

發電系統可靠度評估綜覽

林昌賢

核能研究所 綜合計畫組能源策略研究室

2019/10

一 前言

2017年1月電業法修法三讀通過，規劃我國電業未來將邁向自由化市場，而再生能源發展條例也在今年(2019年)修法通過，更於其中明定至2025年再生能源27GW的裝置量目標，以促使未來再生能源在自由電力市場中蓬勃發展。我國規劃未來將獨占的電力事業拆分為發電、輸配電及售電業等不同事業體。目前已有9家獨立民營發電廠併聯運轉，未來民營業者可以自由零售再生能源電力，也可以透過直供或轉供售電，電力市場亦規劃將從獨占轉為自由競爭，小型發電微電網可能因此而興起，並為我國電業型態帶來新的紀元。

然而，部分變動式再生能源具發電間歇性(Intermittent)，進而可能導致併網點附近電壓劇烈變化。此外，變動式再生能源具有不可控性(Uncontrollable)，無法像傳統電廠一樣控制其發電量，例如太陽光電只能在白天有陽光時發電，而天空雲朵的遮蔽也會對太陽能板輸出功率產生影響，或是風力發電受風速、風向等因素造成發電量不斷起伏，皆會對電網供電品質造成衝擊。台灣擁有豐富的太陽能與風電資源，有優良自然條件可以大規模發電，這也是目前我國政府主要推廣太陽

光電及離岸風電的原因，而此亦為國際未來趨勢。因此，未來電力系統加入大量再生能源後之衝擊，必須提早規劃及因應。

二 電力系統可靠度的重要性

電力系統供電可靠性攸關電力的穩定供應，若電力系統可靠性非常低，經常發生缺電或大停電，會造成社會經濟損失，而大停電甚至會衍生命財產喪失等其他重大事件。例如 2017 年 8 月 15 日的 815 大停電，共 592 萬戶受影響，部分交通號誌停擺，共有 410 家工業區及加工出口區廠家遭受損失，民眾受困電梯及救助案件共計約 900 件，造成民眾不便及不安，並對我國產業造成衝擊（行政院，2017），這也是我國政府努力維持發電可靠度的主要目的。

三 電力系統可靠度評估

現代電力系統可靠度評估可分為發電、輸電及配電三個層次 (Allen & Billinton, 2000)，如圖 1。階層 1 僅評估在發電端之發電設備，系統發電量必須滿足負載需求。階層 2 評估發電與輸電的複合系統，較階層 1 增加輸電線可靠度運算，主要用於大型電力系統。階層 3 評估發電、輸電及配電，由於運算量龐大，多應用於小型電力系統。本文將聚焦於探討階層 1 發電系統可靠度評估，實際上，發電系統可靠度乃是國際上關注且長期追蹤的課題，例如 2016 年 9 月 28 日因一場

暴風雨引起的南澳大停電，使得再生能源與火力混合發電系統可靠性成為關注的焦點(AEMO，2017)，而南澳大停電的事件更促使 Tesla 在南澳建立了全球最大的鋰電池系統，以協助南澳避免未來可能的停電風險。

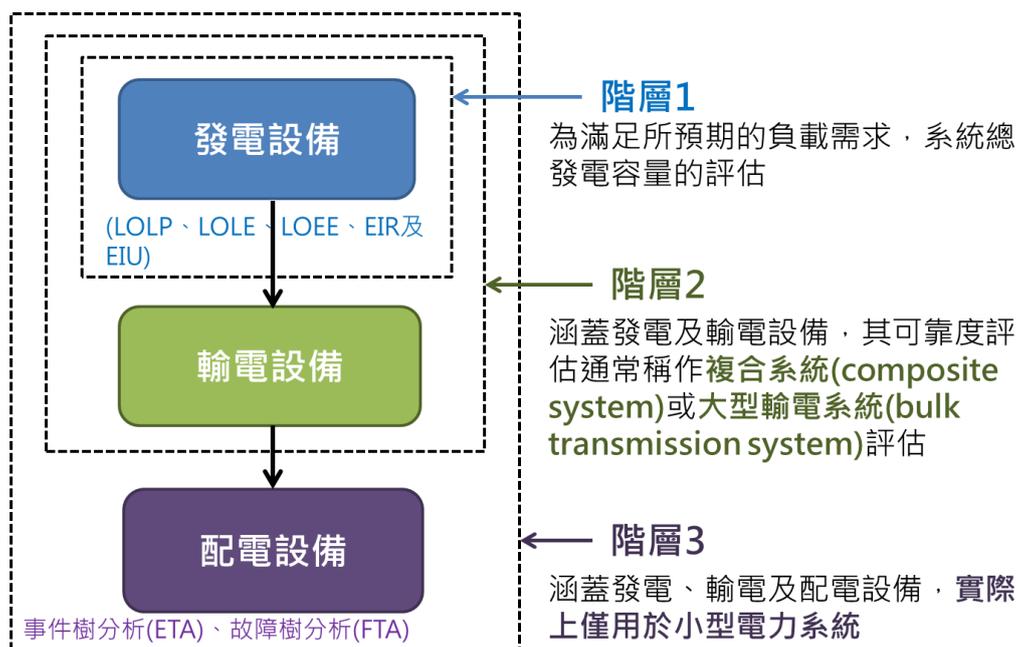


圖 1 電力系統可靠度評估階層

(來源：Allen & Billinton, 2000；韓佳佑，2019)

發電系統供電可靠度與發電機組備用容量率有關，但發電廠投資成本高，且民眾對電廠設置於住家附近會產生鄰避效應。若發電機組不足或經常故障維修，容易因缺電、限電而造成用戶損失。所以合理備用容量率必須考慮可靠度與成本之最佳策略，此外，負載的日夜變化、發電機組排程等因素也會影響發電系統的可靠度，其他如外購能源供應的風險及能源政策與空氣污染皆可限制發電機組運轉，也會對

發電系統可靠度造成影響(盧豐彰，2010)。

國際上常用的發電系統可靠度指標為失載機率(Loss of Load Probability, LOLP) (林家豪，2011)，其表示供電系統在一定期間內(通常以 1 個年度為計算週期)不能滿足負載需求的機率。缺電機率可表示為：

$$LOLP = \sum_{i \in S} P_i = Prob(L > \sum_{i=1}^n (C_i - U_i)) \quad (1)$$

其中， P_i 為電力系統處於 i 狀態的機率， S 為所評估的特定期間內電力系統必須停電或限電的系統狀態集合， C_i 為第 i 部機組的淨尖峰供電容量， U_i 為第 i 部機組的故障容量， L 為負載， n 為發電機組總數(林家豪，2011)。除了缺電機率外，其他常用評估可靠度的指標包含、失載期望值(Loss of load expectation, LOLE)、失載頻率(Loss of load frequency, LOLF)及電力不足期望值(Expected demand not supplied, EDNS)等。

發電系統缺電機率常見的計算方法，主要包含解析法及蒙地卡羅模擬法兩種，如圖 2 所示。

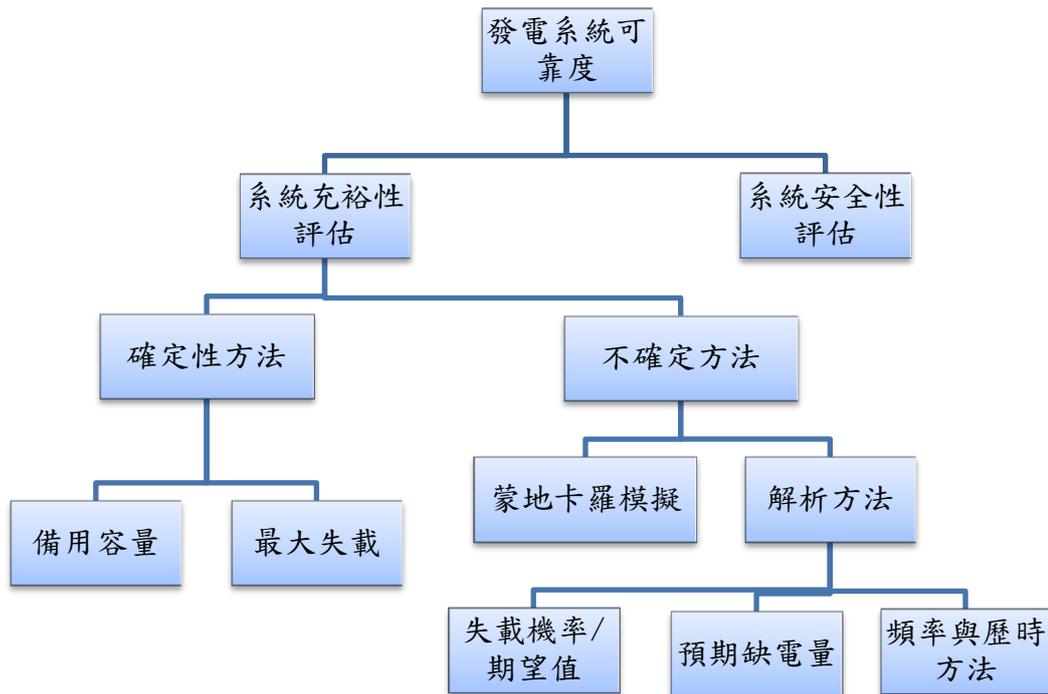


圖 2 發電系統可靠度分析方法 (來源：Phoon 2006)

這些可靠度分析方法與計算最早在 1970 年代就已經蓬勃發展(林家豪，2011)，當時電腦科技尚於萌芽階段，運算能力不足，無法於短時間完成大量摺積分運算，限制了可靠度的計算量。也因此，過去電業應用可靠度的計算，主要針對尖峰用電，並僅針對「日」進行計算，因此才推導出 LOLP 跟 LOLE 的關聯，但這項假設並不適用於所有的可靠度問題。未來藉由電腦運算在「解析法」與「蒙地卡羅模擬」仍有發展空間，例如近年學者提出簡化蒙地卡羅的近似方法，比蒙地卡羅法運算減少許多次數與時間(Hong & Lee，2009)。

四 我國電力系統可靠度規範

過去我國的電力調度依循「電力調度原則綱要」與經濟調度的原則，依序先調度發電成本較低之台電核能、台電燃煤及民營燃煤電廠等基載機組。若仍無法滿足電力需求，則須調度成本稍高之台電燃氣複循環機組與民營燃氣機組。「電力調度原則綱要」也明定輸配電業應擬具符合國際標準之電力系統可靠度指標，至少應包括系統平均停電時間(SAIDI)及系統平均停電次數(SAIFI) (電力調度原則綱要，2018)。我國政府自 2005 年起執行「推動供電可靠度 999 方案」(經濟部，2005)，進行加強電源開發、推動需量反應與無停電施工法及配電自動化等措施，並於 2009 年核定第二期計畫，發電系統以失載機率為指標，將原訂之每年缺電 0.5 天，進步至每年缺電 0.365 天(亦即我國供電可靠度標準為每年允許之缺電機率不大於 0.1%，當時再生能源佔比非常低，主要是針對傳統火力電廠訂定之可靠度標準。)

而再生能源基於電業法修正條文第八條規定：「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。」，再生能源據此可優先併網。然而，目前已將再生能源裝置量目標入法，預期近年再生能源在電力系統的裝置量占比將會有顯著的提升，未來可靠度的評估，勢必要考量再生能源併入電力系統後的衝擊。

五 再生能源併網可靠度評估方法

由於再生能源機組發電功率具有間歇性與不確定性，與核能及火力機組不同，因此需另以專用機率模型分析。再生能源常見的評估方式有兩種(李佩珊，2016)：其一，乃是藉由尖峰削去法，直接從負載端扣除，這種方法經常應用於再生能源佔比非常少時，先將再生能源發電供應之小部分負載扣除，再計算其餘傳統機組缺電機率。其二，建立類似傳統的核能及火力機組之等效可靠度貢獻進行評估，即國際上使用等效火力機組之容量價值(Capacity Credit)或可靠容量。

可靠容量率是目前國內外常用於評估間歇性再生能源對電力調度貢獻的標準，即是在不影響供電系統可靠度之下，能取代傳統火力機組出力的再生能源裝置容量之比例，常用的可靠容量率定義為：(陳昱安，2017)

$$\text{可靠容量率} = \frac{\text{取代火力機組出力}}{\text{再生能源裝置容量}} \quad (2)$$

此外，若再生能源有場域歷史發電資料，可以用統計方式配合再生能源特性分析(Tina *et al*, 2006)，如風力與太陽能之機率模型分析配合案場歷史資料，建立風機與太陽能板機率模型，也可直接進行缺電機率運算，只是運算量非常大，通常使用於小型電力系統。圖 3 為各種不同再生能源可靠度模型。

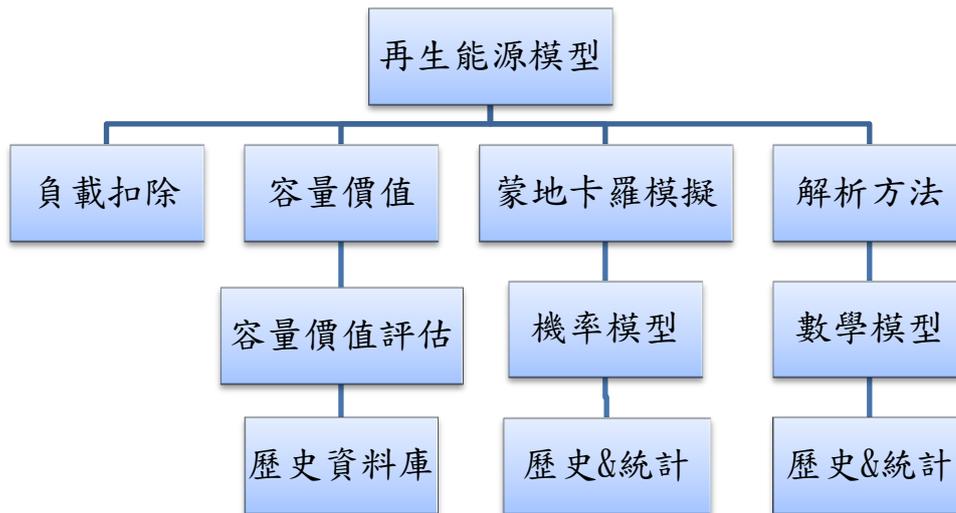


圖 3 不同方法之再生能源模型 (來源:本研究整理)

六 可靠度評估應用於電力市場

英國電力市場在自由化的早期，透過缺電機率來計算掛牌價格，用來獎勵發電業者提高可供調度的容量，用電尖峰期因電力價格較高，故可激勵發電機組提供更多備轉容量，同時亦可鼓勵新發電機組進入市場。(林彥甫，2017)

在不同的應用情境下，缺電機率評估方式將有所差異。長期電源開發針對5年後電力系統進行可靠度評估，由於5年後負載大小與發電機組組成、維修排程等資料較難預測，因此缺電機率評估僅作為電力規劃之參考。短期電力市場包含日前(day ahead)市場、實時(real time)市場。實時市場評估：由於當天氣象與機組狀態為已知，評估較精確，但須要高速電腦即時運算出結果；日前市場評估：前一日需預測明天機組狀態與氣象，這些預測資料準確性要比預測數年後情況高，因此

評估結果將會比長期電源開發之可靠度評估誤差範圍更小。再生能源加入發電行列後，若在電力市場掛牌，則再生能源發電量預測變得非常重要，例如未來某天的風速與日照強度，長期觀測氣象建立資料庫，建立預測經驗法則，以及再生能源可靠度評估標準，將有助於未來再生能源加入電力市場。

七 未來展望

我國目前正值能源轉型階段，大力推動包含太陽光電及風力發電等再生能源，但由於再生能源具有對於天氣高度依賴的特性，且我國地理位置四面環海，並無跨國電網可進行電力調節，因此維持電力系統可靠度極為重要。

要改善有併聯再生能源技術之發電系統可靠度，除增設電廠與增加電網容量、強化傳統電廠可靠度管理外，未來可以朝幾個方向進行：

- (1) 電網智慧化：隨間歇發電端及負載變化調節系統供需平衡。
- (2) 儲能系統的使用：儲存及調節再生能源發電，抑低尖峰用電。
- (3) 加強間歇性再生能源預測：太陽照度與風速大小的事先預測。
- (4) 採用需量反應機制用來抑低尖峰時段用電需求。
- (5) 使用能源效率高之電器減少電力損失。

參考文獻

- 行政院，2017，815 停電事故行政調查專案報告，106 年 9 月 7 日。
- 李佩珊，2016，大規模風光發電對台電系統備用容量率之影響分析，
中華民國第三十七屆電力工程研討會論文。
- 林彥甫，2017，國外電力市場與代輸制度介紹，能源知識庫文章，106
年度「總體電價政策及機制之研究計畫(1/2)」。
- 林家豪，2011，台灣發電系統可靠度之建模與評估，中原大學碩士學
位論文。
- 高翠霜，2003，我國電業自由化下電力供應可靠度性之研究，經濟研
究(3)，第 107-126 頁。
- 陳昱安，2017，大規模風、光發電對台灣發電系統可靠度之影響分析，
中華民國第三十八屆電力工程研討會論文。
- 經濟部，2005，推動供電可靠度 999 方案，經濟部能源局。
- 電力調度原則綱要，2018，全國法規資料庫，民國 107 年 01 月 26
日發布。
- 盧豐彰，2010，發電系統供電可靠度影響因素之探討，中華民國第三
十一屆電力工程研討會論文，第 564-568 頁。
- 韓佳佑，2019，大規模離岸風電併網對電網之可靠度影響研究，核研
所能源經濟及策略研究中心學術演講簡報，108 年 5 月。

- AEMO, 2017, Black System South Australia 28 September 2016, Australia Energy Market Operator report, March 2017.
- Allen R. & Billinton R., 2000, Probabilistic Assessment of Power Systems, Proceedings of the IEEE (88-2), 2000.
- Hong Y. Y., Lee L. H., 2009, Reliability assessment of generation and transmission systems using fault-tree analysis, Energy Conversion and Management (50), 2810-2817.
- IEEE 762 Standard, Definitions for Use in Reporting Electric Generating Unit Reliability, Availability, and Productivity, 2007.
- Phoon H. Y., 2006, Generation System Reliability Evaluations with Intermittent Renewables, A Thesis submitted in partial fulfilment for the requirement of degree in Master of Science in Energy Systems and the Environment, University of Strathclyde.
- Tina G., Gagliano S. & Raiti S., 2006, Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment, Solar Energy (80), 578–588.