

# 我國再生能源年發電量的評估與機率分布研究

蕭子訓<sup>1\*</sup> 黃孔良<sup>1</sup> 葛復光<sup>2</sup>

## 摘要

本研究透過年發電量機率分布的探討，分析我國未來再生能源大量併網後年發電量的變異，並探討可使年發電量波動較小的電力組合。相較於利用固定容量因數進行年發電量的評估，機率分布的分析方法能夠協助決策者預先防止或避免相關的風險產生。本研究結合了財務經濟學上進行資產投資組合風險評估的方法，量化分析數種再生能源間的相關程度，藉此評估總再生能源發電量的期望值及標準差。本研究發現，由於太陽光電與風力發電的容量因數間為負相關，因此，該兩種能源的混合搭配可以降低年發電量的變異，而透過情境的設計進行分析，研究成果指出，樂觀情境下，再生能源發電量達到515億度電的機率為40.314%，而擬真情境下，達到515億度電的機率則要更低，然若將離岸風電的政策目標提升至5.5 GW，擬真情境的再生能源發電量達到515億度電的機率則增加至84.897%，能夠有較高的機率達成政策目標。此外，本研究亦指出，目前政府規劃之再生能源發展目標已接近最小發電量標準差的最適電力組合，然未來太陽光電及離岸風力的裝置需同步增加，但離岸風電的成長率須高於太陽光電，方能最小化發電量標準差。太陽光電與離岸風力裝置量最佳的比值約在5.9至6.7之間，且隨再生能源總發電量的增加而有降低的趨勢。

**關鍵詞：**再生能源，太陽光電，風力發電，年發電量，資產組合理論

## 1. 緒 論

依據聯合國政府間氣候變遷小組(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)所出版的第五次評估報告顯示(IPCC, 2014)，自工業革命以來，由於經濟與人口的大量增長，人類各種活動所造成的溫室氣體排放量不斷攀升，且目前大氣中二氧化碳，甲烷和一氧化二氮的濃度之高，在過去80萬年來是不曾有過的，科學家在整個氣候系統的觀察中發現，這極為可能是導致20世紀中葉以來觀察到地球暖化的主要原因。由於全球暖化的影響及解決並非一國一地可單獨承擔，故自

1992年聯合國通過「聯合國氣候變化綱要公約」(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)後，國際上陸續有數個相關協議，而各國經過數十年的磋商後，於2014年在利馬召開的「聯合國氣候變化綱要公約」第20次締約方會議(COP20)，全球190多個國家達成提出溫室氣體減量排放目標基本規則的協議，並提出一巴黎協議草案，2015年12月12日的聯合國氣候峰會中，更是通過了巴黎協議，並於2016年4月22日世界地球日時，171國代表在聯合國總部簽署巴黎協議。雖然於2017年6月1日，美國新任總統唐納·川普宣布美國將會退出巴黎協議，然而，包含中國在內的諸多

<sup>1</sup> 行政院原子能委員會核能研究所能源經濟及策略研究中心技術員

<sup>2</sup> 行政院原能會核研所能源策略中心主任

\*通訊作者電話: 03-4711400轉2727, E-mail: skyschin0908@iner.gov.tw

收到日期: 2018年03月05日

修正日期: 2018年05月09日

接受日期: 2018年05月14日

國家，均表示會履行巴黎協議的相關承諾。

由國際能源總署(International Energy Agency, IEA)所出版之2017年世界能源展望(IEA, 2017)中顯示，未來全球減碳主要將仰賴能源使用效率提升、再生能源的使用、碳捕集及封存、核能的使用及燃料的轉換等，其中，國際能源總署在WEO 2017 (World Energy Outlook, 2017) (IEA, 2017)更設計了較為積極的永續發展情境(Sustainable Development Scenario)，擘劃了全球達成溫升不高於2°C的長期發展藍圖，並展望達成溫升不高於1.5°C的目標，然國際能源總署的分析顯示，永續發展情境與目前各國規劃的政策目標尚有落差，其落差主要將可透過能源使用效率的提升及再生能源的使用來達成。雖然國際的共識時至近年才有長足的發展，然21世紀再生能源政策網(the Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, REN21)所出版之Renewables 2017 Global Status Report (REN21, 2017)顯示，再生能源的使用，特別是太陽光電及風力發電，近十年來的裝置容量成長十分迅速，全球太陽光電自2006年的6 GW裝置容量成長至2016年的303 GW的裝置容量，而風力發電則由2006年的74 GW裝置容量成長至2016年的487 GW的裝置容量，而其報告中亦顯示，目前幾乎所有的國家均端出了支持再生能源科技發展的政策，而目前各國的政策規劃中，主要聚焦於電力領

域，對交通部分、供熱及制冷的政策規劃則相對較少。

再生能源近年來已儼然成了全球的趨勢，而我國對於能源轉型的路徑亦多有討論，自1998年起迄今，我國共召開了四次全國能源會議(梁啟源，2014；胡瑋元，2014；經濟部，2009a；經濟部，2009b；行政院國家科學委員會，2008；經濟部能源局，2015)，其中對於各項能源的使用又以再生能源、核電與天然氣發電的討論最為聚焦。迄今，我國政府的新能源政策規劃中包含(1)能源轉型、(2)電業改革及(3)帶動自主綠能產業發展等三個構面，其中能源轉型的部分，規劃2025年電力配比为50%天然氣發電、30%燃煤發電及20%再生能源發電，相較於目前的發電結構，其明顯是利用再生能源替代核能發電，並利用部分天然氣發電替代燃煤發電，這也是其能源轉型主要的目標。為了達到法定的非核家園及再生能源占總發電量比例20%的能源轉型目標，更提出了再生能源發展目標，如表1所示，其中以太陽光電與離岸風電所佔的發電比例為大宗，然由於臺灣具有世界一級的離岸風場，經濟部能源局亦於2017年10月26日召開離岸風電場址開發分配機制說明會，由於目前參與離岸風電投標的廠商中，其裝置容量已達10 GW，政府經評估後規劃將先進行裝置容量3.5 GW的遴選，並將開放2 GW的裝置容量讓其餘廠商參與競標。

表1 再生能源發展目標(本研究整理)

	2015		2020		2025	
	裝置容量(MW)	發電量(億度)	裝置容量(MW)	發電量(億度)	裝置容量(MW)	發電量(億度)
太陽光電	842	11	6,500	81	20,000	250
陸域風力	647	16	800	19	1,200	29
離岸風力	0	0	520	19	3,000	111
地熱能	0	0	150	10	200	13
生質能	741	54	768	56	813	59
水力	2,089	46	2,100	47	2,150	48
燃料電池	0	0	22.5	2	60	5
總計	4,319	127	10,861	263	27,423	515

由於人類的活動均難以與能源有所割捨，為了進行諸多社會現象的分析，甚至協助政府進行能源或電力的相關規劃，國內已有諸多對於能源組合的研究，如工業技術研究院與英國政府合作建置的臺灣2050能源供需情境模擬器(工業技術研究院，2014)，除了包含各項細節能源資料建置的進階版及核心模型，可做為協助決策者擬定能源決策的工具外，為促進與社會的溝通，亦開發了以2030年為主要目標年的遊戲版。此外，在能源工程領域中，工業技術研究院(郭瑾瑋等，2015)及核能研究所(黃郁青等，2017)使用由國際能源總署開發之TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System)模型，基於最小化成本的目標設定及實際電廠建置規劃或潛力的邊界條件設定下，可以模擬我國長期電力供需的消長，並由模型分析出最佳的電源規劃配置路徑。而在能源規劃領域，除了這些技術細節建置較為完善的能源工程模型外，還包含了以考量成本及技術間替代關係為主的能源經濟模型，如梁啟源等(2015)所建置的經濟計量模型中，包含了一電力子模型，其將電力機組依特性劃分為基載、中載、尖載、再生能源與其他及汽電共生五個類別，結合外生政策或事件對於電力成本的影響，分析2025年可能的電力成本，進而探討不同情境下，各能源最適的發電組合。

然而，這些進行能源規劃的模型，在評估太陽光電及風力發電的發電量時，均以固定的容量因數進行評估，但由於太陽光電及風力發電對於天氣的高度依賴，蕭子訓等(2017)指出，太陽光電的發電量相較於傳統發電技術具有高度波動的不確定性存在，且其與傳統發電基於調度或機組維修所導致的發電量波動有所不同，太陽光電的發電量波動主要是源於大氣環境的波動，法國電力公司所出版的報告中(EDF, 2015)，從過去的資料來看，無論是太陽光電亦或者是風力發電，其發電量的波動均十分劇烈，而相形之下，風力發電的波動還要更甚於太陽光電，而雖然其發電量的波動劇烈，

但由於歐陸跨國電網的存在，各國再生能源出力時機不同能夠很大程度的撫平其對於電網的衝擊，但反觀我國，由於我國屬於孤島電網，且我國疆域並不遼闊，無明顯的時區分別，故太陽光電及風力發電的發電量劇烈波動現象在我國可能將導致更大的衝擊。事實上，近期由於再生能源的大量布建，國際上對於再生能源併網後對於電力系統產生的衝擊亦多有關注，Kondziella與Bruckner (2016)回顧近年的研究成果，探討能源系統即將面臨日益增加的靈活調度需求，其針對再生能源的調度，認為除了能源儲存的技术外，可再生能源發電量的縮減，並結合燃氣機組的調度，亦可協助電力系統的穩定。Ueckerdt等(2015)則透過剩餘負載歷時曲線(residual load duration curves)方法，在長期的能源經濟模型中，結合可再生能源具有變動性的特性，於模型中提供可再生能源的整合成本評估，而透過該方法的使用，與其先前的分析相比，可以發現電力系統需要更多非再生能源的使用，方能維持電力系統的穩定。誠然，目前國際上對於再生能源併網後的衝擊多有留意，但即使如Ueckerdt等(2015)將其結合至長期的能源經濟模型，但其主要還是在探討其短時間對於電網的衝擊，並未見到針對長期發電量波動的探討。

此外，目前國內再生能源政策及策略的擬定，亦多賴以固定的容量因數進行評估，以我國再生能源發展目標為例，由2020年及2025年太陽光電的裝置量及發電量目標來計算，其所使用之容量因數約為0.143；陸域風力所使用之容量因數約為0.275；離岸風力所使用之容量因數約為0.420；生質能所使用之容量因數約為0.830。然如表2所示，再生能源中，特別是太陽光電及風力發電，歷史數據顯示其容量因數的變異程度遠高於純粹利用燃料發電的生質能、核能發電及燃煤發電，因此，蕭子訓等(2017)提出，再生能源的年發電量評估應當要以機率分布的方式呈現較為妥當。但目前，在以年發電量為主要評估標的之專業能源



表2 各項能源容量因數及其變異程度分析(本研究整理)

	太陽光電	陸域風力	生質能	核能發電*	燃煤發電
平均容量因數 <sup>1</sup> (2004-2016)	0.11	0.29	0.53	0.91	0.80
變異係數 <sup>2</sup> (2004-2016)	15.6%	18.2%	3.4%	2.38%	2.36%

\*核能發電僅考量2004至2014年，若考量包含2015及2016年數據時的變異係數為7.28%，然由於2015年至2017年間，核一廠及核二廠大修後的機組均未聯網發電，故加入該年度評估數值較難以反應其變異。

規劃中，均未見以機率分布的方式進行評估。王京明與林祐民(2017)所使用的最適電源組合分析中，透過結合財務經濟學上進行資產組合風險評估的方法(Markowitz, 1952；楊秉訓，2013)，探討考量成本及財務風險下，最適的電力組合，其財務風險的定義源於Awerbuch與Berger (2003)、Awerbuch與Yang (2007)所使用之發電技術歷史成本波動的評估方法，事實上，由於太陽光電及風力發電並不像傳統能源有價格會波動的燃料成本所影響，影響太陽光電及風力發電成本的因素，除了運維成本外，主要還是實際發電量波動所帶來的影響，因此，在使用最適電源組合分析的研究生中，某種程度上已考量了太陽光電及風力發電發電量的機率分布。但儘管如此，太陽光電及風力發電發電量機率分布的評估方法，目前多用在短期間內發電量的預測，並未見用於中長期能源規劃的領域。

然而，目前我國的電力調度主要是基於經濟性的實際需求考量，然再生能源由於政策支持的緣故，已於電業法中規定可優先併網供應<sup>3</sup>，然若未來電力市場改革為自由市場，且當再生能源趨於市電平價<sup>4</sup>後，或當再生能源建置量大幅增加導致部分時間點電力供給大於需求時，屆時再生能源的發電量基於調度的需求進而有一部分時間點無併網供電時，其容量因數的

變異程度尚有增加的可能性。

另一方面，如表3所示，從歷史數值來看，若包含2000年及2001年的數據，太陽光電的變異係數較高，而若僅看近幾年的數據，其變異係數有降低的趨勢；陸域風力的變異係數有類似的情況，若包含2000年的資料，其變異係數高達27.2%，近幾年的資料明顯降低，而若僅考量2006年或2007至2016年的資料，其變異係數進一步降低至約10%。從陸域風力的資料來看，由於2006年陸域風力裝置量有明顯大量的增加，且之後其變異係數約維持於10%，這可能是由於當裝置量增加時，故障及損壞所導致容量因數的波動將約略維持一固定的比例，而每年該比例的變化不大，故對於容量因數的波動影響不大。太陽光電雖於2002年之後

表3 各年度至2016年間，太陽光電及陸域風力容量因數之變異係數(本研究整理)

使用的資料年度	太陽光電	陸域風力
2000~2016	19.2%	27.2%
2001~2016	19.9%	18.1%
2002~2016	14.6%	18.7%
2003~2016	15.0%	17.5%
2004~2016	15.6%	18.2%
2005~2016	16.2%	18.6%
2006~2016	16.9%	10.2%
2007~2016	17.0%	10.0%

<sup>1</sup> 容量因數的定義為整年實際發電量佔額定發電量的百分比。

<sup>2</sup> 容量因數之變異係數的定義為容量因數的標準差除以平均數。

<sup>3</sup> 電業法第十八條規定：輸配電業對於發電業或自用發電設備設置者要求與其電力網互聯時，不得拒絕；再生能源發電業應優先併網。

<sup>4</sup> 市電平價指該發電技術的成本降低至與一般市場上的電價相當。

的資料分析有明顯的下降，然其與陸域風力早期的資料一樣，本研究認為其變異係數很大程度的來源可能是統計的誤差，因為於105年能源統計手冊(經濟部能源局，2017)，太陽光電發電量最小的位數取到十萬度，然在2004年以前，太陽光電的年發電量均低於六十萬度，陸域風力則於2000年時僅一百四十萬度，其呈現的統計數字未提供更精確的數值，本研究認為其是可能導致早期變異係數較高的主要因素，故太陽能的變異係數目前約為14.6%至17.0%之間，若參照陸域風力的經驗，當太陽光電裝設的容量更多時，可能有進一步降低變異係數的空間，誠然，目前太陽光電的裝置量已超過陸域風力，但太陽光電的容量因數較低，因此，其可能需要更大的裝設量才能對於變異係數的波動抑制有明顯的影響。此外，由於本研究的資料源自於能源統計手冊，其裝置容量的統計並非月平均裝置容量，故其統計方式亦會造成容量因數的波動。

在過去，我國研究者主要聚焦於再生能源併網後，其驟升驟降的特性對於電力系統的衝擊，以及太陽光電及風力發電於日夜交替發電量的多寡，對於電力排程的影響，但從以上分析可以明顯的發現，再生能源中，特別是太陽光電及風力發電，其年發電量逐年間的變化亦相當劇烈，而目前我國至2025年的能源政策中，太陽光電及風力發電的占比將大幅度的提升，屆時，太陽光電及風力發電的劇烈變化，將可能對於我國的電力供給造成劇烈的衝擊，而於我國目前所規劃的電力配比中，除了再生能源外，主要的電力來源為燃煤發電及天然氣發電，未來若產生電力缺口時，電力的來源該如何規劃將是重要的課題，援此，本研究將聚焦於評估再生能源於2025年時，其年發電量的機率分布，並結合財務經濟學上進行資產組合風險評估的方法(Markowitz, 1952；楊秉訓，2013)，探討最小化發電量波動的電力組合策

略，以提供決策者參考。

## 2. 方法論

本研究將個別建立各項再生能源的年發電量機率分布，並結合為總再生能源年發電量的機率分布，進而進行電力組合策略的評估，一般而言，若已知各項再生能源發電量評估的數學函數，可利用工程上進行不確定性分析(Taylor, 1997)的方法，進行總再生能源年發電量標準差的評估；然而，由於影響再生能源發電的因素眾多，且個別發電技術亦難以分別透過明確方程式進行年發電量的評估，故本研究採用財務經濟學上進行資產組合風險評估的方法(Markowitz, 1952；楊秉訓，2013)進行評估。

若將再生能源年發電量的分布視為常態分布，可透過平均值(期望值)及標準差來描繪其分布的樣態，因此，本研究假設再生能源在固定裝置量時，其年發電量的分布為常態分布，亦即再生能源的容量因數為常態分布，由於本研究採用的數據為2004年至2016年再生能源發電量的數據，因為樣本數為12，故使用Shapiro-Wilk常態性檢定<sup>5</sup>(表4)，其中，太陽光電、澎湖陸域風力、廢棄物發電、其他生質能發電及慣常水力的顯著性均大於0.05，故不拒絕常態分布的虛無假設，表示其分布為常態。而由於本研究亦發現陸域風力於2005年的發電量數據異常的高，這是因為剛開始的陸域風力均建置在風場極好的地方，然而其在進行評估時由於少部分的資料導致較大的誤差，故本研究僅考量2006年至2016年的資料，而若僅以2006年至2016年的資料進行Shapiro-Wilk常態性檢定，陸域風力容量因數的顯著性為0.35，故亦可不拒絕常態分布的虛無假設，表示其分布為常態。

總再生能源年發電量的期望值 $E_{Ren}$ 可透過加總個別項目期望值獲得，其數學式可以表示

<sup>5</sup> Shapiro-Wilk檢定為當樣本數小於50個時，檢測是否為常態分佈的方法，透過設立虛無假設為常態分佈，經過檢定後若顯著性大於0.05時，則不拒絕虛無假設，屆時可得知該分佈為常態分佈。

表4 各再生能源容量因數的Shapiro-Wilk常態性檢定(本研究整理)

	顯著性
太陽光電容量因數(2004-2016)	0.884
陸域風力容量因數(2004-2016)	0.017
陸域風力容量因數(2006-2016)	0.347
澎湖陸域風力容量因數(2004-2016)	0.791
廢棄物發電容量因數(2004-2016)	0.433
其他生質能發電容量因數(2004-2016)	0.519
慣常水力容量因數(2004-2016)	0.123

為：

$$E_{\text{Ren}} = \sum E_{\text{Ren}, i} \quad (1)$$

其中根據再生能源發展目標， $E_{\text{Ren}, i}$  可分為太陽光電、陸域風力、離岸風力、生質能、地熱發電、慣常水力及燃料電池年發電量的期望值。

而再生能源年發電量的標準差 $\sigma(E_{\text{Ren}})$ 則可以表示為：

$$\sigma(E_{\text{Ren}}) = \sqrt{\sum \rho_{\text{Ren}, i \text{ Ren}, j} \sigma_{\text{Ren}, i} \sigma_{\text{Ren}, j}} \quad (2)$$

其中， $\sigma_{\text{Ren}, i}$  及  $\sigma_{\text{Ren}, j}$  均為太陽光電、陸域風力、離岸風力、生質能、地熱發電、慣常水力及燃料電池年發電量的標準差， $\rho_{\text{Ren}, i \text{ Ren}, j}$  為兩再生能源發電技術間年發電量之相關係數。

接著，在固定發電量期望值下，以最小化標準差為目標式，可以解出在該發電量期望值下的最適電力組合，由無數個不同發電量期望值的最適組合，所連成的解集合線段則被稱之為效率前沿，本研究的效率前沿中，主要為發電量期望值及標準差間的抵換關係，而若無法獲得決策者對於發電量期望值及標準差偏好無異曲線時，在效率前沿上的任一點均可視為最適的組合。

其中，相關係數將為非常重要的參數，當兩個再生能源的年發電量為完全正相關(相關係數等於1)時，該兩個再生能源可視為同樣的電力來源；而當兩個再生能源的年發電量不是完全正相關時，任意再生能源的組合均有降低再生能源年發電量的標準差之功效，特別是當兩

個再生能源的年發電量為負相關時，對於再生能源年發電量標準差的降低將相較於為正相關時明顯，甚至當兩個再生能源的年發電量為完全負相關(相關係數等於-1)時，可以找到一個適當的組合使再生能源年發電量的變化被完全消除。然由於目前我國再生能源發展政策已確立，故本研究將基於目前再生能源發展政策的規劃進行評估，再衍伸探討若未來使用更多再生能源時，最適電力組合的布建策略為何。

此方法分析時，主要的數據需求為年發電量的期望值及標準差，故以下將先探討個別再生能源的評估，再整合所有再生能源的數據進行總再生能源的評估。

### 3. 再生能源年發電量機率分布評估

如表1所示，再生能源政策的規劃可分為太陽光電、陸域風力、離岸風力、生質能、地熱發電、慣常水力及燃料電池等七項。其2025年再生能源發電量最多的三項發電技術依序為太陽光電、風力發電(含離岸風力和陸域風力)及生質能，佔能源局規劃之再生能源總發電量的87.2%，但也可以看到，迄今，我國尚無商轉之離岸風力、地熱發電及燃料電池，由於缺乏歷史數據，故該三個發電技術在發電量不確定性的評估上較為困難，所幸地熱發電及燃料電池由於技術尚未成熟，故其政府的目標較低，對整體的結果影響較小，然而離岸風力目前於2025年規劃之發電量較大，則其有評估之必要性。故本研究將著重於探討太陽光電、離岸風力、陸域風力、生質能及慣常水力，地熱發電及燃料電池則依循政府發電量的評估，並假設其並無不確定性的存在。另外，本研究所使用的資料年度為2004年至2016年，主要的原因在於本研究太陽光電發電量的評估基於中央氣象局的全天空日射量資料，然其資料於2004年4月以前，由於未經過合適的校驗過程，其導致每日累積量數據低估了15.2%到32.6%不等(林



博雄，2003)。因此，為了較為準確的評估再生能源的發電量，故本研究使用的資料年度為2004年至2016年之間。

### 3.1 太陽光電

從表5中2004年至2016年的整體太陽光電發電量之資料來看(經濟部能源局，2017)，太陽光電的歷史容量因數介於0.068至0.133之間，單位裝置容量的歷史年發電量介於0.006至0.012億度/MW之間，若根據2004年至2016年的數據，可以計算其單位裝置容量的年發電量之標準差為0.0014億度/MW。但若從歷史數據進行2025年太陽光電年發電量的預估，其發電量期望值為185.3億度，標準差為28.90億度。相較於表1的再生能源發展目標，可以發現該值與再生能源發展目標預估值落差甚大，主要的原因在於太陽光電近年的發展迅速，無論是發電效率亦或者是效能均有大幅度的提升，各式各樣嶄新的設計更是不斷地湧現，而國內在地化的影響評估及相關的改進措施亦在逐步的建

立，可能因此對於太陽光電的未來有較為樂觀的評估。然如前所述，目前國內政策研究主要用固定的容量因數進行年發電量的評估，這可能會導致較大的誤差，故蕭子訓等(蕭子訓等，2017)利用線性規劃的數學方法，建構太陽光電的年發電量預測模型，並結合情境分析，探討各個參數對於太陽光電年發電量機率分布曲線的影響。

本文參考蕭子訓等(蕭子訓等，2017)所提出之評估方法，透過臺灣各縣市不同日照的大氣資料，進而評估各縣市的等效日照小時，在考量效能遞減率及整體的影響與損失係數下，利用線性規劃的數學方法，評估在最佳化的布建策略下，太陽光電年發電量的期望值，並結合歷史數據的分析，評估太陽光電年發電量的標準差，其中，效能遞減率、整體的影響與損失係數、各區全天空日射量的相關程度、發電量不確定性的調整係數、屋頂型及地面型太陽能廠土地設定及各年度裝置量策略援用蕭子訓等(蕭子訓等，2017)的設計。本研究所探討的

表5 太陽光電歷史績效評估

年度	太陽光電裝置容量(MW)	太陽光電發電量(億度)	太陽光電發電容量因數	太陽光電單位裝置容量的年發電量(億度/MW)
2004	0.6	0.006	0.114	0.010
2005	1.0	0.010	0.114	0.010
2006	1.4	0.015	0.122	0.011
2007	2.4	0.022	0.105	0.009
2008	5.6	0.046	0.094	0.008
2009	9.5	0.092	0.111	0.010
2010	22.0	0.256	0.133	0.012
2011	117.9	0.703	0.068	0.006
2012	222.5	1.731	0.089	0.008
2013	392.0	3.379	0.098	0.009
2014	620.1	5.517	0.102	0.009
2015	842.0	8.755	0.119	0.010
2016	1210.31	11.322	0.107	0.009
2020	6,500	81*(推估目標)	0.143(預估值)	
2025	20,000	250(政策目標)	0.143(預估值)	

資料來源：105年能源統計手冊(經濟部能源局，2017)；本研究整理。

\*2020年政策目標已調整為6.5 GW，依據2025年數據推估2020年太陽光電發電量。

情境包含擬真情境及樂觀情境(其設定如表6)，其中，擬真情境的結果以能夠較為真實的模擬未來我國於2025年若完成20 GW太陽光電時，實際各縣市建置的數量及年發電量為目標進行設計；而樂觀情境則是以最大化2025年太陽光電發電量為目標，盡可能的選用較為優質的太陽光電板，以及較為積極的布建策略，進而最大化2025年太陽光電發電量，樂觀情境呈現的是一個極端的情況。評估結果顯示，樂觀情境及擬真情境太陽光電年發電量的期望值及標準差如表7所示，預估於樂觀情境下，2025年太陽光電的發電量期望值為251.18億度，發電量之標準差為12.31億度；而於擬真情境時，2025年太陽光電的發電量期望值為213.07億度，發電量之標準差為17.79億度。

### 3.2 陸域風力

根據能源統計手冊(能源局，2017)中所記載，如表8所示，我國於2005年至2013年陸域風力裝置量自23.9 MW大幅成長至614.3 MW，近幾年雖趨緩，然我國能源局預計在2025年裝設至1200 MW。而從表8中2004年至2016年的資料來看，陸域風力發電的容量因數約介於0.240至0.436之間，單位裝置容量的發電量介於0.021至0.038億度/MW之間，若直接根據2004年至2016年的數據，可以計算其預期發電量為30.76億度，單位裝置容量的發電量之標準差為0.0047億度/MW，故可推估2025年陸域風力發電量之標準差為5.59億度。

然而，可以發現2004年及2005年的數據，相較於2006年迄今，其容量因數及單位裝置容

表6 各情境相關參數設定表

	樂觀情境	擬真情境
$\eta_{\text{loss}}$ (效能遞減率)	0.7%	3%
$F_{\text{loss}}$ (整體的影響與損失係數)	15%	20%
目標式	$\max E_{\text{solar}}, 2025$	$\max \sum_{\text{year}}^{2016 \sim 2025} E_{\text{solar}, \text{year}}$
各區全天空日射量的相關程度	低度正相關	中度正相關
發電量不確定性的調整係數 $\alpha$	1	1.414
各縣市屋頂型太陽能電廠土地來源下限	0	推估20年內新建公有機關屋頂面積
各縣市屋頂型太陽能電廠屋頂來源上限	20年內新建案屋頂面積	20年內新建案屋頂面積
各縣市地面型太陽能電廠土地來源下限	0	能源局既有規劃(本研究更新)
各縣市地面型太陽能電廠土地來源上限	地面型太陽光電潛力、長期耕作地及交通用地總和	地面型太陽光電潛力
各年度裝置量策略	先緩後快	先緩後快

資料來源：蕭子訓等，2017。

表7 樂觀及擬真情境太陽光電發電機率分布分析結果

	樂觀情境	擬真情境
2025年太陽光電發電量期望值(億度電)	251.18	213.07
2025年太陽光電發電量標準差(億度電)	12.31	17.79

資料來源：蕭子訓等，2017。



表8 陸域風力發電相關資訊

年度	陸域風力裝置容量 (MW)	陸域風力發電量 (億度)	陸域風力發電 容量因數	陸域風力單位裝置 容量的年發電量 (億度/MW)
2004	8.5	0.25	0.340	0.030
2005	23.9	0.91	0.436	0.038
2006	102	2.76	0.309	0.027
2007	186	4.40	0.270	0.024
2008	250.4	5.88	0.268	0.023
2009	374.3	7.87	0.240	0.021
2010	475.9	10.26	0.246	0.022
2011	522.7	14.93	0.326	0.029
2012	571	14.14	0.283	0.025
2013	614.2	16.40	0.305	0.027
2014	637.2	15.01	0.269	0.024
2015	646.7	15.25	0.269	0.024
2016	682.1	14.57	0.244	0.021
陸域風力發電預測				
2020 (不考量2004及2005)	800	19.29 (本研究推估值)	0.275 (平均值)	
2025 (不考量2004及2005)	1200	28.94 (本研究推估值)	0.275 (平均值)	

資料來源：105年能源統計手冊(經濟部能源局，2017)；本研究整理。

量的年發電量均高上許多，這可能是因為剛開始的陸域風力均建置在風場極好的地方，然而其在進行評估時由於少部分的資料導致較大的誤差，故若僅考量2006年至2016年的資料，可以發現陸域風力發電的容量因數介於0.240至0.326之間，單位裝置容量的發電量介於0.021至0.029億度/MW之間，根據2006年至2016年的數據，可以計算其預期發電量為28.94億度，單位裝置容量的發電量之標準差為0.0025億度/MW，故可推估2025年陸域風力發電量之標準差為2.95億度。

若考量2004年及2005年的數據，預估2025年裝設置1200 MW的預期發電量為30.76億度，但若不考量2004年及2005年的數據，預估2025年裝設置1200 MW的預期發電量為28.94億度，相較於表1能源局所提出之再生能源發展目標可以發現，其所預估的預期發電量為29億度，其

與不考量2004年及2005年的數據較為接近。本研究認為，由於2004年與2005年的資料與其他年落差甚大，故本研究認為不考量該兩年的資料能夠較準確地進行資料評估。故本研究預估2025年陸域風力的發電量為28.94億度，發電量之標準差為2.95億度。

### 3.3 離岸風力

迄今為止，我國僅有一座離岸風力發電兩部機組的示範場，並無長期運轉之離岸風電的數據可據此進行不確定性的評估，雖然陸域風力的資料較為齊全，然而，我國離岸風場的風況勝過陸域風場甚多，以表1能源局的評估為例，陸域風力的容量因數估算時使用0.275，然而離岸風力的容量因數估算時則使用0.420，由此可見直接使用陸域風力的資訊來評估離岸風力可能並不合適。在澎湖，迄今已有10.2 MW

的陸域風力，然而澎湖為離島且位於臺灣海峽，與目前離岸風場較好的區域相近，且其地理位置也較接近離岸風場的實際情況，故本研究將以澎湖的風力發電做為評估離岸風力的基礎。

根據台灣電力公司歷年統計年報的資料中所記載(台灣電力公司，2017)，如表9所示，澎湖的風力發電機於2004年及2010年分別商轉，至今共有10.2 MW的風力發電。而從表9中2004年至2016年的資料來看，澎湖陸域風力發電的容量因數約介於0.295至0.473之間，平均容量因數為0.403，單位裝置容量的發電量介於0.026至0.041億度/MW之間，根據2004年至2016年的數據，可以計算其單位裝置容量的發電量之標準

差為0.0042億度/MW，而我國規劃2025年將安裝3 GW的離岸風力發電，故可推估2025年離岸風力發電量為105.95億度，其標準差則為12.69億度。本研究透過澎湖陸域風力發電的資料推估離岸風力發電量的期望值，其結果於表1能源局預估的結果相近。

### 3.4 生質能

目前我國能源局所規劃之生質能發電主要包含廢棄物發電及其他生質能發電(蔗渣、黑液及沼氣發電)，而根據能源統計手冊(能源局，2017)中所記載，如表10及表11所示，可以發現自2004至2016年，我國生質能發電的總裝置容量僅增加81.7MW，其中以廢棄物發電的裝置

表9 澎湖陸域風力發電相關資訊及離岸風力發電資訊預估

年度	澎湖陸域風力裝置容量(MW)	澎湖陸域風力發電量(億度)	澎湖陸域風力發電容量因數	澎湖陸域風力單位裝置容量的年發電量(億度/MW)
2004	2.4*	0.09	0.409	0.036
2005	4.8	0.17	0.415	0.036
2006	4.8	0.18	0.431	0.038
2007	4.8	0.20	0.473	0.041
2008	4.8	0.19	0.445	0.039
2009	4.8	0.18	0.437	0.038
2010	4.8**	0.16	0.374	0.033
2011	10.2	0.41	0.454	0.040
2012	10.2	0.36	0.402	0.035
2013	10.2	0.35	0.392	0.034
2014	10.2	0.32	0.363	0.032
2015	10.2	0.32	0.353	0.031
2016	10.2	0.26	0.295	0.026
離岸風力發電預測				
2020	520	18.36 (本研究推估值)	0.403 (平均值)	
2025	3,000	105.95 (本研究推估值)	0.403 (平均值)	

資料來源：台灣電力公司105年統計年報(台灣電力公司，2017)；本研究整理。

\*澎湖中屯風力發電五至八號機於2004年12月正式商轉，商轉時間過短，由於本研究所探討之研究數據乃是以年為單位，故2004年僅分析中屯風力發電一至四號機。

\*\*2008年架設的6臺0.9 MW於2010年正式商轉，根據台電99年統計年報資料顯示，當年度澎湖風力發電年平均裝置容量為5.25 MW，實際裝置容量為10.2 MW，同樣由於本研究所探討之研究數據乃是以年為單位，故2010年僅分析中屯風力發電一至八號機。

增加了的量較多，而從表1可以看到能源局所規劃自2015年至2025年生質能發電的總裝置容量則增加了72.6 MW。

而從表10中2004年至2016年的資料來看，廢棄物發電的容量因數約介於0.54至0.60之間，單位裝置容量的發電量介於0.047至0.052億度/MW之間，根據2004年至2016年的數據，可以計算其單位裝置容量的發電量之標準差為0.0018億度/MW，故可推估2025年廢棄物發電量之標準差為1.11億度。而從表11中可以發現，其他生質能發電的容量因數約介於0.23至0.39之間，其變異相對較大，單位裝置容量的發電量介於0.020至0.034億度/MW之間，同樣根據2004年至2016年的數據，可以計算其單位裝置容量的發電量之標準差為0.0044億度/MW，故可推估2025年廢棄物發電量之標準差為0.80億度。結合表10及表11的數據可以估算，2025年生質能發電的總發電量預估為36.06

億度，假設廢棄物發電及其他生質能發電的發電量為獨立變數，透過均方根的計算，可求得生質能總發電量(含廢棄物發電及其他生質能發電)的標準差為1.37億度。

根據工研院臺灣2050能源情境供需模擬器的資料顯示(工業技術研究院，2014)，其預估2025年廢棄物發電及其他生質能發電的容量因數分別為0.5及0.3；而2030年至2050年的容量因數則分別預估為0.644及0.3。可以發現工研院所預估之容量因數在2025年時，廢棄物發電相較於實績值偏低，其他生質能發電則與實績值相近；然從能源局所規劃2020年及2025年的裝置容量及發電量進行推算，其生質能發電平均的容量因數估計值約為0.83，均較本研究及工研院之研究樂觀。

而在生質能發電中，廢棄物發電近年來的裝置容量達629.1MW，佔目前生質能發電總量的86.6%，若其裝置容量並無增減，至2025年

表10 廢棄物發電相關資訊

年度	廢棄物裝置容量 (MW)	廢棄物發電量 (億度)	廢棄物發電 容量因數	廢棄物單位裝置 容量的年發電量 (億度/MW)
2004	541.8	28.25	0.595	0.052
2005	573.8	28.53	0.568	0.050
2006	609.5	29.02	0.544	0.048
2007	622.5	30.14	0.553	0.048
2008	622.5	29.35	0.538	0.047
2009	622.5	29.24	0.536	0.047
2010	622.5	30.36	0.557	0.049
2011	624.4	30.92	0.565	0.050
2012	629.1	30.82	0.559	0.049
2013	629.1	31.49	0.571	0.050
2014	629.1	32.04	0.581	0.051
2015	629.1	32.59	0.591	0.052
2016	629.1	32.58	0.591	0.052
2020	629.1	31.16 (本研究推估值)	0.565 (平均值)	
2025	629.1	31.16 (本研究推估值)	0.565 (平均值)	

資料來源：105年能源統計手冊(經濟部能源局，2017)；本研究整理。



表11 其他生質能發電相關資訊

年度	其他生質能發電 裝置容量(MW)	其他生質能發電 發電量(億度)	其他生質能發電 發電容量因數	其他生質能發電單位 裝置容量的發電量 (億度/MW)
2004	103.1	3.49	0.386	0.034
2005	99.1	3.29	0.379	0.033
2006	101.8	3.24	0.363	0.032
2007	101.8	3.03	0.340	0.030
2008	101.8	2.74	0.307	0.027
2009	101.8	2.24	0.252	0.022
2010	101.8	2.72	0.305	0.027
2011	96.3	2.37	0.281	0.025
2012	96.3	2.43	0.289	0.025
2013	96.3	2.19	0.260	0.023
2014	96.3	2.43	0.287	0.025
2015	97.5	2.36	0.276	0.024
2016	97.5	1.94	0.227	0.020
2020	138.9	3.70 (本研究推估值)	0.304 (平均值)	
2025	183.9	4.90 (本研究推估值)	0.304 (平均值)	

資料來源：105年能源統計手冊(經濟部能源局，2017)；本研究整理。

將佔生質能發電的77.4%，其中，焚化爐又佔廢棄物發電中的9成。從焚化廠營運年報來看(如表12)，近年來的焚化處理量已達理論值的7成左右，實際上操作的時數亦已佔全年的約八成至八成五之間，特別是近年來操作時數有所上升，除了處理垃圾的量增加外，發電量更是有所增加。然而，從表12也可以發現，目前焚化處理量由於已達理論值的7成，若假設每年焚化爐需進行一個月的大修，能夠增加焚燒垃圾的裕度約為目前焚化處理量之3成，因此，可假設在有足夠的料源(廢棄物)的情況下，生質能發電量有增加3成的空間。但另一方面，焚化廠營運年報的資料顯示，近年的廢棄物的總量並沒有明顯的增加，因此，若要增加焚化廠的發電量，可能需要有其他的廢棄物來源，或透過改善焚化爐的熱效率<sup>6</sup>，進而提升焚化廠的發電量。

然由於本研究與能源局的預估差異甚大，為探討不同情況下，對於生質能發電量的影響，本研究規劃2025年兩個可能的情境如表13所示，其中，擬真情境為本研究依據歷史年的數據資料，進行相關參數的預估，是本研究認為未來可能會發生的情境，如先前所分析，本研究所預估2025年生質能發電的裝置容量依據能源局之規劃，設定為813 MW，而預估發電量為36.06億度，發電量的不確定性(標準差)為1.37億度；而樂觀情境，則根據表1經濟部能源局規劃之再生能源發展目標，將生質能發電裝置容量設定為813 MW，生質能發電量同樣根據表1設定為59億度，而如先前所分析，生質能發電量的標準差乃是根據單位裝置容量的發電量所計算，故可由擬真情境的結果推估樂觀情境之發電量標準差為2.24億度。

<sup>6</sup>環境與廢棄物(四)：環保署推動焚化爐供熱供冷系統 <https://scitechvista.nat.gov.tw/c/14Tx.htm>

表12 焚化廠營運資訊

年度	垃圾處理率*	設計處理量(公噸/日)	操作率**	發電量(億度)
2004	69.7%	22,050	81.5%	27.7
2005	69.8%	22,050	81.2%	28.5
2006	67.0%	23,250	80.2%	28.6
2007	70.1%	23,250	81.3%	29.6
2008	67.9%	24.650	79.2%	29.7
2009	67.7%	24.650	80.3%	29.2
2010	69.3%	24.650	81.6%	30.3
2011	70.6%	24.650	82.9%	30.8
2012	71.2%	24.650	83.1%	30.6
2013	70.6%	24.650	83.2%	31.3
2014	70.0%	24.650	83.5%	31.9
2015	72.6%	24.650	85.8%	32.2
2016	71.0%	24.650	84.5%	32.5

資料來源：焚化廠營運年報95年至105年。

\* 垃圾處理率 = (焚化處理量 / 365日) / 設計單日焚化處理量。

\*\* 操作率 = 操作時數 / 全年時數。

表13 生質能情境分析(本研究整理)

	樂觀情境	擬真情境
2025年生質能發電裝置容量	813 MW	813 MW
2025年預估生質能發電量	59 億度	36.06 億度
發電量的標準差	2.24億度	1.37億度

### 3.5 慣常水力

根據能源統計手冊(能源局，2017)中所記載，如表14所示，我國自2004年迄今，慣常水力的裝置容量並無明顯的增加，而從2016至2025年則預計新增60.6 MW的慣常水力裝置，而根據臺灣電力公司2016年11月公布之105年台電公司長期電源開發方案，可以看到未來台灣電力公司所規劃之水力發電包含2020年完成全臺小水力4 MW、2021年完成全臺小水力2 MW、2022年完成集集攔河堰小水力7 MW，共13 MW，由於新增水力發電設備對於周圍生態有一定的影響，通常是環保團體激烈抗爭的重要項目，而目前亦尚未看到其他慣常水力裝置的規劃，尚有努力的空間。

而從表14中2004年至2016年的資料來看，

慣常水力發電的容量因數約介於0.192至0.359之間，單位裝置容量的發電量介於0.017至0.031億度/MW之間，根據2004年至2016年的數據，可以計算其單位裝置容量的發電量之標準差為0.0038億度/MW，故可推估2025年慣常水力發電量及其標準差分別為48.18億度及8.21億度。相較之下，從表1的結果可以發現，能源局所預估慣常水力於2025年的發電量為48億度，與本研究評估相近。

### 3.6 總再生能源

3.1至3.5節包含太陽光電、陸域風力、離岸風力、生質能(含廢棄物發電跟其他生質能發電)及慣常水力中，個別再生能源的年發電量期望值及標準差的評估，以下則探討相關係數的評估。

表14 慣常水力發電相關資訊

年度	慣常水力裝置容量 (MW)	慣常水力發電量 (億度)	慣常水力發電 容量因數	慣常水力單位裝置 容量的年發電量 (億度/MW)
2004	1,909.7	32.10	0.192	0.017
2005	1,909.7	39.86	0.238	0.021
2006	1,909.7	40.88	0.244	0.021
2007	1,921.2	44.18	0.262	0.023
2008	1,937.9	43.05	0.254	0.022
2009	1,936.9	37.48	0.221	0.019
2010	1,977.4	41.94	0.242	0.021
2011	2,040.7	40.00	0.224	0.020
2012	2,081.4	56.70	0.311	0.027
2013	2,081.4	54.23	0.297	0.026
2014	2,081.4	43.18	0.237	0.021
2015	2,089.4	44.70	0.244	0.021
2016	2,089.4	65.62	0.359	0.031
2020	2100	47.06 (本研究推估值)	0.256 (平均值)	
2025	2150	48.18 (本研究推估值)	0.256 (平均值)	

資料來源：105年能源統計手冊(經濟部能源局，2017)；本研究整理。

實際上，評估相關性是非常不容易的，其需要大量正確的歷史數據，以及科學的佐證，但再生能源發展的時間有限，且以年為主的規劃層級之評估，數據累積相當緩慢，故過去研究者亦有使用專家經驗去假設資料之間的相關性(Awerbuch and Berger, 2003)。

雖然個別再生能源年發電量的相關係數可透過歷史數據進行評估，然而，若直接利用發電量的歷史數據進行相關性的分析，其結果並不能代表兩發電技術間實際上是否有實質的相關，如部分再生能源的裝置容量近幾年都呈現成長的趨勢，其發電量亦均為成長的趨勢，但並不表示該類再生能源技術間的未來年發電量同樣呈現正相關的關係。因此，本研究認為進行單位裝置容量下的發電量(容量因數)之相關性的評估再生發電技術間年發電量之相關係數是較為合適的。但是同樣的，若以固定區間容量因數的數值，進行兩再生能源技術間年發

電量之相關係數評估，其所算出的相關係數並非表示該兩項再生能源技術間存在事實的相關性，舉例而言，若利用2004年至2016年的統計資料進行分析，陸域風力與其他生質能發電間的相關係數為0.67，接近於高度的正相關，其表示當明年若陸域風力較多時，其他生質能也能有較多的發電量，然這在科學上卻很難解釋這個相關性，因為風力會隨著天氣的情況有所波動，但生質能中主要受限於燃料的來源，甚或若使用2010年至2016年的數據進行分析時，陸域風力與其他生質能發電間的相關性僅為0.12，其與2004年至2016年數據所分析的0.67相差巨大，因此，直接使用固定年度區間的統計數據進行相關係數的分析可能會有所偏頗。故以下將分項探討。

首先，由於生質能發電受限於其燃料的來源，因此，本研究認為其與其他幾項發電技術的性質較為不同，可假設無相關性(相關係數



$\rho_{Ren, i Ren, j} = 0$ )，前述案例也支持此論述。

慣常水力的發電主要受限於乾枯水期，直覺上可能與環境溫度有所關連，例如當溫度較高時，水的蒸發現象比較明顯，因此其發電量較低，另外當溫度較高時，過去研究指出，太陽能板的效率將會較差(Skoplaki and Palyvos, 2009; Dupré *et al.*, 2016)，進而降低其發電量，故從物理分析上來看，太陽光電及慣常水力年發電量的相關性當為正相關，然而，從表15實際統計數據分析的結果來看，太陽光電及慣常水力發電量的相關係數於多數年度間分析資料顯示為低度負相關，而2010年至2016年的數據分析則為低度正相關，其相關性不高，且與推論的結果相違背，可能的成因是由於該現象並非影響發電量波動的主因，故本研究假設太陽光電及慣常水力發電量間為無相關，而風的形成與太陽能有高度的關連，因此，本研究亦設定風力與慣常水力為無相關。

表15 各年度至2016年間，太陽光電及慣常水力發電量的相關係數(本研究整理)

使用的資料年度	相關係數
2004-2016	-0.16
2005-2016	-0.11
2006-2016	-0.08
2007-2016	-0.03
2008-2016	-0.03
2009-2016	-0.05
2010-2016	0.01

由於風的形成乃是因為大氣中溫度梯度造成的壓力梯度，進而導致空氣的自然對流，因此，本研究認為，當平均溫度有所增加時，不但會造成太陽光電發電效率的降低(Skoplaki and Palyvos, 2009)，較大的溫度梯度亦會產生較大的風，在不超過風機設計的額定功率時，其較大的動能將可能會產生較多的風力發電，所以，本研究認為，從物理上的分析來看，太陽光電與風力發電的年發電量應當是呈現負相關的趨勢，在臺灣，陸域風力與太陽光電的背

景環境較為類似，而離岸風力坐落於海上，則較為不同，此特性亦可能會導致相關程度的不同，因我國目前並無長期商轉的離岸風力發電，故以下使用澎湖風力發電的資料代替離岸風力進行探討。本研究分析太陽光電的年發電量分別與陸域風力及澎湖陸域風力發電的相關性，如表16及表17所示，數個數據的區間均顯示，無論陸域風力或者離岸風力與太陽光電的年發電量均呈現負相關，與物理上的推論相符合，但如前文所述，由於陸域風力2004年及2005年的數據，相較於2006年迄今，其容量因數及單位裝置容量的年發電量均高上許多，這可能是因為剛開始的陸域風力均建置在風場極好的地方，然而其在進行評估時可能由於少部分的資料導致較大的誤差，故可以看到考慮該兩個年度的數據分析的相關性較低，從表16可以發現自2007年至2010年為起始年至2016年的分析結果，相關性介於-0.78至-0.82之間，故

表16 各年度至2016年間，太陽光電及陸域風力發電量的相關係數(本研究整理)

使用的資料年度	相關係數
2004-2016	-0.07
2005-2016	-0.12
2006-2016	-0.54
2007-2016	-0.78
2008-2016	-0.78
2009-2016	-0.80
2010-2016	-0.82

表17 各年度至2016年間，太陽光電及澎湖風力發電量的相關係數(本研究整理)

使用的資料年度	相關係數
2004-2016	-0.31
2005-2016	-0.32
2006-2016	-0.34
2007-2016	-0.44
2008-2016	-0.52
2009-2016	-0.50
2010-2016	-0.64

本研究取該四筆資料的平均值-0.80作為太陽光電及陸域風力發電量的相關係數；從表17可以發現，雖然太陽光電與澎湖風力發電明顯呈中度負相關，然其自2007年至2010年為起始年至2016年的分析結果，相關性介於-0.44至-0.64之間，波動較大，這可能是因為僅使用澎湖風力發電時，其裝置容量較低所造成少數不確定因子被放大的原因，故當未來大規模建置離岸風力時，該情況將有可能改善，故本研究取自2008年至2010年為起始年至2016年的分析結果，共三筆數據的平均值0.55作為太陽光電及離岸風力發電量的相關係數。

陸域風力與離岸風力同屬風力發電，而風的來源又同樣源於陽光強度所造成的溫度梯度，故其從物理上分析來說，其發電量當屬正相關，但又受限於背景環境的不同，故其可能不會是完全正相關，如表18所示，陸域風力及澎湖風力發電量的相關係數，其數值的確為正相關，然其數值波動極大，若僅看近幾年的數據，其呈現接近完成正相關，但若探討的時間較長，則接近於高度正相關，本研究認為，表18的數據包含了三個階段，首先，由於2005年時，陸域風機的容量因數異常的高(0.436)，因此，包含該年度的分析資料會導致較大的誤差，然由於澎湖風力發電有數隻風機於2010年才商轉，因此，在2010年前後，因為風機數量

表18 各年度至2016年間，陸域風力及澎湖風力發電量的相關係數(本研究整理)

使用的資料年度	相關係數
2004-2016	0.27
2005-2016	0.27
2006-2016	0.41
2007-2016	0.38
2008-2016	0.44
2009-2016	0.51
2010-2016	0.85
2011-2016	0.95
2012-2016	0.89
2013-2016	0.94

的差異，導致影響風機發電量波動的主要因素有所差異，本研究認為在2010年後，影響風機年發電量的主要因素為整體大氣環境，故相關係數較高，而2010年之前，本研究認為由於風機數量較少，整體大氣環境對於風機年發電量的影響相對較低，其他因素的影響相形較高。故本研究將採用近年的數值為參考，將起始年度2010年至2013年共四筆數據進行平均，取相關係數0.91作為陸域風力及離岸風力發電量的相關係數。

彙整上述的分析結果，表19為本研究所訂定再生能源發電技術間容量因數之相關係數，而帶入方程式(2)可進一步呈現如下：

$$\sigma(E_{Ren}) = \sqrt{\sum \sigma_{Ren,i}^2 + 2(-0.8 \times \sigma_{solar} \sigma_{onshore\ wind} - 0.55 \times \sigma_{solar} \sigma_{offshore\ wind} + 0.91 \times \sigma_{onshore\ wind} \sigma_{offshore\ wind})} \quad (3)$$

其中為 $\sigma_{solar}$ 、 $\sigma_{onshore\ wind}$ 及 $\sigma_{offshore\ wind}$ 分別為太陽光電、陸域風力及離岸風力發電量的標準差。而利用方程式(3)，即可進行總再生能源發電量標準差的評估。

## 4. 分析結果與討論

從第3章的分析可以發現，本研究數據分析的結果與政策所預估有較大的差異，故將各種再生能源發電量的預估分為兩個情境探討，分別為樂觀情境及擬真情境，其中，兩個情境主要的分歧在於太陽光電與生質能的年發電量評估結果不同，這也是本研究與政策預估差距較大的兩種再生能源；風力發電與水力發電由於本研究與政策所評估的差異不大，然目前我國並無進行發電量標準差的評估，故風力發電與水力發電均以本研究分析之數值進行後續的探討；此外，地熱發電及燃料電池目前並無歷史數據可提供評估，故發電量期望值援用我國政府的政策目標，並假設其無明顯的年發電量波動。

樂觀情境與擬真情境再生能源年發電量的機率分布結果如表20及圖1所示，從表19可以

表19 本研究訂定再生能源發電技術間容量因數之相關係數(本研究整理)

	太陽光電	陸域風力	離岸風力 (澎湖)	生質能 (廢棄物)	生質能 (其他生質能)	慣常水力
太陽光電	1.00	-0.80	-0.55	0	0	0
陸域風力	-0.80	1.00	0.91	0	0	0
離岸風力(澎湖)	-0.55	0.91	1.00	0	0	0
生質能(廢棄物)	0	0	0	1.00	0	0
生質能(其他生質能)	0	0	0	0	1.00	0
慣常水力	0	0	0	0	0	1.00

表20 樂觀及擬真情境再生能源發電機率分布分析結果(本研究整理)

	樂觀情境		擬真情境	
	發電量期望值 (億度電)	發電量標準差 (億度電)	發電量期望值 (億度電)	發電量標準差 (億度電)
太陽光電	251.18	12.31	213.07	17.79
陸域風力	28.94	2.95	28.94	2.95
離岸風力	105.95	12.69	105.95	12.69
生質能	59	2.24	36.06	1.37
地熱發電	13	-	13	-
慣常水力	48.18	8.21	48.18	8.21
燃料電池	5	-	5	-
總計	511.27	15.21	450.23	17.05
95%信心程度的發電量分布(億度電)	481.46 ~ 541.08		416.81 ~ 483.65	
99%信心程度的發電量分布(億度電)	472.04 ~ 550.50		406.24 ~ 494.22	

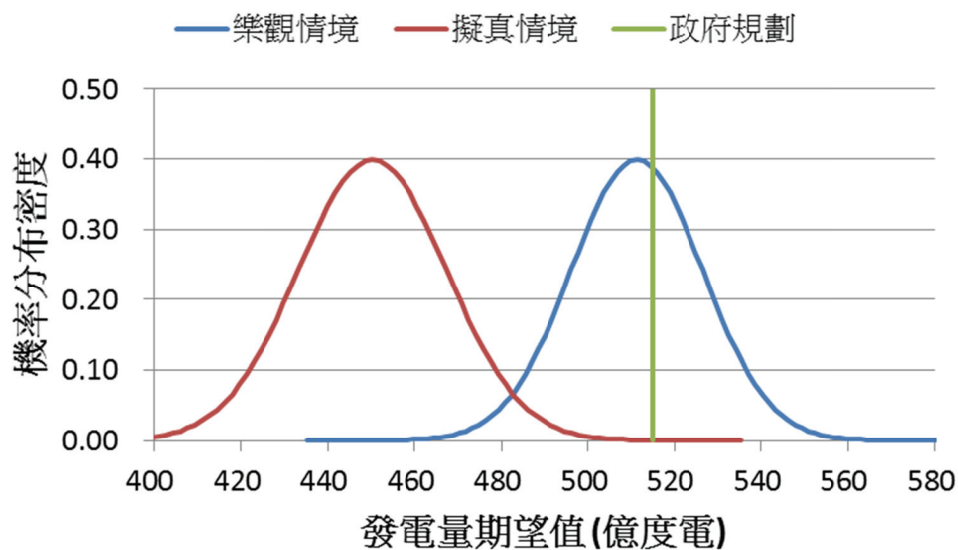


圖1 各情境總再生能源發電量機率分布(本研究繪製)



看到，由於太陽光電的年發電量分別與離岸風力及陸域風力呈現負相關，故雖然太陽光電發電量的標準差很高，但由於各項再生能源的混合有降低變異程度的效果，可以發現擬真情境中，總再生能源的標準差較太陽光電個別的標準差要低。

而相較於表1的再生能源發展目標，從期望值可以發現，樂觀情境的期望值與目前政策規劃較為接近，然在本研究所模擬之較為貼近現實的擬真情境中可以發現，其發電量的期望值僅450.23億度，相較於政策目標尚有64.77億度的發電缺口，此外，期望值就機率分布而言，可視為50%機率的最低保證發電量，但也可以視為有50%的機率，實際的發電量將小於該值，若以機率來進行評估，樂觀情境下，再生能源發電量達到515億度電的機率為40.314%，而擬真情境下，達到515億度電的機率為0.007%，其中，造成擬真情境達成政策目標機率不高的原因，主要是目前政府對於太陽光電及生質能發電的評估較為樂觀。援此，本研究顯示，若以目前政府所規劃之再生能源發展目標，要達成515億度電的規劃目標，其機率可能不高。

然如前所述，由於目前參與我國離岸風電

投標的廠商中，其裝置容量已達10 GW，政府經評估後將先進行裝置容量3.5 GW的遴選，並開放2 GW的裝置容量讓其餘廠商參與競標，故本研究假設於2025年離岸風力實際安裝的裝置容量達5.5 GW時，結合擬真情境的設計進行評估，其結果如表21所示，可以發現在「擬真情境+2.5 GW離岸風力競標」的設計中，發電量的期望值為538.52億度，高於目前政府再生能源發展目標的規劃，但由於太陽光電及風力發電對於天氣高度依賴的特性，若以機率來進行評估，擬真情境+2.5 GW離岸風力競標的設計再生能源發電量達到515億度電的機率為84.897%，其相較於樂觀情境與擬真情境，能夠有更高的機率達成再生能源發電佔比的政策目標，因此，由於目前抗暖化已是全球趨勢，若要達到政策目標並考慮策略的可行性，建議決策者應當適度的提升離岸風力的發展目標。

而若以表21個別再生能源發電量期望值與標準差的數據為基礎，並進行以下假設：

1. 陸域風力、生質能、地熱發電、慣常水力及燃料電池的裝置量與發電量不變。
2. 太陽光電的裝置量下限設定為20 GW。
3. 離岸風力的裝置量下限設定為3 GW。

可探討未來在使用更多的太陽光電及離岸

表21 擬真及其增加2.5 GW離岸風力的發電機率分布分析結果(本研究整理)

	擬真情境		擬真情境+2.5 GW離岸風力競標	
	發電量期望值 (億度電)	發電量標準差 (億度電)	發電量期望值 (億度電)	發電量標準差 (億度電)
太陽光電	213.07	17.79	213.07	17.8
陸域風力	28.94	2.95	28.94	2.95
離岸風力	105.95	12.69	194.24	23.26
生質能	36.06	1.37	36.06	1.37
地熱發電	13	-	13	-
慣常水力	48.18	8.21	48.18	8.21
燃料電池	5	-	5	-
總計	450.23	17.05	538.52	22.79
95%信心程度的發電量分布(億度電)	416.81 ~ 483.65		493.85 ~ 583.19	
99%信心程度的發電量分布(億度電)	406.24 ~ 494.22		479.72 ~ 597.32	

風力時，最適的電力組合策略。表22及圖2即為在固定發電量期望值下，最小化發電量標準差的太陽光電及離岸風力的布建策略，可以發現在最小化發電量標準差的目標下，目前政府所規劃之再生能源發展目標已相當接近最適電力組合。然而，如情境「擬真情境+2.5 GW離岸風力競標」僅將離岸風力的目標提升至5.5 GW且太陽光電維持20 GW時，若改以太陽光電25.0 GW及離岸風力4.0 GW的最適發電組合，在同樣的發電量期望值下，發電量標準差可以從22.79億度改善為20.71億度，發電量大於515億度的機率可從84.897%改善為87.196%。此外，從表22太陽光電與離岸風力裝置量比值來看，未來太陽光電及離岸風力的裝置須同步增加，但離岸風電的成長率須高於太陽光電，方能最小化發電量標準差。

本研究主要透過財務經濟學上資產投資組合風險評估的方法，進行太陽光電及離岸風力

最適的布建策略進行探討，但基於再生能源實際上發展的時間有限，且若以年發電量為尺度進行評估，相關的數據必然是稀缺的，這必然是這一類研究的限制所在。本研究主要透過數據的觀察與分析，探討最適的太陽光電與離岸風力裝置量比值，研究成果指出，未來太陽光電及離岸風力的裝置須同步增加，但離岸風電的成長率須高於太陽光電，方能最小化發電量標準差。但由於目前離岸風力並無實績資料，取澎湖的資料代替進行計算難免有所偏差，另外太陽光電及離岸風力大規模布建後對於發電量標準差的實際衝擊可能會與本研究所設想的情況不盡相同，故建議後續研究者一來可針對相關數據進行更深入的探討及修正，二來決策者亦須長期追蹤，方可確保資源的最適配置。此外，表22的分析基於假設太陽光電及離岸風力臺灣尚有更高的潛力，且尚不考慮其他再生能源，但由於臺灣土地稀缺，未來再生能源發

表22 不同發電量期望值下，太陽光電及離岸風力的布建策略(本研究整理)

發電量期望值 (億度)	發電量標準差 (億度)	太陽光電裝置量 (GW)	離岸風力裝置量 (GW)	太陽光電與離岸 風力裝置量比值
450.23	17.04	19.88	3.03	6.7
470.00	17.85	21.02	3.25	6.5
490.00	18.67	22.18	3.47	6.4
515.00	19.71	23.62	3.74	6.3
538.52	20.71	24.97	4.00	6.2
600.00	23.34	28.51	4.67	6.1
772.50	30.93	38.45	6.56	5.9
擬真情境				
發電量期望值 (億度)	發電量標準差 (億度)	太陽光電裝置量 (GW)	離岸風力裝置量 (GW)	太陽光電與離岸 風力裝置量比值
450.23	17.05	20.0	3.00	6.7
最適配比策略				
450.23	17.04	19.88	3.03	
擬真情境+2.5 GW離岸風力競標				
發電量期望值 (億度)	發電量標準差 (億度)	太陽光電裝置量 (GW)	離岸風力裝置量 (GW)	發電量大於515億 度的機率
538.52	22.79	20.00	5.50	84.897%
最適配比策略				
538.52	20.71	24.97	4.00	87.196%

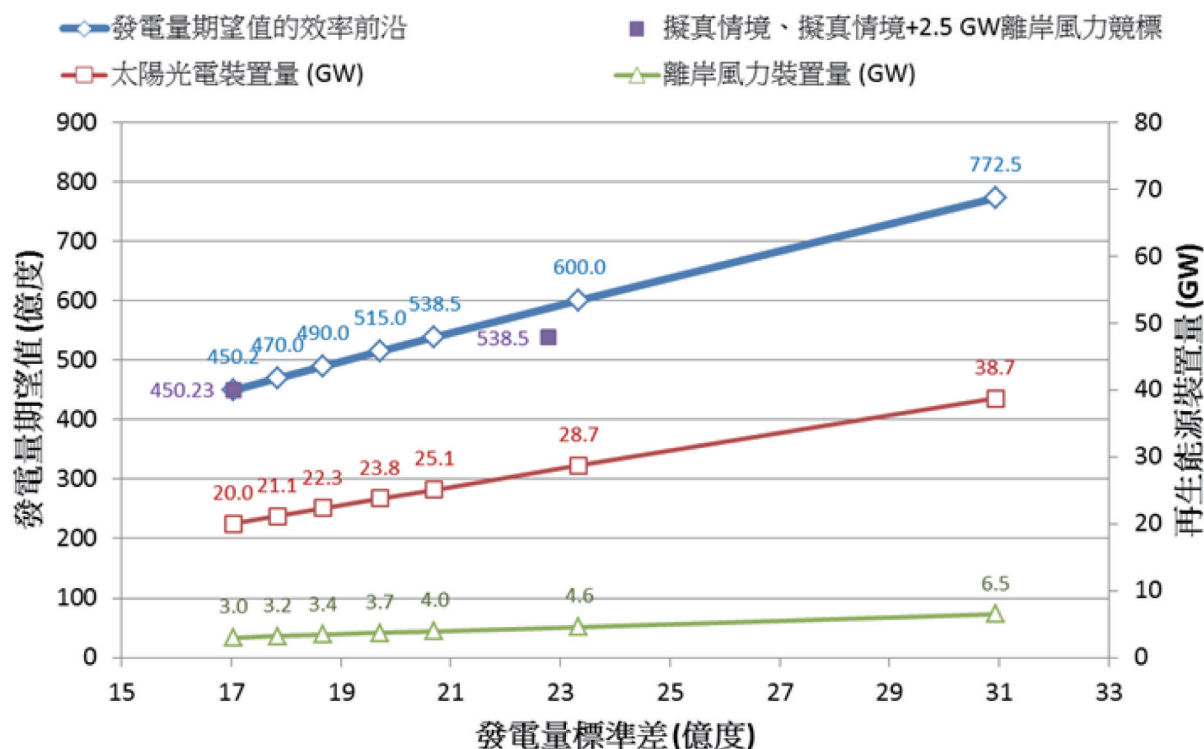


圖2 發電量期望值的效率前沿(本研究繪製)

展的極限亦為重要的研究課題，且納入不同能源對於發電量標準差將有一定改善的空間，這些都會對於最適布建策略有所影響。

研究結果指出，由於太陽光電及風力發電對於天氣的高度依賴，未來當大量使用後，除了瞬時的驟升驟降外，逐年的整體發電量的波動亦相當劇烈，政府及未來的電業機構須即早防範相關情況(如事先規劃更為足夠的化石燃料或生質燃料)，進行整體能源規劃時需要留有餘裕，以應不時之需。

## 5. 結 論

抑制溫室氣體的排放，有效的控制氣候變遷是人類必須面臨的重要課題，其中，再生能源的使用將在其中舉足輕重之影響，然再生能源與以往所使用的傳統能源極為不同，從容量因數的變異係數中可以發現，太陽光電與陸域風力的變異係數為15.6%及18.2%，相較於燃煤發電的2.36%數值為高，且其與使用燃料的傳統能源不同，太陽光電與風力發電高度依賴

天氣的變化，因此未來電力系統因應的相關配套設計將十分重要。

本研究利用機率分布曲線來描繪再生能源的年發電量，並創新的結合了財務經濟學上進行資產投資組合風險評估的方法，量化分析數種再生能源間的相關程度，藉此量化總再生能源發電量的期望值及標準差。研究成果也指出，由於較高的溫度將會導致太陽光電板的效率下降，進而降低太陽光電的發電量，但同時較高的溫度會引起較強的自然對流，故風力發電將會產生更多的電，從歷史數據也可發現太陽光電與風力發電的年發電量呈負相關，故同時使用太陽光電及風力發電將能大幅降低年發電量的不確定性。

透過情境的設計，本研究進行總再生能源年發電量的評估，研究結果顯示，樂觀情境的年發電量期望值略低於政府所提出之再生能源發展目標，而擬真情境的期望值僅450.23億度，相較於政策目標尚有64.77億度的發電缺口，若以機率來進行評估，樂觀情境下，再生能源發電量達到515億度電的機率為40.314%，



而擬真情境下，達到515億度電的機率為0.007%。援此，本研究顯示，若以目前政府所規劃之再生能源發展目標，若要達成515億度電的規劃目標，其機率可能不高。然另一方面，由於我國具有世界一級的離岸風場，且目前參與我國離岸風電投標的廠商中，其裝置容量遠高於政策目標，故本研究亦指出，建議政府可擴大離岸風力的政策目標，若在目前的規劃下，將離岸風力的目標提升至5.5 GW時，再生能源發電量達到515億度電的機率將提升至84.897%，其將能夠大幅的提升達成政策目標的機會。另外，本研究透過財務經濟學上資產投資組合風險評估的方法，進行太陽光電及離岸風力最適的布建策略進行探討，研究成果指出，未來太陽光電及離岸風力的裝置須同步增加，但離岸風電的成長率須高於太陽光電，方能達到最適的布建策略，其可在同樣發電量期望值的情況下，降低年發電量的波動。

## 參考文獻

- 工業技術研究院，2014。臺灣2050能源供需狀態模擬器，<http://my2050.twenergy.org.tw/>。
- 王京明與林佑民，2017。非核家園與政府再生能源推廣目標下之碳稅與最適電源組合分析，臺灣能源期刊，第四卷(第二期)：199-220頁。
- 台灣電力公司企劃處，2017。105年統計年報。
- 行政院國家科學委員會，2008。98年全國能源會議總結報告。
- 林博雄，2003。中央氣象局測站之地表全天空輻射量的效驗與分析。
- 胡瑋元，2014。《我國能源政策之回顧與展望》，核能研究所。
- 梁啟源，2014。《全國能源會議的回顧與展望》，臺北，中華經濟研究院。
- 梁啟源、鄭睿合、郭博堯與郭箴誠，2015。我國最適電力配比之研究，臺灣能源期刊，第二卷(第四期)：481-496頁。
- 郭瑾瑋、周裕豐、洪明龍與劉子衡，2015。應用臺灣TIMES模型進行我國長期電力供需規劃，臺灣能源期刊，第二卷(第四期)：1-20頁。
- 黃郁青、陳治均與葛復光，2017。利用TIMES模型進行我國電網級儲能分析，臺灣能源期刊，第四卷(第一期)：45-58頁。
- 楊秉訓，2013。不確定與經濟決策，瀚蘆圖書，臺北。
- 經濟部，2009a。87年全國能源會議結論-執行成效與檢討。
- 經濟部，2009b。94年全國能源會議結論-執行成效與檢討。
- 經濟部能源局，2015。全國能源會議全體大會總結報告。
- 經濟部能源局，2017。中華民國105年能源統計手冊。
- 蕭子訓、黃孔良與張耀仁，2017。太陽光電年發電量預測模型建置及策略研究，臺灣能源期刊，第四卷(第四期)：401-430頁。
- Awerbuch, S. and M. Berger, 2003. Applying Portfolio Theory to EU Electricity Planning and Policy-Making, IEA Report, Paris.
- Awerbuch, S. and S. Yang, 2007. Efficient Electricity Generating Portfolios for Europe: Maximising Energy Security and Climate Change Mitigation. EIB Papers, 12: 2, 8-37.
- Dupré, O., R. Vaillon and M.A. Green, 2016. Thermal Behavior of Photovoltaic Devices, Springer, Switzerland.
- EDF, 2015. Technical and Economic Analysis of the European Electricity System with 60% RESs.
- IEA, 2017. World Energy Outlook 2017.
- IPCC, 2014. Climate change 2014: synthesis report: summary for policymakers.
- Kondziella, H. and T. Bruckner, 2016. Flexibility requirements of renewable energy based

- electricity systems – a review of research results and methodologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53: 10-22.
- Markowitz, H., 1952. Portfolio Selection, *The Journal of Finance*, 7: 77-91.
- REN21, 2017. *Renewables 2017 Global Status Report*.
- Skoplaki, E. and J.A. Palyvos, 2009. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, *Solar Energy*, 83(5): 614-624.
- Taylor, JR, 1997. *An introduction to error analysis*, 2nd edn. University Science Books, Sausalito.
- Ueckerdt, F., R. Brecha, G. Luderer, P. Sullivan, E. Schmid, N. Bauer, D. Böttger, and R. Pietzcker, 2015. Representing power sector variability and the integration of variable renewables in long-term energy-economy models using residual load duration curves, *Energy*, 90: 1799-1714.

# The Assessment on Annual Power Generation and Probability Distributions of Renewable Energy in Taiwan

Tzu-Hsun Hsiao<sup>1\*</sup> Kong-Liang Huang<sup>1</sup> Fu-Kuang Ko<sup>2</sup>

## ABSTRACT

The paper utilized probability distributions of annual power generation to analyze variations of large renewable energy sources interconnected onto network system. Compared with the assessment of annual power generation based on fixed capacity factors, the probability distribution analysis method could assist decision makers in preventing related risks. The Portfolio Theory is applied to evaluate correlations between power generations of several renewable energy sources, in order to estimate expected values and standard deviations of renewable energy. The simulation results indicated that the capacity factor correlation between solar and wind power is negative related. It meant that these two energy sources can be utilized simultaneously to reduce the variation of annual power generation. In the optimistic scenario, the probability to reach the policy target of 515 TWh of renewable power generation is 40.314%, and the probability is lower for the simulated scenario. If the policy target of offshore wind power is raised to 5.5 GW, the probability in the simulated scenario to reach policy goals will increase to 84.897%. Moreover, the study also pointed out that the government's current target for renewable energy is close to optimum electricity portfolio. To reach minimum variations of renewable energy, solar and offshore wind power need to increase simultaneously, and growth rate of offshore wind power need to be higher in the future.

**Keywords:** Renewable energy, solar power, wind power, annual generation, portfolio theory

---

<sup>1</sup> Technician, Center of Energy Economics and Strategy Research, Institute of Nuclear Energy Research, Atomic Energy Council, R.O.C.

<sup>2</sup> Director, Center of Energy Economics and Strategy Research, INER, Atomic Energy Council, R.O.C.

\*Corresponding Author, Phone: +886-3-4711400#2727, E-mail: skyschin0908@iner.gov.tw

Received Date: March 5, 2018

Revised Date: May 9, 2018

Accepted Date: May 14, 2018