

離島微電網經濟效益敏感度分析

李奕德¹ 陳思涵^{2*} 盧思穎³ 許舒雅⁴ 姜政綸¹

摘要

小型離島電力系統常因距離大型電力系統較遠，且無海纜相連，故多以小型柴油發電機組供應島上用電。然因發電燃料運送不便使得運輸成本較高，且其具高碳排放量之特性，導致離島供電系統面臨著高經濟成本、環境成本等困境。因此，本文針對離島微電網系統進行經濟效益敏感度研究，本文以桶盤嶼為探討案例，透過島上發用電資料蒐集與分析，以負載評估再生能源與儲能系統設置容量，再經發電與成本的影響因子及其變動率探討，進行離島微電網系統的經濟效益敏感度分析，以期降低島上發電成本與減少二氧化碳排放，達到建置澎湖低碳島的願景。透過本文的案例分析，得知柴油發電成本對於微電網建置有較顯著的影響，而太陽光電及儲能系統成本降低有助於微電網系統推動，此研究流程與步驟可作為不同離島型微電網建置參考與借鏡。

關鍵詞：微電網，成本效益分析，敏感度分析

1. 前言

綠色能源的開發與應用可有效減緩地球的溫室效應，世界各國皆積極發展，也是未來的趨勢。我國政府能源政策以能源安全、綠色經濟及環境永續為願景，積極擴大再生能源推動，並考慮國際技術成熟度及健全再生能源的發展環境，規劃於2025年再生能源占比達20%之目標，其中太陽能成熟的技術在塑造臺灣能源的發展上扮演關鍵角色，並佔未來再生能源目標近八成，設置目標量訂為20 GW，其餘兩成則為離岸風電、水力及沼氣等，但由於再生能源發電情況受限於環境氣候，具有間歇性與不確定性問題，若區域之再生能源占比逐漸提升，勢必會衝擊電力系統運轉之穩定性。而為了提升再生能源滲透率，同時增加系統運轉安

全，發展微電網技術成為必要工作。然而微電網是將區域內的分散式能源與負載整合，並透過微電網關鍵技術達到區域內系統的平衡與穩定，必要時亦可與外部電力系統斷開而獨立運轉，因此微電網被視為提升區域內再生能源占比的一種手段，目前各國皆積極發展微電網關鍵技術，及建置微電網示範區(經濟部能源局，2016)。

1.1 離島地區微電網發展

根據Navigant Research(2020)的研究報告，截至2020年第一季度為止，已有超過139個國家投入微電網系統的建置，尤以亞太地區的偏遠地區微電網發展十分迅速，全球總案場數量多達6,610處，總裝置容量約31,784.6 MW，近半年內於全球新增約2,179處微電網系統案場，裝置

¹行政院原子能委員會核能研究所 副研究員

²財團法人台灣經濟研究院 助理研究員

³台經院 副研究員

⁴台經院 助理

*通訊作者電話: 02-2586-5000#325, E-mail: d33691@tier.org.tw

收到日期: 2020年07月03日

修正日期: 2021年02月26日

接受日期: 2021年03月02日

容量約增加5,479.7 MW，就微電網發展總容量和計畫數量而言，北美、亞太地區和拉丁美洲佔大多數。如Navigant Research的研究報告提到，由於儲能系統能有效整合可再生能源間歇性發電的特性，隨著太陽能和風力發電機組部署的增加，微電網案場對儲能系統的需求將持續增長，且隨著技術科技進步、成本降低及對分散式微電網的需求不斷擴張之下，Navigant Research (2020)估計2019年全球微電網的總體市場規模為81億美元，預計到2028年將接近400億美元，全球微電網總容量可望成長至近20 GW，年複合成長率預計可達21.4%，李奕德等(2017)根據國內外離島型微電網建置實例進行評估，國內澎湖縣東吉嶼建置之微電網系統結合太陽能發電及儲能電池蓄電效益，提供村民日常生活所需用電，其透過提高再生能源供電占比，進而減少使用高成本燃油發電，不僅增加電力網絡能源需求供給之多樣性，同時舒緩離島運補柴油燃料之不便。國外如新加坡烏敏島、日本沖繩縣宮古島、印尼孫巴島等多座離島已導入微電網系統示範，該系統多整合分散式電源與儲能系統，結合儲能系統優勢在於可作為分散式發電設備停機時的備援系統外，也作為穩定因太陽光電系統發電量變化及負載變動的獨立系統，主要可用於電壓、頻率變化控制，進而穩定輸出之電力品質。

1.2 澎湖地區地理環境與供電方式

澎湖群島由九十餘座島嶼所組成，面積約為126.86平方公里，距離臺灣本島約50公里。早期澎湖群島交通不便，無法由臺灣本島接引電源，因此除澎湖本島外，其他離島地區皆由當地農漁會等合作社團體，自行安裝獨立小型柴油發電機組，但小型柴油機組發電成本昂貴，其發電營運商轉困難為其面臨之一大挑戰。而自民國63年起，台電公司依照行政院核准「台電公司接辦臺灣省離島電業實施方案」，陸續接管離島電業，加速建設離島發電設施並改善離島居民用電品質，但目前仍有些

離島地區尚未被台電公司接管。

澎湖群島之發電系統分為由台電管轄與非台電管轄兩種類型，其中受台電管轄的區域包含本島馬公市及湖西、白沙、西嶼3鄉，離島則有七美、望安(含將軍)、虎井、吉貝、員貝、大倉、鳥嶼等；其他離島多未受台電管轄，而是由當地政府及台電補助成立電力合作社自行供電，並且由村辦公室或水電合作社負責其柴油發電機組及海水淡化廠的營運工作，如桶盤嶼、東嶼坪、西嶼坪、東吉嶼及花嶼等五座島嶼(盧思丞等，2015)。而台電每年編列一千萬補貼澎湖縣偏遠離島自營水電合作社作為運作經費，但營運上仍有兩千多萬的缺口由縣政府補貼，再者，由於目前離島發電機組皆採用柴油發電，除了發電成本較高外，亦可能造成高二氧化碳排放，故應進行離島微電網系統的經濟效益敏感度分析，以期降低發電成本與減少碳排的效益，達到建置澎湖低碳島的願景。

1.3 桶盤嶼電力系統現況說明

根據政府公布「各機關學校公教員工地域加給表」將澎湖的離島地區分級(表1)，一級離島之電力供應皆由台電公司負責，電費均採取以度計價且無電價優惠方案；三級離島則採取每月每戶固定收費方案；二級離島多採以度計價的電價方案，僅馬公市轄下桶盤嶼為非台電管轄之獨立發電系統，對於島上居民用電採取每月每戶固定收費，目前桶盤嶼官方登記的住戶數117戶，有369名戶籍人口。

桶盤嶼用電規模較小且供電系統距離大型電力系統遠，亦沒有海纜相連，因此使用小型柴油發電機組供應島上用電，由島上的村辦公室、水電合作社負責其發電機組營運工作，現有運轉中的四台180 kW柴油發電機組，以三相三線220 V供應島上用戶及海水淡化廠之用電，目前島上供電狀況無規律性，僅由負責操作人員定期察看發電機組運作情況作為停機依據，海淡廠用電之發電機組則由海淡廠人員自行操作。然而，由於發電燃料的高運輸成本與高碳

表1 澎湖各級離島供電情形

分級	島嶼名稱	營運管理單位	電價方案
一級離島	馬公、湖西、白沙、西嶼、小門	台電公司	以度計價
二級離島	虎井、桶盤、吉貝、鳥嶼、員貝、望安、七美	台電公司	以度計價
	桶盤嶼	水電合作社	每月每戶固定電費(400元)
三級離島	東吉嶼、花嶼、東嶼坪、西嶼坪	望安鄉公所	每月每戶固定電費 (115元至400元)
	西吉嶼(無人居住)		

參考資料：本研究整理自澎湖縣政府官網，2020。

排放量之特性，導致桶盤嶼供電系統面臨著高經濟成本與環境成本的困境。為提高桶盤嶼供電品質及改善環境影響與經濟效益等議題，本文透過桶盤嶼106年至107年的各個發電機之電力輸出端、及海淡廠與用戶用電總盤等電子電表蒐集之發電與用電資訊，進行彙整與分析後，藉以規劃建置再生能源發電與微電網系統的可行方案及最佳化配比，以減少柴油發電機組的使用，落實澎湖低碳島的願景。

2. 研究方法與研究內容

2.1 研究架構

本文利用桶盤嶼四組發電機組輸出端、海水淡化廠與用戶用電總盤上之十具電子電表進行發用電資料的量測工作，將發用電資料加以蒐集與彙整，並進行格式轉換。依據自106年至107年所蒐集之發電與用電資料，整理每月每日尖峰負載小時之用電量統計資訊。並藉由上述統計分析，評估與選用微電網系統容量與儲能設備，計算微電網建置成本、微電網系統每度電均化成本、淨現值、內部報酬率與折現後回收年限，進行系統二十年期投資成本效益分析。最後，本文將針對此微電網建置方案進行經濟效益敏感度分析。

2.2 資料蒐集與樣本描述

本文透過裝設於四台柴油發電機各電力

輸出端、海水淡化廠及島上用戶用電總盤等10具電子電表，長期測量、蒐集及彙整桶盤嶼電力系統發用電資訊。桶盤嶼電力資訊將透過無線的方式傳輸回臺灣本島的記錄器，進行記錄與分析。資料處理方式係以有效功率之每分鐘資料為基礎，加以轉換為60分鐘平均用電需量資料，為了方便討論，以下將每日中最最高的小時平均用電需量視為桶盤嶼該日的系統尖峰負載。圖1為106年4月到11月的每日尖峰負載變化，圖2為107年5月到10月的每日尖峰負載變化，樣本採集天數於兩年期間共計423日。圖中顯示，桶盤嶼的每日尖峰負載大多介於50 kW至90 kW之間。

由106及107年所蒐集之每日尖峰負載資料，經整理後資料分布如圖3所示，每日尖峰負載介於60~69 kW之區間的資料有189筆，為所有資料級距中筆數最多者，約占44.7%；資料筆數次高之區間為70~79 kW級距，該區間有162筆資料，約占38.3%。經上述數據顯示，有超過八成的每日尖峰負載發生在60~79 kW區間，且樣本期間每日尖峰負載的極大值為88.10 kW、極小值為36.89 kW、平均數為67.82 kW、標準差為8.07 kW。

總體而言，每日尖峰負載主要於60 ~ 79 kW區間，若再觀察兩個年度的每月每日尖峰負載情形分布(如表2)，可發現高負載情形主要頻繁發生於6-9月夏秋之際；但不同年度、同月份的負載分布有其差異性，以10月為例，106年10月負載大於70 kW的天數為23天，107年10月負

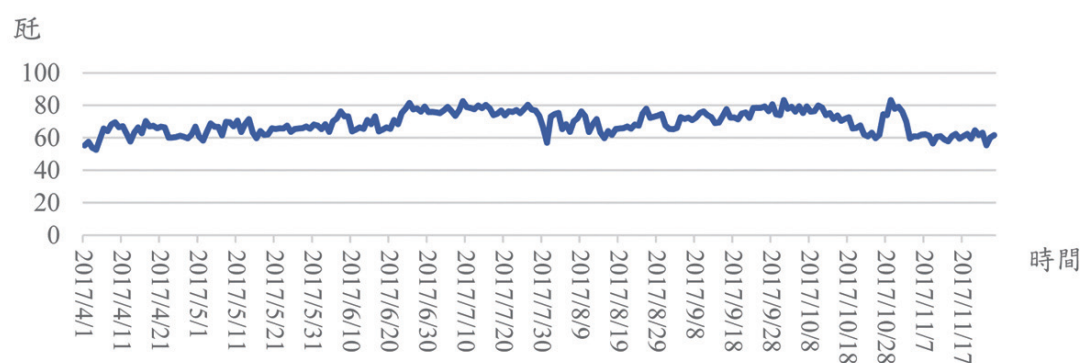


圖1 106年4月至11月每日尖峰負載趨勢變化(本研究繪製)

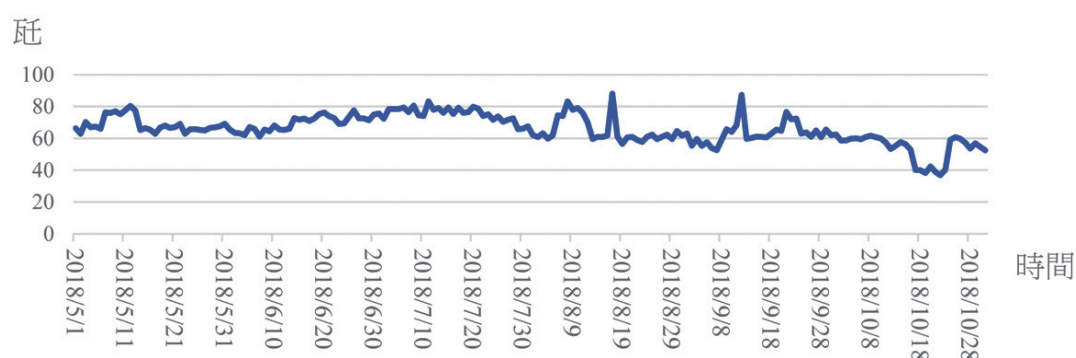


圖2 107年5月至10月每日尖峰負載趨勢變化(本研究繪製)

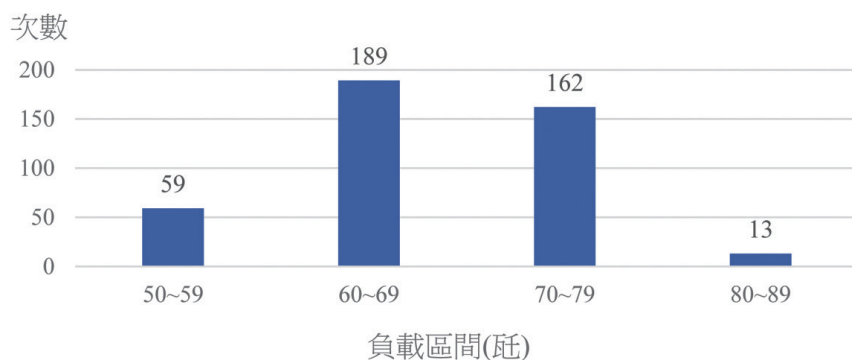


圖3 每日尖峰負載區間分布情形(本研究繪製)

表2 各月每日尖峰負載區間累積次數表(本研究整理)

單位：次

年度	106年								107年					
每日尖峰負載區間(kW)	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
> 80	0	0	1	3	0	1	2	0	1	0	2	2	1	0
70 ~ 79	1	2	15	26	14	24	21	2	7	15	26	6	3	0
60 ~ 69	22	27	14	1	16	5	7	16	23	15	3	16	18	6
< 59	7	2	0	1	1	0	1	7	0	0	0	7	8	25

載大於70 kW的天數則為0天，根據本文調查，107年8~10月之月均溫相較於106年皆至少低於一度以上，以此初步判斷氣溫可能為造成尖峰負載數值略為降低的因素之一，以民眾用電行為來解釋，空調冷氣為民生用電之大宗，氣溫高低合理成為其用電的重要影響因子。

3. 實證分析結果

3.1 評估微電網系統及儲能設備

小型風力機因設置成本低廉及適應低風速環境的特性，主要被應用於離島及偏遠地區作為輔助電源設施，成為許多電力基礎設施不足的地區的供電來源(經濟部能源局，2018)，但陳美蘭與胡哲魁(2015)澎湖具有豐富的風力資源可作為再生能源發展，需進行實地觀測為主、數值模擬為輔的細部風能評估，瞭解風場實際特性才能有效降低風險。除了技術門檻高與實地觀測數據需求，張家豪(2020)也指出，風力發電廠址尋覓與設置也常遭遇當地居民以景觀或環保或漁民權益受損等議題而影響其發展。考量國內市場技術成熟度與設備導入評估之數據需求，故本研究僅先以太陽光電作為微電網評估的主要分散式電源之一。

以現階段儲能技術來說，常見的儲能電池種類包括鋰電池、氫能電池、液流電池、鈉電池(鈉硫電池、鈉氯化鎳電池)、鉛酸電池、鎳電池(鎳鎘電池、鎳氫電池)等。鋰電池主要優

勢在於其壽命長，可在常溫環境下達到20,000次循環壽命，且於高電流出力下仍可保持一定容量維持率，對於環境溫度受限低同時具安全穩定的特性，惟其缺點為成本較高，鋰電池循環次數與充放電效率皆佳且能量密度高，但成本過高。其他電池種類如氫能電池尚處研發階段，儲能成本高，且有爆炸之疑慮；液流電池裝置簡單且易維護，但能量密度偏低且目前可使用之系統寥寥無幾；鈉硫電池技術相對成熟，亦已發展至一定規模，然而鈉硫電池腐蝕性強，安全方面尚有疑慮；鈉氯化鎳電池則較為安全，其運作環境為250~350℃的高溫，因此需要設置加熱與冷卻管理系統；鉛酸電池為迄今使用最久之電池，然而一般僅使用在小型設備如電動車等，因體積大且壽命相對短，若使用在電網儲能成本過高。鎳鎘電池有環境污染的問題，許多國家目前已限制甚至禁用鎳鎘電池；而鎳氫電池則是在成本與表現上遠不如鋰電池。考量鋰電池在循環次數、充放電效率及能量密度高的優勢，且在安全性、應用範圍及商業化程度亦具有相對優勢(圖4)，且其成本過高的劣勢也因逐年技術發展而轉淡，因此本文在儲能系統電池種類的選用上以鋰電池作為應用。

根據行政院原能會核研所(2019)開發離島微電網系統，針對高占比再生能源及儲能系統之電網衝擊分析與緊急運轉系統等相關技術與於東吉嶼及金門大小型離島的實際應用，微電網系統孤島100小時連續運轉測試，可達再生能

種類 項目	鋰電池	鈉硫電池	液流電池	鈉離子電池 (水溶液電解質)	鈉離子電池 (有機電解質)	鋅空氣電池	鎂離子電池
能量密度							
成本							
安全性							
應用範圍							
商業化							

■ 較佳 ■ 普通 ■ 較差

圖4 電池種類比較(麥姆斯諮詢，2016)

源發電量占比54%，本研究以此為借鏡，在技術條件可行並符合提高再生能源占比之目標，初步設定60%作為滲透率之目標。

根據負載統計資料分析，樣本期間所蒐集之每日尖峰負載量，有超過八成集中於60~79 kW區間，其最大值為88.10 kW、最小值為36.89 kW。若欲利用太陽光電發電設備供應所需電力，並搭配相對應的儲能系統，將白天的發電移轉至夜間使用以維持電力供需平衡。在規劃再生能源的設置時，必須同時考量到各區之地理性條件。本文參考中央氣象局公布鄰近之澎湖地區2017年及2018年平均全日射量原始監測數據，再依照經濟部能源局公布太陽光電發電系統常用的呈現方式進行資料統計與單位轉換參考公式，並假設模組設置朝正南、傾斜角150度，模組面日輻射量約增加為1.08倍，且系統性能比以85.7%估算，粗估澎湖地區桶盤嶼年發電量約為1,455.96 kWh，每日等效日照時數約3.99小時。因此，以最大單日用電量1,702 kWh來計算，若欲達到60%的太陽能滲透率，太陽光電設備須提供1,021 kWh的發電量。在等效日照時數為3.99小時的條件下，約可以設置260 kWp的太陽光電，扣除及時用電量約60 kW後，尚須設置儲能設備來儲存200 kWp的太陽光電，因此需搭配約800 kWh的儲能電池，便可將日間的太陽光電發電轉移至夜間使用。

3.2 微電網投資評估分析

本文依照桶盤嶼106年至107年用電資料及配合中央氣象局所公布之氣象資料，及初步設定再生能源滲透率可達60%之目標。在太陽光電發電完全利用之下，約可設置260 kWp的太陽光電搭配260 kW/800 kWh的儲能系統。在與國內相關業者訪談後，考量市面上鋰電池規格與業者實際建置經驗，太陽光電發電設備與儲能系統建置容量之比例可為1比3，故經分析後以250 kWp之太陽能發電設備搭配250 kW/750

kWh儲能系統進行分析，較符合現階段市場供應之規格，以下將以此設備容量，且參考陳彥豪等(2017)估算財務面效益，未來仍可依據場域之太陽能發電效率與相關系統運作之實際情形再行調整。

3.2.1 桶盤嶼微電網系統期初設備建置成本與使用年限

期初資本支出包含產品費用、施工費用等。產品費用為直接成本，為各系統所需之設備費用；設備費用會依該設備規格而有差異且不一定成比例增加。其餘費用屬於間接成本，根據案場特性收取不同費用，因此各案場之間的期初資本費用將有很大差異。施工項目包含土地／裝置點整理、基礎結構安裝、發電與儲電系統安裝、監控系統安裝、直流端與交流端線路安裝、配電箱安裝、能源管理系統安裝、電池管理系統安裝、拉線工程、工地清潔等。施工費用包含人事費用、大型機具費用、差旅費用、管理費用與水電費用。

本文實際訪談數家國內太陽能發電設備業者及儲能系統業者¹，參考國內業者於離島實際建置經驗，並將離島特性納入考量，所建置之設備需具有抗鹽害、耐風性、防鏽蝕等防護措施。太陽光電設備之建置成本包含：支架部分、太陽能板、運輸與施工費用及其他防護措施等，總設備建置成本約為17,400,000元；儲能系統建置設備包含：電力轉換器、儲能控制系統、儲能消防系統、電池模組、電池箱體、保固費用、運輸與施工費用及防護費用，總設備建置成本約為15,778,000元，整體太陽光電設備搭配儲能系統設備之期初成本為33,178,000元，成本細項與使用年限如表3所示。

3.2.2 桶盤嶼微電網系統年度運轉與維護支出

年度支出費用含系統維護與保養費用、

¹作者訪談，大同股份有限公司，2018年9月4日；有量科技股份有限公司，2018年10月23日；中興電工機械股份有限公司，2018年8月24日。

表3 設備建置價格

設備項目	細項	單位建置成本 (元/kWp)	設備總價	使用年限	備註
太陽光電設備 (250 kWp)	支架部分	18,500	4,625,000	20	
	太陽能板	20,000	5,000,000	20	
	運輸與施工費用	19,500	4,875,000	20	
	其他防護設施	11,600	2,900,000		其他防護措施約為設備總費用的20%。
	總額		17,400,000		
儲能系統設備 (250 kW/ 750 kWh)	電力轉換器	15,500	3,875,000	5	
	儲能控制系統	190	142,500	10	
	儲能消防系統	550	412,500	10	
	電池模組	9,900	7,425,000	10	
	電池箱體	1,500	1,125,000	10	
	保固費用		1,298,000		保固費用約總建置成本之10%。
	運輸與施工及 防護費用		1,500,000		施工費用約50萬； 箱體運輸及防護措施約100萬。
	總額		15,778,000		

參考資料：陳彥豪等，2017；本研究訪談。

系統保險費用等其他費用。年度支出費用以每年為單位計算，依據各設備使用年限估算使用期間可能產生之費用，用於分析系統成本效益。系統營運費用主要為人事費用，依據營運系統所需之人力計算；系統維護與保養費用分為設備維護費用與委託技術服務費用，設備一般皆有保固年限，因此未來維護費用可以三方式計算，一是延長保固年限，視延長年數計算費用，二是於保固到期後，以每年一固定費率方式購買維護服務，三是於保固到期後，以單次維護費用計價，委託技術服務費也可以此三方式計價，一般此費用會包含於設備維護費用中。

桶盤嶼微電網系統年度支出費用主要包含系統營運、維護與保養成本及設備汰換成本。根據國內業者相關建置經驗，系統營運、維護與保養費用估算方式為：太陽能發電系統使用第1~5年每年約為總設置成本的4%、使用第6~10年每年約為總設置成本的6%、使用第11年

後每年約為總設置成本的10%；儲能系統使用第1~5年每年約為總設置成本的3%、第6年後每年約為總設置成本的10%。推估該微電網系統年度支出項目及費用如表4。

因微電網系統技術隨時間不斷進步，未來汰換設備所需成本逐年降低，本案參考國內微電網系統關鍵設備系統價格與未來趨勢分析，以陳彥豪等(2017)微電網系統關鍵設備市場價格趨勢分析，儲能模組價格每5年下降50%及電力轉換器價格每年下降7%進行年度成本估算。桶盤嶼微電網系統第一年至第五年年度支出為1,169,340元；第六年至第十年年度支出為2,358,913元；第十一年至第十六年年度支出為2,213,340元；第十六年後年度支出為3,317,800元。然而，儲能系統之電力轉換器使用年限為5年，因此第6年、第11年、第16年年度支出皆需汰換電力轉換器，考慮電力轉換器價格每年下降約7%，新增電力轉換器成本如圖5所示；此外，儲能控制系統、儲能消防系統、電池模

表4 桶盤嶼微電網系統年度支出項目及費用

年度支出項目			費用	備註
系統營運、維護與保養費用(年)	太陽能系統	使用第1~5年	\$696,000	使用年限約為20年，第1~5年，系統營運、維護與保養費用每年以該系統整體施工費用4%估算；第6~10年以6%計算，第11年以後每年以該系統施工費用10%估算
		使用第6~10年	\$1,044,500	
		使用第11年後	\$1,740,000	
	儲能系統	使用第1~5年	\$473,340	使用年限約為10年，第1~5年，系統營運、維護與保養費用每年以該系統整體施工費用3%估算；第6~10年以10%計算；第11年設備使用年限到期，整體儲能系統設備需汰換
		使用第6~10年	\$1,577,800	
系統保險費用	太陽能系統			若有保險需求，可自行編列
	儲能系統			
土地、廠房、倉儲費用				
網路與通訊設備租賃費用				若有，約\$600~700元/月
其他費用				

參考資料：陳彥豪等，2017；本研究訪談。

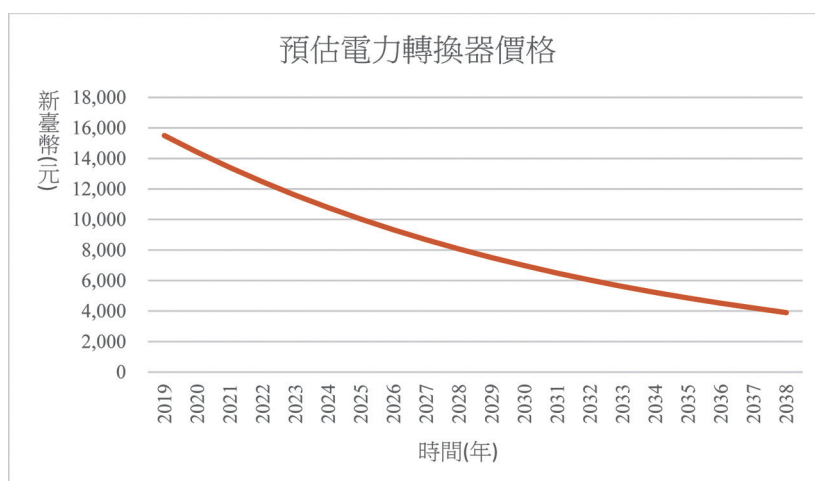


圖5 預估電力轉換器價格下降趨勢(陳彥豪等，2017)

組、電池箱體等設備零件使用年限為10年，因此在第11年度需汰換電池模組設備，以每5年電池模組下降50%進行估算，故桶盤嶼微電網系統20年期總支出費用約87,941,590元。

3.2.3 桶盤嶼微電網系統效率及發電量

系統發電量受系統規模、系統效率、天氣

容量因子等因素影響。太陽能發電影響因子包含系統裝置量、年平均日射量、模組面積、模組效率、模組額定功率、系統性能比與系統衰退率，年平均日射量使用中央氣象局所發布之數據為主。模組面積、效率及額定功率皆為模組本身規格，太陽光電系統發電效率受光電轉換前效率、模組效率及系統效率影響，最低約可達72%左右，每年衰退約1%；儲能系統每年

固定支出維護與保養費用，因此在假設每日進行一次充放電下，使用10年後電池健康度剩餘仍有76%，約每年衰退3%。

太陽光電系統發電量可利用以下公式估算：

$$\begin{aligned}
 & \text{太陽光電系統發電量} \\
 &= \text{模組數量} \times \text{模組發電量} \\
 &= \text{模組數量} \times (\text{年均日射量} \times \text{模組面積} \\
 &\quad \times \text{模組效率} \times \text{PR值}) \\
 &= [(\text{系統裝置量(kW)} \times 1000) / \text{模組額定功率} \\
 &\quad (\text{W})] \times [\text{年均日射量} \times \text{模組面積} \times \text{模組} \\
 &\quad \text{效率} \times \text{PR值}] \quad (1)
 \end{aligned}$$

由於尚未得知桶盤嶼微電網系統設備供應商，因此本文採經濟部能源局(2012)公布太陽光電發電系統常用的呈現方式進行資料統計與單位轉換參考公式，並假設模組設置朝正南、傾斜角150度，模組面日輻射量約增加為1.08倍，且系統性能比以85.7%估算，並參考106年及107年澎湖地區之全天空日射量相關資料，粗估桶盤嶼年發電量約為1455.96度，其餘發電量計算參數如表5所示。經計算，在太陽能板發電效率及儲能系統充放電效率每年遞減的情況下，本文估算之20年間桶盤嶼微電網系統實際上共可產生5,153,587度電力，以經濟部能源局108年度公布之電力排碳係數0.509公斤CO₂e/度

進行估算，約可減少2,623公噸之二氧化碳排放量。

3.3 計算均化成本、淨現值、內部報酬率與折現後回收年限

本文以上述之計算參數及設備建議設置容量，進行桶盤嶼建置微電網系統之20年期效益分析，並以均化成本、淨現值、內部報酬率與折現回收年限等財務面指標，多面向討論微電網系統建置之投資成本及效益，其中財務試算中的折現率參數設定以2020年1月臺灣銀行新臺幣存(放)款牌告利率，一年期(未滿二年)定期儲蓄存款機動年利率1.09%。

3.3.1 發電均化成本(LCOE)

發電均化成本(Levelised Cost of Electricity, LCOE)表示發電設備每生產一度電所需之成本，該成本考量投資發電設備之期初投資成本與各期所需支付之成本投資，包含運維、燃料及各項成本，利用每期均化成本乘上發電量之現值等於總投資淨現值，可得公式，如下：

$$\sum_{t=1}^n \frac{\text{LCOE}_t}{(1+i)^t} \times M_{\text{tel}} = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t} \quad (2)$$

假設每年LCOE為常數，則可重新排列(2)式，得到LCOE計算公式如下：

表5 桶盤嶼微電網系統太陽能發電量與儲能系統計算參數

發電量計算參數		參數值	備註
系統裝置量(kW)		250	
年平均全天空日射量(kWh/m ²)		1572.894444	參考中央氣象局公布之澎湖地區相關資料
模組效率		15.40%	
模組額定功率(W)		250	
系統性能比	光電轉換前效率	96%	
	模組效率	96%	
	系統效率	93%	
每年太陽光電系統衰退率		1%	
每年儲能系統衰退率		3%	

參考資料：陳彥豪等，2017；本研究訪談。

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,el}}{(1+i)^t}} \quad (3)$$

其中 I_0 為投資成本， A_t 為第 t 年之年度成本， $M_{t,el}$ 為第 t 年發電量(kWh)， i 為折現率， n 為總營運年數， t 為營運年度。本文由微電網系統總成本及發電量計算得出桶盤嶼微電網系統發電均化成本約為每度電新臺幣17.43元。

3.3.2 淨現值法(NPV)

淨現值法(Net Present Value, NPV)常作為企業評估投資方案的指標，係將未來各期所有之現金流量透過折現率折現至初期並加以加總，當現值總和大於零時，表示該投資方案值得投資，本財務評估之各年度現金流量為售電收益，以各年度發電量乘上固定每度電柴油發電燃料成本20元估算，計算桶盤嶼建置微電網系統淨現值公式如下：

$$NPV = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (4)$$

其中 I_0 為投資成本， CF_t 為第 t 年之現金流量，單位為新臺幣元， i 為折現率， n 為總營運年數， t 為營運年度。本文由建置太陽光電設備搭配儲能系統之總成本，計算出桶盤嶼微電網系統淨現值約為11,992,152元。因計算出之淨現值大於零，桶盤嶼建置微電網系統可視為值得投資之方案。

3.3.3 內部報酬率(IRR)

內部報酬率(Internal Rate of Return, IRR)為評估投資方案常用的方法，其定義為使淨現值等於0的折現率，當內部報酬率大於所設定之投資基礎報酬率，如融資利率、折現率等，則可視為值得投資之方案，計算桶盤嶼建置微電網系統內部報酬率公式如下：

$$\text{令 } NPV = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad (5)$$

其中 I_0 為投資成本， CF_t 為第 t 年之現金流量，單位為新臺幣元，IRR為內部報酬率， n 為

總營運年數， t 為營運年度。本文由建置太陽光電設備搭配儲能系統之每年現金淨流量，計算出桶盤嶼微電網系統內部報酬率約為6.87%。因本文估算方式以自有資金建置整體微電網系統，並不需要承擔融資利率，因此可視為值得投資之方案；若設備建置資金以借貸方式取得，借貸利率若小於內部報酬率，仍可視為值得投資之方案。

3.3.4 折現回收年限(DPB)

折現回收年限(Discounted Payback, DPB)係衡量投資成本回收期間之指標，回收年期愈短者，表示資金之週轉效率越佳，投資者可愈早收回投資資金，其計算方式為利用各期折現後現金流量之現值逐期加總，求得投資回收之期數，計算桶盤嶼建置微電網系統折現回收年限公式如下：

$$\text{令 } I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} = 0 \text{ 時的期數 } n \quad (6)$$

其中 I_0 為投資成本， CF_t 為第 t 年之現金流量，單位為新臺幣元， i 為折現率， n 為總營運年數， t 為營運年度。本文將建置太陽光電設備搭配智慧型儲電系統之每年現金流量，折現後計算出桶盤嶼微電網系統折現回收年限約為8.77年，因在設備年久使用後，其發電效率衰退程度及設備耗損程度皆會提高，後期發電收益減少以及需支出較高的維運成本，導致折現回收年限偏長，但未超過太陽光電設備壽命20年之一半，仍可視為可投資項目。

綜合以上四項財務面分析指標，本文於桶盤嶼建置之微電網系統具投資價值，惟後期設備維護成本高，需承擔折現回收年限較長之風險。但於桶盤嶼建置太陽光電之微電網系統，除可獲得財務面效益外，可達到能源淨化之節能減碳效益，亦可進行用電調度等需量操作。

4. 微電網建置經濟效益敏感度分析

本文分別針對年模擬發電量、單位建置成本(儲能電池與太陽光電模組)、柴油發電燃料成本與折現率，參考陳琨城(2014)敏感度分析方法以正負5%、10%、15%的變動率分別對淨現值、內部報酬率及折現回收年限進行敏感度分析，各影響因子之變動率分析，各項影響因

子的變動率彙整如表6所示。

從年模擬發電量的敏感度分析可以看出，若是現階段技術進步使年發電量增加5%~15%時，折現回收年限最多可以縮短為6.13年，淨現值為26,005,536元；但若發電系統設備效率因模擬參數設定或天災等因素，使實際年發電

表6 敏感度分析表(本研究整理)

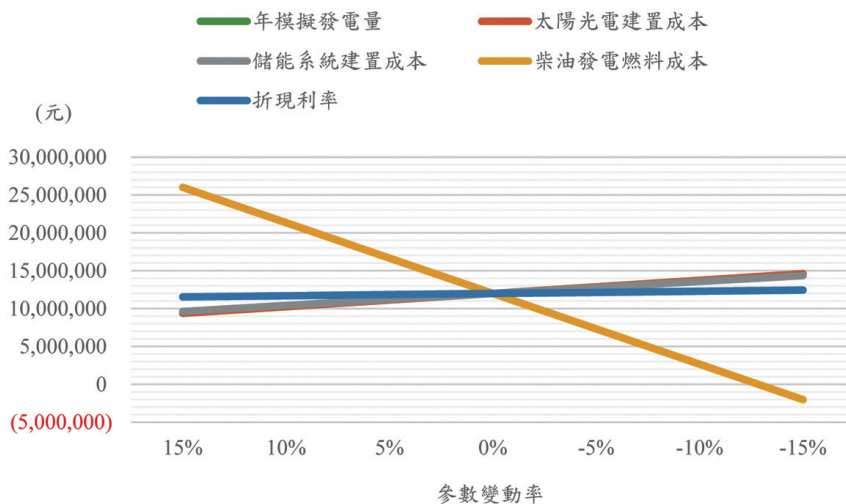
影響因子	本案參數值	參數變動率	淨現值(NPV)	內部報酬率(IRR)	折現回收年限(DPB)
年模擬發電量(kWh)	363,989	15%	26,005,536	12.00%	6.13
		10%	21,334,408	10.39%	6.80
		5%	16,663,280	8.70%	7.66
		0%	11,992,152	6.87%	8.77
		-5%	7,321,024	4.87%	11.27
		-10%	2,649,896	2.58%	13.32
		-15%	(2,021,232)	-	>20
太陽光電建置成本(元)	17,400,000	15%	9,382,152	5.32%	9.94
		10%	10,252,152	5.81%	9.54
		5%	11,122,152	6.33%	9.15
		0%	11,992,152	6.87%	8.77
		-5%	12,862,152	7.44%	8.41
		-10%	13,732,152	8.04%	8.04
		-15%	14,602,152	8.67%	7.71
儲能系統建置成本(元)	14,964,130	15%	9,625,452	5.46%	9.83
		10%	10,414,352	5.91%	9.47
		5%	11,203,252	6.38%	9.11
		0%	11,992,152	6.87%	8.77
		-5%	12,781,052	7.39%	8.44
		-10%	13,569,952	7.92%	8.11
		-15%	14,358,852	8.49%	7.80
柴油發電燃料成本(元)	20	15%	26,005,536	12.00%	6.13
		10%	21,334,408	10.39%	6.80
		5%	16,663,280	8.70%	7.66
		0%	11,992,152	6.87%	8.77
		-5%	7,321,024	4.87%	11.27
		-10%	2,649,896	2.58%	13.32
		-15%	(2,021,232)	-	>20
折現率	0.0109	15%	11,551,623	6.87%	8.85
		10%	11,697,638	6.87%	8.82
		5%	11,844,479	~6.87%	8.80
		0%	11,992,152	6.87%	8.77
		-5%	12,140,662	6.87%	8.74
		-10%	12,290,017	6.87%	8.72
		-15%	12,440,222	6.87%	8.69

量低於年模擬發電量的15%以上時，淨現值將變為負數、內部報酬率將低於折現率，且折現回收年限將大於太陽光電發電設備之使用年限20年，此時該項投資並無益處。從太陽光電建置成本及儲能系統建置成本之敏感度分析的角度，現階段建置太陽光電與儲能設備的技術與價格具有成本效益，在技術持續進步使建置成本降低之下，將更有利於發展離島微電網系統。

以現階段技術而言，離島柴油發電燃料成

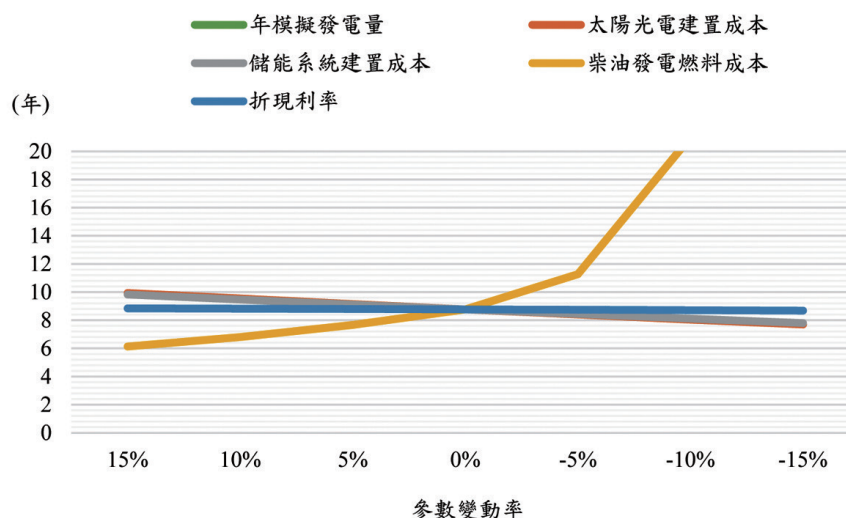
本每度電約為20~25元，本案以每度電柴油發電燃料成本作為售電收益價格，以固定20元保守計算年度收益。從下表中可以看出，若實際每度電柴油發電燃料成本較高，或將來柴油發電燃料成本提高，對淨現值與內部報酬率將有正向影響，離島微電網系統的投資將更具市場競爭力。

本文依敏感度分析報表分別繪製淨現值與折現回收年限之敏感度分析折線圖分別如圖6與圖7所示，由於淨現值與內部報酬率敏感度圖表



註：售電收益為柴油發電燃料成本與年模擬發電量之乘積，故綠線及黃線兩參數為重合。

圖6 淨現值之敏感度分析折線圖(本研究繪製)



註：售電收益為柴油發電燃料成本與年模擬發電量之乘積，故綠線及黃線兩參數為重合。

圖7 折現回收年限敏感度分析折線圖(本研究繪製)

趨勢近乎雷同，僅呈現淨現值之敏感度趨勢。另外，本文主要發電收益是以每度電柴油發電燃料成本作為售電收益價格，再乘以年模擬發電量計算而得，故在圖6、圖7中，每度電柴油發電燃料成本與年模擬發電量兩個影響因子對於各項投資指標敏感度分析之折線是重合的。

如圖表呈現，每度電柴油發電燃料成本與模擬發電量的變動對於淨現值、內部報酬率呈現正向關係、與折現回收年限呈現負向關係，且相較於其他影響因子，柴油發電燃料成本與年模擬發電量之變動呈現重合，且其斜率絕對值皆屬最大，表示其正向及負向變動對於淨現值、內部報酬率及折現回收年限影響程度最大，屬較高風險之影響因子；而折現率之影響曲線皆最為平坦，表示折現率變動對淨現值、內部報酬率及折現回收年限的影響較不敏感，屬較低風險之影響因子。

5. 結論與建議

澎湖群島由90餘座大小島嶼所組成，其中目前有人居住的島嶼總計約有19個，島上電力系統多屬獨立發電系統，以自有柴油發電機供島上所需用電，考量澎湖地區日照充足且地勢廣闊的環境條件及相關技術發展逐漸成熟，加上近年來政府以政策支持鼓勵再生能源的設置，並通過修正再生能源發展條例促進再生能源發展，於環境、技術、法令等面向皆極具誘因發展太陽光電發電潛力。然而，離島地區供電系統具有高發電成本、環境成本等因素，若能導入微電網系統將能降低發電成本、減少二氧化碳排放與提高供店品質等優點，然仍須進行經濟效益敏感度分析，以確保再生能源與儲能系統具有最佳設置，以發揮最好的功效。

本文續由統計分析結果評估再生能源發電系統裝置容量規模與儲能設備之選用，以作為發用電調度使用，並可提升再生能源滲透率，若以現階段太陽光電發電設備及儲能系統設備的技術發展，並參考數家國內廠商於離島型場

域建置分散式電源的實際經驗，本研究設定以再生能源以太陽光電為主，搭配鋰電池儲能系統進行每日一次的充放電排程，並以再生能源滲透率達60%進行規劃，面對實際導入之微電網系統，應再考量技術操作與環境因子變動，以微電網分散式電源的技術調度策略與其調度成本，解決再生能源間歇性發電的衝擊，達到平滑電力供應的課題。本研究僅就微電網系統之效益進行探討，經本研究分析，以250 kWp太陽能發電設備搭配250 kW/750 kWh儲能系統，估算每度電均化成本為17.43元，並以淨現值及投資報酬率判斷其具投資效益，再透過微電網建置經濟效益敏感度分析，結果顯示若柴油發電成本變動不定，將顯著影響微電網建置經濟效益，若未來太陽光電發電設備及儲能系統技術進步進而提升設備效率，將使微電網建置更具經濟效益，本文所進行之分析步驟與方法，可供未來離島型微電網建置參考與借鏡。

致 謝

本研究係執行「區域性儲能設備技術示範驗證計畫」之細部計畫「區域能源智慧聯網技術發展與應用」的研究成果，且承蒙澎湖縣政府協調與同意核能研究所進行離島發用電資料量測與蒐集，特此致謝。本研究承蒙科技部提供研究經費執行「區域(配)電網強韌性研究與技術發展」計畫(計畫編號：MOST 109-3116-F-042A-008-CC2)，特此致謝。

參考文獻

行政院原子能委員會核能研究所，2019。高占比再生能源離島微電網技術發展與應用，科技部補助產學合作研究計畫成果精簡報告。

李奕德、姜政綸、劉力源、張永瑞、范振理與許炎豐，2017。望安島微電網系統配比與經濟效益評估，台電工程月刊，831(11):

- 9-28。
- 張家豪，2020。風力發電業基本資料，台灣經濟研究院產經資料庫。
- 陳彥豪、盧思穎與洪幼倫，2017。儲能系統價格趨勢對微電網市場發展之影響，台電工程月刊，831(11): 41-48。
- 陳美蘭與胡哲魁，2015。臺灣地區風能評估與離岸風電開發潛能分析，中華技術工程論著2。
- 陳琨城，2014。臺灣地區太陽能發電系統投資效益評估》，國立交通大學土木工程學系太陽能及新能源學刊。
- 麥姆斯諮詢，2016。鋰離子電池技術目前及未來的挑戰者，2021/01/18，<https://kknews.cc/tech/anoa3xx.html>。
- 經濟部能源局，2012。民眾簡易評估太陽光電設置的參考日照資料，<http://pvtth.org.tw/upfiles/editor/files/20140212162503-1142442397.pdf>。
- 經濟部能源局，2016。2016年能源產業技術白皮書。
- 經濟部能源局，2018。小型風力機介紹與發展趨勢，<https://www.re.org.tw/knowledge/more.aspx?cid=201&id=1790>。
- 澎湖縣政府官網，2020。澎湖跳島漫遊資訊，<https://www.penghu.gov.tw/userfiles/penghu/files/5-1jump.pdf>。
- 盧思丞、張克勤與鍾光民，2015。澎湖地區居民103年能源使用情形之調查分析，臺灣能源期刊，2(3): 305-321。
- Navigant Research, 2020. Microgrid Deployment Tracker 1Q20，<https://www.giiresearch.com/report/nav925061-microgrid-deployment-tracker-1q20-projects-trends.htm>。

Sensitivity Analysis of Economic Benefits of Island Microgrids

Yih-Der Lee¹ Ssu-Han Chen^{2*} Su-Ying Lu³
Shu-Ya Hsu⁴ Jheng-Lun Jiang¹

ABSTRACT

Small-scale outlying island power systems are usually far away from main power systems and are not connected by submarine cables, so small diesel generator sets are often used to supply electricity to the island. However, due to the inconvenient transportation of power generation fuels, the transportation cost is high, and its characteristics of high carbon emissions have caused the outlying island power supply system to face difficulties such as high economic costs and environmental costs. Therefore, this article conducts a research on the sensitivity of economic benefits to the microgrid system of an outlying island. This article uses Tongpan as a case study, through the data collection, analysis of electricity generation and consumption data on the island, the capacity of the renewable energy and energy storage system is evaluated based on the load. The impact factors of costs and their rate of change are discussed, and the sensitivity analysis of the economic benefits of the outlying island microgrid system is carried out in order to reduce the cost of power generation on the island and reduce carbon dioxide emissions to achieve the vision of building a low carbon island in Penghu. Through the case analysis in this article, it is known that the cost of diesel power generation has a significant impact on the construction of microgrids. The cost reduction of solar photovoltaic and energy storage systems will help the promotion of microgrid systems. This research process and steps can be used as a reference for the construction of different types of island microgrids.

Keywords: Microgrid, Cost-Benefit Analysis, Sensitivity Analysis.

¹Associate Researcher, Institute of Nuclear Energy Research.

²Assistant Research Fellow, Taiwan Institute of Economic Research.

³Associate Research Fellow, TIER.

⁴Assistant, TIER.

* Corresponding Author, Phone: +886-2-2586-5000#325, E-mail: d33691@tier.org.tw

Received Date: July 3, 2020

Revised Date: February 26, 2021

Accepted Date: March 2, 2021