

評論非核家園與發展再生能源

— 兼談風力發電技術開發與應用

台電供電處電驛技術課 李國楨

壹、緒論

回想民國六十年代，當時政府推行『十大建設』，奠定國家經濟建設，促進產業發展，提供民眾大量就業機會，數年之間創造了大量外匯，凡此種種皆令西方經濟專家、學者刮目相看，咸認是一項『台灣奇蹟』不可思議，從未開發國家發芽、茁壯、成長到開發中國家之列，一路走來順暢飛揚，此應歸功於全民勤奮耐勞、共體時艱、精進團結，發揚中興建國之精神。興建核能發電即是當時『十大建設』之一，由於國內自有能源極度貧乏，絕大部分須仰賴國外進口，攸關消耗國家大量外匯，然而電力不足根本無法振興產業，如不能滿足工業用電需求，經濟成長勢必落空，因此尋求長期低廉、穩定可靠能源，將是產業持續成長之關鍵性要素，核能發電符合此項特質，但為解決核廢料後端處理，依規定每年按核能發電量，提出固定比例費用作為終端處理經費，毋須政府再編列專案經費，足見當年施政者之苦心擘劃及思慮周全，核能發電供電後，自民國 72 年以降迄今電費均無須調漲，此期間仍安然度過石油能源危機，且對長期穩定國內物價居功厥偉，更印證當年策劃之宏觀遠見，顯現今日經濟宏規，確實卓越不凡。

近年來國內環保人士為反對核能電廠再興建，喊出了「非核家園」之動人口

號，若進一步探討其他發電方式，不外乎水力、燃油、燃氣、燃煤及再生能源等類別，仍存在不少環保公害，諸如二氧化碳排放關聯地球溫室效應、浮懸硫氮化物遇雨化成酸雨，侵蝕地質危害植物生長、粉塵及煤灰之二次公害污染、水力發電則為引水匯集水壩而改變河川水文，影響高山自然生態丕變等異況，而核能發電並無這些公害，只是核廢料之最終處理，故要求廢核之訴求，是否理性清醒值得商榷，另一方面社會大眾又深款期待「低廉電價、優質電力」之訴求，如電價不能回歸到基本面時，有朝一日電力事業將步入虧損破產之噩運，屆時全體用戶將面臨輪流停電，無一倖免之夢魘。

緣於地球蘊藏石化能源有其極限，加上近年國內產業在 WTO 協定下，不斷加速全球佈局，大量生產機械化，電腦監控自動化，正以前所未有之投資擴充產業版圖，年增生產線，爭逐量產需求，引發產能過剩，市場行銷被迫削價競爭，以微利價格穩住市場佔有率，形成珍貴能源僅獲取低度經濟效益，能源耗損擴大將加速能源枯竭期提前來臨，加上「非核家園」政策又對核能發電永不錄用，後代子孫勢必提前面臨能源短缺，生活文化慘澹度日。綜觀前述，開發、運用再生能源的技術，不得等閒視之，生生不息能源將關鍵著後代子孫生存方式，古有名訓：「凡事豫則立，不豫則廢」，今日若不正視切身問

題，明日將懊悔束手無策，而抱憾終身。

觀照全球各式各樣再生能源發電技術現況，風力發電技術在美、德、荷、丹、英、日等歐美國家，開發技術已趨向穩定成熟階段，國內風力發電技術尚屬開發起步，故應擷取歐美再生能源策略之進階發展技術。一般而言，風力發電機單機組容量並不大，大約為 300~1800KW，通常採用「積沙成塔、聚少成多」的風車陣(Wind Farm)方式，匯聚成一股巨大「小而美」之電能，由於發電風能無法預測操控，故僅能居輔助電力系統小部分能量之角色，絕大部分電能仍須倚賴水力、火力、核能之大容量機組提供。

貳、風力發電系統概述

風力發電系統涵蓋一、風力發電機，二、輸變電系統，三、監控系統等三大部分。其中：

一、風力發電機部份包含組件有：

1. 葉片轉子：受風力氣動作用，繞軸旋轉將風能轉換為機械能。
2. 發電機：轉換機械能為電能。
3. 增速裝置：運用增速齒輪機調變轉速，當作原動機來驅動發電機。(另有設計採用可調變式風力機)
4. 控制系統：調節控制風力機不超速運轉，迎風轉向的方向控制，及其他確保風力機安全運轉之相關控制。
5. 塔架：支撐風力機葉片轉子迴轉軸心於固定高度。
6. 機艙：保護風力機之傳動設備至發電機及部分機電控制系統。

二、輸變電系統概括：

1. 變壓器及輸電線路：風力機啟動初

始，藉由電力系統提供啟動電源，俟發電機並聯後再輸出電力供給電力系統。

2. 配電盤：裝置各種保護電驛、儀測表、轉換器(transducer)等。
3. 補償電容器：補償風力發電機提供無效功率，可遙控投入或啟斷。

三、監控系統包含：

1. 風力機自動控制設備：本設備蒐集風力電廠運轉資訊，經分析處理後自動對電廠內相關設備指令操控，或回送資訊至遙控站主電腦期待指令操控。
2. 遙控站主電腦：監控遠端風力電廠運轉概況，隨時完全掌控。
3. 通信系統：聯絡主電腦與遠端風力電廠資訊傳遞，通常選用微波或專線。

輸變電系統及監控系統均歸屬目前傳統輸變電技術範疇，無須大費周章探討整體設計、設備內容等細節，而風力發電機則須考量市場佔有率、運轉方式、費用成本等諸因素，在設計方面須評析風力發電機運轉特性，規範設計準則及評選廠家目前生產風力發電機之特點要項，目前風力機的使用壽命，一般以 20 年為設計基準，但近世材料科技不斷研發，可預料未來將會延長耐用年限，現今商業化風力機的性能與可靠度逐年提升中，風力發電市場的實用率，即實際運轉時間與應可運轉時間之比值，約在 95%~98%之譜，相較於 1980 年代之 50%~60%提升不少。

參、先進風力發電機的技术

晚近風力發電技術成熟已達到商業化之風力機有採水平軸翼型、垂直軸翼型、上風式翼型、三葉翼型等設計，各式設計

關聯其輸出性能的影響要素，由於導入許多航太應用科技於葉片的研發，迄今已大幅地提升風力機輸出效能。理論上葉片轉子氣動轉換效率之極限值為 59.3%，而目前水平軸翼型風力機之氣動轉換效率最高可達 50%。

由於微電腦科技發達且無所不適，故自然地引用到風力機監測風速、風向的變化，隨風自動啟動葉片轉向，同時監控系統可展現-過熱、過載、超轉速及過度轉向等保護功能，並採程式化遠距遙控，一旦發生異常狀態，兩套獨立安全制動系統（氣動煞車與機械煞車），可將葉輪轉速減至適度狀態或完全停止。另外，控制器和通信傳輸線路須加以隔離、保護、防止雜訊干擾及雷擊，以提升風力機之運轉率。

結構上葉片鎖定於輪轂(Hub)，承受風力作氣體流動旋轉，吸取風力動能，轉動齒輪傳動至發電機軸心，形成機械能轉換電能。葉片轉子承受氣動作用，包含阻力及推力產生扭矩轉動，故葉片轉子氣動性能良窳，具有影響發電機輸出功率之主要因素。通常風力機能量輸出與其葉輪面積成正比，目前所有葉輪設計上最大輸出不超越 $500W/m^2$ ，因此風力機組容量通常以葉輪直徑來推算，由 60cm(50W)~60m(3MW)均有設計。20m 直徑以下者為小型風力機，20m (200KW)~50m (500KW)直徑者為中型風力機，50m 直徑(1MW)以上者為大型風力機。大型風力機通常裝置兩葉片運轉較多；中、小型風力機採用三葉片運轉。前者優點為因減少一葉輪重量，故有效提升轉速進而減少齒輪箱之成本，但缺點為轉速過快，運轉上兩葉片尖端發出噪音，較後者為大，且平衡穩固性差，所以輸出電能效率亦較差，葉

輪轉速與其直徑成反比，大致上葉輪尖端之速度不超越 50m/sec~100m/sec 之範圍。風輪安置位址選擇亦是重要考量之一，裝置於下風(Down Wind)者(葉輪背風向)，雖可順風轉向，但受塔架遮蔽效應產生噪音，故通常採用上風(Up Wind)(葉輪迎風向)運轉。

2. 風力機輸出控制

由於風速的不確定性，連帶傳動發電機轉速亦不穩定，此項非定速運轉將造成齒輪箱直接損害，故規範風力機輸出控制，確有務實面之考量。目前市場上風力發電機輸出控制主要有兩種：

其一為旋角調制(pitch regulation)即利用可調節距之旋翼構造，當風速過大時自動調整葉片迎風角度，有效減縮強風推動氣力，類似滑水風帆運動，隨風向調整風帆斜角，追求最佳風力氣動。水平軸式葉片安置於輪轂，因葉片根部可轉向調整，結構設計趨向複雜，故其控制系統需具足能力驅動整體葉輪。

其二為失速調制(stall regulation)即利用固定旋翼在風速較高時，風力氣動受翼型分散流動以致失去原有強力風速現象，風力發電機因失速而調低輸出，不會產生超額運轉。

前者優點為：

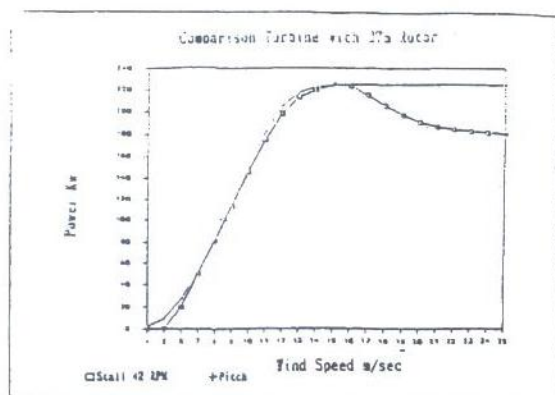
1. 經由葉片轉動改變迎風角度，調控氣動阻力減速或煞車停住；
2. 可控制輸出穩定度，或在額定輸出值內調節在最佳狀態運轉；
3. 可調控長時間穩速運轉，有利於發電機同步並聯電力系統；
4. 旋翼式葉片調控功能可於低風速時，擷取最大啟動扭矩，有利於較低風速下啟動發電；

5. 適合供給輕載饋線用戶群；
6. 具備適應電廠環境變化仍可維持風力機輸出最大值，例如海拔高地空氣密度稀薄、氣溫變化差異性大、空氣污染葉片蒙塵等；
7. 高風速下葉片切入角度大，故噪音小。

後者優點為：

1. 因利用自然分流特性來調制高風速，尤其是高風速中常有中、高亂流區域，以自然方式失速調制輸出控制發電，其機組端輸出動態變化量較前者為小；
2. 旋翼根部固定，結構簡單、問題少，毋須維護；
3. 造價低廉。

兩者輸出性能比較，如圖一所示。



圖一 固定旋翼式與可變旋翼式風力機葉片輸出性能比較

綜上評比可知：可變旋翼設計較為先進，通常應用感測監控與液壓驅動系統，進行調制節距角(pitch angle)，配合風速自動調制輸出最佳化，唯結構體相當複雜，維修技術亦跟隨繁雜，造價昂貴，固定翼恰好擁有上述三點正面效應，故吸引部份人士賞識採用。

另外值得一提的是變速控制風力機(Variable Speed Wind Turbine；VSWT)，與前述固定轉速風力機迥然不同，其關鍵性之技術在於風力機整合 AC-DC-AC 電力電子整流變頻科技運用，變速控制設計係葉輪轉速持續配合風速變化，發電機輸出值維持於最高效率，此時發電機轉子速率，雖隨風速起變化亦能輸出穩定電力。市場上商業化之風力機絕大部分為感應式設計，其輸出頻率值額定為 50Hz 或 60Hz 的交流電，故發電機轉速應固定。當風速過高造成之過大扭矩須由傳動軸鏈自行吸收，傳動機構應力無形中增大，造成效率變差。變速控制風力機正足以彌補上述缺失，靈活吸納風能、延長傳動機構使用壽命、降低成本及增加風力機廠址選擇條件更具彈性化。本項商品發展歷史尚短，未來仍具相當潛力的發展空間。

風力機輸出功率與風速之關係式為

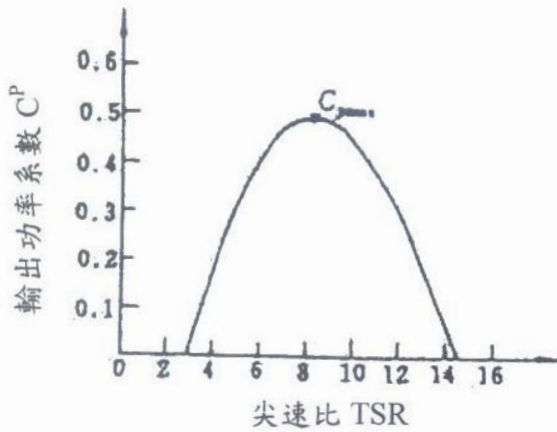
$$P = \frac{1}{2} C_p A \rho V^3$$

式中 C_p 為功率係數(正常值為 1/2~2/5，最高可達 16/27)

A 為葉片掃掠面積 m^2 ； ρ 為空氣密度 kg/m^3 ； V 為風速 m/s

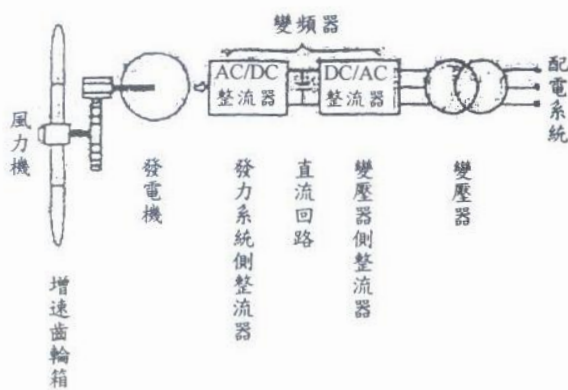
假若變速控制風力機輸出功率係數 C_p 處在某一確定尖速比(Tip Speed Ratio；TSR)時，風能輸出就可達到極大值，所謂尖速比係指葉片尖端之線速與風速之比值， C_p 與尖速比之相關特性曲線如圖二所示，由此可推知前述固定轉速風力機無法靈活吸納風速能量，故 C_p 不可能處於極大值。

變速控制風力機發電系統中，唯一需要控制的是電能頻率為恆定，不干擾電力

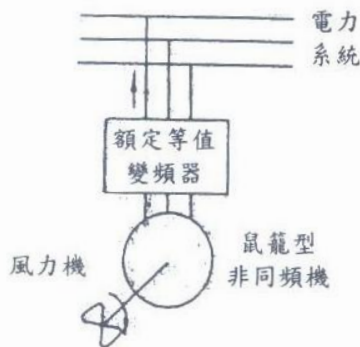


圖二 風力機的典型 C_p 與尖速比 TSR 特性曲線

系統正常運轉頻率，主要組成架構及功能如圖三、四所示：



圖三 變速控制風力發電輸出功率整流變頻架構

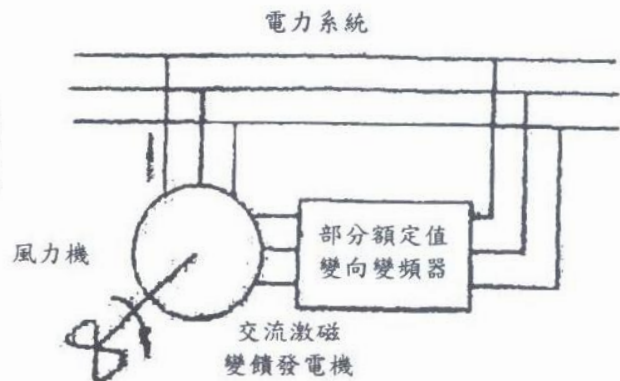


圖四 鼠籠型非同步機變速定頻風力發電架構

1. 風力機利用風力轉動齒輪箱啟動發電機；
2. 發電機輸出功率經過 AC-DC-AC 整流變頻作用；
3. 整流後頻率恆定再引接升壓變壓器至電力系統。

其中第 2 項整流變頻器之容量須與發電機額定容量值相等，避免出現過載或過熱現象，如此將提升整體造價成本，且體積和重量亦會相對增加，不利於大型風力機組之建造。

近來已研發出交流勵磁雙饋變速控制發電方式如圖五所示：



圖五 交流激磁變饋發電機變速控制定頻風力發電架構

定子採兩套正、負極數不同之繞組，一為功率繞組，另為控制繞組，轉子極數則對應定子兩套正、負極數之總合，頻控依下式變化：

$$f_p \pm f_c = (P_p + P_c) f_m$$

超同步時取"正"號；不足同步時取"負"號

f_p 為定子功率繞組電流頻率，因與電力系統並聯運轉，故頻率可視為大致相同；

f_c 為定子控制繞組電流頻率；

P_p 為定子功率繞組之極數；

P_c 為定子控制繞組之極數；

f_m 為轉子機械頻率($f_m = n/60$)，即每秒中之轉速。

當發電機轉速 n 變化時， $f_m = n/60$ 隨之變化，若控制 f_c 適度相應變化，則 f_p 可保持恆定不變，如此即可達到與電力系統大致相同之頻率，此種設計著重在定子結構改變，其通過控制繞組電流之功率僅占無刷雙饋發電機總功率 P_p+P_c 之微小部分，同理，變頻整流器容量亦占發電機容量微小部分，除有效降低造價成本外，尚可產出有效、無效功率，又可提升系統運轉的可靠性。

肆、風力發電量不穩定對電力系統之影響

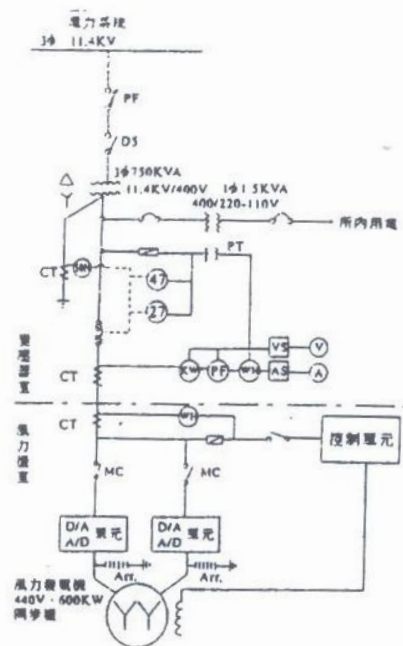
一般而言風力發電機因風力轉速不穩定，故採用感應發電機而非同步發電機，亦即勵磁機引接電力系統供激磁作用，當原動機轉速大於電力系統同步速率 $n = 120 f / P$ (其中 f 為電力系統頻率， P 為發電機之正、負極數)，轉子磁力場線經由氣隙與定子繞組發生電樞效應，所感應電壓、電流、頻率均以激磁系統為參考基準。此對固定旋翼葉片為一定值，如風速 $4m/s$ 始動運轉， $16m/s$ 為滿載，發電量端視風力狀況而論，由此推知風力機組發電容量不應佔整個電力系統過高比例，否則風場條件變化大時，將會影響電力系統運轉穩定度，故採用雙繞式發電機或標定風速超過設定值時，解聯發電機以保護電力系統穩定與品質。

假使在離島地區規劃裝置多部大型風力機組供給電力時，需考量風力發電量變化時，其不足電力須依賴柴油機組自動調

整輸出，以維持穩定電力系統之電壓和頻率，故柴油機組變載能力將是影響該地區整個電力系統恢復於正常狀態的重要因素。由此推論：風力電廠的設置容量應依據風力發電量佔電力系統的百分比來評估，該值應低限於影響電力系統供電能力與品質，以及柴油機組變載能力等，如缺乏完整周延估算，偶遇風突(Wind Gust)使該區域機組出力從滿載陡降，甚至瞬間全部解聯，引發電力系統電壓、頻率驟降及低頻電驛動作卸載狀況。

由於風力發電採用感應式發電機，故須依賴電力系統提供激磁電流，此電焊繞組激磁將饋入電力系統無效功率造成電壓下降，另方面當風力變動時感應發電機亦隨其變化，即所需無效功率會改變，故風力發電機廠家均會依其感應發電機從無載至滿載的功因數變化，設計整套多段式補償電容器自動調整裝置(Automatic Power Factor Regulator ; APFR)，使其並聯點功因數維持在 95% 以上。

風力發電機與電力系統並聯架構如圖六所示，僅須欠壓電驛(代號 27)、相序電



壓平衡電驛(代號 47)及接地瞬時過流電驛(代號 50N)等,風力機室內只須欠壓電驛量測發電機輸出端電壓是否正常?三相電壓引入電力系統相序排列是否正確?及相間電壓幅值是否相等?可應用相序電壓平衡電驛檢測出來,至於接地故障將會產生大量零序電流,可由接地瞬時過流電驛即時清除,減少設備損傷程度。

伍、結 論

從引進到終結核能發電技術均有其時空背景因素,並無昨是(非)而今非(是)的定調。平心而論,各種發電方式可說是利弊互見,絕無僅有某一種發電方式是百利而無一害,由此方向作邏輯思考,「非核家園」並非全然是最佳化之作法,試想:以其他蘊藏能源取代核電,即使可免除核廢料問題,但必須耗盡大量天然資源替代,換來後代子孫短缺可用資源,豈不是現代文明人類豪奪強取的結局?電力造就經濟發展,提供國民就業機會;環保提供優質生活環境,兼顧減少污染病源,因此,「電力」與「環保」孰輕?孰重?如何取捨,確實兩難。

本文從非核家園切入「發展再生能源」,所強調的是再生能源,取之不竭,用之不盡,例如擷取自然風能發電,不但不會挪用消耗後代子孫之能源,反可達到環保發電與開發電源之雙重目標,故被環保人士稱為綠色發電而大力支持。惟美中

不足的是風力無法預測操控及持續穩定性差,一般風力發電機額定容量通常設計上均不會太大。以一部核能機組額定容量一百萬千瓦,必須以 667 組額定容量一千五百千瓦大型風力發電機來替代,而前者能被控制長期穩定運轉,而後者卻時時面臨風速變化而起起落落。由此觀知,風力發電僅能供應對電力品質不在意之小用戶,相對於高精密度產業可能提升產品不良率,或因瞬間斷電導致生產線設備走調均不適用此類電源。

電力事業經營者不能輕忽前述諸多細節問題,而放棄能源多元化之策略,核能發電只是其中一種選項,並非發電系統的主流,如何保持長期穩定電源及提供充裕且高品質之電力,以滿足大多數用戶之需求,才是根本上之重心所在。電力事業經營者應努力維護所有用戶之權益及支持國家經濟發展、穩定國內物價,如此,才不會辜負大眾對電力事業公司之厚望。

參考資料

1. 澎湖風力發電計畫可行性研究報告-85 年 6 月 台灣電力股份有限公司、負威工程顧問股份有限公司
2. 台電工程月刊 651 期(再生能源發電專輯)-91 年 11 月 台灣電力公司編印

『保護電驛』工作是一良心的責任工作◎