降低再生能源發電不穩定影響之策略

Strategies of Reducing the Instability Impact of Renewable Energy Power Generation

許志義*
Hsu, Jyh-Yih

摘　要

再生能源中太陽能與風力發電受季節氣候影響，具發電不穩定的特性。如何穩定電力系統之供電品質是重要課題。本研究之內容有四：一、描述國外和台灣再生能源發電配比目標與現況；二、探討美國因應再生能源發電不穩定之作法及策略；三、探討先進國家運用何種方法評估該國合理的再生能源占比範圍；四、提出我國因應再生能源占比增加時發電不穩定之可行策略。

本研究藉由探討美國相關案例，彙整出降低再生能源發電不穩定的四種執行策略與三個政策面向。同時，針對國內當前與未來之電力市場環境，分析可能面臨之挑戰，提出電力調度的法則逐漸由傳統「發電追隨負載」的方式，同時納入「負載追隨發電」方式，兩者相互爲用，以及其他有關市場誘因制度與政策法規建議，期望對再生能源發電不穩定的問題有正面助益。

Abstract

Solar energy and wind energy are vulnerable to seasonal and climatic effects, resulting in unstable power supply characteristics. Therefore, how to stabilize the power supply system is currently an important energy policy concern. The content of this study includes: (1) describing the renewable portfolio standard and the current development status of foreign countries and Taiwan; (2) exploring strategies to mitigate the impact of intermittency from renewable energy of the US; (3) exploring the methods for evaluating reasonable percentage of renewable energy of advanced countries; (4) suggesting development strategies to mitigate the impact of intermittent power output of renewable energy for Taiwan.

In this study, four implementation strategies and three policies have been presented to reduce the instability impact of renewable energy by exploring the relevant cases in the US. Aside from other relevant incentive market regulations, policy recommendations include gradually shifting power dispatching regulations away from "power generation follows demand load" to accommodate "demand load follows power generation" strategy.

關鍵詞(Key Words): 再生能源發電系統(Renewable Energy Power Generation System)、需量反應(Demand Response)、儲能系統(Energy Storage System)、聚合商(Aggregator)、虛擬電廠(Virtual Power Plant)。

*國立中興大學大數據中心、資訊管理學系、應用經濟學系

壹、前言

近年來由於全球能源價格震盪和環保意識提升等因素，積極發展再生能源發電已是共同趨勢。在台灣，因各種環保抗爭與自力救濟不斷發生，居民鄰避(Not In My Back Yard, NIMBY)意識普遍，大型的核能和火力電廠與區域輸配電線等設施經常無法順利進行建設，再加上電力系統尖峰負載持續成長，導致地區性電力供需失衡。在此情況下，政府有關單位積極推動小型再生能源，增加分散式的太陽能和風力發電，以增加電力供給，且有降低二氧化碳排放量等益處。

值得注意的，再生能源中太陽能與風力發電這兩個主要項目，有易受季節和氣候影響，造成發電不穩定的特性：風力發電受風力大小影響、太陽光電受日照強弱影響，皆無法充分配合用電負載需求之變化，穩定供應電力。以台灣而言，夏季風力較弱，發電量少，但國內夏季電力需求高，無法配合夏季尖峰供電需求；冬季風力較強，發電量較多，惟冬季電力負載需求較低。而太陽光電則在夜間、陰雨天發電量銳減，無法充分配合電力調度之需要。尤其，天有不測風雲，即使平常日照充足或風力強勁時段，仍有可能因氣流瞬間之變化，突然變天，造成太陽能或風力發電起伏不定之狀況出現。因此，太陽能與風力發電通常需要供給面與需求面之配套措施相互搭配，以為因應。

當再生能源占總電力負載供給比例過高時，如何穩定電力系統之供電品質，是當前世界各國積極發展再生能源普遍共同遭遇的難題。根據先進國家之發展經驗，因應再生能源不穩定之作法與配套措施，並非單一。一般而言，幾種主流的做法至少包括：搭配快速追補的升降載發電機組(如抽蓄水力機組、傳統水力機組、複循環機組、氣渦輪機組、輕柴油機組等)、進行需求面管理、儲能系統之應用、其他電力輔助服務(Ancillary Service)等方案。

本研究內容旨在探討降低再生能源發電不穩定影響之策略，具體言之，包括以下數端：一、描述先進國家和台灣再生能源發電配比目標與現況；二、探討美國因應再生能源發電不穩定之作法及策略；三、探討先進國家運用何種方法評估該國合理的再生能源占比範圍；四、提出我國因應再生能源占比增加時發電不穩定之可行策略。

貳、國內外再生能源發電配比目標與現況

一、國外再生能源發電配比目標與現況

(一) 國外再生能源發電配比之目標

世界各國對於再生能源發電占總發電量的比例目標和規定各不相同，而大多數先進國家於法規中有明確訂定其比例目標與年限，稱作再生能源配比標準(Renewable Portfolio Standard, RPS)，至 2015 年底為止共有 61 個國家或地區訂定了目標，如表 1 所示。

再生能源配比標準是指政府為培育再生能源市場、使再生能源發電量達到一個有保障的最低水平而採用的強制性政策手段，屬於再生能源總量目標控管機制。再生能源配比標準是一個以數量為基礎的政策機制，可視為一種固定產量比例法，即要求再生能源發電量在總發電量中占一定的比例；政府通常規定發電業者或經營電網的配電業者，保證一定比例的電力必須來源於再生能源發電。

德國與美國的再生能源配比標準如表 2 所示，在歐盟處於再生能源發電領導國家的德國，分別訂定其再生能源配比標準為 2020 年達到 35%；2050 年達到 80%的高比例。因德國位於歐洲大陸，電網與鄰近國家有完整相連，當缺電時可向法國、捷克等核能大國購電，發電過剩時也可外

銷電力至其他國家，所以電力供需有足夠的彈性可大量使用再生能源發電。而美國各州再生能源配比標準規定不盡相同，大多數地區計畫在 2020 年以前達到 10%至20%之間的發電比例，與台灣同樣是孤立島嶼的美國夏威夷州，甚至已訂定了在 2045 年以前達到 100%完全再生能源發電的目標。

表 1　執行再生能源發電配比政策之國家或地區

Note: Text in **bold** indicates new/revised in 2015.

YEAR	CUMULATIVE #[1]	COUNTRIES/STATES/PROVINCES ADDED THAT YEAR
1983	1	Iowa (USA)
1994	2	Minnesota (USA)
1996	3	Arizona (USA)
1997	6	Maine, Massachusetts, Nevada (USA)
1998	9	Connecticut, Pennsylvania, Wisconsin (USA)
1999	12	Italy; New Jersey, Texas (USA)
2000	13	New Mexico (USA)
2001	15	Australia; Flanders (Belgium)
2002	18	United Kingdom; Wallonia (Belgium); **California** (USA)
2003	21	Japan; Sweden; Maharashtra (India)
2004	34	Poland; **Nova Scotia**, Ontario and Prince Edward Island (Canada); Andhra Pradesh, Karnataka, Madhya Pradesh, Orissa (India); Colorado, **Hawaii**, Maryland, **New York**, Rhode Island (USA)
2005	38	Gujarat (India); Delaware, District of Columbia, Montana (USA)
2006	39	Washington State (USA)
2007	45	China; Illinois, New Hampshire, North Carolina, Northern Mariana Islands, Oregon (USA)
2008	52	Chile; India; Philippines; Romania; Michigan, Missouri, Ohio2 (USA)
2009	53	**Kansas (USA)**
2010	56	Republic of Korea; British Columbia (Canada); Puerto Rico (USA)
2011	58	Albania; Israel
2012	59	Norway
2013	59	None identified
2014	59	None identified
2015	**61**	**Vermont, Virgin Islands (USA)**

資料來源：REN21 (2016)[1]

表 2　不同國家地區再生能源配比標準

地區	再生能源配比標準	年份
德國	35%;80%	2020;2050
美國加州	20%;25%;33%;50%	2013;2016;2020;2030
美國夏威夷州	30%;40%;70%;100%	2020;2030;2040;2045
美國德州	約 10%	2015

資料來源：本研究彙整

(二) 美國再生能源發電配比現況

表 3 為美國各項再生能源歷年發電量，其再生能源發電配比由 2002 年的 8.9%漸漸成長至 2013 年的 12.87%，其中太陽能發電和風力發電有大幅增加的趨勢[2]。2016 年上半年為止，美國再生能源發電配比已達 16.9%[3]。

表 4 為德國各項再生能源歷年發電量，其再生能源發電配比由 1990 年的 3.4%成長至 2015 年的 31.5%，近 5 年的成長速度非常快速。

表 3　美國再生能源歷年發電量

Renewable generation (Billion kWh, TWh)[22][27]

Year	Hydro	Geothermal	Waste	Wood	CSP	Utility PV	Rooftop PV	Onshore Wind	Offshore Wind	Renewable Total	U.S. Total	% Renewable
2002	264.33	14.49	15.04	38.66	0.555			10.34	0	343.44	3858.45	8.90%
2003	275.81	14.24	15.81	37.53	0.534			11.19	0	355.29	3883.18	9.15%
2004	268.42	14.81	15.42	38.12	0.575			14.14	0	351.48	3970.56	8.85%
2005	270.32	14.69	15.42	38.86	0.550			17.81	0	357.65	4055.42	8.82%
2006	289.25	14.57	16.10	38.76	0.508			26.59	0	385.77	4064.70	9.49%
2007	247.51	14.64	16.52	39.01	0.612			34.45	0	352.75	4156.74	8.49%
2008	254.83	14.84	17.73	37.30	0.864			55.36	0	417.72	4119.39	10.14%
2009	273.44	15.01	18.16	36.05	0.74	0.16	1.93	74.12	0	419.59	3950.31	10.62%
2010	257.08	15.67	18.59	37.61	0.82	0.46	3.21	94.95	0	428.38	4125.06	10.38%
2011	325.07	16.70	19.79	36.95	1.82		5.64	119.75	0	520.07	4105.73	12.67%
2012	276.24	15.56	19.82	37.8	4.33		8.45	140.82	0	513.4	4047.76	12.22%
2013	269.14	16.52	19.96	39.94	9.25			167.66	0	522.46	4058.21	12.87%

資料來源：Wikipedia

表 4　德國再生能源歷年發電量

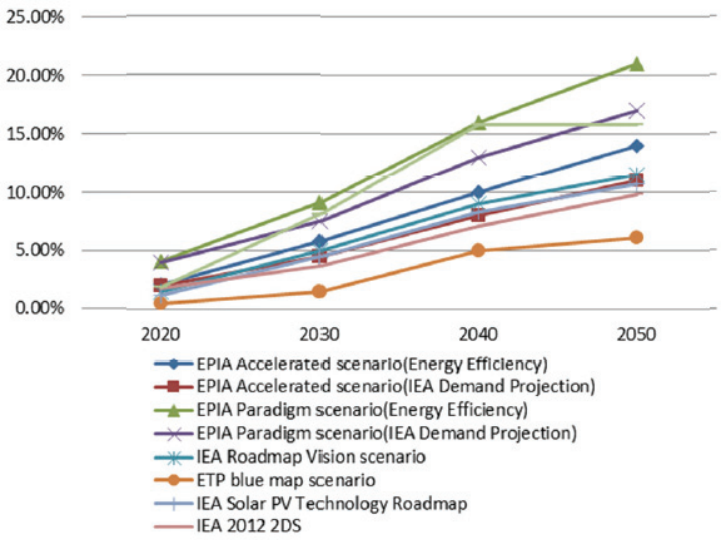
Year	Installed capacity [MW]	Electric gross generation in gigawatt-hours [GWh] by renewable sources since 1990								Share of gross electricity consumption [%]
		Hydro	Wind		Biomass[59]	Biogenic waste incineration[60]	Photovoltaics	Geothermal	Total generation	
			onshore	offshore						
1990	4,718	17,426	71	–	222	1,213	1	–	18,933	3.4
1991	4,826	14,891	100	–	260	1,211	1	–	16,463	3.1
1992	4,918	17,397	275	–	296	1,262	4	–	19,234	3.6
1993	5,190	17,878	600	–	432	1,203	3	–	20,116	3.8
1994	5,548	19,930	909	–	569	1,306	7	–	22,721	4.3
1995	6,223	21,780	1,500	–	662	1,348	7	–	25,297	4.7
1996	6,694	21,957	2,032	–	755	1,343	12	–	26,099	4.8
1997	7,255	17,357	2,966	–	876	1,397	18	–	22,614	4.1
1998	8,301	17,216	4,489	–	1,638	1,618	35	–	24,996	4.5
1999	10,155	19,647	5,528	–	1,845	1,740	30	–	28,790	5.2
2000	12,330	21,732	9,513	–	2,887	1,844	60	–	36,036	6.2
2001	15,157	22,733	10,509	–	3,355	1,859	76	–	38,532	6.6
2002	18,824	23,124	15,786	–	4,099	1,949	162	–	45,120	7.7
2003	22,099	17,722	18,713	–	6,603	2,238	313	–	45,589	7.6
2004	25,340	20,095	25,509	–	8,218	2,253	557	0.2	56,632	9.3
2005	29,040	19,638	27,229	–	11,102	3,252	1,282	0.2	62,503	10.2
2006	32,849	20,008	30,710	–	14,793	3,907	2,220	0.4	71,638	11.6
2007	36,046	21,170	39,713	–	19,832	4,531	3,075	0.4	88,321	14.2
2008	39,113	20,443	40,574	–	23,121	4,671	4,420	18	93,247	15.1
2009	47,958	19,031	38,610	38	26,308	4,323	6,583	19	94,912	16.3
2010	57,251	20,953	37,619	176	29,179	4,746	11,729	28	104,430	17.0
2011	67,684	17,671	48,314	577	32,136	4,755	19,599	19	123,071	20.3
2012	77,820	22,091	49,949	732	38,265	4,951	26,380	25	142,393	23.5
2013	84,330	22,998	50,803	918	40,112	5,415	31,010	80	151,336	25.1
2014	91,718	19,587	55,908	1,471	42,232	6,069	36,056	98	161,421	27.3
2015	99.368	18,977	70,922	8,284	44,553	5,768	38,726	134	187,364	31.5

Source: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (German: *Bundesministerium für Energie und Wirtschaft*)[21]:6, 7
Version: last published PDF data sheet as per December 2016[21]
Note: column "Biomass" contains all generated electricity from biomass, biofuels and biogas, excluding generation from biogenic waste incineration

資料來源：Wikipedia[5]

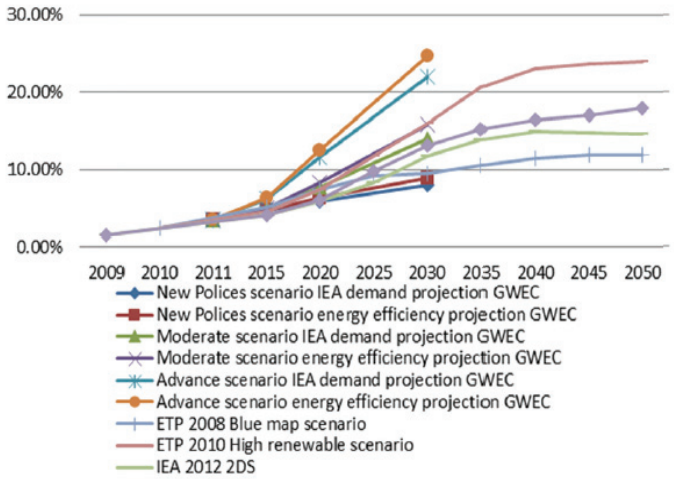
由美國與德國再生能源近年的發展，可以觀察出再生能源發電配比持續增加的趨勢，尤其是太陽能與風力發電，全球還有非常大的發展空間可以增加裝置容量。圖 1 為各機構預測未來全球太陽能發電占總發電量比例的數據，根據國際能源署(International Energy Agency, IEA)和歐洲太陽光電工業協會(European PhotoVoltaic Industry Association, EPIA)機構的預測，預估在 2030 年，最大太陽光電累積配比約為 9.1%，預估在 2050 年，全球平均的太陽光電累積配比約為 12%。而根據歐洲太陽光電工業協會的全球太陽光電累積配比預測，在最理想的情境之下，將從 2020 年的 4%，一路攀升至 2050 年的 21%。

圖 2 為各機構預測未來全球風力發電占總發電量比例的數據，上升幅度較太陽光電更為快速。而若各國能積極發展再生能源，根據全球風能協會(Global Wind Energy Council, GWEC)的先進高效情境，2030 年全球風能的累積占比即可達到 24.8%[4]。



資料來源：陳在相等(2015)

圖 1　全球太陽能發電占總發電量比例預測



資料來源：陳在相等(2015)

圖 2　全球風力發電占總發電量比例預測

二、台灣再生能源發電配比目標與現況

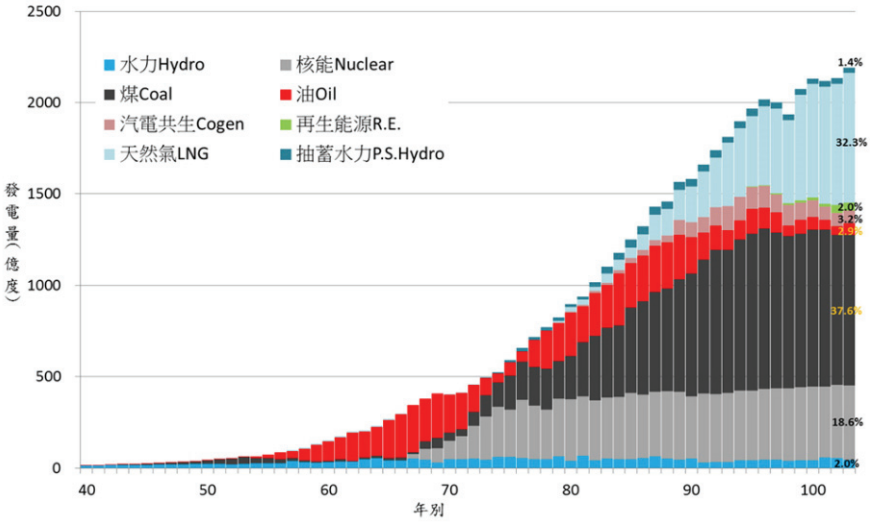
(一) 台灣再生能源發電配比目標

政府於 2011 年 11 月 3 日公布新能源政策，加速開發我國再生能源潛能及擴大各類再生能源推廣目標，惟 2014 年 3 月 24 日針對原訂目標加以提高並修正，規劃於 2025 年裝置容量達 993.3 萬瓩，較原訂 2011 年之目標值新增裝置容量 660 萬瓩，提早 5 年達成「再生能源發展條例」所定 20 年增加 650 萬瓩目標。接著，2015 年經濟部進一步完成規劃，提出較 2014 年更高的目標值，亦即太陽光電 2030 年目標量由 6,200MW 提高至 8,700MW，離岸風力發電目標量於 2030 年由 3,000MW 提高至 4,000MW，據此 2030 年總裝置容量目標將擴大至 17,250MW[6]。2016 年政府又再擴大再生能源發電目標，規劃於 2025 年再生能源發電占比達 20%，其中 2025 年之各類再生能源推廣目標裝置容量分別為太陽光電 20,000MW、陸域風力 1,200MW、離岸風力 3,000MW、地熱能 200MW、生質能 813MW、水力 2,150MW 及燃料電池 60MW，總計 27,423MW[7]。

(二) 台灣再生能源發電配比現況

1. 台灣各型發電能源歷年發電量

台灣各型發電能源的歷年發電量占比如圖 3 所示，2014 年火力發電量占比達 76%，其中燃煤 37.6%、燃油 2.9%、燃氣 32.3%、汽電共生 3.2%，再生能源 2%加上水力 2%占比為 4.0%，抽蓄水力 1.4%，核能為 18.6%。



資料來源：台灣電力公司[9]

圖 3　台灣各型發電能源歷年發電量配比

2. 台灣風力發電現況

迄 2015 年 7 月底止，台灣已建置 324 部風力發電機組，其中台灣電力公司 169 部，民間 155 部，總裝置容量為 64 萬瓩，累積至 7 月底總發電量為 8 億 5,891 萬度。歷年風力發電累計裝置容量見表 5，而歷年風力發電發電量如表 6 所示，2014 年全年的風力發電量超過了 1,486 百萬度[8]。

3. 台灣太陽能發電現況

台灣地區因為陽光充沛，日照充足，具備良好的太陽能發電條件，而且台灣太陽能發電面板製造商出口實力強，因此太陽能發電實為現階段最具發展潛力的再生能源。至於離岸風力發電，則具長期發展潛力。

2014 年底國內已建置完成之太陽能發電系統，總裝置容量 43.75 萬瓩，年發電量約 5 億 1,172 萬度。太陽能發電累計裝置容量至 2015 年 7 月止累計裝置容量合計接近 60 萬瓩。

表 5　歷年風力發電累計裝置容量

項目	迄 2002 年		2003 年		2004 年		2005 年	
	台電	民間	台電	民間	台電	民間	台電	民間
累計裝置容量(萬瓩)	0.240	0.000	0.240	0.000	0.240	0.000	1.776	0.000
項目	2006 年		2007 年		2008 年		2009 年	
	台電	民間	台電	民間	台電	民間	台電	民間
累計裝置容量(萬瓩)	4.776	4.980	11.176	4.980	13.176	11.420	17.976	16.710
項目	2010 年		2011 年		2012 年		2013 年	
	台電	民間	台電	民間	台電	民間	台電	民間
累計裝置容量(萬瓩)	24.916	22.230	28.676	23.150	28.676	27.290	28.676	32.300
項目	2014 年		2015 年 7 月止					
	台電	民間	台電	民間				
累計裝置容量(萬瓩)	28.676	34.600	29.396	34.600				

資料來源：台灣電力公司

表 6　歷年風力發電發電量

項目	迄 2002 年		2003 年		2004 年		2005 年	
	台電	民間	台電	民間	台電	民間	台電	民間
發電量(百萬度)	12.38	0.00	9.80	0.00	12.80	0.00	79.09	0.00
項目	2006 年		2007 年		2008 年		2009 年	
	台電	民間	台電	民間	台電	民間	台電	民間
發電量(百萬度)	174.04	92.66	276.46	153.88	272.69	329.69	371.68	476.50
項目	2010 年		2011 年		2012 年		2013 年	
	台電	民間	台電	民間	台電	民間	台電	民間
發電量(百萬度)	512.20	506.65	802.97	729.68	736.54	752.97	747.79	869.49
項目	2014 年		2015 年 7 月止					
	台電	民間	台電	民間				
發電量(百萬度)	706.54	779.96	418.052	440.866				

資料來源：台灣電力公司

參、美國因應再生能源發電不穩定之作法

一、加州因應再生能源發電不穩定之作法

根據經濟學制度學派(Institutionalism)，政策法規之落實推動，可以降低電力市場上各利害關係人之交易成本，亦即有助於整體市場之風險管理。由於面對再生能源發電不穩定之問題，可能造成電力市場所有利害關係人之交易成本與不確定性風險增加，因此加州透過各種相關法案與政策措施，積極導入智慧電表、智慧電網及發展高比例之再生能源，亦即 2030 年加州整體再生能源發電比例之政策目標，必須達到 50%[10]。

為了達成上述政策目標，加州相關政策與制度化之具體做法如下：

加州參議院於 2009 年通過 412 法案，將自營發電獎勵計畫[1] (Self-Generation Incentive Program, SGIP)重點納入了減排溫室氣體，亦即該法案確認有助於溫室氣體減排目標的分散式發電設備，並提供相應的獎勵方式，以鼓勵投資。參加自營發電獎勵計劃(SGIP)的資格，根據溫室氣體排放的減少量而定，符合這個項目資格的自營發電技術如表 7，按照發電技術之不同，可分為再生及廢能回收、汽電共生、新興技術三大類，每一類都有不同的獎勵金額。此外，這些不同的自營發電系統，又依發電容量細分為三個不同等級的獎勵金，如表 8 所示，其中 1 MW 至 3 MW 的項目其獎勵金獎勵基數，根據表 8 中的規定次遞減少[11]。

值得注意的，加州州議會於 2000 年通過 970 法案，將 SGIP 計畫擴增為加州能源委員會(Energy Commission)的新興再生能源計畫之補充，側重於比一般 SGIP 更小型的再生能源發電系統。惟 2006 年加州太陽能倡議計畫(California Solar Initiative)推出後，SGIP 已不再包含太陽能發電技術，同時也被修正為包含先進儲能設備系統，並提供額外的 20%獎勵金。

表 7　符合資格的技術獎勵基數等級

技術類別	獎勵（$/每瓦）	
可再生及廢能回收	風力發電機	$1.07
	廢熱發電技術	$1.07
	減壓渦輪	$1.07
非可再生資源型傳統的熱電聯產	內燃機 - 熱電聯產	$0.44
	微型渦輪熱電聯產	$0.44
	燃氣渦輪	$0.44
新興技術	能源儲存新科技[1]	$1.46
	沼氣[2]	$1.46
	燃料電池 - - 熱電聯產或只發電	$1.65

資料來源：Southern California Edison (2015)

表 8　自營發電獎勵計畫按不同規模大小給予的獎勵金比率

發電能力	獎勵率（基數的百分比）
0 - 1 MW	100%
>1 MW - 2 MW	50%
>2 MW - 3 MW	25%

註：容量若超過 3 MW 的系統亦可獲得獎勵金，惟獎勵率另有規定。

資料來源：Southern California Edison (2015)

[1] 加州自 2001 年開始實施自營發電獎勵計畫(Self-Generation Incentive Program, SGIP)，提供獎勵新型的分散式發電設備之政策措施，其目的在於針對擁有小型發電設備的合格用戶，提供各種補助，包括安裝電錶，以及根據用戶端所使用的不同發電技術類型及其發電量，給予不同等級的獎勵金，包含風力發電機、廢熱發電機、減壓渦輪機、內燃機、微型燃氣輪機、燃氣渦輪機，燃料電池，以及先進的儲能設備系統。SGIP 至今已完成 544 個自營發電之獎勵項目，是美國國內執行時間最長、最成功的分散式發電激勵政策計劃之一。SGIP 計畫最初原是為了提供尖峰負載用戶端之發電計劃，以因應 2001 年加州因電力自由化政策失敗導致的電力供給危機[12]。

SGIP 計畫鼓勵小型的自營發電，增加了電力供給面的彈性，可以降低區域供電不穩定的問題。該計畫納入更小型的再生能源發電系統後，加上提供獎勵金的配套措施，激勵了更多再生能源併入電網。

除此之外，加州還積極推動先進儲能設備政策。加州最新的再生能源發展趨勢是，針對對於供電不穩定有顯著正面功能的先進儲能設備，獲得加州政府有關單位極高的重視，並且採取了一系列積極的制度化政策措施如下：

2010 年加州州議會又通過議會 2514 法案，要求加州公用事業委員會應決定該州的電力公司是否應該設定儲能目標。該法案列出儲能要達到的多項目標，如可靠地整合間歇性再生能源發電併電網，並使其可接近滿載容量運作。該法案宣稱任何儲能目標應該要是「可行並符合成本效益」，並建議儲能目標該達成的時程。

為了落實州議會 2514 法案，加州公用事業委員會在 2010 年底開始制定相關執行規則，並於 2012 年舉行一系列研討會探討關鍵問題，如典型的儲能方案、成本效益如何評估、採購政策和容量目標等。過程中除了加州三大電力公用事業外，有廣泛的利害關係人參與，並在各個階段提出意見。

加州公用事業委員會和市場上各利害關係人建置了各種「利用類型」(Use Cases)來說明儲能設備如何佈建在電網，並具體解釋相關的操作條件與每種「利用類型」的潛在益處。最後確認了 20 種類型的儲能技術「利用類型」。此外，為了制定成本效益的計算框架，由美國電力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)評估許多由 CPUC 提供的假設情境，進行相關成本效益評估的模型與評估步驟，以供各界參考。

再者，2013 年 10 月加州成為全美國第一個要求電力系統達到特定儲能容量的州，亦即三大電力公用事業(Pacific Gas and Electric, Southern California Edison and San Diego Gas and Electric)在 2020 年之前，必須能夠儲存 1,325 MW 的容量。此儲能計畫主要目的是要配合太陽能與風力再生能源發電不穩定之問題，因加州的再生能源比例依法在 2020 年要達到 33%[13]。該計畫的目標包括：最佳化電網，減少尖峰負載、增加穩定度、推動輸電和配電設備的升級、整合再生能源、減少溫室氣體排放等。至於該計畫之重點包括：

(一) 三大電力公用事業各自在輸電、配電、客戶端這三個領域有不同的儲能目標，自 2014 年起每兩年提高一次。

(二) 選擇進行的儲能方案必須符合成本效益，由加州公用事業委員會和電力研究院所制定的參數計算成本和效益。

(三) 各電力公用事業只能擁有 50%的儲存容量，但這規定也等同於允許電力公用事業可擁有客戶端的儲存容量。

(四) 加州公用事業委員會認為儲能可使太陽能併入電網更為順利，並可減少無太陽光時段燃氣渦輪機發電負載遽增的情形。

加州公用事業委員會要求三大電力公用事業在 2014 至 2020 年佈建的儲能容量目標如表 9，從表中可得知加州三大電力公用事業分別針對輸電、配電、用戶端三個不同領域設定了儲能設備系統容量之目標值，這種制度化的做法，可以降低市場儲能設備相關業者的不確定風險。同時，也增加了太陽能與風力發電併入電網更大的發展空間。

表 9　電網級儲能系統裝置目標(單位：MW)

Storage Grid Domain Point of Interconnection	2014	2016	2018	2020	Total
Southern California Edison					
Transmission	50	65	85	110	310
Distribution	30	40	50	65	185
Customer	10	15	25	35	85
Subtotal SCE	**90**	**120**	**160**	**210**	**580**
Pacific Gas and Electric					
Transmission	50	65	85	110	310
Distribution	30	40	50	65	185
Customer	10	15	25	35	85
Subtotal PG&E	**90**	**120**	**160**	**210**	**580**
San Diego Gas & Electric					
Transmission	10	15	22	33	80
Distribution	7	10	15	23	55
Customer	3	5	8	14	30
Subtotal SDG&E	**20**	**30**	**45**	**70**	**165**
Total - all 3 utilities	**200**	**270**	**365**	**490**	**1,325**

資料來源：Jeff St. John (2013)[14]

至於加州三大電力公用事業的儲能設備系統投資計畫，分述如下：

(一) Southern California Edison (SCE)的 Charge Ready Programs 將從 2015 年至 2019 年投資 355 百萬美元的五年計畫、定位、設計、建造、擁有、並維護電力基礎設施。值得注意的，此計畫將會增加電力用戶平均電費帳單約 0.1%~0.3%。

此計畫的第一階段，為期一年將花費 22 百萬美元部署 1,500 個充電站。第二階段將花費 333 百萬美元，至 2020 年部署 30,000 個充電站。

(二) Pacific Gas and Electric (PG&E) 預計投入 653.8 百萬美元部署 25,000 個二級充電站和 100 個直流電快速充電站，對電力用戶的電費賬單在 2016 至 2017 年不會造成影響，惟估計在 2018 至 2022 年對一般標準住家用戶每個月增加 0.7 美元電費賬單。

(三) The San Diego Gas & Electric (SDG&E)的 Electric Vehicle-grid Integration (VGI)計畫，預計花費 59 百萬美元在 2015 至 2025 年建造 5,500 個充電站。

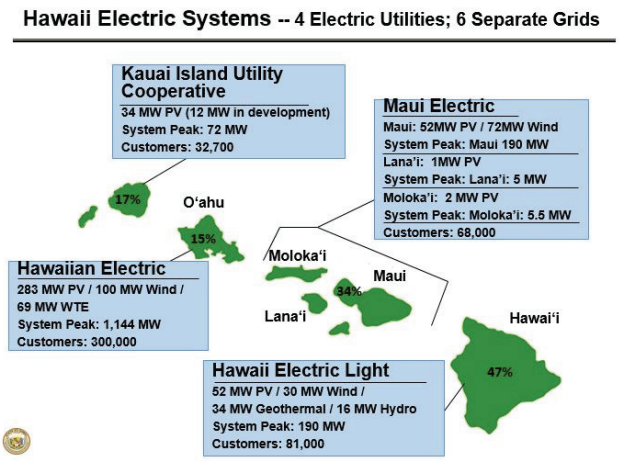
2015 年 5 月，南加州更積極讓 Tesla 公司提供所謂「電力公司等級」且容量最高可至 500MWh 的儲能計畫，等同於一萬輛電動汽車的電能。這種做法有助於提高電網的可靠度，並且讓一些潛在的電力用戶可離線(get off)，意思是離開電力公司的電力網路，仍然有足夠的電力可以使用。

2015 年加州進一步通過參議院 350 法案(Senate Bill 350, SB 350)，此潔淨能源法案(Clean Energy Bill)的目標為，2030 年有一半電力來自風力和太陽能等再生能源技術。法案同時希望提高能源效率目標、推動家庭和企業能源使用效率，加州能源管制機關與公用事業將利用創新、潔淨的能源技術，投入電力系統新模式。根據彭博估計，即使不計入家庭用戶發電，加州 2015 全年之發電量中亦將有 26%來自潔淨能源，遠超過全美平均值 10%。與德國推展潔淨能源初期之狀況相比，加州成功避免電價起伏與供電不穩的衝擊。加州公用事業委員會估計，因發展潔淨能源，當地能源成本增加 3 至 5%，單位價格為全美最高，但嚴格的節能政策促使當地家戶用電量較美國一般家庭低 40%，每月電費的支出反而比全美平均少 20 美元[15]。

二、夏威夷州因應再生能源發電不穩定之作法

美國夏威夷州由於其隔絕的地理位置，接近 90%的能源來自石油。而石油則 100%依賴進口，其能源依賴性高，且電價波動與油價高度相關，造成相對偏高的能源安全風險。為了降低能源成本與依賴，夏威夷州積極發展再生能源，豐富的太陽能和風力資源也提供了永續發展的機會。

夏威夷目前的能源系統如圖 4 所示，有 4 個電力業者、6 個獨立島內電網。



資料來源：Griffin (2015)[16]

圖 4　夏威夷電力系統概要

夏威夷州政府為了發展再生能源，陸續訂定與推動多項相關政策：夏威夷州議會於 2008 年 1 月通過了夏威夷潔淨能源倡議政策(Hawaii Clean Energy Initiative, HCEI)，目標要在 2030 年有 70%的乾淨能源經濟，目的是：(一)增加夏威夷經濟和能源的安全；(二)展示夏威夷的革新性；(三)開發未來的工作機會；(四)成為美國和全球的清潔能源模範[17]。

2009 年訂定了美國最高的 RPS 目標，2030 年要達到 40%(2015 年目標 15%；2020 年目標 25%)。具體實施的政策措施包括：稅收激勵措施、淨計量電表(Net Metering)、饋網電價(Feed-in Tariff, FIT)等。

2013 年，夏威夷州議會通過「電網現代化法」(Grid Modernization Act)，明定「任何個人或生產單位皆有權利安全、穩定，且價格合理，又即時地與夏威夷電力系統相連接」。藉由以上各項政策，夏威夷再生能源發展已超越目標，2014 年底 RPS 達到 21.3%，超越 2015 年要達到 15%的目標，如圖 5 所示。

除了 RPS 超越訂定目標，夏威夷再生能源發展還有以下成果：

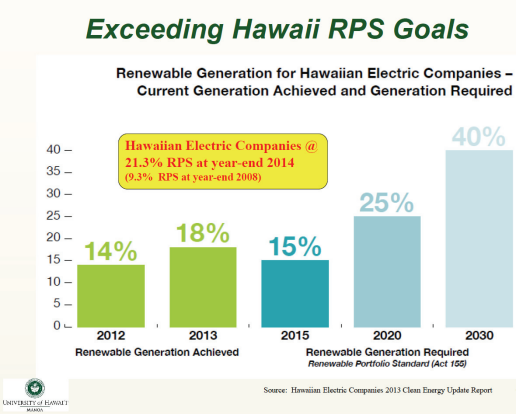
(一) 石油進口大幅下降，2013 年夏威夷能源公司的石油使用量與 2008 年相比下降 16%。

(二) 大規模太陽能發電已有 24 萬瓩的容量，平均成本 15.8 cents/kWh，比石油的能源成本少三分之一。

(三) 用戶端的太陽能發電快速成長，至 2013 年已有 30.1 萬瓩的容量，且 2014 年增加了大約 8.9 萬瓩容量，如圖 6 所示。

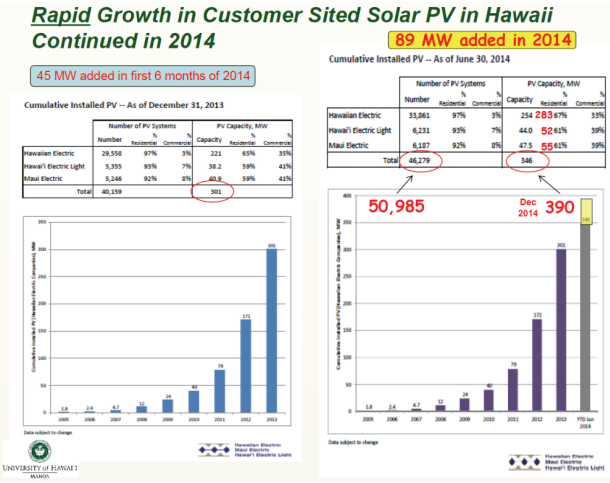
(四) 成為太陽能發電的領導者， 2013 年平均每人擁有的太陽能裝置容量居美國各州最高，如圖 7 所示。

(五) 目前為止，在夏威夷的儲能計畫在不同區域可儲存尖峰負載約 2.5 至 4.2%的系統容量。



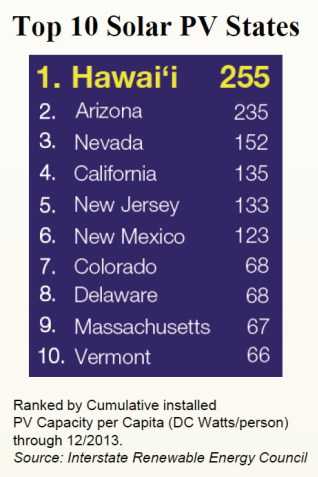
資料來源：Roose (2015)[18]

圖 5　夏威夷再生能源發電配比目標與近年達成率



資料來源：Roose (2015)

圖 6　夏威夷 2014 年用戶端太陽能發電容量



資料來源：Roose (2015)

圖 7　美國各州人均太陽能發電容量排名

而因再生能源供電不穩定的特性，需要各項方案整合幫助穩定電網，夏威夷目前對再生能源電網整合進行了各項研究，如圖 8 所示包含了下列方法[19]：

(一) 正序潮流分析(Positive Sequence Load Flow, PSLF)：這是美國奇異公司(General Electric, GE)的一個電力系統分析模擬套裝軟體，可以用來計算電力潮流、故障電流與模擬暫態穩定度。

(二) 長期動態模擬(Long-term Dynamic Simulations)：這是在自動發電控制(Automatic Generation Control, AGC)系統的情境下，用來模擬各種慢速反應控制器和設

備變動對電力系統造成的影響，可確保系統整合的穩定度。

(三) 風力發電變率評估(Statistical Wind Power Variability Assessments)：這是針對風力發電可能造成電力系統不穩定，而進行之評估分析。

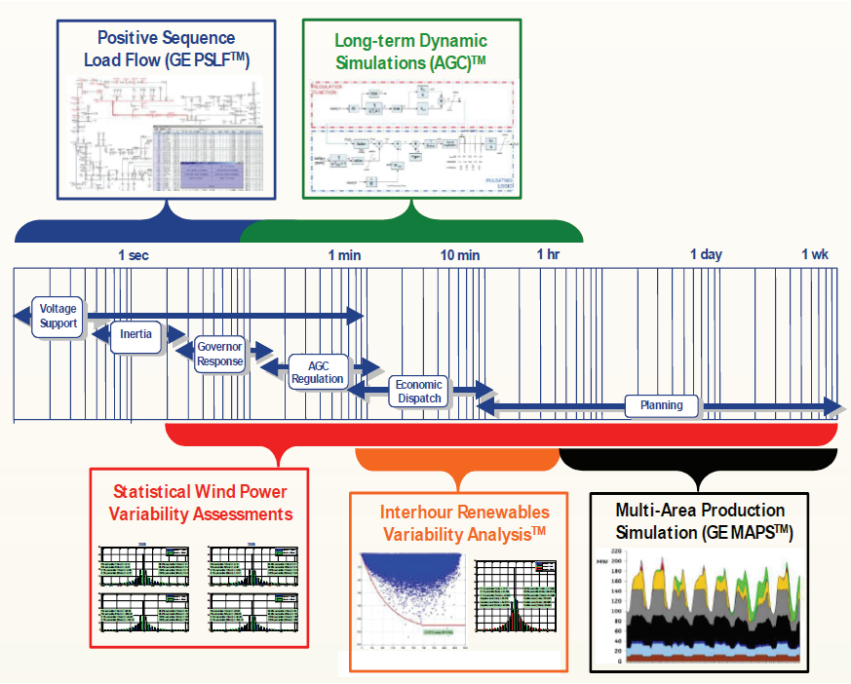
(四) 時內再生能源變率分析(Interhour Renewables Variability Analysis)：這是針對再生能源每一個小時之內，可能產生不穩定現象，而進行之分析方法。

(五) 多區域發電模擬(Multi-Area Production Simulation, MAPS)：這是美國奇異公司(General Electric, GE)的一個模擬套裝軟體，此軟體用來評估在不同風力發電、太陽能發電和負載情境下，三年內各個小時的電網運作情況。

目前夏威夷最新的政策方向包含了：發展智慧電網換流器(Smart Grid Inverters)，包括：(一)安裝新的智慧電網換流器；(二)利用控制和通訊系統加以連結；(三)建構各種演算法之分析模型，並根據電力系統相關資料與參數，調整電網換流器的設定程序。

2015 年考艾島公用合作組織(Kauai Island Utility Cooperative, KIUC)與 SolarCity 公司簽約購買能源，合約時間 20 年。每度電 14.5 美分的饋網電價，低於夏威夷傳統發電的成本。SolarCity 公司宣稱其能源是美國第一個公用事業規模的完全可調度太陽能設施，含有 52 MWh 的儲能電池系統，可在用電尖峰時間提供最高達 13MW 的電力負載供給。值得注意的，夏威夷州考艾島曾在 2016 年 1 月 13 日、16 日、17 日、18 日其再生能源發電量占全島嶼總發電量超過 90%。以 1 月 18 日為例，太陽能發電占比為 77%、生質能為 7%、水力為 6%、火力為 10%[20]。

綜合上述有關夏威夷與再生能源發展相關的政策措施，可了解夏威夷有極高的再生能源配比目標，積極發展再生能源成為全美國甚至全世界的表率。此外，夏威夷關於再生能源整合電網的評估研究方法與太陽能發電技術都十分進步。由於美國夏威夷州各島嶼之電力系統與台灣雷同，均屬於孤立系統，其相關政策措施，頗值得台灣借鏡。



資料來源：Schuerger et al. (2013)

圖 8　各類型再生能源整合電網研究方法

三、EnerNOC 以需量反應確保電網穩定案例[21]

EnerNOC 是全球性的節能智慧軟體供應商，提供電業及工商業能源用戶需量反應(Demand Response, DR)服務，該公司擁有超過 900 萬瓩的可調度需量反應能力，在澳洲、加拿大、德國、愛爾蘭、日本、紐西蘭、南韓，英國和美國擁有超過 15,000 個據點和 10,300 具灌溉負載控制設施。EnerNOC 也是世界上最大的工商業需量反應供應商，除提供需量反應能力給全球超過 100 家電業和系統操作業者外，並參與各種不同形式的需量反應計畫和躉售電力市場，包括容量、能量和輔助服務等市場。

EnerNOC 身為提供電業 DR 技術與服務的美國最大供應商，主要針對工商業用戶市場提供需量反應方案，包括合理的績效評估方式、先進的技術平台、能源軟體技術(Energy Intelligence Software, EIS)，以及客戶服務。

EnerNOC 已建置一個可彈性擴展、安全的技術平台，包括測量、控制、通信和全球網絡營運中心，結合 DR 管理程序，其網路操作中心(Network Operations Center, NOC)每天 24 小時傳送即時的能源資訊，相當於虛擬電廠的中樞神經系統，可迅速接受訊息並傳送給相關部門進行回應，有效協助調度電力需求接近供給。此外，EnerNOC 用戶基準線(Customer Baseline, CBL)演算方法的應用，可模擬 DR 如何影響用戶的資源價值，及是否為客戶接受等。

EnerNOC 公司在需量反應方案之成效，除了可替代尖載機組或輸、配電設備的投資以外，其提供的額外快速反應負載變化之容量，大約有三分之一是可調度負載(Dispatchable Load)，舒緩再生能源供電不穩定期間的電力調度，有效增加太陽能與風力發電機組併入電網的比例。換言之，電力調度的法則逐漸由傳統「發電追隨負載」的方式，同時納入「負載追隨發電」方式，兩者相互為用。當太陽能與風力發電比例日益增加時，「負載追隨發電」或儲能系統的比例也相對隨之增加。

肆、降低再生能源發電不穩定之政策規劃設計與因應策略

一、國外與國內相關文獻探討

(一) 國外文獻

首先，因應再生能源發電不穩定的策略之一，就是利用當代人工智慧與機器學習之先進演算法，精準預測太陽能發電不穩定的型態與時點。國外有關太陽能發電預測之相關應用至少有以下案例：

1. 印度 ANN 分析案例[22]

Yadav、Malik 及 Chandel (2014)收集有關太陽能輻射的相關數據，包括太陽能輻射計、太陽能測量計、太陽熱力計等，但基於成本考量，不可能於每個場所普遍設置這些測量工具。在此情況下，必須藉由其他較容易取得的數據來預測。同時，藉由三種不同模型，用以辨別不同變數與太陽能發電的關係。該文獻選用印度各地區共 26 個地點，如圖 9 所示。

資料來源：Yadav、Malik 及 Chandel (2014)

圖 9 ANN 模型訓練與測試的印度 26 個地區

該文獻採用的資料來自於美國國家航空暨太空總署(NASA)、印度氣象局、印度能源與環境中心。這些資料包括七種：經度、緯度、海拔高

度、平均溫度、最高溫、最低溫、日照小時，實證資料從 1986 年至 2000 年，每四年作為一組資料。研究方法採用懷卡托智能分析環境(Waikato Environment for Knowledge Analysis, WEKA)，是紐西蘭懷卡托大學使用 JAVA 開發的資料探勘軟體。其中，J48 決策樹是資料探勘中用來分類的監督式演算法(預測模型)，呈現每個屬性與輸出值的對應關係。該文獻將上述七種數據透過 WEKA 的 J48 決策樹分析，探討每個數據與發電量的關係。結果顯示：經度與緯度在任何月份中，都是最不相關的兩種屬性，因此平均溫度、最低溫、最高溫、海拔高度、日照小時這五種屬性與太陽能發電量最為相關。該文獻利用上述決策樹分析的結果，建立兩種人工類神經網路(Artificial Neural Network, ANN)模型：ANN-1，將所有七種數據作為輸入的參數；ANN-2，去除經度與緯度的資料，將平均溫度、最低溫、最高溫、海拔高度、日照小時列為此模型的輸入參數；此外，由於有些地區無法取得日照小時的數據，因此建立第三個模型 ANN-3，將平均溫度、最低溫、最高溫、海拔高度作為此模型的輸入參數。經由反覆測試不同結構的 ANN 模型後，結果顯示此三個模型的平均絕對百分差(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)分別為：20.12%、6.89%、9.04%。

根據上述結果 ANN-1 模型，MAPE 高達 20.12%，而經由 WEKA 決策樹篩選屬性之後的 ANN-2 模型，MAPE 降低至 6.89%，由此可以得知，經由決策樹篩選的步驟實為重要，可使預測模型更加精準。另外，ANN-3 模型其 MAPE 為 9.04%，高於 ANN-2 模型，可以得知日照小時對於預測太陽能發電量有所關連，且 MAPE 只要低於 10%，普遍被認為其模型有相當的準確率。因此，ANN-3 模型也可應用於缺乏日照小時數據的地區。

2. 非洲 SVM 分析案例[23]

Belaid 與 Mellit(2016)根據其他文獻得知支援向量機(Support Vector Machines, SVM)對於預測其準確率通常高於傳統的 ANN 演算法，因此該文獻藉由機器學習數據分析，得出預測太陽能發電的重要參數，並比較 ANN 與 SVM 的預測準確程度。

實證資料選用 2012 年 2 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日氣象資料集，位於非洲阿爾及利亞南部，距 Ghardaïa 城市 25 公里處的再生能源應用研究所 (Research Unit for Renewable Energy Applications)，此處每小時測量一次數據，包括：最高溫、最低溫、平均溫度、最高最低溫差、日照時數、水平每日太陽總輻射(Horizontal Daily Global Solar Radiation)。該處海拔高度 450 公尺，氣候乾燥，五月到十月每日溫度介於 25°C～40.8°C，十一月至三月平均溫度為 19°C，其他月份最低溫度可降至 5°C。

該文獻分別建立四 42 種 SVM 模型，包括至少一個參數，至多四個參數。資料訓練階段(Training Phase)為 2012 年 2 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日，資料測試階段(Testing Phase)為 2014 年全年。除了這 42 個模型之外，並分別針對每日及每月作為機器學習資料訓練的單位。實證結果顯示：日照時數與水平每日太陽總輻射對於預測太陽發電量最為重要。

該文獻同時採用多層感知機類神經網路(Multi-Layer Perceptron, MLP)進行預測，藉此對 SVM 與 MLP 進行兩種機器學習演算法的準確率加以比較，結果顯示兩種演算法的差異不大，但 SVM 準確率大都較 MLP 為佳。

3. 塞爾維亞 ANFIS 分析案例[24]

Jović、Aničić、Marsenić 及 Nedić (2016)採用不同於常見的類神經網路(ANN)或支援向量機(SVM)的演算法，藉由調適性網路模糊推論系統(Adaptive NeuroFuzzy Inference System, ANFIS)界定太陽能發電預測的重要參數。因模糊推論系統透過經驗法則定義模糊的 If-Then 規則，對於人類知識與推論過程執行定性描述與分析，但缺乏較為準確的定量分析與數值校正。同時，因類神經網路雖有良好的自我學習能力與組織能

力，卻無法處理定性的知識與具人性的邏輯推論過程。而 ANFIS 結合模糊推論系統與類神經網路兩種演算法，擁有兩種演算法的優點。

該文獻採用不同於其他研究的參數，包括平均海平面(Mean Sea Level)、乾球溫度(Dry-bulb Temperature)、濕球溫度(Wet-bulb Temperature)、相對溼度(Relative Humidity)。資料來源取自塞爾維亞的氣象局，從 2010 年 1 月到 2015 年 12 月的每日資料。所謂濕球溫度指的是，對一定體積的空氣進行加濕飽和(相對濕度達到 100%)時所達到的溫度，而乾球濕度則反之。

經由資料訓練與資料測試後顯示：氣象局不同的氣象站點，其太陽能發電量預測之影響參數，並不相同。其中第一個站點，乾球溫度的誤差值最小；至於第二個站點，則以相對濕度的誤差值最小，代表相對濕度對於該站點預測太陽能發電最具影響性。而濕球溫度，在兩個站點中其誤差值都最大，代表其對於太陽能發電量預測最不具重要性。

從上述國外三個案例顯示，再生能源發電量不確定之痛點，可藉由機器學習與人工智慧之應用加以改善。但卻沒有特定的演算法一定優於其他方法，必須藉由資料訓練與資料測試針對不同案例進行優化。

(二) 國內文獻

吳元康等人(2015)[25]針對台灣電力系統高占比之風力發電進行模擬分析後，提出需量反應管理、智慧電網技術、限制再生能源輸出以及其他功率輸出限制、擴增輸電線路、最適化發電組合、先進風力機組與儲能系統技術、以及計算容量可信度(Capacity Credit)等因應對策。同時，提高風力預測模型的精確度、提升機組排程的演算技術、規畫最適化的發電組合，均可提高再生能源發電比例。

葉貞君等人(2016)[26]提出推動再生能源可能面臨的電力系統衝擊，包括：高占比再生能源於電源供給側之挑戰、高再生能源占比對火力電廠及供電可靠度的影響、再生能源併網運轉法規面及技術面之要求、電壓控制能力、頻率控制能力、系統擾動之承載能力、升/降載率限制。同時，需考慮在中午太陽輻射強時，或可利用過多的太陽光電發電，供抽蓄電廠抽水，於下午 3 至 6 點太陽光電出力驟減時，抽蓄電廠再利用位能轉為電能供電，提升系統升載能力，維持系統供電可靠度。

二、相關政策規劃與設計

先進國家針對再生能源發電不穩定問題的政策規劃與設計，可由下列三個面向予以探討，包括：(一)政策法規；(二)成本效益分析；(三)組織功能。茲分別說明如下：

(一) 政策法規

為了降低再生能源供電不穩定之影響，以及供需雙方交易成本，必須要有明確的政策法規規範，作為市場利害關係人的行為指引。例如：近年美國聯邦能源管制委員會 FERC(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)推動需量反應的相關指令與政策意涵如表 10：

表 10 各項 FERC 近年推動需量反應的相關指令都有與降低再生能源發電不穩定相關的政策意涵，政策法規可以明確指引再生能源與需量反應發展的方向，其中若干法規都與處理再生能源供電間歇性問題，有直接或間接關係，藉此確保供電品質與可靠度。例如美國 2008 年的 FERC 719 指令明訂鼓勵聚合商以第三方的角色參與電力市場，可以有效推動需量反應，即時降低電力需求協助供需平衡；又如加州議會 2514 法案在自營發電獎勵計畫於儲能系統之應用上，即意圖整合儲能系統與間歇性再生能源發電，這些政策措施都能提升電網穩定度、降低再生能源供電不穩定的影響。

(二) 成本效益分析

以美國為例，政策法規通常要求相關措施必須具有可行性，並符合成本效益原則。亦即，藉由成本效益分析(Benefit-Cost Analysis, BCA)可從用戶、電力公司、社會、其他用戶這四種角度

分析其各自的成本與效益。檢定方法有下列五種：1.參與者檢定(Participant Test, PCT)、2.電力用戶影響檢定(Ratepayer Impact Measure Test, RIM)、3.總資源成本檢定(Total Resource Cost Test, TRC)、4.公用事業成本檢定(Utility Cost Test, UCT)、5.一般供需模型。而計算方式有下列三種：1.淨現值法(Net Present Value, NPV)、2.內部收益率法(Internal Rate of Return, IRR)、3.投資回收期法(Payback Period Method)。舉例而言，2010 年加州議會在通過議會法案 2514 後，對儲能計畫的目標是「可行並符合成本效益」。加州公用事業委員會為了制定成本效益的計算框架，尋求電力科學研究院協助評估許多由 CPUC 提供的假設情境，由 EPRI 所制定的參數計算成本和效益，以確保選擇降低再生能源發電不穩定的各項替代方案都符合成本效益。

表 10　FERC 近年推動需量反應相關指令與政策意涵

指令	時間	主旨	政策意涵
890	2007.02	修正輸電網路開放接續費率條款(Open Access Transmission Tariff)，確保非發電資源(包括需量反應)所提供的輔助服務，如調整備轉容量(Regulation)、熱機待轉(Spinning Reserves)、頻率控制(Frequency Response)以及替代備轉服務(Supplemental Reserves)等，均可享公正合理的輸電服務費率。	制定費率條款確保輔助服務的提供，可提升電網穩定度，同時降低再生能源(太陽能與風力)供電不穩定之衝擊。
719	2008.10	強化需量反應市場競爭性，鼓勵更多樣化的電力資源投入市場。包括允許聚合商集結眾多用戶參與需量反應，並可加入市場競標之列。	以自由化市場的競爭機制鼓勵資源投入和用戶參與，聚合商可集結眾多再生能源分散式發電系統並獲得合理報償。而當再生能源分散式系統可獲得市場合理誘因時，再生能源裝置者也較有資金與能力在市場上購買輔助服務，降低再生能源供電不穩定之影響。
745	2011.03	要求區域輸電業者(Regional Transmission Organization, RTO)與 ISO，以區域邊際電價(Locational Marginal Pricing, LMP)補償因實施需量反應而抑低容量與能量的用戶，作為補償。惟此支付須符合兩要件：(1)電業實施需量反應需平衡需求及供給；(2)該項支付金額必須符合電業實施需量反應之成本效益。同時，RTO 及 ISO 得將該補償金額按比例轉嫁給因實施需量反應而獲益的電力用戶。	提供補償金給參與需量反應而抑低容量的用戶，以鼓勵用戶配合需量反應方案。而當市場上有越來越多的需量反應參與市場負載容量交易時，代表用戶負載能夠同步追隨發電(指再生能源發電上下起伏不穩定)，因此也降低了再生能源發電不穩定的負面影響。
755	2011.10	針對發電業者可供批發電力市場頻率調整的資源，包括儲能系統與需量反應資源，提出兩部制補償(Two-part Payment)。第一部分是做為頻率調整容量補償(Capacity Payment)的機會成本，也就是針對因提供頻率調整而無法在批發市場競價的機組容量進行補償。第二部分為頻率調整績效補償(Payment for Performance)，由頻率調整電能數量及其可準確追隨 ISO 調度信號的程度而定。	補償特定發電業者因配合頻率調整的機會成本，同時依其頻率調整電能數量可否準確追隨 ISO 調度信號的程度，給予額外的頻率調整績效補償誘因。這些政策法規都是為了確保電網頻率的穩定，容納更多再生能源發電比例日益增加且發電起伏的現象。
784	2013.07	增進輔助服務市場之競爭性與透明性，並大幅增加儲能系統之應用靈活度。取消原本第 755 號指令對於儲能市場之僵固價格補償機制，第三方(Third Party)可以市場價格為基礎(Market-based)，提供輔助服務予輸電者，有助於用戶端建置儲能系統之 DR 應用，並可使輔助服務能更快速、更精確提供電能服務。	增進輔助服務市場與儲能市場之競爭性與透明性，使市場更自由化、更有效率。同時這種輔助服務與儲能系統，均對於再生能源發電不穩定之問題，能夠有正面助益。

資料來源：本研究整理

(三) 組織功能

為了降低再生能源發電不穩定的影響，必須藉由市場行為主體，亦即發揮組織功能，方能在既有的政策法規架構下，達成符合成本效益分析的目標與結果。其中第三方(Third Party)組織功能極為關鍵，包括：聚合商(Aggregator)、虛擬尖峰容量(Virtual Peaking Capacity, VPC)、商業型虛擬電廠(Commercial VPP, CVPP)、技術型虛擬電廠(Technical VPP, TVPP)等組織，都可提供不同的功能協助穩定電網，茲說明如下：

1. 聚合商

聚合商主要負責推動各種節能創新商業模式。聚合商可整合眾多住商部門的小用戶成為虛擬大用戶，配合電力公司需量反應方案，於電力供給緊澀時段，協助用戶部分用電設備進行降載，甚至啟用已建置之分散式電力資源(Distributed Energy Resource, DER)以彌補抑低負載時所需電力。由此可知，聚合商扮演節能創新模式之關鍵角色，其工作內容主要係透過智慧電表與電能資訊管理系統(Energy Information Management Systems, EIMS)，掌握用戶實際用電情形，並與用戶簽約，運用其能源管理專業能力，調節用戶用電負載，並與電力公司簽訂優惠電價之合約，可使更多用戶能夠參與需量反應方案，因應再生能源供電不穩定之影響。

若欠缺聚合商的角色，一般小型電力用戶將無法有效參與需量反應方案，此相對於大型的高壓電力用戶能夠自主參與電力公司的需量反應方案，將形成對小型用戶不利的不公平現象。反之，若有第三方聚合商在市場上進行整合後，可將眾多小型電力用戶，集合成具規模經濟的虛擬大用戶，不但可擴大需量反應市場的範圍，也可幫助電力負載需求追隨再生能源發電不穩定的起伏變化，以穩定電力系統電壓與頻率。先進國家已發展出多種聚合商之創新商業模式，包括商業型虛擬電廠(Commercial VPP, CVPP)與技術型虛擬電廠(Technical VPP, TVPP)，對於臺灣現階段來說，是很具有啟發性的課題。

2. 虛擬尖峰容量

電力公司藉由電價優惠或者市場誘因機制，透過聚合商需量方案或者分散式電源競標的方式，導引眾多用戶在尖峰供電緊澀時段，配合電力公司之需要而降低負載，此即虛擬尖峰容量。

虛擬尖峰容量與虛擬電廠之概念，使電力資源不僅來自中央電力系統，亦可「即時」、「雙向」來自電力需求端之分散型發電系統，其電力供需較以往更多元、更充沛、更具彈性，故此種 VPC 與 VPP 已逐漸成為電力需求面管理之主流價值。

3. 商業型虛擬電廠與技術型虛擬電廠

綜觀國際間虛擬電廠的作法，依據其功能與角色定位，可概分為商業型虛擬電廠與技術型虛擬電廠兩類，其中 CVPP 可整合其轄下不同類型之分散式電力資源，並代表參與能源市場或相關電力服務市場；TVPP 則係透過通訊系統取得電網相關即時運轉參數、DER 發電排程，進行電網各種可靠度與安全性分析，依據分析結果於輔助服務市場中提供所需的虛功補償、平衡服務、電壓(或頻率)調節及備轉容量等電力服務。

三、實際執行之因應策略

本研究提及上述美國夏威夷州為了降低再生能源供電不穩定的影響，實際執行正序潮流分析、長期動態模擬、風力發電變率評估、時內再生能源變率分析、多區域發電模擬這五項模擬與分析方法。同時，積極發展以下四大策略：

(一) 供給面彈性

凡是能透過迅速升載或降載之發電機組，都能增加電力系統供給面的運作彈性，能配合再生能源供電不穩定之起伏變化。例如：利用自動控制系統，以燃氣或柴油發電、水力發電等可快速反應的機組，藉由供給面彈性的發電負載升降能供，來彌補因再生能源發電的不穩定，這是供給面的做法。

(二) 提升預測準確度

利用歷史資料、改進預測模型，提升不同時

段的電力需求與再生能源發電量的預測準確度，避免電力供給與需求實際運作時落差太大，也可藉由大數據(Big Data)模擬情境評估電網運轉的風險。

(三) 需求負載彈性(需量反應)

各種需量反應方案，其中虛擬電廠是國際間發展的主要方向，可使電力需求追隨再生能源發電不穩定之負載，有效降低電力供需的落差。傳統的需量反應方案，不論是 DR 1.0 或 DR 1.5，仍皆屬電業或能源服務業者「單一方向」提供各種力求「質優」、「量足」、「價廉」之 DR 方案予用戶採用。唯有 DR 2.0「即時」、「雙向」、「同步」的市場機制，才能真實反應「當下」供需雙方之邊際成本(Marginal Cost)及邊際效用(Marginal Utility)，進行整體社會剩餘最大之撮合。從電網實際運作層面觀之，再生能源迅速增量併入電網後，因其發電具間歇性，出力易受天候與環境影響而難以預測，為避免可能造成的輸電壅塞與電壓不穩，市場需要更能「即時」反應電力供需狀況的「DR 2.0」，確保電網供需平衡。DR 2.0 之特點，在於其即時反應瞬間係以「秒」或「毫秒(Millisecond)」為單位，以數位訊號(Digital Signal)取代類比基礎系統(Analog-based System)，更快速地平衡電能供需[27]。

值得注意的，2015 年台北 101 大樓和台電公司簽訂「空調系統自動需量反應措施合作備忘錄」，進行高達 1MW 需量反應方案，可獲得抑低尖峰負載的電價優惠折扣，這種強調需求面管理的電價方案，等同於分級電價(Priority Service)的概念，意指用戶若願意在電力系統尖峰關鍵時刻，配合電力公司的要求，暫停用戶端負載者(如空調系統停 15 分鐘其室溫不會顯著增高)，可抒緩尖載壓力而換取電價優惠的誘因。易言之，這種自願降低(犧牲)其用電負載，釋放出額外電力容量的用戶，其「供電可靠度」較低，也就是「用電等級」較低，其電價理當便宜。相應地，電力公司也藉此而抒解「針形尖載」之供電瓶頸，進而抒解再生能源供電不穩定的問題。至於社會整體，亦因此減少二氧化碳排放與民眾抗爭電力設施環境之成本，誠可謂「三贏」。

(四) 儲能系統

風力發電與太陽能機組皆可搭配安裝儲能設備，當發電過剩時，可將電力暫時儲存於儲能系統中，爾後有電力需求時，再由儲能系統供給電力，並可利用電動車作為彈性(指正向或負向輸出電力)耗能設備。例如：本研究夏威夷州的案例中，夏威夷島內的儲能計畫在不同區域已可儲存尖峰負載約 2.5 至 4.2%的系統容量；加州案例中亦提到，加州是第一個要求電力系統達到特定儲能容量的州，並積極發展 Tesla 公司的儲能電池等先進儲能設備。

四、小結

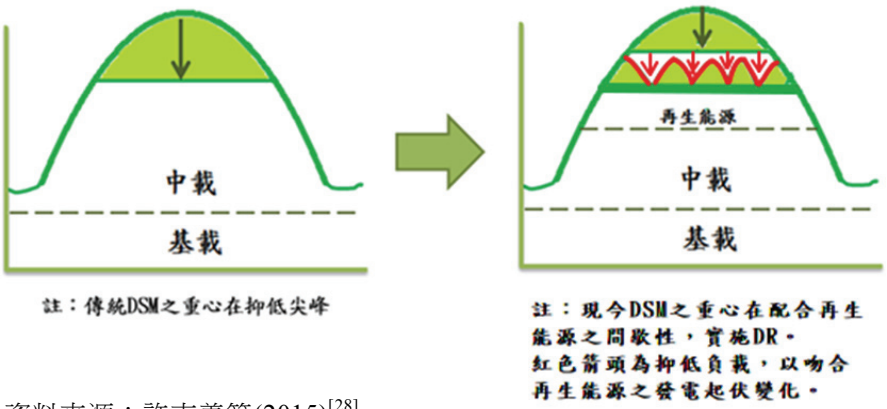
目前世界各國因應再生能源發電不穩定的政策規劃設計與因應策略，大至不脫離上述三個面向與四大策略。電力的供給和需求，傳統上都是前者追隨後者，亦即「發電追隨負載」。現在有智慧電表先進基礎設施後，已可反過來，藉由各種需量反應方案，促使「負載追隨發電」(亦即需求端之負載追隨再生能源發電端之起伏高低)，達成供電穩定之目的。當今需求面管理之重心也由傳統的抑低尖峰轉變為配合再生能源之間歇性，實施 DR 方案，如圖 10 所示。

綜合上述說明，可知降低再生能源供電不穩定的關鍵就在於「彈性」，不論供給面或需求面，皆需要彈性系統「即時」、「雙向」、「同步」反應，避免供需失衡，此即降低再生能源供電不穩定之關鍵成功要素。

伍、評估方法與提升技術

一、評估方法

先進國家積極以各種分析方法評估與推算電網穩定程度，目前常用的研究方法除了上述正序潮流分析、長期動態模擬、風力發電變率評估、時內再生能源變率分析、多區域發電模擬與分析方法等之外，亦包括傳統上採用的下列方法：



資料來源：許志義等(2015)[28]

圖 10　傳統需求面管理與當代需求面管理之比較

(一) 電力潮流分析

電力潮流研究，一般稱為負載潮流，在電力系統規劃、經濟調度規劃、現有電力系統之控制、及後續電力系統擴張之規劃方面，均不可缺少。在電力工程中電力潮流研究，是一個關鍵數值之分析，並應用於電力系統的重要工具。電力潮流研究通常使用簡化過的表示法，像是單線圖以及標么值(Per-unit Value)系統，而且著重在不同形式的交流電力(例如：電壓、電壓角、實功率、虛功率等)，其用於分析在正常穩態操作下之電力系統，目前已有許多關於電力潮流研究的軟體，包括 PSS/E, DigSilent, OpenDSS, ETAP, EMTP-RV, Powerworld 等。

基本上，沿著輸電線之實功率流量，主要係由端點電壓之相角差決定；而虛功率流量，則主要由端點電壓之大小差值決定。實功率及虛功率可利用分抽頭變壓器(Tap Changing Transformer)及調制變壓器(Regulating Transformer)，予以控制。

一般而言，較大型之再生能源發電設施合併電網時，需要進行電力潮流分析，因併網後，電力饋線甚至主要輸配電幹線都有可能會過載(Overload)。例如澎湖兩條 161KV 的電纜，如果裝置再生能源超過 500MW 即可能有過載的疑慮。此外，屏東曾經發生輸配電系統之設備過載，造成電壓異常的狀況。在此情況下，饋線末端的電壓可能過低，或饋線端點的電壓可能過高，都將影響供電品質與系統安全。

傳統的火力單一機組，通常可以自動控制發電的出力與電壓。相對而言，再生能源發電設施要具備控制出力與電壓的功能，其軟硬體成本相對較昂貴，例如：風力雙饋式感應發電機(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)、太陽能逆變器(PV Inverter)等設備，雖可使其發電與出力更加穩定，但購置成本即較一般再生能源設備較高，因此是否值得裝設就需要事先進行成本效益分析，於各種模擬情況下的不同參數進行敏感度分析等計算，確定符合成本效益，再進行之。

(二) 暫態穩定度(Transient Stability)分析

電力系統穩定度分析，係探討某一擾動後同步發電機的動態行為。為利於針對不同情況下，所造成的影響，進行上述分析，通常把電力系統穩定度問題分成兩個主要範疇：穩態穩定度(Steady-state Stability)及暫態穩定度(Transient Stability)。

穩態穩定度探討之重點，係在電力系統發生小而緩慢的擾動之後，發電機回復同步運轉的能力，例如：緩慢的電功率變化。暫態穩定度則是處理較大、突然的擾動所產生的影響，例如：電力系統發生故障、輸配線系統突然跳線、電力負載突然上升或下降。暫態穩定度之研究非常重要，主要為了確保電力系統能夠承受由主要擾動

所造成的暫態情況。每當電力規劃新的發電及輸電設施時，必須進行暫態穩定度研究，俾有助於決定所需電驛系統之特性、斷路器的臨界清除時間、系統電壓等級及轉供能力。

暫態穩定度的研究涉及決定發電機遭受劇烈的擾動後是否保持同步，此擾動可能是突然加入的負載、發電機跳脫、失去大量的負載或系統的故障，例如：金門的風力發電機組經常必須降載運轉，難以兩部風機同時運轉，否則電流突然變化太大，電力系統無法承受。這也顯示出電力系統不宜太依賴單一機組，以免運轉狀態改變時影響穩定度。此外，動態穩定度(Dynamic Stability)則是穩態穩定度的延伸，動態穩定度所關心者為持續較長時間的小擾動，並考量自動控制設備。

(三) 短路分析

短路(Short Circuit)是指在正常電路中，電勢不同的兩點不正確地直接碰接或被阻抗(或電阻)非常小的導體接通時的情況。短路時電流強度很大，往往會損壞電氣設備或引起火災。電力系統在正常運行中，相與相(Phase)之間或相與地(或中性線)之間發生非正常連接(即短路)時，會流過非常大的電流，其電流值遠大於原來設計的額定電流，並取決於短路點距電源的電氣距離。例如，在發電機端發生短路時，流過發電機的短路電流最大瞬時值可達額定電流的 10 至 15 倍。大容量電力系統中，短路電流可達數萬安培，這會對電力系統的正常運作造成嚴重影響和難以預期的後果。這些都是再生能源發電不穩定必須加以考慮的。

短路是一種不正常的低電阻電路，會產生較大的電流。過大的電流有可能導致電路損壞、過熱、火災或爆炸。短路造成的危害，可以透過預防(如使用符合建築和電氣使用規範的電路)或使用熔斷器(如保險絲)、斷路器或其他過載保護器，在電流過大時予以斷路。電流過載保護必須根據電流大小的考量加以選擇。例如，大功率的用電器需要 10 至 20 安培的工作電流，因而需要 20 到 30 安培的斷路器進行保護。而照明電路通常只需要不到 10 安培或 15 至 20 安培的斷路器。

一般而言，再生能源裝置容量占電力系統比例過高時，一旦造成過載，電力系統可能會引起短路。如我國於台中環港北路沿線裝設的風力發電機組可以承受每秒 25 公尺的風速，只要超過標準，風力發電就會啟動迎風系統，並且停止發電，就是為了避免風力太強時發電電流過大造成短路。同樣地，發電「靠天吃飯」的太陽能，也要特別留意短路問題。

(四) 失載機率分析

失載機率(Loss of Load Probability, LOLP)被廣泛地用來評估電力系統可靠度和系統裝置容量規劃。失載機率是一種電力系統可靠度之評估方法，應用於計算電力系統在特定期間內，預期每日尖峰負載超過系統容量造成失載的機率，通常以長期間(十年或是系統壽命)內，預估失載的天數來表示。此方法利用機率求平均值的觀念進行可靠度評估，並可獲得發生故障情況下之頻率變化的資訊，而其缺點是無法提供故障能量大小的資訊。台灣發電系統及離岸風機之佈建，都必須事先進行失載機率的分析模擬。

(五) 電能不足機率分析

電能不足機率(Loss of Energy Probability, LOEP)是另一種評估電力系統可靠度的方法，是由長期間內電力供給不敷需求的預估差額(Expected Energy not Served, EENS)，除以該期間內的總電力需求量而得。計算出的數值，其單位為 MWh/年，因是期望值而不是機率，又被稱作預期缺電量的期望值(Loss of Energy Expectation, LOEE)。此方法由能量層面做長期考量，以評估發電系統缺電量的多寡。其優點是若欲增加一部新的發電機組時，可經由預期缺電量的期望值來評估最適當的機組容量大小，以及作為初步評估的考量，但缺點是無法表示發生停限電的頻率。

綜合上述各種研究分析方法，可以了解再生能源併入既有電網前，必須做好許多不同的分析模擬，並且評估各種潛在意外可能造成的衝擊。當再生能源發電不穩定時，會影響電壓或頻率，

造成供電品質不佳，甚至有造成電路損壞、癱瘓電網、引起火災等意外的可能性，因此審慎的評估極為重要。

在電力潮流研究之外，許多軟體也提供其他形式的分析，如短路故障分析、暫態及穩態穩定度分析、機組組合以及經濟調度分析，特別是使用線性規劃找出最佳電力潮流，亦即使電力傳輸時的損耗成本達到最小化。

目前政府核定饋網電價尚未考慮對於不同類別之再生能源發電設備其供電品質差異，進行不同價格之收購。這對於提供較高供電品質的再生能源設備者，欠缺經濟誘因。若為降低再生能源供電不穩定之影響，未來饋網電價應該要有差別費率，針對不同再生能源供電品質，訂定符合經濟誘因的價格機制。此外，未來電力市場自由化之後，政策上可考慮在現貨電力市場按照各種不同類別的電力服務(例如輔助服務)，給予不同的電力收購價格。

二、技術面提升再生能源供電穩定之方法

先進國家為了降低再生能源供電起伏過大的問題、提升整體電網電力穩定度，積極研究先進技術應用於再生能源發電機組。在技術面持續提升改進下，再生能源發電的穩定性也有所進步，主要包含下列兩項：

(一) 雙饋式感應發電機(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)使用繞線式轉子饋入電力系統的界面，同時包括定子側(Line Side)及轉子側(Rotor Side)，其電力轉換器功率僅為發電機額定功率之 20~30%，故成本較低，且發電機可變速範圍可達同步轉速之±30%，因此性能/價格比值最高，故為目前大型風力發電機中最普遍採用者。雙饋式感應發電機可調節勵磁電流(或電壓)的幅值、頻率、相位，來實現定子恒頻恒壓輸出。

(二) 風力發電機組的技術提升，使風能容量因數(Capacity Factor)和可用風場面積快速增加。風能容量因數隨著風能產業技術進步，正在快速提升，2000 年時美國風力發電機平均容量因數為 30%，2014 年已經提升到 33%，而隸屬於美國能源部的美國國家再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory，NERL)最新資料則以 35%為目標，顯示全美國可達 35%容量因數的潛在風場高達總面積近 6 成，而風能容量因數可隨風機高度增加，其最高數值更可達 65%。

先進技術開發的風力發電機組中，西班牙的 Vertex 新型風力發電機沒有葉片，而且建置成本比傳統葉片風力發電機低 50%。不但沒有噪音，不會有鳥類誤殺，而且適合台灣颱風季節的天候環境。

隨著風力發電機組的技術提升，使風能容量因數上升後，有更多的風場可以有效發電，有助發電供給調度，風力發電併入電網也可能更加容易，電網整體供電穩定度相對衝擊也可能降低。

陸、結論與建議

本研究探討美國再生能源發電配比、加州與夏威夷州因應再生能源供電不穩定之作法，彙整降低再生能源發電不穩定的四種策略與三個政策面向。茲歸納本文之結論與建議如下：

一、電力來源應避免過度依賴單一不穩定的發電種類(如風力或太陽能)，否則當該發電來源供電量起伏太大時，電力調度不易，對整體電網有負面衝擊，可能造成短路、供電品質(電壓或頻率)不穩定等影響。

二、再生能源的發電設施，其佈建不宜太集中在某一個區域，因特定時間內同一區域的氣候狀態(風力大小或日照量)十分接近，同一範圍內機組運轉發電相關性與同質性太高，將增加發電容量同步陡升陡降不穩定之風險。反之，若發電設施分散佈建於不同區域，全台灣各區域風力大小或日照強弱之參差度變化，將可增加發電來源的多樣化與分

散化，較容易「截長補短」、「互通有無」，有助於整體電網穩定性之運作。

三、電力供需雙方相互協調與配合之「彈性」機制，是降低再生能源供電不穩定影響之重要策略。具體作法包括風力與太陽能搭配汽電共生、需量反應、抽蓄發電、熱泵、儲能電池、電動車、彈性電價等諸多可採行之配套方案，促使電力負載能夠彈性追隨不穩定的再生能源發電起伏變化，甚至進一步形成虛擬電廠或虛擬尖峰容量之整合運作商業模式。換言之，電力調度的法則逐漸由傳統「發電追隨負載」的方式，同時納入「負載追隨發電」方式，兩者相互為用。當太陽能與風力發電占整體電力系統比例愈來愈高時，上述「負載追隨發電」之比例也必須隨而增加，並宜規劃設計開發區域性小型抽蓄水力發電，或仿照加州與夏威夷州設立「電力公司等級」的儲能系統。同時，也應引進先進國家積極推動之聚合商制度，亦即具有智慧能源管理能力的第三方，可藉由聚合眾多電力用戶(包括小型用戶)，發揮聚沙成塔、積少成多的需量反應。這種等同於「團購」需求端負載容量的創新服務模式，是一種群眾外包(Crowd Sourcing)的虛擬尖峰容量或虛擬電廠，也正是因應再生能源發電不穩定的配套措施之一。

四、隨著再生能源發電技術發展快速、設置成本也大幅降低。在智慧電網、微電網與人工智慧發展趨勢下，高比例的再生能源發電將成為電力市場常態，政府與相關業者應注意相關技術發展，即時調整策略，並依法於每兩年審核訂定一次新的再生能源配比標準時，參考先進國家發展經驗，制定合理的配比標準。而再生能源配比標準是以全國的總發電量來源來計算，但不同區域或用電尖峰、離峰時間的再生能源供電比率，都可能大幅超出或遠低於目標值，提升再生能源配比標準的同時也要注意「極端值」實際運作情形。

五、提升再生能源發電占比已是世界趨勢，但配比標準高低與各國電網系統的電力供需情形和穩定度(如備載容量率、電網連結方式)或氣候環境因素(如日照量、風力大小)息息相關，必須考量各國電力系統不同的優勢與劣勢，每個國家都是獨立的個案，必須分別討論與分析，並沒有所謂放諸四海皆準的「上限定額標準」(如配比不得超過電力系統某一特定百分比)。相對地，較普遍的政策形態是逐年提高再生能源發電定額占比，已成為大多數國家的目標，台灣亦然。不少國家或地區甚至提前超越原先設定的再生能源占比目標值，如加州與夏威夷州。

六、在資料探勘應用於預測太陽能發電的部分，國內外均有實證研究，透過不同的預測模型，可界定影響太陽能發電量之重要變數。常見的變數不外乎是平均溫度、高低溫度、日照時數等，這些變數最容易與太陽能發電連結在一起。此外，亦有研究文獻採用乾球溫度、濕球溫度等變數來預測太陽能發電量。由此可見，預測太陽能發電量之變數甚多，需透過重複的模擬與配適，進而界定出最適化之模擬變數與預測模型。在國外太陽能發電量之預測文獻中，透過預測結果之圖表比較，可清楚得知 SVM 之預測準確率大於 MLP 研究模型。由此可見，SVM 可能較適合用於預測太陽能發電量。同時，該文獻之作者也利用多個不同的 SVM 模型，分析哪些預測變數與太陽能發電量具有較高之關聯性。在 MLP 模型方面，屬於傳統 ANN 演算法，雖然在該文獻中顯示其預測能力不如 SVM 模型，惟近來隨著 AlphaGo 人工智慧的崛起，深度學習(Deep Learning)之發展與應用受到各界矚目，透過增加 MLP 的層數，將有提升 ANN 模型預測準確度之機率，故未能遽下論斷何者預測模型優於其他模

型，仍需針對不同之個案情境，分別進行符合實際狀況需要之模擬預測，方屬允當。

七、至於國內文獻，提出需量反應管理、智慧電網技術、限制再生能源輸出以及其他功率輸出限制、擴增輸電線路、最適化發電組合、先進風力機組與儲能系統技術、以及計算容量可信度(Capacity Credit)等因應對策。同時，提高風力預測模型的精確度、提升機組排程的演算技術、規畫最適化的發電組合，均可提高再生能源發電比例。此外，亦有文獻指出推動再生能源可能面臨的電力系統衝擊，包括：高占比再生能源於電源供給側之挑戰、高再生能源占比對火力電廠及供電可靠度的影響、再生能源併網運轉法規面及技術面之要求、電壓控制能力、頻率控制能力、系統擾動之承載能力、升/降載率限制。同時，需考慮在中午太陽輻射強時，或可利用過多的太陽光電發電，供抽蓄電廠抽水，於下午 3 至 6 點太陽光電出力驟減時，抽蓄電廠再利用位能轉為電能供電，提升系統升載能力，維持系統供電可靠度。

八、降低再生能源發電不穩定之影響，在政策規劃設計上，必須考慮：1.政策法規、2.成本效益分析、3.組織功能這三個面向；而實際執行之因應策略則有：1.供給面彈性、2.提升預測準確度、3.需求負載彈性(需量反應)、4.儲能系統這四個面向的做法。政府有關單位推動再生能源發展過程中，應兼顧各面向進行規畫和協調，建立良好的公私夥伴關係(Public–private Partnership, PPP)，激發民間業者原本具有的活力與創意，積極投資發展再生能源產業。

九、先進國家為因應再生能源供電不穩定之問題，透過嚴謹的研究方法，加以評估電網之穩定程度，並進行各種必要的配套措施，分析方法包含：1.電力潮流分析、2.暫態穩定度分析、3.短路分析、4.失載機率分析、5.電能不足機率分析。而夏威夷州進行再生能源併入電網時，採用正序潮流分析、長期動態模擬、風力發電變率評估、時內再生能源變率分析、多區域發電模擬等研究方法，進行模擬分析後，在維持電網穩定度要求下，有效提升再生能源發電比例，該比例也就是所謂合理的再生能源占比範圍。值得注意的，所謂合理的再生能源占比，並無絕對標準可言，各國電力系統情況不同，也因此其合理占比也就不會相同。

十、完善且明確的政策法規是推動再生能源發展的重要因素，如美國聯邦能源管制委員會為了配合再生能源發展，積極推動需量反應，頒布至少五項相關的指令與法規，包括 FERC 一系列行政命令(890 指令、719 指令、745 指令、755 指令、784 指令)都是政策面重要的里程碑。這也符合制度經濟學派的理論，可藉由政策法規降低市場交易成本。例如：若欠缺完善的法規制度，聚合商的定位就不明確，難以加入電力市場。美國 2008 年的 FERC 719 指令明訂鼓勵聚合商以第三方的角色參與電力市場，可有效推動需量反應，即時快速抑低電力負載需求，促進供需均衡。

十一、先進國家除了發展既有的再生能源發電技術外，儲能設備系統的投資也是重要發展策略之一。如加州 Pacific Gas and Electric (PG&E)電力公司擬投資 653.8 百萬美元部署 25,000 個二級充電站和 100 個直流電快速充電站，短期內對用戶的電費沒有影響，估計在 2018 至 2022 年對標準住家用戶才會增加每個月約 0.7 美元的電費支出。

十二、目前國內饋網電價尚未考慮對於不同類別之再生能源發電設備其供電品質差異，進行不同價格之收購。這對於提供較高供電品質的再生能源設備者，欠缺經濟誘因。若為降低再生能源供電不穩定之影響，未來饋網電價應該要有差別費率，針對不同

再生能源供電品質，訂定符合經濟誘因的價格機制。此外，未來電力市場自由化之後，政策上可考慮在現貨電力市場按照各種不同類別的電力服務(例如輔助服務)，給予不同的電力收購價格。值得注意的，在本研究的美國發展再生能源案例中，加州有自營發電獎勵計畫等政策法規鼓勵投資分散式發電設備；夏威夷州則有很高的再生能源配比標準且再生能源電網整合發展有系統地予以優化，這些成功經驗都值得台灣學習，並在適當時機加以引進。

柒、誌謝

本研究承蒙科技部計畫「再生能源於物聯網與大數據架構下創新服務模式之研究」(計畫編號: MOST 105－ET－E－005－001－ET)，以及工研院計劃「降低再生能源供電不穩定影響之發展策略」提供研究經費，謹此致謝。同時，感謝林惠民教授、劉志文教授、陳斌魁教授、吳元康教授給予本文撰寫過程中，有關電機方面專業知識之指教。此外，感謝洪穎正、蔡松諺、李高忍、江苔呈四位助理協助整理資料與文獻。惟文中若有任何錯誤，應由作者自行負責。

捌、參考文獻

[1] REN21, Renewables 2016 Global Status report, 2015, [Online]. Available: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report.pdf.

[2] Wikipedia, Renewable energy in the United States, 2015, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy_in_the_United_States.

[3] RenewableEnergyWorld, Renewable Energy Was 16.9 Percent of US Electric Generation in the First Half of 2016, 2016, [Online]. Available:http://www.renewableenergyworld.com/articles/2016/08/renewable-energy-was-16-9-percent-of-u-s-electric-generation-in-the-first-half-of-2016.html.

[4] 陳在相、楊念哲、楊正光、曾威智、陳子揚、林維哲，「因應我國智慧電網技術發展與高占比再生能源併網運作趨勢之對策研究」，台灣能源期刊，第二卷，第二期，第 129-151 頁，2015 年。

[5] Wikipedia, Renewable energy in Germany, 2015, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy_in_Germany.

[6] 台灣電力公司，國家再生能源未來展望，最近瀏覽日期：2017 年 2 月 10 日，資料來源：http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-b34.aspx?LinkID=8.

[7] 經濟部能源局，2016 年能源產業技術白皮書。

[8] 台灣電力公司，我國再生能源發電概況，最近瀏覽日期：2017 年 2 月 10 日，資料來源：http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-b36-1.aspx?LinkID=8.

[9] 台灣電力公司，歷年發電量占比，最近瀏覽日期：2017 年 2 月 10 日，資料來源：http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-c37.aspx?LinkID=13.

[10] PV magazine, California calls for 50% Renewables in electricity by 2030, 2015, [Online]. Available: https://www.pv-magazine.com/2015/09/13/california-calls-for-50-renewables-in-electricity-by-2030_100021062/#axzz3lmwh0qcE.

[11] Southern California Edison，自營發電獎勵計劃，最近瀏覽日期：2017 年 2 月 10 日，資料來源：http://www.sce.com.

[12] Self-Generation Incentive Program, 2015 Self-Generation Incentive Program Handbook, Provides Financial Incentives for Installing Clean, Efficient, on-site Distributed Generation, July 17, 2015.

[13] 李清雲、蕭石虎、李建德、蘇冠華、劉凱銘、張彥偉，「拜訪 Nexant、CAISO 及 PG&E 等討論再生能源併入系統整合及電力市場等相關議題」，台灣電力公司，2015 年。

[14] Jeff St. John, “California Sets Energy Storage Target of 1.3GW by 2020,” 2013.

[15] Breaking Energy, California’s Clean Energy Bill Could Serve as A Template for National Energy

Policy, 2015, [Online]. Available: http://breakingenergy.com/2015/10/15/californias-clean-energy-bill-could-serve-as-a-template-for-u-s-energy-policy/.

[16] Jay Griffin, "Overview and Status of Distributed Energy Resources Policy Docket,"Hawaii Public Utilities Commission, 2015.

[17] 許志義，「台灣能源及電力業之挑戰與機會」，財團法人中技社，台北，第 121-146 頁，2013 年。

[18] Leon R. Roose, "Hawaii's Renewable Energy Future. The Maui Smart Grid-An Energy Technologies & Applications Showcase," Grid System Technologies Advanced Research Team, *The Second International Symposium on Open Energy Systems,* Japan, 2015.

[19] Matt Schuerger, HarjeetJohal, Leon Roose, Marc Matsuura, and Richard Piwko, "Variable Generation Integration on the Islandof Oahu,*"IEEE Power & Energy Magazine,* vol. 11, no. 6, pp. 33-44, 2013.

[20] CleanTechnica,Kaua'i Cooperative Integrates Over 90% Renewables Four Times In January, 2016, [Online]. Available: https://cleantechnica.com/2016/02/05/kauai-cooperative-integrates-90-renewables-four-times-january/.

[21] EnerNOC Incorporation, 2015, [Online]. Available: https://www.enernoc.com/.

[22] Amit K.Yadav, H. Malik and S. S.Chandel, "Selection of Most Relevant Input Parameters Using WEKA for Artificial Neural Network Based Solar Radiation Prediction Models," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 31, pp. 509-519, 2014.

[23] S. Belaida and A. Mellit,"Prediction of Daily and Mean Monthly Global Solar Radiation Using Support Vector Machine in an Arid Climate," *Energy Conversion and Management,* vol. 118, pp. 105–118 2016.

[24] SrđanJović, O.Aničić, M.Marsenić and B.Nedić,"Solar Radiation Analyzing by Neuro-fuzzy Approach," *Energy and Buildings,* vol. 129, pp. 261-263, 2016.

[25] 吳元康、李東璟、謝廷彥、林偉民，「高占比再生能源的系統衝擊以及相關的技術研究」，台電工程月刊，804 期，第 1-15 頁，2015 年。

[26] 葉貞君、楊宗穎、沈柏丞、郭傳薪、黃柏元、林彥均、張嘉諳、張凱翔、陳斌魁，「推動再生能源面臨的議題」，台灣能源月刊，第 3 卷，第 4 期，第 385-415 頁，2016 年。

[27] 許志義，吳仁傑，「論電力需量反應與虛擬電廠發展趨勢」，台灣經濟論衡，第 12 卷，第 6 期，第 59-83 頁，2014 年。

[28] 許志義等，「我國住商部門需求面管理(DSM)之市場、技術與商業模式策略研究」，資策會合作研究計畫，2015 年。