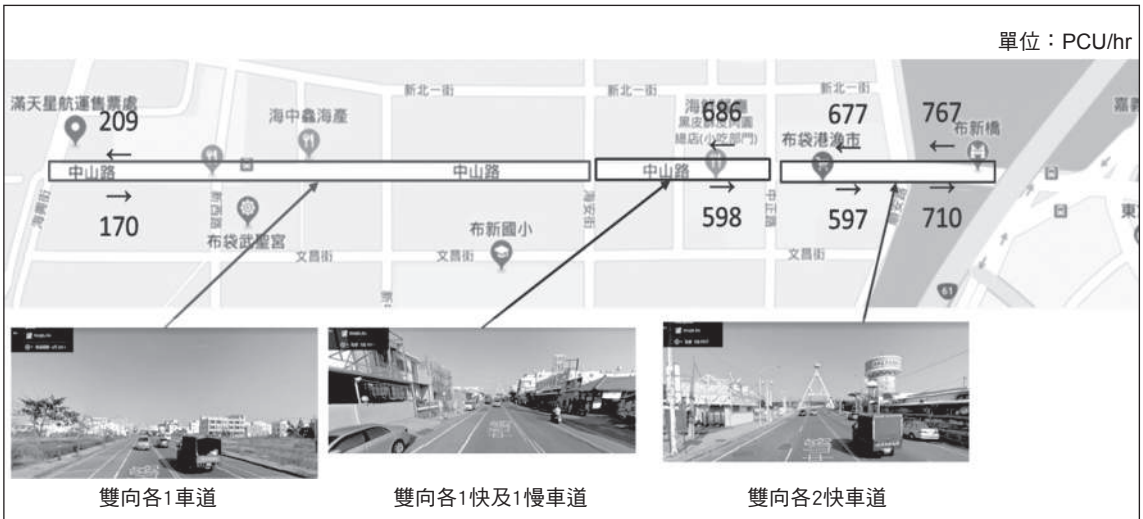


圖 9　中山路假日道路容量及需求分布圖

規左轉進入停車場等問題，較容易有交通壅塞現象。

漁市對面雖有漁會停車場（如圖10所示），但民眾違規停車相當普遍，影響車流運轉。而且，停車場僅一處入口，左轉車流違規跨越雙黃線；停車場於入口處進行人工計次收費，易有回堵並占用車道。未來應加強

圖 10　漁會停車場進出入口配置圖

違規取締，並檢討出入口及動線。

（三）短期 - 海興街路口前一定距離應設置明顯可見之指示標誌

中山路西側海興街係前往高跟鞋教堂與布袋港，為兩平行道路，且實體分隔，惟指引標示設置於海興街入口前之號誌桿，牌面較小，常造成車輛驟然減速、猶豫不定，甚至違規倒車迴轉，爰建議於中山路左轉海興街路口前一定距離，例如100尺前，設置明顯可見之指示標誌（如圖11），供用路人提早判斷。

（四）中期 - 建立區內的停車管理資訊系統

布袋海埔新生地的觀光景點主要為高跟鞋教堂及觀光漁市，考量海埔新生地的腹地有限，如於假日期間引進過多車流，將會衍生停車空間不足，並造成高跟鞋教堂及觀光漁市周邊的交通衝擊，因此，建議建立區內的停車管理資訊系統，當區內停車場快飽和，例如有計數停車場之停車數大於85%停車位時，布新橋禁止非當地居民的車輛進入，並在外圍地帶設置路外停車場，同時，搭配公共運輸接駁的方式，以及區內廣設公共自行車的方式將旅客引導至區內觀光及消費。

四、結論

由數據顯示，布袋商港客運量逐年成長，未來仍應著重客運及觀光發展，吸引遊客停留布袋消費，另外布袋港現況仍有廣大土地可做開發，政府現階段得先以活化現有設施，創造亮點及地方特色，除了提供搭船旅客更好的服務品質，並配合周邊區域引進觀光產業，活化港區土地並促進地區經濟發展，創造更多觀光效益。

目前布袋商港屬海埔新生地，周邊主要觀光景點為高跟鞋教堂及觀光漁市，常於假日期間引進過多車流，惟海埔新生地腹地有限，因而常常衍生停車空間不足，造成高跟鞋教堂及觀光漁市周邊的交通衝擊，本研究藉由實地瞭解當地交通問題與成因，並研提具體短期改善策略如下。

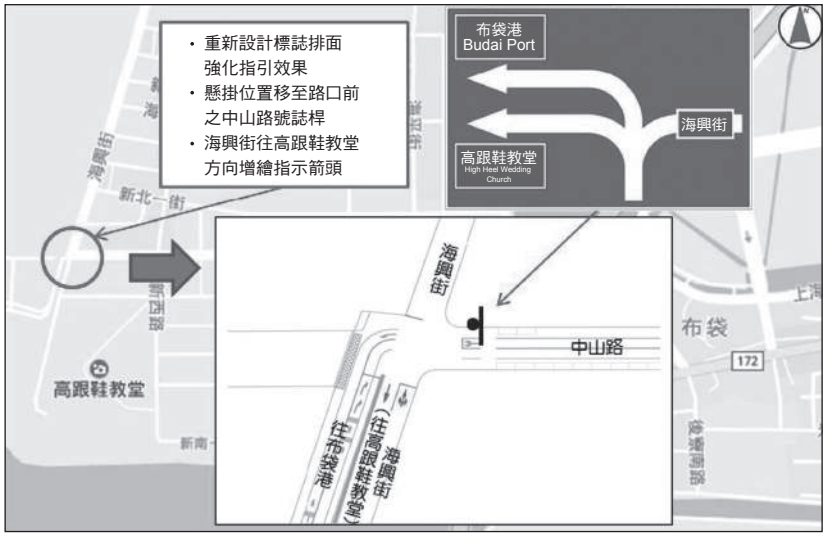


圖 11　中山路 / 海興街路口改善措施示意圖

號誌時制改善：依據當地上海路與後寮路口交通量調查結果發現，上海路西向直行與東向左轉後寮路車流量比例甚高，易產生交織衝突，加以假日車流量較平日大，且現況該路口東西向及南北向時制週期設定相同，建議針對假日上下午尖峰車流情況，調整綠燈秒數，或增加左轉時相型態。

交通違規改善：布袋漁市場因緊鄰布新橋旁，因此常有車輛臨時停靠，影響布新橋兩端連絡道車流順暢度，建議檢討漁會停車場進出動線，並協調當地警方，加強假日取締違規停車，以改善車流運轉。

交通設施標示改善：現況海興街前往高跟鞋教堂與布袋港為兩平行道路，且為實體分隔，惟指引標示設置於海興街入口前之號誌桿，且牌面較小，常造成車輛驟然減速、猶豫不定，甚至違規倒車迴轉，建議於中山路左轉海興街路口前一定距離，設置明顯可見之指示標誌，供用路人提早判斷。

就長遠之計，考量海埔新生地的腹地有限，為利觀光發展，該地區不宜引入過多的車流，如於假日期間引進過多車流，將會衍生停車空間不足，並造成高跟鞋教堂及觀光漁市周邊的交通衝擊，因此，未來應朝人本、永續的運輸來發展，建議儘速建立區內的停車管理資訊系統，當區內停車場快飽和，得禁止非當地居民的車輛進入布新橋，並在外圍地帶設置路外停車場，同時，搭配公共運輸接駁的方式，以及區內廣設公共自行車的方式將旅客引導至區內觀光及消費。

參考文獻

1. 嘉義縣政府，布袋國內商港聯外道路規劃報告，106 年。
2. 交通部航港局，布袋商港發展計畫及關鍵議題簡報，107 年。

量子技術於網際網路安全通信的應用

能源與環境研究所財團法人工業技術研究院退休研究員 / 呂錫民

關鍵字：量子金鑰分配、網際網路通信、量子理論安全

摘要

為了使大量敏感數據（例如，電子健康記錄，政府文件），在十年甚至若干世紀之後，仍能保持可存取性，網際網路（Internet）在進行此類數據通信時，需要長期安全通信通道，這又需要可靠的金鑰分配協定（Key Distribution Protocol, KDP）。但是，當前使用的KDP並非為長期安全而設計。它們的安全性不是受到量子計算機的威脅，就是在基本上對計算問題的依賴而受到威脅。量子金鑰分配（Quantum Key Distribution, QKD）協定在信息理論上是安全的（Information-theoretically Secure），因此可針對計算攻擊提供長期安全性。但是，在現實世界中使用仍然存有重大障礙。我們在計算機學家和物理學家的跨領域協助下，針對QKD長期安全網際網路通信的挑戰和策略，實現本研究論文對這些知識的系統化。首先，我們對現今所謂「點對點QKD」技術的性能和安全性進行分析。然後，我們討論在大型多用戶網路中啟用QKD的幾種方法。最後，我們列出若干重要挑戰，如果未來這些挑戰成功克服，則將使基於QKD網際網路的通信，達到長期安全且切實可行的境界。

一、引言

網際網路（Internet）可以說是當今最重要的通信媒介，它使全球任何兩個客戶端都可以立即相互通信。如果有敏感信息（例如病歷或政府文件）即將傳達，則需要建立安全連接，以保護所傳達數據的機密性、完整性和真實性。這樣的安全連接協定將金鑰分配協定（KDP）與通道協定結合在一起，其中一個較為顯著的例子是傳輸層安全性（Transport Layer Security, TLS）協定。首先，啟動金鑰分配協定以建立對竊聽通信的潛在竊聽者未知的公共秘密金鑰。然後，此金鑰在通道協定中用於加密和驗證傳輸的數據。

當今最常用的金鑰分配協定係以Diffie-Hellman金鑰交換協定為基礎，該協定提供

了所謂的計算安全性：該協定的安全性建立在離散對數（discrete logarithms）在大型有限領域中無法被有效計算。但是，量子計算機可以有效地計算出這樣的離散對數，因此，一旦量子計算機未來可用，Diffie-Hellman金鑰交換就變得不安全。近來，基於晶格密碼學（lattice-based cryptography）的替代金鑰分配協定已被提出，其被認為對量子計算機是安全的。但是，它們的安全性仍然取決於計算問題，只要有足夠的計算能力和時間就可以破解。因此，計算安全的金鑰分配協定僅在有限的時間段內實現安全性。一旦解決了計算問題，所有傳輸數據的機密性就會丟失。

計算安全金鑰分配的替代方案是信息理論安全（information-theoretically secure）金鑰分配。信息理論安全協定可以抵抗任何計算攻擊（譬如，來自量子計算的進步或蠻力攻擊），因此可以提供長期的安全性。提供長期機密性的連接需要理論安全金鑰分配和加密信息。然而，這種通道的完整性要求通常只是臨時性的（或者計算性的），也就是說，在傳輸數據時足以保證完整性。儘管在定義、理解和構建計算安全通道方面付出巨大努力，但如何構建信息理論安全的通道，從而實現機密性和完整性的雙重效果，以及重播（replay）和重新排序保護標準安全目標的全面了解目前仍然缺乏。對於信息理論加密，一次性填充加密（one-time pad encryption）是最佳解決方案。對於信息理論安全的金鑰分配，目前存在幾種候選方法。其中，較天真的方法是使用受信任的快遞員分配金鑰，該快遞員以物理交付存儲在硬碟上的已生成金鑰。但是，這種方法存在明顯的成本和延遲問題，因為它需要在全球範圍內移動的硬碟。用於信息理論安全金鑰分配的其他方法包括定義在有界存儲模型（bounded storage model）或雜訊通道模型（noisy channel model）中的協定。

然而，目前尚不清楚如何在實際上應用它們。當前，信息理論安全的金鑰分配最看好的方法是量子金鑰分配（QKD）。QKD的安全性是根據量子物理學定律為基礎，其可行性已在許多現場測試場合中獲得驗證。但是，要使QKD在網際網路通信上達到長期安全的切實可行地步，仍有一些技術上的難題需要解決。尤其是QKD在實際上的性能和安全性仍然是一個問號。此外，大多數QKD技術著重於兩方設置，但是未來還需要做更進一步的技術改良，以便能夠在大規模多用戶網路（例如，網際網路）中使用。

在本立場文件（position paper）中，我們對根據QKD的網際網路通信所需的構建模塊進行分類和比較。具體來說，我們將對現有技術的分析分為兩項步驟。

1. 首先，我們在兩方環境下檢查QKD協定。為此，我們按照功能、信息準備方法和信息載體所用變量的類型對「點對點QKD協定」進行分類。然後，我們從性能和安全性方面比較此類協定。

2. 其次，我們轉向大規模通信網路的問題。為了可擴展性，未來的網路運行不能依賴每兩方之間的專用通信通道。因此，支持根據QKD通信的大型網路需要集線器，即多鏈路節點。當前的集線器技術不支持

QKD。我們將現有的QKD支持方法分為兩類：受信任節點網路和全量子網路。然後比較兩種方法的實用性。

通過以上分析，我們得出實現大規模QKD網路所必須解決的關鍵性挑戰。

本立場文件的目的在於提供計算機科學家和物理學家都可以理解此一主題（即本質上跨領域）的概述。同時，我們另一目標在於，以計算機科學和物理兩面向來解讀該主題時，雙方都可達到類似的詳細程度。因此，我們最終目的在於提供一個易於相互溝通的概述管道，以促進跨學科之間的合作研究與開發。

本文其餘部分的結構如下。我們首先討論兩方QKD技術在性能和安全性面向上的現狀（第貳章）。然後，我們討論在大規模多用戶網路中啟用QKD的幾種方法（第參章）。最後，我們總結經過研究分析之後的發現，並且討論當前的標準化和部署工作，同時列出在網際網路上基於QKD的長期安全通信時，所面臨實際上需要解決的挑戰（第肆章）。

二、兩方之間的 QKD

在本章中，我們將描述點對點QKD技術的最新發展。我們首先解釋量子物理學的相關概念。然後，我們對主要的QKD協定進行分類和總結。接下來，我們比較協定的性能，並討論安全性模型以及對協定上所實施的攻擊。

（一）量子物理學

QKD協定背景係建立在量子物理學中的兩個基本定律之上：1. 量子物件在測量後的典型狀態變化，即波函數崩潰；以及，2. 不可能在不干擾原始粒子狀態的情況下複製量子狀態，即無克隆定理。QKD協定的安全性取決於這樣一個事實，即潛在的竊聽者通過其攻擊過程來揭示自己。竊聽會給交換量子狀態帶來不可避免的錯誤，這些錯誤隨後可以由通信方檢測到。每個QKD協定的核心都在於量子狀態的交換。在現代的光通信系統中，在一定的時間間隔內，典型位元（bits）被編碼成不存在（0）或存在（1）的「經典」雷射脈衝。但是，QKD使用量子位元（qubits），也就是一次能夠攜帶不止一個經典位元信息的量子物件，因此表現出古典物理學無法描述的行為。

基本上，完全不同的物理系統可以作為量子位元：例如，單光子、弱雷射脈衝、福克態（Fock state）和光壓縮態、半自旋量子系統（當作捕獲原子和離子）、或腔耦合里德堡原子（Rydberg atom）。量子信息可以使用不同類型可觀測值（即量子位的物理可測量屬性）來被編碼。也就是說，信息可以使用下列量測物理屬性來編碼，例如極化、相位、單光子的創建時間、或者多光子同調雷射態的正交、相位和幅度。

（二）共同功能

現在，我們將概述隨後討論到的所有QKD協定的共同功能。這些協定包含原始金鑰分配階段和後處理階段。

1. 原始金鑰分配

每個QKD協定運作的第一個步驟，是利用特殊量子通道來傳輸qubit，以便建立原始金鑰。理想地，由於量子位元與傳輸介質的相互作用（例如，玻璃纖維中的極化改變），這種通道不應改變編碼信息。為了成功分配金鑰，失真或扭曲必須保持低階水平，因為量子位元狀態的干擾也可能是由攻擊者所造成。

在原始金鑰分配階段，通信夥伴通過量子通道來交換量子位元。一旦接收到量子位元，接收者就對可觀察到的量子位元進行測量，並根據選取QKD協定的確定過程，從其接收結果中解碼出典型位元。之後，通信夥伴使用典型鑑定管道來諮商他們的測量。此一過程在每個QKD協定都是特定的，最後得出的結果就是原始金鑰。如果他們推斷出攻擊者可能嚴重干擾了量子信息，則必須重新開始金鑰分配程序。

2. 後處理

在原始金鑰分配階段之後，每個通信夥伴都獲得一個單獨原始金鑰。由於實驗的不完美，具備完全相關性的金鑰是不可能的，因此糾錯編碼（例如，低密度同位元檢查、串接（cascade）或極性（polar）等編碼）必須執行。之後，隱私放大程式被應用，以便從糾錯後的原始金鑰生成最終金鑰。在原始金鑰交換或錯誤校正過程中，即使無法完全防範竊聽者看到少量位元，但這仍可確保安全性。最後，將生成的秘密金鑰用作一次性密碼或高級加密標準（Advanced Encryption Standard, AES）加密的金鑰。

如上所述，QKD需要在通信夥伴之間進行身份驗證的經典通道。這樣的認證通道可以使用簡短的共享密碼或典型的安全連接（例如，傳輸線系統（Transmission Line System, TLS）來建立。最近，基於量子物理學定律實現認證通道方法已被提出。我們認為，在QKD協定執行時，只有使用已驗證通道，才能保持QKD協定的安全。

（三）協定家族

實現QKD協定的方式有很多種。為了方便分析，我們以信息製備（製備和測量或基於糾纏）的方式和變量（離散變量、連續變量或分佈式相位參考）的類型對它們進行分類。

1. 按信息製備方法的分類

我們根據量子態製備方法來描述QKD協定的類別。

(1) 製備和測量：在製備和測量（Prepare-and-Measure, PaM）協定（圖1a）中，發送方“Alice”主動製備信息載體，並對其內信息進行編碼，然後將其發送給一個或多個接收者。該類協定的傑出代表作是由Bennett和Brassard所開發的協定（BB84）或延生的協定。

(2) 基於糾纏：在基於糾纏（Entanglement-based, EB）的協定中（圖1b），「源」產生糾纏粒子—多個量子物件，它們可以違反局部現實的相關量子態來描述。根據量子力學糾纏理論：對一個物件的某些可觀察到的測量會立即影響另一個物件的狀態。其後，糾纏粒子狀態被通信對方測量。在此類通信過程中，為了驗證接收到的粒子的糾纏，並進行竊聽檢測，於是施行貝爾測試（Bell test）。如圖1（b）所示，通過粒子之間的非經典相關性，可以確保「愛麗絲」和「鮑

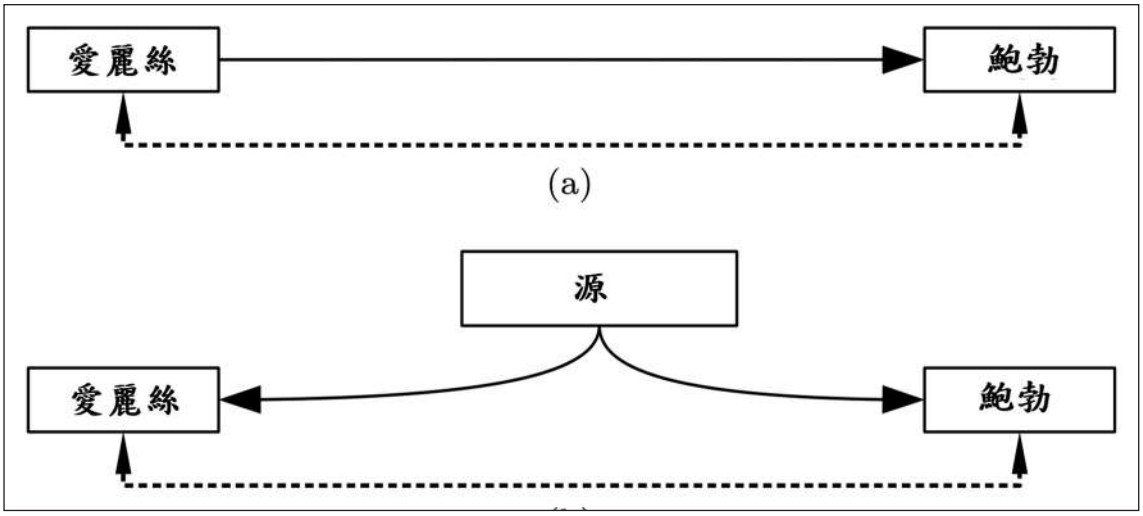


圖 1 （a）製備和測量協定（例如 BB84），（b）基於糾纏的協定（例如 E91）。實線表示量子通道，虛線表示已認證的經典通道。箭頭表示信息流動的方向。

勃」無需直接交換信息即可擁有一個共同秘密。該類協定的傑出代表作是Ekert所開發的E91協定。

2. 按變量種類分類

QKD協定也可以按照信息載體的變量種類來進行分類。

(1) 離散變量（DV）

對於具有離散變量（Discrete Variable, VD）的協定，其中所攜帶可觀察信息值是離散的。最常見的是，單光子或弱雷射脈衝被用來傳輸量子位元。原則上，半自旋粒子（例如電子）也可以使用，但是這種粒子的傳輸有問題。該信息可以在時間、極化、自旋、相位中編碼。源可以PaM系統或基於糾纏系統來實現。DV協定需要昂貴且效率低的單光子源和檢測設備。

(2) 連續變量（CV）

連續變量（Continuous Variable, CV）協定是DV協定的替代方案，該協定使用許多粒子狀態（例如，光的壓縮狀態或相關狀態）來代替量子位元（例如，單光子和弱雷射脈衝）。因此，其中沒有檢測到離散變量（例如，0和1），但是光正交分量的連續光譜被觀察到（例如，通過同差技術（homodyne technique）。CV協定中檢測的量子狀態也不同於DV協定。在此，針對量子通信的標準組件被使用。例如，採用同差或外差檢測方案。這比檢測單光子要快得多，效率也更高。大多數現有的CV協定都可以當作PaM變體或EB變體來實施。

(3) 分佈式相位參考（DPR）

QKD協定的第三系列，稱為分佈式相位參考（Distributed Phase Reference, DPR）協定，其使用離散變量進行信息編碼，但同時也觀察後續脈衝的相關性

來確保安全。其中，位元可以按脈衝對的順序或後續脈衝的相位編碼。兩種方法也可以組合成二維QKD協定，其中幾個位元可以兩個後續脈衝編碼。DPR協定需要與DV協定類似的設備，即單光子源和檢測器。

（四）運行和績效

前述QKD協定可以在自由空間上或玻璃纖維中運行。不同秘密金鑰生成速率和有效距離可以獲得，這理論上取決於通信介質的種類。DV協定典型金鑰在幾十公里距離內的最高速率為幾kbit s^{-1}，而在大約100 km距離內的最高速率為若干bit s^{-1}（參見表1）。CV協定金鑰速率（key rate）與DV協定不相上下，其在幾公里通道和最大150 km有效距離內的數值高達10 kbit s^{-1}。在表1中，我們列出基於光纖的QKD技術的性能指標。對於所有QKD協定，由於量子通道中的雜訊和損耗，金鑰速率隨著通信距離增加而呈指數下降。研究結果顯示，QKD最大可達金鑰速率取決於通道損耗的函數限制，後者是唯一僅有的影響參數。另一方面，在自由空間的QKD系統可以達到更遠的距離，這是因為空氣的衰減係數遠小於光纖。最近，基於衛星的QKD技術已達歷史里程碑。在2017年，通過衛星以DV為基礎的量子金鑰分配已經在1200 km的距離上以1 kbit s^{-1}的金鑰速率進行演練。在2018年，在奧地利格拉茨和中國上海之間，通過衛星的洲際QKD也進行同樣演練。由此，專家發現標準電信衛星能夠實現基於CV的QKD協定。

除了金鑰速率和距離的因素之外，系統與現有通信基礎結構的兼容性也很重要。例如，DV QKD協定需要昂貴的單光子檢測器、單光子或糾纏光子源以及精確的時間測量設備。同時，金鑰分配的典型分配距離和速率僅允許在都會網路區域內使用。單光子源的缺陷使光子數分裂攻擊成為可能（請參閱第2.5節）。

另一類更新的協定是CV協定，由於不需要單光子源或單光子檢測器，因此它可以提供更高的秘密金鑰速率和更低的實現成本，

表 1　點對點 QKD 技術的性能比較

實驗	類型	100 公里處的鍵速	最大距離
Boaron [1]	PaM-DPR	14 kbit s^{-1}	421 km
Yin [2]	EB-DV	2 kbit s^{-1}	404 km
Korzh [3]	PaM-DPR	10 kbit s^{-1}	307 km
Wang [4]	PaM-DPR	20 kbit s^{-1}	260 km
Stucki [5]	PaM-DPR	6 kbit s^{-1}	250 km
Grünenfelder [6]	PaM-DV	50 kbit s^{-1}	200 km
Huang [7]	PaM-CV	500 bit s^{-1}	100 km
Honjo [8]	EB-DV	0.59 bit s^{-1}	100 km
Jouguet [9]	EB-CV	200 bit s^{-1}（80 km）	80 km

表 2　QKD 協定系列的定性比較

	部署	鍵速	距離	成本效益
DV	+	+	+	+
CV	+	++	+	++
DPR	++	++	++	+

並且可以使用光通信的標準組件。最近的一項實驗證實，即使在相對靜止衛星，CV協定也可以應用標準光通信，從而實現更長的通信距離。但是，相對於DV協定（參見第2.5節），CV協定對旁通道攻擊的安全性防護較少。

DPR協定目前在最大金鑰分配距離方面可達到最佳性能（表1）。此外，像DPR協定一樣，多維QKD方案允許在單個qubit中傳輸多於一位元的經典信息。

針對所有協定類型，專家正在研究如何將量子通道和經典通道一體成型到單個玻璃纖維當中。因為，在如此設置下，量子位元與經典通信脈衝可以不同波長同時傳輸，以避免串擾（cross-talk），從而降低QKD部署成本。表2總結不同QKD協定系列的觀察結果。

（五）安全性

如果在協定執行後，通信夥伴「愛麗絲」和「鮑勃」知道一個公用金鑰，並且如果通道上的竊聽者「夏娃」無法獲得有關該金鑰的任何信息，則雙方可以認定該QKD協定是安全的。現在，我們總結有關分析QKD協定安全性的研究，並討論QKD實行時所遭遇的理論和實際攻擊。

1. 理論分析

在分析QKD協定安全性時，我們目標在於證明對抗可能擁有完善技術的強大攻擊者「夏娃」的絕對安全性。例如，夏娃可能能夠在任意持續時間內提取和存儲量子位元，並對它們執行任何量子運算或測量。然而，根據基本量子物理定律，由於非克隆定理，「夏娃」既不能完美地克隆也不能完美地測量系統的狀態並重新發送新粒子而不會留下痕跡。此外，我們通常假定在通信夥伴之間存在需要身份驗證的經典通道或較短的預共享金鑰。這些是保證數據完整性和真實性所必需的，因此「夏娃」不能執行模擬攻擊或更改發送的經典數據。我們強調，身份驗證通道不需要提供任何機密性保證。

如果「夏娃」分別測量每個量子位元，則這將是對QKD系統的個體攻擊。在集體攻擊中，「夏娃」仍然與每個量子位分別互動，但是她可以整體性地測量所有用於互動的輔助系統。如果允許「夏娃」同時攻擊幾個發送量子位元，則該攻擊稱為相關攻擊（coherent attack）。Renner等[10]證明各種QKD協定針對相關攻擊的安全性。

QKD安全保證建立在信息理論（information theory）之上，而非取決於計算難度設定。與當前使用的金鑰分配方法相比，這種基本上差異保證QKD的長期安全性。但是，在QKD安全保證中的理想化假設會導

致不完整的安全性模型。為了獲得有關施行上的實際安全保證，我們需要更多有關硬體和軟體的設定。如下所述，藉由不完善的設備和不安全的軟體進行攻擊是可能的。隨著各種協定的不同，對抗理論攻擊的安全保證也有所不同。儘管某些DV協定已被證明是無條件安全的[11, 12]，但CV和DPR協定的類似證據仍然缺乏。Diamanti，Kogias，Laudenbach等[13-15]概述有關CV協定的安全保證。Moroder等[16]則提供DPR協定的安全分析。

作為範例，我們討論BB84對抗攔截重發（intercept-resend）攻擊的安全性，這是一個體攻擊案例。在此攻擊中，「夏娃」隨機選擇一個基底（basis）並檢測粒子狀態。她有50%的可能性選擇了錯誤的基底。之後，針對檢測量子位元，她製備替換品，並發送給「鮑勃」。這樣，她在「鮑勃」金鑰匙引發25%的QBER（Quantum Bit Error Rate）。但是，Shor和Preskill研究結果證明，如果QBER超過11%，則「愛麗絲」和「鮑勃」將知道金鑰分配已受到損害。在其他策略中，例如，使用不是根據每個量子位元或中間基底的檢測，則對「夏娃」不利，因為她獲得較少金鑰信息。在基於糾纏協定的情況下，在量子位元測量過程中，「夏娃」破壞粒子之間的非經典相關性，造成在金鑰處理過程中Bell測試的失敗。總而言之，針對QKD協定的安全性保證，專家證明如果攻擊者試圖竊聽網路發送的量子狀態，則會暴露自己。與傳統的金鑰分配相比，這就是為什麼QKD會如此強大的原因。

2. 實施時的攻擊

即使是證明為無條件安全的協定，旁通道和不完善設置也可能導致漏洞。因此，實施QKD協定需要擴展到周邊環境的安全性分析。特別需要考量的是，旁通道的脆弱性和設置的不完美，最有可能必須採取的措施是安全性證明。

舉例來說，建立客製化單光子數並不繁瑣。在大多數情況下，脈衝內具有1個以上的光子是很有可能的。因此，如果弱雷射脈衝有多個光子，「夏娃」可用分束器（beam splitter）拾取若干光子，以獲得信息而不被注意。這類攻擊稱為光子數分裂攻擊。作為對策，專家修改協定，例如，添加誘餌狀態（decoy state）到BB84，並開發新協定，例如，SARG04。

利用特洛伊木馬攻擊可以劫持量子通道，因此，有關「愛麗絲」和「鮑勃」設置的信息可被提取，甚至可被操縱。例如，如果「夏娃」實時獲得有關「愛麗絲」選擇基底的信息，那麼她就可以進行成功的攔截-重發攻擊，因為她不再局限於隨機猜測基底。

另一種可能性是「鮑勃」檢測器通過量子通道所產生的明亮照明，使得攻擊者得以控制「鮑勃」的測量結果。Lydersen等[17]描述攻擊者如何成功獲取完整金鑰並且不被注意的細節。

至關重要的是，所有這些攻擊都必須在物理上和實際的金鑰分配過程中進行，這是QKD協定與經典金鑰分配協定的根本上差別，傳統金鑰分配協定的安全性可能會因分配時的未知攻擊而被破壞。

3. 與設備無關的QKD

與設備無關（device-independent）的QKD是一種方法，旨在擺脫對自己設置硬體信任的假設。因此，基本上應該通過類似於

E91協定的量子相關測試（即Bell測試）來評估整個QKD系統的安全性。由於我們很難實現純粹與設備無關的協定，因此專家已經開發了與測量設備無關的QKD協定。

三、大型網路中的 QKD

到目前為止，我們已經討論了QKD技術，該技術使用環境為，在短距離內通過專用量子通道直接連接兩方通信。然而，在大規模通信網路（例如，網際網路）中，任何兩個參與者之間通常不存在專用通信通道。此外，通信夥伴之間的物理距離可能很大，而且通常需要低延遲和高吞吐量功能。在網際網路上，業者通常使用網路集線器（network hub）來解決任何兩方皆能相互連接和通信的問題（圖2）。為此，業者通常使用諸如邊界閘道協定（Border Gateway Protocol, BGP）之類的路由協定。但是，當前集線器的體系結構和協定並不支持QKD，因此，其需要新技術以便在大規模網路中實現QKD。這涉及QKD集線器的體系結構和相應路由協定的開發。另外，QKD體系結構與應用程序層之間介面也需要定義。

在下文中，我們討論實現QKD網路的不同方法，並將它們相互比較。QKD集線器可以使用標準電信技術來實現，例如，波分-或時分-多工傳輸，或有緣光開關（active optical switching）。然而，如第貳章所述，這些方法不能克服QKD中的距離限制。但是，只有中繼器（repeater）可擴展QKD連接的有效範圍。目前有兩種中繼器正在開發：信任中繼器（trusted repeater）和量子中繼器（quantum repeater），它們支持兩種根本不同類型的QKD網路：信任節點網路和全量

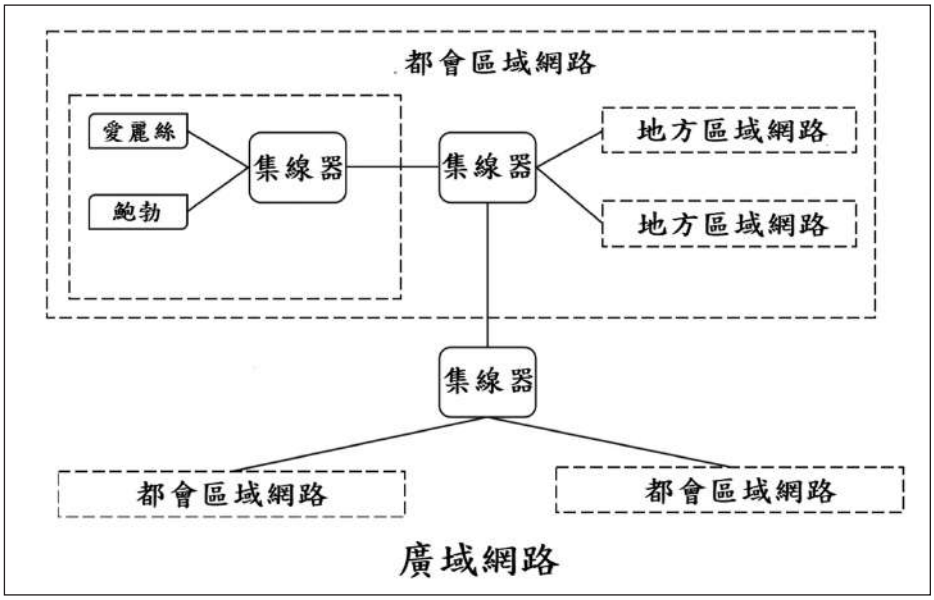


圖 2　通過集線器連接的網際網路的各個網路層

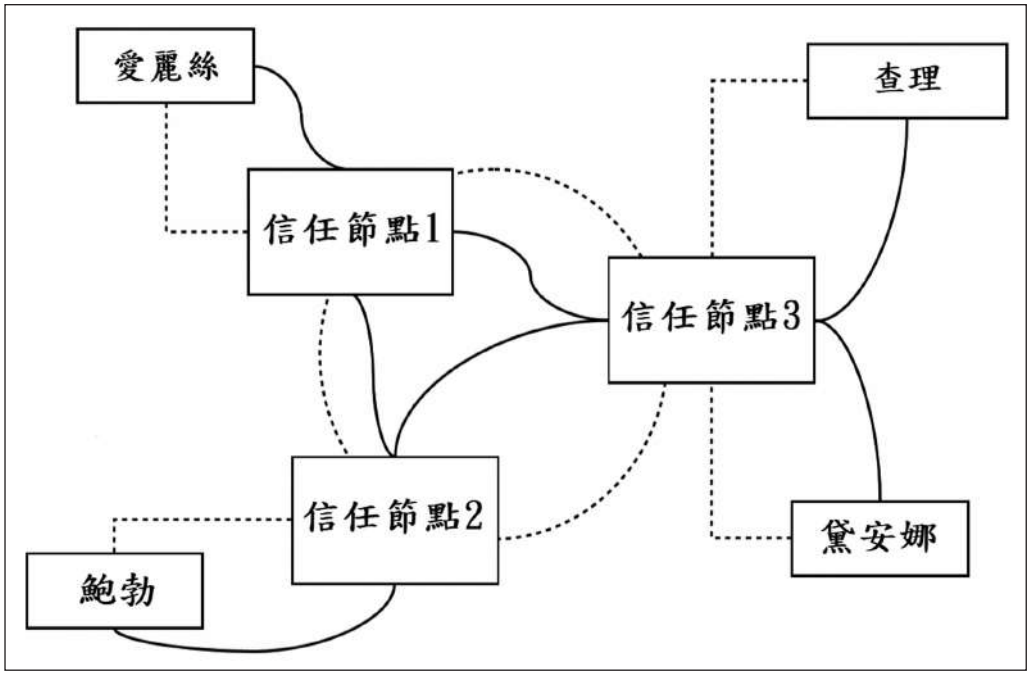


圖 3　與信任節點的 QKD 網路鏈接的方案。實線是量子通道，虛線表示經典通道。

子網路。

（一）信任節點網路

信任節點（trusted node）方法需要一連串的中繼器，該中繼器藉兩方QKD系統相互連接，並且一步接一步，將金鑰彼此中繼。因此，每個中繼器都知道金鑰，所以節點必須是安全且可信賴。這種方法已經研究十年。突出的例子包括SECOQC網路，東京QKD網路。

信任節點網路技術已經跨出研發階段，目前處於商業成功門檻。在中國，一條長2000公里連接北京到濟南、合肥和上海的線路已於2017年完成。電信運營商SK Telecom正在韓國實施基於信任節點的網路，計劃完成日期為2020年。

詳細說明信任節點網路的運作步驟如下。每個通信夥伴「愛麗絲」和「鮑勃」連接到附近的信任節點，該處的多個信任節點也相互連接（圖3）。為了使「愛麗絲」和「鮑勃」之間建立安全連接，業者使用路由和負載平衡協定，穿過信任節點網路層，建立彼此之間的安全路徑。然後，他們與各自的信任節點交換金鑰，不同信任節點還彼此交換金鑰。最後，從通信路徑生成的金鑰材料中，通信夥伴衍生出秘密金鑰。路由建立和金鑰衍生過程可由額外網路層和所謂金鑰管理服務來執行，這些服務獨立執行金鑰生成，並將最終秘密金鑰移交給客戶。

基於信任節點的網路克服了當前QKD技術的典型距離限制，並允許通過網路輕鬆靈活地進行通信路徑路由。假設有足夠多的信任節點，則金鑰可以中繼幾次，並且QKD距離限制僅針對每個金鑰中繼單獨考慮。此外，在一條通信路徑中可以使用不同類型的QKD協定。另外，大量工作已經致力於開發必要的路由協定和應用介面。基於信任節點的集線器的主要缺點在於，它們不提供嚴格的端到端安全性。實際上，量子狀態在每個集線器中都被破壞，並且信任中繼節點無法確保傳輸數據的機密性。但是，既使在某些節點有損壞的情況下，基於信任節點的網路仍然可以確保安全性。

（二）全量子網路

基於量子集線器和中繼器的全量子網路（all-quantum network），可在兩個遙遠的各方之間分配量子信息，從而實現真正端到端的安全性。從「愛麗絲」到「鮑勃」，量子信息載體分配糾纏給通信方。這種沒有任何失真或檢測的通信是透過傳輸光子來實現，例如它們之間的光-電-光轉換。因此，要達成高安全性的目標很難。其中網路協定必須謹慎選擇，因為它必須在整個網路實施，這對金鑰分配性能具有決定性的影響。該網路協定應該對所有已知的攻擊類型和稀疏的旁通道提供最佳安全性，同時也應具有成本效益和可擴展性等諸特徵。

在具有不同拓撲結構和使用不同QKD協定的都會區域網路（metropolitan area network）中，許多實驗已經證明全量子網路的可行性，例如：

- 圓形網路：因為光子僅注入網路中的一個位置，在所有參與者共享同一量子通道的情況下，因此減少雙方之間的有效距離，進而使得應用在大多數現實世界中的設置變得不那麼有趣。

- 具有PaM的星形網路：首先，每個通信者都配有量子狀態源和量子狀態檢測器等設備。然後，通過位於網路中心的量子路由器來實現量子粒子分配，並使用一種滿足量子態無失真要求的標準電信技術，例如，有源光開關或時分多工傳輸。在交換量子位元之後，建立的安全金鑰與兩方傳輸情況相同。然而，網路的可擴展性受到量子路由器可以處理通道數的限制。此外，該系統的成本很高，因為每個新接收者都必須建立源設備和檢測器。

- 帶有EB的星形網路：此方法的工作原理與典型基於兩方糾纏的QKD協定相似，但涉及的通信方數目擴展到兩個以上（圖4）。該方案具有挑戰性的部分是設計一個糾纏對源，即一個量子集線器，它建立與這些技術兼容的量子位元，並包含用於路由的所需硬體。與先前描述的網路設計相比，其中一個好處是每個接收者僅需要一個量子狀態檢測器，而無需量子狀態源。另外，由於源位於中央，所以通信雙方之間的有效距離更高。一些實驗已經證實在電信波長下通過波分多工（wave length division multiplexing）在玻璃纖維中進行糾纏分配的可行性，並且這種量子中心源的第一個實現已經完成。但是，這些設備的性能必須提高，並且需要在更大的現場測試中進行評估。這種量子集線器協定具

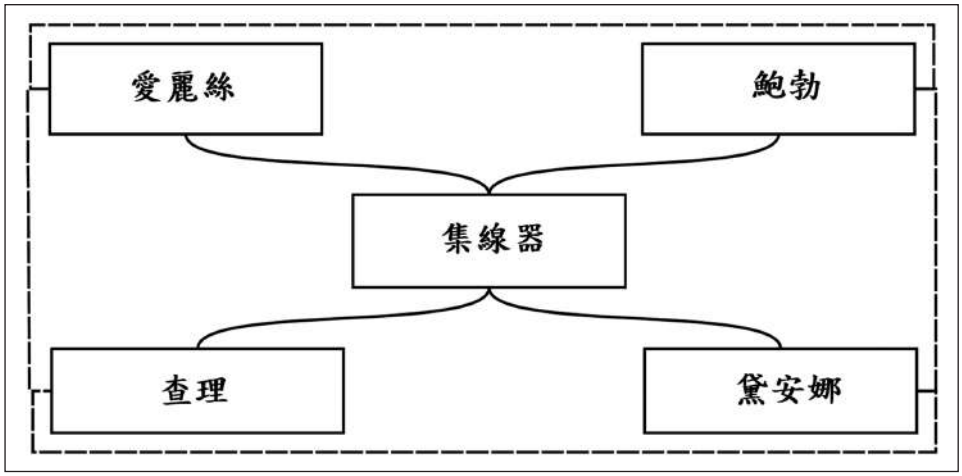


圖 4　星形 QKD 網路的方案。實線是量子通道，虛線是經典通道。

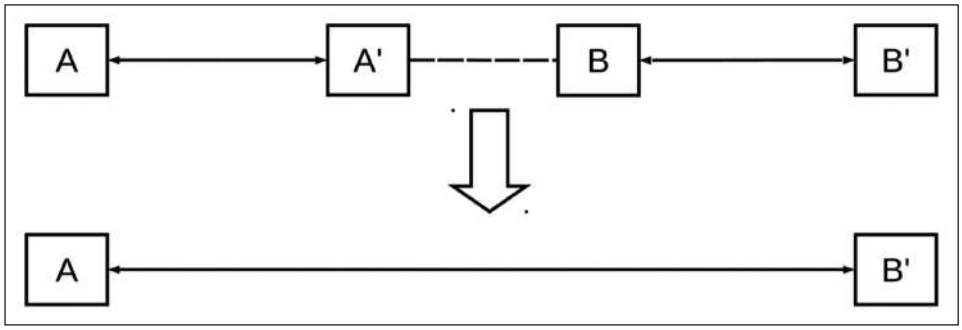


圖 5　量子中繼器的示意圖結構

有與典型上基於糾纏協定相同的優點和缺點。它們允許端到端安全金鑰的交換，但可達到的距離僅有幾十公里，如果沒有諸如量子中繼器之類的附加設備。主動或被動路由的方法也限制了連接接收者的最大數量，從而將這種設備限制在都會區域網路中。

（三）克服距離限制

如上所述，為了克服距離限制，專家已經提出量子中繼器，將糾纏粒子以更長的距離分配，如圖5所示。首先，將所需距離劃分為較短間隔。然後，在每個間隔中，建立糾纏粒子A-A'和B-B'，以標準方式共享糾纏，並將它們分配到間隔末端，其中光子A'和B共同測量，例如使用貝爾測量。該測量的一些經典信息分配給剩餘一對粒子A和B'，使得它們之間的纏結得以建立。此過程稱為糾纏交換。由於時間是此過程的關鍵因素，因此光子必須存儲在量子存儲器（quantum memory），在該存儲器中，量子信息可以保

留一定的時間，並且可以根據需要以高度保真進行檢索。所需時間的最高容量從幾微秒到幾秒不等。因此，存儲時間應要足夠長，才方便與最近節點進行粒子交換、糾纏交換、以及存儲和檢索存儲器中的量子位元。而且，應該提供對存儲在量子存儲器中的每個單一粒子的存取功能。另外，同時存儲多少粒子取決於所使用QKD協定的類型，數目範圍從一千到幾千。當前量子存儲技術允許同時存儲665個光量子狀態，最長存儲時間可達50 μs，而單個光子則最多可存儲幾個小時。為了讓QKD網路獲得更高的吞吐量，這些數量和時間還需要改善。

由於量子態的去相干（decoherence），以及其他量子雜訊，量子中繼器對通信通道引入額外雜訊。因此，量子和經典糾錯算法正在開發，從而開拓更廣的研究領域。如前所述，針對兩方通信系統，金鑰速率存在上限，該上限是通道雜訊的函數。這個基本限制也適用於全量子網路。針對具有量子中繼器鏈的網路，這些限制已在[18-19]研究。因此，中繼器鏈內的錯誤傳播也被考慮進來，這顯示這種網路的可行性。

結合量子集線器和量子中繼器，不僅可以解決距離限制問題，而且可以解決僅支持少量客戶端問題。接收器內的糾纏透過不同集線器交換（見圖6），在任意距離之下，我們可以建立擴展性全量子網路。量子中繼器的整合設置尚未完成，儘管已有不同財團和歐盟支持。

（四）路由

由於邏輯信息流與物理粒子分配的不平行，穿過全量子網路的信息路由非常複雜。在圖6示例中，我們可以使用不同方式來分

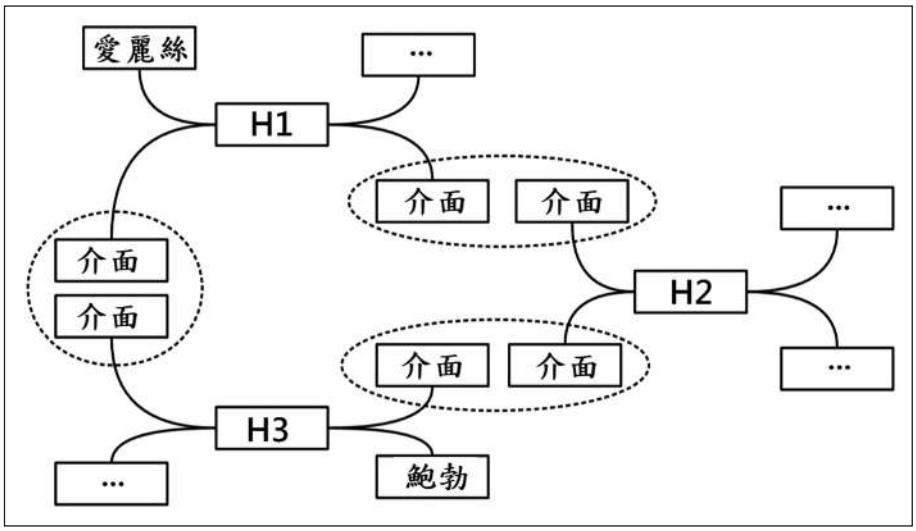


圖 6　全量子網路的示意圖結構。圓圈表示糾纏交換設備與不同集線器之間介面內的量子存儲器結合在一起。經典頻道未顯示。

表 3　信任節點網路和全量子網路之間的比較

	部署狀態	性能	距離靈活性	協定靈活性	成本效益	安全性
信任節點網路	+	+	+	+	+	-
全量子網路	-	-	-	-	-	+

註：在所有面向當中，除了安全性之外，信任節點網路皆優於全量子網路。

配「愛麗絲」和「鮑勃」之間的糾纏粒子。雖然集線器H1和H3之間的直接路徑可以進行一次交換，但是跨越集線器H1、H2和H3的其它路徑應該可以提供更高的傳輸速率，因為那些集線器彼此可能更為靠近。因此，我們需要BGP量子類比，以建立「愛麗絲」和「鮑勃」之間快速的金鑰交換和連接。這需要找到最佳的分配路徑，並且，在最終通信方之間，對量子中心和量子中繼器的分配和時序進行管理。然而，這樣的協定目前尚未開發。

（五）安全性

結合已開發QKD協定與量子中繼器，需要對此類網路進行複雜的安全性分析。在這方面，Rass等[20]開發一個用於量子網路中路由優化的框架，該框架允許找到最安全的網路路由。此外，Lee等[21]最近證實，在多節點網路中存在貝爾不等式，從此實現設備獨立安全性。與兩方系統及經典優化問題一樣，整體性能和安全性也要考慮在內，多節點網路系統的安全性是由量子物件的非局部相關性來確保。但是，最佳拓撲仍然取決於量子中繼器的潛力。

四、結論與展望

最後，我們討論信任節點和全量子網路的當前狀態，然後得出在大規模網路中實現QKD所面臨的開放性挑戰。

（一）現狀討論

在表3中，我們可以找到信任節點網路和全量子網路的比較。接下來，我們將詳細討論比較的標準。

部署狀態：在實際部署中，基於信任節點的網路已不再處於研究階段，而是處於商業成功邊緣。目前，所有關鍵硬體問題已經解決，並且成本優化和關鍵管理層逐漸步入實施階段。因此，未來迫切需要將信任節點最大程度整合到經典網路系統，並建立綜合整體網路的最佳路由。至於有關全量子網路，由於需要客製化設備，因此在未來十到二十年內，不太可能實現迅速的商業化。

性能：基本上，信任節點網路的性能取決於可用的最佳兩方QKD協定。另一方面，全量子網路的性能取決於諸如量子存儲器和量子中繼器之類的附加技術性能，因此，整體性能可能比預期更低，但是，由這些附加技術導致的確切性能損失尚未得到量化。

距離靈活性：信任節點方法主要優點在於，儘管以額外信任設定為代價，但QKD技術固有距離限制可以輕鬆克服。至於全量子

網路，克服距離限制仍是一大挑戰，它需要安裝量子路由器和量子存儲器（第3.2節）。而且，最近實驗結果顯示，即使折衷性方案使用量子中繼器，全量子網路也無法克服某些基本上的速率損失。

協定靈活性：至於協定選擇的靈活性，在信任節點方法中，同一網路中任何供應商的任何類型QKD協定和硬體允許混合使用。但是在全量子網路設計中，整個網路中的各個硬體組件必須彼此相互兼容。

成本效益：成本效益問題與先前討論的比較標準相關。由於構建量子集線器和中繼器需要量身訂製設置元件，因此導致全量子網路的設備昂貴。相反，信任節點網路的協定靈活性可降低成本。

安全性：信任節點網路的主要缺點在於，惟有中繼節點完全受信任時，傳輸數據的機密性才能被保證，因此，如果骨幹網路是由單一公司或政府控制，而它們同時也是該網路的主要用戶，則該方法就足夠安全。另一方面，全量子網路的主要優點在於，它們不需要上述前提條件，經由量子物理學定律和相應QKD設備的正確實施，它的信息傳輸安全性就可保證。

（二）標準化與部署

標準化和部署是QKD技術從研究過渡到實踐的兩項重要因素。在下文中，我們總結在這方面的過去及現在的工作努力。

首先，我們說明正在進行的QKD組件標準化活動。從2010年以來，ETSI（European Telecommunication Standard Institution）在QKD行業規範小組內持續實施激烈運作。特別是，ETSI最近發布一份有關量子密碼學實施安全性白皮書。ETSI規定面向包括：光學組件表徵、應用程序介面和金鑰傳遞API（application programming interface）。最近，ITU-T（國際電信聯盟電信標準化部門（International Telecommunications Union-Telecommunication Standardization Sector））第17研究組也開始進行標準化工作，除了QKD之外，重點項目包括量子隨機數發生器（quantum random number generator）。此外，最近在IETF（Internet Engineering Task Force）上，一個量子網際網路提議的研究小組被提出，但是，該小組的目前工作進度到僅止於早期草案的研議。

各種致力於QKD系統的部署已經實施，而目前也正在進行。在2000年代初期，先進國家和主要研究機構開始研究計畫，以部署原型QKD網路。最近，在東京QKD網路中，基於QKD的長期安全存儲系統的可行性已被證實。在商業領域中，一些公司正在開發和銷售QKD設備。特別是，若干重要電信公司最近開始投資QKD技術，同時也努力部署原型QKD系統。

（三）挑戰與展望

網際網路上的長期安全通信一直是人們企盼的目標，而當前QKD是實現此目標的最有希望候選技術。然而，大規模多用戶網路實現QKD，仍有若干技術挑戰存在。總而言之，我們展望未來列出以下重要挑戰：

- 候選QKD協定需要早日擬定，讓安全網路通信免於理論和實施攻擊。
- QKD協定的數據速率需要進一步提升，以便實現與傳統通信同等的數據速率。
- 安全連接協定（例如TLS）需要重新設計，以支持基於QKD的信息，從理論上來講，這就是安全的金鑰分配。
- 通信專家建議的實現量子中心方法必須實施，並且必須要有實用性證明。
- 量子中繼器的實用性需要在現實世界中加以展示，且它們如何與量子集線器結合必須驗證。至於量子中繼器所需的量子存儲技術，亦即，最大存儲能力和最大可能存儲時間都必須增加。
- 相關於全量子網路，具有高效路由的BGP量子類比必須開發。

除了這些挑戰之外，我們還希望有更多良好機會被創造。由於全量子網路在任何兩個節點之間分配了糾纏（即量子信息），因此除了網際網利通信的金鑰分配功能之外，它們尚可應用在其他項目。量子網際網路聯盟（Quantum Internet Alliance）規劃在2020年以前建立連接量子計算機的多節點全量子網路，因此屆時，有效且安全的聯合計算能力將被整體提升。

參考文獻

1. Boaron, A., et al.: Secure quantum key distribution over 421 km of optical fiber. Phys.Rev. Lett. 121 190502, 2018.
2. Yin, H.L.,et al.: Measurement-device-independent quantum key distribution over a 404 km optical fiber. Phys. Rev. Lett. 117 190501, 2016.
3. Korzh, B., et al.: Provably secure and practical quantum key distribution over 307 km of optical fibre. Nature Photonics 9 (3), 163-168, 2015.
4. Wang, S., et al.: 2 GHz clock quantum key distribution over 260 km of standard telecom fiber. Optics letters 37(6), 1008–1010, 2012.
5. Stucki, D.,et al.: Highrate, long-distance quantum key distribution over 250 km of ultralow loss fibres. New Journal of Physics 11(7), 075003, 2009.
6. Grünenfelder, F., Boaron, A., Rusca, D., Martin, A., Zbinden, H.: Simple and high-speed polarization-based QKD. Applied Physics Letters 112(5), 051108, 2018.
7. Huang, D., Huang, P., Lin, D., Zeng, G.: Long-distance continuous-variable quantum key distribution by controlling excess noise. Scientific reports 6, 2016.
8. Honjo, T., et al.: Long-distance entanglement-based quantum key distribution over optical fiber. Opt. Express 16(23), 19118-19126, 2008.
9. Jouguet, P., et al.: Experimental demonstration of long-distance continuous-variable quantum key distribution. Nature Photonics 7(5), 378-381, 2013.
10. Renner, R., Gisin, N., Kraus, B.: Information-theoretic security proof for quantum-key-distribution protocols. Physical Review A72(1), 012332, 2005.
11. Lo, H.K., Chau, H.F.: Unconditional security of quantum key distributionoverarbitrarilylongdistances. Science 283(5410), 2050-2056, 1999.
12. Shor, P.W., Preskill, J.: Simple proof of security of the BB84 quantum key distribution protocol. Physical Review Letters 85(2), 441, 2000.
13. Diamanti, E., Leverrier, A.: Distributing secret keys with quantum continuous variables: principle, security and implementations. Entropy 17(9),6072-609, 2015.
14. Kogias, I., Xiang, Y., He, Q., Adesso, G.: Unconditional security of entanglement-based continuous-variable quantum secret sharing. Physical Review A 95(1), 012315, 2017.
15. Laudenbach, F., et al.: Continuous-variable quantum key distribution with gaussian modulation—the theory of practical implementations. arXiv preprint tquant-ph/1703.09278, 2017.
16. Moroder, T., et al.: Security of Distributed-Phase-Reference Quantum Key Distribution. Phys. Rev. Lett. 109 260501, 2012.
17. Lydersen, L., et al.: Hacking commercial quantum cryptography systems by tailored bright illumination. Nature Photonics 4(10), 686-689, 2010.
18. Azuma, K., Mizutani, A., Lo, H.K.: Fundamental rate-loss trade-off for the quantum internet. Nature Communications 7 13523, 2016.
19. Guha, S., et al.: Rate-loss analysis of an efficient quantum repeater architecture. Phys. Rev. A 92 022357, 2015.
20. Rass, S., Schartner, P.: Security in quantum networks as an optimization problem. In: ARES2009. pp.493-498. IEEE, 2009.
21. Lee, C.M., Hoban, M.J.: Towards device-independent information processing on general quantum networks. Phys. Rev. Lett. 120 020504, 2018.

中鋼公司
STEEL WITH YOU
www.csc.com.tw

平交道安全宣導

保命三步驟 Life-saving three steps

按 Press　推 Push　跑 Run

平交道警鈴響起，閃光號誌閃亮
應立即停止通過

闖越平交道
最高罰款 90,000元
並吊銷駕照

臺鐵官網

平交道安全專區

交通部道安委員會
Road Traffic Safety Committee,MOTC

交通部臺灣鐵路管理局
Taiwan Railways Administration,MOTC

關心您 廣告

CTCI 中鼎集團

CTCI 中鼎集團 (TWSE: 9933、TPEx: 5209、TPEx: 6803) 為國際級工程統包公司，承攬多元化重大工程。創立於 1979 年，總部位於台灣台北市，業務範圍包括煉油石化、電力、環境、交通、一般工業等工程領域，致力提供全球最值得信賴的工程設計、採購、製造、建造施工、試車操作及專案管理等服務項目。於全球超過 15 個國家地區成立約 40 家關係企業，集團員工總數超過 7,000 人，並入選道瓊永續指數 (The Dow Jones Sustainability Indices, DJSI)。

CTCI
Discover Reliable

業務領域

- 煉油石化
- 電力
- 環境
- 交通
- 一般工業

服務內容

- 專案管理
- 可行性研究及前端工程設計
- 工程設計
- 工程採購
- 設備製造
- 工程建造與維修
- 工廠試車
- 智能解決方案
- 自動化控制
- 無塵室與機電配管工程
- 智能頂進工法
- 地盤冷凍工法
- 操作及維護

產品項目

- 設備製造
- 化學添加劑
- 智慧化能源管理系統

CTCI
中鼎集團

11155 台北市中山北路六段89號
Tel: (886)2-2833-9999
Fax: (886)2-2833-8833

www.ctci.com

CTCI EF
財團法人中鼎教育基金會

10571台北市南京東路五段188號2樓之2
Tel: (886)2-2769-8599
Fax: (886)2-2769-9299

www.ctcief.org