

淺談間歇性再生能源之開發對我國電力供應的影響

蔡禹擎，楊鏡堂，葛復光(2016)

依據能源局於 2015 年對於再生能源之發展目標修正，我國於 2030 年的再生能源規劃裝置總量已上調至 17,250 MW，其中太陽光電裝置容量達 8,700 MW、風力發電 5,200 MW(其中 4,000 MW 為離岸風力)、水力發電 2,200 MW、生質能發電 950 MW 以及地熱發電 200 MW(能源局, 2015)。預估再生能源佔電力系統裝置總量達 30.7%，再生能源發電量佔電力系統發電量則為 14.5%(註 1)。如以能源局預估的 2030 年風力發電量 165 億度及太陽光電發電量 109 億度推算，將分別佔前述 2030 年再生能源發電總量(405 億度)的 40.6%及 26.9%。因此，離岸風力與太陽能可視為我國未來再生能源發展的兩大主力技術。

壹、台灣再生能源的發展問題

台灣發展風力發電與太陽能之阻礙，常見的主要因素為發電成本、用地取得、地域分布以及間歇特性。以成本因素而言，美國能源資訊局(EIA, 2015)評估 2020 年美國陸域風力以及太陽能之均化發電成本(Levelized Cost of Electricity, LCOE)在容量因素為 36% 以及 25%前提下(註 2)，已分別下降至每度電 0.0736 美元以及 0.1253 美元(註 3)，相較於傳統燃煤以及先進燃煤技術的每度電

0.0951 美元以及 0.1157 美元而言，再生能源在不考慮政策補貼誘因下已有相當的競爭力(註 4)。然而，對於我國寄望最深的離岸風力，由於離岸施工成本高昂，EIA 預估 2020 年的價格仍高達每度電 0.1966 美元(約新台幣 6.29 元)。

在用地取得方面，蕭子訓等人(2014)評估若要取代我國核電廠(包含核四)之年發電量 635 億度，單以離岸風機來達成需要 4.2 個台北市的面積，如僅以太陽光電來達成則需要 1.8 個台北市面積；即使以 2030 年風力與太陽能發電量目標來計算，亦需要 1.1 個台北市大小來設置離岸風電以及 0.3 個台北市大小來設置太陽光電。雖然離岸風電土地取得問題相對較小；但卻有海洋生態與漁業權之爭議，而太陽光電對於土地的龐大需求，對於地小人稠的台灣則為一大挑戰。

從地域分布的層面探討，我國北、中、南、東四個區域電網中，缺電最嚴重的為北部，然而太陽能最具開發潛力的地方卻位於南部；離岸風力最具開發潛力的地方則位於中部外海。如此的區域分布不均雖能藉由改善現有電網傳輸能力來達成，但所需增加的電網改善成本則會進一步增加再生能源之開發成本。

再生能源的間歇性，其對於電力系統的影響可以分為兩種時間尺度。第一種為短期的影響，其時間尺度為數分鐘至數小時，例如陰天或晴天造成太陽能短暫的輸出變動；第二種為長時程的影響，其時間尺度為數天甚至是數個月的季節性影響(IEA, 2014a)，例如台灣冬季季風強烈與夏季少風造成風力發電量於冬季與夏季有明顯之差異。再生能源的間歇性對於我國未來電力發展之影響為本文討論的重點，以下則針對兩種不同尺度的間歇性進行探討：

一、再生能源短周期間歇性

對於再生能源的短周期性的間歇性質，目前常見的解決方式為利用可調度(dispatchable)發電機組(如燃氣機組、燃油機組、抽蓄水力或水庫水力)，藉由快速的升載或降載來調控再生能源的大幅變動；利用儲能系統、負載端的需量反應控制、鄰近電網的調度與支援、或是與其他能源消耗部門進行整合應用，例如使用熱儲存(thermal energy storage)、汽電共生或運輸部門的電動車(electric vehicle)來作為再生能源變動的調控媒介(IEA, 2011)。當然，對忽然間大量湧入而系統無法及時消耗的再生能源，暫時關閉部分再生能源機組以縮減輸出(curtailment)亦是一種在實務上可行的方法。

根據研究(IEA Wind, 2009)，當風力發電佔電力系統的 20%時，為了應付其短期間歇性所需付出的代價為每度電介於 0.001 美元

至 0.007 美元之間，約合新台幣 0.032 至 0.224 之間，而且隨著再生能源的占有比例越高，其費用也越高。依照台電對於電源開發之評估方式(台電, 2014)，當規劃我國電力系統需要多少機組方能達到法定的備用容量率時，對於風力與太陽能機組的貢獻僅以其裝置容量的 6%以及 20%來計算(註 5)。亦即 2030 年在台灣最高峰用電時，風能僅 312 MW($5,200 \text{ MW} \times 6\%$)、太陽能僅 1,740 MW($8,700 \text{ MW} \times 20\%$)比較有信心能派上用場。換句話說，在確保供電穩定為前提下，2030 年風能及太陽能總計 13,900 MW 的設置僅能替代約 2,052 MW 傳統火力電廠的設置需求(約一座核二廠裝置量)。前述風力發電裝置對於整體電力系統設置容量之貢獻評估，亦可從圖 1 中得到驗證。在夏季系統用電高峰期間(約第 181 至 271 日)，單日尖峰用電時刻風力發電輸出低於其裝置容量 6%之天數，2014 年及 2015 年分別為 32 天及 13 天(圖 1)，且圖 1 中顯示其發電出力每日之波動十分劇烈。至於太陽能之評估，由於台電未提供民營太陽能裝置即時輸出資訊(僅提供推估值)，因此如以 2013 年初台電自有太陽能系統裝置容量 10.01 MW 以及該年度 7 月份太陽能每日發電出力最高與最低(排除周末時間)分別約 9.2 MW 及 3.1 MW 來評估(鄭金龍, 2013)，在用電高峰時太陽能可能因天氣影響僅能提供三成的電力輸出。雖然太陽能在尖峰用電時段處於低電力

輸出的機會相對於風力發電少很多，但每個月仍可能有 2 至 3 天因天氣不佳而出現低電力輸出的狀況。因此，太陽能裝置容量對於減少傳統火力機組裝置容量的貢獻確實仍無法過於樂觀預估。

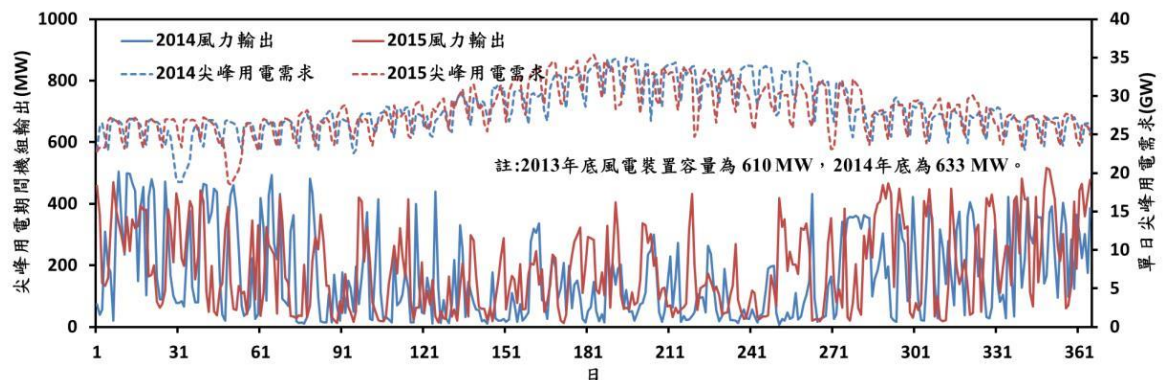


圖 1 2014 - 2015 年每日尖峰時段用電與風力輸出

Source: http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-c51.aspx?LinkID=29

二、再生能源長周期間歇性

對於再生能源長周期性的間歇性質，除了依賴大量的火力機組(尤其是燃氣機組)做為備援外，尚可仰賴大規模的儲能系統、或不同再生能源間的季節性互補來調控。在儲能系統方面，如僅考慮電力形式之儲存與應用，則抽蓄式水力(Pumped Hydroelectric Storage, PHS)、壓縮空氣儲能(Compressed Air Energy Storage, CAES)或氫能為較可行的技術選項。

這些技術中又以抽蓄式水力技術最成熟、效率最高(註 6)、成本最低且最廣為採用，在 2014 年全球約 97%的儲能系統皆為 PHS

(IEA, 2015)。然而，PHS 如果要做到跨季節性的儲存(seasonal storage)，所需要的空間是十分驚人的。以台灣抽蓄水力為例，目前位於日月潭的大觀二廠及明潭電廠同樣都以日月潭為上池(目前有效容量為 13,125 萬立方公尺)，其 PHS 機組容量分別為 1,000 MW 及 1,602 MW;其下池目前有效容量分別為 745 及 1,143 萬立方公尺，原機組設計為可連續滿載發電/抽水時間各為 8.5 / 7.7 小時及 6.7 / 7.8 小時(鄭金龍, 2016)。以 PHS 裝置容量合計 2,602 MW 而言，與預期發展的風力發電目標 4,200 MW 有著不少的差距，此外，由於 PHS 上、下池容量的限制，可供儲存的電力遠不及風力發電在冬季時刻滿發一日的電量，更遑論供應夏季達數月之久的尖峰用電需求。因此台灣現有的 PHS 發電系統僅能儲存離峰時段的部分火力發電，並用於隔日尖峰時段之負載調控。

如考慮壓縮空氣來進行季節性儲能，由於同樣需要龐大的設施或是依賴特殊的地質洞穴來儲氣，因此並不適用於台灣。至於氫能，雖然其能量密度高於壓縮空氣儲能，但是由於電能轉氫能，再轉換回電能的過程中能量損耗高，其整體效率僅約 22% - 50%，且需額外設置燃料電池系統作為電力轉換裝置，除非再生能源的價格遠低於現有發電成本，否則將氫能作為再生能源之季節性儲能方案將存在著重大的效益問題。

利用多種再生能源季節變動的互補性，同樣可用來減輕單一再生能源長時程間歇性的影響。例如太陽能具有夏季強冬季弱，風能具有夏季弱冬季強的特性，若將兩者以適當的比例設置，則可達到季節性互補的效果(如圖 2)，此亦常稱為風光互補。然而以太陽能與風能這兩種再生能源的季節分布特性所進行的風光互補策略，仍免不了設置高調度彈性的火力機組或儲能系統來調控前述短周期之間歇性。相關研究(Stefan et.al, 2015)指出，藉由適當的太陽能、風力與具有調度彈性的傳統電廠組合，理論上可在無儲存設備的配置下將再生能源的占比提升至 50%。不過，這也再度證明有調度彈性的傳統電廠對於調控再生能源間歇性的重要性。

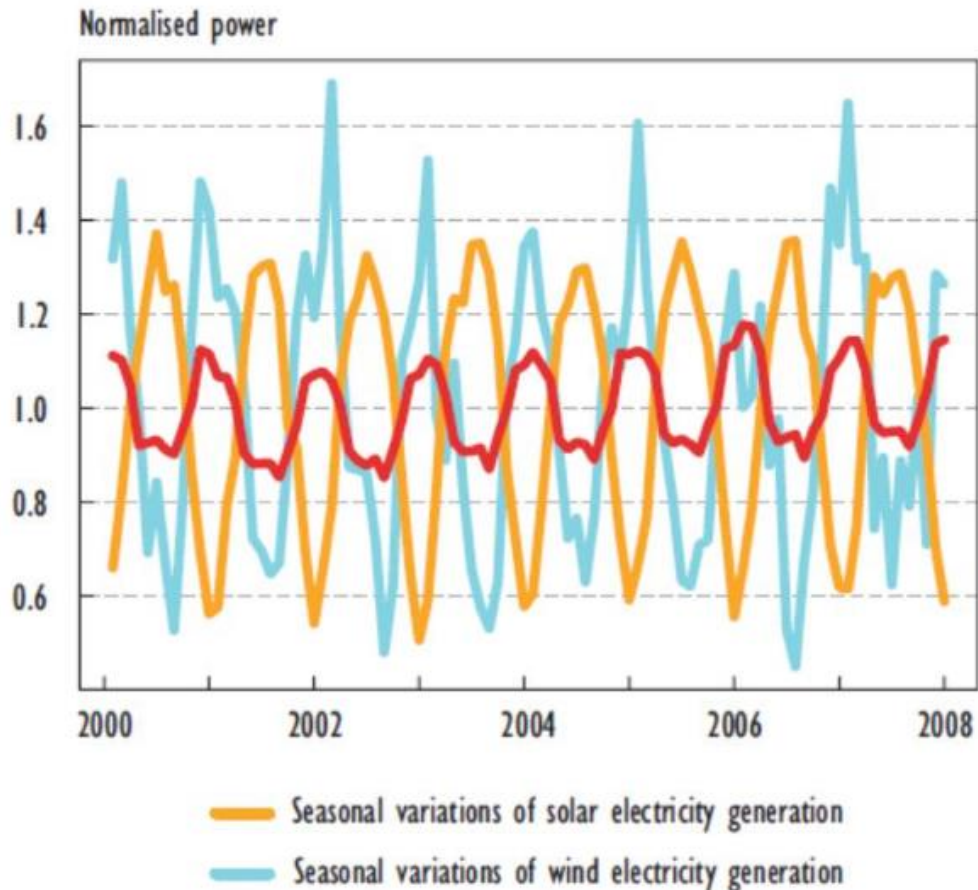


圖 2 2000 年至 2008 年歐盟地區經正規化之風力輸出、太陽能輸出與電力需求

Source: IEA, 2014a

貳、對於再生能源間歇性之應對策略

以目前台電 10405 電源開發方案為例 (圖 3)，在無核電情境下，2026 年各式發電佔比為抽蓄發電 5.2%、再生能源 20.5%、燃油發電 0.5%、燃氣發電 43.2%、燃煤發電 30.6%。以抽蓄發電裝置容量 2,602 MW 推算，2026 年再生能源為 10,258 MW、燃油發電 250 MW、燃氣發電 21,617 MW、燃煤發電 15,312 MW，總裝

置容量為 50,038 MW(註 7)。在可預見的未來: (1)發電成本最高的燃油發電將被極小化(註 8)，由 2016 年的 2,750 MW(不含柴油機組)降至 2026 年的 250 MW。此一削減量約略與前面推算的 2030 年再生能源機組可替代之火力機組裝置容量 2,052 MW 相當；(2)具有快速升降載彈性的燃氣機組將被大幅提升，以替代部分核能發電缺口及新增負載需求；(3)抽蓄水力將失去於離峰時段抽取便宜火力機組之電力(燃煤、燃氣機組)，並於尖峰時段取代昂貴火力機組電力(燃油機組)之效益。

因此，綜合未來台灣的電力開發狀況，對於再生能源之間歇性影響，主要仍是採用燃氣機組的調度彈性來因應，並輔以抽蓄水力來降低其間歇性所造成的影響。然而以前述的因應方式，將導致即使設置了大量的再生能源裝置，但是仍需要配置大量的火力機組當作備援。根據台電公司 2012 年對於備用容量率的評估(台電, 2012)，當減少 1%的備用容量率(以 2012 年而言約相當於減少 346 MW 裝置容量)，如果以每 kW 投資費用 27,435 元計(燃氣複循環 2013 年完工價位)，則可減少投資費用為 95 億元，攤提在每年的成本上則每年約可省 4 億元。因此，若能提升再生再生能源裝置容量對於備載容量需求之貢獻，則節省的效益將十分可觀。

由 2011-2013 年太陽能與風力夏季發電情形評估(鄭金龍, 2013), 在七、八月期間風力發電最低出力在 10%以下之天數高達 48~57 天, 因此除非離岸風機於夏季期間之容量因素可以明顯提高, 否則風力機組確實難以提高其對備用容量之貢獻。相反的, 太陽能對備用容量之貢獻則有較大的潛能。以台電所擁有的太陽能系統在 2012 年及 2013 年七月發電狀況為例, 當日最高電力輸出時段其電力輸出達不到全功率一半的天數僅分別佔 4 天及 3 天。換句話說, 如果可以在不增加備用火力機組以及儲能系統的前提下找到方法來緩解太陽能短期受天候影響所減少之輸出, 則可能可以大幅提高太陽能裝置容量對全國備用裝置容量的貢獻度。以下則提供一些思考的方向, 可值得進一步的研究:

一、可由過往夏季期間的運轉資料, 找出尖峰負載以及太陽能發電對天氣狀態的相關性。例如天氣晴朗炎熱時, 尖峰負載勢必相對較高且此時太陽能亦能提供較高的輸出; 而當天氣陰天或甚至下雨時, 雖然太陽能出力會急遽降低, 但尖峰負載亦可能會相對較低。因此, 天氣型態對於負載變動之影響, 或可提高太陽能對系統裝置容量之回饋, 亦即有機會將太陽能對於備用容量率之貢獻由目前僅太陽能裝置容量的 20% 向上提升。以 2030 年的發展目標為例, 每提升 1% 的太陽能裝置容量採認, 則可減少 87 MW 之火力機組設置。

二、即使是在 2015 年 7 月 2 日台灣創下歷史尖峰用電新高的當下，台灣最大的慣常水力電廠-大甲溪電廠(裝置容量 1,148 MW)之出力亦僅只有 64%。由於需要配合整年度的用水的調度，因此水力機組在尖峰負載時刻未必能全力輸出。如果我們可以利用冬季時刻的充沛風力來搭配海水淡化廠進行造水，除了可以提高現有水庫水力於夏季尖峰期間配合輸出的能力外，亦可增加台灣在未來氣候變遷下供水的安全性。雖然這種運轉模式無法直接提高風力裝置對於裝置容量的貢獻，但卻可藉由提高水力機組對於淨尖峰供電能力，來間接降低裝置容量的需求。

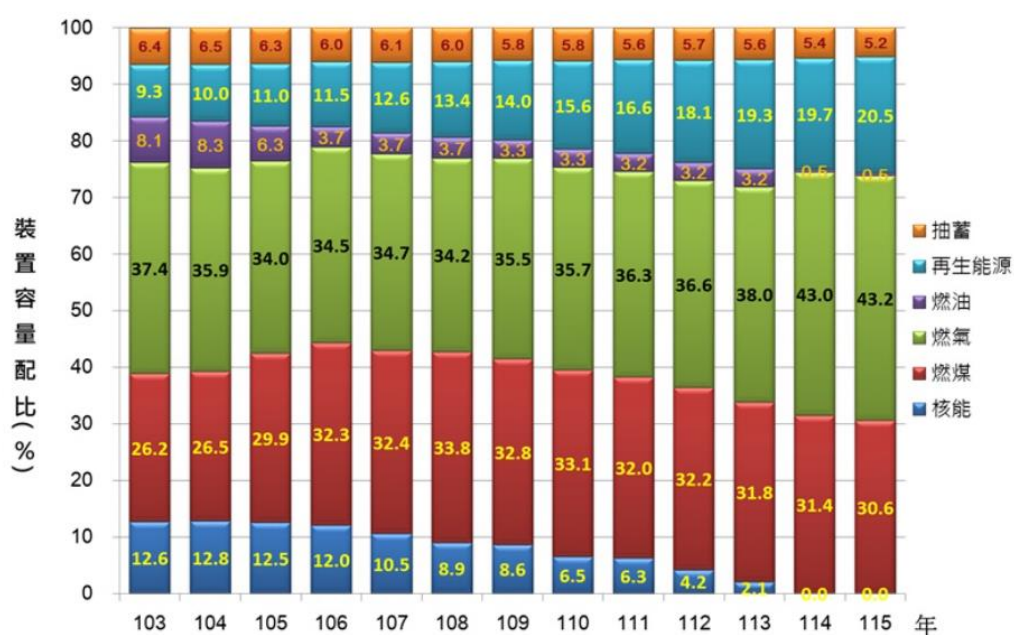


圖 3 台電評估 2026 年無核電情境下之發電能源裝置容量配比
(10405 電源開發方案)

Source: http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-c40.aspx?LinkID=13

註解

1. 以全國系統占比而言，裝置容量佔比約為 26.0%，發電量約為 13.3%。
2. 2011 年至 2015 年，台電系統的陸域風力及太陽能容量因素分別介於 27.82%-32.00%以及 15.06%-18.18%之間(太陽能為本研究保守推估值，以該年度年底裝置容量以及發電量作為計算基礎)。
3. 以 1 美元兌 32 元新台幣計算，陸域風力與太陽能之均化發電成本約新台幣 2.36 元及新台幣 4.01 元。
4. 105 年度我國每度再生能源躉購費率，陸域大型風力為 2.7763 元、離岸為 5.7405 元、地面型太陽光電為 4.6679 元。
5. 火力燃煤、燃氣機組則為其裝置容量的 94%及 97.8%估算。
6. PHS 能源效率約 50-85%，CAES 約 27-70%，氫能儲存約 22-50%。
7. 該裝置容量僅為本研究推估值。
8. 2015 年每度電發電成本燃油 4.34 元、燃煤 1.21 元、燃氣 2.67 元。

參考文獻

1. 經濟部能源局 (2015) 2015 年 11 月 27 日焦點新聞
(http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/news/News.aspx?kind=1&menu_id=41&news_id=4226) 登入時間:2016.02.24
2. 經濟部能源局 (2015) 2015 年 8 月 31 日焦點新聞
(http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/news/News.aspx?kind=1&menu_id=41&news_id=4145) 登入時間:2016.02.24
3. 台灣電力公司 (2016) 國家再生能源未來展望
(http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-b34.aspx?LinkID=8) 登入時間:2016.02.24
4. EIA. (2015). Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2015. U.S. Energy Information Administration.
5. 蕭子訓、陳中舜、葛復光. (2014). 台灣風電與太陽光電在短中期取代核電的可行性. 能源簡析. 核能研究所.
6. 千架海陸風力機風力資訊整合平台
(<http://pro.twtpo.org.tw/geo.aspx>) 登入時間:2016.02.26
7. IEA. (2014a). The Power of Transformation: Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems. OECD/IEA, Paris.
8. IEA. (2011). Harnessing Variable Renewables: A Guide to the Balancing Challenge. OECD/IEA, Paris.
9. IEA. Wind (Implementing Agreement for Co-operation in the Research, Development, and Deployment of Wind Energy Systems) (2009). Design and Operation of Power Systems with Large Amounts of Wind Power: State-of-the-Art Report. Task 25

report. VTT Working Paper 82. VTT, Finland.

10. IEA. (2015). Energy Technology Perspective 2015. OECD/IEA, Paris.

11. IEA. (2014b). Technology Roadmap - Energy Storage. OECD/IEA, Paris.

12. 台灣電力公司. (2014). 台電電源開發方案(10302 案).

13. 台灣電力公司. (2015). 未來電力供需情形

(http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-c40.aspx?LinkID=13) 登入時間:2016.03.10

14. 鄭金龍. (2013). 看見台電風力與太陽能發電. Gordoncheng's Blog

(<https://gordoncheng.wordpress.com/2013/12/26/%E7%9C%8B%E8%A6%8B%E5%8F%B0%E9%9B%BB%E9%A2%A8%E5%8A%9B%E8%88%87%E5%A4%AA%E9%99%BD%E8%83%BD%E7%99%BC%E9%9B%BB/>) 登入時間:2016.03.04

15. 鄭金龍. (2016). 漫談台灣電業的前世今生(五).

Gordoncheng's Blog

(<https://gordoncheng.wordpress.com/2016/01/15/%E6%BC%AB%E8%AB%87%E5%8F%B0%E7%81%A3%E9%9B%BB%E6%A5%AD%E7%9A%84%E5%89%8D%E4%B8%96%E4%BB%8A%E7%94%9F%E4%BA%94/>) 登入時間:2016.03.04

16. Stefan Weitemeyer, David Kleinhans, Thomas Vogt, Carsten Agert. (2015). Integration of Renewable Energy Sources in future power systems: The role of storage. Renewable Energy 2015; 75:14-20.

17. 台灣電力公司. (2012). 台電公司備用容量率規劃目標值與實

際現況之說明. 台電及中油公司經營改善小組第 1 次委員會議.

(<http://www.sec.gov.tw/PAGES/document/20120504/20120504>

[%E5%A0%B1%E5%91%8A%E4%BA%8B%E9%A0%853.pdf](#))

登入時間:2016.03.12