

先進讀表基礎架構下之零碳電能建築規劃

凌拯民

南臺科技大學電機工程系

jmling@stust.edu.tw

摘要

在建築節能設計需求下，利用情境式最佳化規劃技術，本研究發展了一套應用於未來淨零能耗建築之電能/熱水儲存設計及經濟效益規劃分析工具。當住宅建築內設置了可同時提供冷氣及住戶熱水的高效率節能空調熱泵電熱水器儲熱、太陽能光電發電及蓄電池儲電設備後，利用先進讀表基礎架構下的儲電/儲熱的能源管理系統，本工具可分析在未來住宅型微電網中數種電能匯率變化情境下，探討於不同用戶消耗電能型態/熱水使用習性下，如何建置出符合經濟效益的淨零能耗建築內設備最佳容量配置組合。考量的餘電購回電價匯率情境包括了，用戶平均電價、再生能源固定電價躉購價格及需量時間電價。面對的諸多重要系統設計狀況變數的不確定特性，利用長期大量的氣象時序數據納入淨零能耗建築電能/熱能的情境規劃架構下，可有效分析當未來住宅型微電網運轉後，規劃合理經濟效益下的再生能源電能供應管理系統，將有助於未來臺灣在推動零碳住宅型微電網的重要參考。

關鍵詞：先進讀表基礎建設、淨零耗能建築、餘電購回、時間電價、情境分析

Planning of Net-Zero-Electrification Building in the Advanced Metering Infrastructure

Jeeng-Min Ling

Department of Electrical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

Since energy-saving buildings are in great demand, an economic analytical tool with optimal scenario planning is developed to design a future net zero energy building in this research. This building can store both electrification and heated water. Its deployment of a high efficiency energy-saving heat pump combines the following functions: air conditioning, electric water heating, photovoltaic generation and battery storage. This can also be constructed under an advanced metering infrastructure. Besides, this tool can measure how to plan the optimal deployment in this zero-carbon electrification building with micro-grid according to the household's electricity or water heating use habits. Different net energy metering scenarios here include electricity tariffs, feed-in tariffs, time of use tariffs, load profiles and water heating habits. By integrating the long-term time series of meteorological data into the proposed scenario planning of this net zero energy building, the analysis tool can well describe the uncertainty in some state variables and achieve a cost-effective net zero energy buildings design. It is an important prototype to promote net-zero-electrification buildings and micro-grid in Taiwan.

Keywords: Advanced Metering Infrastructure, Net-Zero-Electrification Buildings, Net Energy Metering, Time of Use Tariff, Scenario Analysis

壹、前言

一、研究目的與背景

對於過度使用石化燃料造成污染，導致溫室效應及各式天災及極端氣候加劇，各國均積極尋求各種方案試圖解決，因而全力發展「永續能源」與「節能減碳」等相關技術的研發受到全球矚目。各國回應諸多氣候協議的具體作法，便是在能源總供應中大幅提高再生能源所佔的比例，根據國際能源總署(IEA)2014年 Energy Technology Perspectives 資料顯示，為避免地球平均溫度升高不要超過攝氏 2 度，全球再生能源發電滲透率至 2025 年必須達到全球能源供應量的 27% [1]，關於再生能源推廣方面，近年全球積極發展太陽光電市場的國家，已由德國、英國、印度等國轉向由中國、日本、美國帶頭呈現大幅成長的態勢。歐美日等國除早期大量興建的公共式/電廠式太陽能發電系統外，近幾年已積極朝向擴展屋頂型住商/農業/工業用戶，及結合建築物矽晶/薄膜式太陽光電的中小型分散系統建置。未來中小型太陽光電(photovoltaics, PV)系統的前景，隨著國內、大陸及國際眾多廠商的積極投入，PV 模組的售價不斷下降，因此不管是屋頂型或適合與建築物結合的太陽能單獨供電，或搭配其他微小型風機或其它再生能源供電系統的混合運轉，將是分散式能源相關應用中發展最快速，也是包括臺灣在內許多國家積極希望推廣快速成長的一塊 [2-3]。

如何有效地利用資通訊技術建立先進讀表基礎建設(advanced metering infrastructure, AMI)，進行輸電/配電系統中重要設備的運轉監控，並在一些重要配電系統中建立不同規模的微電網(micro grid)，用以重新檢視分配新併網的分散式再生能源與傳統集中式電力及熱量等能源的輸配，達到電力能源區域供需平衡並降低再生能源併網帶來的系統衝擊，是近期世界各國在推動智慧電網(smart Grid)相關技術發展的重要核心原因 [4-5]。除了全球暖化造成的極端氣候問題外，日本 311 地震造成不可預期的福島核災後，歐美日先進國家已不再一廂情願的寄望核能帶來的減排效益，反而更加積極地推動再生能源，使得建置具全面監控調度功能的全新電網的實質壓力不斷浮現。事實上，近年來許多國家已將智慧電網建置列為國家能源戰略的重要部分，不斷投入並持續頒布相關投資補助與示範計畫 [6]，昭示了其未來必然發展的重要趨勢。

世界各國對智慧電網推動的主要原因及發展目標各有不同，已開發國家原因希望推動此新型電網，解決再生能源併網比例增加造成的衍生問題及推廣節能技術。在此目標下發展具雙向通訊/監控功能的 AMI 及微電網架構，實施電力需求面為主的節能管理措施：包括時間電價(time-of-use, TOU)、需量反應(demand Response, DR)、家庭/建築能源管理系統(HEMS/BEMS)。如美國 AMI 系統的建置即十分重視後端/雲端應用服務的開發，諸如導入時間電價、節能技術、運用 AMI 資料強化電網管理等；日本將重點放在配電系統負載用電端的區域智慧能源管理系統，包括 HEMS/BEMS、推廣需量反應計畫與建置分散式發電系統 [6] 等。目前智慧電網內先進讀表基礎建設技術發展的趨勢顯示，家庭住宅將成為結合嵌入式監控設備與通訊技術，落實能源智慧化與控制調節之最佳場所。透過具有資通訊功能的智慧電表、家庭能源管理系統、智慧家電等新式設備，在住商中小型負載內有效量測各用戶用電設備電能使用狀況，再經由智慧電網先進讀表基礎建設的遠端/近端雙向互動通訊，在近端家庭能源管理系統中結合遠端傳回的需量反應的時間電價管理策略，達成調節能耗進達到終極「零碳建築」內零碳電能的目標。

與此再生能源逐漸增加滲透率的併行配合推動策略，則是大力鼓勵節能管理技術的研發，為了加速節能的新視野及推動相關商機，日本政府明確定出 HEMS 普及目標，將於 2030 年導入 5000 萬戶。2012 年推出「能源管理系統導入促進事業補助金」，HEMS 與 BEMS 補助金合計 300 億日圓；2014 年加碼推出「HEMS 設備導入支援事業」，HEMS 與零碳建築(zero energy building, ZEB)共 50 億日圓，另外補助 40.3 億日圓對 1.4 萬家庭用戶進行 HEMS 資訊應用實驗計畫 [6]，挖掘 HEMS 資料商業化應用方向。臺灣能源結構、地理條件與社會氛圍與日本極為相似，日後臺灣積極推動類似的策略與技術將是無可避免，此類相關趨勢發展的核心技術亦是本研究的核心重點。2016 年初於美國拉斯維加斯舉辦的國際最大消費性電子展 CES2016，會中最受矚目的電子產品已由去年前的智慧手持式終端及穿戴式裝置，變為具物聯網

功能的家電新興產品，智慧家庭形成的科技發展氛圍與逐漸進化的 HEMS/BEMS 實用趨勢終將勢不可擋；另外家庭能源管理戰場未來將從硬體裝置逐漸移往雲端軟體服務[7-8]，亦會結合居家安全/健康/影音娛樂等資訊，以提昇智慧家庭對消費者的附加價值及服務體系。

若將蓄電儲能設備結合各式轉換器之功率調節器，使其充放電控制與電網系統穩定電壓/頻率的功能聯動，將可舒緩因分散式再生能源滲透率逐漸提高，併入系統造成衝擊並增加微電網穩定性，此類儲能裝置與分散式能源形成必要互補的概念正逐漸興起[9-12]。日本測試研究結果顯示，大規模分散式再生能源產生剩餘電力回賣電力公司後會超過輸電線路容量，因此需要裝設儲能設備以作為緩衝；德、法亦在同時間有類似測試結果的報告，此項結果促使電網級儲能及家用/中小型儲能產品的逐漸興起[12]。全球併網型家用儲能市場目前主要的經費來源為政府政策補助，包含日本、德國，美國加州等，皆有小型示範計畫進行測試[13]，此外為測試智慧電網與提高再生能源利用率，美國與韓國也都針對太陽光電發電系統搭配儲能展開小規模補助及小型示範計畫性能測試。以併網家用儲能系統最蓬勃發展的日本市場為例，儲能產品中以鉛酸電池使用量佔 51% 最高，其次為鋰電池的 47%，安全性較高的磷酸鋰鐵電池則是另一選擇。依據日本的研究報告指出，以往商用戶負載側裝設鋰電池的儲能系統為例，當量產未來達到 5 百萬 kWh 後，價格可降至目前的 1/6[13]；這項研究結果亦對再生能源併網儲能系統的未來市場發展趨勢有正面的幫助。

另一帶動儲能市場成長的原因，則來自於全球太陽光電模組價格的崩跌，導致全球各國再生能源市場之電力收購補助躉購電價費率(feed-in tariff, FiT)不斷下降。雖然再生能源的躉購電價費率目前仍是英國、法國、義大利等世界各國推動再生能源的主要政策，但因各國財政經濟狀況、再生能源的利用率基準所佔比率、電力系統設備運轉維護責任歸屬等諸多因素各國有差異，FiT 的後遺症逐漸呈現，電力環境急需改革。該現象也顯示實施 FiT 制度的國家，已經重新審視自身發展再生能源之極限，而進行政策上的調整。目前全球再生能源政策已有 FiT 採用國減少，而使用「餘電購回/淨能源計量(net energy metering, NEM)」逐年增加的趨勢[14]。餘電購回機制是指用戶優先自己使用再生能源產生的發電量，多餘的電力再饋入電網回賣給電力公司，此機制為美國住商市場推展再生能源的重要驅動經濟因素，可使太陽能發電在與電力公司的零售電價比較後仍有足夠的競爭力，不僅美國其他如印度、澳洲、荷蘭、巴西和中國大陸也陸續實施 NEM 制度[15]。

上述 FiT 下跌趨勢及電價未來可能逐步上漲等多重因素影響下，全球再生能源發電不需要政府補助買回的「市電平價(grid parity)」時代即將正式來臨[14-15]；此趨勢將助長分散式再生能源的穩定且持續地成長，對於未來在 AMI 架構下負載端各住宅用戶具有電能自給自足的零碳(zero carbon)電能微電網的時代應將逐漸成真。臺灣因應此種世界的重要節能減碳趨勢變遷，必須極早規劃上述重要技術的未來相關應用。當先進讀表基礎架構逐漸普及於臺灣的住宅建築內，本論文將研究焦點集中在設計零碳電能建築需求下，如何利用情境式最佳化規劃技術，發展出一套儲電/儲熱的能源管理策略以有效管理電能/熱水儲能設備，包括提供冷氣/熱水節能空調熱泵電熱水器、太陽能光電發電及蓄電池儲電設備，並進行此零碳電能建築的經濟效益分析。研究分析中將考量數種未來住宅型微電網市場中的可能電能匯率變化情境，建置出符合經濟效益的淨零能耗建築內上述各式設備的最佳容量配置組合情況。此研究結果可提供未來在臺灣推動此類零碳電能建築時的重要參考。

二、淨零耗能住宅建築

依據根據國際能源總署及美國能源部再生能源研究所的報告顯示，全球建築物約占用掉人類耗能的 30~40%。以美國為例，一般住商建築消耗了近 40% 自然界取得的初級能源，及高達全國 70% 的電能，其中商業建築對能源消耗的成长速率更遠高於住宅建築[16]，若能發展低能耗甚至淨零耗能建築將可有效進行節能減碳。因此美國能源部於 2007 年提交國會之能源獨立與安全法案(EISA 2007)中，首見對於零能耗商業建築提議並提出相關的規劃藍圖。其中，由能源部主導的產業界中之商業建築節能聯盟，率先針對管轄範圍內之零售商、房地產及醫院節能聯盟分別訂出一個基本的節能比率，目標是希望未來於 2040

年前能夠強制推動半數美國商業建築必須符合「淨零能耗建築(net-zero energy buildings, NZEBs)」的標準，並於 2050 年前達到全數符合[16]。

成立於 1894 年的美國暖氣冷凍空調學會 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE) 是建築技術的權威協會，針對除低層住宅外之各式建築，制定了現今全球普遍採用的國際節能標準 ASHRAE 90.1 [17]，此標準於 2004 年頒佈並分別於 2007、2010 及 2016 年修正擴充其適用/應用範圍，對於製熱、通風、空調和製冷等應用領域內，諸如建築系統、能源效率、室內空氣品質等應用皆有明確的各式節能準則；規範涵蓋的設施包括：建築外部結構、HVAC、生活所需熱水、電力轉換效率及監控、照明、馬達、加壓水泵、電梯等。其實，接受美國能源部技術支援的美國許多各類節能聯盟及學會中之成員，許多早已訂定了比 ASHRAE 90.1 更嚴格的各式節能標準。美國建築師學會(AIA)公布的 AIA2030 Challenge，便希望於 2030 年既有舊建築達到 50% 節能，而新建築排碳為零的完全碳中和目標[18]。美國加州公用事業委員會為了加速達成節能減碳的目標，率先於 2009 年制定了「能源行動計畫」來響應 AIA 的規劃，希望於 2020 年州內所有家用住宅新建物為淨零能耗建築，而新建商業用建物於 2030 年達到此目標[17]。歐洲議會的工業及能源委員會，於 2009 年 4 月跨黨派投票一致通過重新修正它們 2002 年通過的建築能源性能管理法規，並於隔年公布的建築能源準則 2010/31/EU(energy performance of buildings directive)，主要內容是規範並希望所有歐盟的成員國於 2019 年建成的新公共建築物及 2021 年的新建築物，必須能夠自行產生大部份自身所消耗的能源[19-21]。

美國能源部的國家再生能源研究室(NREL)最早於 2006 年報告定義淨零耗能建築(net-zero energy buildings, NZEBs)，即建築物本身整年使用掉的能源必須要與再生能源整年自行產生的能源一樣，意味著這些建築物在居住使用時不會增加大氣中溫室氣體的含量[22]。淨零耗能建築這種零耗能(zero energy)的全新理想觀念，亦可稱為零碳建築、零淨能源(zero net energy)建築、零建築(net zero building)等不同名稱[23]。本研究希望從「電機」的觀點，結合日益普及的分散式再生能源發電系統及儲能設備，在進行有效的能源管理/調度，設計出合理成本的淨零耗能建築。當然這類零耗能(zero energy)的全新理想觀念，牽涉諸多定義上及對零淨能源量測校準標準上的不同認定方式，例如淨零耗能建築供給消耗能源平衡的能源量測，應以何值作為標準即有諸多不同之認定，包括：最終能源、全部初級能源、非再生初級能源、碳排放量、焓(exergy)或能源的價格；對於淨零耗能建築到底是使用源至何處的能源，亦或有數種不同分類認定，包括：建築物本身架設之發電能源、建築物基地內(on-site)之發電能源、建築物基地外(off-site)之可再生能源、非來自建築物基地內之能源供應系統[23-24]。每種淨零耗能建築定義皆有其不同考量點，如何將這些零耗能基本精神納入零碳/綠/永續建築物的設計過程才是關鍵[24]，因此本研究並不特別針對諸多不同 NZEBs 定義或量測驗證機制特性進行探討，主要將採用國際期刊引用較多的 NREL 報告的淨零耗能建築定義進行 NZEBs 的設計。

臺灣屬於亞熱帶區域，傳統歐美日普遍使用之高效率的暖通空調(heating, ventilation and air conditioning, HVAC)設備設備中暖氣功能，在臺灣真正使用的時機不多，因此能夠回收空調冰水機/壓縮機散熱之廢熱或屋外熱能，加熱產生建築物內生活/洗滌熱水的具熱泵功能電熱水器設備，除了可減少空調產品廢熱排放造成的城市熱島效應外，還能節省電熱器的電能消耗。此類空調設備結合具熱泵功能的電熱水器(air conditioner with heat pump water heater, ACWH)(簡稱複合式空調熱泵電熱水器)，能夠有效利用冷熱兩端的能源，提昇空調冷氣系統及電熱水器的能源效率。臺灣一些辦公大樓、豪宅、機關學校宿舍已有實際應用的案例[25]，但隨著市面上日立(Hitachi)新推出之複合式空調設備[26]，即是針對亞熱帶區域使用的小型高能耗效率結合空調的電熱水器，在本研究 NZEBs 的設計規劃中將採用此類設計，取代傳統使用液化天然氣的熱水器及電熱水器。

三、最佳情境規劃技術

NZEBs 的設計規劃研究文獻中，大多數皆針對「建築結構」及「建築設計」的諸多建築物內部的狀態變數進行最佳化，較常見於建築土木、能源環境類的論文，因此對再生能源供電系統的設計十分簡略

[23,27–29]。在進行建築住宅內部設計最佳化的過程中，關於上述兩大類的設計狀態變數非常的繁多，包括通風、開窗、熱源、建築物方位座向、採光大小…等種類下各自諸多設定變數，且許多建築案例的狀態變數充滿了不確定的動態變化特性[27–29]。因此，通常諸如此類考量零碳電能微電網下之 NZEBs 設計規劃技術，屬於高度異質(heterogeneous)且需考量不確定性的問題，屬於高度異質(heterogeneous)且需考量不確定性的問題，於規劃階段便必須合理的將未來重要不確定狀態變數的動態變化趨勢納入考量。根據應用時必須考慮的系統特性及限制，發展一個可對大規模不確定度量進行合理範圍的設定進行分析模擬演算法，方可掌握系統動態隨機的不確定性，有效地對此高度異質問題提供有意義的解決方案[30]。

關於考量未來不確定性的複雜動態隨機最佳化(dynamic stochastic optimization, DSO)技術，應用於設計規劃的純理論架構，相關文獻的探討並不算十分成熟[31–34]，雖常利用結合機率統計理論之單點或極值分析、分析(analytical)法或蒙地卡羅模擬(Monte Carlo simulation)等方法，近似規劃出在有限不確定及複雜性尺度下的設計最佳合理理解，但對規劃未來具有高度不確定性及複雜性的 NZEBs 應用上仍有相對侷限性[35–36]。例如，應用在淨零耗能建築設計的相關文獻中，NZEBs 設計的節能效果與天候的變化對再生能源長期累積的發電有絕對關係；多數研究文獻利用太陽光電發電/風機功率方程式，以日輻射量/風速的機率期望值或機率密度函數進行機率分析模擬，來估算天候間歇變異對太陽能/風能長期發電效益造成的影響，若用於淨零耗能建築設計規劃欲獲得合理結果，可能產生變異性太大之不可預期的落差[23,27]，技術運用上仍有相當挑戰性。

結合進化為基礎(evolutionary-based)的智慧演算法，用以改善並解決在智慧電網等實際應用的 DSO 可行性研究文獻，近期亦受到廣泛的注意；主要技術挑戰為：(1)如何產生和維持足夠高多樣性的族群，(2)發展強大的解決方案以有效追蹤過程並獲得確定的最佳解[30,37]。理想的情況下，我們希望有一個自適應算法，每次當環境變化時可以適當的方式自行進行響應[30]，在要求不高配置產生的眾多的遺傳算子及有效的探索搜索空間時，仍有高度的自適應精確度。此類研究文獻絕大多數利用調整模擬參數的經驗(Empirical)設定，去趨近當考量了未來重要的不確定動態趨勢帶來的各式變異[29,33–34]，並以此經驗結果去驗證可能的複雜動態最佳化理論架構的應用合理性。上述進化演算技術應用在設計 NZEBs 的設計規劃上，其有效性必須進行進嚴謹的過程測試模擬結果的合理性。

結合了再生能源、儲能/儲熱設備及能源管理系統，應用於規劃未來零碳電能微電網中的淨零耗能建築之相關研究，為近期國際期刊上新興的研究議題。目前，雖有諸多於低碳建築設計規劃應用研究結果的發表[38–39]，但對於未來零碳微電網運轉環境下，於興建淨零耗能建築之初，結合了再生能源、儲能電池，及高能耗效率複合式空調熱泵電熱水器儲熱的能源管理系統後，探討如何進行上述電能/熱能相關設備的容量配置規劃的經濟效益分析之相關研究，目前尚少見諸文獻發表。此類低零能耗研究是目前國際期刊上新興熱門的研究議題，尤其是結合了歐美地區住商用戶不曾使用，較適合亞熱帶地區的高能耗效率的冷氣空調電熱水器。本研究嘗試應用情境規劃(scenario planning)技術，解決使用動態隨機最佳化技術規劃零碳電能建築之電能/熱能時，面對處理未來不確定性情境產生高度複雜之模擬尺度問題。情境規劃法雖僅利用數量有限的特定情境進行模擬規劃，但因能夠有效地考量並組織未來高度複雜不確定環境中，重要設計決策變數的長期變動趨勢及遠景全貌[39–40]，因此，此類系統規劃技術能夠探勘出近似全域的最佳合理決策解[39,41]。本研究進行的 NZEBs 設計規劃架構，將考量未來高度複雜的零碳微電網環境下之運轉可能情境，並結合最佳化技術進行系統的分析模擬，於規劃階段估算出最佳經濟效益下之合理分散式再生能源及系統電能/熱能儲存設備配置結果，更接近未來淨零耗建築真正架設運轉後的實際狀況。

貳、系統分析架構

一、零能耗建築分類

依據美國能源部再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)的研究報告，NZEBs 除必需採用能提昇能源使用效率的建築設計技術及節能設備外，依其對用戶端再生能源於 NZEBs 座落的

場所、源頭、成本及排放四種因素，有了四類建築物的零耗能源「定義」[16,23,28]；及依能源使用(energy-use)方式進行 A、B、C、D 四種「分類」，其中 A 及 B 類屬於由建築基地範圍內(on-site)供應的再生能源選項，C 及 D 類選項的再生能源來自建築物佔地界限以外(off-site)的地方。依建築物使用再生能源的四類 NZEBs 分級制度：

- (一)A 類零能耗建築(ZEB_A)：再生能源直接建置在建築物本體上，可直接供應建築物內用戶所需的電能或冷/熱水系統所需能量。例如太陽光電、太陽能熱水系統、風力發電等設備。
- (二)B 類零能耗建築(ZEB_B)：再生能源直接建置在建築物基地範圍內(但不在建築物上)，可直接供應建築物內用戶所需的電能或冷/熱水系統所需能量。
- (三)C 類零能耗建築(ZEB_C)：再生能源來自在建築物基地範圍外，但在建築物基地範圍內產生能源，直接供應建築物內用戶所需的電能或冷/熱水系統所需能量。例如生質能、木材、酒精、生物柴油以及基地內的廢棄物。
- (四)D 類零能耗建築(ZEB_D)：購買建築物基地外由再生能源產生的綠色能源，但須符合 Green-E(2009)或其他同等再生能源認證規範。例如電力公司供應由風力/太陽能等再生能源產生的電能、購買碳排放的碳權、水力發電等。臺灣能源局稱此類電能為綠電。

如前所述，這些定義及能源使用計量(accounting)分類，沒有那一種是最好的，利用不同定義及分類當作零耗建築設計的目標及依循原則，皆有其使用考量價值及運用特性的優缺點差異，建物擁有者可依自身自覺重視的目標，及配合各國處於推動再生能源不同階段的政策差異而自行調整，例如不同電力 FiT 及 NEM 變化。通常對於那些在建築物基地外的再生能源，是否可被用以供應能源達到真正的 NZEBs 仍存有頗多爭議；當然從能源供需及減少排碳的觀點而言，此類廣義非建築基地的 ZEB_C 及使用的併聯電網作為儲能及電能平衡的 ZEB_D 類仍有其貢獻。但目前較大的共識仍是由裝置在建築物現場 ZEB_A 或 ZEB_B 類的可再生能源，自足供應自身建築用戶所需的能源，才真正符合 NZEBs 設計的理想與精髓。ZEB_A 類建築除了必須透過上述現場能量技術補獲/生產足夠的再生能源能源，另外亦必須加裝可降低整體建築能源使用的高效節能設備，包括照明、通風空調、冷/熱水供應等設備。

對於目前歐美注重再生綠色能源的先進國家，過渡到真正理想的 ZEB_A 類建築仍屬初期推廣階段，各國推動步調及進度不同，因此目前達到低能耗或 ZEB_D 類建築屬於大多數。此種將電力系統併網視為零碳能源平衡的運作方式，當再生能源滲透率提高至某種比率後，電網其實並不再能夠許可無容量限制的過多剩餘再生能源回灌系統，此類情境下將如前面內容所述，建築基地內住戶具有併網儲能的設備將無可避免。零能耗建築被認為是智能電網的一部分[42]，這些 NZEBs 的優點整合建築現場的分散式再生能源及併網儲能設備，應可較綠色永續建築更有效地達到淨零能源的理想，對於未來在 AMI 架構下的配電系統負載側，各住宅具有電能自給自足的零碳電能微電網的時代應將逐漸成真。

二、複合式空調熱泵電熱水器及零碳電能微電網系統

低能耗建築的節能技術主要包括，自然採光、被動式太陽能熱能、高效率的暖通空調設備、自然通風、蒸發冷卻、地熱熱泵、海水冷卻、高能效率節能變頻家電等諸多技術/設備，當然 NZEBs 設計中必須優先考慮全面或部份使用此類相關節能技術/設備。如前所述，本研究將採用可回收空調冰水機/壓縮機散熱之廢熱或屋外熱能，加熱產生建築物內生活/洗滌熱水的具熱泵功能電熱水器設備，此種空調設備結合具熱泵功能的電熱水器，當成 NZEBs 內居家蓄熱節能的設備。日立推出之複合式空調熱泵電熱水器設備，在未來在零能耗高度需求及價格普及化的趨勢下，有可能逐漸普及至一般的小型住宅及商業建築。在 NZEBs 設計基本理念儘量不使用石化燃料的理想下，目前臺灣普遍使用液化天然氣當供應生活/洗滌熱水的熱水器，在本研究的設計規劃中將以此類高能效率的電熱水器取代。圖 1 為本研究探討的結合具熱泵功能電熱水器之複合式空調設備架構示意圖。

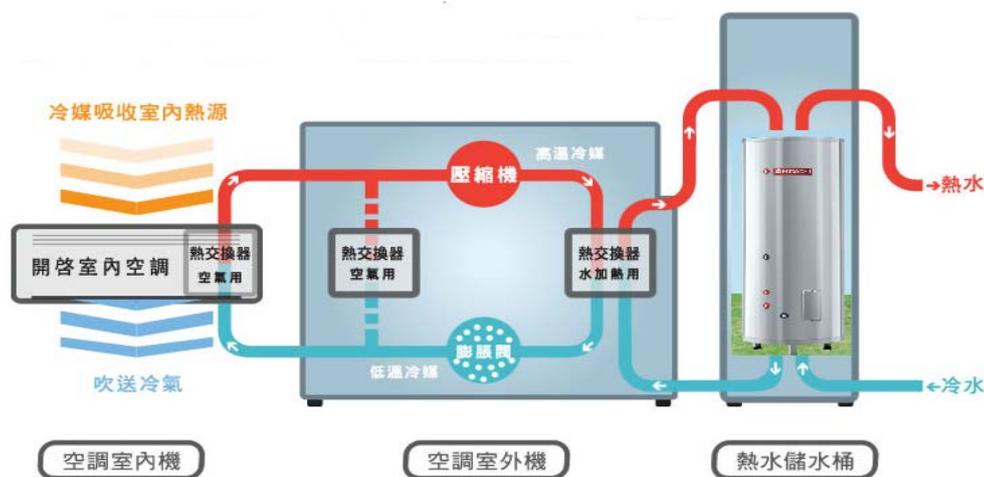


圖 1 日立複合式空調熱泵電熱水器之冷熱流程及系統架構圖

三、零碳電能微電網分析規劃架構

圖 2 為本研究模擬測試的低能耗節能微電網下住宅的內部設施建置，包含了分散式再生能源、蓄電池儲能、複合式高能效率空調熱泵電熱水器及內部的智慧型能源管理器。本研究擬發展出一套情境技術評估及經濟效益模擬分析軟體，測試上述節能微電網的能量平衡過程，其中必須能夠考量到未來微電網市場運轉環境下，可能使用的 DERs、電能/熱能儲存設備、微電網費率情境、及節能調度運轉策略，應用於未來建置臺灣各區域逐漸成熟的住宅型零碳電能微電網市場。

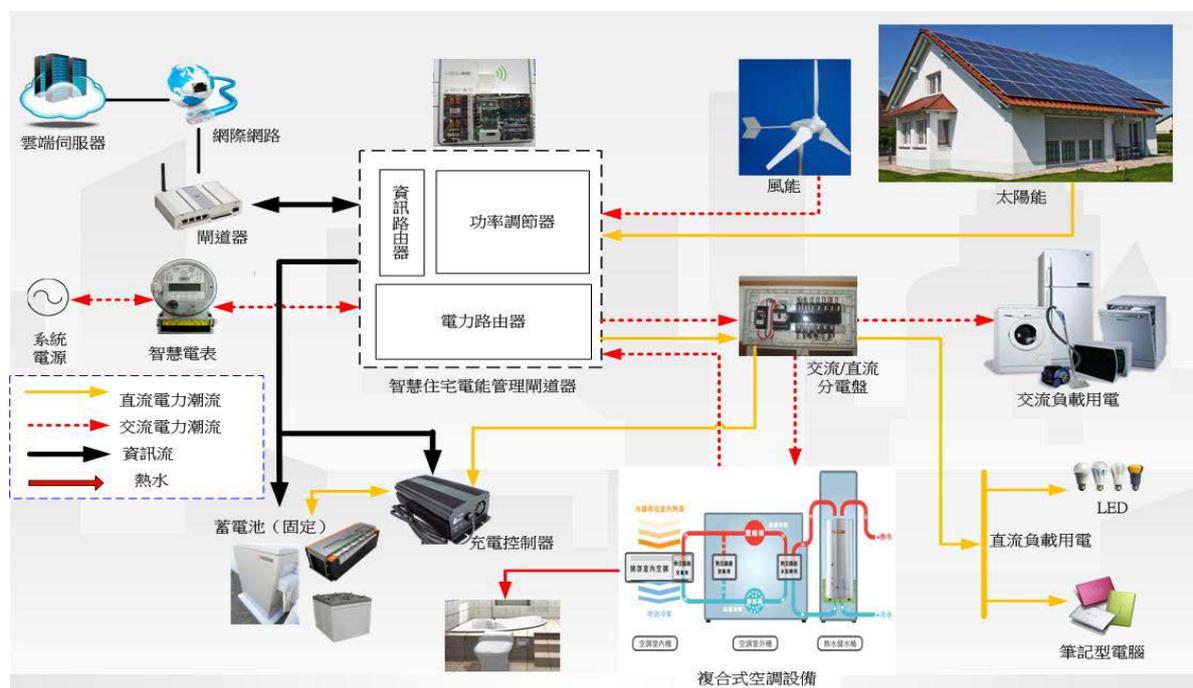


圖 2 零碳電能微電網測試系統中住宅內部設施

考慮了空調熱泵電熱水器電能/熱能轉換儲存、時間電價、FiT、餘電躉售供需操控能源管理模式，本研究發展的太陽能結合儲能儲熱零碳微電網系統最佳規劃流程圖如圖 3 所示。本研究發展的零碳住宅型電能微電網規劃架構，同時考慮了系統可靠度及可彈性操控儲能儲熱設備的規劃需求，並結合了短期能源管理調度策略及長期系統規劃策略。短期能源管理調度首先必須考慮天候氣象實際的時序資訊，在比較了不同測試情境下，時間電價、躉購費率、太陽能發電量、及用戶用電的相對關係後，決定進行蓄電

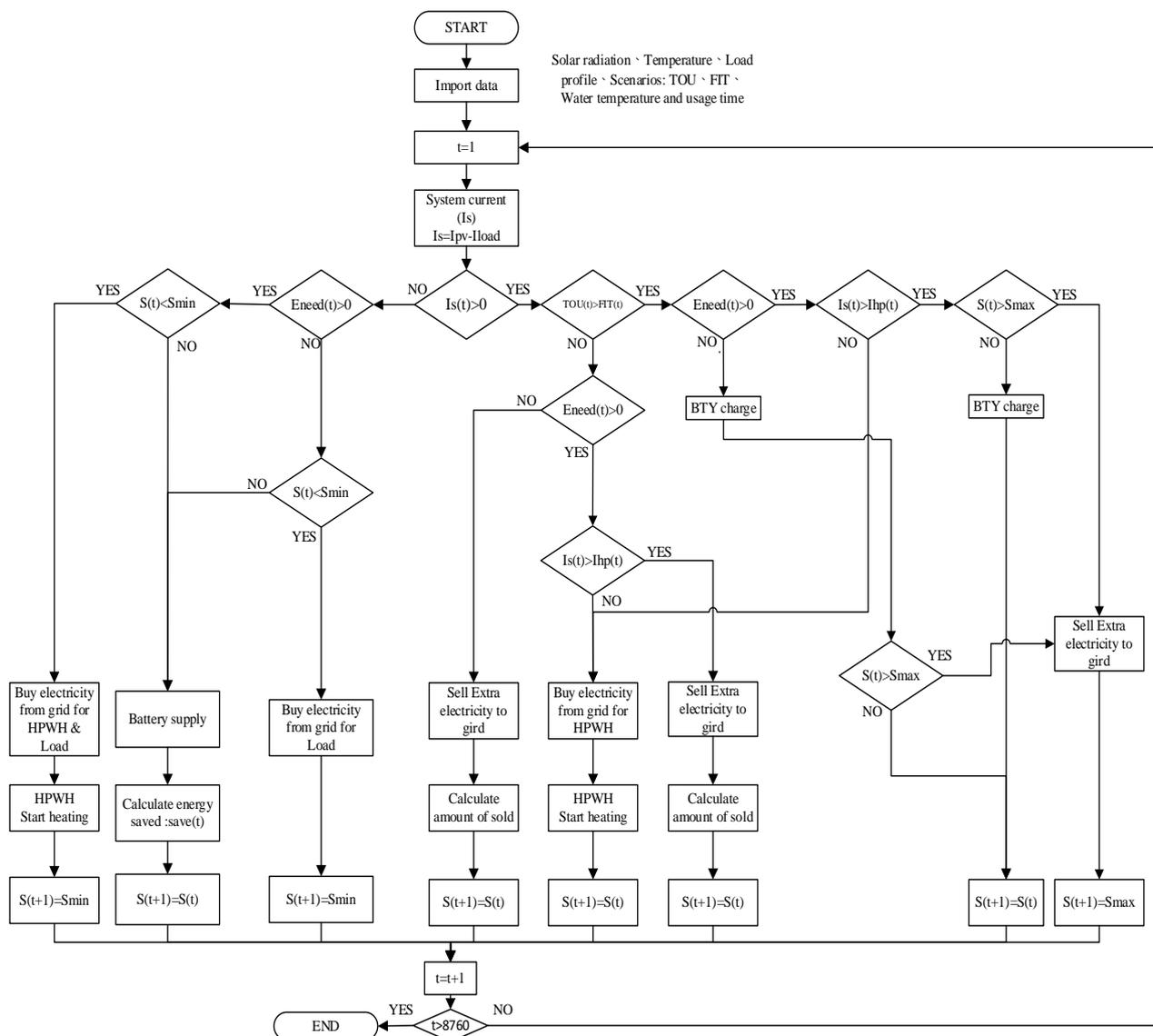


圖 3 太陽光電發電結合儲能儲熱之零碳微電網分析流程圖

池儲電、事先加熱熱水的時間、加熱熱水的儲熱容量、或負載直接使用太陽能發電量的能源管理控制策略。上述短期調度策略必須融合至系統長期規劃架構下，主要經由疊代考量整年的各式時序資訊後，進行調整短期調度及長期規劃控制情境變數之模擬，再將整年度的疊代求解出的零碳電能微電網中關鍵設備的容量組合配置，求解出近似全域最佳的合理解，經濟效益的評估是以 20 年為規劃週期。此架構在兼顧系統可靠度、狀態變數限制、節能控制策略與設置成本經濟效益要求下，可模擬求解出特定測試情境下，分散式再生能源及儲能/儲熱設備之最佳配置。

零碳電能建築規劃已採取情境規劃技術，將能夠有系統地簡化並考量系統分析上大部份的不確定資訊。按照研究文獻及作者以往使用生物進化演算技術的經驗，在不確定資訊維度下降，導致設備容量合理配置狀況大幅減少分析計算過程中，遺傳基因演算法(genetic algorithm)即可獲致合理的演算結果。本論文因研究重心為利用情境分析考量儲存電能及熱能，達到未來零碳建築內零碳電能的目標，故僅採用此類較有效的進化演算技術進行規劃模擬。遺傳基因演算法是一種啟發式且具高度自我環境適應性的疊代搜索演算技術，可以從多個點進行並行搜索，並產生各族群遺傳基因運算子的不同變異擴充搜索空間，減少搜索陷入局部最佳化的可能性。但與諸多進化演算相關技術類似，啟發式的基因演算法求解質量的優劣很大程度取決於其內部參數的有效設置，例如，各族群的染色體數量(chromosome population)、交配

率(crossover rate)、突變率(mutation rate)、族群世代(generation)等。模擬過程初期必須經過不斷測試調整模擬參數的經驗設定值，以達到目標適應函數(fitness function)在最短世代的有效收斂結果。疊代模擬規劃求解過程，遺傳基因演算法必須結合短期時序的調度管理策略及長期規劃的流程，用以提昇設計零碳電能微電網系統的合理性及精確度。

參、零碳電能微電網模擬情境測試分析及討論

本研究利用情境式規劃技術規劃未來具有高度不確定特性的智慧電網市場運轉環境，此類技術常用進行步驟的主要精髓，在於必須根據各自專業領域的經驗，有效掌握能夠預測未來的關鍵變數及可能發生情境，並將此類情境納入模擬規劃過程之中。依據節能減碳趨勢下未來智慧電網市場實際運轉後，如何設計零碳電能建築內的電能/熱能相關設備配置狀況，以快速達到成本回收的經濟效益，進行情境式的規劃分析。為考量系統規劃的複雜程度及電腦模擬時間，必須對於系統設計中的狀態變數進行某種程度的篩選削減再進行情境規劃[43]，本研究聚焦可能影響零碳電能建築內電能/熱能設備容量經濟效益較大的主要關鍵狀態變數情境進行模擬探討，包括了零碳電能微電網環境下數種測試的費率，及淨零能耗建築內儲電/儲熱設備數種負載用戶使用模式的情境，詳細情境分類詳見下節內容。另外，考量天候不確定性對太陽能光電發電量變動的長期影響，將利用臺灣中央氣象局各區域整年太陽能的每小時日輻射實際數據進行測試，避免使用機率統計模式推導出的等效方程式所帶來的額外不確定變異性。

一、零碳電能微電網測試情境

為貼近歐美日目前已有諸國提前進入市電等價的餘電購回狀況實際現況，零碳電能微電網環境下測試的費率情境，則包括了是否使用綠電、兩段式及三段式時間電價費率、五種平均電價、及五種屋頂型太陽光電再生能源躉購費率。淨零能耗建築內儲電/儲熱控制情境變數，包括了二種不同負載用電型態、五種空調熱泵電熱水器的用戶熱水使用時間習性、及四種熱水儲水桶的容量儲熱變數。針對上述情境分類便蘊含了 $3 \times 5 \times 5$ 共 75 種微電網市場環境下費率情境，及 $2 \times 5 \times 4$ 共 40 種負載用戶使用模式情境，應可涵蓋大部分未來可能發生的重要情境。

圖 4 所示為測試之不同用戶用電型態，其中左邊負載用電型態為典型的家庭用戶、右邊負載用電型態為典型辦公大樓用戶。表 1 及圖 5 分別為家庭測試用戶在春夏秋冬四季之平均消耗電能，空調熱泵電熱水器熱水之效能係數、熱水使用溫度，及不同使用時段的測試情境，熱水儲水桶的容量分別測試 100/200/300/400 公升四種儲熱容量。辦公大樓測試用戶的四季平均消耗電能分別為 35.38、40.14、34.79、35.74 度。

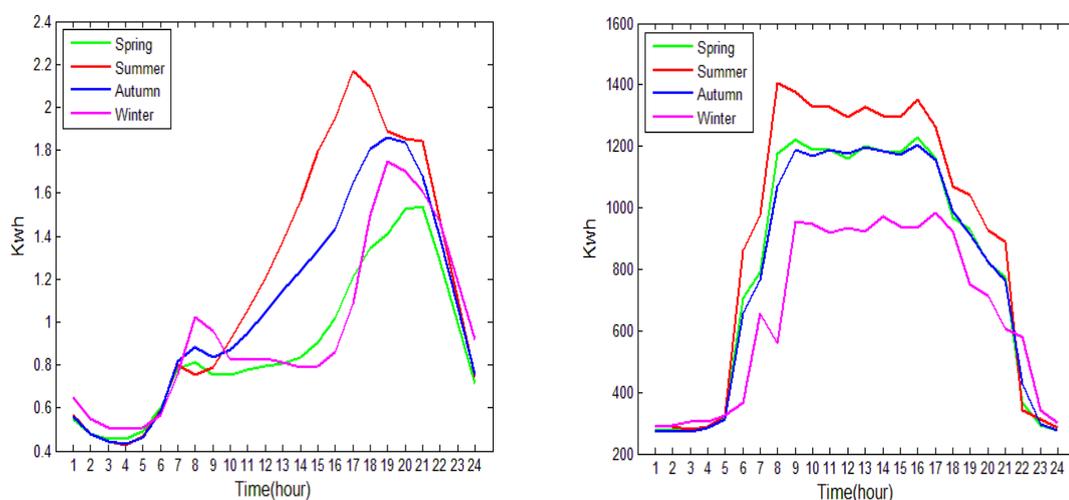


圖 4 測試的用戶用電負載型態

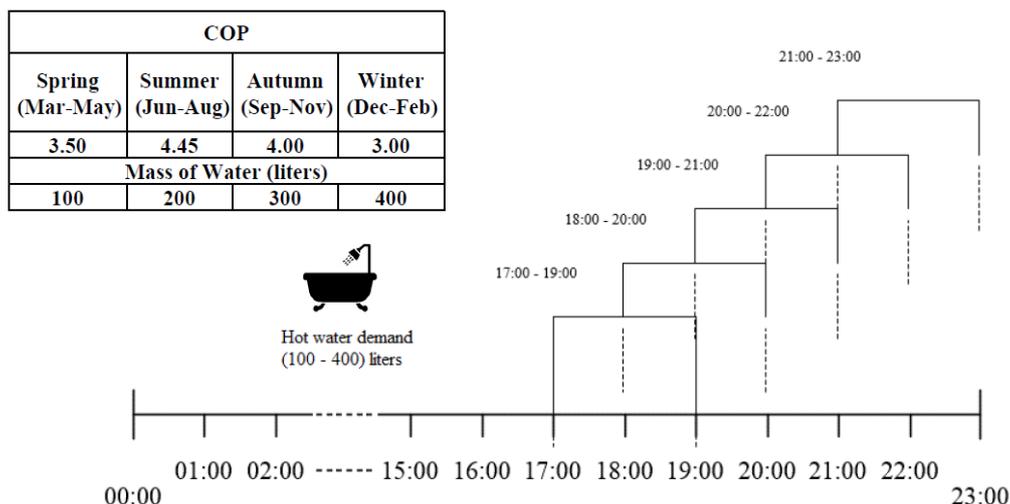


圖 5 家庭用戶內空調熱泵電熱水器熱水使用測試情境

表 1 家庭測試用戶之每季平均消耗電能及空調熱泵電熱水器之效能係數及熱水使用溫度

季節	春季	夏季	秋季	冬季
測試負載之日平均耗電量(度)	21.29	28.35	25.56	22.97
空調熱泵電熱水器之效能係數	3.50	4.45	4.00	3.00
使用熱水目標溫度	45°C	40°C	50°C	55°C

本研究利用臺灣中央氣象局各區域太陽能日輻射實際數據，測試數種微電網費率變化情境，用以瞭解如何以最經濟的方式建置微電網下的淨零能耗建築。微電網費率測試情境，分別使用圖 6~7 美國加州及 105 年 10 月臺灣臺灣電力公司公布的兩段式及三段式電價費率型態、德國/日本/英國/美國(夏威夷)/臺灣五類不同住商小用戶平均電價，及如表 2 所示屋頂型太陽光電再生能源躉購費率情境進行比較。本研究使用的電價費率使用單位為 NTD/kWh，表 3 則為圖 2 所示為零碳電能微電網測試系統中各式設備的模擬測試規格。

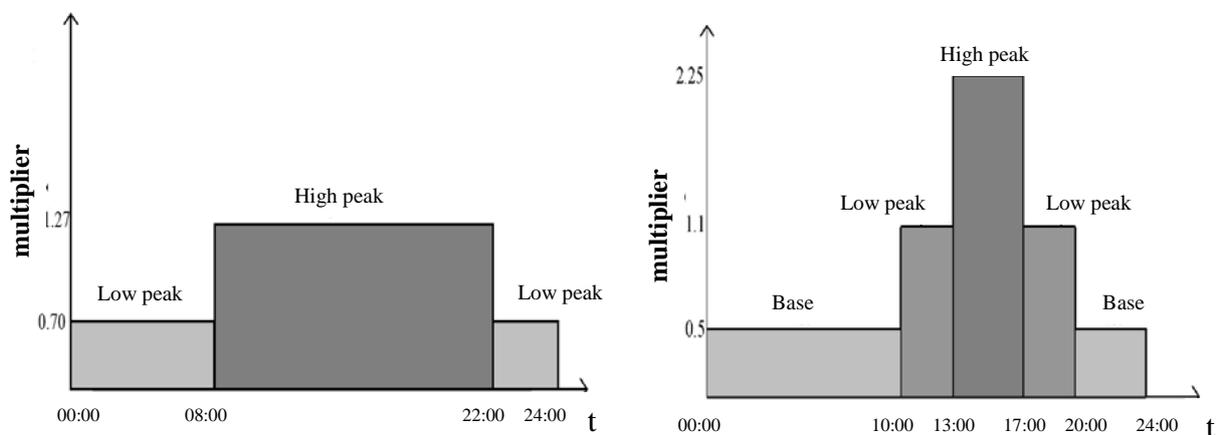


圖 6 測試的美國加州兩段式及三段式時間電價費率型態

105年10月1日起適用						單位:元	
二段式時間電價							
分類		夏月	非夏月				
基本電費	按戶計收(每戶每月)		75.00				
流動電費	週一~週五	尖峰 07:30~22:30	每度	4.19	4.01		
		離峰 0:00~07:30 22:30~24:00	每度	1.71	1.65		
	每月用電超過 2000 度的部份		每度加 0.91				

單位:元						單位:元	
三段式時間電價							
分類		夏月	非夏月				
基本電費	按戶計收(每戶每月)		75.00				
流動電費	週一~週五	尖峰 夏月 10:00~12:00 13:00~17:00	每度	5.84	-		
		半尖峰 夏月 07:30~10:00 12:00~13:00 17:00~22:30	每度	3.85	-		
		離峰 非夏月 07:30~22:30	每度	-	3.69		
		離峰 0:00~07:30 22:30~24:00	每度	1.71	1.65		
	每月用電超過 2000 度的部份		每度加 0.91				

圖 7 臺灣電力公司實施的兩段式及三段式時間電價費率型態

表 2 五類測試費率情境(NTD/kWh)

(a) 住商小用戶平均電價		(b) 屋頂型太陽光電再生能源躉購費率	
國家	費率	容量	躉購費率
德國	11.997	1kW~10KW	6.98
日本	8.196	10kW~40kW	6.62
英國	6.537	1kW~10KW	10.9
美國(夏威夷)	3.519	>10kW	11.15
臺灣	2.853	1kW~4KW	7.37
		4kW~10KW	6.68
		10kW~50KW	6.2
		1kW~20KW	6.5
		20kW~500KW	5.64
		1kW~10KW	7.07
		10kW~100KW	6.3398

表 3 各式測試設備的規格

設備名稱 (測試產品規格編號)	設備容量	價格(新臺幣)
空調熱泵電熱水器 (Hitachi CRC-40)	6,300 (瓦)	50,000
太陽光電模組 (BP380)	80 (瓦)	4,000
蓄電池 (SPV 12750)	720 (瓦時)	5,000
DC/AC 換流器	5,000 (瓦)	40,000

二、時間電價及綠電費率情境測試

首先測試實施採用二段式/三段式時間電價及綠電費率的未來住宅型零碳電能微電網情境，因篇幅限制，僅列出電價費率較低及較高的臺灣及德國費率情境模擬結果表 4~5 進行分析比較；表中右半部為不同 NZEBs 定義 D 類零能耗建築(ZEB_D)的測試結果，可購入再生能源的綠電電價費率之測試結果，臺灣能源局公佈的綠電為每度電價再加 1.06 元。表中的 PV 及 BTY 分別為太陽光電模組(W_p)及蓄電池(Wh)的容量，Cost_{opr} 為零碳電能微電網測試系統 20 年的運轉維護及設備替換成本，包括表四中的空調熱泵電熱水器、蓄電池、換流器設備之壽命，分別為 10 年、4 年及 5 年；Sold 及 Bought 分別為 20 年規劃期間賣電所得及用電支出費用(單位為萬元)，Payback 為收回年限的經濟效益評估指標(單位為年)。

表 4~5 的模擬結果顯示，因臺灣 TOU 電價遠小於 FIT 價格，根本不需配置蓄電池儲能系統；相較德國高 TOU 但低 FIT，會產生較大的系統設備投資回收年限結果。另外，表中右半部測試結果為使用綠電之 D 類零能耗建築(ZEB_D)情境，臺灣/德國兩類極端不同的匯率模式，會產生全然相反的經濟效益。對於家庭用戶，不一定採取三段式時間電價或不使用綠電，就一定獲致較佳的回收年限效益。未來建置低碳或零碳微電網環境時，使用綠電建置門檻最低的 D 類零能耗建築，在臺灣低電價匯率架構下會增加的系統設備回收年限；但於德國高電價匯率反而會降低，若再增加綠電的購電成本，反而會增加住戶使用自給自足淨零電能建築的經濟誘因。

表 4 德國電價及綠電費率情境測試結果

(a) 三段式時間電價

Electricity price: 11.968 FIT<10kW6.98>10kW6.62							Electricity price: 11.968 +1.06 FIT<10kW6.98>10kW6.62						
PV	BTY	Cost-opr	Sold	Bought	Payback		PV	BTY	Cost-opr	Sold	Bought	Payback	
Time1700							Time1700						
100L	14960	13680	984.7	1581.661	226.358	12.4	100L	14960	15120	1034.7	1545.421	200.122	11.97
200L	14960	13680	987.8	1567.146	230.463	12.51	200L	14960	15120	1037.8	1530.951	204.68	12.07
300L	14960	14400	1021.3	1505.831	224.686	12.9	300L	14960	15840	1071.3	1470.322	199.955	12.45
400L	14962	14400	1024.6	1489.846	227.391	13.01	400L	14960	15840	1074.6	1454.385	203.032	12.56
Time 1800							Time1800						
100L	14960	15120	1034.7	1563.738	199.733	12.24	100L	14960	16560	1084.7	1525.511	172.107	11.8
200L	14960	15120	1037.8	1559.386	212.894	12.36	200L	14960	16560	1087.8	1520.184	185.293	11.91
300L	14960	15120	1046.3	1536.899	245.934	12.74	300L	14960	16560	1096.3	1496.889	219.684	12.28
400L	14960	15120	1049.6	1522.402	250.42	12.85	400L	14960	16560	1099.6	1482.435	224.648	12.39
Time 1900							Time 1900						
100L	14960	15120	1034.7	1563.93	200.073	12.2	100L	14960	15840	1059.7	1544.48	194.505	11.76
200L	14960	15120	1037.8	1563.665	216.808	12.29	200L	14960	16560	1087.8	1524.835	189.89	11.85
300L	14960	16560	1096.3	1516	219.53	12.55	300L	14960	17280	1121.3	1495.977	215.704	12.08
400L	14960	16560	1099.6	1511.504	232.554	12.67	400L	14960	17280	1124.6	1490.825	229.121	12.2
Time 2000							Time 2000						
100L	14960	15120	1034.7	1563.976	198.173	12.37	100L	14960	15840	1059.7	1544.471	192.384	11.93
200L	14960	15120	1037.8	1563.654	215.083	12.45	200L	14960	16560	1087.8	1524.804	187.997	12.01
300L	14960	15840	1071.3	1537.651	239.584	12.66	300L	14960	17280	1121.3	1496.174	213.226	12.2
400L	14960	15840	1074.6	1536.901	255.871	12.74	400L	14960	17280	1124.6	1495.525	230.865	12.29
Time 2100							Time 2100						
100L	14960	15120	1034.7	1563.999	198.235	12.37	100L	14960	15840	1059.7	1544.391	192.349	11.93
200L	14960	15120	1037.8	1563.718	214.579	12.49	200L	14960	16560	1087.8	1524.892	187.479	12.05
300L	14960	15840	1071.3	1537.845	237.861	12.83	300L	14960	18720	1171.3	1456.823	166.115	12.37
400L	14960	15840	1074.6	1537.347	254.593	12.92	400L	14960	18720	1174.6	1456.387	184.182	12.45
Time 2200							Time 2200						
100L	14960	15120	1034.7	1564.013	198.192	11.37	100L	14960	15840	1084.7	1525.663	170.317	11.93
200L	14960	15120	1037.8	1563.601	214.424	12.49	200L	14960	16560	1087.8	1524.614	187.171	12.04
300L	14960	15840	1071.3	1537.762	237.819	12.83	300L	14960	18720	1171.3	1456.594	165.945	12.37
400L	14960	15840	1074.6	1537.238	253.871	12.95	400L	14960	18000	1149.6	1476.012	205.743	12.49

(b) 兩段式時間電價

Electricity price: 11.968 FIT<10kW6.98>10kW6.62							Electricity price: 11.968 +1.06 FIT<10kW6.98>10kW6.62						
PV	BTY	Cost-opr	Sold	Bought	Payback		PV	BTY	Cost-opr	Sold	Bought	Payback	
Time1700							Time1700						
100L	14960	18000	1134.7	1483.611	189.259	10.77	100L	14960	18000	1134.7	1483.611	205.981	10.3
200L	14960	18000	1137.8	1469.086	195.854	10.87	200L	14960	18720	1162.8	1458.513	199.17	10.39
300L	14960	18720	1171.3	1413.474	198.424	11.22	300L	14960	18440	1196.3	1404.194	196.818	10.72
400L	14962	18720	1174.6	1398.03	203.687	11.33	400L	14960	18720	1174.6	1398.03	221.684	10.82

(下頁續)

	PV	BTY	Cost-opr	Sold	Bought	Payback		PV	BTY	Cost-opr	Sold	Bought	Payback
Time 1800							Time1800						
100L	14960	18720	1159.7	1479.766	180.794	10.56	100L	14960	19440	1184.7	1469.293	176.946	10.08
200L	14960	18720	1162.8	1474.606	198.631	10.68	200L	14960	19440	1187.8	1463.695	196.052	10.2
300L	14960	20160	1221.3	1417.574	195.907	10.99	300L	14960	20160	1221.3	1417.574	213.216	10.49
400L	14960	20160	1224.6	1403.227	202.787	11.09	400L	14960	20160	1224.6	1403.227	220.705	10.59
Time 1900							Time 1900						
100L	14960	18720	1159.7	1479.723	180.711	10.52	100L	14960	19440	1184.7	1469.169	176.902	10.04
200L	14960	18720	1162.8	1478.572	203.199	10.6	200L	14960	18720	1162.8	1478.572	221.153	10.12
300L	14960	20160	1221.3	1424.898	205.626	10.75	300L	14960	20880	1246.3	1412.806	202.731	10.22
400L	14960	20160	1224.6	1420.052	224.235	10.85	400L	14960	20880	1249.6	1407.761	222.754	10.34
Time 2000							Time 2000						
100L	14960	18720	1159.7	1479.695	180.861	10.52	100L	14960	19440	1184.7	1469.094	176.815	10.04
200L	14960	18720	1162.8	1478.595	203.484	10.6	200L	14960	18720	1162.8	1478.595	221.452	10.12
300L	14960	20160	1221.3	1424.958	205.79	10.69	300L	14960	20880	1246.3	1412.673	203.078	10.19
400L	14960	20160	1224.6	1424.702	230.102	10.77	400L	14960	20880	1249.6	1412.282	229.552	10.28
Time 2100							Time 2100						
100L	14960	18720	1159.7	1479.832	182.308	10.53	100L	14960	19440	184.7	1469.135	177.844	10.05
200L	14960	18720	1162.8	1478.692	205.489	10.61	200L	14960	19440	1187.8	1467.488	203.06	10.14
300L	14960	20160	1221.3	1424.902	207.745	10.07	300L	14960	20880	1246.3	1412.613	205.516	10.2
400L	14960	20160	1224.6	1424.592	232.267	10.79	400L	14960	20880	1249.6	1412.207	232.314	10.29
Time 2200							Time 2200						
100L	14960	18720	1159.7	1479.686	175.971	10.7	100L	14960	19440	1184.7	1468.959	171.742	10.22
200L	14960	18720	1162.8	1478.593	198.368	10.78	200L	14960	18720	1162.8	1478.593	215.896	10.3
300L	14960	20160	1221.3	1424.743	200.443	10.86	300L	14960	20880	1246.3	1412.549	197.103	10.36
400L	14960	20160	1224.6	1424.428	224.728	10.95	400L	14960	20880	1249.6	1412.205	223.793	10.45

表 5 臺灣電價及綠電費率情境測試結果
(a) 三段式時間電價

Electricity price: 2.8530 FIT<10kW7.1602>10kW6.4190							Electricity price: 2.8530 +1.06 FIT<10kW7.1602>10kW6.4190						
	PV	BTY	Cost-opr	Sold	Bought	Payback		PV	BTY	Cost-opr	Sold	Bought	Payback
Time1700							Time1700						
100L	14960	0	509.7	2029.275	202.597	13.01	100L	14960	0	509.7	2029.275	277.869	13.21
200L	14960	0	512.8	2015.503	204.332	13.14	200L	14960	0	512.8	2015.503	280.249	13.34
300L	14960	0	521.3	1973.558	211.382	13.58	300L	14960	0	521.3	1973.558	289.919	13.81
400L	14962	0	524.6	1957.33	211.993	13.72	400L	14960	0	524.6	1957.33	290.757	13.95
Time 1800							Time1800						
100L	14960	0	509.7	2051.831	211.094	12.91	100L	14960	0	509.7	2051.831	289.524	13.12
200L	14960	0	512.8	2047.592	215.771	13.02	200L	14960	0	512.8	2047.592	295.938	13.24
300L	14960	0	521.3	2027.332	228.362	13.36	300L	14960	0	521.3	2027.332	313.207	13.64
400L	14960	0	524.6	2013.56	230.097	13.5	400L	14960	0	524.6	2013.56	315.587	13.78
Time 1900							Time 1900						
100L	14960	0	509.7	2053.58	211.765	12.9	100L	14960	0	509.7	2053.58	290.444	13.11
200L	14960	0	512.8	2053.58	217.978	12.98	200L	14960	0	512.8	2053.58	298.966	13.21
300L	14960	0	521.3	2051.636	237.53	13.25	300L	14960	0	521.3	2051.636	325.782	13.53
400L	14960	0	524.6	2047.397	242.207	13.36	400L	14960	0	524.6	2047.397	332.196	13.65
Time 2000							Time 2000						
100L	14960	0	509.7	2053.774	201.21	12.81	100L	14960	0	509.7	2053.774	275.967	12.99
200L	14960	0	512.8	2053.774	207.423	12.89	200L	14960	0	512.8	2053.774	284.489	13.08
300L	14960	0	521.3	2053.58	227.646	13.14	300L	14960	0	521.3	2053.58	312.225	13.39
400L	14960	0	524.6	2053.58	233.859	13.22	400L	14960	0	524.6	2053.58	320.747	13.49

(下頁續)

	PV	BTY	Cost-opr	Sold	Bought	Payback
Time 2100						
100L	14960	0	509.7	2053.774	201.21	12.81
200L	14960	0	512.8	2053.774	205.126	12.87
300L	14960	0	521.3	2053.774	217.091	13.05
400L	14960	0	524.6	2053.774	223.304	13.15
Time 2200						
100L	14960	0	509.7	2053.774	201.21	12.81
200L	14960	0	512.8	2053.774	205.126	12.87
300L	14960	0	521.3	2053.774	217.091	13.05
400L	14960	0	524.6	2053.774	221.006	13.11

	PV	BTY	Cost-opr	Sold	Bought	Payback
Time 2100						
100L	14960	0	509.7	2053.774	275.967	12.99
200L	14960	0	512.8	2053.774	281.338	13.06
300L	14960	0	521.3	2053.774	297.748	13.27
400L	14960	0	524.6	2053.774	306.27	13.37
Time 2200						
100L	14960	0	509.7	2053.774	275.967	12.99
200L	14960	0	512.8	2053.774	281.338	13.06
300L	14960	0	521.3	2053.774	297.748	13.27
400L	14960	0	524.6	2053.774	303.119	13.34

(b) 兩段式時間電價

Electricity price: 2.8530 FIT<10kW7.1602>10kW6.4190

	PV	BTY	Cost-opr	Sold	Bought	Payback
Time1700						
100L	14960	0	509.7	2029.275	334.935	13.97
200L	14960	0	512.8	2015.503	337.047	14.11
300L	14960	0	521.3	1973.558	343.578	14.55
400L	14960	0	524.6	1957.33	344.293	14.7
Time 1800						
100L	14960	0	509.7	2051.831	347.766	13.88
200L	14960	0	512.8	2047.592	355.301	14.02
300L	14960	0	521.3	2027.332	374.167	14.44
400L	14960	0	524.6	2013.56	376.279	14.47
Time 1900						
100L	14960	0	509.7	2053.58	348.761	13.86
200L	14960	0	512.8	2053.58	358.707	13.97
300L	14960	0	521.3	2051.636	387.992	14.33
400L	14960	0	524.6	2047.397	395.527	14.47
Time 2000						
100L	14960	0	509.7	2053.774	348.871	13.86
200L	14960	0	512.8	2053.774	358.817	13.97
300L	14960	0	521.3	2053.58	389.098	14.31
400L	14960	0	524.6	2053.58	399.044	14.42
Time 2100						
100L	14960	0	509.7	2053.774	348.871	13.86
200L	14960	0	512.8	2053.774	358.817	13.97
300L	14960	0	521.3	2053.774	389.208	14.31
400L	14960	0	524.6	2053.774	399.155	14.42
Time 2200						
100L	14960	0	509.7	2053.774	330.767	13.71
200L	14960	0	512.8	2053.774	340.713	13.82
300L	14960	0	521.3	2053.774	371.104	14.15
400L	14960	0	524.6	2053.774	381.05	14.27

Electricity price: 2.8530 +1.06 FIT<10kW7.1602>10kW6.4190

	PV	BTY	Cost-opr	Sold	Bought	Payback
Time1700						
100L	14960	0	509.7	2029.275	459.276	14.47
200L	14960	0	512.8	2015.503	462.273	14.62
300L	14960	0	521.3	1973.558	471.23	15.08
400L	14960	0	524.6	1957.33	472.211	15.14
Time1800						
100L	14960	0	509.7	2051.831	476.974	14.39
200L	14960	0	512.8	2047.592	487.308	14.55
300L	14960	0	521.3	2027.332	513.184	15.06
400L	14960	0	524.6	2013.56	516.081	15.21
Time 1900						
100L	14960	0	509.7	2053.58	478.339	14.37
200L	14960	0	512.8	2053.58	491.98	14.51
300L	14960	0	521.3	2051.636	532.147	14.95
400L	14960	0	524.6	2047.397	542.81	15.11
Time 2000						
100L	14960	0	509.7	2053.774	478.49	14.37
200L	14960	0	512.8	2053.774	492.132	14.51
300L	14960	0	521.3	2053.58	533.663	14.92
400L	14960	0	524.6	2053.58	547.304	15.07
Time 2100						
100L	14960	0	509.7	2053.774	478.49	14.37
200L	14960	0	512.8	2053.774	492.132	14.51
300L	14960	0	521.3	2053.774	533.814	14.92
400L	14960	0	524.6	2053.774	547.456	15.07
Time 2200						
100L	14960	0	509.7	2053.774	453.66	14.17
200L	14960	0	512.8	2053.774	467.301	14.3
300L	14960	0	521.3	2053.774	508.984	14.72
400L	14960	0	524.6	2053.774	522.625	14.86

三、空調熱泵電熱水器最佳使用時段效益分析

家庭用戶負載型態若裝置了複合式空調熱泵電熱水器後，由上節模擬結果可再歸納綜合出如表 6(a) 所示之熱水最佳使用時段，表中的情境模擬包括了裝設 100~400 公升四類不同熱水儲存容量的儲熱桶；表 6(b)則為另一辦公大樓負載用電型態之熱水最佳使用時段。模擬情境結果顯示，空調熱泵電熱水器的

最佳熱水使用時間，除了與電價費率有關外亦與熱水儲存桶容量有關。針對實施二段式及三段式時間電價何者可讓用戶獲致更佳的長期經濟效益，比較表 7 的結果顯示，不管德國高電價匯率及較低電價匯率的臺灣，用戶使用三段式時間電價長期下來帶來的經濟效益並不一定高於二段式時間電價。原因除了與 TOU 尖峰/離峰電價發生時段與負載用電模式的匹配程度，促使用戶自我改變熱水的使用時間及行為模式的基本價格勸誘考量外，因為加入了蓄電池儲電及熱水儲熱桶儲熱的儲能設備，會讓節能控制器於尖峰/離峰有較大的電價差價誘因下，產生提前蓄積電能或提前加熱熱水儲熱的決策模式出現，讓如何獲致較佳節能經濟效益的結果變異更為多樣。表 6(a)中德國的兩段式時間電價的節能成效在四類比較情境下最佳，但臺灣電價匯率情境下節能經濟效益較好的確是三段式時間電價。

比較表 6(a)的模擬結果顯示，家庭用戶負載型態相較於辦公大樓用戶負載，更為貼近三段式時間電價高低電價變動的時段，因此造成家庭用戶負載具有更佳的回收年限經濟效益；另外，不同熱水容量的儲熱桶，對熱水最佳使用時段及回收年限造成經濟效益的影響程度小於時間電價結構變化情境。表 7 的模擬結果，主要在比較實施時間電價與否，對長期經濟效益造成的影響程度。表中負載 A/B 分為家庭及辦公大樓用戶負載用電型態，模擬結果明顯看出使用者選擇採用時間電價可獲致更大的經濟效益。因此未來在臺灣欲推動零能耗建築的建置社會氛圍時，於住商用戶中建立 AMI 微電網架構並裝設智慧電表，將有助於此類住宅建築的推廣。

表 6 家庭用戶負載用電型態之空調熱泵電熱水器熱水最佳使用時段

(a) 家庭用戶						(b) 辦公大樓用戶用戶					
Taiwan TOU(3 tiers)						Taiwan TOU(3 tiers)					
ACWH (Liters)	Case	Time	PV Capacity	Battery Capacity	Payback year	ACWH (Liters)	Case	Time	PV Capacity	Battery Capacity	Payback year
100	4	20:00	14960	0	12.81	100	4	20:00	14960	0	13.70
200	5	21:00	14960	0	12.87	200	5	21:00	14960	0	13.76
300	5	21:00	14960	0	13.05	300	5	21:00	14960	0	13.95
400	5	21:00	14960	0	13.11	400	5	21:00	14960	0	14.00
Germany TOU (3 tiers)						Germany TOU (3 tiers)					
100	3	19:00	14960	13680	12.20	100	3	19:00	14960	13680	13.23
200	3	19:00	14960	13680	12.29	200	3	19:00	14960	13680	13.31
300	3	19:00	14960	13680	12.55	300	3	19:00	14960	13680	13.57
400	3	19:00	14960	13680	12.67	400	3	19:00	14960	13680	13.70
Taiwan TOU(2 tiers)						Taiwan TOU(2 tiers)					
100	6	22:00	14960	0	13.71	100	6	22:00	14960	0	15.62
200	6	22:00	14960	0	13.82	200	6	22:00	14960	0	15.74
300	6	22:00	14960	0	14.15	300	6	22:00	14960	0	16.11
400	6	22:00	14960	0	14.27	400	6	22:00	14960	0	16.24
Germany TOU (2 tiers)						Germany TOU (2 tiers)					
100	3	19:00	14960	18720	10.52	100	3	19:00	14960	20160	11.32
200	3	19:00	14960	18720	10.60	200	3	19:00	14960	20880	11.42
300	4	20:00	14960	20160	10.70	300	4	20:00	14960	21600	11.59
400	4	20:00	14960	20160	10.77	400	4	20:00	14960	22320	11.68

表 7 實施時間電價與否的回收年限長期經濟效益比較

Load A—Taiwan TOU										
Without TOU consideration						TOU consideration				
ACWH(Liters)	Case	Time	PV (W)	Battery(W)	Payback year	Case	Time	PV (W)	Battery (W)	Payback year
100	4	20:00	14960	0	13.82	4	20:00	14960	0	12.81
200	5	21:00	14960	0	13.88	5	21:00	14960	0	12.87
300	5	21:00	14960	0	14.07	5	21:00	14960	0	13.05
400	6	21:00	14960	0	14.13	5	21:00	14960	0	13.11

(下頁續)

Load A—Germany TOU										
Without TOU consideration						TOU consideration				
ACWH(Liters)	Case	Time	PV (W)	Battery(W)	Payback year	Case	Time	PV (W)	Battery (W)	Payback year
100	3	19:00	14960	13680	13.60	3	19:00	14960	13680	12.20
200	3	19:00	14960	13680	13.69	3	19:00	14960	13680	12.29
300	3	19:00	14960	15120	13.99	3	19:00	14960	13680	12.55
400	3	19:00	14960	15120	14.12	3	19:00	14960	13620	12.67

Load B—Taiwan TOU										
Without TOU consideration						TOU consideration				
ACWH(Liters)	Case	Time	PV (W)	Battery(W)	Payback year	Case	Time	PV (W)	Battery (W)	Payback year
100	3	19:00	14960	12240	14.61	3	19:00	14960	13680	13.23
200	3	19:00	14960	12240	14.72	3	19:00	14960	13680	13.31
300	3	19:00	14960	12240	15.06	3	19:00	14960	13680	13.57
400	3	19:00	14960	12960	15.19	3	19:00	14960	13680	13.70

四、各式費率情境下 D 類零能耗建築之經濟效益分析

D 類零能耗建築(ZEB_D)為可購買建築物基地外由再生能源產生的綠色能源，須符合 Green-E(2009)或其他同等再生能源認證規範，此即再生能源產生電能不足時必須購買綠電，此類零能耗建築的供電可依賴對外購買綠電，不全部由建築本身或外圍基地，架設太陽光電等再生能源設備供應用戶所需的電能或冷/熱水系統所需能量，因此較易推動。為測試何種電價/躉購費率情境會在未來推動建置此類零能耗建築可獲致最大的長期經濟效益，本研究依表 6 中臺灣電價模式模擬結果，選擇熱水使用最佳情境出現較多的晚上 10 點進行測試，以使模擬結果有統一比較的標準。表 8 為採採用臺電三段式時間電價費率型態測試結果，表 8 (a)為再生能源發電系統與市電併聯之運轉情境、表 8 (b)則為 D 類零能耗測試情境。

有別於表 4~5 為利用圖 6 之美國加州使用的三段式時間電價費率模式的測試結果，表 8 利用圖 7 之臺電三段式時間電價費率變化型態。模擬結果顯示，雖然本研究使用之熱水測試時刻(晚上 10 點)不一定是所有應用情境的最佳熱水使用時段，但與表 6 比較臺灣採用的時間電價費率型態，仍較加州使用的時間電價費率型態獲得更低的系統設置的回收年限。主要原因可觀察圖 6 與圖 7 之時間電價費率變化型態，美國加州使用的三段式時間電價費率為單峰式的型態，尖峰集中在 13:00~17:00；臺電三段式時間電價則為雙峰，除了 13:00~17:00 的尖峰外又多了一個 10:00~12:00 的尖峰。此種雙峰交錯型態對如圖 4 所示的本研究用戶測試用電型態而言，匹配程度更高，因此更適合採用以提昇未來一般住商小型家庭用戶建置零能耗建築的經濟誘因。

在表 8 的模擬結果亦顯示與表 4~5 類似的結論，當 D 類的零能耗建築使用綠電，在德國及英國的電價/躉購費率情境下反而降低系統設置的回收年限，但其它三種電價/躉購費率情境(臺灣/日本/美國夏威夷)卻會增加回收年限。增加回收年限的情境，臺灣/美國的低電價費率情境是主因外，但對於高電價費率的日本本應產生如德國/英國降低回收年限的結論，但日本測試匯率情境中 FiT/NEM 過高的收購補助價格，反而稍許抑低了建置 D 類的零能耗建築的經濟誘因。未來在推動此類零能耗建築時，如何在考量了電價結構後，訂定出一個較佳的 FiT/NEM 匯率模式，表 8 的模擬結果提供了數組非常重要的結論。

表 8 使用市電及 D 類零能測試情境之各類電價費率情境比較表

(a) 市電併聯情境							(b) D 類零能耗情境						
三段式(TW) 10 點使用熱水							三段式(TW) 10 點使用熱水						
Liters	PV	BTY	Cost-opr	Sold	Bought	Payback	Liters	PV	BTY	Cost-opr	Sold	Bought	Payback
Load A—台灣費率							Load A—台灣費率						
100	9920	0	364.5	2013.25	155.896	9.3	100	9920	0	364.5	1978.19	213.817	9.7
200	9920	0	367.6	2013.25	165.585	9.41	200	9920	0	367.6	1978.19	227.107	9.85
300	9920	0	376.1	2013.25	195.698	9.77	300	9920	0	376.1	1978.19	268.407	10.3
400	9920	0	379.4	2013.25	205.387	9.89	400	9920	0	379.4	1978.19	281.696	10.45

(下頁續)

Load A—美國費率						
100	10000	0	364.9	1812.31	192.184	10.44
200	10000	0	368	1812.31	204.135	10.59
300	10000	0	376.5	1812.31	241.278	11.04
400	10000	0	379.8	1812.31	253.23	11.19
Load A—德國費率						
100	9920	10080	714.5	1449.86	59.6893	9.22
200	9920	9360	692.6	1458.98	97.9354	9.3
300	9920	11520	776.1	1399.51	75.0515	9.44
400	9920	11520	779.4	1399.15	93.5653	9.52
Load A—日本費率						
100	10000	0	364.9	3108.8	420.023	7.19
200	10000	0	368	3108.8	446.144	7.35
300	10000	0	376.5	3108.8	527.321	7.89
400	10000	0	379.8	3108.8	553.442	8.02
Load A—英國費率						
100	9920	5760	564.5	1457.21	121.716	11.36
200	9920	6480	592.6	1449.59	117.32	11.48
300	9920	7200	626.1	1436.93	136.32	11.78
400	9920	8640	679.4	1405.88	109.033	11.93

Load A—美國費率						
100	10000	0	364.9	1812.31	250.072	10.67
200	10000	0	368	1812.31	365.624	10.85
300	10000	0	376.5	1812.31	313.954	11.39
400	10000	0	379.8	1812.31	329.506	11.57
Load A—德國費率						
100	9920	0	509.7	2053.58	478.339	14.37
200	9920	0	512.8	2053.58	491.98	14.51
300	9920	0	521.3	2051.636	532.147	14.95
400	9920	0	524.6	2047.397	542.81	15.11
Load A—日本費率						
100	10000	0	364.9	2443.62	139.416	7.44
200	10000	0	368	2422.65	129.663	7.51
300	10000	0	376.5	2399.13	156.2	7.78
400	10000	0	379.8	2371.68	145.802	7.86
Load A—英國費率						
100	9920	5760	589.5	1449.82	121.245	10.99
200	9920	6480	617.6	1436.85	112.843	11.07
300	9920	7200	651.1	1422.61	135.874	11.37
400	9920	8640	679.4	1405.88	126.713	11.45

五、基因演算技術模擬效能分析

本研究探討的零碳電能建築規劃，採取情境規劃技術結合基因演算法進行模擬測試。為達到用戶建置此零碳電能建築的最佳經濟效益，規劃的目標函數為最少的回收年限，因此遺傳基因演算法中的適應函數即為零碳電能系統建置的回收年限。疊代過程的儲能/儲熱設備容量配置求解變數，經過族群遺傳基因的選擇、交配和突變技術來模仿遺傳變異演化過程，使產生的結果更趨近全域最佳解。設計規劃欲求取的關鍵設備配置容量狀況變數最佳解的優劣程度，模擬過程初期必須經測試後經驗地選取基因演算法內演化參數的設定值，以達到對適應函數在最短世代收斂的效能。經過收斂效能和勘探能力間進行權衡後，本研究採用的基因演算法參數為：染色體數量：100；交配率：0.7；突變率：0.01。

圖 8 為利用上述參數值，測試不同世代族群內不同儲能/儲熱設備配置容量變化，對零碳電能建築規劃目標適應函數影響的對應關係曲線。模擬結果顯示，在 100 世代內適應函數可有效收斂獲致合理的最低回收年限模擬結果。

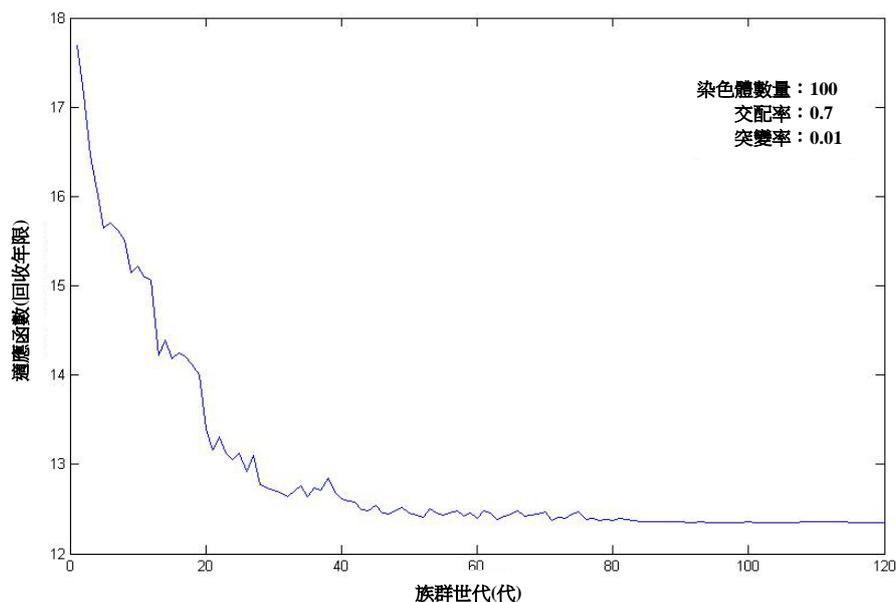


圖 8 遺傳基因演算法在不同世代族群模擬過程中對零碳電能建築規劃適應函數的收斂特性

肆、結論

本研究重心在結合 NZEBs 內未來可能普及的高耗能高效率節能通風空調/電熱水、再生能源供電及儲能設備，發展一套成本經濟效益評估的情境分析系統，用以規劃設計出於可預見未來可能逐漸普及的零碳電能微電網發下建置的 NZEBs。研究成果之主要學術應用價值，首在將家用型的小型家用複合式空調熱泵電熱水器、太陽光電發電及儲能系統結合，設計一個先進讀表基礎架構下可儲電/儲熱的能源管理系統，並利用情境式的分析架構，探討建置零碳電能住宅型微電網的經濟效益。

考量未來零碳微電網不同的電能匯率情境後，結果顯示對於家庭用戶，不一定採取三段式時間電價或不使用綠電，就一定會獲致較佳的回收年限效益；另外建置使用綠電的 D 類零能耗建築，在考量了不同電價結構後，訂定出一個較佳的 FiT/NEM 匯率模式，不一定會增加系統設置的回收年限，反而可以提昇建置自給自足 D 類的零能耗建築的經濟誘因。本研究測試的費率情境，包括了是否使用綠電、兩段式及三段式時間電價費率、五種不同平均電價及屋頂型太陽光電再生能源躉購費率，淨零能耗建築內儲電/儲熱控制情境變數，包括了二種不同負載用電型態、五種空調熱泵電熱水器的用戶熱水使用時間習性、及四種熱水儲水桶的容量儲熱變數，進行情境式的經濟分析測試。模擬結果結論可提供未來在臺灣推動此類零能耗建築時的重要參考。

參考文獻

- [1] International Energy Agency. (2014). *Tracking clean energy progress 2014: Energy technology perspectives 2014 excerpt IEA input to the clean energy ministerial*. Retrieved from http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Tracking_clean_energy_progress_2014.pdf
- [2] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2016). *The power to change: Solar and wind cost reduction potential to 2025*. Retrieved from http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Power_to_Change_2016.pdf
- [3] 楊翔如 (2017/9/28)。分散式發電下太陽光電扮演角色與發展契機【IEK 產業情報網】。取自：http://ieknet.iek.org.tw/iekppt/ppt_more.aspx?actiontype=ppt&indu_idno=5&domain=28&sld_preid=5058
- [4] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas. (2008). Microgrids management. *IEEE Power and Energy Magazine*, 6(3), 54~65.
- [5] G. Venkataramanan and C Marnay. (2008). A larger role for microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, 6(3), 78~82.
- [6] 黃雅琪 (2014/11/19)。2015 年全球智慧電網產業之展望－挑戰重重的大機會【IEK 產業情報網】。取自：http://ieknet.iek.org.tw/iekppt/ppt_more.aspx?actiontype=ppt&sld_preid=4092
- [7] 江緻惟 (2014)。家庭能源管理產品發展，IEK 能源智庫，工業技術研究院產業經濟與趨勢研究中心。取自：http://ieknet.iek.org.tw/iekrpt/rpt_detail.aspx?indu_idno=1&domain=0&rpt_idno=877431199
- [8] 鄭婉真 (2016/11/8)。建築能源管理系統(BEMS)市場機會與挑戰【IEK 產業情報網】。取自：http://ieknet.iek.org.tw/iekppt/ppt_more.aspx?actiontype=ppt&indu_idno=5&domain=80&sld_preid=4820
- [9] D. Manz, R. Piwko, and N. MillerLook. (2012). Before you leap: The role of energy storage in the grid. *IEEE Power & Energy Magazine*, 7(4), 75-84.
- [10] 鄭婉真 (2012 年 3 月)。再生能源發展規劃及搭配儲能必要性，IEK 太陽光電與綠色能源智庫，工業技術研究院產業經濟與趨勢研究中心。取自：http://ieknet.iek.org.tw/iekrpt/rpt_detail.aspx?indu_idno=1&domain=0&rpt_idno=904955276

- [11] E. Hittinger, T. Wiley, J. Kluza, and J. Whitacre. (2015). Evaluating the value of batteries in microgrid electricity systems using an improved energy systems model. *Energy Conversion and Management*, 89, 458–472.
- [12] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti, and M. Y. Chow. (2013). Battery management system : An overview of its application in the smart grid and electric vehicles. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(2), 4–16.
- [13] 鄭婉真 (2012/11/13) 。太陽光電儲能系統發展狀況【IEK 產業情報網】。取自：
http://ieknet.iek.org.tw/iekprt/rpt_more.aspx?actiontype=rpt&rpt_idno=816689300
- [14] N. R. Darghouth, G. Barbose, and R. H. Wiser. (2014). Customer-economics of residential photovoltaic systems (part 1): The impact of high renewable energy penetrations on electricity bill savings with net metering, *Energy Policy*, 67, 290-300.
- [15] C. Breyer and A. Gerlach. (2013). Global overview on grid-parity, *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 21(1), 121-136.
- [16] D. Crawley, S. Pless, and P. Torcellini. (2009). Getting to net zero, *Ashrae Journal*, 51(9), 18–25. (Also from National Renewable Energy Laboratory Journal Article, NREL/JA-550-46382.)
- [17] ASHRAE 90.1 (2016), Retrieved from: https://en.wikipedia.org/wiki/ASHRAE_90.1.
- [18] AIA 2030 Commitment. Retrieved from: <http://www.aia.org/resources/202041-the-2030-commitment>
- [19] European Parliament 2009 Press Release. (2009/3/31). *All new buildings to be zero energy from 2019*, Retrieved from: <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?language=en&type=IM-PRESS&reference=20090330IPR52892>
- [20] European Photovoltaic Industry Association (EPIA) Report (2009). *Solar electricity key to reach net zero energy buildings*, Retrieved from: <http://pr.euractiv.com/pr/solar-electricity-key-reach-net-zero-energy-buildings-88808>
- [21] H. Erhorn and H. Erhorn-Kluttig. (2015). *Towards 2020 nearly zero-energy buildings: Overview and Outcomes*. Retrieved from: <http://www.epbd-ca.eu/outcomes/2011-2015/CA3-CT-2015-5-Towards-2020-NZEB-web.pdf>
- [22] S. Pless and P. Torcellini. (2010). *Net-zero energy buildings: A classification system based on renewable energy supply options*. (National Renewable Energy Laboratory Technical Report, NREL/TP-550-44586.) Retrieved from: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/44586.pdf>
- [23] A. GhaffarianHoseini, D. Dahlan, U. Berardi, A. GhaffarianHoseini, N. Makaremi, and M. GhaffarianHoseini. (2013). Sustainable energy performances of green buildings: A review of current theories, implementations and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 1–17.
- [24] U. Berardi. (2013). Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building, *Sustainable Cities and Society*, 8, 72–78.
- [25] 率能節電-推廣冷暖兩用熱泵系統，行政院環境保護署: 低碳永續家園資訊網。取自：
https://lcss.epa.gov.tw/LcssViewPage/Responsive/PrjDetail.aspx?WikiPrjMain_Id=840FBD35C2A26FA4
- [26] 變頻三合一: 日立複合式空調(2017)。【商品介紹】取自：http://www.taiwan-hitachi.com.tw/products/products_level3.aspx?9504659B59200F3E
- [27] M. Kapsalaki, V. Leal, and M. Santamouris. (2012). A methodology for economic efficient design of net zero energy buildings, *Energy and Buildings*, 55, 765–778.

- [28] A. J. Marszala, P. Heiselberg, J. S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, and A. Napolitano. (2011). Zero energy building—A review of definitions and calculation methodologies, *Energy and Buildings*, 43(4), 971–979.
- [29] M. Kabak, E. Köse, O. Kirilmaz, and S. Burmaoglu. (2014). A fuzzy multi-criteria decision making approach to assess building energy performance, *Energy and Buildings*, 72, 382–389.
- [30] J. Kołodziej. (2012). *Evolutionary hierarchical multi-criteria metaheuristics for scheduling in large-scale grid systems*. New York, NY: Springer-Verlag.
- [31] P. Rohlfshagen, P. K. Lehre, and X. Yao. (2013). Theoretical advances in evolutionary dynamic optimization, In S. Yang and X. Yao (Eds). *Evolutionary computation for dynamic optimization problems* (pp.221–240). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- [32] Y. Jin, and J. Branke. (2005). Evolutionary optimization in uncertain environment—a survey. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 9(3), 303–317.
- [33] G. Dellino and C. Meloni (Eds). (2015). *Uncertainty management in simulation-optimization of complex systems: algorithms and applications*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- [34] S. Yang and X. Yao (Eds). (2013). *Evolutionary computation for dynamic optimization problems*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- [35] A. A. Kadhem, N. I. A. Wahab, I. Aris, J. Jasni, and A. N. Abdalla. (2017). Computational techniques for assessing the reliability and sustainability of electrical power systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1175–1186.
- [36] Y. Lu, S. Wang, Y. Zhao, and C. Yan. (2015). Renewable energy system optimization of low/zero energy buildings using single-objective and multi-objective optimization methods, *Energy and Buildings*, 89, 61–75.
- [37] P. J. Werbos. (2011). Computational intelligence for the smart grid—history, challenges and opportunities, *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 6(3), 14–21.
- [38] A. Ronga and Y. Sub (2017). Polygeneration systems in buildings: A survey on optimization approaches, *Energy and Buildings*, 151, 439–454.
- [39] P. Schoemaker. (2008). Forecasting and scenario planning: The challenges of uncertainty and complexity, In D. J. Koehler, and N. Harvey (Eds.) *Blackwell Handbook of Judgment and Decision Making* (pp.274–296), Hoboken NJ: Blackwell Publishing.
- [40] T. Y. Chen, O. Yu, G. J. Hsu, and W. Sung. (2009). Renewable energy technology portfolio planning with scenario analysis: A case study for Taiwan, *Energy Policy*, 37(8), 2900–2906.
- [41] B. A. Benedict. (2017). Benefits of scenario planning applied to energy development, *Energy Procedia*, 107, 304–308.
- [42] M. Stylianou. (2011). Smart net zero energy buildings and their integration in the electrical grid, *ASHRAE Transactions*, 117(1), 322–329.
- [43] E. Gil, I. Aravena and R. Cárdenas. (2015). Generation capacity expansion planning under hydro uncertainty using stochastic mixed integer programming and scenario reduction, *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(4), 1838–1847.