

智慧家庭能源管理系統營運模式及其經濟分析： 電能產消者 vs. 產消儲電者

許志義^{1*} 林振玄²

摘 要

近年來，智慧家庭能源管理系統的發展日趨重要，藉由智慧家庭能源管理系統讓家庭的角色從原先單方面的電力消費者轉為電能產消者(Prosumer)，或是藉由設置儲能設備轉為產消儲電者(Prosumager)，亦即消費者同時也是生產者，能夠為其自身帶來額外的效益。本研究旨在探討智慧家庭能源管理系統(Smart Home Energy Management System, SHEMS)的核心價值以及經濟分析，採用成本有效性分析法，評估案例家庭採用智慧家庭能源管理系統是否具有收益，過程中採用三種模擬情境。情境一是電能產消者：案例家庭參與台電公司需量反應方案。情境二是電能產消者：案例家庭參與台電公司需量反應方案，並自行使用部分太陽光電系統之電力，剩餘的電力再將之躉售給台灣電力公司。情境三是產消儲電者：案例家庭將太陽光電系統電力藉由儲能設備儲存使用並參與台電公司的需量反應方案，剩餘的電力再將之躉售給台灣電力公司。根據本研究之實證分析顯示，模擬情境二最符合成本有效性。從案例家庭的觀點，在現行的制度下，將太陽光電系統電力依照躉售費率銷售給台灣電力公司具有相當大的收益，其原因為目前台灣電力公司之躉售費率金額遠高於時間電價。本研究透過量化研究，讓未來參與智慧家庭能源管理系統的家庭，有所依據衡量其收益。

關鍵詞：智慧家庭能源管理系統，成本有效性分析，電能產消者，產消儲電者，儲能設備

1. 緒 論

電力產業正面臨新的變革，由傳統的大型集中式電源，轉向間歇性、分散式的能源資源(Distributed Energy Resource, DER)，現階段，臺灣的電網結構仍以單向發輸配售供應鏈(Supply Chain)為主，亦即從台電發電端經由變電、輸電、配電、售電，提供電能至用戶端。但相對地，電力用戶也可自由架設太陽能面板

發電，除了自用之外，剩餘的電力能透過躉購費率(Feed-In Tariff, FIT)躉售給台電公司，成為電能產消者。

伴隨此種營業模式的改變，智慧家庭(Smart Home)正迅速蓬勃發展，市場上推出越來越多相關的產品，例如：各式各樣的「小米家電」，包括小米冷氣機、小米機器人、小米電動車...等，可透過「米家App」相互連結操作，事前或及時設定開關起停(On and Off)，

¹中華大學企管系特聘教授、國立中興大學智慧運輸發展中心兼任特聘研究員、
國立台北商業大學榮譽講座教授

²國立政治大學經濟學系研究所 碩士

*通訊作者電話: 03-5186261 / 04-2285-0505, E-mail: ghsu@chu.edu.tw / hsu@nchu.edu.tw

收到日期: 2020年09月11日
修正日期: 2021年03月31日
接受日期: 2021年04月21日

不但為居家使用者提供便利舒適的生活環境，更可藉由用戶群代表(Aggregator)聚合眾多螞蟻雄兵的家庭小用戶，整合成為一個虛擬電廠(Virtual Power Plant, VPP)的概念參與電力公司需量反應(Demand Response, DR)電價誘因方案，更強化上述電能產消者的電力市場參與之能力。在此情況下，能建構出智慧家庭的雛型，也延伸出全新的分散式系統電力營運模式，亦即所謂的智慧家庭能源管理系統。

儘管現今的「電能產消者」以及「產消儲電者」並未普及，但隨著科技技術的進步以及降低用電成本的優勢作為發展的利基，電力用戶逐步從現狀用電方式轉型為「產消者」，邁向電力產業去中心化，最終達成自給自足的離網系統，如圖1所示(Sioshansi, 2019)。

因此，智慧家庭作為日後電力產業轉變的重要基礎，值得我們深入的探討。在國內，廖桓輝(2013)採用住宅在先進電表基礎建設的架構下，參與台電公司需量反應之效益，過程中也採用了再生能源系統(太陽能發電)以及電動車(Nissan Leaf-S, 2013)儲能系統。在國外，Darby (2017)指出智慧家庭雖然已被廣泛的探討，但實際運用上依然以較富裕的國家為主，且僅有為數不多的案例。其原因為一般民眾對於智慧家庭的能源管理系統應用缺乏概念，且其成本效益較難估算，以致於民眾的使用率不高。

綜合上述，由於電動車儲能系統將電能逆送至電網的V2G (vehicle to grid)應用上牽涉到充電樁必須具備雙向電力傳輸的設施(蔡志祥，2019)，普及性較受局限。因此本研究之模擬情境改為電池儲能系統(Tesla powerwall)，讓電力用戶參與智慧能源管理系統的應用更加便捷。同時，針對智慧家庭能源管理系統的營運模式深入探討，並且實際計算參與者的成本效益，以補足廖桓輝(2013)以及Darby (2017)研究文章之缺口，爰為本研究之動機。

基此，本研究之目的在於模擬消費者採用智慧家庭能源管理系統的營運模式，探討案例家庭從原來的「消費者(consumer)」轉變為「電能產消者(prosumer)」或是「產消儲電者(Prosumager)」三種不同情境之比較。藉由成本有效性分析法，從經濟層面切入，比較三種情境以判斷出最佳的決策方案。

2. 文獻探討

2.1 智慧家庭的定義說明

智慧家庭的定義分為兩大類，第一類定義為智能家庭是配備有通信網路、鏈接傳感器以及家用設備的住宅，可以進行遠端監視、訪問或控制，滿足其住戶需求的服務；第二類定義為著重於建築本身及其與能源系統的連結，

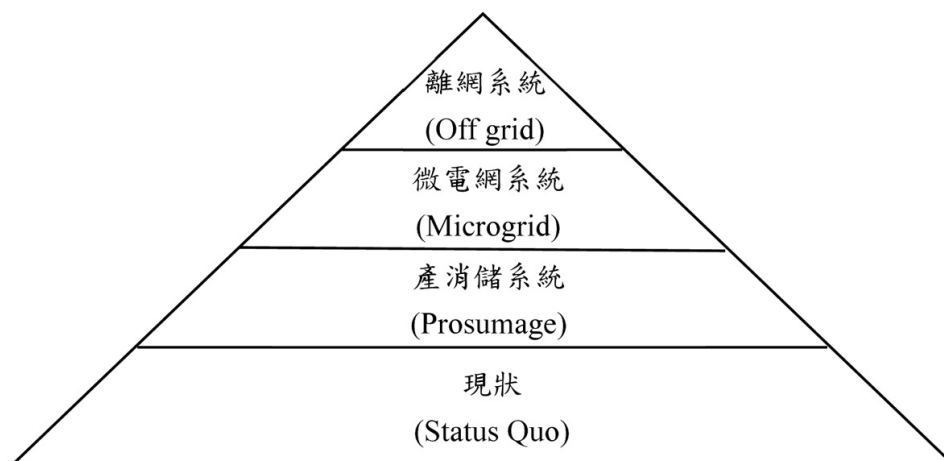


圖1 消費者金字塔(Sioshansi, 2019)

智慧建築與能源系統具有緊密的聯繫和交互作用，將能夠生產、儲存或更有效的使用能源(Darby, 2017)。

近年來智慧家庭發展，透過科技業者創新的研發及政府的大力推廣促成，智慧家庭控制系統涵蓋的層面除了管理家中的電器用品以外，更進展到需注意節能環保、居家照護、住家品質提升等項目，如表1所示。

2.2 智慧家庭的發展

隨著物聯網時代的來臨，智慧家庭將成為未來的重要趨勢，透過在家庭中導入智慧科技，藉由多元化的功能創造新的使用體驗與商業模式，得以實現智慧家庭願景(經濟部技術處，2020)。

智慧家庭早期被稱作家庭自動化，於二十世紀後期開始發展，透過先進的電腦技術、網路通信技術，結合家庭中的子系統，如家用電器、環境傳感器、能源設備、家庭保全、居家照護與家庭娛樂等系統，透過系統化進行管理與監控，與一般的家庭相比，智慧家庭得以讓居家生活更加高效、舒適、安全、便利和環保。智慧家庭總體架構可分為三層，分別為應

用層、家庭網路層和物理層，說明如表2所示(戴士中，2018)。

2.3 智慧家庭的營運模式

智慧家庭的營運模式在國內外已有相當多的文獻，隨著物聯網以及互聯網的蓬勃發展，也創造出更加多元的營運模式，以下整理有關智慧家庭營運模式的相關文獻。

Bernal (2006)說明西班牙政府對於住宅用戶之太陽能發電回購電價政策，西班牙政府對於太陽能躉購費率為市場電價的5.75倍，且透過敏感度分析，探討系統成本、發電量以及維護成本高低對還本期及淨現值所產生之變動。

智慧家庭可以透過與智慧型電表(Smart Meter)相結合，提供給用戶即時電價資訊，也可透過調度負載、用電資料即時顯示、記錄分析等方式，達到降低用電成本、合理用電的管理系統。而節能資訊管理大致可分為兩種，分別為宏觀與微觀。在宏觀的節能資訊管理層面上，主要是來自於政府政策的制定與推動，微觀的節能資訊管理主要是透過改變使用者的日常用電習慣以達到節約能源之目的(Wu, 2009)。

表1 智慧家庭涵蓋的層面(高啟洲與楊孟洵，2019)

項目	說明
節能環保	節能環保行為最常見的種類包含：關閉非使用中的設備電源、換用能源效率高的電器產品，或是及時因天候、溫度的改變，調整家中電器設備的使用狀態(如冷暖氣、除濕機等)。智慧家庭控制系統能透過電能管理減少不必要的能源浪費。
居家照護	智慧居家照護包含智慧聲控、空調、WSN (Wireless Sensor Network無線傳感器網路)居家環境監視、氣體偵測及辨識系統、壓力感測陣列、跌倒感知、浴室滑濕警示，而個人健康醫療系統、遠距醫療診斷系統、兒童安全監測、無線生理監測整合等項目，更是未來醫療服務努力的目標。
住家品質	太陽能追蹤控制、電池最大功率追蹤、節能隔熱板、優質通風系統等項目，更是現代綠建築與完美居家生活的發展方向。

表2 智慧家庭的總體架構(戴士中，2018)

項目	說明
應用層	應用層包含智慧家電、家庭自動化等應用層面
家庭網路層	家庭網路層為通訊層面的網路技術
物理層	物理層為通訊技術之傳輸媒介，如電力線、光纖、無線等

楊宏澤與廖建棠(2011)指出智慧家庭電能資訊管理系統以家庭閘道器(Home Gateway)為核心，與外部相連以取得電價費率資訊。此外，透過家庭內部網路(Home Network)監控及管理相關電能設備(如：家電負載、儲能設備、電動車充放電控制器、家庭再生能源系統等)，搭配智慧型電表可同時將即時用電資訊顯示於人機監控軟體介面，如圖2所示。

張榮瑞(2012)探討家庭住戶對於電能資訊管理系統採用意願的高低，以及有何因素會影響其對於電能資訊管理系統的採用意願。透過更了解家電用電資訊，可以協助家庭用戶管理用電，得以讓家庭用戶改變自身用電行為，以達成節約能源且節省電費之目標，其結果顯示將能增加用戶對電能資訊管理系統之採用意願。

朱建華(2012)建立一套智慧家庭節能資訊管理系統，用以達到自動化產生家庭家電設備使用排程替選方案之目的，研究中主要考量三

大目標，包括用電總費用、家電移動總時間與家電移動總數量，分別代表著「經濟性」目標、「便利性」目標、「舒適度」目標。過程中運用層及分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)以及多目標基因演算法，達到利用電腦自動化產生多組家電設備排程之替選方案。

Yamauchi *et al.* (2012)探討了先進的智能家庭由光伏¹發電，低容量電池(2 kWh)所組成，其概念圖如圖3所示，藉由HEMS(Home Energy Management System)連結Wi-Fi(Wireless Fidelity)的智能設備，了解每個電器設備消耗的電力以及使用狀況，讓家電的控制更加容易。透過太陽能收集器可以更有效的運用電力，如在颱風造成停電的期間或是電網故障時造成電力無法使用時，智慧家庭依然能持續獨立運作，不受影響。

Baraka *et al.* (2013)利用家庭自動化技術，實施遠端控制能源和高擴展性的智慧家庭，具備保障居民的舒適性和安全性的功能。

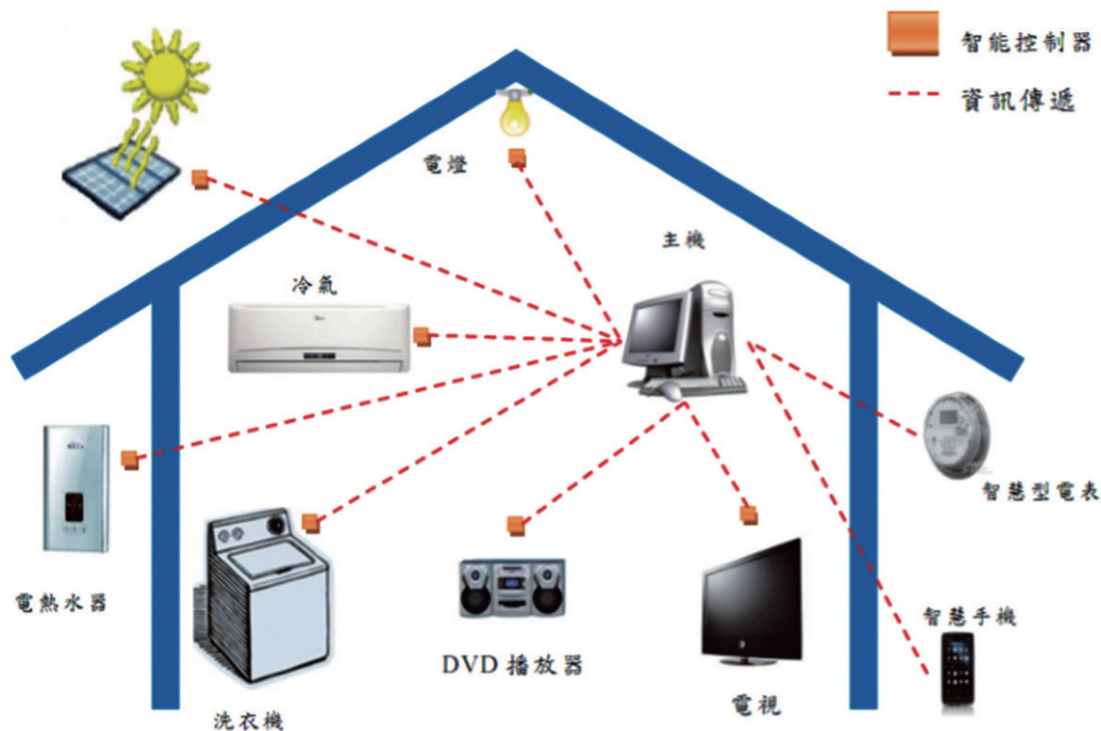
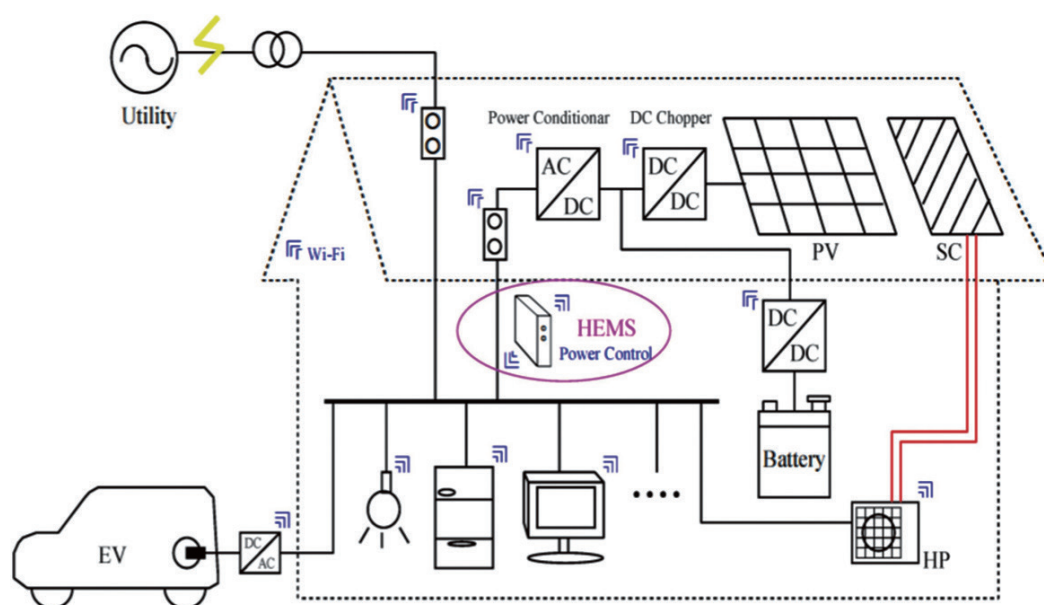


圖2 智慧家庭電能資訊管理系統架構圖(Lin, 2011)

¹光伏發電是利用半導體介面的光生伏特效應而將光能直接轉變為電能的一種技術。這種技術的關鍵元件是太陽能電池。

圖3 先進智慧家庭概念圖(Yamauchi *et al.*, 2012)

廖桓輝(2013)利用成本效益分析，評估住宅用戶在先進電表基礎建設架構(Advanced Metering Infrastructure, AMI)下，藉由用戶群代表參與台電公司需量反應方案之結果，各國用戶群代表實際範例參閱表3。需量反應是藉由機動調節用戶端電力需求量的方式來改善電力系統的負載形態，藉此降低電力系統尖峰需求。其評估的方式是從用戶及整體社會兩種觀點探討，針對其可能帶來之效益與成本進行估算。

張翰杰(2014)分析家庭用戶之夏季用電與非夏季用電，在智慧電表裝設的情形下，可以精確了解用電情形、時間電價制度之尖峰離峰電價費率，讓用戶改變用電型態，並傳達正確之供電成本資訊，如用戶參與適合之時間電價方案，亦可減少用戶電費支出。

Nextdrive (2020)透過物聯網閘道器Cube與節能App(應用程式)結合智慧家庭，以零耗能未來住宅的概念，打造新生代節能生活。物聯網閘道器Cube能與智慧電表結合，除了可以幫助用戶得知用電狀況外，更可以替電廠分析用電數據，做為發電及商用依據。在用電數據，Nextdrive (2020)透過與日本電力公司合作創造出新興的數據應用，其應用如表4所示。

Castro-Antonio *et al.* (2019)提出了一種機器人操作系統，結合智慧家庭帶來不同類型的服務，其系統結合自動服務機器人加強了遠端控制的概念，能夠處理所有家用的嵌入式設備，例如燈、空調和火災探測器，且不需要繁雜的傳感器以及執行器。

表3 各國用戶群代表實際範例(許志義與洪穎正，2016)

1. 瑞士Vattenfall公司，該公司的運作概念以集結再生能源眾多分散式發電用戶為目的，成為生產者和消費者之間創新商業模式平台，該用戶群代表之公司，在瑞士的調度配置已經有數十年的經驗。
2. 美國最著名的聚合商EnerNOC，對於用戶訂定了十分完善的制度，不論是補償方案、衡量績效、帳單管理、預算控制、需求管理、項目跟蹤，都可以藉由能源智能軟體(Energy Intelligence Software, EIS)完成個人化的服務需求，改善客戶體驗。
3. 美國Comverge公司主要提供解決尖峰需量反應的創新方案給電力公用事業與輸電系統操作者。目前擁有的客戶群包括：住宅用戶、小型工商業用戶以及全美國共180萬客戶，涵蓋超過450萬負載控制裝置。

表4 用電數據衍伸應用(Nextdrive, 2020)

項目	內容
老人照護	透過用電圖表獲知電器是否正常使用，藉此了解長者生活作息，並藉由比對過往用電數據，得知作息是否出現異常，即時給予必要協助
智慧物流	Nextdrive與東京大學合作研究智慧物流，彙整家中即時電力數據，規劃最適物流配送路徑，使再配送率由20%降低至2%
智慧家居	提供外出照護服務、居家安心服務以及居家IoT服務
遠距照護	運用家中電力傳感器或是Sensor (人感或溫度等)，提供活動資料推估生活樣態與異常狀況，提供給用戶即時資料以及讓照護師或是長照業依據活動資料制定照護計畫

2.4 本章小結

本研究國外文獻以Darby (2017)為標竿，其研究說明了用戶在智慧家庭中的定義以及角色，探討的兩個面向如下：1. 強調運用最先進的技術，讓住宅變得高度自動化，提高便利性。2. 關注系統層面的多元應用，像是尖峰需求、輔助服務、資通訊技術(ICT)的應用。本研究據此進行量化模擬分析，包括三個不同情境)，對於智慧家庭能源管理系統(Smart Home Energy Management System, SHEMS)所能帶來的預期收益有更進一步的了解，補足Darby (2017)之研究缺口。

在國內文獻的部分以朱建華(2012)及廖桓暉(2013)為標竿。朱建華(2012)探討在盡量不影響住戶舒適度與便利性的情況下，採用智慧家庭節能資訊管理系統，用以達到自動化產生家庭家電設備使用排程方案為目的，過程中採用Illinois-Ameren即時電價費率，藉此節省電費，其考量的目標，包括經濟性、便利性及舒適

度。本研究在探討中延續節能資訊管理系統，並在屋頂建置太陽光電系統及電池儲能系統，同時參與台電公司需量反應及躉售電力方案，以經濟面為主要探討面向，並未考量住戶之舒適度與便利性，其營運模式與本研究之比較，參見表5。

廖桓暉(2013)探討當住宅用戶在先進電表基礎建設架構下，參與台電公司需量反應方案、在用戶端的屋頂自行建置再生能源系統及引進電動車儲能系統。智慧電表雖然可以即時掌握家中的用電狀況，一旦發現異常用電或使用電量超出時，即可馬上關閉特定電器，但用戶為被動的調整用電，本研究採用的節能資訊管理系統，用戶可以主動調整用電時段，對特定電器進行使用排程，避開用電費用較高的時段，更能有效掌控用電狀況以及降低用電成本。

此外，在儲能設備廖桓暉(2013)係採用了電動車(Nissan Leaf-S)，本研究採用儲能電池(Tesla Powerwall)，有關之數據比較說明如下

表5 本研究與朱建華(2012)之營運模式比較(朱建華，2012)

項目	朱建華(2012)	本研究(2020)
節能資訊管理系統	有	有
需量反應	無	有
太陽光電系統	無	有
儲能系統	無	有
FIT躉購	無	有
探討面向	經濟、便利、舒適度	經濟

表6 本研究與廖桓暉(2013)之儲能設備數據比較(廖桓暉，2013)

項目	廖桓暉(2013) Nissan Leaf-S	本研究(2020) Tesla Powerwall
售價(元)	835,000	328,000
電池容量(kWh)	24	13.5
電池類型	鋰電池	鎳鈷錳酸鋰混合鋰電池(NMC混合鋰電池)

(參考表6)：1. 儲能設備售價：本研究係根據Tesla官網價格進行計算(包括電池、配件以家庭電力系統升級改造費用)。國內文獻係根據Nissan官網價格計算，相較之下，本研究之儲能電池成本較低。2. 電池容量：本研究之儲能電池所含電池容量較低。3. 電池類型：比起普通鋰電池，NMC (Nickel Manganese Cobalt, NMC)混合鋰電池有更高的能量密度，更長的循環壽命。值得注意的，儲能電池相較於電動車用途更為多元，因應未來電力產業的變革，儲能電池將是不可或缺的一部分。

3. 研究方法

3.1 決策評估工具探討

經濟個體對於一項計畫的可行性與獲利性進行評估，以決策是否進行此計畫，這一過程稱之為資本預算決策。

在經濟學的基礎上，決策一項計畫或政策執行與否，將根據柏拉圖準則(Pareto Criterion)評估，其決策方式為該計畫或政策是否能帶來柏拉圖改善(Pareto improvement)，進而達到經濟效率或是又稱為柏拉圖最適(Pareto optimum)，若能夠達成，則該計畫或政策將可被執行。然而，此種方式在現實中難以被計算，因此將採用其餘的替代方式，如成本效益分析法或是成本有效性分析法(蕭代基等，2002)。

郭彥廉(2000)指出在經濟學的範疇中，決策的評估通常採用成本效益分析與成本有效性分析兩種方法，成本效益分析是將計畫對社會產生的所有成本與效益均加以計算。成本有效

性分析則是僅計算計畫的實施成本及欲評估的效益項目之效果，選擇較低單位成本的政策。

成本有效性分析(cost-effectiveness analysis)係以最低成本法，做為選擇方案之策略。其在評估最低成本方案之過程中，會應用經濟學之機會成本概念，亦即迴避成本(Avoided Cost)。換言之，由於選擇另一個不同的替代方案，其所節省、迴避一部分當初原來之基準方案之成本。而替代方案節省之成本項，換句話說，其係為成本之減項，即為替代方案之效益(許志義與黃國璋，2010)。

上述分析方法應用成本效益分析，該效益並非為替代方案對其他利害關係人產生之效益，其係指對自己本身，所節省成本之效益。以本研究為例，對案例家庭而言，其迴避之成本，亦即效益，為成本有效性分析之成本減項。相對而言，案例家庭建置太陽能設備之固定成本及變動成本等，為成本有效性分析之成本加項。因此，成本有效性分析法與成本效益分析法，最大不同之處係成本有效性分析法沒有考慮對整個社會或各產業間之效益。然而，本質上該分析方法仍為成本效益分析之一種(許志義，2020)。

3.2 成本有效性分析

成本有效性分析之原則是，「即使不知道所要達成目標之價值，但卻很清楚要以最低成本的方式達到該目標」。換句話說，是在資源有限的情形下，找出成本最小的選擇，或是在固定的成本下可獲得的最大產出之選擇(蕭代基等，2002)。

選擇計畫或政策之成本與效益計算方法是相當重要的，對於可以量化之項目，可以以價

格作為衡量依據，譬如商品或是服務；在對於無法量化之項目，譬如像是人的生命、品質、自然環境或是很難具體說明因此計畫或是政策的受益，將能夠採用成本有效性分析法作為另一種輔以決策的工具(蕭代基等，2002)。

在做計畫或是選擇政策時常見之方法如下。

一、淨現值法(Net present value, NPV)

此方法將各期總效益與總成本差值之現值加總，即可得到整體淨現值(NPV)。當NPV>0時，表示總效益大於總成本，表示此計畫或政策值得執行，反之則否。公式如下：

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

上述方程式中，NPV為計畫或政策之整體淨現值； B_t 為第 t 年之總效益； C_t 為第 t 年之總成本； n 為計畫或政策預期壽命年限； i 為折現率。

二、益本比法(Benefit-cost ratio, BCR)

此方法將各期的總效益的現值除以總成本的現值進而得到比值，當計算出的益本比(BCR)大於1時，此時，總效益大於總成本，表示該計畫或是政策值得執行，反之則否。公式如下：

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}} \quad (2)$$

上述方程式中， B 為整體效益現值； C 為整體成本現值； B_t 、 C_t 、 n 、 i 之意涵同淨現值法之說明。

三、內部報酬法(Internal rate of return, IRR)

此方法為當淨現值等於0時之折現率即為內部報酬率(IRR)。當內部報酬率大於決策者設定之折現率或是市場報酬率時，則選擇內部報

酬率越大的計畫或是政策，反之則否。公式如下：

$$IRR = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} = NPV \quad (3)$$

上述方程式中， r 為內部報酬率； B_t 、 C_t 、 n 、 i 之意涵同淨現值法之說明。

在本研究中，將從案例家庭自身效益的角度計算，分析採用了智慧家庭能源管理系統之成本與效益，加總計算後，與基準方案(未使用智慧家庭能源管理系統)相比，以淨成本低者作為選擇的依據。

3.3 資料來源說明

首先，說明本研究模擬情境之背景資料來源，1. 太陽能板發電量：係參考台灣電力公司(2020)，雲林縣太陽光電每瓩日平均發電量為3.23度，每瓩年平均發電量為1,179度。2. 平均用電量：係參考台灣電力公司營業規則，1個行政戶約3-4人，約申請1.5顆電錶，用電量約為每個月500度。換句話說，1個行政戶之每日用電量約為16.67度。

模擬情境之效益項與成本項的資料來源說明如下：1. 電力系統之收益：係參考許志義與蔡志欣(2018)太陽能發電週期，以及經濟部能源局(2020)太陽光電發電設備電能躉購費率和台電(2018)需量反應負載管理措施之可靠型需量競價措施。2. 政府太陽光電系統補助款：係參考臺北市產業發展局(2019)太陽能板補助金發放方式。3. 建置太陽光電系統的固定成本：係參考經濟部能源局(2020)之太陽能板的期初設置成本，以及參考Tesla官網(2020)之儲能設備Tesla powerwall報價。4. 建置太陽光電系統的變動成本：係參考陽光伏特家(2019)之太陽能板變動成本，一年粗估為設置成本的1.5%至3%。5. 用電電費：係參考台灣電力公司(2020)之住商簡易型時間電價二段式，以及朱建華(2012)透天家庭家電設備耗量比例。

4. 實證結果與分析

本章採用成本有效性分析法，計算三種智慧家庭能源管理系統營運模式的模擬情境淨現值。接著進行三種智慧家庭情境之關鍵參數敏感度分析，同時比較三種情境的淨現值高低，以判斷哪一個情境符合成本有效性。

4.1 三種模擬情境之說明

首先，說明案例家庭之重要參數值(參考表7)。案例家庭設定為居住於雲林縣佔地22坪的透天四人家家庭，原因為雲林縣具有發展再生能源日照充足且土地相對較廣的先天優勢。此外，當地政府積極推動綠能政策，目前也為國內太陽光電裝置容量最大的第二名縣市。此為本案所探討具代表性家庭結構。至於，太陽光電系統發電量根據台灣電力公司(2019)指出，雲林縣太陽光電每坪日平均發電量為3.23度，每坪年平均發電量為1,179度。

根據台灣電力公司營業規則訂有分戶規定，透天獨棟的建築1戶住家可能會申請超過1

表7 三種模擬情境之案例家庭各項重要參數值(台灣電力公司，2018)

案例家庭	四人一般家庭
居住地	雲林縣
住家占地	22坪透天住家
平均用電量	每日16.67度
平均每坪太陽光電板發電量	每年1,179度

顆電錶，依據統計資料，1個行政戶約3-4人，約申請1.5顆電錶，用電量約為每個月500度。換句話說，1個行政戶之每日用電量約為16.67度。

接著，針對三種模擬情境設計進行說明(參見表8)：

一、模擬情境一：案例家庭考量將住家轉變為智慧家庭，以此節省能源與用電電費。過程中採用節能資訊管理系統²，並同時調整家庭用電方式，將抑低用電藉由用戶群代表(Aggregator)參與台電公司需量反應方案。本研究的情境模擬營運模式如下：參與智慧電能管理系統的用戶在申請裝置台電公司低壓AMI情況下，用戶群代表透過非侵入式負載監控(Nonintrusive load monitoring, NILM)人工智慧軟體幫助用戶管理智慧家庭的各種家電用電時間(中央通訊社，2020)。在用戶需量競價得標後，藉由通訊軟體(如：LINE)告知用戶哪些家電之使用時間需向前或向後移動(可事先透過用戶自行購買的「智慧插座smart plug」或智慧家電自動設定，比如說小米智慧電器等)，在此過程中，並不會造成用戶生活上太大的不便(朱建華，2012)。

值得注意的，用戶群代表在過程中並不需要額外裝設硬體設備，只需要透過用戶裝設的低壓智慧電表及通訊軟體即能操作。在此情況下，考量用戶群代表主要的成本是軟體系統及人力管理，因此僅收取需量競價所獲收

表8 案例家庭之三種模擬情境說明(本研究整理製作)

項目	模擬情境一	模擬情境二	模擬情境三
節能資訊管理系統	有	有	有
需量反應	有	有	有
太陽光電系統	無	有	有
FIT躉購	無	有	有
儲能系統	無	無	有

²根據朱建華(2012)，智慧家庭節能資訊管理系統採用Illinois-Ameren即時電價費率，對三十四種家庭家電設備使用時段進行排程，主要考慮三個目標，包括用電總費用、家電移動總時間與家電移動總數量，分別代表著經濟性目標、便利性目標以及舒適度目標。在排程過程中，不至於造成生活上太大的不便，例如：電鍋的使用時間往後調整一個小時，避開時間電價較高的時段，以此節省電費。

益約10%的服務費，亦即以人力資源與軟體系統運用之邊際成本訂價，俾擴大其市場佔有率，達成所謂的需求面規模經濟(Demand-side Economy of Scale)(許志義，2019)。在此情境下案例家庭從消費者(Consumer)轉變為電能產消者(Prosumer)，依此營運模式進行成本有效性分析。

二、模擬情境二：案例家庭除了採用節能資訊管理系統以及參與台電公司需量反應方案，考量在透天住家屋頂建置太陽光電系統，優先將屋頂型太陽光電系統電力用於家庭用電。接著將剩餘的太陽光電系統電力參與台電公司躉購電力方案，藉由屋頂型太陽能發電系統每度躉購電價5.7132元³售給台電公司，此情境案例家庭亦為電能產消者，依此營運模式進行成本有效性分析。

三、模擬情境三：與模擬情境二不同之處為案例家庭考量在非日照時段採用太陽光電系統電力，因此增設了電池儲能系統(Tesla powerwall)⁴，藉此將太陽光電系統電力儲存至非日照時段。換句話說，案例家庭不管在白天或是晚上都能夠採用太陽光系統電力，在此情境下案例家庭從電能產消者轉變為產消儲電者(Prosumer)，依此營運模式進行成本有效性分析。

三種模擬情境皆以2019年為基期。以當年中央銀行公告「五大銀行平均基準利率」2.63%為折現率⁵。在使用年限的部分，根據許志義與蔡志欣(2018)的研究指出，太陽能發電板的生命年限理論上可達35年，但在臺灣的太陽能發電系統，目前仍未有超過20年，且對台電的售電合約，一般合約多以20年為常態，故本研究是以20年為經濟年限做相關之計算。

4.2 模擬情境一之成本有效性分析

本節探討案例家庭藉由智慧能源管理系統轉變為電能產消者，計算其效益項以及成本項。

首先，第 t 年電力系統之收益(PB_t)，在此模擬情境電力系統之收益為參與台電公司需量反應，根據朱建華(2012)指出，家庭採用節能資訊管理系統，對特定電器的用電時段進行排程，避開用電費用較高的時段，將可減少7.9%的電費。值得注意的是，案例家庭將省下的電力採用需量反應，根據台電107年度需量反應負載管理措施之可靠型需量競價措施，其抑低用電每度回購價格不得高於10元，本研究採用每度電回購價格10元。此外，由於參與的電力不足100瓩，必須藉由用戶群代表(Aggregator)參與需量競價，在此處將採用10%的費用給付給用戶群代表。每日減少用電數為1.317度，每年將能減少用電數為480.71度。綜合上述，每年參與需量競價的收入為4,326元。在本研究20年研究期間，不考慮通貨膨脹率，累計20年並經折現後 $\sum_{t=1}^{20} PB_t$ 總和為66,618元。

第 t 年用電電費(PC_t)分為兩個部分，分別為基本電費以及流動電費。首先，根據台灣電力公司(2020)，住商簡易型時間電價二段式基本電費為每戶每月75元，因此每年為900元。從第1年開始，累計20年並經折現後總和($\sum_{t=1}^{20}$ 第 t 年基本電費)為13,859元。

計算流動電費的部分，以案例家庭的使用電費狀況，平均每日用電量為16.67度。若案例家庭採用節能資訊管理系統，對電器的用電時段進行排程，避開用電費用較高的時段，可減少7.9%的電費，約莫1.32度電量可彈性調

³將於4-3節說明，請參考本文表13之內容。

⁴Tesla在儲能系統佔有相當大的市場份額，更在2017年躍升為全美電網用定置型儲能系統供應商首位，市佔率高達80%。旗下產品Tesla Powerwall電池儲能系統，可結合太陽能以儲存白天產生的多餘電力供需要時使用，大幅降低對公共電網的依賴，其未稅售價約為195,000元，可用的儲能容量為13.5 kWh，保固10年，預期使用20年，可循環使用5,000次，安裝於牆面或地面、室內或室外(Tesla, 2020)。

值得注意的，本研究案例平均每日用電量為16.67度，白天太陽能發電時即隨產隨用，電池儲能系統只需儲存沒有太陽時的用電所需，扣除颱風、假日出遊等因素，此案例約符合電池儲能系統循環5,000次之需求。

⁵五大銀行為臺灣銀行、合作金庫銀行、第一銀行、華南銀行、以及臺灣土地銀行。

度，參與台電需量競價。在上述模擬情境之假設下，以此進行合理推斷家庭每日用電時間排程，透天的家庭家電設備耗量比例分為三個部分，分別為家電、空調、照明與其他(朱建華，2012)，如表9所示。

接著，採用朱建華(2012)節能資訊管理系統最佳之排程，案例家庭平日各種典型家電用電時段如圖4所示。第一部分家電，考量台電公司季節電價分類方式區隔為：夏季月份(6/1~9/30)與非夏季月份(10/1~5/31)。首先探討夏季月份家電用電量，佔每日用電量的36%。換句話說，夏月每日家電耗電總量為5.527度，家電夏月平日離峰時間的用電總時數為21小時，耗電量為2.523度，用電費用為4.54元；家電夏月平日尖峰時間的總用電時數為25小時，耗電量為3.004度，用電費用為13.34元。綜合

上述，可知在夏月平日每天的家電用電費用為17.88元，週六日則皆為離峰時間，家電總用電時數為46小時，耗電量為5.527度，夏月週六日每天的家電用電費用為9.95元。因此，夏月家電每月電費金額約為465元。

非夏季月份家電佔每日用電量的57%。換句話說，非夏月每日家電耗電量為8.751度，家電非夏月平日離峰時間的用電總時數為21小時，耗電量為3.995度，用電費用為6.91元；家電非夏月平日尖峰時間的總用電時數為25小時，耗電量為4.756度，用電費用為20.12元。綜合上述，可知在非夏月平日每天的家電用電費用為27.03元，週六日則皆為離峰時間，家電總用電時數為46小時，耗電量為8.751度，非夏月週六日每天的家電用電費用為15.14元。因此，非夏月家電每月電費金額約為704元。

表9 透天家庭家電設備耗量比例一覽(朱建華，2012)

類型	透天夏季月(6/1-9/30)	透天非夏季月(10/1-5/31)	透天全年
家電	36%	57%	48%
空調	32%	7%	18%
照明與其他	32%	36%	34%
總電量	100%	100%	100%

資料來源：並經本研究整理

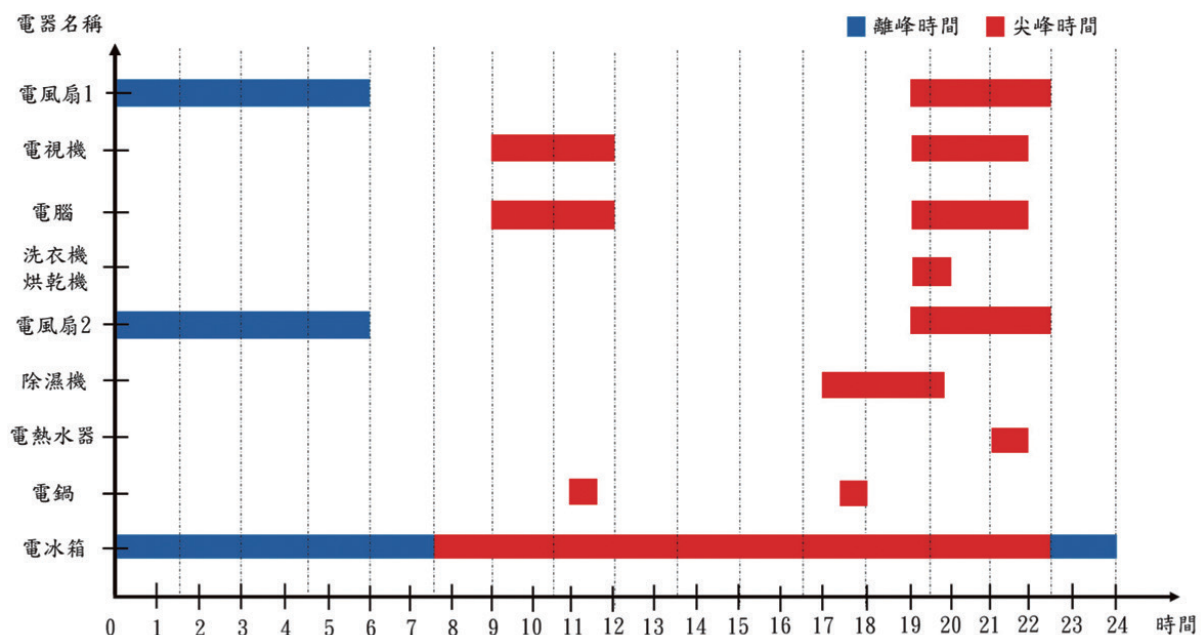


圖4 案例家庭平日各種典型家電用電時段(朱建華，2012)

第二部分空調，案例家庭平日空調用電時段如圖5所示。首先探討夏季月份空調用電量，佔每日用電量的32%。換句話說，夏月每日空調耗電總量為4.913度，夏月平日離峰時間的用電總時數為8小時，耗電量為3.023度，用電費用為5.44元；空調夏月平日尖峰時間的用電總時數為5小時，耗電量為1.89度，用電費用為8.39元。綜合上述，可知在夏月平日每天的空調用電費用為13.83元；週六日則皆為離峰時間，空調總用電時數為13小時，耗電量為4.913度，夏月週六日每天的空調用電費用為8.84元。因此，夏月空調每月電費金額約為370元。

接著，非夏月空調佔每日用電量的7%。換句話說，非夏月每日空調耗電量為1.074度，案例家庭平日空調用電僅開設冷氣1 (參考圖5)，從表中可知道空調非夏月平日尖峰時間的用電總時數為5小時，耗電量為1.074度，綜合上述，可知在非夏月平日每天的空調用電費用為4.54元；週六日則皆為離峰時間，空調總用電時數為5小時，耗電量為1.074度，非夏月週六日每天的空調用電費用為1.86元。因此，非夏月空調每月電費金額約為112元。

第三部分照明與其他，此處案例家庭不考慮其他的部分，案例家庭照明用電時段如圖6所示。首先，探討夏月照明用電量，照明佔每日用電量的32%。換句話說，夏月每日照明耗電總量為4.913度，照明夏月平日離峰時間的用電總時數為4.5小時，耗電量為0.867度，用電費用為1.56元；照明夏月平日尖峰時間的用電總時數為21小時，耗電量為4.046度，用電費用為17.96元。綜合上述，可知在夏月平日每天的照明費用為19.52元；週六日則皆為離峰時間，照明總用電時數為25.5小時，耗電量為4.913度，夏月週六日每天的照明用電費用為8.84元。因此，夏月照明每月電費金額約為489元。

接著，非夏季月份照明佔每日用電量的36%。換句話說，非夏月每日照明耗電量為5.527度，照明非夏月平日離峰時間的用電總時數為4.5小時，耗電量為0.975度，用電費用為1.69元；照明平日尖峰時間的用電總時數為21小時，耗電量為4.551度，用電費用為19.25元。綜合上述，可知在非夏月平日每天的照明費用為20.94元；週六日則皆為離峰時間，照明總用電時數為25.5小時，耗電量為5.527度，非夏月

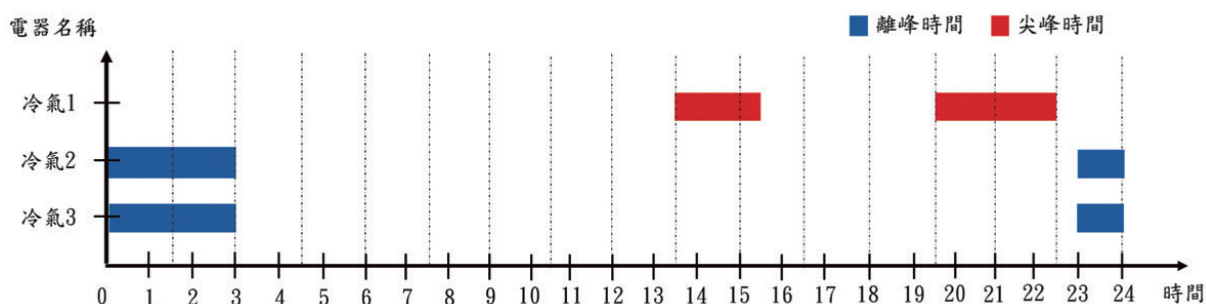


圖5 案例家庭平日空調用電時段(朱建華, 2012)

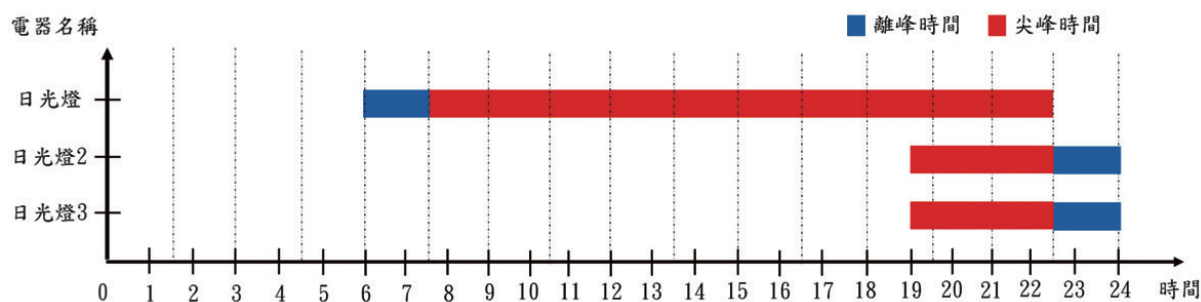


圖6 案例家庭平日照明用電時段(朱建華, 2012)

週六日每天的照明用電費用為9.56元。因此，非夏月照明每月電費金額約為526元。

從上述三個部分(家電、空調、照明)的用電情況可以得到流動電費金額。首先，夏月有17週，因此，夏月的平日與假日分別為85天以及34天；非夏月有35週，因此，非夏月的平日與假日分別為175天以及70天。綜合上述，每年的流動電費金額為16,344元，如表10所示。

接著，以第0期為基準年折現，從第1年開始，累計20年並經折現後總和($\sum_{t=1}^{20}$ 第t年流動電費)為251,688元。綜合基本電費以及流動電費，可知道累計20年並經折現後，用電電費總和為($\sum_{t=1}^{20} PC_t$) 265,547元。

最後，需量反應負載管理措施之可靠型需量競價措施，其抑低用電每度回購價格為10元，針對此變數進行敏感度分析，模擬每度回購價格變更為6、8、10元時，是否案例家庭的評估結果會有所不同。案例家庭各項效益項與

成本項經折現加總後，可計算出在模擬情境一之成本有效性，如表11所示。

根據表11可知，模擬情境一之淨現值。在需量競價每度回購價格為6元、8元及10元時，案例家庭之淨現值分別為-225,570元、-212,250元及-198,929元。換言之，在其他條件不變的情況下，模擬情境一之淨現值隨著需量競價每度回購價格提高而增加。

4.3 模擬情境二之成本有效性分析

本節探討在案例家庭使用智慧家庭能源管理系統的情況下，與前述模擬情境相比是否符合成本有效性。此外，本節與前述模擬情境不同之處，案例家庭在住家屋頂建置太陽光電系統發電，針對此營運模式進行成本有效性分析。首先，將認列所有相關效益與成本項目，如表12所示。

接著，說明如何計算效益項以及成本項，

表10 案例家庭每年流動電費金額(本研究整理製作)

單位：元

	平日夏月	平日非夏月	假日夏月	假日非夏月
家電	1,520(17.9)	4,730(27)	338(9.9)	1,060(15.1)
空調	1,176(13.8)	795(4.5)	301(8.9)	130(1.9)
照明	1,659(19.5)	3,665(20.9)	301(8.9)	669(9.6)
總和	4,355(51.2)	9,190(52.5)	940(27.6)	1,859(26.6)
每年流動電費金額				16,344

註1：本研究採用之折現率為中央銀行公告「五大銀行平均基準利率」之2.63%。

註2：表內()處代表該段期間平均每日流動電費。

註3：在家電的部分，不論平日或假日皆為非夏月之每日用電量多於夏月，主因為電熱水器之故。

表11 模擬情境一之效益項與成本項及淨現值(本研究整理製作)

單位：元

效益項	成本項	需量競價每度回購價格	各期現值加總
(1) PB_t	—	6	39,977
		8	53,297
		10	66,618
—	(2) PC_t	-	265,547
(1) - (2) = 淨現值		6	-225,570
		8	-212,250
		10	-198,929

表12 模擬情境二之效益與成本項目及說明(本研究整理製作)

	項目	項目說明
效益項	PB_t	第 t 年電力系統之收益
	SUB_t	第 t 年政府太陽光電系統補助款
成本項	EC_t	第 t 年建置太陽光電系統的固定成本
	VC_t	第 t 年建置太陽光電系統的變動成本
	PC_t	第 t 年用電電費

第一項為第 t 年電力系統之收益(PB_t)。根據再生能源資訊網(2019)指出，以合法的透天建築物為例，22坪的屋頂可裝設約40塊的太陽能板，且其發電容量約為10瓩，本研究模擬情境將採用設置發電容量為10瓩，且每瓩年發電量為1,179度，每年發電量一共為11,790度。

在此模擬情境，電力系統的收益分為三個部分，分別為家庭用電、參與需量反應以及躉售給台灣電力公司。第一個部分為家庭用電，由於尚未擁有儲能設備，因此只能在白天日照時段使用太陽光電系統。雲林縣平均每日日照時數約為3.51小時，約佔每日的15%，也就是每日藉由太陽光電系統電力可以減少向台電購買15%的電力。換句話說，能省下的金額為用電電費(PC_t)的15%，也就是每年減少39,832元。

第二部分為參與需量反應，同第四章第二節收益項之計算，可知累計20年並經折現後，參與需量競價之收益總和為66,618元。

第三部分，剩餘的太陽光電系統電力將透過躉售費率躉售給台灣電力公司，扣除掉上述

兩個部分後，剩餘的每年太陽光電系統電力量度為10,949.41度。又根據經濟部能源局(2020)指出，109年度太陽光電發電設備電能躉購費率如表13所示。在此模擬情境下，太陽能板總裝置容量為10瓩且為屋頂型，因此案例家庭每期之躉售費率為上限費率5.7132元/度，每年之躉售收入為62,556元，從第1年開始，累計20年並經折現後總和為963,326元。綜合上述三個部分，可計算出累計20年總和 $\sum_{t=1}^{20} PB_t$ 為1,069,776元。

第二項為第 t 年的太陽光電系統補助款(SUB_t)。根據臺北市產業發展局(2019)指出，補助費用將依據設置總容量分配，設置總容量逾3瓩，且在5瓩以下者，每瓩補助新臺幣2萬5千元；設置總容量逾5瓩，且在10瓩以下者，其5瓩以下部分依前目規定補助，逾5瓩部分，每瓩補助新臺幣2萬元；設置總容量逾10瓩，其10瓩以下部分依前目規定補助，逾10瓩部分，每瓩補助新臺幣1.8萬元。若採用智慧家庭能源管理系統的營運模式，太陽能板總裝置容量為10瓩，且補助會發生在第1期初，故為第0期，因

表13 109年度太陽光電發電設備電能躉購費率(經濟部能源局，2020)

單位：元/度

再生能源類別	分類	裝置容量級距	第一期 上限費率	第二期 上限費率	外加模組 回收費	外加併聯電業特 高壓電線路費
太陽 光電	屋 頂 型	1瓩以上未達20瓩	5.7132	5.7132	0.0656	--
		20瓩以上未達100瓩	4.4366	4.3701		--
		100瓩以上未達500瓩	4.1372	4.0722		--
		500瓩以上	4.0571	3.9917		--
		無並聯電業特高壓供 電線路 有並聯電業特高壓供 電線路				0.4674

此 $SUB_{t=0}$ 為225,000元。

在太陽光電發電設備完工後即發放補助金，可能會有道德風險的疑慮，政府為避免此問題，因此制定了對應的規範確認補助金的使用動向⁶。

第三項為第 t 年建設太陽光電系統的固定成本(EC_t)。此項目將依據經濟部能源局(2020)，109年度太陽光電電能躉購費率計算公式使用參數表如表14所示，因此，建置10瓩太陽能板之期初設置成本為572,000元。且此項成本會在第1期初時發生，故為第0期，因此 $EC_{t=0}$ 為572,000元。

第四項為第 t 年建置太陽光電系統的變動成本(VC_t)。一般來說，變動成本為維運成本，維運成本包含設備的清洗、檢測、保養以及維修等。根據經濟部能源局(2020)指出，太陽光電系統的保固期約為5年，之後可自行與建置廠商簽訂合約，一年粗估為1.5%至3%的設置成本，本研究模擬情境採用設置成本的2%計算。從第6年開始，每年的變動成本為11,440元，並以第0期為基準年折現，因此 $\sum_0^{20} VC_t$ 為123,219元。

第五項為第 t 年用電電費(PC_t)，根據本章第二節之計算，可知道累計20年並經折現後，用電電費總和為($\sum_1^{20} PC_t$) 265,547元。

最後，需量反應負載管理措施之可靠型需量競價措施，其抑低用電每度回購價格為10元，針對此變數進行敏感度分析，模擬每度回購價格變更為6、8、10元時，是否案例家庭的

評估結果會有所不同。案例家庭各項效益項與成本項經折現加總後，可計算出在模擬情境(二)之成本有效性，如表15所示。

由表15可知，模擬情境二 在每度回購價值為6元、8元、10元的情況下，其淨現值分別為307,369元、320,689元、334,010元，與模擬情境一之淨現值相比，不論每度回購價格為6元、8元、10元的情況下，模擬情境二皆具有成本有效性，且隨著每度回購價格提高時，越具有效益，呈現出正相關。

4.4 模擬情境三之成本有效性分析

本節探討在案例家庭使用智慧家庭能源管理系統的情況下，與前述兩種模擬情境相比是否符合成本有效性。此外，與前述模擬情境不同之處，在此模擬情境增設儲能設備 Tesla powerwall，案例家庭轉變為產消儲電者 (Prosumer)，以利電力的多元使用。首先，將認列所有相關效益與成本項目，如表16所示。

首先，第一項為第 t 年電力系統之收益(PB_t)，參與需量競價之收益總和，累計20年並經折現後為66,618元，與本章第三節相同。每年太陽光電系統電力度數為11,790度，扣除每日用電度數15.353度，每年將剩餘6,186.16度餘電躉售給台灣電力公司，累計20年並經折現後總和為544,262元。綜合上述，可計算出累計20年總和 $\sum_1^{20} PB_t$ 為610,880元(參見表14之2020年度太陽光電發電設備電能躉購費率)。

表14 2020年度太陽光電電能躉購費率計算公式使用參數值(經濟部能源局，2020)

		單位：元/度	
再生能源類別	分類	裝置容量級距	初期設置成本
太陽光電	屋頂型	1瓩以上未達20瓩	57,200
		20瓩以上未達100瓩	46,700
		100瓩以上未達500瓩	44,600
		500瓩以上 無並聯電業特高壓供電線路	43,400
		有並聯電業特高壓供電線路	—

⁶太陽光電發電設備設置完成後，自補助款撥付日起五年內，應記錄每季使用狀況，並於每年一、四、七、十各月之五日前完成記錄，且繳交上一季之太陽光電發電設備電能生產及運轉記錄表。如系統發生故障情形，應詳細記載與說明故障原因及維修狀況於太陽光電發電設備電能生產及運轉記錄表。

表15 模擬情境二之效益項與成本項及淨現值(本研究整理製作)

單位：元

效益項	成本項	需量競價每度回購價格	各期現值加總
(1) PB_t	—	6	1,043,135
		8	1,056,455
		10	1,069,776
(2) SUB_t	—	—	225,000
—	(3) EC_t	—	572,000
—	(4) VC_t	—	123,219
—	(5) PC_t	—	265,547
(1)+(2)=(6) 效益項總和	—	6	1,268,135
		8	1,281,455
		10	1,294,776
—	(3)+(4)+(5)=(7)成本項總和		960,766
(6)+(7)=淨現值		6	307,369
		8	320,689
		10	334,010

表16 模擬情境三之效益與成本項目及說明(本研究整理製作)

	項目	項目說明
效益項	PB_t	第 t 年電力系統之收益
	SUB_t	第 t 年政府太陽光電系統補助款
成本項	EC_t	第 t 年建置太陽光電系統的固定成本
	VC_t	第 t 年建置太陽光電系統的變動成本
	PC_t	第 t 年用電電費

第二項為第 t 年的太陽光電系統補助款(SUB_t)。與前述模擬情境相同， $SUB_{t=0}$ 為225,000元。

第三項為第 t 年建設太陽能板的固定成本(EC_t)。建置10瓩太陽能板之期初設置成本與第三節相同為572,000元。在此模擬情境中將設置電池儲能系統Tesla Powerwall。依據Tesla (2020)指出，一塊Powerwall未稅售價約為195,000元。此外，還須另付配件費用約為33,000元，以及對家庭電力系統進行升級改造，改造費約為75,000至135,000元(本研究將以100,000元計算)，總合約為328,000元。綜合上述，且此項成本會在第1期初時發生，故為第0期，因此 $EC_{t=0}$ 為900,000元。

第四項為第 t 年建置太陽光電系統的變動成

本(VC_t)。與前述模擬情境相同，採用設置成本的2%計算。從第6年開始，每年的變動成本為18,000元，並以第0期為基準年折現，因此 $\sum_{t=6}^{20} VC_t$ 為193,877元。

第五項為第 t 年用電電費(PC_t)，在此模擬情境家庭用電全數運用太陽光電系統發電。換句話說，不另外向台電公司購買用電。綜合上述， $(\sum_{t=1}^{20} PC_t)$ 為0元。

最後，需量反應負載管理措施之可靠型需量競價措施，同第三節模擬每度回購價格變更為6、8、10元時，是否案例家庭的評估結果會有所不同。案例家庭各項效益項與成本項經折現加總後，可計算出在模擬情境三之成本有效性，如表17所示。

由表17可知，模擬情境三在每度回購價

表17 模擬情境三之之效益項與成本項及淨現值(本研究整理製作)

單位：元

效益項	成本項	需量競價每度回購價格	各期現值加總
(1) PB_t	—	6	584,239
		8	597,559
		10	610,880
(2) SUB_t	—	—	225,000
—	(3) EC_t	—	900,000
—	(4) VC_t	—	193,877
—	(5) PC_t	—	0
(1)+(2)=(6) 效益項總和	—	6	809,239
		8	822,559
		10	835,880
—	(3)+(4)+(5)=(7)成本項總和		1,093,877
(6)+(7)=淨現值		6	-284,638
		8	-271,318
		10	-257,997

值為6元、8元、10元的情況下，其淨現值分別為-284,638元、-271,318元、-257,997元，與前述兩種模擬情境之淨現值相比，在每度回購價格為6元、8元情況下，模擬情境三皆不具有成本有效性。

4.5 本章小結

案例家庭採用智慧家庭能源管理系統營運模式之模擬情境分析結果，彙整如表18所示。

從上述分析結果可知，模擬情境一、模擬情境二及模擬情境三之淨現值分別為-198,929

元、334,010元及-257,997元。其中模擬情境二為最佳決策方案。背後原因為目前需量競價抑低用電每度回購價格以及屋頂型太陽能發電系統每度躉售費率金額均顯著高於所有時段的的時間電價，消費者能夠將自身轉變為電能產消者，可增進自身的收益。此外，模擬情境三則最不具有成本有效性，原因為在現行臺灣的制度下，電池儲能系統的設置成本過高，在收益的層面上考量，非理性的選擇。值得注意的，在使用的層面上，擁有儲能電池能夠讓案例家庭在用電上更加便利且多元，讓自身成為產消

表18 三種模擬情境之總收益與總成本項目及淨現值(本研究整理製作)

單位：元

項目 (代號)	情境一 (Prosumer) 需量競價	情境二 (Prosumer) 需量競價+太陽能	情境三 (Prosumager) 需量競價+太陽能+儲能電池
(1) PB_t	666,18	1,069,776	610,880
(2) SUB_t	—	225,000	225,000
(3) EC_t	—	572,000	900,000
(4) VC_t	—	123,219	193,877
(5) PC_t	265,547	265,547	0
(1)+(2)=(6)總收益現值	666,18	1,294,776	835,880
(3)+(4)+(5)=(7)總成本現值	265,547	960,766	1,093,877
(6)-(7)=淨現值	-198,929	334,010	-257,997

儲電者，例如：在停電時，可以藉由儲能電池的電力，讓自身不受影響。此外，因應電力產業的變革，未來邁向去中心化，就長遠的發展性來看，儲能電池的應用是必然的。

接著，針對需量競價抑低用電每度回購價格進行敏感度分析，彙整如表19所示。

從結果可觀察出，將每度回購價格調整為6元、8元及10元時，模擬情境一的淨現值分別為-225,570、-212,250及-198,929元；模擬情境二的淨現值分別為307,369元、320,689元及334,010元；模擬情境三的淨現值分別為-284,638元、-271,318元及-257,997元。綜合上述，在敏感度分析中，模擬情境二依然皆最具有成本有效性，且隨著需量競價每度回購價格的提高，越具有收益，呈現正相關。

5. 結論與建議

5.1 模擬情境分析結果與結論

經本研究模擬情境量化分析，可以得知以下四點結論：1. 模擬情境二為最佳決策方案。換句話說，成本有效性之分析結果顯示，在現行的制度下，案例家庭選擇轉變為Prosumer的

收益較Prosumager高。2. 採用智慧家庭能源管理系統時，是否將自產電力妥善運用，對其效益有極大的影響。換句話說，不管是將電力透過用戶群代表參與需量競價⁷或是藉由躉購費率躉售給台電公司，亦或是以儲能設備儲存使用，在現行的做法下，都能為其自身帶來收益。3. 雖然建置太陽能板的成本遠高於政府補助金額，讓一般家庭在初期擁有龐大的投資負擔，但目前台電的屋頂型太陽能發電系統每度躉售費率顯著高於所有時段的時間電價，因此以長遠來看具有成本有效性。4. 模擬情境三相較於其他兩種模擬情境較不具有成本有效性，其原因為目前儲能設備Tesla powerwall之設置成本金額過高，能帶來的收益卻顯著低於設置成本。5. 在敏感度分析中，調整了需量競價措施其抑低用電每度回購價格，模擬情境二在6元、8元、10元皆為最佳決策方案。其中每度回購價格越高，其所帶來的收益也越高。

5.2 後續研究建議

本研究模擬情境中，在基礎情境即以智慧家庭為案例，未考慮一般家庭之情境作為比較基礎。太陽光電系統的收益受到政府補助款、需量競價價格及躉售價格影響，故未來研究可

表19 敏感度分析之總收益與總成本項目及淨現值(本研究整理製作)

單位：萬元

項目(代號)	情境一			情境二			情境三		
需量競價每度回購價格(元)	6	8	10	6	8	10	6	8	10
(1) PB_t	4	5.3	6.7	104.3	105.6	107	58.4	59.8	61.1
(2) SUB_t		—			22.5			22.5	
(3) EC_t		—			57.2			90	
(4) VC_t		—			12.3			19.3	
(5) PC_t		26.6			26.6			0	
(1)+(2)=(6)總收益現值	4	5.3	6.7	126.8	128.1	129.5	80.9	82.3	83.6
(3)+(4)+(5)=(7)總成本現值		26.6			96.1			109.3	
(6)-(7)=淨現值	-22.6	-21.3	-19.9	30.7	32	33.4	-28.4	-27	-25.7

⁷現行臺灣的制度並未開放低壓用戶參與可靠型的需量競價，即便透過用戶群代表依然無法參與，但此處假設的情境為目前先進國家相對普遍存在的營運模式(各國用戶群代表的實際範例可參閱本研究第二節文獻探討表2-3)，未來臺灣也必將逐步開放。

以朝向政府以及台灣電力公司進行，太陽能板的補助金額以及躉售費率的相關面向進行評估，例如：政府與台灣電力公司若希望推行再生能源的應用，補助金額以及躉售費率應該如何制定才能有效提升民眾採用智慧家庭能源管理系統的比例。此外，本研究假設藉由用戶群代表參與需量競價，所需給付的佣金為10%，並未探討更多樣化的營運模式，例如：用戶群代表協助住戶建置屋頂型太陽光電及儲能系統，但藉此收取更高的佣金。

本研究假設電池儲能系統在充放電時為100%轉換電力，並沒有考量電池儲能系統充放電轉換時耗損電量，建議未來可以納入考量。評估裝置太陽能板時，本研究參考再生能源資訊網之內容，以22坪可裝設10kW裝置容量計算，而若以太陽光電單一服務窗口的資訊，則建議以7kW較為合理⁸。本研究家庭案例每月用電為500度，惟未注意每月700度以上適合選用簡易式時間電價，建議可以再以不同之電價制度再行估算⁹。

本研究著重於案例家庭自身利益的探討，並未探討對於整體社會的效益，例如：使用智慧家庭能源管理系統後，估計其所能產生的外部效益，包括降低空氣汙染、減少溫室氣體的排放。未來研究也可以利用不同利害關係人的角度進行分析，例如：從用戶群代表或是太陽光電系統的建設者角度探討。

目前臺灣常見的家庭發電全售給台電，而本研究假設未來電業自由化，家庭自發自用，不足或者多餘的電再由台電收購，與現今臺灣的情況有所差異。若電力市場自由化之後，本研究評估之電價以及收購價格也會有所不同，但可依本研究之分析方式，調整電力市場價格以及收購價格等相關參數，予以智慧家庭能源管理相關政策之建議。

最後，本研究的單位著重於家庭自身，建議後續可以研究智慧家庭與智慧家庭之間相互

連結，如果有聚合商結合，產生聚少成多、積沙成塔，形成螞蟻雄兵的虛擬電廠，創造出更大的商業價值以及社會整體效益。

參考文獻

- 中央通訊社，2020。智慧電表結合AI秒董家戶用電節能更有效。https://www.cna.com.tw/news/afe/202008230108.aspx?utm_source=LINE&utm_medium=share&utm_campaign=lineuser。(2020年8月23日檢索)
- 台灣電力公司，2019。再生能源，各縣市太陽光電容量因素。<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=207&cid=165&cchk=a83cd635-a792-4660-9f02-f71d5d925911>。(2020年3月20日檢索)
- 台灣電力公司，2020。營業規章。<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=158>。(2020年6月10日檢索)
- 台灣電力公司，2018。107年需量負載管理措施。<https://www.taipower.com.tw/upload/135/2018071708513325281.pdf>。(2020年7月16日檢索)
- 朱建華，2012。《智慧家庭節能資訊管理系統最佳化之整合研究：多目標基因演算法與層級分析法》。國立中興大學資訊管理學系碩士論文。
- 再生能源資訊網，2019。太陽能板補助開跑，先受理在抽籤。<https://www.re.org.tw/news/more.aspx?cid=217&id=2331>。(2020年3月20日檢索)
- 高啟洲與楊孟洵，2019。行控智慧家庭系統之設計與製作。*International Journal of Science and Engineering*，第9卷第2期，頁125-137。
- 張容瑞，2012。《影響智慧家庭採用電能資訊管理系統之因素分析-市場調查法》，國

⁸本研究未注意到太陽光電單一服務窗口的資料，在此特別感謝評審委員的建議。

⁹本研究未注意到台電建議選用簡易式時間電價為每月700度以上，特此謝謝評審委員指正。

- 立中興大學資訊管理學系碩士論文。
- 張翰杰，2014。《智慧電表住宅用戶選用需求反應電價之替代方案分析》，國立中興大學應用經濟系碩士論文。
- 郭彥廉，2000。《空氣汙染移動源管制政策之成本有效性分析》。國立臺北大學資源管理研究所碩士論文。
- 臺北市產業發展局，2019。108年度產業發展局補助設置太陽光電發電設備實施要點受理申請公告。https://www.doed.gov.taipei/News_Content.aspx?n=E6AB8A3B0931765D&sms=7335C63E63BF46FA&s=744B6B8EF43AD51C。(2020年3月20日檢索)
- 許志義，2019。「獨角獸經濟學：引領期盼臺灣獨角獸」《哈佛商業評論》，2019年11月號，頁44-45。
- 許志義，2020。政大經濟系研究所郭哲甫碩士論文口試現場提供之書面修正意見。
- 許志義與洪穎正，2016。「電力需求面管理與用戶群代表法制革新：先進國家案例及其對臺灣之政策意涵」。《臺灣能源期刊》第3卷第2期，頁137-153，臺北，經濟部能源局。
- 許志義與黃國暉，2010。「臺灣能源需求面管理成本效益分析之應用」，發表於《能源經濟學術研討會》，2010年10月19日，臺北市。
- 許志義與蔡志欣，2018。「太陽能發電系統生命週期淨能源分析與成本效益評估」。《台電工程月刊》第834期，頁1-21，臺北，台灣電力公司。
- 陽光伏特家，2019。出資太陽能電廠能獲益多少？需要承擔哪些風險？太陽能出資前必讀。<https://blog.sunnyfounder.com/2019/09/02/%E6%88%91%E6%83%B3%E6%8A%95%E8%B3%87%E5%A4%AA%E9%99%BD%E8%83%BD%E9%9B%BB%E5%BB%A0%E6%BC%8C%E8%83%BD%E7%8D%B2%E7%9B%8A%E5%A4%9A%E5%B0%91%E6%BC%9F%E9%9C%80%E8%A6%81%E6%89%BF%E6%93%94%E5%93%AA%E4%BA%9B/>。(2020年3月25日檢索)
- 楊宏澤與廖建棠，2011。智慧家庭(建築)電能管理技術之發展。《電機月刊》，21(8)，168-179。
- 經濟部技術處，2020。智慧家庭發展趨勢。https://www.moea.gov.tw/MNS/doit/industrytech/IndustryTech.aspx?menu_id=13545&it_id=288。(2020年6月1日檢索)
- 經濟部能源局，2020。中華民國一百零九年再生能源電能躉購費率及其計算公式。https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/Law/Content.aspx?menu_id=8848。(2020年6月1日檢索)
- 經濟部能源局，2020。再生能源發展條例，109年度第2次會議。https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/renewable/content/ContentLink.aspx?menu_id=778。(2020年6月1日檢索)
- 廖桓暉，2013。《臺灣住宅部門需求反應方案與分散式供電系統之整合研究》，國立中興大學應用經濟學系碩士論文。
- 蔡志祥，2019。《電動汽車儲能對電網售電營運模式之成本有效性分析》。國立政治大學經濟學系研究所碩士論文。
- 戴士中，2018。《基於ECHONET Lite協定之智慧家庭閘道器設計與實作》。國立臺北科技大學自動化科技研究所碩士論文。
- 蕭代基、鄭惠燕、吳珮瑛、錢玉蘭與溫麗琪，2002。《環境保護之成本效益分析：理論、方法與應用》。臺北：俊傑書局股份有限公司。
- Baraka, K., M. Ghobril, S. Malek, R. Kanj and A. Kayssi, 2013. "Low cost Arduino/Android-based Energy-Efficient Home Automation System with Smart Task Scheduling," 2013 Fifth International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (CICSN), pp. 296-

- 301.
- Bernal, A., 2006. "Economical and Environmental Analysis of Grid Connected Photovoltaic Systems in Spain," *Renewable Energy*, vol. 31, Iss.8, pp. 1107-1128.
- Castro-Antonio, M. K., G. Carmona-Arroyo, I. Herrera-Luna, A. Marin-Hernandez, H. V. Rios-Figueroa & E. J. Rechy-Ramirez, 2019. "An Approach based on a Robotics Operation System for the Implementation of Integrated Intelligent House Services System". In 2019 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP) (pp. 182-186). IEEE.
- Darby, S. J., 2017. "Smart technology in the home: time for more clarity. *Building Research & Information*", 46(1), 140-147.
- Lin, F.J., 2011. "Strategic Initiatives of Smart Grid in Taiwan". Paper presented at the International Symposium on Smart Grids, Taipei, Taiwan.
- Nextdrive, 2020. <https://www.nextdrive.io/tw-news/>. (Data retrieved on June 6, 2020)
- Sioshansi, F. P. (Ed.), 2019. "Consumer, Prosumer, Prosumager" How Service Innovations Will Disrupt the Utility Business Model. Academic Press.
- Tesla, 2020. Tesla powerwall, https://www.tesla.com/zh_TW/powerwall. (Data retrieved on March 25, 2020).
- Wu, Y. 2009. "Scientific Management-the First Step of Building Energy Efficiency", *Proc. International Conf. on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, Xi'an, vol. 4, pp. 619-622.
- Yamauchi, H., Y. Izumi, K. Uchida, A. Yona & T. Senjyu, 2012. "Advanced smart house". In 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (pp. 130-135). IEEE.

The Operating Model and Economic Analysis of Smart Home Energy Management System: Prosumer vs. Prosumager

Jyh-Yih Hsu^{1*} Chen-Hsuan Lin²

ABSTRACT

Over the past few years, the development of smart home energy management systems (SHEMS) has become increasingly crucial. SHEMS convert the role of households from a consumer of electricity to a prosumer or—through the installment of energy storage devices—a prosumager of electricity. Specifically, SHEMS equip households with a dual role of a consumer and also a producer, creating additional benefits to consumers. With the aim of discussing the core value of and conducting an economic analysis on SHEMS, this study evaluated the economic benefits of application of SHEMS in the case households with cost-effectiveness analysis. Three simulation scenarios were used in the evaluation as follows: (1) the case households participated in the demand response program of Taipower. (2) Prosumer: the case households used part of the electricity produced by itself, and participated in the demand response program of Taipower, and sold all excessive power to Taipower at the wholesale electricity rate. (3) Prosumager : the case households stored produced electricity in an energy storage device for future use and participated in the demand response program of Taipower and sold all excessive power to Taipower at the wholesale electricity rate. According to the empirical analysis, scenario (2) was determined to be cost-effective. On the basis of the case households and under the existing policy, selling self-produced electricity to Taipower at the wholesale electricity rate generates great economic benefits. This is because the current wholesale electricity rate adopted by Taipower is much higher than the time-of-use rates. Through a quantitative research design, this study provided insights into the economic benefits of SHEMS for households planning to use such a system.

Keywords: smart home energy management system, cost-effectiveness analysis, prosumer, prosumager, energy storage device.

¹Distinguished Professor, Department of Business Administration, Chung Hua University; Distinguished Research Fellow, Intelligent Transportation Development Center, National Chung Hsing University; Distinguished Chair Professor, National Taipei University of Business.

²Master, Graduate Institute of Economics, National Cheng Chi University.

*Corresponding Author, Phone: +886-3-5186261 / +886-4-2285-0505,

E-mail: ghsu@chu.edu.tw / hsu@nchu.edu.tw

Received Date: September 11, 2020

Revised Date: March 31, 2021

Accepted Date: April 21, 2021