



大量再生能源併網的衝擊 與電力調度因應策略

台灣電力公司電力調度處處長 / 吳進忠

台灣電力公司電力調度處電網運用計劃專員 / 鄭宇軒

關鍵字：系統慣量、電壓 / 頻率穿越、輔助服務、調頻備轉容量、重新調度程序

摘要

為落實能源轉型，政府規劃再生能源發電佔比將於民國114年達總發電量之20%。大量再生能源併網後，將造成電網壅塞及系統衝擊等議題，其間歇性、不易預測性對電力系統供需平衡與電網運轉產生影響，是電力調度的最大挑戰，輕者會導致系統頻率不穩定、區域電網電壓變動過大；嚴重時可能導致輸電線路壅塞、區域電網電壓不穩定，若再生能源發電量瞬間變化太大，則可能造成系統頻率驟升或驟降而嚴重影響系統穩定與供電安全。本文分別從大量再生能源併網的衝擊、台電系統再生能源發電情形分析、再生能源發電與系統負載需求一致性分析、電力調度衝擊與因應策略等面向提出報告，作為未來電力調度因應策略之參考，以期降低大量再生能源對系統之衝擊。

政府能源轉型整體目標，係確保國家電力穩定、相關能源配套措施完成下，盡力管制全國溫室氣體排放，朝向火力發電發電量占比80%（燃氣50%、燃煤27%）、再生能源發電量占比20%之目標前進，以達低碳潔淨能源發展目標。

由於國人環保意識日漸提升、地方政府環保法規日漸加嚴，擔任基載機組任務的燃煤電廠時常受到環保限制，發電量逐年下降（如臺中、興達及麥寮等燃煤電廠生煤減量限制）。此外，每年11月至隔年4月期間，常因大氣擴散情況不佳，導致臺灣西南部地區空氣品質指標（AQI）偏高，臺中電廠及興達電廠燃煤機組必須配合執行自主降載減排或友善降載減排，改以燃氣複循環機組增加發電替代。另一方面，電業法第八條規定：「輸配電業應負責執行電力調度業務，於確保電力系統安全穩定下，應優先併網、調度再生能源。」隨著再生能源裝置容量不斷成長，未

一、前言



來再生能源將於某些時段取代部分燃煤機組發電量，擔任基載機組的角色。

再生能源的間歇性、不易預測性是再生能源併網與電力調度的最大挑戰，其間歇性對電力系統供需平衡與電網運轉產生影響，輕者會導致系統頻率不穩定、區域電網電壓變動過大；嚴重時可能導致輸電線路壅塞、區域電網電壓不穩定，若再生能源發電量瞬間減少太多，則可能導致系統頻率驟降，觸發低頻電驛動作卸載，影響供電可靠性。

本文分別從大量再生能源併網的衝擊、台電系統再生能源發電情形分析、再生能源發電與系統負載需求一致性分析、電力調度衝擊與因應策略等面向提出報告，以作為未來電力調度因應策略之參考。

二、大量再生能源併網的衝擊

(一) 大量太陽光電併網對電力調度的衝擊

太陽光電的發電量多寡主要受日照條件、飄雲及溫度影響，要預測其發電趨勢不難，但要準確預測太陽光電的變化量卻非常困難。在夏季期間太陽光電發電量分布基本上與台電系統負載需求可匹配，惟其每天可發電時間不長，僅約10小時，發電情形最佳的時間主要集中在11:00-15:00。相反的，冬季期間的尖峰負載約在18時，太陽光電完全無法配合冬季期間的尖峰用電需求，所以大量太陽光電併網對冬季期間電力調度的衝擊最大。以114年冬季某日的負載預測及再生能源可能發電推估的情境進行分析，114年冬季台電系統負載模擬曲線如圖1所示，在此時系

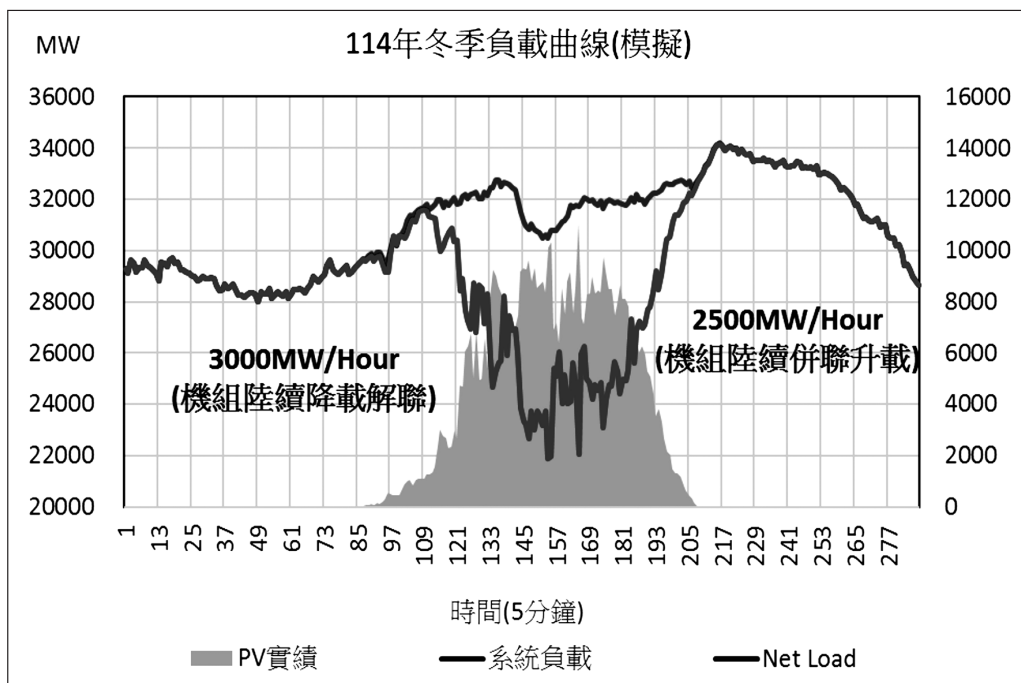


圖 1 114 年冬季台電系統負載與太陽光電模擬曲線 [1]



統的經常狀況如下：

1. 再生能源（PV）滲透率約32-35%，但完全無法支援冬天（晚上）尖峰負載需求。
2. 白天時段傳統機組（燃煤機組）出力大幅降低，部分機組（燃氣複循環機組）甚至解聯待機，導致系統慣量（inertia）不足。
3. 抽蓄機組運轉模式須調整為白天時段抽水，其他時段發電。
4. 複循環機組解併聯頻繁（早上9:00陸續降載解聯、下午3:00陸續併聯升載）。

冬季負載較低且太陽光電發電情況較佳時對系統電力調度的衝擊與影響如下：

1. 傳統機組併聯數量及發電容量均減少，造成輔助服務取得困難，影響系統安全與穩定。
2. 系統慣量不足，導致頻率響應變差，不僅頻率穩定受到影響，系統發生偶發（跳機）事故時易造成系統穩定度問題。
3. 主動式無效電力來源不足，電網發生接地故障時，造成系統電壓偏低，可能導致系統電壓不穩定。
4. 上午時段負載下降速度快（3000 MW/小時），若機組降載、解聯不及，易導致系統頻率及電壓過高。
5. 下午時段負載上升速度快（2500 MW/小時），若機組升載不及或遇跳機事故時，易導致低頻電驛動作卸載。若系統無效電力供應不足或調度不及，恐導致電壓崩潰（Voltage Collapse）。

（二）大量離岸風電併網對電力調度的衝擊

依國外風力發電及大型風場運轉經驗，

風力發電取決於風速，其在短時間內的表現完全取決於當地的風力條件，因此大量離岸風電對電力系統的穩定運轉的衝擊包括出力變動更為劇烈、併網點系統衝擊變高、輸電系統壅塞、系統頻率及區域電壓變動加劇、系統穩定度與可靠度降低等。我國離岸風電未來發展呈現區域裝置容量大且高度集中併網的情形，對台電系統及併網區域（中部地區）的衝擊包括：

1. 發電出力受氣候影響更為劇烈，發電預測愈加困難：

由於近岸風速、風向變化較為劇烈，所以區域集中式各離岸風場易同時受影響，導致發電預測愈加困難，衝擊電力系統供需平衡與電網穩定運轉。

2. 區域無效電力來源不足，電壓維持能力降低：

風力發電機本身提供無效電力的能力較低，當風力發電機出力發生巨幅變化時易引起電壓變動，系統發生短路故障時也易造成電壓驟降，不僅影響電壓穩定，甚至可能導致風機跳機，進而引發系統頻率下降及系統不穩定。

3. 區域慣量不足，頻率響應變差：

風機的慣量比傳統機組的慣量小很多。當風場出力變動較大的時候，易使頻率更快偏離目標值；當遇系統發生偶發（跳機）事故時，因系統慣量減少、頻率響應變差，可能造成系統穩定度問題。

綜上所述，原本電力需求已經取決於天氣狀況，但是系統再生能源占比隨風力和太陽能的增長而提高，使電力供應面也將大部



分依賴於天氣的狀況。因此，供需平衡將具有更大的隨機變動性，導致負載/再生能源發電預測愈加困難。依國外電力系統運轉經驗，若負載/再生能源發電預測誤差過大，對電力調度、系統供電穩定與安全將產生重大衝擊，不僅影響電力系統的經濟調度，嚴重時更可能引發分區輪流限電事件[2]。

調度最大風險在於負載陡升階段又面臨再生能源出力陡降的趨勢，因此必須針對台電系統風力發電情形與系統負載需求特性進行分析比較，並研擬相關電力調度因應對策。

三、再生能源發電與系統負載需求一致性分析

再生能源除了間歇性與不易預測外，對電力調度而言，另一個併網的挑戰是再生能源發電能否與系統負載需求匹配。本文以台電系統107年全年8760小時全系統負載需求、太陽光電及風力發電等之變動情形進行定性分析。

圖2為台電系統107年全年8760小時全系統負載需求分布情形，可發現6-10月份為台電系統負載需求高峰，尤其是在此期間每天

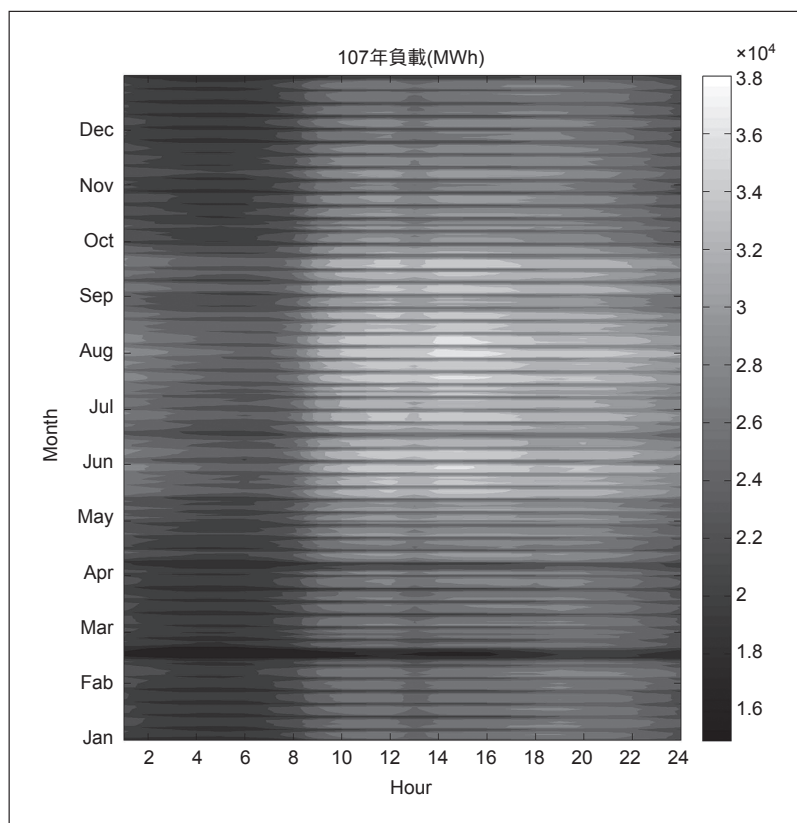


圖 2 台電系統 107 年 8760 小時負載量分布 [3]

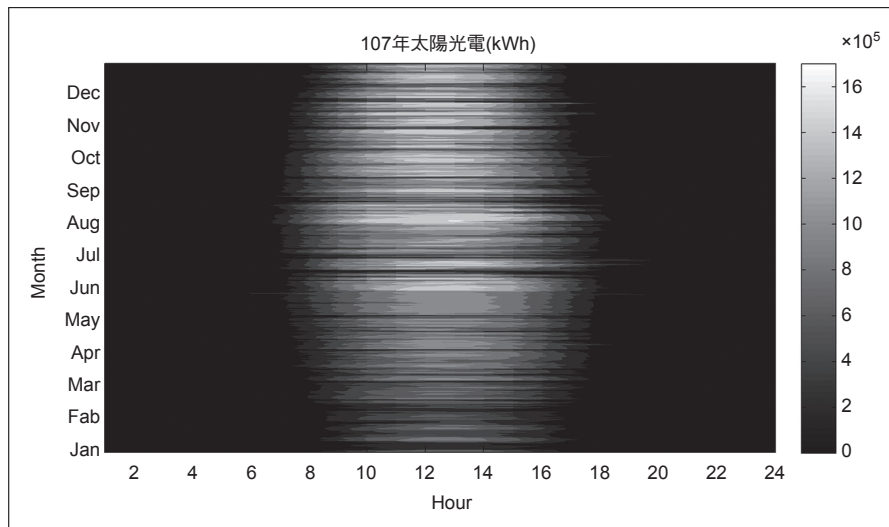


圖 3 台電系統 107 年 8760 小時太陽光電發電量分布 [4]

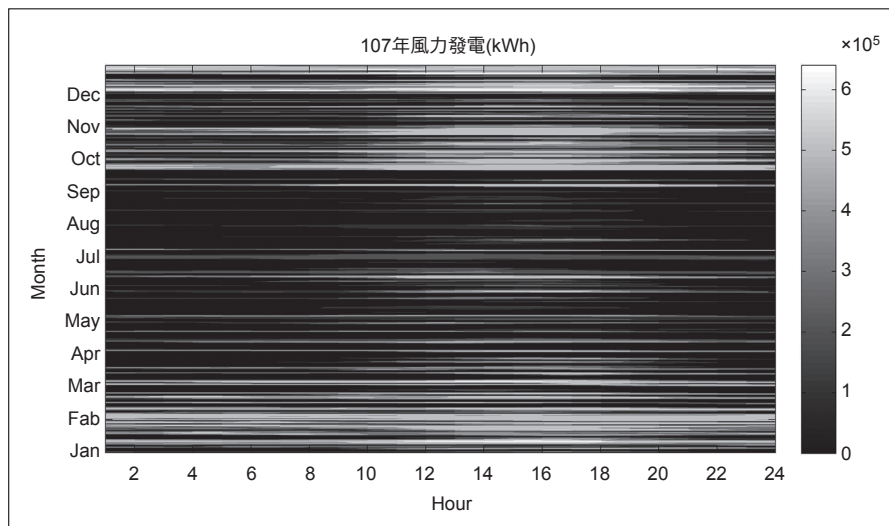


圖 4 台電系統 107 年 8760 小時風力發電發電量分布 [5]

10:00-22:00負載需求更為殷切。台電系統107年全年8760小時全系統太陽光電發電量分布情形如圖3所示，可發現太陽光電發電量分布雖然基本上與台電系統負載需求可匹配，但其每天可發電時間不長，僅約10小時（8:00-18:00），且主要集中在11:00-15:00的發電情

形最佳，又台電系統冬季期間尖峰用電是在每天晚上18:30-19:30左右，此時太陽光電已完全無法發電，故無法配合冬季期間尖峰用電需求。

圖4為台電系統107年全年8760小時全系



統風力發電發電量分布情形，可發現在夏季期間風力發電量極低，主要是在冬季期間比較有發電量輸出，所以風力發電量分布與台電系統夏季尖峰負載需求基本上不匹配。

如上所述，風力發電與系統負載需求雖不匹配，但風力發電仍有其貢獻，特別是在冬季期間再生能源發電可替代火力機組發電、舒緩火力機組因空污配合環保減載的調度壓力。所以未來大量離岸風電併入電網，要確保電網運轉的安全穩定與電力調度的順遂，必須依賴準確的風電發電預測、相關併網法規要求的落實與風場營運商的配合。

四、電力調度衝擊與因應策略

大型再生能源電廠併聯審查、電網擴建計畫僅可確保在特定情境下，可符合各項系統安全準則，但並無法保證系統可於任何時間點，皆可滿足所有再生能源（特別是離岸風電）之電力傳輸需求。因此電力調度中心仍需對再生能源（特別是離岸風電）併網之衝擊與影響預作分析、研擬各項因應大型再生能源併網之穩定電力供應策略。

（一）再生能源之衝擊與影響系統穩定性的分析

1. 氣候依賴度增加，負載/發電預測愈加困難

電力需求面已經取決於天氣狀況，但是再生能源占比隨風力和太陽能的增長而提高，使電力供應方面也將大部分依賴於天氣的狀況。因此，供需平衡將具有更大的隨機變數，導致負載預測絕對誤差將增加。因應對策如下：

- (1) 引進大數據分析技術，提高負載/再生能源發電預測準確度
- (2) 日前再生能源發電預測分析技術（未來七天），提供符合日前安全限制機組排程（Day-Ahead Security Constraint Unit Commitment, DA-SCUC）、符合安全限制經濟調度（Day-Ahead Security Constraint Economic Dispatch, DA-SCED）及輔助服務規劃（DA-Ancillary Service Scheduling）

即時再生能源發電預測分析技術（包括未來3小時及每5或15分鐘），提供符合即時安全限制經濟調度（RT-SCED）、即時輔助服務調度及即時調度調頻輔助服務、即時備轉輔助服務

2. 系統慣量（inertia）減少，系統頻率/暫態穩定度下降

再生能源（風機和太陽光電）的慣量要比傳統機組的慣量小很多，在正常出力變動的時候，易使頻率偏離目標值，系統發生偶發（跳機）事故時，因系統慣量減少導致頻率響應變差，而造成系統穩定度問題。因應對策如下：

- (1) 增加調頻備轉容量及快速反應備轉容量等輔助服務之配置
- (2) 靈活抽蓄電廠之調度運轉策略，增加系統慣量
- (3) 發展快速反應型需量反應（類似ERCOT的LaaR）
- (4) 規範風機具備低頻穿越（Low Frequency Ride-Through）能力
- (5) 設置儲能系統強化系統慣量，並提供快速反應備轉容量



3. 傳統機組的靈活性下降，輔助服務取得困難

因為環保或排放限制，又由於大量再生能源之負載因數提高（特別是離岸風機）的影響，有可能使得複循環機組解併聯機會增加（即併聯發電的時間減少），導致部分燃氣電廠競爭力下降。原先由這些機組提供的輔助服務（如備用容量、備轉容量、頻率響應和慣量）等則需要從其他機組取得。因應對策如下：

- (1) 增加調頻備轉容量及快速反應備轉容量等輔助服務之配置
- (2) 靈活抽蓄電廠之調度運轉策略，提供變速調頻控制
- (3) 發展快速反應型需量反應（類似ERCOT的LaaR）
- (4) 要求離岸風機具備頻率反應（Frequency Response）能力，協助調整頻率
- (5) 規範離岸風場升降載率（10-20%/分鐘）

4. 系統短路容量不足，電壓品質及穩定度下降

當系統發生短路故障時易造成電壓驟降，不僅影響電壓品質，甚至導致風機跳機，進而引發系統頻率下降及系統不穩定。另與傳統發電機組比較，風力發電機本身提供無效電力的能力較低，當風力發電機出力發生巨幅變化時易引起電壓變動。因應對策如下：

- (1) 要求離岸風機具備低電壓穿越（Low Voltage Ride-Through）能力
- (2) 鼓勵離岸風場具備虛功率補償設備（STATCOM）

（二）再生能源併網之電力調度因應措施

依國外電力調度中心運轉經驗，必須從要求再生能源配合提升各項性能及加強電力調度中心相關即時調度作業兩方面努力，方能大量再生能源得以順利併網，並在高再生能源發電占比時可以確保電力系統的穩定度及可靠度[6-11]，分別說明如下：

1. 要求風場/風機配合加強各項性能

(1) 準確發電預測（Forecast）

一定裝置容量以上的風場即必須定時更新提供未來一段時間發電預測資訊給調度中心進行機組發電排程（通常日前發電預測為168小時、即時發電預測為3小時），國外調度中心也有要求風場必須提供氣象資訊（包括風速、風向等），再由調度中心（ISO）負責區域及全系統的風力發電預測；國外調度中心除了日前進行未來168小時的風力發電預測外，在即時運轉更要求每15分鐘更新未來3小時的風力發電預測，以利進行即時輔助服務相關備轉容量（包括即時備轉容量及補充備轉容量）。受限氣候變化，日前預測（Day Ahead Forecast）的平均絕對百分誤差（Mean Absolute Percent Error, MAPE）約為6-8%，小時前預測（Hour Ahead Forecast）的平均絕對百分誤差約為3-4%。

- (2) 提高電壓支持（Voltage Support）能力，強化併接點（POI）之電壓調整能力
風力發電機被要求必須能夠提供至少10%裝置容量的無效功率（Reactive Power）、在併接點（Point of Interconnection, POI）可以在功率因數0.95超前及0.95落後範圍內運轉、且其無效功率（虛功率）容量必須是可以動態



調整。

(3) 提高頻率支持 (Frequency Support) 能力，風機具備類似調速機功能

風力發電機被要求必須能夠協助調整系統頻率，提供相當於傳統發電機初級頻率反應 (Primary Frequency Response) 功能的類似調速機反應 (Governor-like) 能力以因應系統頻率變動[6]，如圖5所示。

(4) 強化異常電壓/頻率穿越能力 (Voltage/Frequency Ride Through)

風力發電機在系統遭遇偶發事件期間或之後的幾個週波 (Cycle) 瞬間必須維持與系統併聯持續供應電力 (包括實功率與虛功率)，不能在系統頻率偏高、偏低，或併接點電壓過高、過低而切離系統，即風機應該具有在異常電壓/頻率持續運轉的能力，如圖6及圖7所示。

(5) 規範限制升/降載率 (Power Ramping)

為確保系統頻率穩定，規範再生能源電廠的升降載率，以德州電力調度中心為例，即要求風場/風機的每分鐘升降載率不能超出其銘牌額定值的20%。目前我國再生能源併聯技術要點雖未要求再生能源的升/降載率，但為確保系統穩定與安全，有必要比照國外作法規範再生能源升/降載率，建議大型再生能源電廠配置一定容量的儲能系統以符合升/降載率要求。

2. 即時電力調度方面配合加強相關調度作業

(1) 動態規劃輔助服務 (Ancillary Service)

考慮每日負載型態、瞬間負載變動、發電機出力變化及機組可能故障跳機等因素而使系統發電及負載隨時都在變動，導致系統頻率變動超出許可範圍，因此調度中心必須配置適量的各類備轉容量 (輔助服務) 使系統發電及負

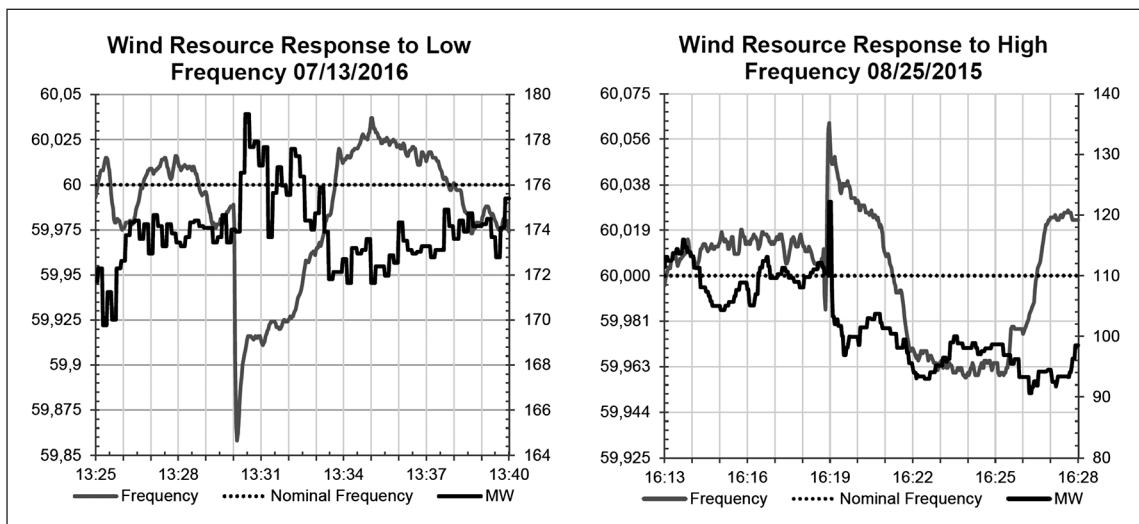


圖 5 風機具有類似調速機的頻率反應能力 [6]

說明：1. 右圖為風機的低頻反應能力，左圖為風機的高頻反應能力

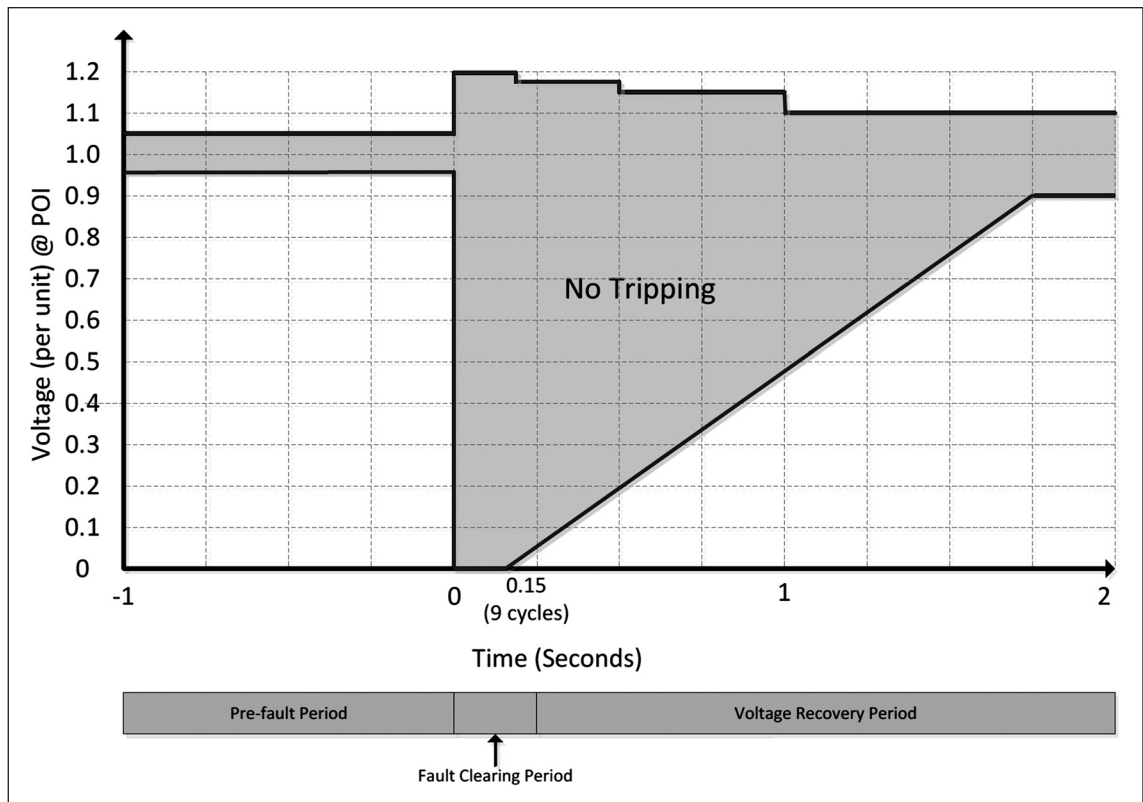


圖 6 風機應具備之電壓穿越能力 [6]

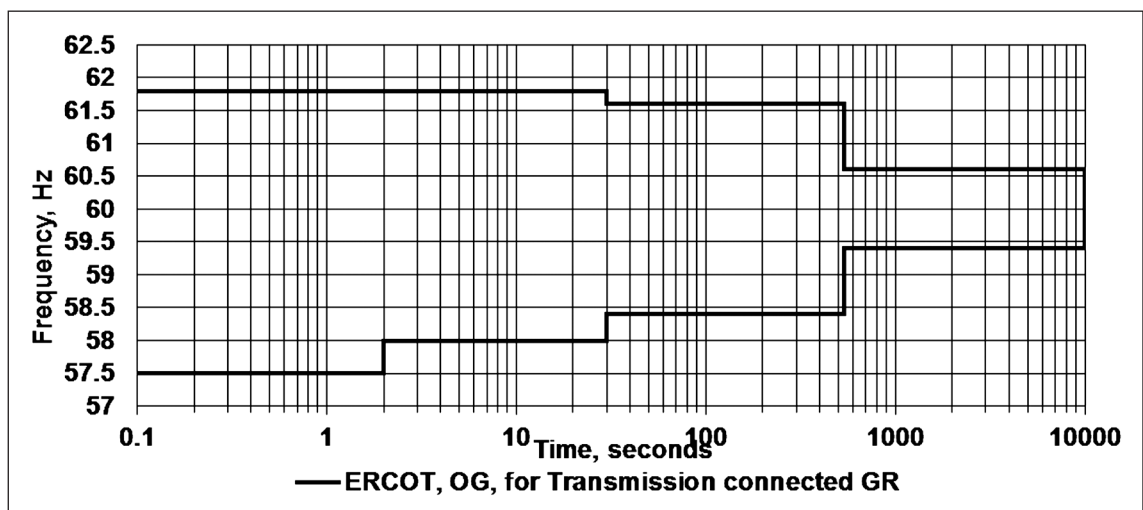


圖 7 風機應具備之頻率穿越能力 [6]



載得以維持平衡，各類備轉容量包括調頻備轉容量（Regulation Service）、即時備轉容量（Responsive Reserve Service）及補充備轉容量（Supplemental Reserve Service，亦稱Non-Spin Reserve Service）[6]。

(2) 增加調度員專責監控再生能源變動，加強即時運轉控制

針對大量風機併網所引發的各種可能風險進行定量分析、改善，並動態考慮特定的風險，包括最大可能預測誤差、淨負載變動、系統慣量偏低、輔助服務需求動態調整等[6]。

五、因應大量再生能併網台電公司調度準備工作

為確保能源轉型成功，因應大量再生能併網衝擊，確保電力系統供電穩定與安全，目前台電公司正積極推動以下幾項準備工作[12, 13]：

（一）提高風力發電預測的準確性與重新調度程序

為使風電之變動性、間歇性對系統造成之影響降至最低，參考美國ERCOT、NYISO等ISO之集中式風力發電預測作業方式，引進大數據分析技術，提高負載/再生能源預測準確度，提供Day-Ahead SCUC及Real-Time SCED使用，以改善系統整體運轉效率，並調度適足的輔助服務，維持電力系統的穩定與安全。

（二）準備充裕之各項系統備轉容量

由於再生能源短時間預測具高度不確定性，NYISO或CAISO皆以提高調頻備轉予以因應。再生能源滲透率增加後，調頻備轉需求量顯著增加，必須尋找新的供應源，如大型儲能（電池、飛輪）或需量反應等。依據台電公司委託美國電力研究院（EPRI）之研究結果，因應大量再生能源併網需額外準備再生能源裝置容量10%之備轉容量[11]。

（三）增加可快速起停之燃氣複循環機組

長期電源開發需大量增加快速起停、運轉範圍大及頻控範圍大之燃氣複循環機組。因此台電電源開發計畫105-114年規劃新增可快速起停之燃氣複循環機組包括大潭#7-#9機、新通霄#1-#3機、高原複循環機組、興達新CC#1-#2、協和複循環機組等。

（四）再生能源併聯技術法規配合修訂

藉由法規條件管制再生能源於責任分界點的負載變動率（ ΔP ）、電壓變動率（ ΔV ）、電壓/頻率穿越（Voltage & Frequency Ride-Through）、功率降載能力（Power Curtailment）、可設定之升/降載率（Ramp Rate Limitation）、調速機功能（Governor）等，並透過費率機制鼓勵再生能源業者設置適當之儲能設施。

（五）要求風場/風機接受調度

風場/風機應當接受由調度單位發送出之調度訊號，在系統正常符合安全限制期間，風場/風機採優先調度方式。在系統有可能不符合安全限制期間，若該風場/風機可以舒緩



安全限制，則風場/風機出力需配合調度指令降載直至可靠度問題被解決為止。

（六）強化系統調度控制

包括建置「再生能源管理系統」（包括再生能源發電預測、監控及調度管理等）、修訂「電力調度規則及相關作業程序」、建立「輔助服務市場及相關機制」、推動「自動反應型需量反應」、因應再生能源發展及負載變動情境、加強電力調度人員相關訓練等。

六、結論

未來大量再生能源加入系統是必然的結果，其對電力系統的衝擊與影響，國外均有成功的解決方案，如何選擇適合台灣電力系統的因應措施是重點，必須兼具經濟性與可執行性，並納入電力市場機制。大量再生能源併網後，電力系統對氣候依賴度增加，負載/發電預測愈加困難，再生能源的間歇性、不易預測性是再生能源併網與電力調度的最大挑戰，因應再生能源的間歇性與不確定性，必須配置足夠的各類輔助服務使系統發電及負載得以維持平衡、確保系統穩定，所以建立適當的電力市場機制或電力交易平台，取得多元且充裕提供各項輔助服務，方可積極協助大量再生能源併網，並有效抑低其可能之衝擊與影響，確保系統供電安全與穩定。僅提出兩項建議如下：

（一）再生能源併網技術法規：

建議盡速配合修訂，要求大型再生能源電廠強化設備性能提升穩定運轉能力

1. 一定容量以上的再生能源電廠必須提供發電出力預測
2. 要求大型的再生能源電廠應具備頻率響應能力
3. 要求再生能源電廠必須具備穩定電壓、補償無效電力的能力
4. 要求大型的再生能源電廠設置一定容量的儲能系統，補償實功變動

（二）電力市場機制：

建議儘速建立電力市場，電力調度中心可透過電力市場取得必要的輔助服務因應大量再生能源併網的衝擊。

參考文獻

1. 吳進忠（107年）。「再生能源併聯運轉對電力調度的挑戰與機會」，再生能源併聯運轉研討會，臺北：財團法人中技社，107年。
2. Ela E., Kirby B., “ERCOT Event on February 26, 2008: Lessons Learned”, July 2008, [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43373.pdf>, Accessed on: Jun. 21, 2019.
3. 台電公司電力調度處，「107年8760小時系統負載量統計」，108年。
4. 台電公司電力調度處，「107年8760小時太陽光發電量統計」，108年。
5. 台電公司電力調度處，「107年8760小時風力發電量統計」，108年。
6. 黃舜賢（107年），「再生能源發電併網—ERCOT運轉經驗」，再生能源併網運轉研討會，臺北：台灣電力股份有限公司，106年。
7. Lannoye, E., Tuohy, A., Entriken, R., “Wind and Solar Power and their Impact on Operating Reserves in the Taiwan Power System,” California: Electric Power Research Institute, 2015.
8. John C. Yang Stephen N. Zack, “Incorporation of Wind Power Resources into the California Energy Market,” California Independent System Operator Corporation, USA, 2005.
9. Smith, J. C., “Renewable Energy Interconnection Requirements for the US”, IEEE Power and Energy Society Meeting, Denver, July 28.
10. NYISO, “Integration of Wind into System Dispatch.”, October 2008, [Online]. Available: <https://www.nyiso.com>



ferc.gov/CalendarFiles/20090303120334- YISO%20Wind%20White%20Paper%20October%202008.pdf., Accessed on: Jun. 21, 2019.

11. Lannoye, E., Tuohy, A., Entriken, R., “Wind and Solar Power and their Impact on Operating Reserves in the Taiwan Power System”, 2015.
12. 吳進忠, 「再生能源預測對於電力調度的重要性」, 再生能源發電預測研討會, 臺北: 財團法人中技社, 107 年。
13. 吳進忠, 「離岸風電併網與電力調度」, 綠色金融暨離岸風電發展之風險與前瞻國際研討會, 臺北, 財團法人中技社、中華經濟研究院, 106 年 11 月 14 日。