

美國再生能源高占比情境之模擬分析

李沛濠、陳庚轅

工業技術研究院 綠能與環境研究所

摘要

美國為了解推動高再生能源占比的技術挑戰及其可行性，特別利用 NREL 所發展的模式進行模擬分析，假設情境包括維持原電力需求、限制新增輸電線路、限制開發能資源、限制電力調配彈性，以及 30%到 90%不同占比等。結果顯示，利用目前商業化的成熟技術，可達成裝置 80%高占比再生能源設施供應電力需求，該情境中即使有 50%為變動性的再生能源，仍可平衡電網每小時的供給與需求。但須面對低負載以及抑制多餘電力等操作管理問題，因而需要更具彈性的電網系統，採用更先進的技術、新操作程序、進化的商業模式以及新的市場規則。另外，也需設置長距離的高壓輸電線路，以平衡再生能源供電的變異性。不過 80%占比再生能源情境，可達成減少 80%因發電造成的碳排放、降低 50%的發電用水量，並減少 3%電廠所占面積等效益。因此，純以技術上而言，美國裝置高達 80%占比的再生能源設施是可行的。不過該研究尚未考量政策可行性，需求端技術等因素，目前僅可作為初步的技術發展參考。

一、前言

美國再生能源研究室(National Renewable Energy Laboratories)為了探討美國未來發展高再生能源占比的可行性以及所可能面臨的議題，特利用該單位所發展的 ReEDS 再生能源規劃模式以及 ABB 公司所發展的 GridView 電網模擬模式，探討不同占比以及情境下，到 2050 年再生能源成本最經濟的組合策略。

該研究的主要目的在探討電力部門設置高占比再生能源設施的技術面議題，因此該研究的基本假設條件如下：

1. 僅分析美國地區。
2. 分析不同的占比方案: 30% ~ 90%。
3. 分析眾多可採用的再生能源技術(以成熟商業化的技術為主)。
4. 僅探討電力系統整合相關議題(著重電力供應)。
5. 判斷哪裡適合配置再生能源。
6. 評估環境衝擊。
7. 透過眾多的情境分析關鍵因子。
8. 所有再生能源配置，必須滿足電網穩定性限制條件。

因此，該研究並非探討未來可能趨勢、政策影響，也不是詳細系統整合研究、區域性研究以及減碳路徑方面的探討。主要是探討在不同發展情境下，高占比再生能源的所面臨的技術性挑戰，所假設的分析情境如下圖 1 所示，包括：低用電成長(用電需求沒成長)、高用電成長情境(BAU)，不同再生能源占比 30%~90%，再生能源技術沒改善(RE-NTI)、稍微改善(RE-ITI)、較為改善(RE-ETI)。限制開發新的輸電線路、嚴格的發電調配條件、限制新開發再生能源。

如圖 2 所示，低用電成長為主要的用電假設情境，其主要假設為大量採用用戶端的技術，使得總用電量到 2050 年前沒有增加。而高用電成長境，則是在沒有採用特殊措施，用電量自然成長的 BAU(Business-As-Usual)情境，作為比較的情境。

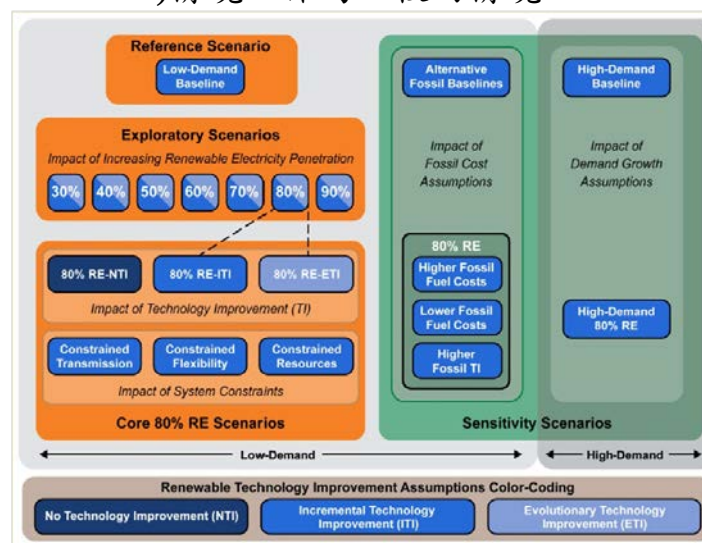


圖 1、再生能源高占比模擬情境 [1]

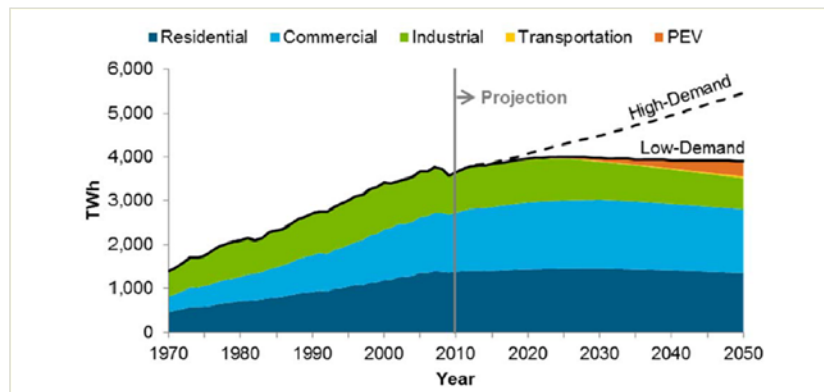


圖 2、高電力需求以及低電力需求模擬情境 [1]

美國具備眾多豐富的再生能源，根據 NREL 的分析，各種再生能源在美國地區的分布如圖 3 所示。各項能源的分布與潛能說明如下：

1. 生質能：集中在中西、東南部，從農林、廢棄物而來，未來可由能源作物提供。可用於傳統發電設施，未來潛能 100GW，包含 27%從生質能源作物而來。
2. 地熱能：美西，目前水熱式技術潛能達 36GW，若未來新技術發展，可達 500GW。
3. 水力能：除了密西西比之外，各州都有分布，以華盛頓以及加州最多。未來增設水力發電設施是可能的，川流式潛能達 152~228GW。
4. 海洋能：目前尚未有商業成熟的技術，初估潛能達 2,500 TWh/year。
5. 太陽能：潛能最大，目前美國每年需求 4,000TWh，大約只有美國面積幾個小時的太陽能量即可供應，地面型 PV 潛能達 80,000GW，CSP 潛能達 37,000GW，屋頂型 PV 潛能達 700GW。
6. 風能：潛能大，離岸風力可供應海岸以及五大湖區的用電需求。估計 80m 高度 48 州的容量潛能達 10,000GW，容量因素為 30%，亦即可生產達 37,000TWh。

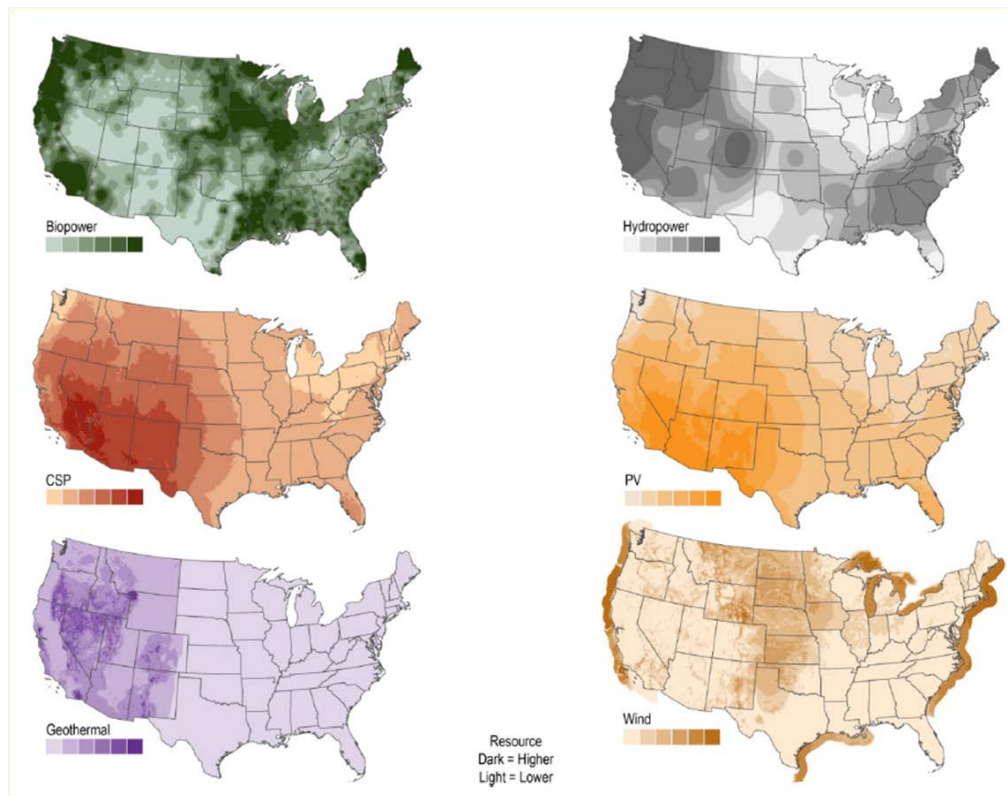


圖 3、美國各類再生能源空間分布圖 [1]

二、 再生能源不同占比之情境分析

根據該研究的推估，在沒有任何新的政策措施下，亦即沒有設定再生能源占比目標，並考量最經濟發電組合條件下，再生能源到 2050 年將提供 20% 的總電力供應，其低需求基準情景的結果，如圖 4 所示。再生能源發電，電力供應總量的比例從 2010 年的 12.0% 上升到 2050 年 19.5%。由圖可以發現，在低需求的基準情景預測美國未來的電力系統，仍以化石燃料與核能發電為主。

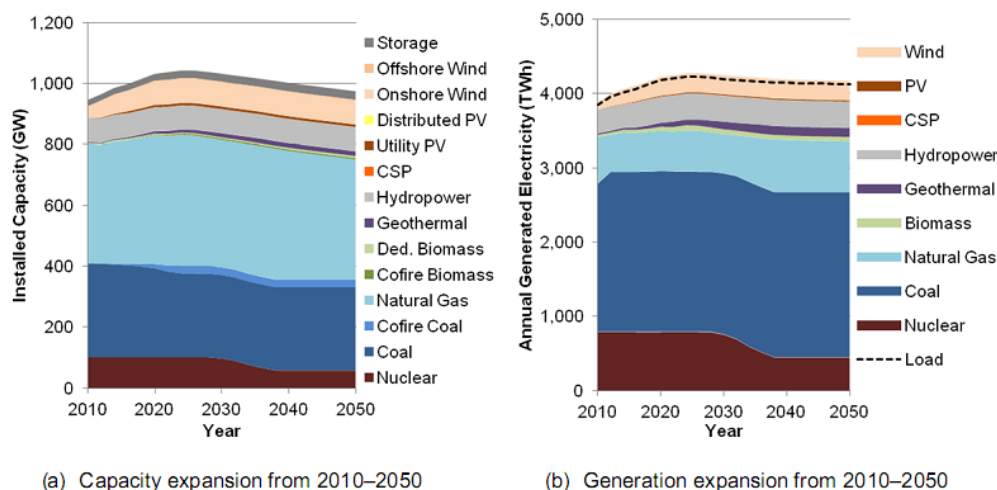


圖 4、美國地區低需求基準情景的裝置容量與發電量結果 [1]

1. 不同再生能源占比分析：RE-ITI 情境與 RE-ETI 情境

在 RE-ITI(技術稍微改善)情境下，2050 年再生能源裝置容量，如圖 5 (a)所示，低需求基準情景為 950GW，而 90%占比情境下為 1,390GW。風能(包含陸域風機及離岸風機)為 517GW；聚光型太陽能(CSP)為 102GW。風能占比最多，儲能容量隨占比增加，亦增加生質能、CSP、水力等。

在 RE-ETI(技術較有改善)情境下，2050 年再生能源裝置容量，如圖 5 (b)所示，低需求基準情景為 950GW，而 90%占比情境下為 1,300GW。風能(包含陸域風機及離岸風機)為 413GW；聚光型太陽能(CSP)為 178GW。CSP 技術改善影響較大，占比較多，風能裝置容量變少、CSP 明顯增加(成本的影響)，總裝置容量需求較少，可能裝置容量效率高。

RE-ITI 情境與 RE-ETI 情境差異在於太陽能部署不同，RE-ETI 情境則減少風能部署。在未來的能源結構中，煤炭、天然氣只是為了滿足電力系統尖峰時期的需要，儲能也變得越來越重要。

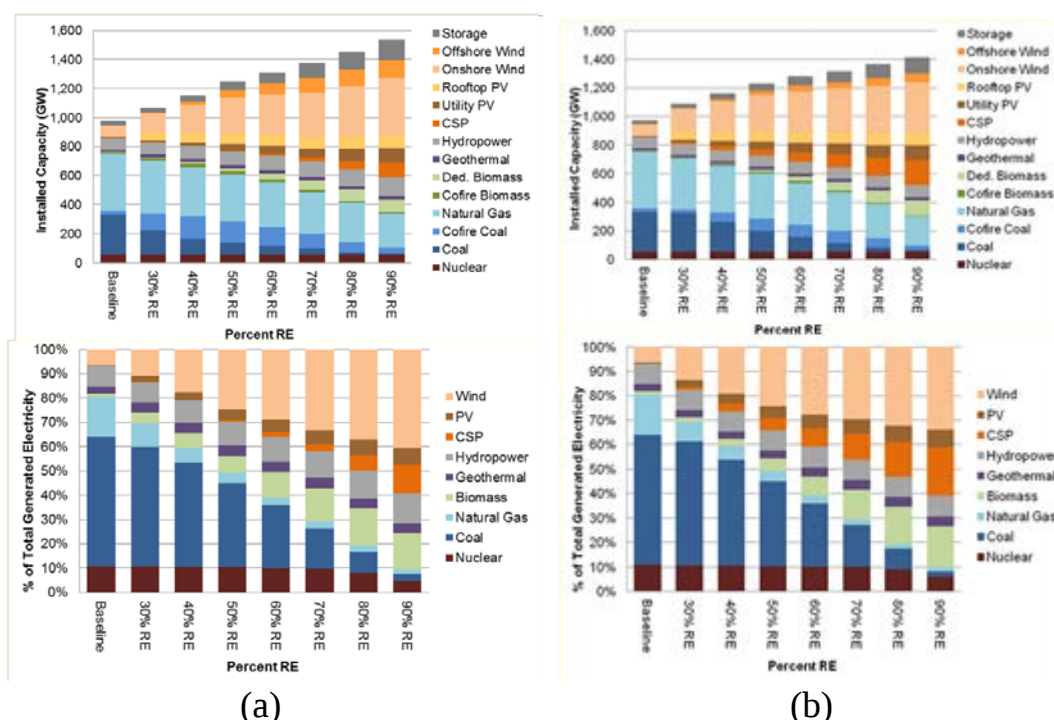


圖 5、美國地區(a)RE-ITI 情境與(b)RE-ETI 情境於 2050 年再生能源的裝置容量與發電量結果 [1]

2. 再生能源占比增加影響

根據該研究探討在再生能源占比增加的情況下，將會有下列各點變化：

(1) 再生能源占比增加，電力部門的碳排放量下降

在 2050 年的參考基準狀況下，電力部門所造成的基線碳排放量為 2,400MMT。若提升再生能源占比達 30%，則電力部門的碳排放量下降 10%；60%時下降 55%；90%時下降 95%。

(2) 儲能增加、備用容量電力部分由再生能源供應

在低用電成長的情境下，不同再生能源裝置比例下的備用電力容量，主要是以用電負載的比例來設定，因此容量都相同。備用容量可由儲能、傳統能源、非變動性再生能源以及變動性再生能源滿足，隨著再生能源占比增加情況下，由變動性再生能源設施供應的比例也隨之增加。可見，在技術配合下，變動性的再生能源，如風力、太陽光電所發電力，也可以滿足備用容量需求。

(3) 備轉容量(operating reserve)需求增加

由於電力系統操作時，可能會有無法預期情況，需要額外的能源，補足受到損壞影響或短缺的電力負載。其類型分為規定量、偶發、預測錯誤，主要的差異來自於因為再生能源占比增加，增加預測錯誤的機會，進而必須要增加額外的容量，減低該錯誤的影響。而備轉容量可採用技術包括：傳統發電機組、儲能系統、可中斷負載合約。以可中斷負載容量為例，基線情境下需要規劃容量為 28GW；30%為 33GW；60%為 36GW；90%為 36GW。

(4) 電力抑制量、儲能容量增加

再生能源占比增加，也增加所發電力的抑制量，且須配合儲能系統增加，以穩定供應電力。根據預估 2050 年，在基線情境下，需抑制再生能源所發電力的 2%；30%再生能源占比下為 2.5%；60%為 4%；90%為 7%。而儲能容量需求，分別在基線情境下為 28GW；30%為 31GW；60%為 74GW；90%為 142GW。

三、80%再生能源占比情境分析

為了解如何在 2050 年前逐年達成再生能源高占比目標，選擇以 80%再生能源占比情境為基礎，套用不同限制情境來探討，主要發現的結論彙整如下：

1. 到 2050 年前每年要大量增設各類再生能源設施

根據分析結果，相較於美國過往 2010 年增加 7GW 以及 2009 年增加 11GW 的再生能源裝置容量，未來 2050 年前的前半時期每年要增加約 20GW，後半時期每年要增加約 45GW，預估總裝置容量 2010 年時為 130GW，2030 年為 540 GW，2050 年為 920 GW。其變化趨勢如圖 6 所示。

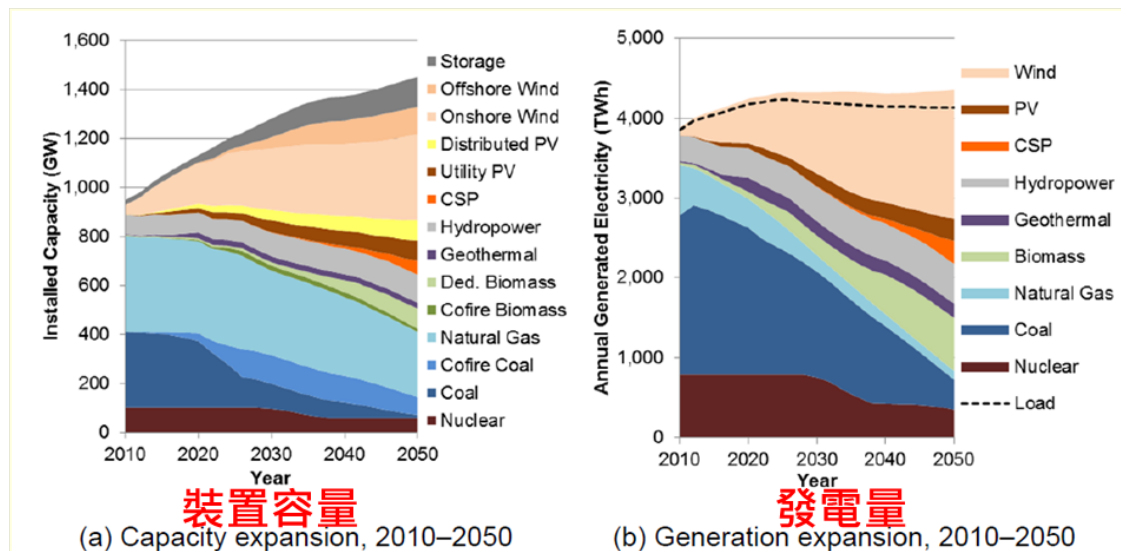


圖 6、80% 占比情境下逐年各類再生能源裝置容量與發電量 [1]

2. 限制條件不同下再生能源組合各異

- (1) 80% RE-ETI 情境下，CSP 以及太陽光電的裝設量最高。主要是因技術改善，太陽能技術效率改善，且成本下降明顯。
- (2) 80% RE-NTI 情境下，以風能以及水力裝置量較多，CSP 以及太陽光電的裝設量低，因太陽能技術沒改善，則其成本、效率仍相對較差。
- (3) 限制新增輸電線路情境下，傾向於選擇不需要依賴輸電的技術，比如屋頂型太陽光電、電廠型太陽光電、離岸風力以及生質能等，以分散的電力滿足不同區域所需電力。
- (4) 要求電力調配彈性高的情境下，造成不易調配的風電以及太陽光電裝設的數量略少，而調配性較高的 CSP 結合熱儲能系統裝置量明顯較多，且系統需求的儲能系統容量也較高。
- (5) 在限制開發條件的情境下，環境影響較大的生質能、地熱以及水力等技術的裝設量為最少。

3. 需要設置新的輸電線路

由於再生能源所在位置不一定在用電負載較高區域的附近，因此必須透過輸電網路輸送到用電戶所在區域，因此必須要配合新增高壓線路。需新增輸電線路容量為 1.1-1.9 億 MW-英哩，在美國三個大供電區之間，增設 47,500~80,000MW 容量的連接節點，提升區域間的輸電能力，使得系統間連結性更高。預估每年需投入 64~84 億美元的成本。由於美國目前投入電網改善的費用已經達到每年 20~90 億美元的額度，因此，該增設成本並不會造成額外的財務負擔。

不過在美國設置新輸電線路的挑戰，包括：

- (1) **新線路選址**：可能會受到州政府與民眾的反對。
- (2) **成本配置**：需協調確認建置、營運成本由跨區域的單位支付。
- (3) **與多個管制組織合作**：因牽涉的機構眾多，增加該業務的困難度。

美國現有的輸電網路以及因應高再生能源占比情境下所需新建擴增的輸電網路如圖 7 所示。現行線路主要是配合主要用電負載而興建，因此跟美國的人口分布密度相符，而需要新建的線路，則需要跨區域長距離輸送豐富的風能以及太陽能等再生能源到電力負載所在區域。

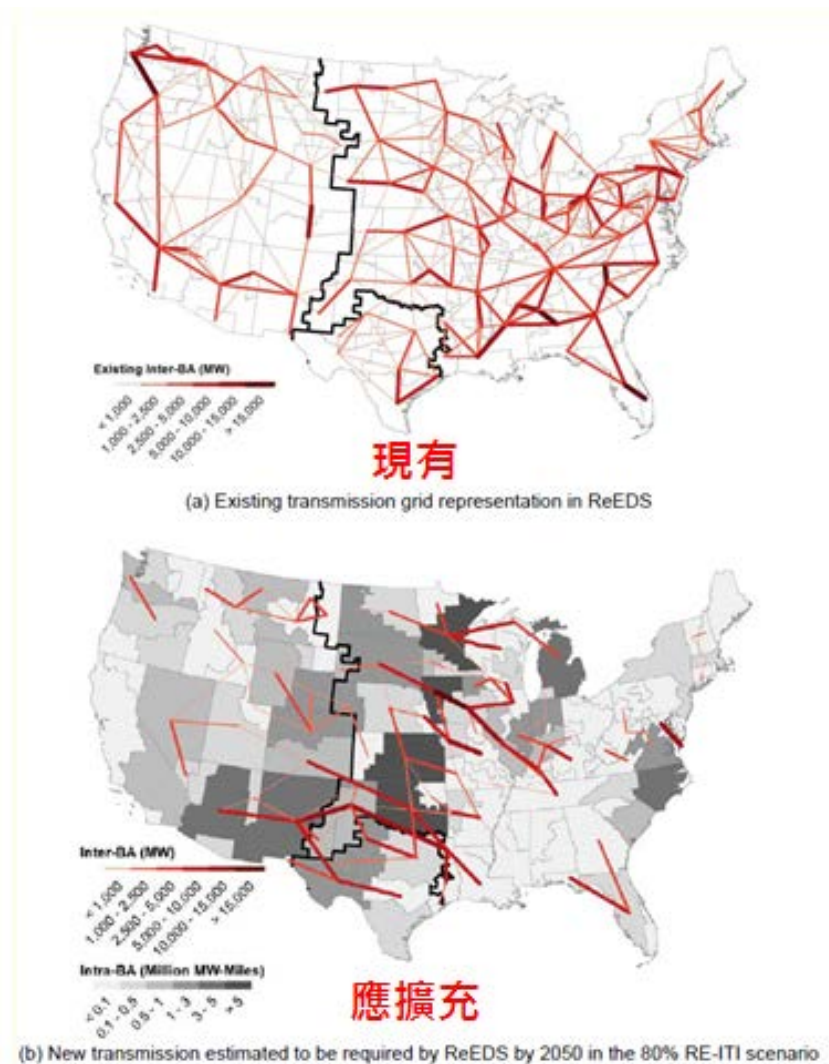


圖 7、高再生能源占比情境下美國應擴充之電網分布 [1]

4. 高占比需要增加備轉容量

再生能源設施發電量隨著不同時間以及自然環境條件而變，因此較不易預估，進而增加發電量預測的困難度。

備轉容量(operating reserve)主要是因應：偶發備轉(設施損壞)、頻率備轉(調整供電頻率)、預測錯誤備轉容量需求，前兩者為根據法規規範，固定為負載的 6%、1.5%。而再生能源的發電預測錯誤，就會造成不同再生能源組合下，總備轉容量的差異。若系統裝設較多風力發電設施，則預測錯誤的量較高，則備轉容量的需求自然較高。而可採用的備轉措施包括：傳統發電機組、增加儲能系統、採用可中斷負載(interruptible load)契約。

5. 高占比將增加抑制電量並需要更多的儲能容量

由於再生能源不一定能在電力負載高時，配合發出相應的電力，過多的電力則需要抑制而浪費，或者裝設儲能系統提升再生能源的調配能力。

經過預估，在裝設 80% 占比的再生能源設施後，將會 5%~9% 的再生能源電力會被抑制而浪費，且需裝設高達約 100~152GW 容量的儲能系統。若限制新增輸電網路或者再生能源技術沒有提升，則儲能系統的需求也會較高。

6. 再生能源供應鏈需要調整不過可以克服

為達成 80% 再生能源占比目標，每年必須新增高達 20~45GW 的設施，因此再生能源產業供應鏈要大量擴充，提供材料、設備製作、發展計畫以及人力等，不過都可以經由市場調整而達成。

四、主要結論

若達成 80% 再生能源占比量，相較於開發傳統化石能源將可減少 80% 碳排放、50% 用水量、3% 增設面積。而就經濟面而言，每 MWh 發電量電價到 2030 年時將增加約 9~26 美元，到 2050 年則約 41~53 美元，亦即在分析情境中最差的條件下，反應新增再生能源、改善舊系統等所造成的成本負擔，每度電售價將增加約 1.5 元台幣。

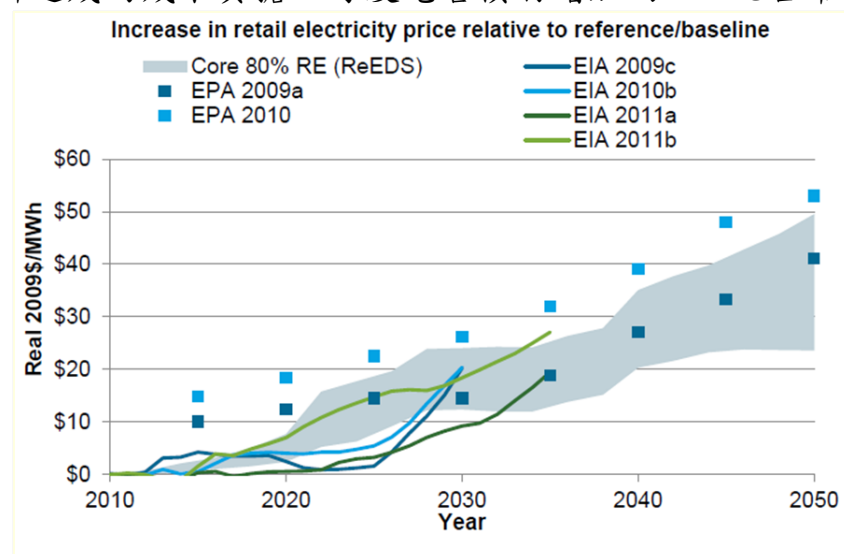


圖 8、高占比再生能源情境下售電價格增加趨勢 [1]

其他主要發現如下列各點：

1. 使用現有成熟技術即可滿足未來 80%的用電量，且可達到每小時平衡需求。
2. 高占比情境需要更彈性的電網操作策略，利用更先進的技術、新的操作程序、商業模式以及市場規則來達成。
3. 需增設輸電設施，以擴大備用容量分享區域、平滑再生能源發電量。
4. 再生能源高占比可有效降低溫室氣體排放量以及用水量。
5. 電價最多每度電將增加台幣 1.5 元。

為達成高再生能源占比的系統，則需要落實以下各項：

1. 美國各區域都要大量裝設再生能源設施。
2. 再生能源增設必須滿足法規、操作限制，包含輸電線增設、系統彈性、資源可得性等。
3. 以傳統發電機、可調配再生能源設施、儲能系統、需求端技術滿足備用容量以及備轉容量需求。
4. 以儲能技術、需求端技術選項、更有彈性的調配傳統機組、能源抑制、輸電線增設來增加電力系統調配彈性。
5. 擴增輸電線以取得偏遠地區的再生能源，並擴大備用容量分享區域(reserve-sharing regions)。

五、參考文獻

1. NREL(National Renewable Energy Laboratory), (2012), “Exploration of High-Penetration Renewable Electricity Futures(includes Executive Summary)”, report, vol.1
2. NREL(National Renewable Energy Laboratory), (2012), “Renewable Electricity Generation and Storage Technologies”, report, vol.2
3. NREL(National Renewable Energy Laboratory), (2012), “End-Use Electricity Demand”, report, vol.3

4. NREL(National Renewable Energy Laboratory), (2012), “Bulk Electric Power Systems: Operations and Transmission Planning”, report, vol.4
5. Short, W.; Sullivan, P.; Mai, T.; Mowers, M.; Uriarte, C.; Blair, N.; Heimiller, D.; Martinez, A. (2011). Regional Energy Deployment System (ReEDS). NREL/TP-6A20-46534. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
6. Feng, X.; Tang, L.; Wang, Z.; Yang, J.; Wong, W.; Chao, H.; Mukerji, R. (2002). “A New Breof Software Tool for Integrated Electrical Power System and Market Analysis—GridView.” In Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, Chicago, July 21–25; pp. 737–743.