

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

智慧型微電網電力調度與最佳化負載管理
**Power monitoring and optimal load management of
intelligent micro grid**

計畫編號：1012001INER045

受委託機關(構)：元智大學

計畫主持人：魏榮宗

核研所聯絡人員：何元祥

聯絡電話：(03)463-8800 ext: 7117

E-mail address：rjwai@saturn.yzu.edu.tw

報告日期：101 年 12 月 5 日

目 錄

中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	4
貳、研究方法與過程.....	14
參、主要發現與結論.....	26
肆、參考文獻.....	32

中文摘要

由於全球氣候變遷問題日益升高，各國家紛紛提倡低碳經濟，以節能減碳為核心，進行能源使用效率提升，並發展可再生能源。因此結合再生能源之智慧型微電網之發展成為目前相當熱門研究主題之一，智慧型微電網是屬於分散式發電系統，其設備容量一般較小，大部分會與電力公司配電系統併聯，其系統可利用再生能源協助供電達成環保效益，最主要可在台電系統發電量不足或是故障時，提供特定負載之緊急用電，該系統與電力公司配電併聯後對於整個電力可靠度、供電品質以及能源效率有正面影響。而如何預知智慧型微電網中再生能源之發電量使得系統內部家電負載的使用在不影響使用者生活習慣的前提下進行調控，可以同時得到最佳經濟效益與提升用電效率是目前急須解決之課題。本計畫將以實驗廠址進行實測，以驗證本計畫所發展策略之有效性，本計畫預期可達到四點目標：第一點本架構將採用適應型粒子群優化演算法(Adaptive Particle Swarm Optimization)進行再生能源發電預測，希望能減少運算量以增強負載調控之動態對應能力；第二點建立以動態發電經濟模型為基礎的電力調度計劃來配合實際負載需求；第三點在不影響使用者生活習慣的前提下，調整尖峰負載峰值，達到電力供需平衡的目的；第四點若實際再生能源發電情形與預測系統發生偏差時，控制系統的即時反應機制可以減少因估測誤差所導致之損失，以找出最符合經濟效益之系統控制方法。

英文摘要

Due to the increasing problem of global climate change, every country promotes low-carbon economy to increase the energy utilization efficiency and develop renewable energy. Thus, an intelligent micro grid in combination with renewable energy is one major topic of recent interesting researches. The intelligent micro grid belongs to a distribution generation system, and its power capacity is smaller than the utility power. In general, the intelligent micro grid is operated in connection with the power distribution system of the power company, and it can use renewable energy to supply compensated or emergent power for specific loads to achieve the benefit of environment protection as the insufficient power supply from the power company or the occurrence of power breakdown. As the grid connection with the power distribution system, it has a positive impact on the power reliability, power quality and energy efficiency. However, how to predict the generated power from renewable energy in the intelligent micro grid for manipulating power sources to achieve optimal economic benefit and energy efficiency without influencing users' comfortable feeling is a recent issue to be solved. This effectiveness of the proposed strategy in this project is verified by the experimental operation of a real demonstration site. This project expects to achieve the following four objectives. (1) An adaptive particle swarm optimization strategy is developed to predict the generated power from renewable energy in the intelligent micro grid for reducing the computational amount and enhancing the dynamic ability in response to load manipulations. (2) A power dispatch plan is designed to satisfy real load demands. (3) The

power balance for power supply and load demand can be achieved by adjusting the peak power requirement without influencing users' comfortable feeling. (4) A real-time control system is investigated to design a suitable economic control methodology for avoiding the possible loss under the occurrence of prediction error.

壹、計畫緣起與目的

一、設計製作緣由及目的

氣候變遷及能源短缺是迄今人類所遇到的最大範圍的公共危機，節能減碳、綠色能源、永續發展等課題逐漸成為各國關注的焦點。因此許多關於用電及負載管理之策略紛紛被提出，包括像時間電價、需量反應等，其不外乎就是在一般用戶間達到移轉尖峰負載用電以及減少用電以達到節能減碳的目的地。但這類措施不僅影響一般用戶的日常生活習慣，更會侵犯到個人或家庭的隱私權，所以積極開發替代性綠色能源取代部分傳統石化能源的電力供應，變成相當重要之課題。

為減少石化能源排放大量的溫室氣體，我國加強了開發再生能源的開發速度、例如太陽能光電池發電以及風力發電雖然價格仍然相對偏高的情況下，因其可以兼顧扶植國內產業以及推展綠色能源的綜合效果，所以在各類微型電網中的電力供應端有著普遍的應用，而燃料電池近年來也展現了其未來發展潛力[1]-[3]。

太陽能光電池發電系統其特點為無放射性的污染，並有耐用且維修費低的優點，而且在其轉換效率提升以及半導體工業大幅躍進的影響下，其成本持續降低，使其逐漸接近經濟實用化；以風力發電來說，其沒有污染且不會破壞臭氧層，一些風力資源豐富之國家均已大量開發，目前也越來越受到支持及重視。但是太陽能光電池以及風力發電量相當依賴天氣的狀況[4]，其發電量具有不確定性的缺點；燃料電池發電系統的主要特點主要包括高效率發電、幾乎是零污染以及架構彈性等，但燃料電池其發電成本相對較為昂貴，因

此為了應對再生能源本身發電限制以及每年不斷攀升之用電量，世界各國之電源供應系統逐漸由集中式電源朝向分散式電源發展，推廣靠近用戶端且容量小之分散式電源並且引進新能源，作為傳統大型集中式供電系統之輔助性及替代性電力。

分散式能源的優勢在於容易尋覓設置地點、設備投資靈活度高、易應付尖峰負載狀況、可作為孤島運轉或緊急發電電源、較高的綜合能源利用效率、較低的故障率、管理容易、可利用低碳能源及減少輸變電與配電線路設備的投資。為對抗全球氣候變遷，先進國家紛紛研擬溫室氣體減量目標，降低石化能源使用比例，擴大再生能源利用，提高能源的利用效率，降低能源密集度。然而再生能源及新能源發電的不穩定特性，當其併入電網之容量佔比逐步提高而達到某個程度時，其將影響大電力系統的穩定度，需發展即時有效監控/調度分散式或再生式電源技術，降低分散式能源併網帶來的衝擊，因此美國、歐洲與日本等先進國家近年都積極投入智慧電網技術研究。

針對智慧型微電網之用戶端的電力網路進行負載管理，不僅可降低用電量，並且能提升能源使用效率，因此各國均將其納入節能減碳的主要政策之一，其方法為透過智慧型控制器調控負載，以提升電網中再生能源的使用效率與分散尖峰負載的使用量，如此可以減少家庭支出(電費節省)和保障生活品質(減少溫室效應造成的氣候變遷)，以提升消費者參與智慧型電網之意願。一般住宅負載管理設計目標是減少或轉移能源使用量，例如鼓勵消費者了解自己的能源消費模式和興建更多節能建築以達到減少能源使用量之目標。適當地轉移能源使用量之目的是當家電使用時將其高耗能的使用時段轉

移到能源消耗較低的離峰時段，這方式已變成減少尖峰用量比 (Peak-to-Average Ratio, PAR) 實際且有用的方法。舉例來說直接負載管理 (Direct Load Control, DLC) 就是住宅負載管理方案之一，DLC 是電力公司與消費者之間的電力管理機制，在取得消費者的同意下，進行遠端家電負載調控 (例如電燈、電熱器、空調機... 等等)，但如何保障消費者用電習慣的隱私，是推行 DLC 所遭遇的最大課題。而另一種類型的 DLC 管理就是智能電費定價，鼓勵消費者自發性的管理自己家電負載的使用情形。例如用電尖峰定價 (Critical-Peak Pricing, CPP) 讓消費者減少尖峰用電時刻的用電量、即時的用電定價 (Real-Time Pricing, RTP) 讓消費者依不同電價的時段調整自己的用電習慣。RTP 在某些地區已在使用，但消費者通常會對於每個小時都會變化的用電定價該如何及時對應而感到困惑，另一個 RTP 遇到的問題是無法有效減少 PAR，因為會發生整個用電量從尖峰用電時段轉移到原先非尖峰用電時段的情形。因此消費者將發揮關鍵的角色，積極的參與智慧型電網的負載調節並發展「最佳化負載管理」，其將減少高峰電量的需求，且同時降低發電成本，為消費者與企業創造更多的環保發電。

本計畫所提出之智慧型微電網係以太陽能光電池發電系統、風力發電系統以及燃料電池作為分散式電源實施例，而由於環保意識抬頭以及溫室效應所帶來之二氧化碳汙染問題，全世界正積極推廣及發展再生能源，將來各種再生能源發電系統技術開發都將日臻成熟，因此本計畫所提出之智慧型微電網之架構除了上述所提出技術已開發成熟之太陽能光電池發電系統、風力發電系統以及燃料電池之外，未來包括潮汐發電、水力發電、地熱以及生質能等其他再生

能源也將可彈性加入本計畫所提出之智慧型微電網中，除了再生能源以外，根據不同設置廠址之需求，本計畫所提出之智慧型微電網也可搭配如柴油引擎以及火力發電等傳統能源，此智慧型型電網架構將不侷限於某幾種特定能源，而是根據不同設置場址之實際需求建構出最適合當地場址且多元化組合之混合能源發電系統。

本計畫所提出之「智慧型微電網電力調度與最佳化負載管理」研擬利用過去的歷史資料做統計分析，找出與再生能源發電量有較大關聯性的可能變因(例如過去的發電資料，照度，溫度與風速等等)以降低估測所需資料量，將可能變因輸入以適應型粒子群優化演算法(Adaptive Particle Swarm Optimization)演算法為基礎之智慧型估測機制，以達到再生能源發電量估測的效果，並開發複數潔淨能源整合之智慧型電力監控系統，執行即時電力監控及經濟電力調度。本計畫所發展之智慧型電力監控系統，除擷取各種電力資訊外，還將採取友善使用者設定程序進行電力監控調度，透過可程式邏輯控制模組來執行控制程式以及互動式人機介面來輸入控制參數與監控運作時狀況，使其可達到最佳化經濟調度節能調控以提升用電效率。

二、相關案例研究

近年來台電鼓勵消費者在自用住宅屋頂架設太陽能光電且保證饋回市電的電力收購時間保證 20 年，由此可以看出政府希望在 2025 年的二氧化碳排放量可以回到 2000 年，且規畫於 2025 年使用無碳之再生能源需達 8% 以上的遠程目標[5]，因此在使用者端推廣由多種再生能源構成分散式電源的智慧型微電網已在各相關的政府組織積極研擬研究計畫並逐步推廣實施中。

現今再生能源發電都有其尚未克服的問題，例如燃料電池從啟動運轉到正常供電需要緩衝時間以及太陽能與風力發電系統之發電量受氣候影響等因素，因此為了滿足即時的電力調度以達到供需平衡的目地，再生能源發電量之預測成為相當熱門的研究課題。過去常見的運用於預測系統的人工智慧型理論(模糊理論以及類神經網路)各有其缺點，模糊理論由於是以口語方式表達，因此可以不需要預先知道受控系統的物理模型，再加上規則庫內有許多人性化且易於瞭解的規則可遵循因此容易被人們所接受，但是該如何決定適當的規則庫相當困難，倘若規則訂定不佳將會對預測結果造成很大的影響，如果此系統又是未知系統，那要訂定完整的規則庫更是難上加難。類神經網路可以不必預先知道受控系統的數學模型，因為其具有強大的學習能力，對於任何的未知系統都能根據線上調整類神經網路的連結權重值，以達到所期望之鑑別與控制性能，但是所調整出來的連結權重值所代表的意義，並不能像模糊控制器的規則庫能以口語方式來表達，因此類神經網路控制器並不容易被人們瞭解其運作規則。

近年來將模糊理論融入類神經網路之模糊類神經網路(Fuzzy Neural Network)被提出改善上述所提到之問題，模糊類神經網路控制系統結合處理不確定性訊息能力之模糊推理機制與線上學習能力之類神經網路的優點，故經常將其應用在處理控制系統具有非線性和不確定性的問題，也可同時克服解決上述所提到模糊理論以及類神經網路之缺點。然而模糊神經網路雖然具有強大的估測能力，但其控制架構較為複雜，因此會導致較長的運算時間以及成本。

過去有學者提出利用演算法做估測架構，一般來說以演算法為

基礎之估測架構較為簡單且運算時間短，相較於上述所提到之模糊神經網路等架構，更適合搭配電力監控系統做即時的電力經濟調度，其中最常見的演算法有包括基因演算法(Genetic Algorithm)、演化式規劃法(Evolutionary Programming)、模擬退火法(Simulated Annealing)、演化式策略法(Evolutionary Strategy)、遺傳規劃法(Genetic Programming)、微分演化法(Differential Evolution)和進化式演算法(Evolutionary Algorithm)等，在此針對以上提到的常見演算法做簡單介紹：

(一)基因演算法

基因演算法是取於大自然的一種演算法，利用競爭-生存以及基因交換-突變，尋求問題的正確解答；但其運算時間較長且較容易落入局部最佳解，此外其編碼以及解碼結構也相當複雜。

(二)演化式規劃法

演化式計算是人工智能研究領域的一項學科，原理大都來自於自然界生物演化的機制，依其發展特性來分類，演化式規劃則是介於數值分析和人工智能間的方法與模型；但其缺點為當演化式規劃收斂接近最佳解時，其收斂速度會變慢。

(三)模擬退火法

模擬退火演算法簡單來講是一種 optimizing brute-force search 的演算法，當遇到一個沒有辦法直接找出答案的問題，就靠檢查每一組可能的組合是否為答案，optimizing 則是在各答案中(盡量)選取最佳的答案，這種方法是很容易可以執行的。不過其算是徒法煉鋼的一種方法，且若其流程中有步驟錯誤或是微調值不理想，會對結果造成很大的影響。

(四)演化式策略法

演化式計算是人工智能研究領域的一項學科，原理大都來自於自然界生物演化的機制，依其發展特性來分類，演化式策略則是屬於數值分析的方法與模型。

(五)遺傳規劃法

演化式計算是人工智能研究領域的一項學科，原理大都來自於自然界生物演化的機制，依其發展特性來分類，遺傳規劃則是偏向以程式表現人工智能行為的方法與模型。

(六)微分演化法

演化式計算是人工智能研究領域的一項學科，原理大都來自於自然界生物演化的機制，依其發展特性來分類，微分演化法則是用於多值域及多目標工程最佳化的方法與模型。

(七)進化式演算法

進化式演算法是以整個樣本空間為基礎，在演化的過程中個體會互相影響(交換訊息)，進化式演算法交換訊息主要是透過選擇、競爭和重組三個步驟所組成。

而上述所提到之演算法也都各有其缺點，例如基因演算法運算時間較長且較容易落入局部最佳解，其編碼以及解碼結構也相當複雜，演化式規劃收斂接近最佳解時其收斂速度會變慢，模擬退火法算是徒法煉鋼的一種方法，且若其流程中有步驟錯誤或是微調值不理想，會對結果造成很大的影響。因此本計畫「智慧型微電網電力調度與最佳化負載管理」研擬利用適應型粒子尋優演算法為基礎之智慧型估測架構進行再生能源發電預測，希望能減少運算量以增強家電負載調控之動態對應能力，滿足發電預測的要求以歸納成實際

負載管理執行依循。

關於智慧型微電網中的程控流程架構，過去文獻提出了包括有全域控制(Global Control)、局部控制(Local Control)、多層架構(Agent-based Scheme)與雙層架構(Non-agent-based Scheme)等方式[6]。由於全域控制可調控與規劃範圍較廣，因此全域控制比局部控制方法更具伸縮性，而雙層架構雖有對負載變動反應差之問題，但其成本比多層架構低，若能將雙層架構進行改良，例如將局部設施使用有規劃與執行能力的控制器使得全域控制器與局部控制器之間有良好溝通，即可解決多層架構成本太高且擁有多層架構對負載變動反應快的優點，如此才能有效率的執行計畫命令與解決負載變動的問題。為了最佳化電力調度與負載管理，本計畫使用全域控制配合雙層架構的改良式來進行計畫命令的執行與調整、資料傳遞與即時監控以達到能源供給與負載需求之最佳化管理。

根據 2009 Electric Power Research Institute (EPRI)的統計，家庭用電占全美電力消費約 38%，而空調機的用電量又佔全部家庭用電的 21%，如果這些家電可以開發成具有可以經由「需求反應(Demand Response)」進行負載側管理(Demand-Side Management)[7]，其中如熱水器、電熱器、通風設備並開發出兼具可靠與安全的系統與之連結，將來一定可以提升用電效率與有意義的減少溫室氣體的排放。智慧型微電網系統之電力調度過去文獻有提出利用限制負載的使用來保障電力供需的平衡，但此方法會造成使用者生活上之不便利，加上各式再生能源發電系統之發電成本差異性頗大，因此對於電力的調度除了滿足負載需求外，也需要結合經濟層面以及使用者舒適度做綜合考量，求得最佳化以提升電力供應之可靠度[8]-[9]。

智慧型微電網之電力調度與負載管理的範圍約可分為單一家庭(獨立使用分散式發電系統)、如鄰之單位的家庭組合(共同使用分散式發電系統)以及如鄉/里之單位的家庭組合(共同使用虛擬電廠)[10]，但各有其缺失待改善，如單一家庭有保障隱私與家用負載不受外界管控之優點，但也有調度方法不具伸縮性的缺點；而以鄰之單位的家庭組合則有調度具伸縮性與家電之啟動峰值在整體負載需求圖上幾乎看不出來的優點，但也有喪失隱私權的缺點；而以鄉/里之單位的家庭組合對於虛擬電廠的調度希望達到可以取代傳統電力的目標，現今有許多控制方法被發展於智慧型微電網之電力調度與負載管理，其中針對以鄰之單位的家庭組合(共同使用分散式發電系統)進行測試，來滿足提倡環保意識、保持電網穩定度、節省電費與配合電力公司再生能源躉購政策等多重目標最為常見。

一旦消費者在政府優惠措施的鼓勵下，在自用住宅進行安裝與使用再生能源的發電系統，家用電力來源就會變得多樣化，此時消費者的用電習慣到底需變得更積極或需變得更保守?相信每一個消費者都會對此種情況造成困惑。此時若有一套消費者能源管理系統，可以讓消費者查看即時的電力生產與負載使用狀況的資料，並讓消費者規畫自己的節能計劃[11]，使消費者能源管理系統可以在消費者設定的情境下，自動依照消費者意願所執行的直接負載控制(Direct Load Control)[12]–[15]，讓消費者了解自己規畫的計劃所執行結果表現在電費節省上的明顯成效，想必會提升消費者參與節能減碳計劃的積極度。

讓消費者個人能習慣於自用住宅的負載進行調控以達到個人的節能目標，並養成真正節能省電的好習慣，如此一來，將來加入區

域甚至是全域微型電網的電力調度時，才能主動提升參與的意願。本計畫即在發展一套家庭式的消費者能源管理系統，可使用太陽能光電、風力發電(隨機型式的自然能源)透過可程式邏輯控制器(Programming Logic Controller, PLC)進行電錶資料收集，並對可調控負載的家電(如電燈、電風扇、冷氣..等)進行隨機動態程式控制(Stochastic Dynamic Programming)[16]或使用燃料電池(緊急用電型式的自然能源)，並對緊急用電時可控制負載的家電(如電燈、抽風扇..等)進行不同情境的調控測試，並使用人機介面(Human-Machine Interface, HMI)消費者進行節能規畫，使用電腦進行即時資料的顯示與歷史資料的儲存，讓消費者在安裝潔淨能源時，也能了解自己在改善地球暖化行動中所扮演的重要角色。

促使消費者從被動的使用電力進化到可以達成節能省電的主動角色[10]，再經由個人(Local)發展到群體(Global)的用電管理時，更可以透過消費者間彼此的競賽(Game-Theoretic)，對於節能成效良好的消費者給予獎勵以提升消費者之參與的積極度，這對於平緩尖峰用電量會有更明顯的成效[17]。因此本計畫亦將研擬建立再生能源之發電經濟模型，建立此動態模型可有助於找出最符合經濟效益之電力調度，例如燃料電池發電成本主要來自於製氫系統的用電需求，因此可將製氫系統於離峰時間運轉，太陽能與風力發電系統如有多餘的電能可以轉換為熱能、儲能或配合能源躉購政策等等。除了考慮經濟層面外，本計畫並利用可調整負載使用之家電，透過調整家電使用負載量取代傳統關閉家電之負載管理，例如過去文獻提出冷氣設定溫度每調高1度，尖峰負載使用減少30%，可同時滿足最佳經濟效益以及使用者舒適度[18]-[19]。

貳、研究方法與過程

本計畫「智慧型微電網電力調度與最佳化負載管理」研擬利用過去歷史資料做統計分析，找出與再生能源發電量有較大關聯性的可能變因(例如過去的發電量、溫度、照度與風速等等)以降低估測所需資料量，將其可能變因輸入以適應型粒子群優化演算法(Adaptive Particle Swarm Optimization)演算法為基礎之智慧型估測架構估測再生能源發電量，並發展智慧型電力監控系統，更因應負載端電力需求作最佳化經濟調度節能調控以提升用電及經濟效率。

一、小波轉換

本計畫使用小波轉換用來分析太陽能發電及風力發電的資料。近幾年來的研究方法中，已發展很多各具特色的小波函數，例如正交型[20]-[21]、雙正交型[22]-[24]、半正交型[25]-[26]…等，且都先後運用在控制領域中。西元1988年Daubechies[20]運用多層解析(Multiresolution)空間的觀念[27]-[28]設計具有歸一化正交性(Orthonormal)及緊支撐(Compact Support)的小波函數，其具有良好的時間和頻率局部化的性質，因此初步的小波分析系統理論得以建立，進而幫助更多學者致力於研究更有效率的小波函數。西元1990年代初期，Chui和Wang [29]利用弧線建造出半正交小波函數，可用於計算上之解析表示式(Analytic Expression)。Chen和Hsiao[30]以小波積分形式的操作矩陣和公式化的程序來分析動態系統。

各式各樣的小波函數，大多延伸自學者 Haar 於西元 1910 年所提出之 Haar 小波函數 $\psi(x)$ ，如圖 1 所示，其小波函數皆須滿足

$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0$ 之條件，意指小波函數的平均值必須為零，且當 x 趨近正負無限大時，小波函數 $\psi(x)$ 將衰減至零[31]。

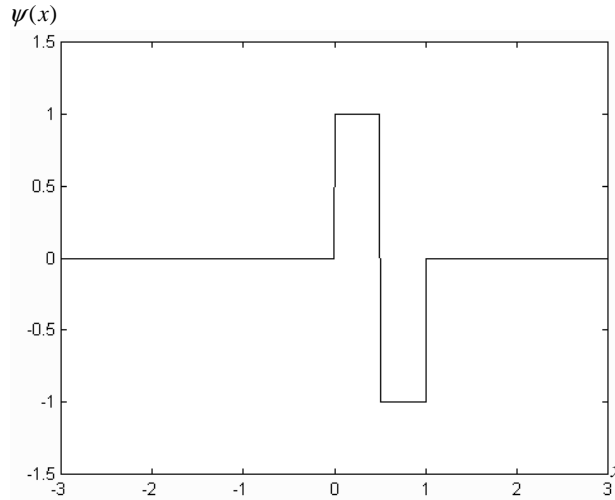


圖 1 Haar 函數

正交 Haar 小波函數集合，如圖 2 所示，其為部分區間函數大小為一而其他處皆為零的方形小波。 $\psi_0(x) = 1$ 於區間 $0 \leq x < 1$ ，如圖 2(a)，稱為尺度函數或稱作父波(Father Wavelet)；圖 2(b)的 $\psi_1(x)$ 稱為基本方波(Fundamental Square Wave)或母波(Mother Wavelet)；其餘的曲線則是經由 $\psi_1(x)$ 的脹縮和平移所得到的的小波函數，如圖 2(c)至 2 (f) 所示，可以標記成下式

$$\psi_n(x) = \psi_1(2^j x - k) \equiv \psi_{j,k}(x) \quad (1)$$

其中 $n = 2^j + k$ ($j \geq 0$ 以及 $0 \leq k < 2^j$)。根據方程式(1)，小波函數集合間的關係可整理成下式

$$\int_0^1 \psi_i(x) \psi_l(x) dx = 2^{-j} \delta_{il} = \begin{cases} 2^{-j}, & i = l = 2^j + k \\ 0, & i \neq l \end{cases} \quad (2)$$

其中 δ_{il} 是 Kronecker Delta 函數[27, 32]。觀察方程式(2)，可得知 Haar 小波函數集合間具有正交之特性，因此適當選取 Haar 小波函數可形

成正交基底向量。

假定任意函數 $y(x)$ 在區間 $[0,1]$ 是可平方積分且為有限值，則函數 $y(x)$ 可以藉 Haar 小波函數展延成

$$y(x) = \sum_{i=0}^{\infty} c_i \psi_i = c_0 \psi_0(x) + c_1 \psi_1(x) + c_2 \psi_2(x) + \dots \quad (3)$$

其中 c_i 代表小波係數，可經由下列方程式計算獲得。

$$c_i = 2^j \int_0^1 y(x) \psi_i(x) dx \quad (4)$$

經由上述推導，可得知正交 Haar 小波函數具有強大的函數近似能力。

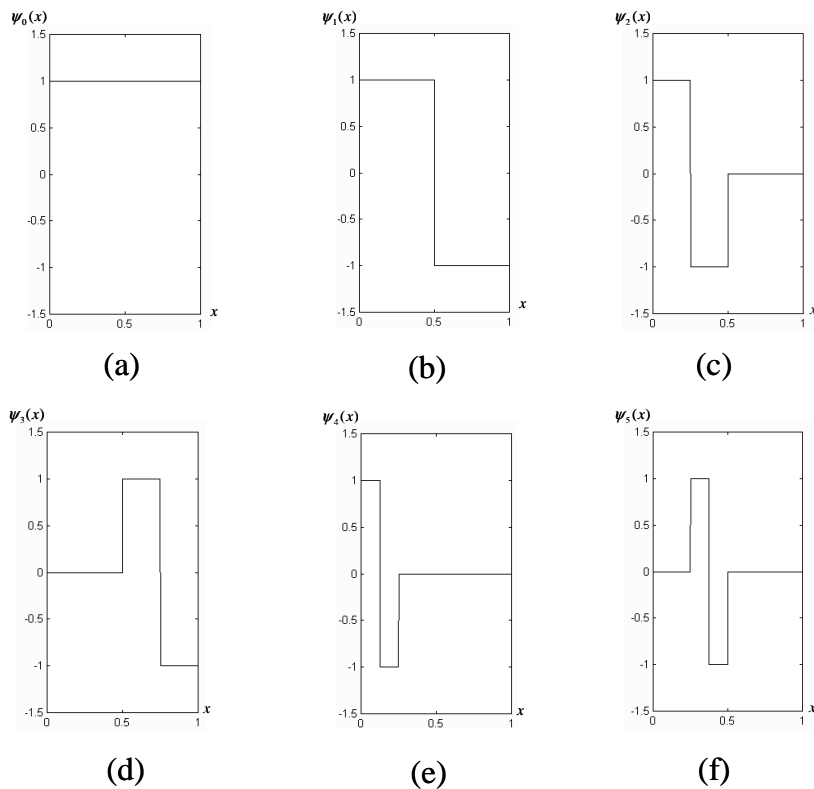


圖 2 Haar 函數族群

除此之外，多層解析理論[27,28]對於空間 $L^2(R)$ 中有系統地建立正交基底小波是十分重要的，其利用尺度變換之分解(Decompose)和合成(Synthesis)技術，先由空間 $L^2(R)$ 中的特定子空間上建立一組基

底，然後利用尺度變換，再將這個子空間中的基底慢慢地一層一層擴充到 $L^2(R)$ 空間上，進而再獲得建立在空間 $L^2(R)$ 中的正交基底。事實上，可將其寫成線性代數關係

$$V_{j+1} = V_j \oplus W_j \quad (5)$$

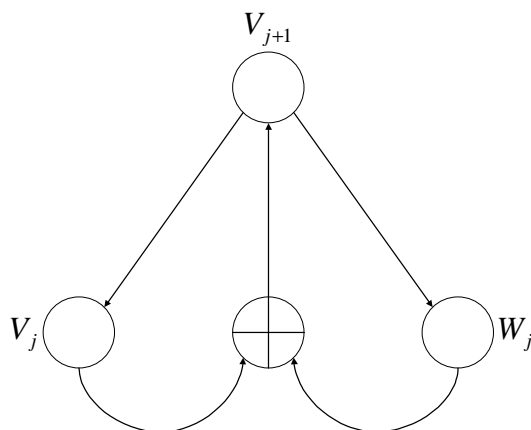


圖 3 兩層尺度間的分解與合成

兩層尺度間的分解與合成關係，如圖 3 所示，意指 V_{j+1} 可以分解成 V_j 和 W_j 兩部分，而 V_j 和 W_j 是彼此互相垂直的子空間，且子空間 W_j 是由正交基底函數 $\{\psi_{j,k}; j, k \in Z\}$ 所產生，而 \oplus 若以向量空間解釋， $+$ 符號表示每個 R^2 中的向量可分解成 R_x 向量以及 R_y 向量， \circ 符號表示 R_x 和 R_y 是互相垂直的向量空間，整體而言， \oplus 符號代表直和的意思。換言之，即為小尺度和大尺度間的轉變，其差異在於小尺度基底函數的函蓋較窄、探測範圍小和精確度高，然而大尺度基底函數的函蓋較寬、探測範圍大和精確度低。若從中剖析多層解析空間可以得到下列特性

- (一) $\dots \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset \dots$ ，亦即各個子空間均可由同一尺度函數經脹縮平移而展開此空間。
- (二) 假設 $f(x) \in V_0$ 則 $f(x-n) \in V_0$ ，同理若 $f(x) \in V_j$ 則 $f(x-n) \in V_j$ ，

代表 $f(x)$ 平移時，亦存在相同子空間上。

(三) 假設 $f(x) \in V_j$ 則 $f(ax) \in V_{j+1}$ ，此說明空間序列中任一空間 V_j ，其基底可由其中另一空間的基底經簡單的脹縮變換而得。

(四) $\lim_{j \rightarrow \infty} V_j = \bigcup_{j=-\infty}^{\infty} V_j$ 於空間 $L^2(R)$ 上是緊密的，亦即

$$\text{clos}_{L^2} \left(\bigcup_{j \in Z} V_j \right) = L^2(R) \text{ 且 } \lim_{j \rightarrow -\infty} V_j = \bigcap_{j \in Z} V_j = \{0\}。$$

(五) 存在尺度函數 $\xi \in L^2(R)$ 且 $\xi_{j,n} = 2^{-j/2} \xi(2^{-j}x - n)$ ，使得 $\{\xi_{0,n} : n \in Z\}$ 為 V_0 之正交基底函數。

多層解析理論可將空間 $L^2(R) = \dots \oplus W_{-1} \oplus W_0 \oplus W_1 \oplus \dots$ ，其基本精神是將空間 $L^2(R)$ 分解成其子空間 W_j 之正交集，亦即歸一化的正交小波基底函數可將空間 $L^2(R)$ 作正交分解，因此空間 $L^2(R)$ 中之任何函數均可以使用正交小波級數來作函數近似。根據方程式(3)與方程式(4)，任何函數 $f(x) \in L^2(R)$ 具有唯一的級數關係 $f(x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle f(x), \psi_{j,k} \rangle \psi_{j,k}(x)$ ，其中 $\langle f(x), \psi_{j,k} \rangle$ 為小波係數。重要的是，存在整數 M 使得 $f(x) \in L^2(R)$ 在 V_M 中可被任意近似，因此假定存在微小常數 $\varepsilon < 0$ 使得

$$\left\| f(x) - \sum_k \langle f(x), \psi_{M,k} \rangle \psi_{M,k}(x) \right\| < \varepsilon \quad (6)$$

也就是 $f(x)$ 和 $\sum_k \langle f(x), \psi_{M,k} \rangle \psi_{M,k}(x)$ 之間的距離趨近於零；亦即

$$f(x) = \lim_{L_1, L_2, U_1, U_2 \rightarrow \infty} \left\| \sum_{j=-L_1}^{U_1} \sum_{k=-L_2}^{U_2} \langle f(x), \psi_{j,k} \rangle \psi_{j,k}(x) \right\| \quad (7)$$

經由多層解析理論推導，可證明正交小波函數具有強大的函數近似能力，此即為各領域紛紛研究小波理論之主要原因。

二、適應型粒子群優化演算法

粒子群優化演算法(Particle Swarm Optimization, PSO)又翻譯為粒子群演算法[33]、微粒群演算法或微粒群優化演算法，其為透過模擬鳥群覓食行為而發展起來的一種基於群體協作的隨機搜索演算法，通常認為它是群集智能(Swarm intelligence, SI)的一種，它可以被納入多主體優化系統(Multi-agent Optimization System, MAOS)，由Eberhart博士和Kennedy博士發明。

如前所述，粒子群優化演算法模擬鳥群的捕食行為。設想這樣一個場景：一群鳥在隨機搜索食物，在這個區域裡只有一塊食物，所有的鳥都不知道食物在那裡，但是他們知道當前的位置離食物還有多遠，那麼找到食物的最優策略是什麼呢？最簡單有效的就是搜尋目前離食物最近的鳥的周圍區域。粒子群優化演算法從這種模型中得到啟示並用於解決優化問題，粒子群優化演算法中，每個優化問題的解都是搜索空間中的一隻鳥，通常稱之為「粒子」，所有的粒子都有一個被優化的函數決定的適應值(Fitness Value)，每個粒子還有一個速度決定他們飛翔的方向和距離，然後粒子們就追隨當前的最優粒子在解空間中搜索。

粒子群優化演算法初始化為一群隨機粒子(隨機解)，然後通過疊代找到最優解，在每一次疊代中，粒子通過跟蹤兩個「極值」來更新自己，第一個就是粒子本身所找到的最優解，這個解叫做個體極值(pbest)，另一個極值是整個族群目前找到的最優解，這個極值是全域極值(gbest)。另外也可以不用整個種群而只是用其中一部分最佳粒子的鄰居，那麼在所有鄰居中的極值就是局部極值，當找到這兩個極值時，粒子根據如下之式子更新本身速度和位置：

$$V_{id}(N+1) = V_{id}(N) \times w + c_1 \times \text{rand}(\cdot) \times [p_{pbest}(N) - x_{id}(N)] + c_2 \times \text{rand}(\cdot) \times [p_{gbest}(N) - x_{id}(N)] \quad (8)$$

$$x_{id}(N+1) = x_{id}(N) + V_{id}(N+1) \quad (9)$$

其中 x_{id} 為粒子位置， V_{id} 為粒子速度， N 為目前疊代次數， p_{pbest} 為局部極值， p_{gbest} 為全域極值， $\text{rand}(\cdot)$ 為介於0至1間之隨機變數， w 為慣性權重值， c_1 及 c_2 為正值加速係數。整個粒子群優化演算法設計流程可以整理為下列步驟：

- (一) 評估每一個粒子的適應函數值。
- (二) 適應函數值與粒子本身的最佳函數值記憶比較，而粒子依照個體最佳變數記憶去修正下一次變數搜尋的粒子速度。
- (三) 個體最佳函數值與群體最佳函數值的最佳化程度做比較，如個體最佳優於群體最佳值，則修正群體最佳函數值的變數記憶，同時每個粒子依照群體最佳變數記憶來修正下一次變數搜尋的粒子速度。
- (四) 利用隨機的方式產生出更新粒子的位置與速。
- (五) 若滿足終止條件就中止運作，否則重複步驟二至五。

雖然粒子群優化演算法具有很強的尋求最佳解的能力，但粒子群優化演算法中有些參數必須由使用者自行設計或是給予定值，然而參數決定的好壞也會對於最後的估測結果造成影響，此外為了加速演算法的搜尋速度，本計畫在此提出適應型粒子群優化演算法 (Adaptive Particle Swarm Optimization, APSO) 來解決上述問題，適應型粒子群優化演算法將針對慣性權重值(w)以及加速係數(c_1 及 c_2)做設計。慣性權重值主要是影響演算法之收斂行為，其可選擇設定為定值或是隨著疊代做調整，若能挑選到適當的慣性權重值，其將可

讓演算法在全域以及局部搜尋取得一個平衡，使其能加速演算法找到最佳解，適應型粒子群優化演算法在此將採用全自動調整的方式設計慣性權重值，其會隨著疊代數去調整其搜尋範圍，其設計如下之式子所示：

$$w(N) = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) * N / N_{\max} \quad (10)$$

其中 w_{\max} 和 w_{\min} 分別代表慣性權重值之最大與最小值，其範圍定義在 0 至 1 之間，而 N_{\max} 代表最大的疊代數。

加速係數(c_1 及 c_2) 主要是推動粒子靠近個體極值(pbest)與全域極值(gbest)的力，該如何設計加速係數將會對最後搜尋結果產生很大的影響，因此適應型粒子群優化演算法在此提出隨著疊代次數不斷去改變加速係數的適應性調整法，其設計如下之式子所示：

$$c_1 = 2.5 - N / N_{\max} \quad (11)$$

$$c_2 = 0.5 + N / N_{\max} \quad (12)$$

與先前所提到常見的演算法做比較，適應型粒子群優化演算法優勢在於計算成本低、簡單容易實現並且沒有許多參數需要調整，以適應型粒子群優化演算法與傳統基因演算法做比較，可發現粒子群優化演算法的資訊共用機制是很不同的，在基因演算法中，染色體互相共用資訊，所以整個種群的移動式比較均勻的向最優區移動，在粒子群優化演算法中，只有gbest(或pbest)給出資訊給其他粒子，這是單向的資訊流動，整個搜索更新過程是跟隨當前最優解的過程，與基因演算法比較，在大多數情況下，所有粒子可能更快的收斂於最佳解。本計畫適應型粒子群優化演算法估測架構之再生能源發電量估測程式流程如圖4所示。

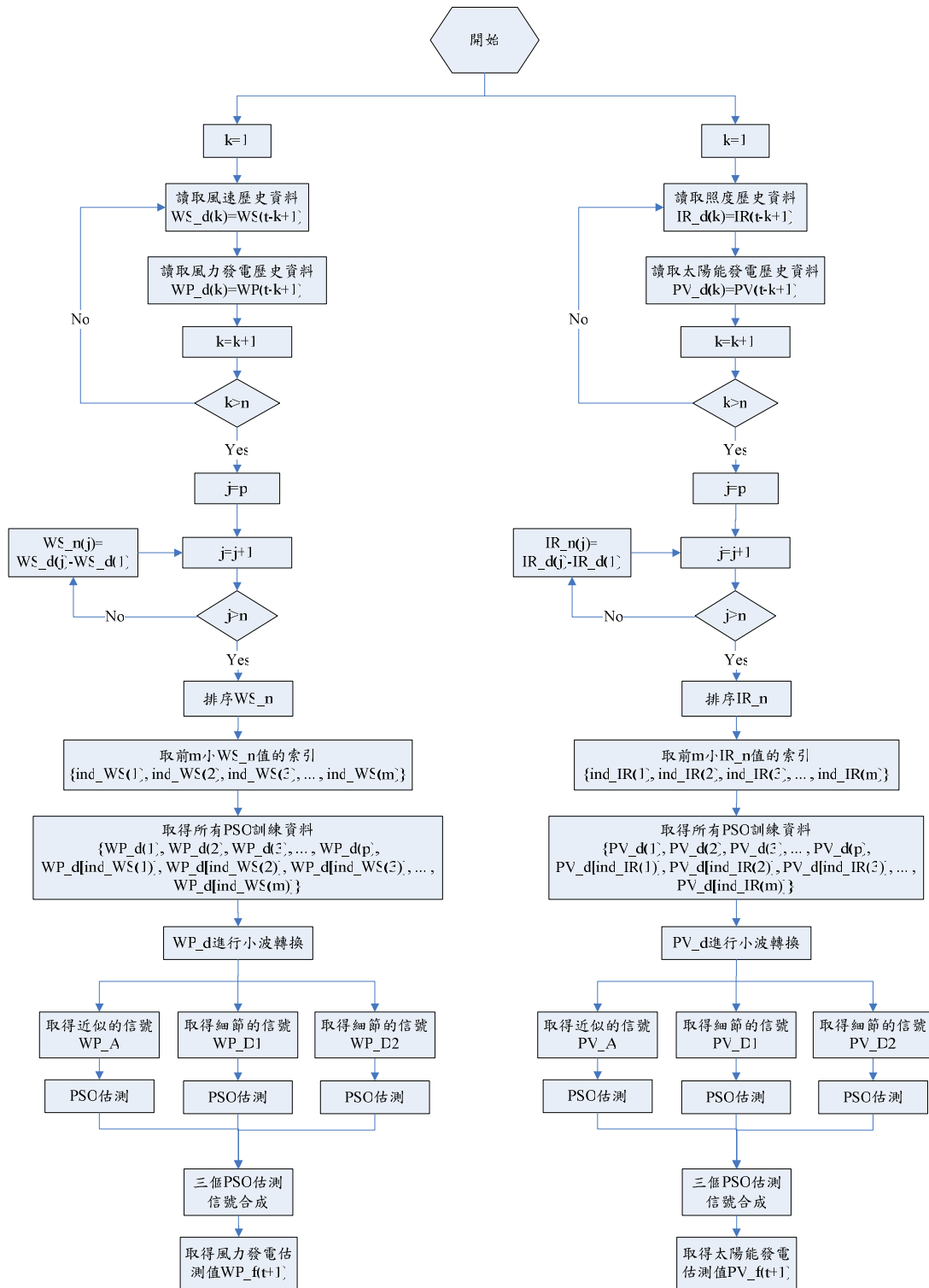


圖 4 適應型粒子群優化演算法估測架構之再生能源發電量估測程式流程

此流程先取得n筆風力發電量及太陽能發電量歷史資料，並於其中取得與現在風速最接近的m筆風力發電量歷史資料，而太陽能發電

量估測則取得與現在照度最接近的m筆太陽能發電力量歷史資料，並同時取得與現在時間最接近的p筆歷史資料，總共為m+p筆資料分別當作風力發電量估測及太陽能發電量估測的訓練資料，接著利用小波轉換將所選取風力發電量歷史資料及太陽能發電量歷史資料分別分解成一個近似的信號及兩個細節的信號，再分別利用三個粒子群優化演算法估測近似的信號及細節的信號，最後再將三個估測的信號合成，得到風力發電及太陽能發電的估測值。

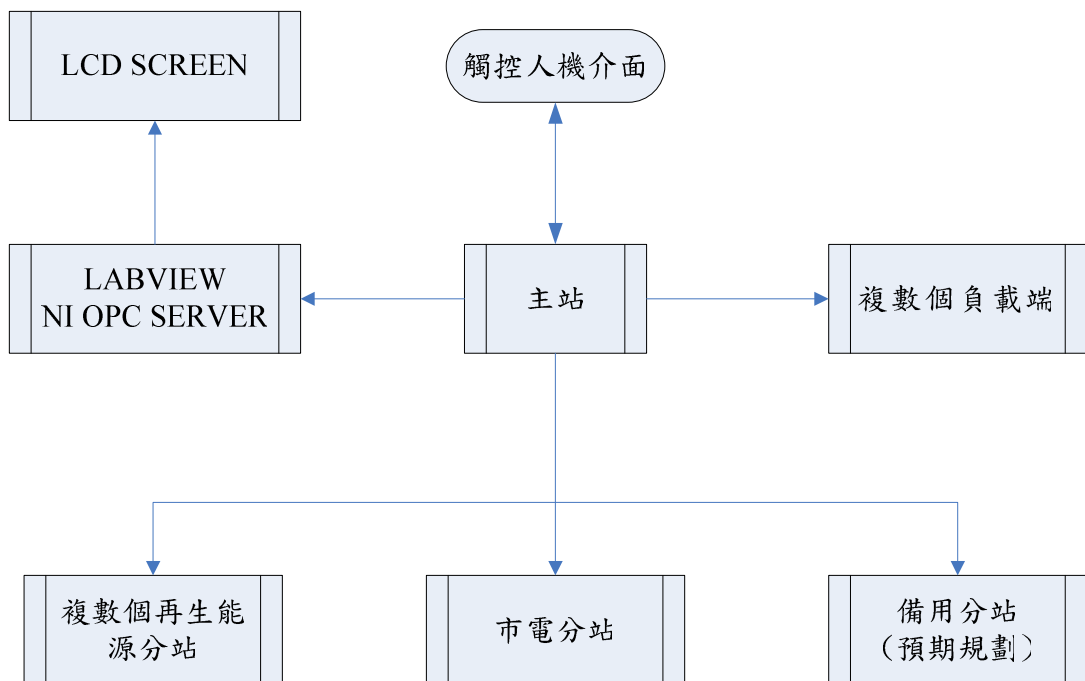


圖 5 智慧型電力監控系統基本控制架構

三、智慧型管理

智慧型電力調度與最佳化負載管理系統除擷取各種能源來源之電力資訊外，更可因應負載端電力需求作最佳化經濟調度。本計畫所規畫之智慧型電力調度與最佳化負載管理系統採用全域電力監控配合雙層改良式架構，由於全域電力監控可調控與規劃範圍較廣，因此比局部控制方法更具有伸縮性，而雙層架構雖有對負載變動反

應差之問題，但其成本比多層架構低，若能將雙層架構進行改良，例如將局部設施使用有規劃與執行能力的控制器使得全域控制器與局部控制器之間有良好溝通，即可解決多層架構成本太高且擁有多層架構對負載變動反應快的優點，如此才能有效率的執行調度命令與解決負載變動的問題。本計畫所提之全域電力監控配合雙層改良式架構如圖 5 所示，主要是透過全域電力監控配合雙層架構來進行調度命令的執行、資料傳遞與即時監控以達到能源供給與負載需求之最佳化管理。

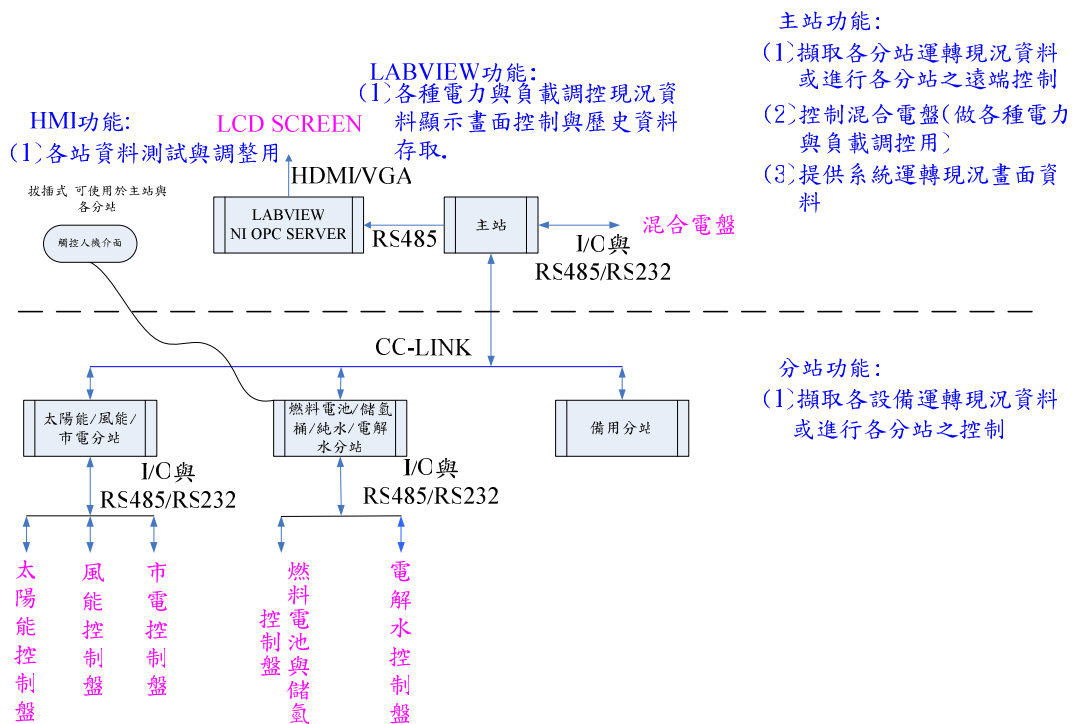


圖6 智慧型電力監控系統實施例

本計畫透過實驗廠址驗證所研製之智慧型電力調度與最佳化負載管理有效性，實施例控制架構及功能如圖 6 所示，包含一主站，可控制三個分站，包括含太陽能/風能/市電分站、燃料電池/儲氫/純水/電解水分站以及備用分站(可供未來擴充其他能源之用)，採取友善使用者設定程序進行電力監控調度，使用 PLC 模組來執行控制程

式以及採用人機介面來輸入控制參數與監控運作時狀況，並規劃多個負載端進行最佳化負載管理測試。可透過 LabView 規畫程式，利用 OPC 軟體與 RS485 通訊介面與 PLC 控制系統作資料傳輸，LabView 收集 PLC 資料後建立即時圖檔並將資料彙整成一個 Excel 檔案成為歷史資料庫可進行歷史資料搜尋，並規劃系統整合工程畫面架構，可動態顯示能源電力輸出曲線、負載使用狀況以及即時電力節省狀況。

參、主要發現與結論

一、資料分析

本計畫利用小波轉換對歷史資料進行分析，圖 7 及圖 8 分別為風力及太陽能發電量歷史資料的分析結果，由圖可發現原始的歷史資料(signal)可利用小波轉換分解成一個歷史資料近似(approximation)的部分及兩個歷史資料細節(detail)的部分。

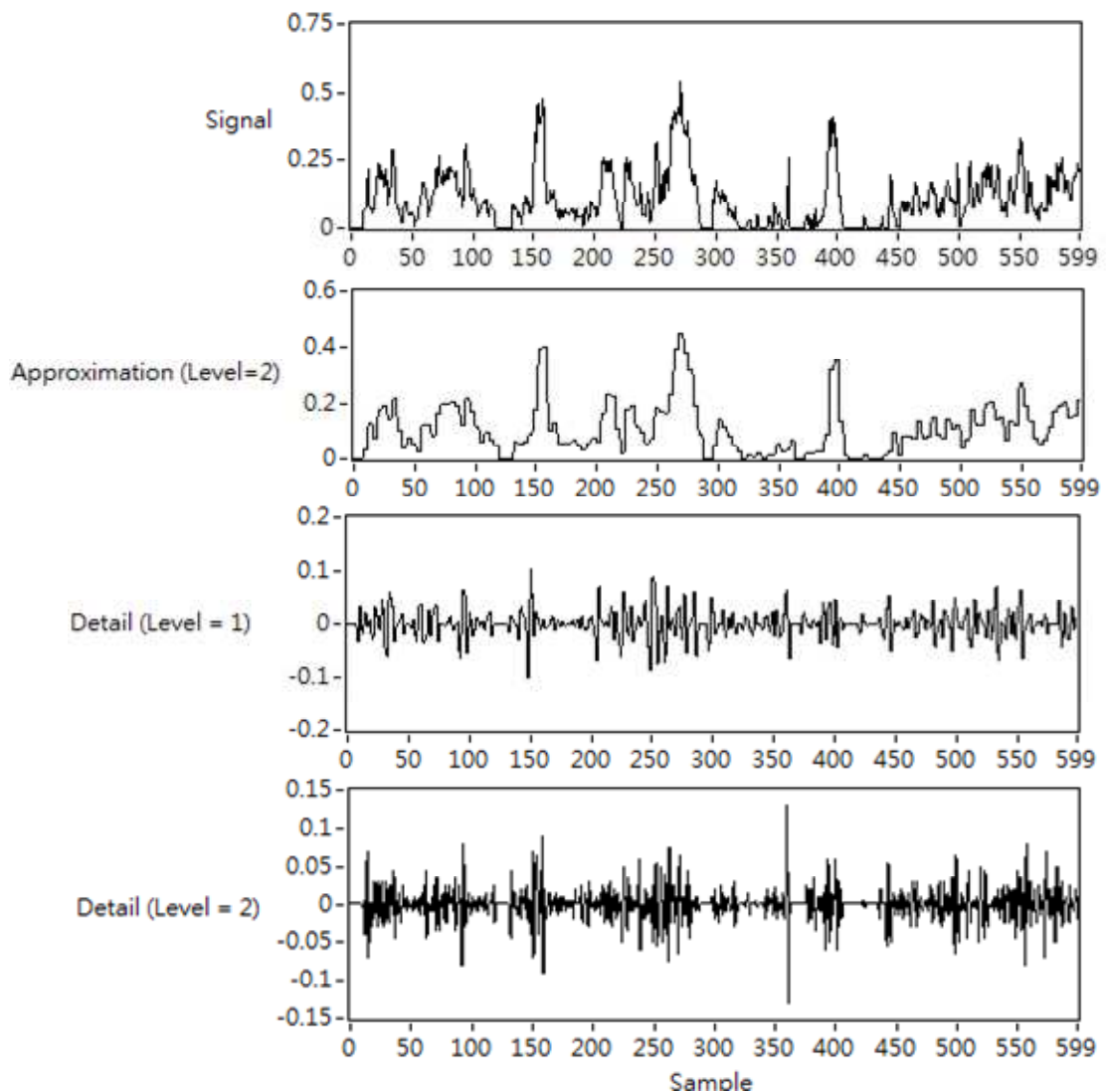


圖 7 風力發電量歷史資料的分析結果

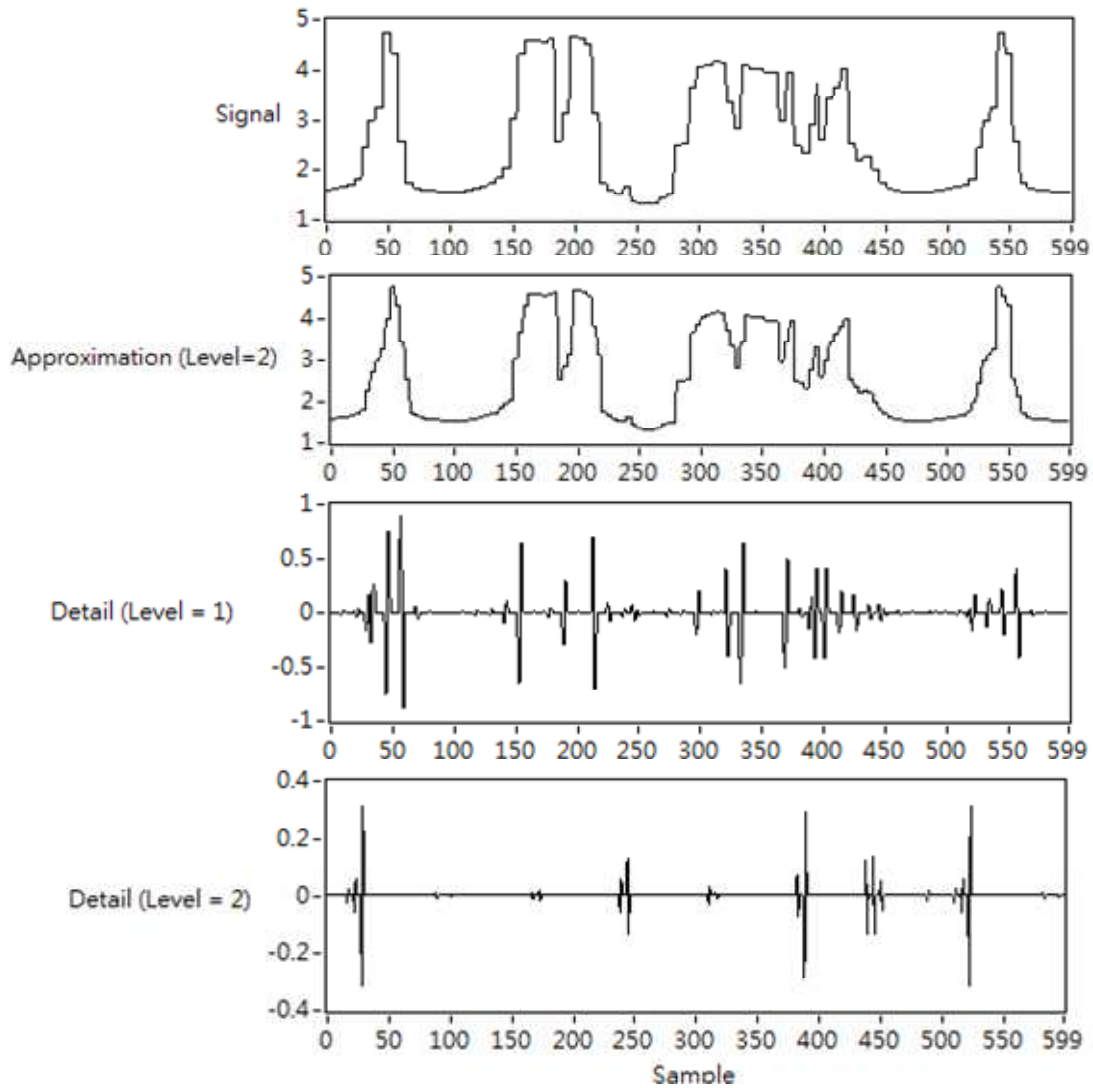


圖 8 太陽能發電量歷史資料的分析結果

二、適應型粒子群優化演算法估測結果

本計畫利用 LabView 軟體實現風力發電量及太陽能發電量之估測，如圖 9 所示，而粒子群優化演算法分別估測風力發電量如圖 10(a) 所示及太陽能發電量如圖 10(b) 所示，由圖 10 可發現適應性粒子群優化演算法可準確估測風力及太陽能的發電量。本計畫所提出之適應型粒子群優化演算法估測架構是透過平均絕對值誤差 (Mean Absolute Error, MAE) 來評斷估測精確度，其判斷式可表示如下：

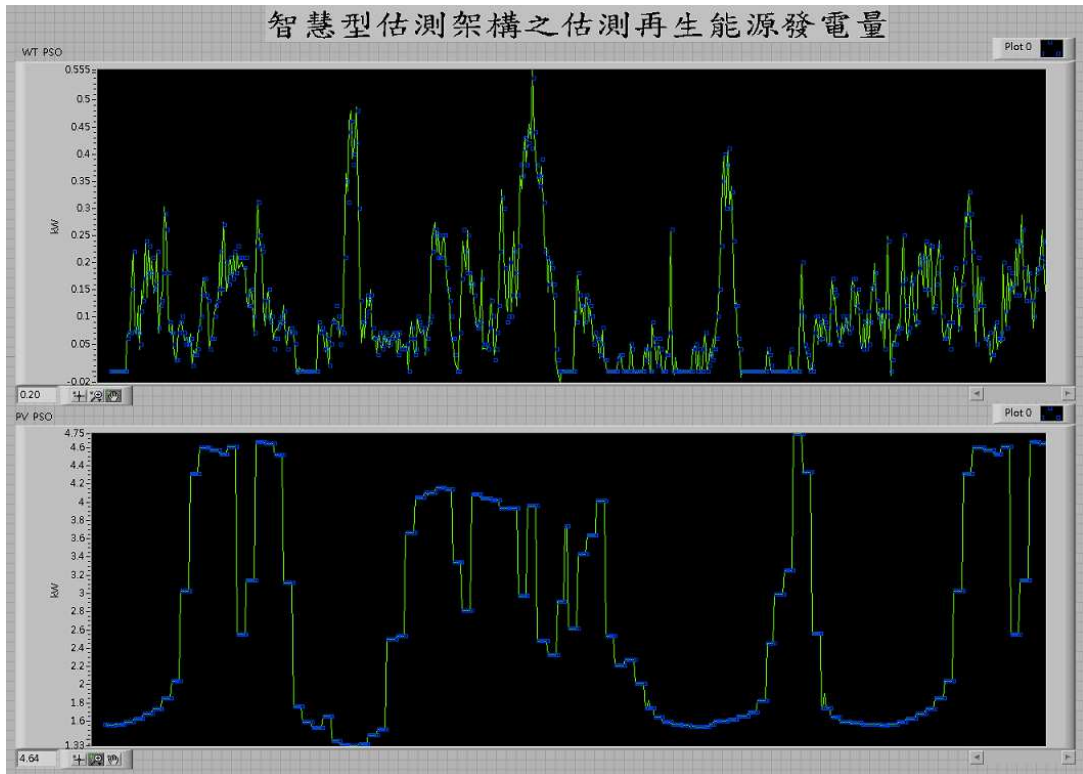


圖 9 LabView 軟體實現風力發電量及太陽能發電量之估測

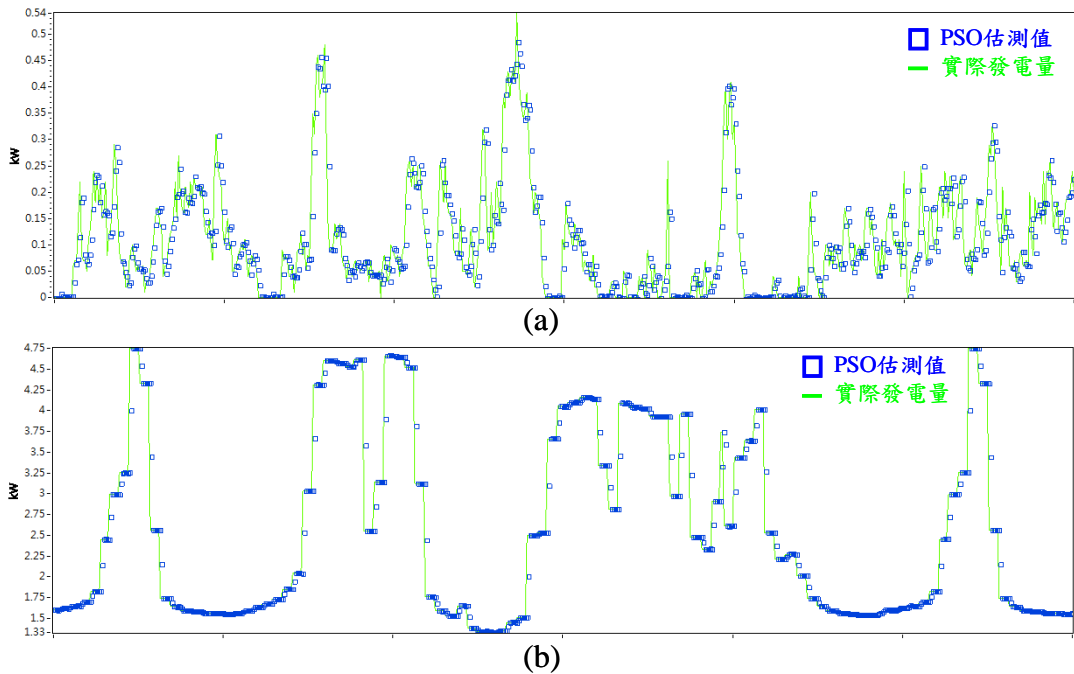


圖 10 適應型粒子群優化演算法估測結果: (a)風力發電量估測; (b)太陽能發電量估測

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |x_f(t) - x_r(t)| \quad (13)$$

其中 N 為取樣數目， $x_f(t)$ 代表估測的風力發電量或太陽能發電量， $x_r(t)$ 是代表真實的風力發電量或太陽能發電量。本計畫所提出適應型粒子群優化演算法估測架構之風力發電量估測 MAE 值為 0.0357，而太陽能發電量估測 MAE 值為 0.0702，相對於其平均絕對值誤差率可以低於 2%。為比較估測性能，本計畫另利用粒子群優化演算法估測，但不使用小波轉換分析歷史資料，可得到風力發電量估測 MAE 值為 0.0397，而太陽能發電量估測 MAE 值為 0.0815，因此可發現當發電量變化劇烈時，本計畫所提出之適應型粒子群優化演算法估測架構可明顯改善傳統粒子群優化演算法估測性能 10% 以上。此外，為了驗證本計畫所提出之適應型粒子群優化演算法估測架構運算效率，統計適應型粒子群優化演算法估測計算及收斂時間為 0.1716 秒，相較於傳統模糊類神經網路估測架構需要 0.6396 秒，減少 73.17% 之運算與收斂時間。



圖 11 LabView 規劃程式

三、電力監控調度

本計畫所規畫之智慧型電力調度與最佳化負載管理系統，利用 LabView 規劃程式進行負載管理如圖 11 所示，並且限制台電用電量分別於 1.2kW、2kW 及 1.7kW，進行負載的調度如圖 12 所示，而設定調控優先順序為電燈、電風扇、窗型冷氣機，可以看出經由調整用電限制值，可以依調控優先順序調控使用家電，使得實際用電量不超過用電量設定值。電量節省比例試算如圖 13 所示，資料區間為上午 11:00 至下午 13:00(合計 2 小時)，假定電燈、電風扇、電腦及窗型冷氣機完全使用，家電經過調控而未使用的電量加上當時風力發電與太陽能發電饋回台電之電量(紅色線)等於自動調控所節省的電量(綠色線)。使用總功率：2.884kW[電燈(0.504kW)、電風扇(0.18kW)、電腦(0.2kW)及窗型冷氣機(2.0kW)]；使用總度數：2.884*2=5.768kWh；依據圖 10 顯示綠色線數值加總為 11833.309kW(每秒取一數據)，時間軸為兩小時(7200 秒)；換算所節省之電量： $(11833.309) * 1 / 7200 = 1.644\text{kWh}$ ；電量節省比例： $1.644 / 5.768 * 100\% = 28.5\%$ 。

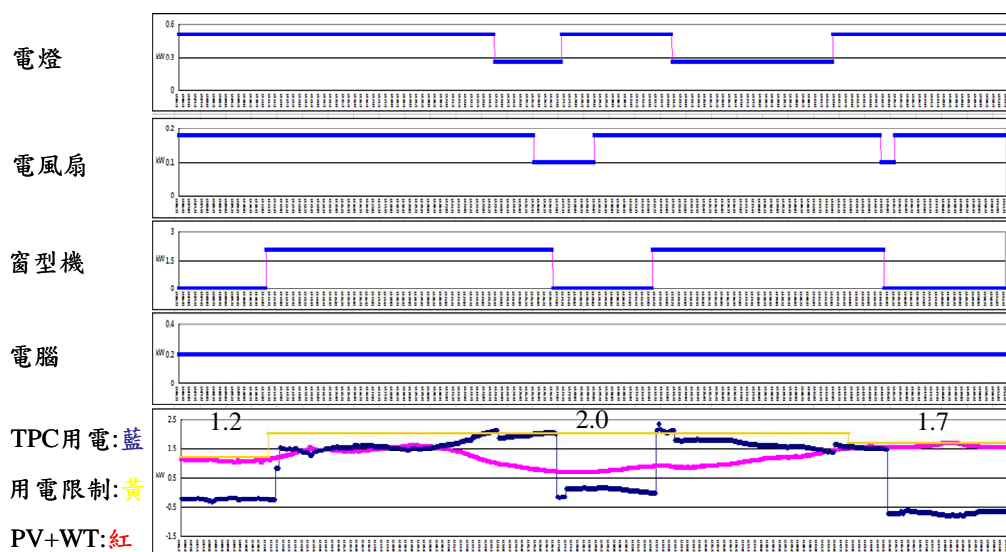


圖 12 負載調度實作結果

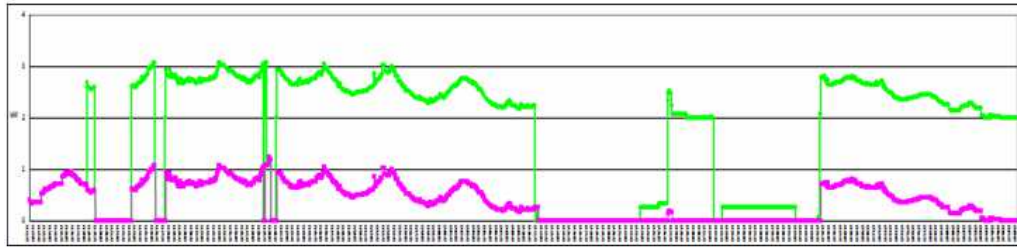


圖 13 電力調度節省電量計算比較

四、結論

本計畫「智慧型微電網電力調度與最佳化負載管理架構」完成一再生能源發電量估測機制，其可成功估測風力發電量及太陽能發電量，並完成智慧型電力監控系統及電力調度與最佳化負載管理系統，因此可擷取各種能源來源之電力資訊外，更可因應負載端電力需求作最佳化經濟調度。

此外本計畫「智慧型微電網電力調度與最佳化負載管理架構」符合以下技術指標：(1)再生能源發電量預測之平均絕對值誤差率可以低於 2%；(2)使用適應型粒子群優化演算法進行預測所需之資料量較少，比傳統模糊類神經網路預測方式減少 10% 以上之運算與收斂時間；(3)透過多種控制情境來測試以動態發電經濟模型為基礎的電力調度計畫，有效達到節省 15% 以上電力使用之功效；(4)適時的調整或轉移尖峰負載使用量，以提升能源使用效率，且不影響使用者生活習慣；(5)控制系統對於預測錯誤的即時反應機制可以減少電力的浪費。未來可將相關技術轉移至能源管理廠商或是研發單位，更進一步研發提供使用端設置以及使用智慧型電網時可達到最佳經濟效益與用電效率。

肆、參考文獻

- [1] W. El Khatam and M. M. A. Salama, “Distributed generation technologies, definitions, and benefits,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 71, pp. 119-128, 2004.
- [2] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, and G. Strbac, *Embedded Generation*. London: The Institution of Electrical Engineers, 2000.
- [3] H. L. Willis and W. G. Scott, *Distributed Power Generation: Planning and Evaluation*. New York: Marcel Dekker, 2000.
- [4] E. A. DeMeo, W. Grant, M. R. Milligan, and M. J. Schuerger, “Wind plant integration: costs, status, and issues,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 3, no. 6, pp. 38-46, 2005.
- [5] 張永瑞，核能研究所再生能源微電網規劃及研發現況簡介，電工月刊，第15~31頁，2011年。
- [6] R. Caldon, A. Patria, and R. Turri, “Optimisation algorithm for a virtual power. plant operation,” *Int. Univ. Power Eng. Conf.*, vol. 2, pp. 1058–1062, 2004.
- [7] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. Hoboken, NJ: Wiley, 2004.
- [8] J. Scott, P. Vaessen, and F. Verheij, “Reflections on smart grids for the future,” Dutch Ministry of Affairs, 2008. [Online]. Available: <http://www.kema.com/nl/papers/Reflections.aspx>.
- [9] Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets 2002.
- [10] A. Molderink, V. Bakker, M. Bosman Johann, L. Hurink, and G. J. M. Smit, “Management and control of domestic smart grid technology,” *IEEE Trans. Smart*, vol. 1, no. 2, pp. 109-119, 2010.

- [11] T. J. Lui, W. Stirling, and H. O. Marcy, "Get smart," *IEEE Power Energy Mag.*, pp. 66-78, 2010.
- [12] N. Ruiz, I. Cobelo, and J. Oyarzabal, "A direct load control model for virtual power plant management," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 959-966, 2009.
- [13] A. Gomes, C. H. Antunes, and A. G. Martins, "A multiple objective approach to direct load control using an interactive evolutionary algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 3, pp.1004-1011, 2007.
- [14] D. D. Weers and M. A. Shamsedin, "Testing a new direct load control power line communication system," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 2, no. 3, pp.657-660, 1987.
- [15] C. M. Chu, T. L. Jong, and Y. W. Huang, "A direct load control of San Francisco, air-conditioning loads with thermal comfort control," *IEEE PES Gen. Meet. CA.*, 2005.
- [16] L. Costa and G. Karinotakis, "A stochastic dynamic programming model for optimal use of local energy resources in a market environment," *IEEE Lausanne Power Tech.*, pp.449-454, 2007.
- [17] A. Mohsenian-Rad, V. W. S. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, and A. Leon-Garcia, "Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, pp. 320–331, 2010.
- [18] J. Kok, C. Warmer, and I. Kamphuis, "Powermatcher: Multiagent Control in the electricity infrastructure," *Int. Joint Conf. Autonomous Agents Multiagent Syst.*, pp. 75-82, 2005.
- [19] M. Hommelberg, B. van der Velde, C. Warmer, I. Kamphuis, and J. Kok, "A novel architecture for real-time operation of multi-agent based coordination of demand and supply," *IEEE Power Eng. Soc.*

- Gen. Meet*, pp. 1-5, 2008.
- [20] I. Daubechies, “Orthonormal bases of compactly supported wavelets,” *Communications on Pure and Applied Mathematics*, vol. 41, pp. 909-996, 1988.
- [21] Y. Meyer, “Principe d’incertitude bases hilbertiennes et algebres d’operateurs,” *Seminaire Bourbaki*, no. 662, 1985.
- [22] M. Unser, “Approximation power of biorthogonal wavelet expansions,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 44, no. 3, pp. 519-527, 1996.
- [23] A. Cohen, I. Daubechies, and J. Feauveau, “Bi-orthogonal bases of compactly supported wavelets,” *Communications on Pure and Applied Mathematics*, vol. 45, pp. 485-560, 1992.
- [24] A. Cohen, and I. Daubechies, “On the instability of arbitrary biorthogonal wavelet packets,” *SIAM Journal on Mathematics Analysis*, vol. 24, pp. 1304-1354, 1993.
- [25] C. DeBoor, R. A. DeVore, and A. Ron, “On the construction of multivariate (pre)wavelets,” *Constructive Approximation*, vol. 9, pp. 123-166, 1993.
- [26] S. D. Riemenschneider, and Z. Shen, “Wavelets and pre-wavelets in low dimensions,” *Journal of Approximation Theory*, vol. 71, pp. 18-38, 1992.
- [27] 單維彰, *凌波初步*, 全華科技圖書股份有限公司, 1999.
- [28] S. G. Mallat, “A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, no. 7, pp. 674-693, 1989.
- [29] C. K. Chui, and J. Z. Wang, “A cardinal spline approach to wavelets,” *Proceedings of the American Mathematical Society*, vol. 113, pp. 785-793, 1991.

- [30] C. F. Chen, and C. H. Hsiao, "Haar wavelet method for solving lumped and distributed parameter systems," *IEE Proceedings - Control Theory Applications*, vol. 144, no. 1, pp. 87-94, 1997.
- [31] 秦前清, 楊宗凱, *實用小波分析*, 西安電子科技大學出版社, 1994.
- [32] N. Sureshababu, and J. A. Farrell, "Wavelet-based system identification for nonlinear control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44, no. 2, pp. 412-417, 1999.
- [33] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *IEEE Int. Conf. Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942-1948, 1995