

推動再生能源面臨的議題

葉貞君^{1*} 楊宗穎¹ 沈柏丞¹ 郭傳薪¹ 黃柏元¹
林彥均² 張嘉諳^{3, 4} 張凱翔¹ 陳斌魁⁵

摘要

近年環保意識抬頭，能源議題須具環保觀念，潔淨的再生能源成為各國政府致力發展及推廣的方向，隨著未來間歇性再生能源(如風力、太陽光電)佔比的提升，其不穩定及不易預測等特性，對電力系統併網及運轉將造成供電品質及可靠度的衝擊，若未具備所需配套因應對策，日後非預期的停/限電次數及時間恐將增加，將對國家整體經濟發展帶來威脅。目前政府推行再生能源發電主要以太陽光電及風力發電為主，鑒於不穩定之再生能源是否優先併網發電，其對系統運轉及產業的衝擊是否會如同歐盟傳統電業於五年內，資產市值少了一半，在重大能源政策拍板前，宜通盤思考；本文針對先進國家大力發展再生能源時曾經歷的問題，檢視再生能源併網運轉經驗，探討政府欲擴大推動再生能源時，技術面所需配套，如再生能源設備之性能要求及於電力系統擾動時所須具備的電壓及頻率承載能力，以確保電力品質及供電可靠度。本文期盼藉由吸取先進國家運轉經驗，作為國內未來對再生能源併網運轉所需配套及相關規範訂定的參考，供相關決策者於規劃能源政策時，能注意到技術面的障礙，以縮短臺灣學習的時間與減少盲目投資造成的浪費。

關鍵詞：再生能源、電力品質、太陽光電、風力發電

1. 再生能源發展現況

近年來，世界各國紛紛意識到發展再生能源不僅可舒緩氣候變遷，也可以藉由推動再生能源過程所遭遇的問題及困難，須有研發及創新來克服障礙，進而促成新興產業、經濟發展及創造就業機會，本節將介紹臺灣及目前發展再生能源較為成熟先進國家之再生能源發展狀況。

圖1為國際能源署(International Energy Agency, IEA)統計全球自1990年到2014年各類型

再生能源的成長情形，其中太陽光電和風力發電的增加比例分別為46.2%及24.3%，且預期在2015到2020再生能源仍有20%的成長率，如圖2所示。

利用風力、太陽能、地熱…等再生能源做為電力來源儼然已在全球成為一種趨勢，如美國即有37個州制訂再生能源佔比標準(Renewable Portfolio Standard, RPS)，在2020年以前，再生能源所提供之電力須滿足各州10%至33%的電力需求(De Martini *et al.*, 2012)。

¹大同大學電機所 碩士生

²台灣電力公司 系統規劃專員

³大同大學電機所 博士生

⁴核能研究所 助理研發師

⁵大同大學電機所 教授

*通訊作者, 電話: 02-2182-2928 #3470 #672, E-mail: awsz254871@gmail.com

收到日期: 2016年09月21日

修正日期: 2016年10月11日

接受日期: 2016年10月27日

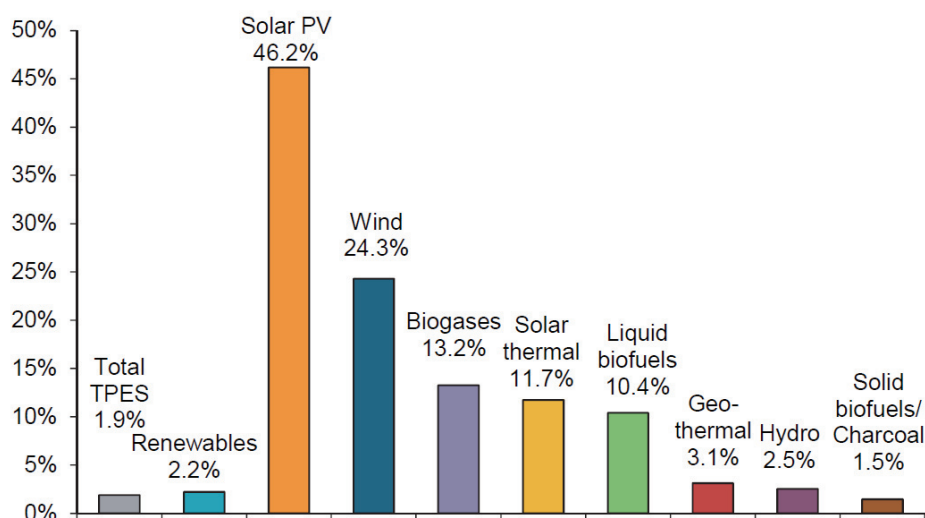


圖1 1990年至2014年全球再生能源成長比例
資料來源：International Energy Agency, 2016

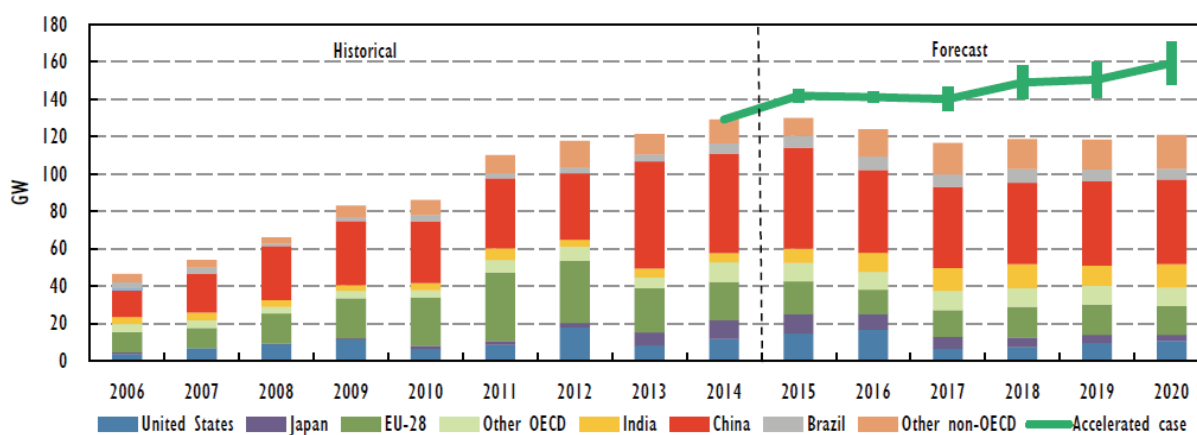


圖2 各國再生能源裝置量成長情形
資料來源：International Energy Agency, 2015

1.1 臺灣

臺灣政府為促進相關業者及一般民眾裝置再生能源的意願，立法院於2009年6月通過「再生能源發展條例」，該條例主要規範電業對於再生能源設備所產生的電能應予以優惠收購，並對收購費率的制定方式、再生能源發展基金的來源及相關示範設備的獎勵方法提出相關規範，截至2015年底，再生能源裝置總量達到4,319 MW，未來主要著重於風力發電及太陽光電的發展，政府對各類再生能源裝置容量及發電量目標如表1所示。

1.2 德國

德國2000年所頒布之再生能源法(Erneuerbare Energien Gesetz, EEG)與產業政策掛鉤，給予再生能源相關產業投資者誘因，法令中規劃再生能源躉購制度(Feed-in Tariffs, FITs)，於契約年限20年間，保證以固定費率全數收購再生能源發電，確保再生能源相關產業投資者的投資報酬，並藉由推動再生能源之過程所帶動的研發與創新，成為世界再生能源技術領導者之一，如2012年1月啟用VDE-AR-N 4105標準之變流器，如今美國亦跟進，即今日IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)所

表1 臺灣未來擴大各類型再生能源推廣目標

能源別	2015年		2020年		2025年	
	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)
陸域風力	647	16	1,200	29	1,200	29
離岸風力	0	0	520	19	3,000	111
水力	2,089	46	2,100	47	2,150	48
太陽光電	842	11	8,776	110	20,000	250
地熱能	0	0	150	10	200	13
生質能	741	54	768	56	813	59
燃料電池	0	0	22.5	2	60	5
合計	4,319	127	13,537	273	27,423	515

資料來源：Energy Trend, 2016

調的Smart Inverter先驅，另如Enercon全容量轉換器，啟動風速最低、最能善用風力之風機...等，並以再生能源優先併網發電政策，吸引大量再生能源業者投入發展，促使德國再生能源迅速蓬勃發展。

德國政府於2011年公布能源轉型(Energiewende)概念之政策，其長期再生能源發展規劃朝向減少碳排放量，推動再生能源發展、能源效率提升及住宅與運輸部門節能等

目標，並決定於2022年終止核能發電，預期至2050年碳排放減少為1990年排放量的80%至95%。由表2可知，2015年，德國再生能源發電1,959億度電，佔全國總發電量30%，其中最具發展潛力的風力發電和太陽光電發電量佔總發電量20%。

1.3 美國

1980年，美國加州開始發展風力發電，但

表2 2013年至2015年德國各能源發電量表

能源別	2013		2014		2015	
	Billion kWh	%	Billion kWh	%	Billion kWh	%
總發電量	638.7	100	627.8	100	651.8	100
褐煤	160.9	25.2	155.8	24.8	155.0	23.8
核能	97.3	15.2	97.1	15.5	91.8	14.1
硬煤	127.3	19.9	118.6	18.9	118.0	18.1
天然氣	67.5	10.6	61.1	9.7	59.8	9.1
礦油	7.2	1.1	5.7	0.9	5.4	0.8
再生能源總量	152.4	23.9	162.5	25.9	195.9	30.1
風力	51.7	8.1	57.3	9.1	88.0	13.5
水力	23.0	3.6	19.6	3.1	19.3	3.0
生質能	41.2	6.5	43.3	6.9	44.2	6.8
太陽光電	31.0	4.9	36.1	5.7	38.4	5.9
家庭廢棄物	5.4	0.8	6.1	1.0	5.8	0.9
其他能源	26.2	4.1	27.0	4.3	26.1	4.1

資料來源：Arbeits Gemeinschaft Energie Bilanzen, 2016

因早期小容量風機(200 kW)發電效率不彰、金屬疲勞…等因素下，在發展上受限制。隨近十年環保意識抬頭、政府優惠措施及風機效能提升，再生能源才又開始繼續發展，如圖3所示。

由US. Solar Market Insight統計可知(如圖4)，近年隨著再生能源的發展與政策的推動，2010年至2015年間，每年的太陽光電裝置容量皆穩定成長。

2. 大量再生能源併網對電網運轉的影響

隨節能減碳意識的高漲，各國皆積極發展再生能源，然因間歇性再生能源發電出力易受環境影響，其出力不穩定的特性將對電力系統的運轉帶來衝擊。由於電力公司有責任提供可靠的電力及維持電力品質，包含維持負載與

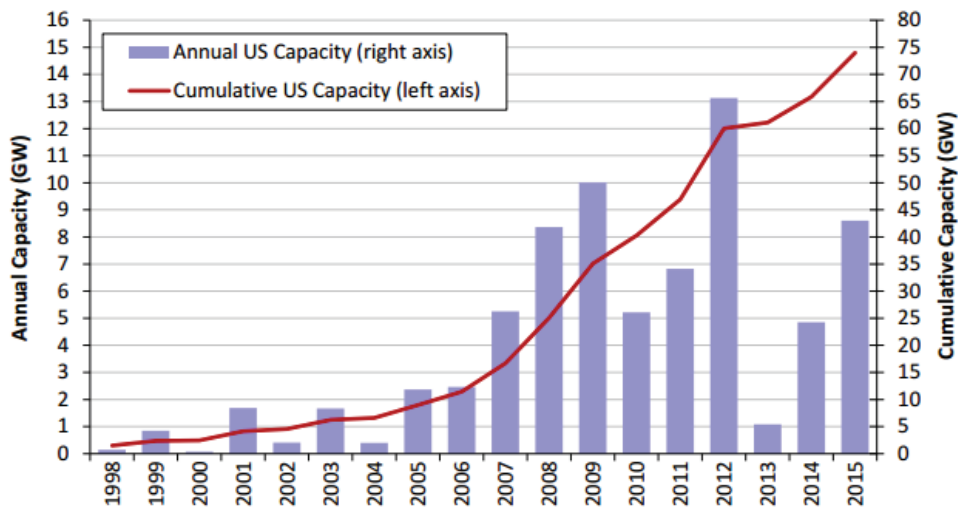


圖3 1989年至2015年美國風力發電裝置量趨勢
資料來源：Wiser & Bolinger, 2016

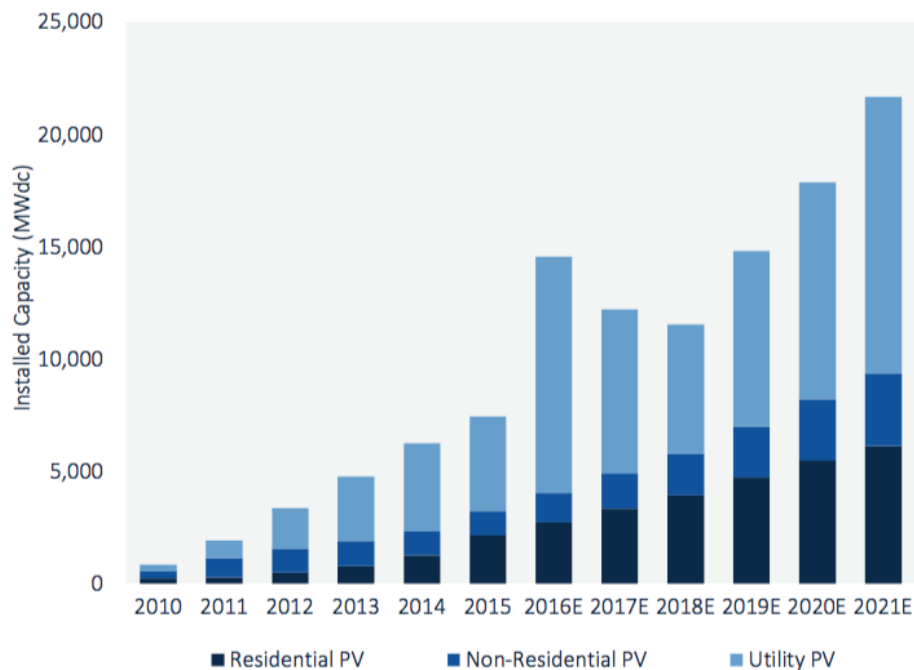


圖4 2010年至2021年美國太陽光電裝置容量
資料來源：SEIA, 2016

發電的平衡；當再生能源發電容量佔比小時，其對電力系統的運轉影響不大，但隨著再生能源發電容量日漸成長，當達到相當佔比時，因再生能源發電不像傳統電廠一樣可預期及控制出力，再加上天候變化，其出力變動勢必會對電力系統運轉造成影響。面對新挑戰，電力系統運轉除機組排程、調度運轉有異於傳統作法外，亦需要額外的設備及花費來維持電力系統的可靠度及電力品質，瞭解天候環境的變動和再生能源出力預測之準確性，對於電力系統最佳化運轉是一個重要的關鍵。此外，瞭解不同再生能源發電的特性和對電網運轉的衝擊，亦將有助於制訂再生能源發展政策所需的法規及配套，降低系統衝擊成本，才可能裝置更大量

的再生能源。如圖5所示，相關能源政策的決策者須能全盤思考大量再生能源併網對系統運轉調度、輸配電的衝擊，規劃適合再生能源產業發展所需的配套，才能順利推展再生能源永續發展。

2.1 再生能源設備性能對電網安全運轉的重要性

檢視以往高佔比再生能源國家遭受電力系統事故之經歷，如2004年1月18日西班牙大停電，輸電系統遭遇短路事故，使配電系統上併網運轉的風力機組因欠電壓的保護機制引起大量風力機組瞬間跳脫，加劇系統停電範圍，如圖6所示，此事件引起低電壓承載能力(Low

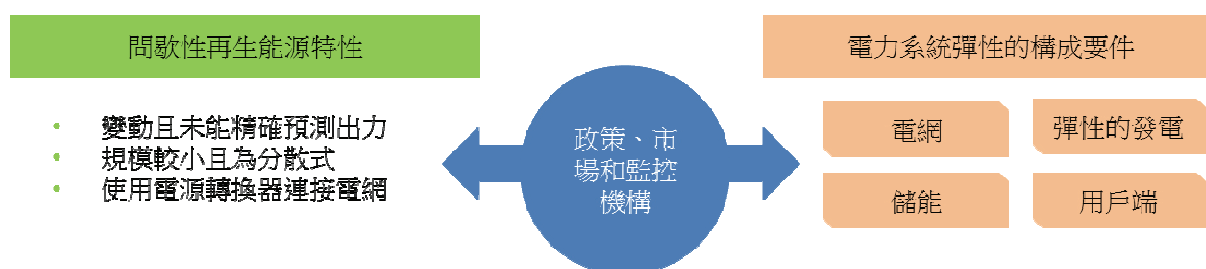


圖5 高佔比再生能源併網之挑戰
資料來源：Mueller, 2016

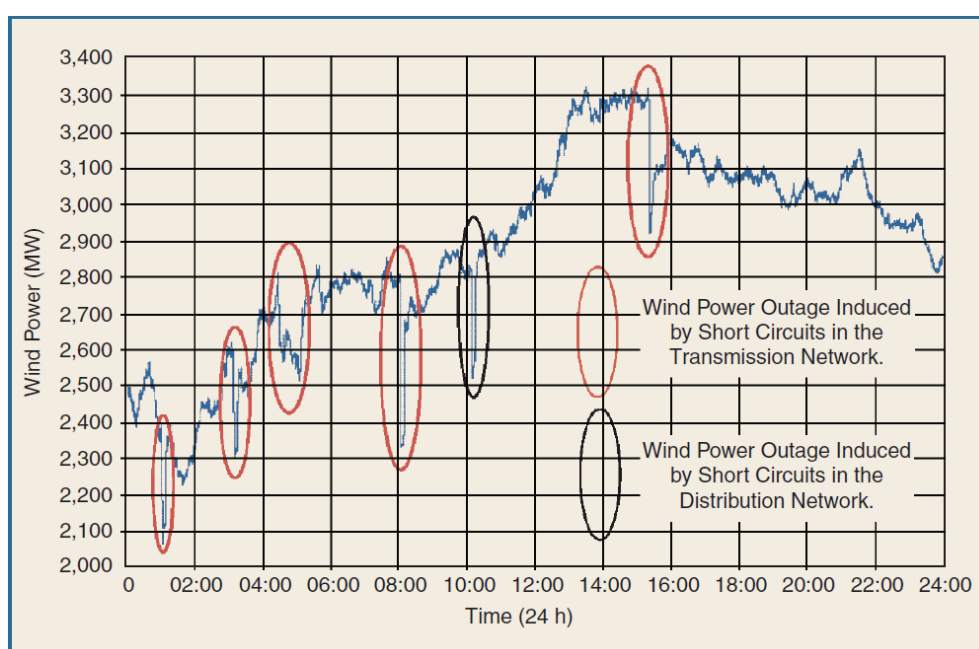


圖6 2004年西班牙停電事故導致風力發電跳脫
資料來源：Eriksen *et al.*, 2005

Voltage Ride Through, LVRT)討論，促成後來風機被要求須具備低壓承載能力；另如2006年11月4日歐洲大停電，事故發生後，歐洲電網輸電聯盟(Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity, UCTE)解聯，分成西部、東北部、東南部三區，各區電力供需嚴重不平衡，相繼出現低頻率或高頻率情況。如圖7所示，西部電網因東部輸入電力中斷，8秒內頻率驟降至49 Hz左右，在卸除大量負載後，頻率回升至49.2 Hz以上；東北部電網因發電量過剩10 GW，頻率升至51.4 Hz，在解聯部分發電機組及部分機組因高頻跳脫後，系統頻率降至50.3 Hz，隨系統電壓及頻率漸穩定後，再生能源無秩序地自動併網，同時大量水力、火力機組出力隨其調速機動作自動下調，系統潮流發生了大變化。許多變壓器及線路過載，影響電網頻率調節和電力潮流，增加停電範圍擴大的風險，加劇復電的困難。此事故範圍波及法國、德國、比利時等多個重要國家之城市，整個事故損失負載量高達16.72 GW，約1,500萬用戶受影響。

歷經此兩次大停電事故，歐盟先進國家注意到高佔比再生能源於電力系統遭受擾動後，再生能源設備須有一定程度的頻率及電壓承載

能力，才能減輕對電網安全運轉的威脅，也因而針對再生能源設備訂定相關規範以確保系統能維持穩定的運作，避免事故進一步擴大。

2.2 高佔比再生能源於電源供給側之挑戰

電力系統的機組排程和運轉，主要目的係在不影響供電可靠度下以最低成本運轉，持續提供足夠的電力給負載使用，使系統的電壓和頻率維持在規定的範圍內。然而，不穩定出力之再生能源大量併入系統後，勢必會影響到原有系統的運轉模式。如圖8所示，大量再生能源併網雖能抑制尖峰用電，唯因風力能及太陽能等間歇性再生能源易受天候環境變動的影響，其預測發電量與實際發電量之誤差將增加運轉調度困擾及額外的運轉成本。若誤差偏大，甚至可能造成電力品質與停/限電問題，因而電力系統內須具備能迅速啟動、高升/降載率機組、儲能裝置…等設備及配套，才能應付再生能源即時出力變動，維持系統頻率。在未來規劃大量再生能源併網時，須同時全面思考此運轉模式改變的因應對策，如傳統機組功能及性能的要求。

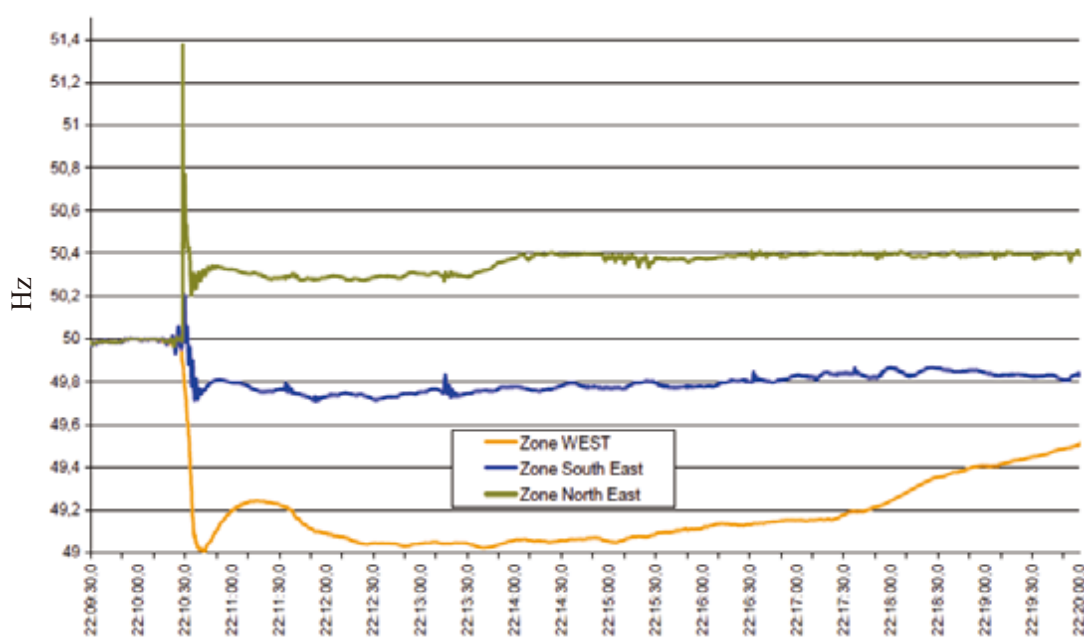


圖7 歐洲大停電UCTE解聯後各區之頻率曲線
資料來源：UCTE, 2007

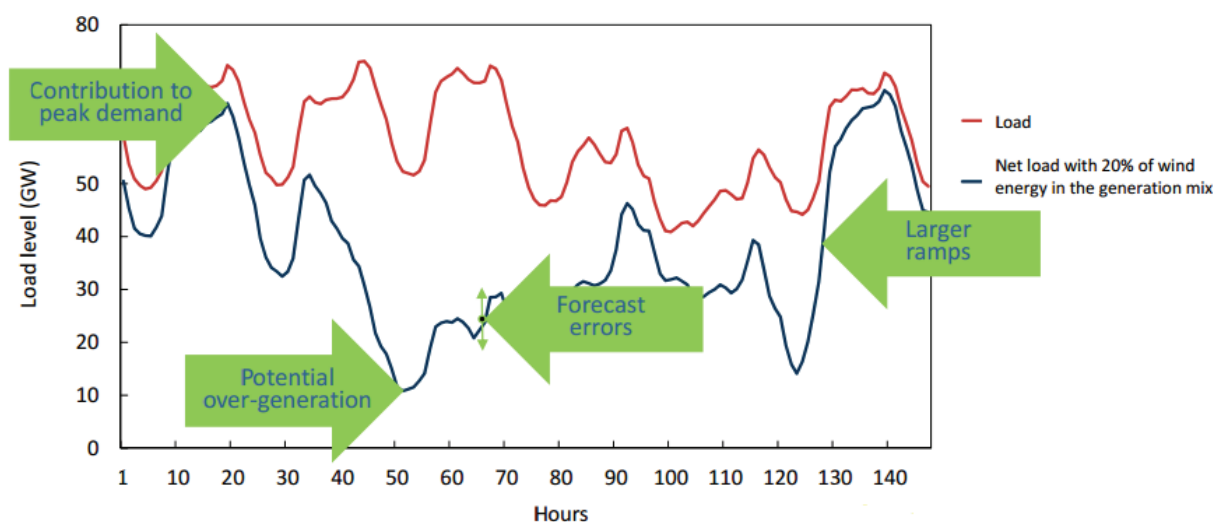


圖8 高佔比再生能源併網之新運轉要求
資料來源：EC-Eurostat, 2016

針對高佔比再生能源併網運轉的要求，可從電力系統的分析和預測、監控因應，如下(陳斌魁等，2006)：

(1) 再生能源出力預測

再生能源發電高佔比的系統，其發電出力預測在電力系統運轉中扮演一個重要的角色。再生能源預測的準確性，將影響到機組排程、電源調度，預測不準將有過多或過少的轉備機組，造成偏高的運轉成本或影響供電可靠度，因而在電力控制中心的能源管理系統(Energy Management Systems, EMSs)需整合再生能源預測資訊，以便：

- (a) 降低調度控制中心的風險和不確定性因素。
- (b) 增加電力系統操作者和調度者的信心，以及管理再生能源變動所需的因應對策。
- (c) 透過改善整個系統的運轉規劃和電源調度及電網調度，降低運轉成本。
- (d) 使系統能容納最多的再生能源發電量。

再生能源預測準確度若能提高且發電量預測技術改善，能縮短更新預測的時間，即時提供再生能源下一時刻出力大小等資料，將有助於機組排程及電網調度運轉，減少電網操作的額外成本，穩定供電及電力品質。

(2) 機組排程

機組排程是根據預測負載量及再生能源發

電預測量，考慮能源價格、輸電線壅塞限制、機組熱耗率及機組、輸電設備維修等因素下，決定未來哪些機組上線運轉，能以最低的成本、穩定可靠的運轉。但由於再生能源發電佔比越來越高，加上天氣預測的不準確影響再生能源發電出力的估計，可能導致不合適的機組排程。若因不準確的預測使安排的轉備可控機組不足，將影響系統運轉可靠度及對電力品質造成威脅；安排過多機組上線運轉，將使整個系統發電運轉成本增加。

(3) 負載追隨

負載追隨是指在幾分鐘到幾小時的時間範圍內，當負載上升或下降時，考慮經濟調度的情況來調整發電。而在再生能源併網後，於早上負載上升期間須有較多電力資源被調度，假如此時再生能源發電也增加，則系統運轉需要較少的負載追隨機組，相反地，假如再生能源發電機組未能提供預期的電力，則需要較多的負載追隨機組，因此，有較精確之再生能源發電出力預測，將有助於負載追隨機組的估計，避免不必要的調度，減少發電成本及供電可靠度疑慮。

(4) 頻率調節

頻率調節是指在幾秒鐘到幾分鐘的時間範圍內，利用自動發電控制(Automatic Generation

Control, AGC)機組及調頻機組增加或減少發電來匹配快速變動的負載，以維持系統頻率及控制區域內的互聯線電力潮流量，使發電跟負載隨時保持平衡。而在再生能源併網後，由於再生能源發電輸出可能快速變動，再加上負載隨時變動將使頻率調節機組需求增加，頻率調節成本與預測誤差有關，預測誤差越小，相對的頻率調節成本就越低。

(5) 負載預測

負載預測通常分成中、長期(預測日前尖峰負載和能量需求量、季節性)和短期(預測下一小時的負載量)，負載預測是電力系統機組排程和運轉的重要依據，當負載預測不準確時，需臨時調整發電排程，此將造成額外的燃料花費和供電可靠度疑慮，系統負載如果可以正確的被預測，將可以節省不同燃料機組的成本，使總發電成本降低。

短期的負載預測依賴歷史資料和各種數據：如天氣情況、每天和季節性的狀況、景氣需求等，預測隔天每小時的負載。短期預測是一個複雜的問題，在已知的條件下，即使短期預測可以準確預測負載，也可能因為隨機情況：如暴風雨、工廠罷工等，而打亂預測值。

所以為了達到最低的運轉成本，除了結合負載管理、需量反應方案外，可持續改善或發展新的負載預測方法，正確的負載預測是達到最低運轉成本的重要關鍵。

依表1，政府於2020年風力裝置目標量1,720 MW、太陽光電裝置目標量8,776 MW，當再生能源發電環境條件大幅變動，可能出現如圖9所示之淨負載、總負載及再生能源出力曲線，隨下午3點至6點日照減弱，太陽光電出力驟減，此3小時內淨負載劇升12,700 MW，台電電源是否具足夠快速升載之機組或其他配套以補足再生能源出力缺口，維持系統供需平衡？恐為臺灣日後需面臨的嚴酷考驗！相關再生能源決策者期望推廣大量再生能源併網的同時，必須了解此對電網供電可靠度、電力品質的影響，而審慎規劃所需的相關配套。

3. 輸、配電系統面臨問題

分散式再生能源的併網，除上述對電源供應、機組排程、電網安全運轉問題外，也改變傳統電力傳輸的模式，用戶可將電能賣回電力公司，因此電力潮流從原本單方向由電力公司

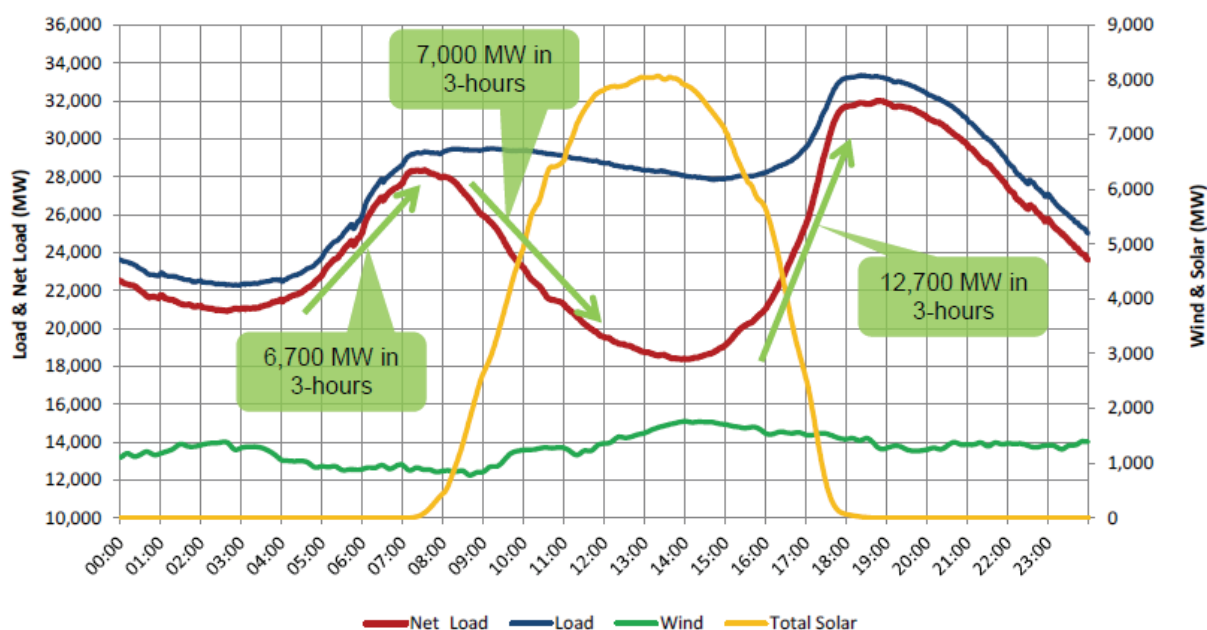


圖9 California Independent System Operator, CAISO (加州電力調度中心)發電結構圖
資料來源：Loutan, 2013

到用戶端，可能轉變為雙向的電力潮流，且由於間歇性再生能源不易準確預測其發電量，將會增加電力系統安全運轉的困擾(Barker *et al.*, 2000) (陳斌魁等，2006) (盧展南等，2008)。

3.1 再生能源併網對穩定度影響議題

資源良好的再生能源場址通常遠離負載中心或現有的輸電線路，因此當大量再生能源併入電網時，可能需同時擴建新的或加強既有的輸配電網路，以確保電力系統的充裕性及可靠性。

由於輸配電網的興建成本很高，加上輸配電線路具有自然獨占的特性，在電業自由化後，由於再生能源加入，興建輸配電線路所需分攤費用的方法，及相關政策法規配套亟待建立以減少日後爭議。

早期再生能源發電容量小，可以連接在配電網路，近年再生能源發電容量快速增加，有更多和更大容量的再生能源連接到輸電網路，當電網要容納更多再生能源發電時，必須要有明確的要求，有關電網穩定度(特別是動態)的併網連接議題應深入討論和瞭解，例如：

- (a) 是否有適當的電網法規，提供給再生能源製造商和再生能源投資者有所依循。
- (b) 在缺乏適當的再生能源動態模型下，電網調度者可能無法評估再生能源發電對電力系統穩定度的衝擊。

- (c) 當需要削減再生能源發電出力時，是否允許適當的協議去執行降載…等。

在再生能源發電高佔比的情況下，假設輸電容量足夠，電網可以傳送多少再生能源出力變得很重要，未來先進的模擬工具應該持續開發，以便檢視電網的穩定度。

3.2 輸電層面

高佔比的再生能源將影響到輸電系統的規劃和運轉，當其發電量超過輸電線路額定容量時，即造成線路壅塞的情形，輸電能力將被限制，造成許多具良好再生能源資源的場址未能被妥善發展，如中國近年積極布建風力機組及太陽光電，然因電網建設週期較長及跨區域的協調不易，未能即時於再生能源建設週期內完成輸電線路的擴充更新(王趙賓，2014)，無法將西部供過於求的再生能源發電量輸送至用電需求較大的城市；另因跨省聯絡線的考核機制，採降低再生能源出力應變措施，造成嚴重的棄風及棄光現象，如圖10所示，2015年全年棄風率達15%，相當於2015年三分之二的新增風機裝置容量沒有帶來任何效益。當可用輸電傳送能力不足以容納再生能源輸出時，雖可短暫削減再生能源發電輸出解決線路壅塞，但長期來看，將影響相關再生能源產業發展，故政府在規劃再生能源發展政策，同時需搭配輸、配電線更新及布建規劃，以及裝設壅塞量測設

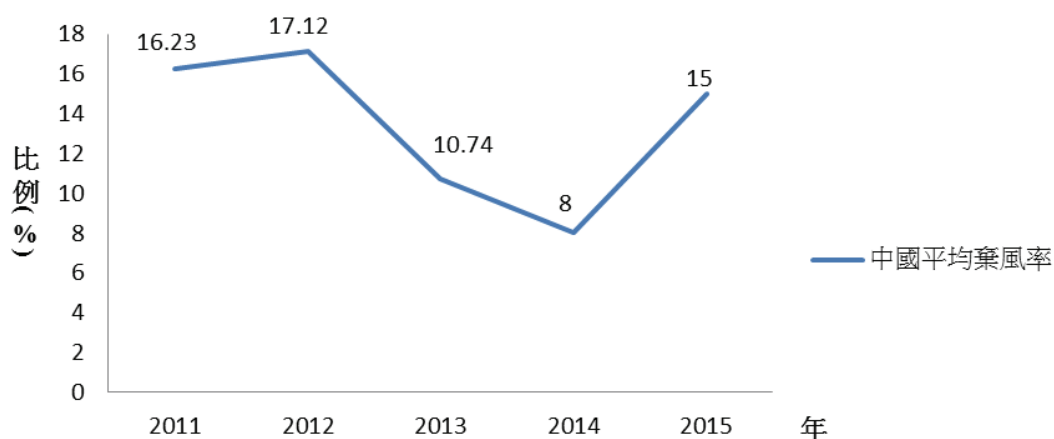


圖10 中國2011年至2015年風力發電棄風率
資料來源：張玥，2016

備，使輸電線控制達到最佳。

3.3 配電層面

由於以往的配電方式都是由電力公司單向供電，電力公司配電系統亦依此規劃設計，在控制、管理、維修或是收費上都較單純，但是當線路上併聯很多分散型電力時，代表同一條饋線上至少有兩處以上的電源，此時電力品質的控制和負載管理將較為複雜，有時甚至連負載潮流的方向都無法預測，而影響電網運轉和保護設備能否正常操作。

除了部分之分散型電力的技術仍有待發展和改良之外，隨著分散型電力的容量越來越大，其與電力系統併聯時造成之衝擊、潛在威

脅仍不可忽視，以下列舉分散型電力對配電系統衝擊議題。

3.3.1 變壓器介面與接地

早期台灣電力公司配電系統因投資成本考量，於市郊之配電線路變壓器常採open-Y、open- Δ 方式連接，導致變壓器需減額運轉，為額定容量之86%，才不會使變壓器過載，然此將壓縮太陽光電的裝置量。

配電變壓器扮演的是電力公司和分散型電力連接的橋樑，但也有可能同時危害電力系統和分散型電力系統，所以在考慮併聯分散型電力時，需慎選合適的變壓器，表3為各種變壓器在分散型電力系統併聯時的優、缺點(Franklin

表3 各種變壓器結線的優、缺點

配電形式	變壓器類型	優點	缺點
三 相 四 線 中 性 點 多 重 接 地 系 統	高壓側Y接中性點接地 / 低壓側 Δ 接	<ul style="list-style-type: none"> ● 在故障時可以防止高壓側過電壓 ● 可用於非接地型之換流器(Converter)併聯 ● 當電力系統的電壓漂移(Voltage Swell)時，可以減少對換流器之影響 ● 不容易產生鐵磁共振 	<ul style="list-style-type: none"> ● 零相序電流會在Δ接繞組內循環流動，使變壓器溫昇增加 ● 用戶端變壓器，常非此種結構 ● 使饋線接地故障保護較不靈敏
	高壓側Y接中性點接地 / 低壓側Y接中性點接地	<ul style="list-style-type: none"> ● 在故障時可以防止高壓側過電壓 ● 防止低壓側零相序循環電流 ● 常使用於既有用戶端設備 	<ul style="list-style-type: none"> ● 部分分散型電力無法提供有效接地而不適用
	高壓側 Δ 接 / 低壓側Y接中性點接地	<ul style="list-style-type: none"> ● 可使用於既有用戶端設備 	<ul style="list-style-type: none"> ● 裝置容量超過100 kVA時，若饋線有接地故障或孤島運轉將引起過壓問題 ● 在單相運轉時可能會引起鐵磁共振
	高壓側 Δ 接 / 低壓側 Δ 接	<ul style="list-style-type: none"> ● 可用於非接地型之換流器併聯 ● 當電網的電壓漂移時，可以避免電壓升高對換流器之影響 	<ul style="list-style-type: none"> ● 裝置容量超過100 kVA，若饋線有接地故障或孤島運轉時，可能引起過壓問題
三 相 三 線 非 接 地 系 統	高壓側 Δ 接 / 低壓側 Δ 接	<ul style="list-style-type: none"> ● 容易裝設 	<ul style="list-style-type: none"> ● 無法提供有效的接地點，使接地故障不易偵測
	高壓側 Δ 接 / 低壓側Y接中性點接地	<ul style="list-style-type: none"> ● 容易裝設 ● 可以為發電端提供一個接地參考點 	<ul style="list-style-type: none"> ● 發電機出力不平衡時，零序電流會在Δ接高壓側循環流動

資料來源：陳斌魁等，2006

& Franklin, 1983) (洪德生等, 2003)。

3.3.2 電力品質

(1) 電壓調節

在輻射型配電系統中由配電站引出的饋線距離可能相當長，而饋線本身的阻抗將會造成饋線末端嚴重壓降，所以必須調高配電站的電壓，使饋線末端的電壓不低於容許額定電壓變動值。

用戶電壓調節通常利用配電站變壓器的 LTC (Load-Tap-Changer)、線電壓調整器以及補償電容器的啟斷來控制。但不論是變壓器 LTC 或電壓調整器，都依配電站到負載端的負載電流大小來估算饋線上的總負載，以判斷所需要調節電壓之大小。分散型電力所提供的電流會影響電壓調整器對於負載量的估算值，進而影響調節電壓的準確值(除非配電站可依實際之電壓進行調整)。

例如，當分散型電力併聯於電壓調整器和變壓器 LTC 的下游，在系統重載時，因為分散型電力所提供的電流使電壓調整器低估整條饋線的負載量，電壓調整器將無法調整至合宜的電壓，造成下游或饋線末端的端電壓不足，如圖 11 所示，若盡可能的將分散型電力併聯於配電站上游，方可避免電壓補償不足的問題；但當分散型電力併聯於饋線末端時，可能造成線

路末端電壓過高，若在輕載時，配電站的一次側電壓已經調整到接近臨界值，又因分散型電力注入電流使端電壓上升，末端負載用戶便可能面臨電壓過高，影響電氣設備安全，如圖 12 所示。

因此，在考量分散型電力併聯於電力系統之衝擊時，應針對分散型電力裝置容量的大小、特性、裝設的位置、電壓調整器的位置和饋線的阻抗特性等一併列入考慮。

(2) 諧波問題

不同形式的分散型電力所產生之諧波也會不盡相同，分述如下：

- (a) 同步發電機(尤其是凸極機)或感應發電機以 Y-Y 變壓器(接地)連接：幾乎只有產生 3 次諧波。
- (b) 單相式換流器：以低階的奇次諧波為主。
- (c) 三相式換流器：以低階的奇次諧波為主，但其起始諧波為 5 次諧波。

目前所有新型的電源轉換器都以 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 為轉換元件，以得到更完美的波形，現在的電源轉換器所產生的諧波已經符合 IEEE 519-1992 的標準。然而，擁有主動式防獨立運轉(anti-islanding)的換流器，因利用注入不對稱波形來偵查是否有發生獨立運轉的現象，會有高階項的諧波。當電力系統併聯大量的分散型再生能

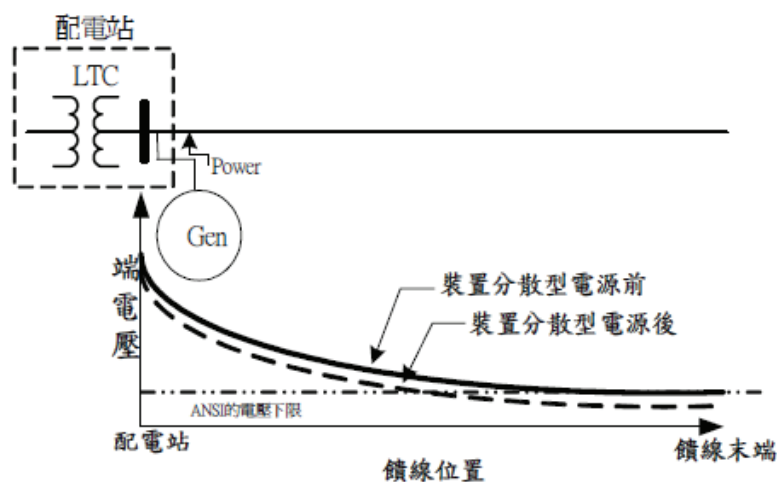


圖 11 分散型電力造成電壓補償不足
資料來源：陳斌魁等，2006

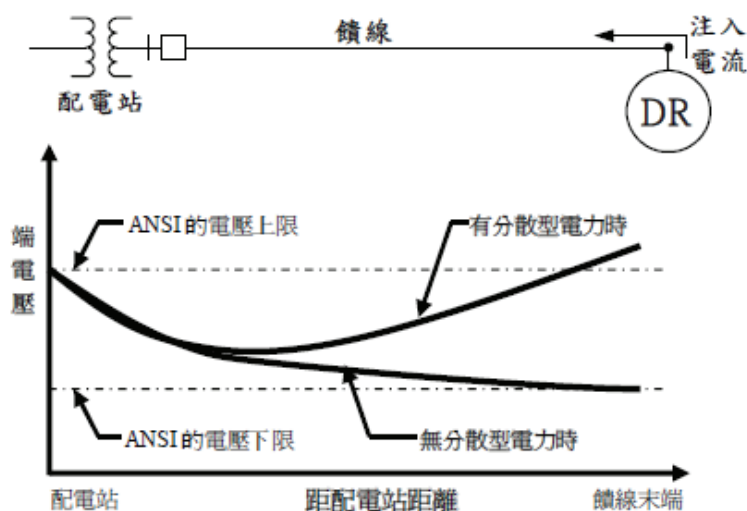


圖12 分散型電力可能造成用戶端過電壓
資料來源：陳斌魁等，2006

源時，這種高次諧波將會對電氣設備之壽命及功能造成危害，日後分散型電力併聯計畫仍必須考慮分散型電力的諧波影響。因目前法規，電力品質只在責任分界點符合即可，日後若甚多用戶裝設分散型電力，在各責任點或皆能滿足電力品質需求，但加總之後，可能遠超過限制值，此將是大量裝設分散型電力後需嚴肅面對的問題。

(3) 逆送潮流

負責大都市供電的配電站在二次低壓側通常有數條饋線以供應不同地區使用。在各別主饋線的一次側和二次側都有特定的保護設備，其中一分路發生故障時，其餘線路仍可以繼續

供電，而且保護設備也能在逆向潮流流經時跳脫，以保護電力系統供電的可靠度。

隨分散型電力併網，電力系統可能會對這種配電站造成嚴重衝擊；如果分散型電力的容量很大，以致於有可能逆送電力回配電站，此時分散型電力的逆送電力會造成二次側的保護電驛跳脫，如圖13所示，使原本正常供電之負載在無事故下全部停電。當網路保護器(Network protector)再投入時，在某些情況下亦可能造成嚴重傷害，譬如在輕載時，分散式再生能源也有可能造成配電站二次側的所有保護電驛跳脫，雖然保護設備會嘗試復閉以繼續供電，但當一次側和二次側不同步時將使電力設

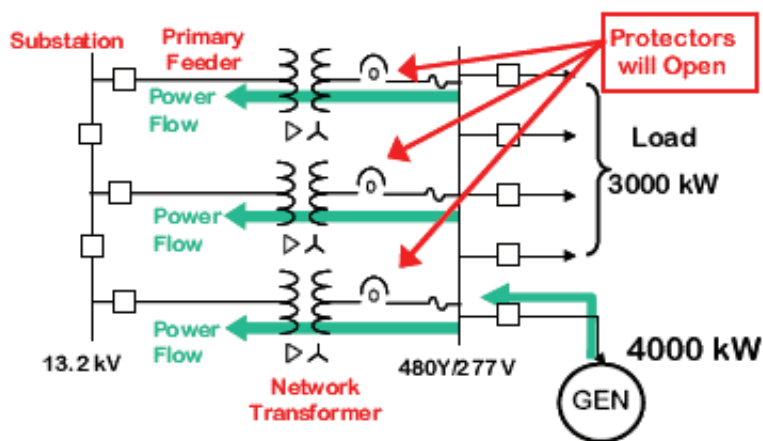


圖13 逆送潮流引發保護設備跳脫
資料來源：Barker *et al.*, 2000

備損壞。

3.3.3 保護電驛之誤動作

配電系統上線路有故障發生時，分散型電力會提供額外的故障電流，而對於原本輸配電上之過電流保護裝置會造成衝擊，其可能的衝擊包括：

- (a) 因為短路電流增加，造成電力保險絲(Fuse)不必要的熔毀。
- (b) 下游分散型電力的故障電流也有可能造成上游的斷路器(Breaker)、復閉器(Recloser)、分段遮斷器(Sectionalizer)或保護熔絲不必要遮斷或熔斷的誤動作。
- (c) 分散型電力的獨立運轉會使分段遮斷器無法運作(因分散型電力仍對線路繼續供電)。
- (d) 使未考慮分散型電力的斷路器和復閉器變成不靈敏。

雖然配電線路上單一的分散型電力所提供的故障電流並不是很大，但是如果線路上併聯很多的分散型電力，其所造成的影響就不能忽略。

而當大型的分散型電力鄰近配電站時，也會造成配電站斷路器的誤動作。如圖14所示，當接地故障發生於配電站的另一饋線時，因為分散型電力所提供的大電流，使相關饋線的斷路器一起誤跳脫，造成不應該停電的地區突然

斷電。

3.3.4 偶發性的獨立運轉

獨立運轉是指當電力系統因故障而造成線路上的保險絲或斷路器打開，使分散型電力單獨供給某一地區的所需電力，如圖15所示，這種脫離原連接之電力網而形成的獨立供電狀態又稱為孤島運轉(Islanding)，但如此一來會造成：

- (a) 維修員工和公共的安全：傳統配電系統為輻射狀，電力潮流為單向性，當故障發生導致斷路器打開，負載端理應沒有電壓，但當分散型電力獨立運轉時，代表被隔離線路的另一端仍繼續供電，如此會造成電力公司維修人員有觸電的危險。
- (b) 當系統恢復供電時若和分散型電力不同步，會造成用戶和電力公司設備的損害：在故障排除後，電力公司會儘速復電以繼續供給負載所需的電力，但若復閉時沒有考慮到線路另一端之電壓是否同步，在復閉的瞬間，若兩端有電壓相位差，會產生嚴重的電壓波動而危害到用戶和電力公司的設備。
- (c) 電壓調整的問題：早期的分散型電源並無追隨負載、虛功補償和頻率控制的功能；當分散型電力發生獨立運轉時，其所提供之電力無法完全滿足用戶的需求，分散型電力所提

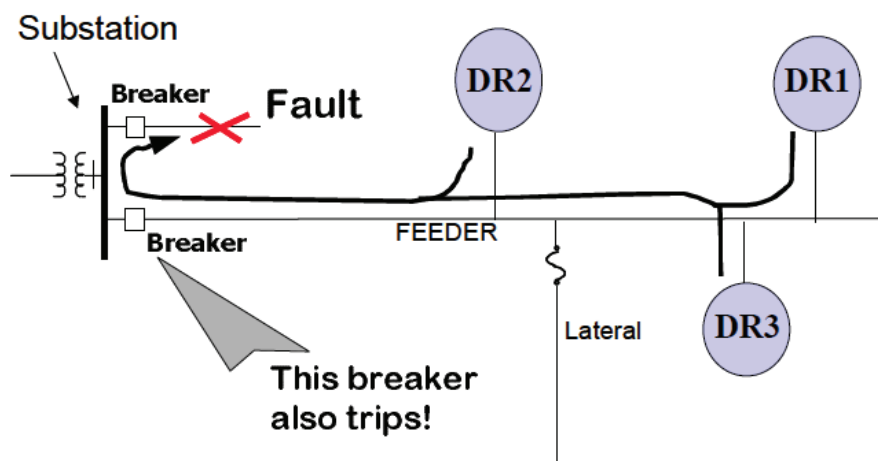


圖14 分散型電力造成斷路器的誤跳脫
資料來源：Barker *et al.*, 2000

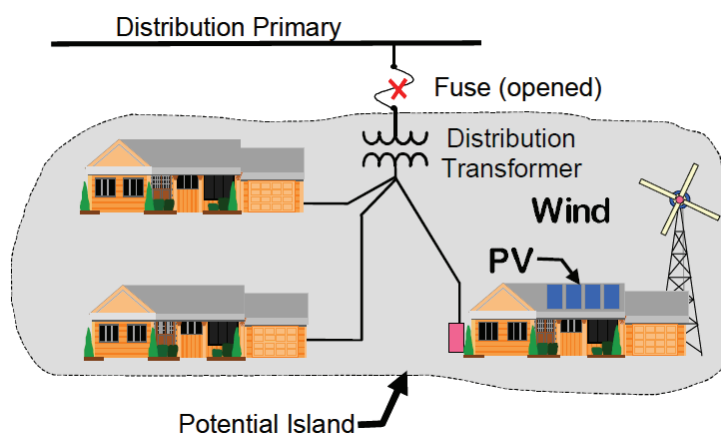


圖15 偶發性的獨立運轉
資料來源：Barker *et al.*, 2000

供的電壓會由正常值緩慢衰減，造成用戶端電壓過低，可能損及用電設備。

3.3.5 其他可能之衝擊

(1) 故障等級

先進國家之分散型電源大都與電網併聯運轉，故障時大多會提供故障電流，若分散型電力的容量不大，其影響不會很顯著，但當線路上併聯大量的分散型電力時，若線路發生接地故障，此時產生之故障電流可能會超過原來無分散型電力時的故障等級。

(2) 電力系統三相不平衡

分散型電力有些為單相發電系統，如臺灣裝設之PV併接配電系統，很可能只在某相注入電源，此將引起三相不平衡的情況。由於電力不平衡影響層面甚廣，在(a)用戶方面：不平衡的電力系統將造成用電設備損失增加、溫升過高、設備壽命縮短進而使用戶電費和維修費增加；(b)電機設備製造商方面：為因應系統三相不平衡需進行改善設計，包括增加絕緣耐溫，改善設備散熱系統，將導致成本增加；(c)電力公司方面：不平衡三相電力將使台電發電機、馬達等旋轉電機設備過熱，縮短壽命；保護電驛誤動作，造成停/限電；二次諧波共振，使設備損毀；及系統損失增加，墊高發電成本。

(3) 監測、通訊以及控制

通訊在電力公司和分散型電力之間的自動

控制和保護協調扮演了一個很重要的角色，但有一些分散型電力併聯的位置相當的偏遠，此情況下，監測、通訊和控制的即時性和一致性需要考量，而且在各分散型電力之擁有者間需有共識；輸配線上的電力品質控制(如相角、頻率、電壓、相序等)必須由主電力系統主導，而監測大型分散型電力系統的電壓、斷路器的狀態、有效功率和視在功率的輸出，才能幫助電力公司達到最佳的控制，但如此會增加分散型電力擁有者額外的監測及保護設備成本。

(4) 同步

同步機與電力系統若未同步而予以併聯時，所產生的電壓變動將會造成電力系統內用戶設備和裝置的損害，因而同步發電機須裝設同步儀，以避免不同步的狀況產生。但不論是感應發電機、自切換轉換器(Self-commutated Converter)或線切換轉換器(Line-commutated Converter)在併聯時仍有不同步的可能，最好的解決方法不是裝設同步電驛，而是改善設備本身的控制演算法。另外，亦需考量分散型電力在解聯後，重新併聯電力系統時的條件，如IEEE 1547規範在電力事故清除，復電後，分散型電力需於系統穩定至少5分鐘以上才能重新併網，避免因分散型電力的不穩定性使系統受到不良影響。

(5) 刻意的獨立運轉

在主電力系統故障時，斷路器跳脫，但

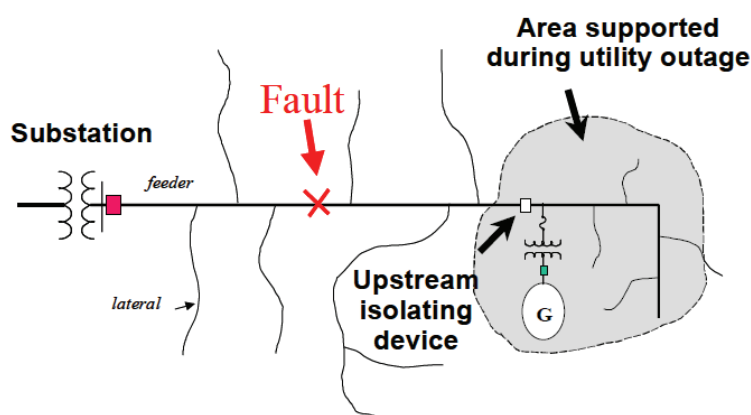


圖16 利用分散型電力做為後備電源
資料來源：Barker *et al.*, 2000

分散型電力仍可當作後備電源使用，以增加特定區域的可靠度，如圖16所示，此時，分散型電力系統必須能提供剩餘地區足夠的電力且提供穩定的電壓和頻率控制，此觀念可搭配未來台電特殊保護系統架構(Special Protection System)。

欲達此目的，分散型電力必須能預測被隔離地區的負載量，並具備電壓控制以及負載追隨的能力，而且還必須有保護設備偵測和隔離其供電區域所發生的故障。當主電力系統修復完成要恢復併聯供電時，分散型電力必須能和主電力系統同步才能進行併聯，因此要當作後備保護電源的分散型電力系統必須具備電力品質控制能力、自動切換技術和通訊能力才有可行性。

4. 德國再生能源併網運轉之經歷

德國政府採主動積極的策略，於發展再生能源過程所遭遇之問題，利用研發與創新克服障礙，進而帶動新興產業，如今已成為全球發展再生能源國家之先驅。本節舉出德國推動大量再生能源併網運轉面臨之問題與經驗，盼能縮短臺灣學習的時間以及減少盲目投資造成的浪費，同時達到降低成本與風險的成果。

4.1 國家經濟危機

德國2000年頒布之再生能源EEG法，於躉購制度契約年限20年間，保證以固定費率收購再生能源發電，確保再生能源相關產業投資者的投資報酬，此政策雖使再生能源蓬勃發展，然FIT制度契約年限長，隨再生能源技術成熟及成本降低，躉購費率調降幅度不及，使再生能源投資業者大量迅速進入電力市場，因政府低估再生能源發展，龐大的補貼成本使政府財政出現困難；此外，為保持德國工業競爭力，並未對佔總負載量約40%的部分能源密集產業徵收EEG稅，如表4，長期累積下來對部分能源密集產業的補貼成本，亦增加政府財政負擔。

4.2 零售電價上漲

德國EEG法令明定，批發價格與零售電價間的差額由最終用戶消費者負擔，且部分能源密集產業之用電免徵此稅，德國住宅電價由2000年每度14歐分上漲至2013年每度29歐分，其中再生能源補助附加捐(EEG Levy)的增加是使住宅電價持續上漲的主因之一，從圖17可明顯得知。在德國，雖然家庭電費僅占一般家庭總支出約2.5%，但若電價持續上漲將可能影響用戶支持能源轉換計畫之意願；其他歐洲國家如愛爾蘭、希臘、西班牙亦因發展再生能源而使零售電價明顯上漲，如圖18所示。

表4 不需繳交再生能源(EEG)稅之能源密集產業用電量

能源密集產業 (Power intensive industries)	不需繳交EEG稅之 公司數目 (Exempted companies)	用電量 (Consumption) (GWh)	用電量/公司 (Ratio consumption/ companies) (GWh)
紙業(Paper)	107	14,062	132
鋁業(Aluminum)	40	10,699	267
鋼鐵業(Steel)	37	11,945	323
水泥業(Cement)	25	3,738	150
能源密集產業之總額 (Total: power intensive industries)	209	40,464	194
整體產業之總額 (Total: ALL industries)	2,057	107,477	52

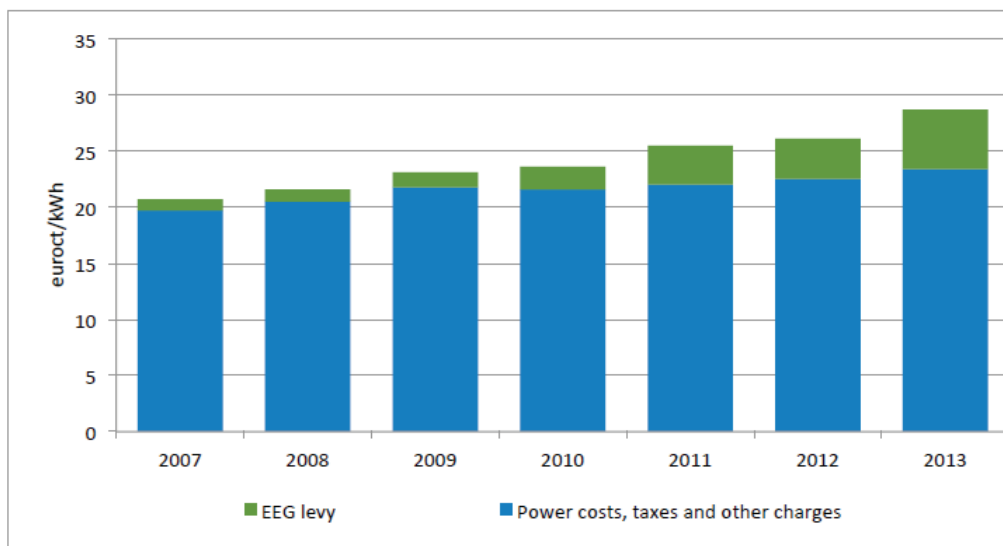
資料來源：Poser *et al.*, 2014

圖17 德國近年住宅電價圖

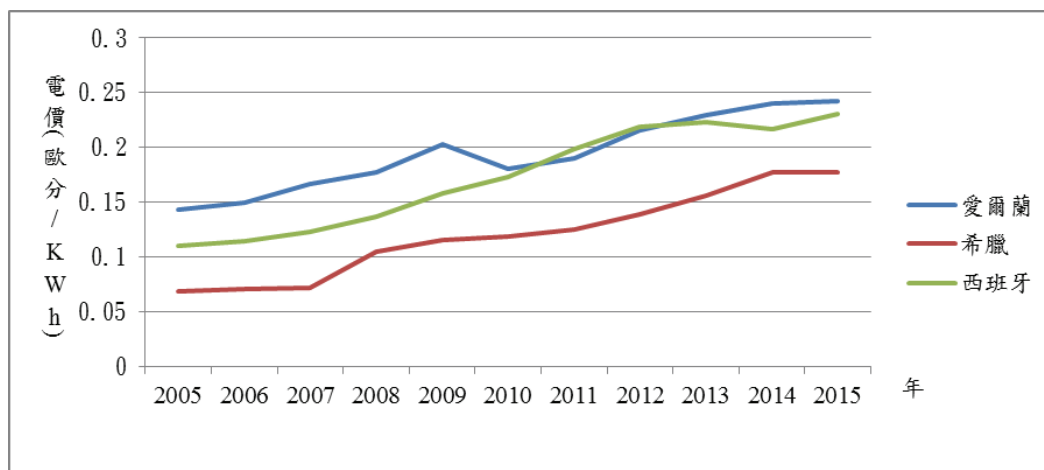
資料來源：Poser *et al.*, 2014

圖18 愛爾蘭、希臘、西班牙2004至2015年零售電價

資料來源：EC-Eurostat, 2016

4.3 批發電價下跌

因再生能源沒有燃料成本，其發電邊際成本幾乎為零，在電力市場上能以較低的價格投標，且施行再生能源優先併網發電政策，使德國電力批發價格隨大量再生能源併網而持續下降(圖19)。

電力市場的電源供給順序由發電邊際成本低的再生能源優先併網，批發價格降低對於

傳統火力電廠帶來的衝擊如下：(1)火力電廠因實際運轉時數不如原先規劃的運轉時數，降低了電廠整體收益，又因負載尖峰電價降低，進一步壓縮火力電廠的收入，使火力電廠的成本回收更加困難，面臨倒閉危機。根據MSCI (Morgan Stanley Capital International)，歐洲前20大傳統電力公司從2008年至2013年，資產市值損失超過一半，約五千億歐元(Weidner, 2013)。從圖20之2010年歐洲主要電力公司的投資等級

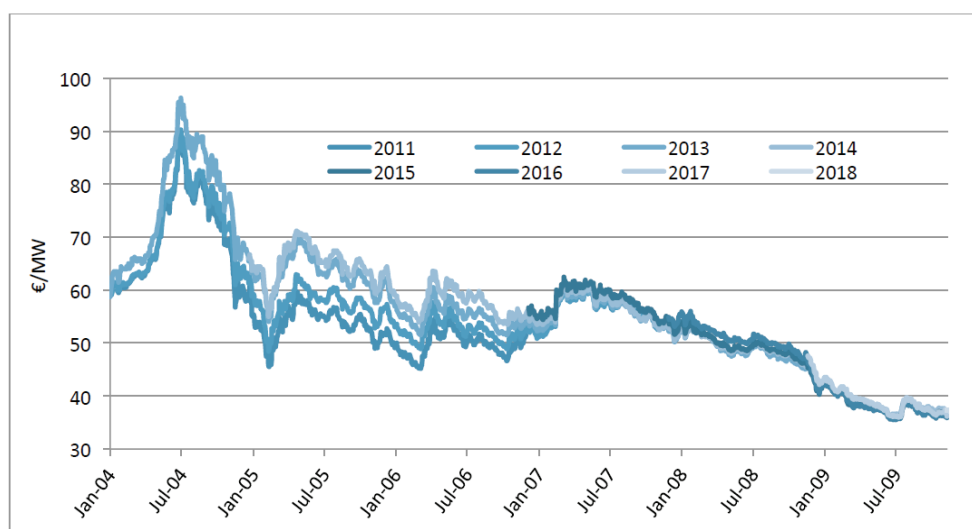


圖19 德國批發價格趨勢
資料來源：Poser *et al.*, 2014

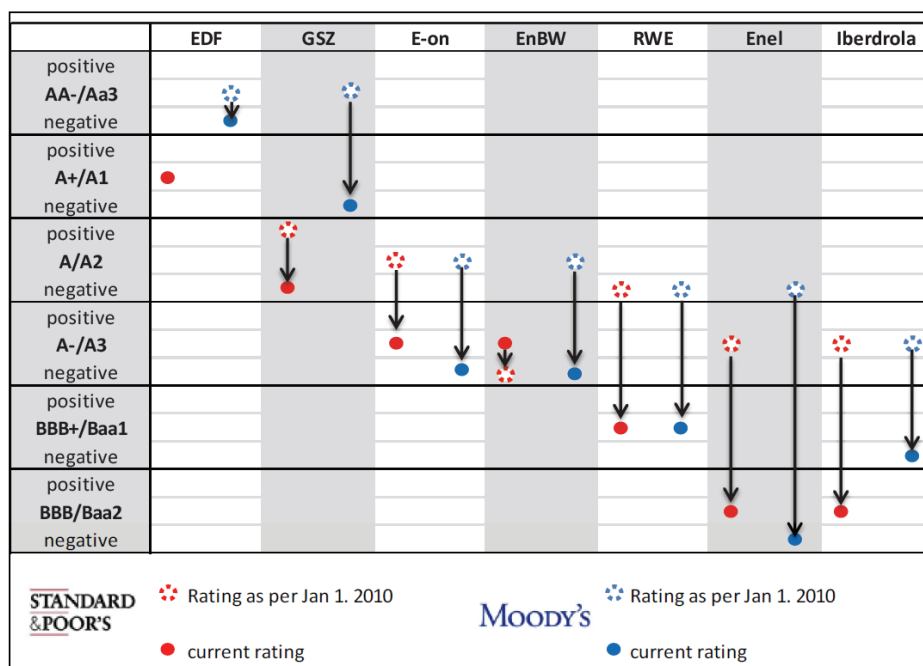


圖20 歐洲主要電力公司的投資等級評價發展
資料來源：Poser *et al.*, 2014

評價發展，可得知再生能源蓬勃發展地區的電力公司投資等級皆明顯被降級；(2)隨核能機組除役和大量再生能源併網，傳統火力電廠被迫成為提供備用電力和平衡電力市場服務，使電力系統面臨供電可靠度問題，如德國E.ON公司之燃氣電廠，於2010年開始運轉兩年之3部350 MW燃氣機組(Combined-Cycle Gas Turbine, CCGT)為效率高達60%且每分鐘升載率高達50 MW之高性能機組，因受再生能源優先併網政策影響，原為基載運轉機組被迫成為尖載運轉機組，如圖21，長期運轉不符成本效益而不得不提出將其機組氣封，然政府為維持系統供電可靠度，最終與業者簽定協議，並藉由容量費率補償使該電廠繼續運轉。

4.4 批發電價定價模式改變

過去電價費率主要由市場供需條件決定，隨著負載尖、離峰而有不同電價。近年大量再生能源併入電網，氣候環境的變動條件反而成為決定電力市場批發電價的主要依據之一，因此，在再生能源佔比偏高的電力市場，其電價預估需將更多的相關資料，如天氣預測資料及再生能源發電量。

4.5 高再生能源佔比對火力電廠及供電可靠度的影響

大量間歇性再生能源併入電網，若因外在氣候環境條件不佳而突然減少發電，仍需火力電廠即時補足供電缺口，以維持系統電力品質、供電可靠度及安全性。由圖22所示，隨德國再生能源佔比提升，電網調度員為負載預測誤差及再生能源發電不如預期，需介入電網調

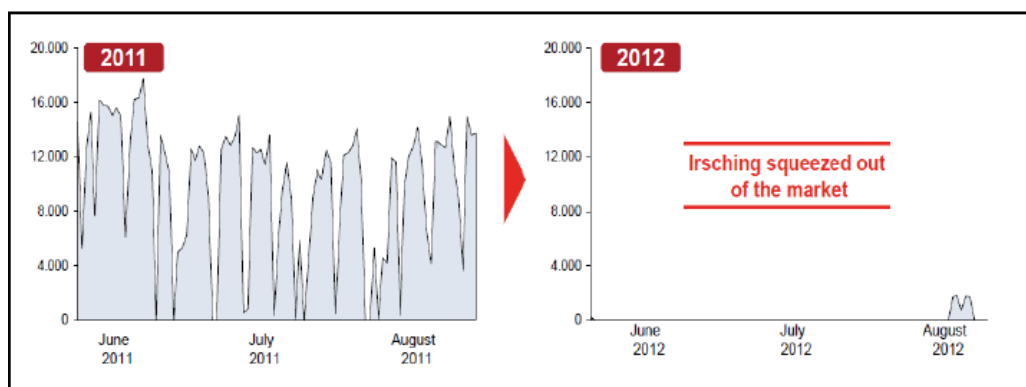


圖21 德國燃氣電廠CCGT發電量圖(in MWh) (2011v.s. 2012)
資料來源：Barth, 2013

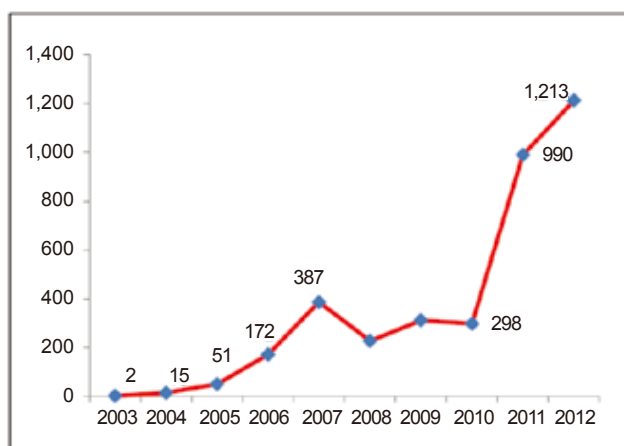


圖22 2003年至2012年德國電力公司介入電網調度次數
資料來源：Poser *et al.*, 2014

度傳統可控機組發電以平衡電力市場供需，其調度的次數由2003年每年2次增加至2012年1,213次；且因再生能源優先併網，原作為基載、中載機組運轉的火力機組，被迫轉為中、尖載運轉機組，於再生能源供電減少時做為備援，提供電力系統備用電力和調節系統平衡服務；圖23所示為德國某一週發電結構圖，因再生能源優先併網政策，隨星期六、日負載需求變少，系統發電量亦隨之減少，傳統火力電廠發電成本較高之硬煤及天然氣機組不得不停機或降載供電，以維持系統供需平衡。

圖24所示為一西歐複循環機組電廠，因由基載機組運轉轉為尖載機組運轉，發電機組運轉容量因數由2008年85%降低至2012年10%，

且每次啟動後運轉時數由100小時降低至每次僅運轉15小時，目前這些機組大部分時間不運轉，只能待命於尖峰負載時段，有需要時才快速啟動。

此外，火力電廠運轉方式的轉變除增加火力電廠的運轉壓力，亦因過去以基載運轉條件而設計的老舊燃煤機組，被迫轉為負載追隨，週期性於尖峰運轉，定子與轉子的頻繁熱膨脹及收縮將加速機組的磨損，減少火力機組的生命週期，連帶增加火力機組維修、更新之額外成本。

4.6 電網大規模投資

為容納更多分散式再生能源併網，必須擴

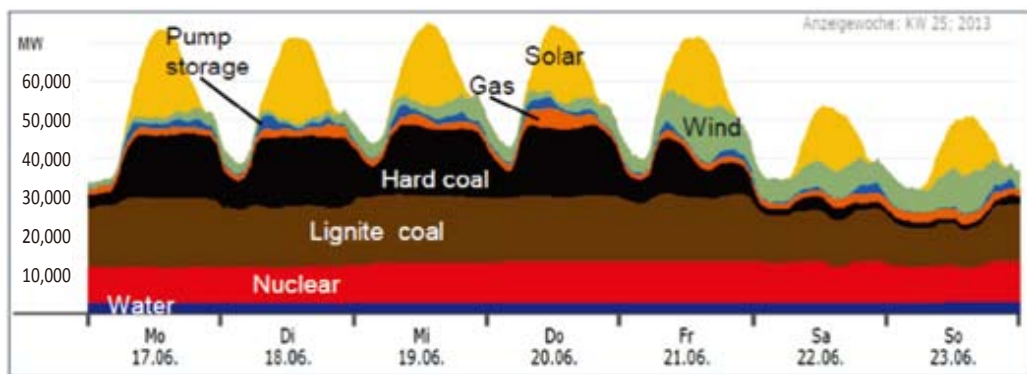


圖23 2013年德國一週發電結構
資料來源：Weidner, 2013

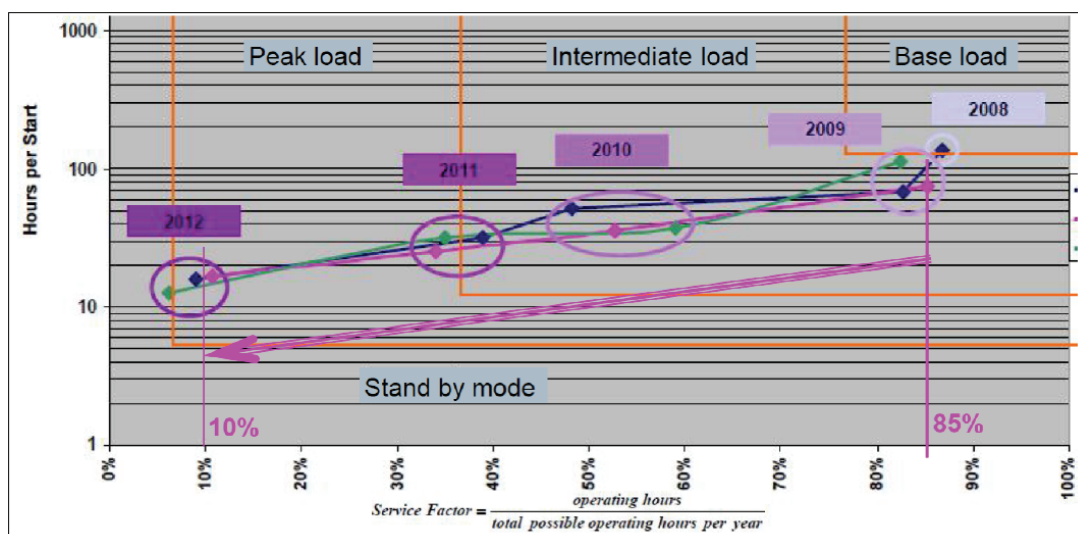


圖24 複循環機組電廠於2008年至2012年之運轉變化
資料來源：Weidner, 2013

建與維護更新輸配線路，因此電網投資成本將隨大量再生能源併網而增加，德國預估於未來十年投資520億美元，建設岸上及離岸風機的輸電系統；如表5所示之住宅零售電價，德國2014年住宅電價高達29.11歐分/度，其中電網費用7歐分/度，電網之擴建與維護更新費用將轉嫁於用戶上，增加用戶的負擔。

表5 2014年德國住宅零售電價結構

項目	成本 (歐分/度)
發電成本(Cost of power)	12.20
相關稅費(Charges)	16.91
電網使用費(Grid fee)	7.00
特許經營費(Concession fee)	1.80
再生能源補助附加捐(EEG levy)	5.30
離岸風力保證收購捐(Offshore liability levy)	0.25
汽電共生附加捐(KWK levy)	0.13
電網升級使用條例捐(\$19 power levy)	0.33
電力稅(Electricity tax)	2.10
零售電價(Total retail power price)	29.11

資料來源：Poser *et al.*, 2014

4.7 過於大方無法永續的補貼制度

德國因EEG法令與再生能源躉購費率(FIT制度)過於大方及政府過度介入市場等，雖然成就了再生能源相關產業，但也造成電力市場價格的扭曲及政府財政困難，德國政府因而頻繁修改FIT制度內容，導致法規不確定性增加及投資再生能源業者財務風險，間接影響相關再生能源業者的投資意願；原FIT躉購制度對再生能源業者相當優惠且無總量限制，對德國政府期望再生能源能持續發展造成阻礙，遂引導FIT躉購價格逐年下降，期望日後再生能源發電能與傳統電業競爭。由德國政府委任的獨立專家委員會於2014年2月份出爐的報告指出(Mihm, 2014)，德國過於大方的再生能源補貼制度對於減少碳排不具經濟效益，建議應停止此制度，同年4月，歐盟委員會提出新的指導原則以改善

市場扭曲的狀況，並將於2017年生效。而相關制度的反覆修訂，亦將增加再生能源業者於財務及規劃上的疑慮。

4.8 創造高就業率

德國利用推展再生能源的過程，針對大量再生能源併網運轉遭遇的問題及障礙，利用研發創新解決問題的同時，亦帶動新興產業的發展及製造業的成長，使德國成為太陽光電及風機產業之領先者，如SMA公司為2015年全球太陽光電變流器最大的製造商(IHS, 2016)、Siemens公司為2015年歐洲離岸風機製造商市佔率第一，如圖25所示。隨再生能源的新興產業發展，為國家帶來更多的就業機會，如圖26所示。

5. 再生能源併網運轉法規面及技術面之要求

德國推動大量再生能源併網運轉，對電網衝擊甚大，依報導2011年之統計，3分鐘以上停電通報次數即超過20萬次(Schiermeier, 2013)，此與早期變流器使用之標準VDE-0126-1-1，未要求要具備電壓/虛功調節能力及當系統高頻時要減少出力有關，當太陽光電以實功注入電網，因系統線路阻抗導致電壓上升，隨太陽光電裝置量大幅增加，易因系統電壓過高造成變流器集體跳脫及用戶停電；另如太陽光電發電量增加，可能使系統頻率升高，易因頻率過高而集體跳脫，2012年1月1日起德國採用再生能源變流器規範VDE-AR-N 4105，取代既有規範VDE-0126-1-1，要求併網之再生能源變流器，需具備電壓/虛功及頻率調節能力。

當不穩定之再生能源併聯電網，為了確保電網運轉能穩定、可靠，臺灣在再生能源設備之功能/性能及電網法規上應有所規範；隨著近年來再生能源發電佔比不斷增加及再生能源技術的成熟，併聯條件及運轉性能要求也需持續修正，這些要求必須確保再生能源發電不會

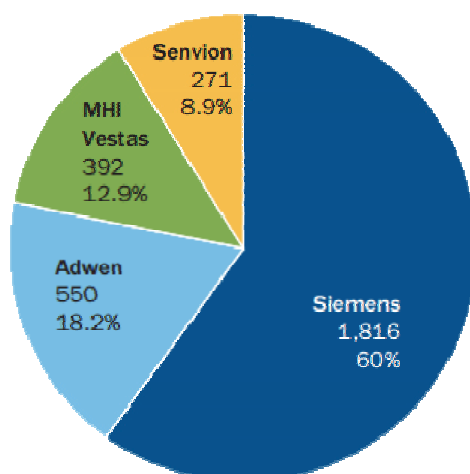


圖25 2015年歐洲離岸風機市佔圖
資料來源：Ho *et al.*, 2015

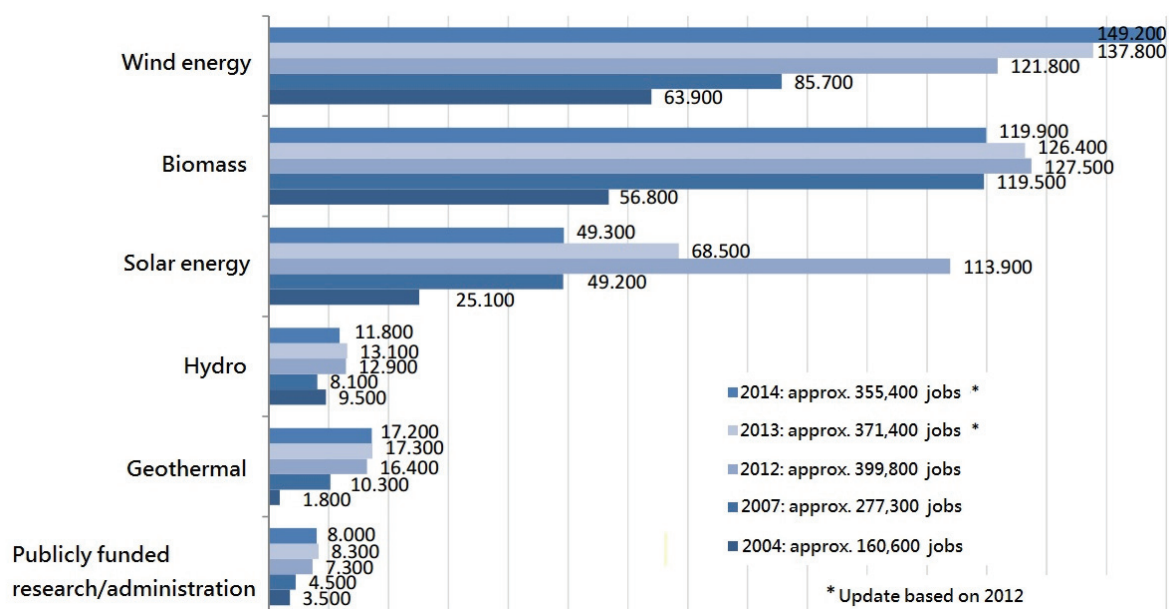


圖26 2004年至2014年德國再生能源業之就業人數
資料來源：BMWi, 2015

影響到電力系統的運轉，使整個電力系統穩定運轉及維持良好的電力品質，並期望於系統發生事故時，能提供類似傳統發電機組般支撐電網運轉安全的能力。本節將簡介國外重點機構之再生能源併網運轉規範(Singhvi *et al.*, 2014) (Ellis *et al.*, 2013)，以供臺灣未來修訂再生能源併網運轉規範參考。

5.1 併網規範

各國電網併網規範常依據再生能源發電佔

比和電網強度的不一樣而有所不同，目前國際上常見的再生能源併網及設備性能要求，主要可以分成 1. 電壓/虛功控制能力；2. 頻率控制能力；3. 系統擾動時之電壓及頻率承載能力及 4. 升降載率限制。

5.1.1 電壓控制能力

電網中各項電器設備需要運作在特定電壓範圍內，設備才能正常、持續運轉，傳統水、火力機組具虛功調節能力，可協助穩定系統穩

態及暫態之電壓，為使再生能源設備併網不危害電力系統安全，目前再生能源設備之虛功調節及電壓控制能力已成為併網之基本要求項目之一。

- (1) 歐洲：圖27為歐洲不同電網對風機之規範，除了風力發電外，德國能源與水利協會(Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, BDEW)更針對太陽光電要求，若併接於電壓等級10 kV到110 kV，需具有功率因數 ± 0.95 的調節能力。
- (2) 德州電力調度中心(Electric Reliability Council of Texas, ERCOT)：容量大於20 MVA之風場在併網點需具有功率因數 ± 0.95 連續可調範圍之能力，但風機實功輸出小於額定功率10%者，得不提供系統虛功；另外風場之功率因數設定需依據ERCOT提供之電壓排程(Voltage Schedule)，且規定風機必須運轉於電壓調節模式，而非定功因模式。
- (3) 美國能源部邦尼維爾電力管理局(Bonneville Power Administration, BPA)：規範非同步機組需有功率因數 ± 0.95 連續可調範圍之能力，或依BPA的分析規劃提供系統需要的虛

功量，此可藉由裝設虛功補償裝置如SVC (Static Var Compensator)或STATCOM (Static Synchronous Compensator)來達成。

- (4) 德國變流器之低電壓併網規範(VDE-AR-N 4105)：發電設備(變流器)出力在額定輸出功率20%以上時，需具備電壓調節能力，其功率因數規範如下：

- (a) 發電系統小於3.68 kVA：不須受電網操作者控制，功率因數規範為0.95 lagging~0.95 leading；
- (b) 發電系統介於3.68 kVA到13.68 kVA：電網操作者會提供變流器的運轉操作曲線設定，功率因數規範為0.95 lagging~0.95 leading，如圖28(A)；
- (c) 發電系統大於13.68 kVA：電網操作者會提供變流器的運轉操作曲線設定，功率因數規範為0.9 lagging~0.9 leading，如圖28(B)。

5.1.2 頻率控制能力

電力系統運轉頻率必須維持在正常範圍內，任何發電量及負載量不平衡的偏差，都會

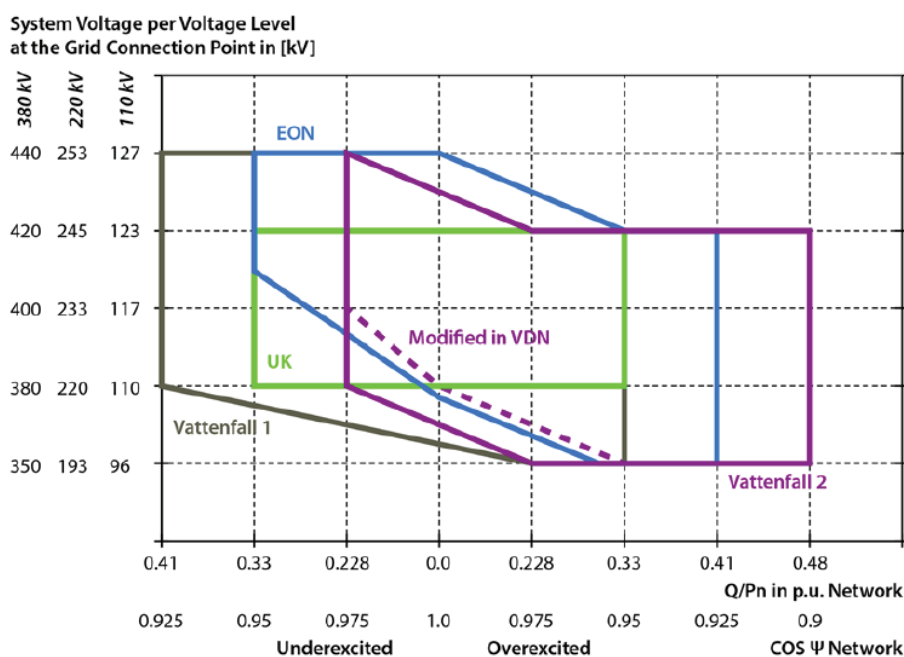


圖27 歐洲風機電壓控制規範
資料來源：Singhvi *et al.*, 2014

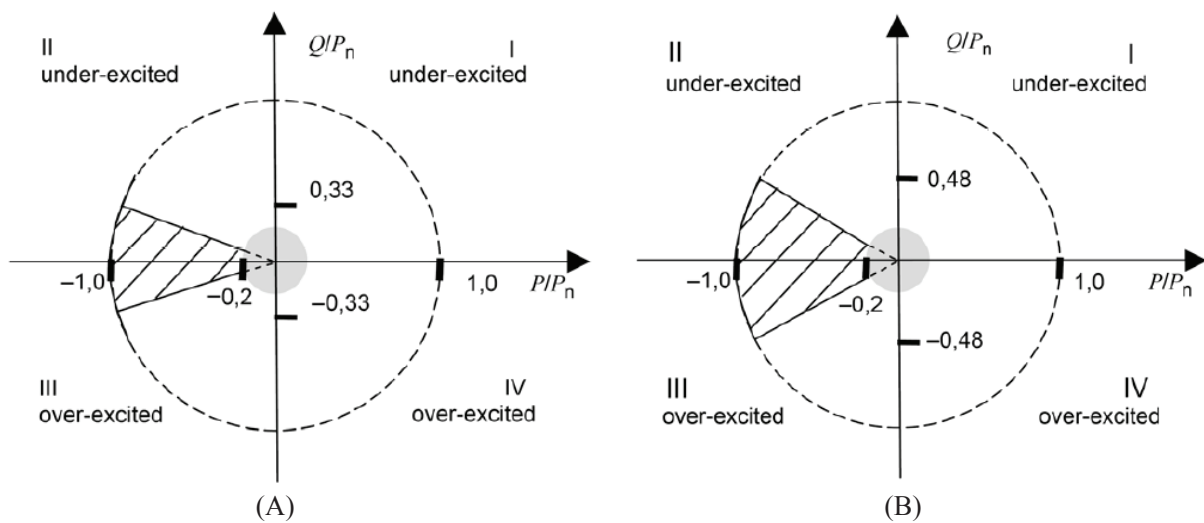


圖28 變流器功因操作範圍 (A) 發電系統介於3.68 kVA到13.68 kVA；(B) 發電系統大於13.68 kVA
資料來源：Dong, 2012

使頻率偏離正常值，若偏差過大，頻率超過正常的範圍，則會降低電力系統的品質、可靠度及可能使設備不正常運轉；不正常的頻率將增加發電機線圈的運轉溫度，影響絕緣、縮短設備的使用年限、可能損壞電力電子設備，以及使電子資訊設備功能不正常。傳統機組可藉由慣量和初級頻率控制抑制系統頻率變動，而針對大量不穩定之再生能源併網，早期歐洲電網規範要求，當頻率下降時，風機需從電網解聯，但隨風力發電容量增加，在低頻率解聯時，會影響系統重新恢復穩定運轉的能力，目前規範已有修正：

- (1) 北美電力可靠度公司(North American Electric Reliability Corporation, NERC)：針對裝置容量10 MW以上之風場，當系統頻率變動0.5 Hz時，風機需能在10秒內調整實功出力(0~5%之Droop調節)。
- (2) 德州電力調度中心(Electric Reliability Council of Texas, ERCOT)：風機於頻率過高時，需具有5%之Droop調節能力。
- (3) 德國變流器之低電壓併網規範(VDE-AR-N 4105)：針對風場及太陽光電場，規範變流器正常併網頻率為47.5 Hz至50.2 Hz，當系統頻率高於50.2 Hz時，變流器需能調降輸出功率，如圖29所示。

5.1.3 系統擾動之承載能力

傳統發電及輸電設備在系統發生事故時需要具備一定的承載能力，為了確保系統有足夠的可靠度，除保護設備需要清除事故跳脫外，其餘設備在不影響機組安全下，皆需在事故時持續運轉一小段時間，支撐系統渡過此事故異常時段，除避免事故擴大外，亦可協助將系統電壓、頻率回復到正常範圍；近來大量再生能源取代了原有的傳統發電機組，須訂定相關再生能源併網運轉之規範，再生能源設備需具有特定功能/性能才可併網運轉，以避免事故後因再生能源大量跳脫，導致事故擴大。

5.1.3.1 電壓承載能力(Voltage Ride-Through, VRT)

分散式再生能源併網要求較常被引述的規範為IEEE1547，此法規最初設立之背景為早期美國各州、各電力公司對分散型電源併網，因其非電力公司可控制而持保守態度，以致各電力公司要求併網條件不同而產生爭議，對分散型電源成長有阻礙，因而由IEEE制訂一最低併網條件要求，各電力公司可再斟酌其電網強弱，要求補強併網條件；早期分散式能源佔比較小，若系統電壓低於0.5 pu，需在10週波內將

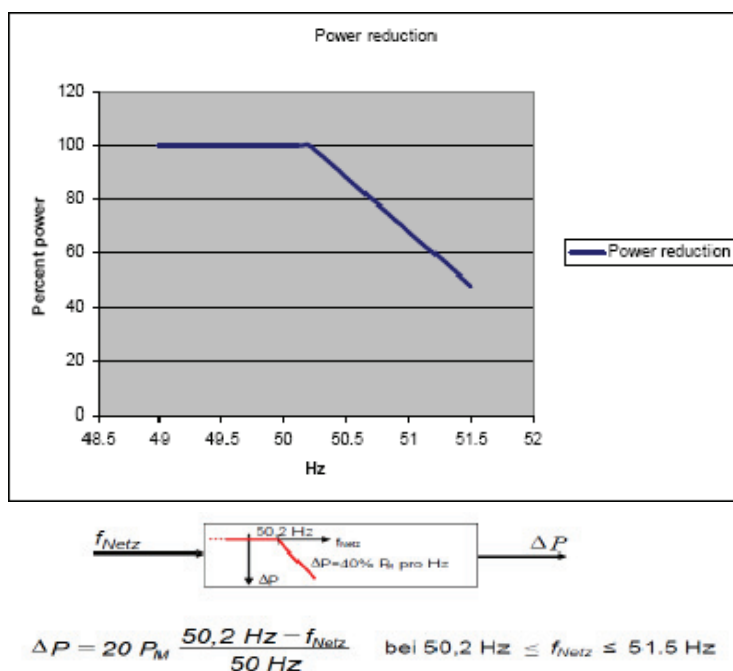
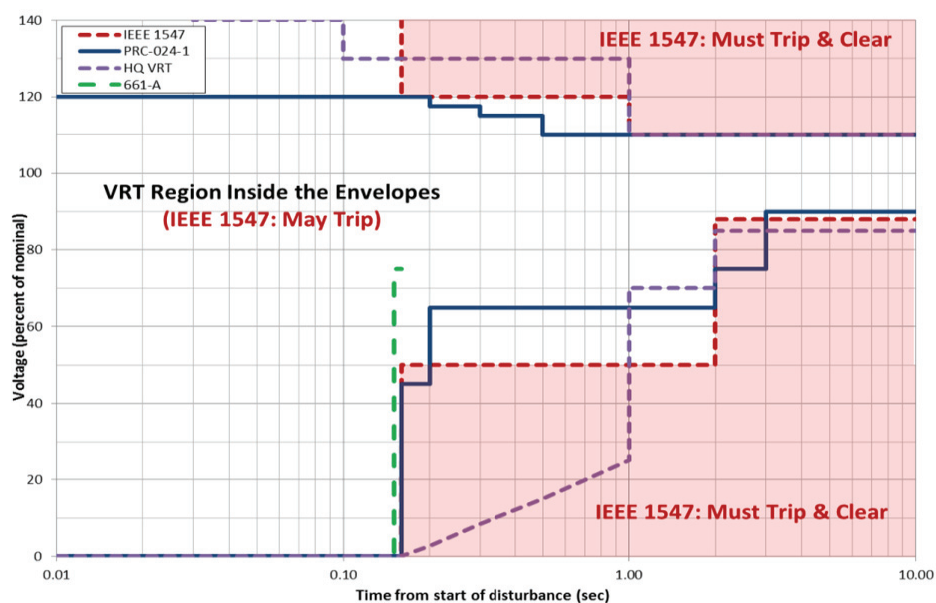


圖29 德國VDE-AR-N 4105規範之變流器輸出功率與頻率關係圖
資料來源：Dong, 2012

發電設備切離系統，然而近來再生能源裝置容量已大幅成長，若依照原有規定將導致大量的分散式能源於系統事故時切離系統，可能使事故進一步擴大，故各國已積極修訂相關規定以因應再生能源大量併網產生的前述問題，2014年再頒布補強的IEEE1547-a，取消以往分散式

能源強制切離系統之規定，而成為要求其運轉性能，如遇事故時，視系統電壓、頻率及事故持續時間，需繼續運轉以支撐電力系統運轉，圖30為IEEE1547與其他機關之VRT要求比較，併網設備的啟斷將導致高壓現象，故除了低壓外，因應事故後之系統高壓亦需要納入考量。



PRC-024-1：北美電力可靠度公司電設定標準

HQ：加拿大魁北克電力公司VRT能力要求

661-A：美國聯邦能源管制委員會命令

圖30 IEEE Standard 1547與其他機構VRT要求比較
資料來源：Ellis *et al.*, 2013

5.1.3.2 頻率承載能力(Frequency Ride-Through, FRT)

系統頻率變化主因為發電量或負載量的變動，使發電與負載無法保持即時的平衡，若再生能源機組缺少頻率承載能力，當系統因大型發電機組跳脫而造成之頻率變動，可能連帶使再生能源切離系統，增加系統頻率回復穩定之難度，甚至可能加劇事故影響，導致系統崩潰。

(1) 北美電力可靠度公司(North American Electric

Reliability Corporation, NERC)：PRC-024-1 針對發電機組頻率保護設定，要求“於不能跳脫區間”不得跳脫，除例外條件：①為故障清除；②為防止設備受損；③為保持系統穩定；圖31所示為不同電網要求的頻率承載能力區間曲線。

(2) 歐洲：歐洲各國針對系統遭遇事故，頻率變動時，發電機組之FRT規範如圖32所示。

5.1.4 升/降載率限制

電力系統運轉所需之升/降載量的速度及

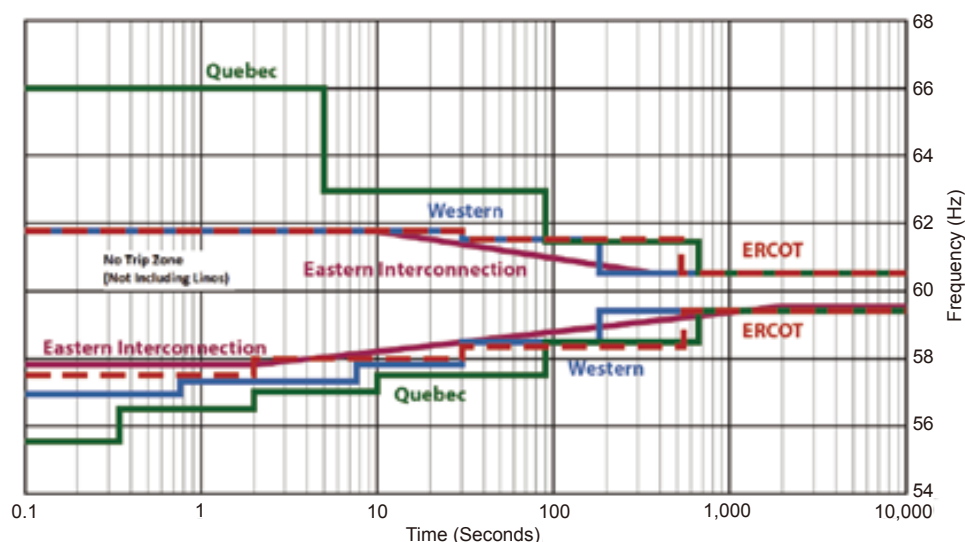


圖31 北美地區機組之FRT曲線
資料來源：Singhvi *et al.*, 2014

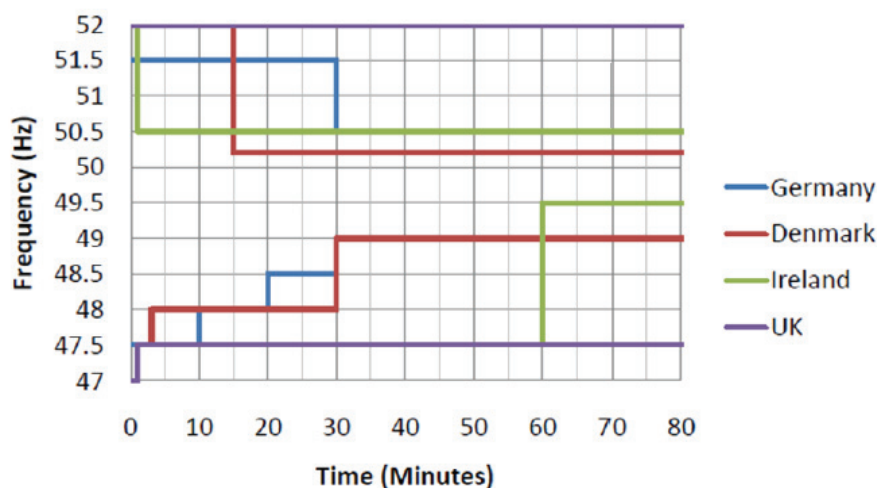


圖32 歐洲各國機組之FRT曲線
資料來源：Ellis *et al.*, 2013

大小，視再生能源的發電量變化模式，需有規劃，間歇性再生能源與傳統機組其中一個最大的差異在於不穩定的出力，系統運轉需能處理再生能源變動及再生能源啟、停期間所引起較大的頻率變動；一般只訂定再生能源出力升載率限制，此可於出力增加，高於限制值時，利用削減出力方式達到目的；至若再生能源出力下降速率則較少要求，若有規定，通常需搭配儲能裝置，此規範對較易受再生能源出力變動影響之小型獨立系統尤其重要，表6所示為不同國家之升降載率要求。

表6 不同國家電網法規要求的升降載率

	Positive ramp rates	Negative ramp rates (for wind farm shut down)
德國	每分鐘額定輸出的10%	不明確
蘇格蘭	每分鐘1-10 MW (根據風場容量)	每分鐘額定輸出的3.3%
愛爾蘭 (ESB)	每分鐘1-30 MW (TSO, Transmission System Operator指定)	不明確

資料來源：Van Hulle, 2005

- (1) 夏威夷電力公司(HECO)：依據機組裝置容量大小而有不同升/降載率之要求，如表7。
- (2) 德國：輸電層級再生能源，規範額定功率每分鐘 $\pm 10\%$ 變動，但是當頻率大於50.2 Hz時，每赫茲需減少當時出力之40%。
- (3) 德州電力調度中心(Electric Reliability Council of Texas, ERCOT)：風場5分鐘內實

表7 HECO 升/降載率規範

發電機容量	升載率
5 MW – 25 MW	2 MW/min
25 MW – 50 MW	2 MW/min – 3 MW/min
50 MW – 100 MW	3 MW/min – 5 MW/min
100 MW – 200 MW	5 MW/min – 10 MW/min

資料來源：Singhvi *et al.*, 2014

功平均變動需在裝置容量20%內，每分鐘變動不可超過裝置容量之25%，因ERCOT的風場需在5分鐘內接受運轉人員視當時可靠度限制，採經濟調度，此項規範較以往增加10%的變動裕度(Zamani *et al.*, 2014) (WECC, 2007)。

從上述不同國家、不同機構因各別電網特性不同，各有不同的再生能源併網要求，臺灣對再生能源之電壓、頻率控制之功能及性能以及電壓、頻率承載能力相關規範，或可從以往的運轉經驗、事故後系統電壓、頻率產生的變動來檢視，並以此做為未來規範修正之依據。

5.2 臺灣再生能源併網規範

目前臺灣再生能源併網規範主要依據為台電再生能源發電系統併聯技術要點，針對併接特高壓系統以上之風機，要求具備低電壓承受能力；當電力系統發生故障造成責任分界點電壓驟降時，風力發電設備必須能夠持續運轉，當責任分界點電壓降低至額定電壓的15%時，應持續運轉至少0.5秒以上，如圖33所示。

隨大量再生能源併網，日後臺灣或可藉由以下幾點併網準則要求，以維持電網供電可靠度(Loutan, 2013)：

- (1) 虛功及電壓控制能力：非同步機組需提供電網虛功，增訂相關規範可協助電網電壓控制、降低輸電線路和發電損失，確保系統穩定及可靠度；
- (2) 實功控制能力：大量再生能源併網後，可能出現發電過剩現象，實功控制將成為一大難題。為確保系統運轉之穩定，要求再生能源應能依調度指令自動反應並調控實功出力；
- (3) 慣量及頻率響應：大量再生能源取代傳統同步發電機，將導致系統慣量大減，未來任何一種發電能源宜能提供系統慣量，並能根據系統頻率變動自動調節出力，以維持系統運轉安全；
- (4) 系統穩態及暫態穩定度模型建立：為能透過電力系統分析了解大量再生能源併網之衝

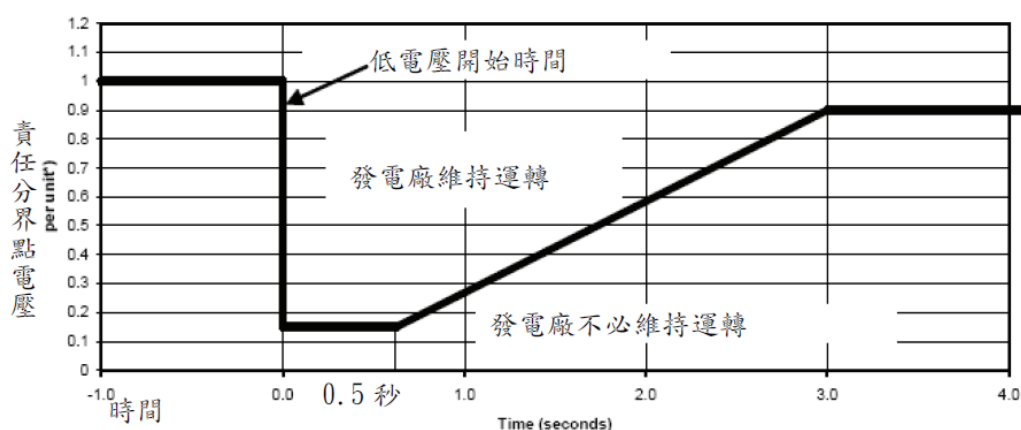


圖33 臺灣針對風機併網之LVRT要求
資料來源：台灣電力公司，2016

擊，針對電力系統之負載潮流、暫態穩定度及短路電流分析，建立能驗證之通用模型以觀察系統特性；

- (5) 負載量及發電量預測：利用負載量預測及要求再生能源業主(某特定裝置量以上)提供發電量預測，並規劃短期至長期的機組排程，以確保系統可靠度；
- (6) 系統擾動之承載能力：要求當系統發生事故時，除保護設備需要清除事故跳脫外，其餘設備在不影響機組安全下，視系統電壓及頻率大小，在事故時需具備持續運轉一小段時間之能力，支撐系統以確保系統可靠度，此能力除了避免事故進一步擴大外，亦可協助將系統電壓及頻率回復到正常範圍。

6. 結論與建議

電力是產業發展的動力，與人類生活密不可分，電力的穩定供給更是維繫經濟成長及生活舒適不可或缺的要素。電力產業的特性包括：(1) 電力產品儲存成本極高且不能任意移動；(2) 需求不能等待且產品替代彈性低；(3) 需求預測困難且複雜；(4) 產品消耗損失隨傳送距離增加而增加；(5) 電力產品不能以減量或降低品質方式供應，除此之外，必須使用輸電網路輸送電能，且供需須達到即時平衡，亦即電力系統中的發電與負載用電隨時維持在動態平

衡下：用多少電，就發多少電；多發電或少發電都會使電力系統無法維持平衡，此將導致不良的電力品質以及供電可靠度問題；相關政策制定參與者若不了解此種產品的專業獨特性，所發布之政策及配套若不到位，恐導致日後停/限電頻繁、供電品質變差以及用電戶電費上升。

未來電網，隨著再生能源佔比的提高，預期將會取代部分傳統電力，而不同再生能源各有其特性，如間歇性、不穩定出力、不易預測性、場址限制、設備成本以及非電業擁有及控制，將造成電力系統運轉、調度、供電可靠度與電力品質及安全的問題，因應對策可藉由：(1) 電力市場工具及規則；(2) 新技術整合；(3) 制定相關標準及要求，維持系統供電可靠度，若不事先規範防範，可能重踏2011年，德國因再生能源併網造成持續3分鐘以上的停電事故通報超過20萬次的事件。

從德國推行再生能源的經驗，藉由政策補貼誘因促成大量再生能源的布建，鼓勵相關產業投資，並針對佔整體系統負載量約40%的部分能源密集產業，為維持其產業競爭力免徵收EEG稅，犧牲傳統電力產業，在長期補貼下，亦造成國家財政損傷及可能被其他國家視為不公平競爭而引起貿易糾紛；臺灣因再生能源相關技術根柢不夠紮實，推廣再生能源裝置的同時，是否有考慮帶動能引領風潮、能永續的新

興產業及提升就業機會？相關補貼政策是否注意到政策目標效益，避免拿納稅人的錢補貼國外廠商？

目前政府政策準備擴大再生能源裝置量，2020年再生能源裝置目標量太陽光電為8,776 MW、風力發電為1,720 MW，此大量之再生能源併網，至少需有下述的思考，才能促成一成功的再生能源政策且同時兼顧供電可靠度：

- (a) 宜思考目前及未來的電網能負荷多少間歇性的再生能源併網以及所需配套是否到位，否則如中國近年，因輸配線路的更新跟不上再生能源建置速度、電網缺乏足夠彈性之調節能力、相關政策配套尚未考慮周全，於供電可靠度考慮下，不得不限制再生能源出力，帶來大規模之棄光、棄風現象，造成相關投資效益不彰，因目前政府財政狀況不佳，尤需注意政策挹注下之投資成本效益。
- (b) 台電配電系統饋線設計，係依變電所為供電唯一電源，饋線負載電流為單一潮流方向，隨太陽光電大量裝設，配電饋線電流可能有逆向潮流，此對電力公司供電設備及人員安全、電力品質及供電可靠度皆有明顯衝擊。此於2010年台電第六配電計畫即被指出相關配電工程規劃設計須有因應改善對策，既有台電經營績效考核機制是否能做調整，使台電各區處能積極主動改善能容納更多再生能源併網的做法；譬如布建低壓先進讀表基礎建置(AMI)監控PV發電量，另如配電線路變壓器改用三相變壓器，可避免台電配電系統常用之open-Y、open- Δ 連接之變壓器因需減額運轉，而限制配電線路上PV裝置量，以及要求PV變流器需具備虛功/電壓調節能力…等，皆能提升臺灣中南部PV裝置量。
- (c) 間歇性發電之再生能源併網，將使較具運轉彈性之燃氣機組有更頻繁的升/降載及起、停機次數，此潛在的問題將使傳統發電機組更易磨損、維修頻率上升。且若以德國為師，採再生能源優先併網發電政策，傳統可控火力機組將因容量因素降低，售電收入減

少，造成傳統火力機組為主的電業面臨財務、經濟面的問題，機組投資恐因無法回收而退出電力市場，更增加停/限電次數及時間，因而系統供電可靠度及再生能源裝置量的衝突，需全盤思考規劃。

- (d) 臺灣屬不算大的獨立電力系統，若大量再生能源加入後，電網需提升系統之升/降載能力以應付再生能源出力變動。此意味著台電傳統調度運轉模式，將需大幅度的修正，如30年前，基載機組(核能、燃煤)出力大於離峰用電，便規劃將明湖、明潭抽蓄電廠發電機組轉為馬達用電，利用離峰較廉價電力，從下池抽水至上池儲存，使不能調降出力之核能基載機組能順利運轉，當白天用電尖峰時，抽蓄電廠可利用上池儲水位能轉為電能以應付尖峰負載；隨未來大量太陽光電併網，中午時段大量太陽光電發電，使淨負載量大幅降低，將導致尖峰負載時段後移2、3小時。此外，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；亦即，日後電力公司機組調度，可能從以往“發電追隨負載變動”轉成“彈性負載追隨再生能源發電”。因此，未來所需傳統火力機組之性能要求將變得很重要，機組除效率高外，其熱機起機時間需短、升載率需高、最低負載率要少…等，才能因應大量再生能源併網後產生之問題。

針對分散型電力併網對系統安全運轉之威脅，視分散型電力之種類、容量、併網點之不同及所併接之電力公司電網強度不同而異，唯各不同國家對再生能源併網考慮，基本上是一致的，其指導原則為：(1) 既存電力系統供電可靠度之維持；(2) 既存電力系統電力品質之維持；(3) 安全之確保，包含人員及設備安全；反觀目前國內再生能源併聯技術要點，缺少大量再生能源併網對電網可靠運轉穩定所需之相

關規範，如對再生能源設備需具備虛功/電壓調節能力、頻率控制能力、升/降載限制及電網發生事故時之電壓及頻率承載能力。政府急需考慮臺灣電力系統特性，增訂相關政策及配套法規，此外，正在討論的電業法草案第七條：「電力調度，應本於安全、公平、公開、經濟及能源政策原則為之」，會造成日後爭議；如以經濟調度，較昂貴的再生能源恐被邊緣化；若以政府推廣再生能源政策為主要考量，經濟調度將被犧牲，臺灣未來再生能源發展政策宜參酌國外的經驗，權衡各國再生能源政策的利弊，若同德國以再生能源併網為優先，雖可促進大量再生能源產業蓬勃發展，但因傳統火力將轉為備用電源，恐衝擊傳統火力發電業者，減少收益；若同美國(德州、加州)以供電可靠度為優先，電力公司可於供電可靠度有疑慮時削減再生能源出力，此將損及再生能源發電業者的獲利，相關法規宜先明確釐清，減少日後再生能源業者投資障礙及產業界對政府公信力打折扣。

政府能源政策規劃未來裝置大量間歇性再生能源目標量，宜全盤思考所需配套是否到位、電網要如何因應新的能源結構，同時能否藉由研發與創新，帶動新興產業及促進就業機會，使能源政策與產業政策相輔相成；隨著電力供給市場的變化和環境法規帶來的巨大轉變，臺灣的發電組合受廢核及燃煤電廠帶來限制，亦需思考燃煤機組除役順序，考慮因素除效率高低、汙染排放大小外，其發電機組所處位址對實/虛功調節能力、電力品質、供電可靠度等皆須納入考量；中央主管機關及地方政府面對電網安全、可靠、穩定的運轉需求，需共同努力，全盤規劃短、中、長期電力供需能平衡，確保電源資源充足、用電戶用電權益，使臺灣再生能源發展可長可久，永續經營。

參考文獻

王趙賓，“中國風電棄風限電分析報告”，能

源，2014年7月21日。

台灣電力公司，2016，台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點，2016年2月22日。

洪德生、陳斌魁、楊豐碩等，“臺灣地區應用分散型電力可行性研究”，臺灣經濟研究院，2003年。

陳斌魁、陳清山、黃欣媛、陳唯泰、張嘉諳、簡慧菁，“離島風力併聯技術問題資料彙整”，工研院，2006年11月30日。

張玥，2011年-2015年中國棄風數據統計，風能雜誌，第72期，pp.34-35，2016年2月。

盧展南、許振廷、蘇俊連、陳朝順、鄧人豪，“整合分散型電源建構優質配電網之研究”，台灣電力公司，2008年12月。

Arbeits Gemeinschaft Energie Bilanzen, Jan. 2016.
Barker, P., T. Short, T. Key, and F. Goodman, “Engineering Guide for Integration of Distributed Generation and Storage into Power Distribution Systems,” Electric Power Research Institute, Dec. 2000.

Bath, Thomas, “The German Energiewende: Shining or Warning Example for Europe?,” E.ON, 5th Conference ELECPOR, Nov. 2013.

BMWi, 2015, “Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien in Deutschland und verringerte fossile Brennstoffimporte durch erneuerbare Energien und Energieeffizienz,” pp.12, Sep. 2015.

De Martini, Paul, K. Mani Chandy, and Neil Fromer, “Grid 2020 Towards a Policy of Renewable and Distributed Energy Resources,” California Institute of Technology, Sept. 2012.

Dong, Bowen, “VDE 4105 Introduction,” Intertek, Mar. 2012.

EC, European Commission, Eurostat, 2016.

Ellis, Abraham, Brendan Kirby, Thomas McDermott, *et al.*, “Performance of Distributed

- Energy Resources During and After System Disturbance Voltage and Frequency Ride-Through Requirements,” North American Electric Reliability Corporation, Dec. 2013.
- Energy Trend, 2016. <http://pv.energytrend.com.tw/news/20160622-14063.html>.
- Eriksen, P. B., T. Ackermann, and H. Abildgaard, “System operation with high wind penetration,” Institute of Electrical and Electronics Engineers, Power and Energy Magazine, Vol. 3, Nov.-Dec. 2005.
- Franklin, A. C. and D. P. Franklin, “The J & P Transformer Book,” 11th Edition, Oct. 1983.
- Ho, Andrew, Ariola Mbistrova, and Giorgio Corbetta, “The European offshore wind industry - key trends and statistics 2015,” European Wind Energy Association, Feb. 2015.
- IHS (Information Handling Services), 2016, “SMA Retains Top Ranking in Global PV Inverter Market, but Competitors are Gaining, IHS Says”, May 2016.
- International Energy Agency, 2015, “Renewable Energy Medium-Term Market Report 2015”, pp.7.
- International Energy Agency, IEA, 2016, “Key Renewables Trends”, pp.4.
- Loutan, Clyde, “2013 Special Reliability Assessment: Maintaining Bulk Power System Reliability While Integrating Variable Energy Resources – CAISO Approach”, The North American Electric Reliability Corporation, Nov. 2013.
- Mihm, Andreas, “Regierungsberater wollen EEG abschaffen,” Frankfurter Allgemeine, Feb. 2014.
- Mueller, Simon, “Next Generation Wind and Solar Power From cost to value,” International Energy Agency, pp.7-8, 2016.
- Poser, Hans, Jeffrey Altman, Felix ab Egg, Andreas Granata and Ross Board, “Development And Integration Of Renewable Energy: Lessons Learned From Germany,” Financial, Jul. 2014.
- Schiermeier, Quirin, “Renewable power: Germany’s energy gamble,” Nature, Apr. 10 2013.
- SEIA, Solar Energy Industries Association, “U.S. Solar Market Insight”, Jun. 2016.
- Singhvi, V., A. Tuohy, D. Brooks, and B. York, “Interconnection Requirements for Variable Generation”, Electric Power Research Institute, Dec. 2014.
- UCTE, Union for the Coordination of Transmission of Electricity, 2007, “Final Report - System Disturbance on 4 November 2006”.
- Van Hulle, Frans, “Large Scale Integration Of Wind Energy In The European Power Supply: analysis, issues and recommendations”, the European Wind Energy Association, Dec. 2005.
- WECC, Western Electricity Coordinating Council, “The Technical Basis for the New WECC VRT Standard”, Jun. 13 2007.
- Weidner, Jürgen, Siemens AG, 2013, The Economist, Oct. 2013, “How to lose half a trillion euros”.
- Wiser, Ryan and Mark Bolinger, “2015 Wind Technologies Market Report”, U.S. Department of Energy, Aug. 2016.
- Zamani, M. A., N. Wrathall, and R. Beresh, “A Review of the Latest Voltage and Frequency Ride-Through Requirements in Canadian Jurisdictions,” IEEE, Electrical Power and Energy Conference, pp.116-121, 2014.

Issues in the Development of Renewable Energy

Zhen-Jun Ye^{1*} Zong-Ying Yang¹ Bo-Cheng Shen¹ Chuan-Hsin Kuo¹ Po-Yuan Huang¹
Yan-Jun Lin² Chia-An Chang^{3,4} Kai-Xiang Zhang¹ Bin-Kwie Chen⁵

ABSTRACT

Growing environmental awareness has led to increased attention toward energy sources in recent years, and governments worldwide are developing renewable energy. Renewable energy are characterized by their intermittent and unpredictable nature; with increasing penetration of renewable energy, these characteristics increasingly undermine the reliability and quality of the electricity supply from these sources. If adequate countermeasures are not developed, the number of unexpected outages and brownouts will increase in the future, which is a threat to the economy of any country. Taiwan's primary renewable energy policy currently focuses on the development of photovoltaic and wind energy. Before deciding major energy policies, the government should consider the effect of interconnection of renewable energy power system and the power industry. For example, shares of traditional European electrical utilities have plunged 50% in five years because of the increasing penetration of renewable energy. This paper examines foreign experiences with interconnection of renewable energy and discusses the technical support needed for developing renewable energy. Such as, performance requirements of equipment for renewable energy, and when the power system is incurred disturbance, they must have voltage and frequency ride-through capacities to ensure power quality and power reliability. The experience of interconnection of renewable energy in countries with advanced renewable energy systems can be a reference for future policy decisions in Taiwan. This paper is expected to serve as reference for policy makers when planning energy policy for Taiwan. That can shorten the learning time and reduce waste caused by blind investment.

Keywords: Renewable energy, Power quality, Photovoltaic, Wind power

¹ MS student, Electrical Engineering Department, Tatung University.

² System Planning Engineer, Taiwan Power Company.

³ Doctoral candidate, Electrical Engineering Department, Tatung University.

⁴ R&D Assistant, Institute of Nuclear Energy Research.

⁵ Professor, Electrical Engineering Department, Tatung University.

*Corresponding Author, Phone: +886-2-2182-2928 #3470 #672, E-mail: aws254871@gmail.com

Received Date: September 21, 2016

Revised Date: October 11, 2016

Accepted Date: October 27, 2016