

台灣風電與太陽光電在短中期取代核電的可行性

蕭子訓、陳中舜、葛復光

核能研究所-能源經濟及策略研究中心

2014/09

由於台灣自主能源極度缺乏，且能源供給仍以化石能源為主，因此任何低碳且可穩定供給的能源，對我國皆至關重要。為此，原能會長期以來，即致力於確保每部核電機組的安全操作。而為因應政府『綠能低碳』、『穩健減核』等政策，如風電、太陽光電亦是不可或缺之重要選項。本文即針對台灣短、中期內，以太陽光電與離岸風電取代核電的經濟及技術可行性以及須負擔之代價，就(1)用地取得、(2)電網調度及(3)整體成本效益提出以下說明。

1. 用地取得

目前世界各國在再生能源發展上，皆是以積極投入風電與太陽光電為重點，而參考 2013 年能源局公布的實績資料如表 1 估算，未來我國若欲以風電或太陽光電取代核一廠至核四廠(合計年發電量 635 億度)，預估共需 1.8~4.2 個台北市大小的土地面積。

表 1.核電與離岸風電、太陽光電土地使用比較

	核能發電	離岸風電	太陽光電
2013 年既有裝置容量(MW)	5144	614 ¹ _(陸域)	392
2013 年發電量(億度)	416.4	16.4 ¹ _(陸域)	3.4
取代核能預估裝置量(MW)	7,844 8 部機組	18120 3,624 支(5MW)	48,319 1,611 萬個屋頂 ²
理想容量因子(%)	92.4 _(2013 實機)	40	15
單位面積裝置量(MW/km ²)	604	16	100
發 635 億度電所需面積(km ²)	13 (0.05 個台北市)	1,151 (4.2 個台北市)	483 (1.8 個台北市)

¹ 2013 年台灣尚無離岸風機

² 台灣屋頂估計約 800 萬戶，可用於太陽光電的估計約 400 萬戶，遠低於所需屋頂數量。

備註 1: 根據日本原燃株式會社專務田中治邦的估算,台灣 8 部核機組 40 年間高階核廢料約須四個大安森林公園面積 (1 km^2) 的處置場即可儲存。〈日本核電再出發論壇 (2014/4/27)〉

備註 2: 假設 1 個屋頂所占面積為 30 m^2 (資料來源: 兩岸再生能源領域發展與合作-台灣觀點, 工研院綠能所 胡耀祖, 2013)

備註 3: 根據千架海陸風力機-風力資訊整合平台的內容,風機與盛行風垂直方向之風力發電機間距離約為 3~5 倍葉輪直徑,平行於盛行風風向之風力發電機排距約為 4~6 倍葉輪直徑,本文取其中間值[4 倍葉輪直徑(垂直盛行風) $\times$ 5 倍葉輪直徑(平行盛行風)]估算風力機所需佔地面積

資料來源:能源局-能源統計手冊 2013, NREL-5MW 風力機, 千架海陸風力機-風力資訊整合平台, 核能研究所太陽能專案, 台灣電力公司, 中華民國統計資訊網。

然考慮到我國地狹人稠的特性,且由於目前陸域風場已趨於飽和,可預期的未來風場開發將會以離岸風場為主。根據調查,台灣海峽擁有世界一級的離岸風場³,長遠來看應能提供相當可觀的電力。但短期內要將數千支離岸風機部署於海面,以達到替代核電的目標,尚需努力克服航道安全、漁業生態、海事工程及後續維修等困難。而在太陽光電廠的開發方面,由於大規模且長期取得空地使用權確屬不易,故現行政策以鼓勵先屋頂後地面的方式裝設。但若想完全取代核電,全台屋頂的面積並不足夠,未來仍必須取得其他形式的大面積用地。建議可優先考慮南部的休耕地,但仍需評估其設備投資與土地成本。

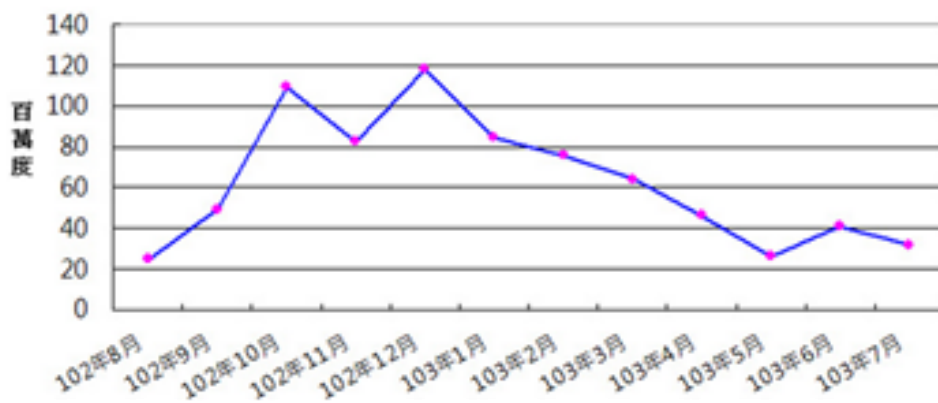
2. 電網調度

我國風力資源與太陽光電資源分佈並不平均,儘管已透過各類先進技術的引進加以改善,但以目前的國際技術水平仍將所費不貲且恐力有未逮。就風電而言,目前我國正積極推動離岸風機示範計畫,可預期未來為能有效處理離岸風電全負載時的電力輸出,必須進行大規模海底電纜與海上變電站的投資。倘若電網鋪設不及,將會造成電力無法併網,此亦為目前德國風力發展受阻的主因之一。而在太陽光電方面,由於南部太陽光電發電效益較高(南部全年平均每日有效日照數可達 4 小時、北部為 2.5 小時),故太陽光電發電大多建於南部,惟台灣主要缺電位於北部,為強化南北供電的安全,尚需增設更多跨區的中、長程輸電網絡。以台電為滿足

³ 英國 4C offshore, <http://www.4coffshore.com/offshorewind/>

目前南電北送需要的第六、七輸電計畫為例，從民國 90 年至 104 年間，預計需投資 5,655 億元在全國電網架設與維護上，該金額已超過原可就近填補北部電力缺口的龍門電廠造價。

未來一旦大規模使用風電與太陽光電後，其間歇供電的特性仍是必須設法解決之課題(圖 1)。台灣風力發電主要集中在東北季風時節，對於夏季用電高峰助益有限，且太陽光電夜間無法供電；因此，供電時間如何與電力需求取得平衡，已成為各國在再生能源部署與調度上的一項『藝術工程』。另一方面，台灣為孤島電網，不像德國可透過歐洲電網與鄰國相互進行電力調度，為彌補風電或是太陽光電預期或非預期性的降載，預估仍須再加蓋至少兩座大潭等級⁴的天然氣發電廠提供備載容量。另為解決風電與太陽光電大規模部署後，瞬間達到全負載發電所可能產生的大量多餘電力，有必要籌建相當的儲能設備，甚或架構跨國電網，以避免系統因卸載不及而導致跳脫的風險，這些在現實上都仍有諸多困難有待突破。



資料來源：台電公司

圖 1. 台電 102 年 8 月~103 年 7 月之風力發電量

3. 整體成本效益

依據政府再生能源既有規劃及可開發潛力評估，其分析結果如表 2 所示。於現階段規劃，假設 2030 年時所有發電設備皆能順利完工的情況下，年發電量為 186.6 億度，約為核電三成的發電量，而總建廠投資金額達到 7,000 億元。若採更積極開發的方式，則需將台南、台東、高雄及屏東的共 253.8 平方公里的休耕地，皆移做太陽光電發電之用；同時開發水深 50 m 以

⁴ 大潭火力發電廠擁有天然氣複環機組 6 部，裝置容量為:4384.2 MW

內所有的離岸風場，可使年發電量達到四座核電廠總發電量的 86%，建廠投資金額則為核四廠預算的 6 倍有餘。以當前國庫情況，政府實已難能獨資完成。若改以民間方式投資，考量再生能源償還貸款的能力，如此巨額的資金出借，亦需進一步評估其衍生的金融風險。

表 2. 我國太陽光電與風力發電的成本效益評估

開發方式	發電模式	裝置容量 (MW)	發電量 (億度)	建廠投資 (億元)	相當於核一 至核四發電 量(%)
既定規劃	風力發電	3,000	105.1	3,800	29.4%
	太陽光電發電	6,200	81.5	3,200	
積極開發	風力發電	6,000	210.2	7,600	85.7%
	太陽光電發電	25,400	333.8	13,200	

備註 1: 經濟部能源局於 2013 年公布離岸風電及太陽光電(地面型)的躉購費率分別為 5.6 及 4.8 元/度，以表 2 既定規劃情境為例，台灣電力公司針對裝置容量 3000 MW 的離岸風電及 6200 MW 的太陽光電，每年估計可發電 186.6 億度，所需購電金額為 980 億元/年。另據台電估計核四廠包含建廠、發電、後端處置等，總計每度電均化成本約 2 元，以此估算，每年發 186.6 億度，所需成本則為 373 億元/年。

資料來源: 核能研究所機械系統專案、金屬中心及核能研究所太陽能專案、經濟部

總結而言，若核能一至三廠於 2018 年至 2025 年間屆齡除役後，我國欲以風電及太陽光電取代核電，必須考量下列條件與需負擔之代價並加以克服：

- (1)所有設備最晚應在 2025 年前完工商轉
- (2)離岸風機與太陽光電直接設備投資超過 2 兆元(相當每人每年約需負擔 1 萬元，連續 10 年)
- (3)另需至少投資 5000 億元⁵ 增設兩座備轉的天然氣發電廠
- (4)額外進行電網強化及取得土地等投資

⁵ 以大潭火力發電廠為例，其土地取得及建廠金額共約 2700 億元。

如此巨額的資金用於再生能源建設上，勢必將排擠到國家基礎建設、社會福利、國防及教育等重大預算的分配及各類民間產業的生產投資，建議及早綜整各方意見並審慎權衡，再做定奪。

附件：詳細計算流程

以下為表 1 數據計算過程：

- 核一、二及三廠的裝置容量為 5144 MW，核四廠為 2700MW，四座核電廠共 7844 MW。
其中 2013 年核一、二及三廠共發電 416.4 億度(資料來源:能源局-能源統計手冊 2013)，容量因子為 92.4%，若核一至核四廠以 92.4%的容量因子運行，一年的發電量為 634.9 億度。
- 核一至核四廠的建廠面積分別為 2.45、2.2、3.54 及 4.8 平方公里(資料來源：台灣電力公司)，共 12.99 平方公里(約 13 平方公里)，其中台北市的面積為 271.8 平方公里(資料來源：中華民國統計資訊網)，約占 0.05 個台北市。
- 一台裝置容量為 5MW 的離岸風機，若其容量因子為 40%，一年發電量為 0.175 億度，5MW 離岸風機的葉輪直徑約為 126 公尺[資料來源：1. NREL-5MW 風力機以及 2. LUXE XD128-5000 永磁式風力機]，假設風機與盛行風垂直方向之風力發電機間距離約為 4 倍葉輪直徑，平行於盛行風風向之風力發電機排距約為 5 倍葉輪直徑 [資料來源：1. 彰濱風場規劃之風力發電機開發計畫、2. 利用 GRASP 解決風力發電場最佳風機配置問題-作者：尹邦嚴及王泰元以及 3. 千架海陸風力機-風力資訊整合平台]，故可以計算一架離岸風機所占面積為 $126\text{m} \times 4 \times 126\text{m} \times 5 = 317,520 \text{ m}^2 = 0.32 \text{ km}^2$ ，故一年發 1 億度電所需要的土地面積為 $0.32/0.175 = 1.81 \text{ km}^2$ ，若要發與四個核電廠一年發電量 634.9 億度一樣多的電，需要的佔地面積為 $1.81 \times 634.9 = 1,151 \text{ km}^2$ ，約占 4.2 個台北市。
需要 5MW 離岸風機的數量為 $634.9/0.175 = 3,624$ 支，對應的總裝置容量為 $3,624 \times 5 = 18,120 \text{ MW}$ 。
- 裝置容量 1 kW 的太陽光電板占地約 $10 \text{ m}^2 (10^{-5} \text{ km}^2)$ ，若其容量因子為 15%，一年發電量 1.314×10^{-5} 億度(資料來源:核能研究所太陽能專案)，故發 1 億度電所需要的面積為 $10^{-5}/(1.314 \times 10^{-5}) = 0.76 \text{ km}^2$ ，若要發與四個核電廠一年發電量 634.9 億度一樣多的電，需要的佔地面積為 $0.76 \times 634.9 = 483.19 \text{ km}^2$ ，約占 1.8 個台北市。假設 1 個房子的屋頂約為 30 m^2 ，其一年發電量 3.942×10^{-5} 億度，若要發與四個核電廠一年發電量 634.9 億度一樣多的電，需要 $634.9/(3.942 \times 10^{-5}) = 16,106,347$ 個屋頂=1,611 萬個屋頂，對應的裝置容量為 $16,100,000 \times 3\text{kW}/1,000 = 48,319 \text{ MW}$ 。

以下為表 2 數據計算過程：

1. 風力發電裝置容量 3,000 MW，若其容量因子為 40%，一年發電量為 105.1 億度，花費預算 3,800 億元(資料來源:金屬中心)，若裝置容量 6,000 MW 則估計花費預算為 7,600 億元。
2. 太陽光電發電裝置容量 6,200 MW，若其容量因子為 15%，一年發電量為 81.5 億度，其中每 1 kW 地面型電廠的建置成本為 52,000 元(資料來源:核能研究所太陽光電專案)，故其共需 $6,200 \times 1,000 \times 52,000$ 元 = 3,224 億元，若裝置容量 25,400 MW 則估計花費預算為 1.32 兆元。