行政院原子能委員會

委託研究計畫研究報告

配電網最佳化配置與提升饋線裕度之研究 Study on Optimal Allocation of Distribution Networks and Improvement of Feeder Capacity Reserve

計畫編號:110A007

受委託機關(構):國立彰化師範大學

計畫主持人:黃維澤

聯絡電話:04-7232105#7264

E-mail address : vichuang@cc.ncue.edu.tw

協同主持人:姚凱超

研究期程:中華民國 110年2月至 110年12月

研究經費:新臺幣94萬2千元

核研所聯絡人員:蔡佳豪

報告日期: 110年12月13日

目	錄	Ι		
中さ	て摘り	更		1
英う	て摘り	更		2
壹、	•	計畫	緣起與目的	3
		•	計畫緣起	
	<u> </u>	•	計畫目的	7
	三	•	文獻探討	9
貳、	•	研究	方法與過程	13
	—	•	區域配電網自動化饋線重構模擬平台	
		(-)	區域配電網元件參數蒐集與分析	
		(ニ)	最佳化拓樸重構演算法	
	=	•	饋線簡化模型與動態架構下負載計算	
		(-)	雙端饋線簡化模型	
		(ニ)	含動態系統架構之精進負載計算	
	Ξ	•	整合 TPU 與 FTU 之邊緣計算單元	
		(-)	TPU與FTU之通訊連線與SQLite 資料庫存取	
		(ニ)	整合氣象環境資料之負載預測	
	四		應用邊緣計算於配電網模擬分析	
		(-)	含動態系統架構之邊緣負載計算	
		(ニ)	TPU 電網建模解析損失與末端壓降	46
		(三)	即時負載模型之最佳化饋線重組	
参、	•	主要	發現與結論	54
	-	•	最佳化饋線重構模擬結果	54
		(-)	模擬平台使用者介面	54
		(ニ)	電網自動化建模	
		(三)	最佳化饋線重構提高再生能源併網裕度結果	67
	<u> </u>	•	整合動態系統架構與饋線簡化測試結果	70
		(-)	饋線簡化測試結果	
		(ニ)	動態架構下之饋線簡化測試結果	73
	Ξ	•	TPU 之 FTU 長短期負載預測與電網潮流解析結果	74
		(-)	長期預測結果	74

肆、		參考	文獻	
	四、		結論	
		(三)	邊緣計算單元電網模型與電力潮流解析	
		(ニ)	短期預測結果	

中文摘要

本計畫擬建立區域配電網之饋線重組最佳化模擬平台,其目的為提升饋線上 分散式再生能源及負載之總裕度,在再生能源高滲透率對配電網的衝擊下達到最 佳運轉之效果。首先,本研究採用饋線終端設備所量測之電壓、電流以及饋線開 關拓樸等資料進行配電網的狀態估測,並考慮變壓器損耗、線路損耗,以及拓撲 動態架構等因素,於台電某區處完整之配線系統建立精準與簡化饋線模型,再以 此模型進行擴大區域配電網饋線重組之最佳化模擬演算。最佳化演算法則使用群 優演算法以搜尋疊迭代方式對目標函數進行求解。故本計畫廣泛蒐集饋線重組、 開關切換,以及再生能源併網裕度之相關文獻,並以 Python 程式語言以及配電 系統模擬軟體 OpenDSS 為基礎建立整合模擬分析平台,其包含資料庫轉換與建 置模組、饋線狀態估測模組、饋線簡化模組、最佳化饋線重組演算模組,以及使 用者介面,所開發之平台可提供台電區處較具系統性之開闢切換策略建議與簡易 操作的使用平台。此外,為了完整掌握饋線動態架構,本計畫使用邊緣計算器擷 取饋線終端設備即時資料,用以偵測並學習未知開關操作狀態,達到更精準之動 態拓樸估測;同時,亦結合天氣與即時負載資料在邊緣計算器中進行即時、時前、 日前負載預測,以利進行邊緣端潮流解析進而求得饋線損耗與壓降等狀態,達到 精準系統狀態預測,提高配電網運轉者對電網之掌握性。本計書之成果有助於提 升再生能源併網裕度與配電網供電品質。

英文摘要

This project aims to establish a large scale regional distribution network reconfiguration (DNR) optimal simulation platform for increasing the hosting capacity (HS) of distributed renewable energy resource (DRER) and load which achieve optimal operation under the impact of the high penetration of DRER. Firstly, the data set of voltage and current measured by feeder terminal unit (FTU) and the data of feeder switch topologies are used to conduct the distribution network (DN) state estimation, then build the accurate and simplified feeder models of a Taipower large regional DN considering losses of transformer and conductor as well as dynamic topology. This model is applied in DNR optimization algorithms for solving the besdt solution by swarm optimization algorithms. Consequently, the relevant researches related to the DNR, switching scheme, and HS of DRER are extensively collected as the research reference for this project. The Python language and distribution system simulator OpenDSS are combined to establish the integrated optimization simulation platform. The developed application program is composed of database conversion and building module, feeder state estimation module, feeder simplification module, optimized DNR algorithm module, and user interface. This platform is capable of providing Taipower a more systematic DNR strategy and a user-friendly interface. Furthermore, in order to master the information of feeder dynamic topology, the TPU is utilized as edge computer (EDGE) to capture real-time data of FTU to detect and learn the unknown feeder switch operation status for the more accurate dynamic topology estimation. Moreover, the weather and real-time load date are transmitted to the EDGE to carry out the real-time, hour-ahead, day-ahead net load forecast and to solve the power flow of the feeder to obtain the precise real-time system losses and voltage drop of the feeder, etc. The combination of EDGE and FTU is expected to achieve the accurate feeder state estimation and enhance the distribution network operators to realize the system state. The outcomes of this project are helpful for increasing DRER interconnected reserve capacity and power quality.

壹、計畫緣起與目的

一、計畫緣起

在饋線自動化工程,監視控制饋線上的饋線斷路器(Feeder Circuit Breaker, FCB)、復閉器(Line Recloser, LR)、分段開闢(Disconnect Switch, DS)、電力電容 器組(Capacitor Bank)等,藉由饋線開闢與相關軟硬體設施強化配電網運轉靈活性。 在放射狀或常開環路一次配電系統型態下,自動化饋線開關操作上通常以兩個為 單位,由饋線本體開關與常開開關一閉一開,藉此建立負載轉供機制,並保持一 次配電饋線為放射狀,其主要在於發生永久性故障(Permanent Fault)時,搭配故 障偵測器(Fault Detector)可快速隔離故障區,並以故障區上游復電、下游轉供方 式恢復健全區域電網供電,達到節省人工巡查成本與增加復電速度與復電區域的 效果。此外,當電力調度需進行緊急卸載時,可將標的饋線上醫院等重要負載切 換轉移至其他饋線。若在正常運轉情形下,透過饋線轉供亦可達到平衡區域配電 網饋線間負載的效果,以改善總系統損失或者饋線末端壓降;而在如今大量分散 式再生能源如太陽光電(Photovoltaic, PV)等併入配電網的情形下,運用開闢切換 策略達到區域配電網拓樸重構,可將再生能源逆送量過高的饋線段轉供至鄰近尖 峰需量相對較高之饋線,或者轉供至容量裕度(Hosting Capacity)較大之饋線以防 止太陽光電電壓變動率超過電網規範。綜合上述,自動化饋線開闢提高了區域配 電網操作上的靈活度,不僅縮小系統故障期間復電時間,在正常運轉下亦可提升 配電網運轉效能,以及減緩再生能源併網衝擊並提升其裕度。

為了在實際配電網進行拓樸重構以達上述益處與效果,掌握實際配電負載模 型為首要之務。然而現今配電網結構愈趨複雜,除了一般高低壓用戶之住宅類、 工業類以及商業類等不同用電模型外,大量再生能源如 PV、小型風力機組,加 上近年來漸受重視之儲能系統均被併入低壓配電系統,雖然其有著環保與就近供 電等多種好處,卻也對配電網帶來了不小的衝擊,使得運轉控制邏輯上變為更加 複雜。此外,隨著尖峰需量提高,台電也擴大需量反應方案,近兩年內不少配電 系統上的大用戶紛紛參與計畫性減少用電措施以及需量競價,故配電網負載模型 成份以及控管方法要考量的因素也越來越多。若要精準掌握配電網實際負載模型,

3

需取得高壓用戶電錶資訊、用戶資訊系統(Customer Information System, CIS)之用 戶用電資訊、再生能源業者之發電量資訊,以及高壓用戶之需量反應參與措施及 其抑低用電量。然而,由於智慧電錶尚未完全普及,加上客戶資訊隱私等種種原 因,在實作上欲完整掌握所有資訊非常困難,故退而求其次以饋線終端設備 (Feeder Terminal Unit, FTU)量測之區域範圍電壓、電流等資訊來推導負載模型方 為上策。台電饋線之FTU(實際照片如圖 1 所示)均裝置於饋線自動化開關,其又 分為二路開關(2-way)與四路開關(4way),如圖 2 所示,用以掌握開關點與常開點 電壓、電流等資訊,以利轉供之執行,而這些資訊會以每小時為單位紀錄並回傳 至饋線調度控制中心(Feeder Dispatch Control Center, FDCC)。以饋線各 FTU 量測 之電壓、電流資訊,並以上游減去下游可估測饋線各區段之淨負載,再以各區間 之變壓器數量、容量以及其位置與間隔導線長路、規格等資訊,可堆導變壓器銅 損、鐵損以及線路損失,將 FTU 量測之負載資訊扣除各個系統損失成份即可得 到較為精準之淨負載模型,以利饋線重構之開關切換策略之制定與執行。



(a) 亭置式 FTU



(b) 桿上 FTU





圖 2 台電 SCADA 系統之饋線自動化開闢與線路圖

一般而言,單一條饋線裝置約2至4具自動換開關,意味著裝設2至4部

FTU,若以純粹學術觀點制定開關切換策略需考慮所有饋線開關(含手動開關), 然實際電網運轉手段通常以可遠端操作之自動化開關為主,雖然效果會打折扣, 但較符合實際需求,且擴增至大區域範圍電網在策略演算上亦較為可行。此外, 在大範圍之電網潮流解析上,若將負載模型細分至各變壓器與分歧線中,其運算 量亦過大,將負載模型簡化勢在必行,故堆導各 FTU 之簡化負載模型,再以此 為基礎進行饋線重構之開關切換策略,不僅在電網運轉操作需求上較為可行,於 策略制定演算中資訊處理量亦較為合理。不過,由於 FTU 資料為注入該量測點 之電壓、電流歷史資料,若期間有下游開關(包含手動開關)動作,將使得饋線拓 樸改變,造成饋線負載模型估測錯誤卻不得而知,故這種方法仍有瑕疵。即便如 此,還是可以使用一些數學手段來估測非預期之開關操作點,如機器學習 (Machine Learning, ML)或迭代法(Iterative Method)。

隨著資通訊技術(Information Communication Technologies, ICT)的成熟加速 了電網智慧化的發展,其中,在配電網智慧化驅使下大幅降低分散式再生能源高 佔比運轉之衝擊與影響,轉而朝向對系統更有利的方向發展。邊緣計算(Edge Computing)是 ICT 領域中一種分散式運算架構,其將數據資料、運算,由網路中 心節點移往網路邏輯上的邊緣節點來處理。邊緣運算將原本完全由中心節點處理 大型服務加以分解,切割成更小與更容易管理的部份,分散到邊緣節點去處理, 而邊緣節點更接近於用戶端裝置,可以加深資料的處理的細膩度。在這種架構下, 資料的的產生與分析更接近於數據資料的來源,因此更適合處理巨量資料。張量 處理器(Tenser Processing Unit, TPU)即為一種專門用於 ML 之邊緣計算器,若將 其配置於 FTU 內(如圖 3)並建立通訊協定,可對饋線負載估測以及饋線重構等帶 來許多助益。

首先,新版 FTU 除了量測電壓電流外,亦可獲得相位角、功率因素、頻率 等資料,而一般 FTU 為 6 秒採樣一次資料,再計算一小時內最大值、最小值, 以及平均值等在整點時回傳 FDCC 主機。雖然由歷史 FTU 資料無法取得是否有 下游饋線轉供之線索,但若可由 TPU 擷取每 6 秒之饋線資料,當有下游開關切 換可獲得即時電壓、電流、角度與頻率擾動資料,在以 ML 或迭代法即可較有根 據地估測動態負載模型。此外,TPU 與 FTU 結合後,其即時負載資料與每小時

5

平均負載資料可搭配天氣資料進行即時、時前,以及日前負載預測,FDCC人員 可據此安排不定期轉供之策略,如圖4所示。



圖 3 TPU 配置於亭置式與桿上 FTU 示意圖



圖 4 TPU 強化 FTU 功能示意圖

綜上所述,自動化饋線開關賦予調度中心在運轉手段上有更多元的選擇,在 台電調度中心,配電饋線負載轉供可分為定期轉供與不定期轉供二種情況。而不 定期負載轉供則以縮小停電區域範圍及儘速復電為原則;定期負載轉供是以降低 系統損失、提升系統運轉效能以及分散式再生能源併網裕度為目的,以及變電所 電力設備定期檢修時,將其負載轉移至其他變電所之手段。若欲達成正確的轉供 策略需先精準估測饋線負載模型,不論國內外電力公司目前在實務上均缺乏較有 系統性的整合方式,故本計畫將與台電研議克服實務困難,將所提理論與方法應 用於實際系統中。

二、計畫目的

一般而言,台電正常運轉情形下饋線重構之開關切換操作大致上以數個月為 週期,區處以人工調閱報表的方式檢討運轉現況再行決定自動化開關或者手動開 關的切換操作。而台灣中南部配電饋線有大量太陽光電併網,若其過度集中或者 負載量不足將導致電壓變動率過大與電力逆送等問題,若以饋線重構的方式改變 線路拓撲與負載模型,搭配最佳化演算法達到有系統性地提升再生能源裕度之效 果。在最佳化開關切換策略執行前,饋線負載模型需準確估測,在用戶資訊取得 困難的情形下,以FTU 量測之各區域電壓、電流可推導負載模型。上述若有一 套系統性的整合平台,將台電區處所轄各變電所、饋線,以及負載資料建模,以 再生能源裕度、饋線間負載平衡度、饋線末端電壓等作為最佳化評估指標,再以 饋線上母線電壓、互連轉供點電壓大小與相位差等作為限制條件,接者應用人工 智慧(Artificial Intelligence, AI)下相關機器學習(ML)之深度學習(Deep Learning, DL)或者啟發式演算法(Heuristic)如粒子群或者灰狼等演算法求解全區處電網每 月為週期之饋線開關的切換排程,預期將提供配電調度控制或饋線調度控制更具 體性、明確性、規劃性的最佳運轉方式參考,達到區域配電網運轉效能、裕度提 升等成果。

故本計畫提出一最佳化模擬平台,其架構如圖 5 所示。首先,蒐集台電轄區 標的區域配電網內歷史 FTU 量測資料以及該轄區線路規格、長度、變壓器容量、 相別、位置、再生能源位置與容量等饋線拓樸資料,並整合具強健計算功能與彈 性可靠之工程計算軟體 Python 以及美國電力研究機構(Electric Power Research Institute, EPRI)開放軟體 OpenDSS(Open Distribution System Simulator), 整合建立 OpenDSS 配電網潮流解析模型。其中以饋線負載簡化模型對全轄區電網進行建 模,併考量變壓器、線路損失以達精準負載估測。接著,以 Python 開發啟發式 最佳化演算法與 DL 最佳化學習程式,呼叫 OpenDSS 電網模型計算在電網拓撲 (Topology)改變下之電力潮流,取得對應之電網母線電壓、線路流量、損失等系 統性能評估指標,並利用前述之電網運轉限制條件與擬定之目標函數,計算出最 佳化饋線開闢切換排程排列組合,提供間歇性再生能源高佔比以負載需求面管理 方式適度調控負載需量提高饋線再生能源併網裕度、饋間間負載平衡程度之區域 配電網運轉效能之具體作法,所建立的平台除了可以輔助協助正常運轉下最佳饋 線重構之開關決策外,所發展之技術亦可促進配電自動化與配電網智慧運轉相關 技術發展,以及營造國內優質的再生能源發展環境,並有效提高國內配電網運轉 效能。此外,本計畫欲建立 FTU 與 TPU 之通訊,並結合解者取得饋線即時電壓、 電流、相位角、功率因素與頻率等即時資料,以 ML 或迭代法尋找未知的開關操 作,以達到考量動態拓撲架構之精準負載估測,而 TPU 亦結合氣象資料進行即 時、時前、日前負載預測,併求解電力潮流計算饋線壓降、損失等,以利非定期 轉供策略制定。



圖 5 本計畫架構

三、文獻探討

為提供潔淨、穩定與安全的電力供應,全球先進國家莫不積極投入智慧電網、 穩定配電網供電品質、機組排程調度、再生能源高滲透與需求面負載管理等提升 配電網運轉相關研究與實際系統建置,其中,國內專家學者投入與本計畫相關研 究有台灣科大、台北科大、中正大學、成功大學、中山大學與義守大學等,研究 範疇包括再生能源高滲透對輸電系統穩定度之衝擊與影響、高佔比再生能源整合 電力系統即時模擬開發、結合穩定度與可靠度分析之再生能源預測與調度平台開 發、區域能源整合調度與電網輔助服務示範場建立、自動需量反應與需量競價、 配電網結構最佳化,以及電力聚合業等,上述研究並未完全整合含高滲透再生能 源與需量反應負載之配電網結構最佳化配置與最佳化運轉排程,故顯示本計畫所 提研究方向具前瞻性與急迫性。以下分別詳述與本研究計畫相關研究現況。

在開關最佳化切換重新配置電網結構相關研究[1]-[12]方面,[1]以饋線重構 與分散式電源(Distribution Energy Resource, DER)容量制定來改善電網電壓安全 之可靠度問題,其以圖形理論(Graph Theory)進行饋線重構,並使用人類基礎行 為最佳化(Human Behaviour-Based Optimisation, HBBO)演算法求解台電系統之最 佳電壓分布。[2]以多目標粒子群最佳化演算法(Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)以及卷積神經網路(Convolutional Neural Networks, CNN) 對 IEEE 測試系統與台電系統進行最佳化重構,目標為降低損耗與母線壓降。另 外, [5]提出了社會甲蟲群體最佳化演算法(Social Beetle Swarm Optimization, SBSO)對於饋線動態重構以及 DER 容量配置進行最佳化,目標函數為損耗、負 載平衡以及電壓分布,為了減少開關操作數量,以灰色關聯投影法(Grey Relation Projection ,GRP)來劃分時段。[7]以深度強化學習(Deep Reinforcement Learning, DRL)從有限的歷史開闢操作數據學習電網重構策略,該方法在實作上有很大的 擴充性。而國內研究方面也在此議題上有著不少著墨,例如[12]利用台電用戶資 訊系統(Customer Information System, CIS)以及停電管理系統(Outage Management Information System, OMIS)蒐集並估算配電變壓器標準日負載曲線,以免疫演算 法(Immune Algorithm) 推導最佳線路開闢操作策略及過載事故時之操作策略。上 述相關研究內容與成果與本計畫重疊性不高,其研究方法與成果將有助於本計畫 進行,本研究將於予引述參考並持續蒐集相關研究資料。

而在改善再生能源裕度的相關研究[13]-[24]方面,[13]以儲能系統(Energy Storage, ES)變流器之四象限控制(Quadratic Control)來提升低壓配電系統 PV 裕度, 並制定最小電池容量以降低成本。[14]以 ES 來推遲配電線路的增設,在提高 DER

裕度下可帶來最佳的總收益。[15]運用 PSO 計算電力質量調節器裝設位置來最佳 化電網 PV 乘載能力與網路損耗。而[18]-[24]為利用饋線重構提升 DER 裕度之相 關研究,[18]與[19]分別以混合整數非線性多週期最佳電力潮流(Mixed-Integer, Nonlinear, Multi-Period Optimal Power Flow, MI-N-MP-OPF)以及混合粒子群最佳 化(Hybrid PSO)演算法對動態開關切換策略進行最佳化,後者考慮了開關切換次 數。[20]以混合整數法(Mixed-Integer Linear Programming, MILP)針對功因調整、 虛功補償以及饋線重構來對配電網之風機承載能力進行最佳化。[23]在具有 235 具開關之大規模電網中求解最佳拓樸配置,將所有問題轉換為零抑制二進制決策 圖(Zero-suppressed binary Decision Diagram, ZDD),再通過加權組合於 49 小時內 獲得了全域最佳解。

而 DER 裕度的標準亦在不同的文獻中[25]-[29]有不同的評估方式,[25]以蒙 地卡羅法(Monte Carlo-based method, MC)應用於 5 萬個實際低壓配電系統,結果 表明過電壓是 PV 併網量的最大限制。[26]考慮了 PV、風機以及負載的不確定性 來估算 DER 裕度,併以 IEEE 測試系統以及實際澳大利亞饋線驗證其實用性。[29] 不僅考慮負載與 DER 的不確定性,亦將有載抽接頭(On Line Tap Changer, OLTC) 以及靜態虛功補償器(Static Var Compensators, SVCs)之控制納入考量,以評估不 同水平對應之裕度。[30]同樣考慮了 OLTC 與變流器虛功控制(Reactive Power Control, RPC),以 MC 建模低壓網路不確定性之概率,根據不同國家/地區之過 電壓限制值評估最佳電壓控制,研究表明 OLTC 對於 PV 裕度提升效果最大,搭 配 RPC 可達到最大化效果,在低 PV 滲透情形下建議以 RPC 為主以降低運轉成 本。

關於負載預測,許多文獻如[31]-[37]皆有深入的探討與實作,[31]針對傳統 住宅負載模型進行機率性的負載預測;[32]則針對含再生能源之短期住宅淨負載 預測;而[34]則是探討長期負載預測。

綜合上述國內外與本計畫相關研究可知,不論在智慧電網、改善再生能源併 網裕度、饋線重組等個別主題相關研究均有可參考之處,本計畫將修正後於予引 述作為後續研究立論基礎,有助於本計畫之進行;然整合含高滲透再生能源與需 量反應負載之配電網結構最佳化與最佳化饋線重構以改善再生能源裕度之研究 鮮少,國內使用 DRL 演算法與電網最佳化運轉之研究更是屈指可數,重疊性不高,故可為之研究空間甚廣。

貳、研究方法與過程

本研究開發了一套區域配電網最佳化拓樸架構重組模擬分析平台,標的系統 為台電雲林區處配電網系統。該平台包含了拓樸資料與 FTU 歷史資料轉換饋線 模型、配電網重構演算法、群體優化演算法、視覺化與使用者介面等技術,上述 技術皆以軟體達到自動化功能,未來若有標的系統的增加亦可無縫擴充。此外, 若未來最佳化標的過於龐大,勢必需要將系統簡化以避免過於冗長之模擬時間, 本研究亦探討饋線簡化模型;而為了達到精準的負載計算,也必須採用動態饋線 拓樸架構以計算 FTU 所轄區域之負載。另一方面,本研究提出了以邊緣計算單 元 TPU 結合饋線終端設備 FTU,以達到負載預測、電力潮流解析、最佳化拓樸 重構等技術之邊緣運算,使電力系統分析可達去集中化,以減輕雲端伺服器負擔, 增加系統即時控制之反應速度,以及增加邊緣端負載預測準確性。

一、 區域配電網自動化饋線重構模擬平台

本節針對區域配電網饋線重構模擬平台架構以及最佳化拓樸重構演算法詳述如下。

(一) 區域配電網元件參數蒐集與分析

如圖 6 所示電網資料轉換架構圖,將台電 DDCC 資料庫中的「Substation (.set)」、「Switch, lateral and transformer (.set)」和「FTU(.sql)」檔案進行轉換, 即可構建網絡拓撲。轉換程序採用 Python 語言撰寫,將上述三個檔案分別轉換為 OpenDSS(Open Distribution System Simulator)中的相應部分,構建網絡拓撲。 如下所述:

1. 變電所

在「Substation (.set)」檔案中,變電站、主變壓器和饋線代碼記錄在該檔案的每個欄位(Field)中。因此,這些相關資料可用於形成從配變電站到 饋線通過主變壓器的關係,並將相應的參數加入 OpenDSS 中。

2. 分枝

分枝(Branch)意指電網拓普中之串聯元件,因此在「Switch, lateral and transformer (.set)」檔案中,有13個欄位代表饋線、開關、配電變壓器、分散式再生能源的類型和容量等的關係,其分類如下:

- ✓ 開闢座標與饋線型態(Switch Coordinates and Feeder Type);
- ✓ 開闢座標經緯度(Latitude and Longitude of Switch Coordinates);
- ✓ 開闢座標與上游開闢饋線型態(Switch Coordinates and Feeder Type of the Upstream Switch);
- ✓ 開闢所屬饋線代號(Switch Belongs to Feeder Number);
- ✓ 開闢狀態(Switch Status);
- ✓ 開闢是否為常開(Switch Belongs to Normally Open or not);
- ✓ 開闢型式與代碼(Switch Type and Code);
- ✓ 桿號或位置(Pole Number or Address);
- ✓ 導線規格與長度(Conductor Size and Length);
- ✓ 分散式再生能源的類型和容量(Type and Installed Capacity of the DER);
- ✓ 配變壓器組別與座標(Coordinates and Bank of the Distribution transformer);

上述資料集(Data Set)可以轉換為網絡拓撲結構,其代表 OpenDSS 中節點 (Node)和元件(Element)之間的連接,可用於三相潮流分析。

3. 負載

FTU 測量資料包括其測量部分的三相實功和虛功、線電流以及母線電壓, 如圖 7 所示。測量數據可以從 SQL 資料庫中取得,並利用 FTU 測量區 域所量測之實功和虛功分配給每個配電變壓器的淨負載資料,其分配原 則乃依據量測區域每個母線配電變壓器裝置容量,以式(1)與(2)分配 FTU 每小時量測功率分配給各母線配電變壓器,其中, C_{DT,i}為各母線配電變 壓器裝置容量。再根據饋線上各母線配電變壓器所得之每小時負載,求 解配電網中月、季、年最佳饋線重構,實現各饋線段淨負載均衡。



$$Q_{DT,i}^{h} = Q_{FTU}^{h} \cdot \frac{C_{DT,i}}{\sum_{i}^{n} C_{DT,i}}$$

$$(2)$$



圖 6 電網資料轉換架構



圖 7 整合負載與分散式能源之饋線模型

(二) 最佳化拓樸重構演算法

為了以自動化方法達到最佳化拓樸重構,且滿足放射狀拓樸條件,本研究提出一通用拓樸重構演算法。此方法不是以算法限制來過濾非放射狀拓樸,亦不是

使用預設資料庫,也不須以圖形理論大量計算。所提之方法為依序將常開開關閉 合,此時將造成如圖 8 之環路,在此環路中以演算法得到一位置將其開關打開, 使其回歸放射狀。其中,環路包含了饋線本體環路、饋線間環路、變電所間環路, 環路的判斷可由 OpenDSS 生產拓樸階層得知。將所有常開點依序執行該策略, 最後則會得到一次解,在以演算法反覆迭代達到最佳化目標。



圖 8 重構演算法示意圖

本計畫採群優演算法(Swarm Optimization Algorithms)進行所擬定之多目標 電網最佳拓普重構問題求解,茲擇十種最佳化演算法說明如下:

1. 粒子群優演算法(Particle Swarm Optimization, PSO)

眾所周知, PSO 算法是由 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出[38]。 它的靈感來自於成群的鳥遷徙和覓食行為,通過觀察將其兩種基本行為 歸納為認知模型和社會模型。粒子群的速度和位置函數分別以式(3)和式 (4)表示。其中 w為權重, v_n^i 是粒子在*i*時刻的運動速度, φ_p 與 φ_g 是學 習因子, rand()為0到1之間的隨機數。另外, p_{bestn}^i 是粒子在*i*時刻的 運動速度的最佳解, s_n^i 是粒子 n 在*i*時刻的運動速度的位置, g_{bestn}^i 是粒 子的社會學習最佳解。

$$v_n^{i+1} = \omega v_n^i + \varphi_p rand()(p_{bestn}^i - s_n^i) + \varphi_g rand()(g_{bestn}^i - s_n^i)$$
(3)

$$s_n^{i+1} = s_n^i + v_n^{i+1} \tag{4}$$

2. 灰狼演算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)

GWO演算法模擬Mirjalili等人提出的自然界灰狼的領導層級和狩獵機制 [39]。灰狼的社會等級由四類組成,它們的順序是阿爾法(Alpha, α)、貝 塔(Beta, β)、歐米茄(Omega, ω)和德爾塔(Delta, δ)。灰狼一邊狩獵, 一邊圍著獵物,然後靠近獵物,直到它停下來,最後發動攻擊。灰狼的 位置向量描述如下:

$$\overrightarrow{D} = \left| \overrightarrow{C} \overrightarrow{X}_{p}(t) - \overrightarrow{X}(t) \right|$$
(5)

$$X(t+1) = X_p(t) - AD$$
(6)

其中 t 為疊代次數, \vec{A} 與 \vec{C} 表示因子向量,由分別式(7)和(8)計算所得。 其中, \vec{a} 在迭代期間從 2 線性減少到 0,並且 $\vec{r_1}$ 與 $\vec{r_2}$ 是[0, 1]之間的隨機 向量。

$$\vec{A} = 2\vec{a}\cdot\vec{r_1} - \vec{a} \tag{7}$$

$$\vec{C} = 2\vec{r_2} \tag{8}$$

3. 蝙蝠演算法(Bat Algorithm, BA)

蝙蝠演算法類似於 PSO,它的靈感來自蝙蝠的迴聲定位行為,具有不同的發射脈衝率和響度,由 Xin-She Yang 於 2010 年開發之演算法[40], 其數學模型可分別以式(9)至式(11)表示。

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta$$
(9)

$$v_i^t = v_i^t + \left(x_i^{t-1} - x_*\right) f_i \tag{10}$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t$$
 (11)

$$\gamma^{t+1} = \gamma_0 \left(1 - e^{-\gamma t} \right) \tag{12}$$

蝙蝠在 f_i 頻率和響度為 A_0 的情況下,在 x'_i 位置以 v'_i 速度隨機飛行以尋找 獵物。其中,響度由指數遞減函數控制,它們可以根據目標的接近程度 自動調整入射脈衝的頻率並調整入射脈衝率 $\gamma \in [0,1]$ 。式(12)中顯示的脈 衝率是 γ_0 初始值與 γ 的函數,它控制收斂速度。

4. 人工蜂群演算法(Artificial Bee algorithm, ABA)

ABA 是由 Tereshko 和 Loengarov 於 2005 年提出,該演算法再由 Karaboga 引入用於優化求解數值問題[41]。它的靈感來自蜜蜂的智能覓 食 行 為 , 其 數 學 函 數 可 以 解 釋 如 下 。 ABA 的 第 一 步 是 在 $x_i(i=1, 2, 3,...,S)$ 變量的特定範圍內隨機生成初始解,然後每隻蜜蜂以 式(13)識別新食物源,其數量等於總食物源的 50%。在式(13)中, $k \in (1,2,...,N)$ 和 $j \in (1,2,...,D)$ 是隨機選擇的索引;此外, ϕ_{ij} 也是[0,1]之 間的隨機數。該參數控制周圍相鄰食物源的產生,並通過蜜蜂在視覺上 比較兩種食物位置,如式(14)的 x_{ij} ,其中 v_{ij} 和 x_{ij} 分別是蜂群的速度和位 置;此外, x_{min}^{j} 和 x_{max}^{j} 是參數的最小和最大限制。最後一步是旁觀者蜜蜂 以式(15)概率選擇食物來源。其中, fit_i 是第i解的適應度值,且與位置 i處食物源的花蜜量成正比;此外,j是食物來源的數量,它等於僱傭蜜蜂的數量。該演算法的終止條件為疊代次數。

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij} \left(x_{ij} - x_{kj} \right)$$
(13)

$$x_{ij} = x_{\min}^{j} + rand\left(\left(x_{\max}^{j} - x_{\min}^{j}\right)\right)$$
(14)

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n}$$
(15)

5. 布穀鳥搜尋(Cuckoo Search Optimization, CSO)

CSO 演算法由 Yang 和 Deb 於 2009 年首次提出[42],它的靈感來自某些 杜鵑物種的專性繁殖寄生,將它們的卵產在其他寄主鳥類的巢穴中,一 些寄主鳥類會與入侵的杜鵑發生直接衝突。CSO 理想化了這種育種行為, 因此可以應用於各種最佳化問題。該演算法在其實現中採用了三個基本 規則或操作,布穀鳥通過式(16)搜索路徑和位置,其中,α是步長因子, 它是一個大於零的常數,用於控制隨機搜索的範圍。此外, Levy(β)是 Levy 飛行的隨機最佳路徑,而⊕表示點對點乘法。

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \oplus Levy(\beta) \tag{16}$$

式(17)中的Levy概率表示Levy飛行隨機最佳航線與時間t的關係,其中, x;為正態分佈的隨機數,為指數係數。

$$Levy(\beta) \sim \mu = t^{\beta}, (1 < \beta < 3) \tag{17}$$

為求解一個實際的最優問題, Levy 表示所有變量的有效值空間, nest 的 適應度值表示取不同值的變量對應的目標函數值。疊代過程由式(16)執 行,直到獲得最佳解。

6. 貓群演算法(Cat Algorithm, CA)

CA 是由 Chu 等人於 2006 年提出[43],該方法係通過觀察貓的行為產 生的,由追踪模式和尋找模式模仿貓的行為。每隻貓在解決方案集合中 都有自己的位置、適應度值和標誌。在跟踪模式下,隨機速度值被賦予 在初始步驟中貓位置的所有維度;接下來,根據式(18)更新所有維度的 速度,如果其中一個速度超過最大值,則將其設置為最大速度。根據式 (19),貓的位置由速度 v^d 更新。基於機率,更新機制從候選點中隨機選 擇要移動的點,並用式(20)計算的選擇機率替換貓的位置,為了解決本 文中的最小目標問題, FS_b=FS_{min}。上述等式中,FS 為候選位置的適應 度值;r_i 是介於[0, 1]範圍內的均勻隨機值;c₁表示加速度係數,用於擴

19

展貓在解空間中移動的速度。

$$v_k^d = v_k^d + r_1 c_1 \left(x_{best}^d - x_k^d \right)$$
(18)

$$x_k^d = x_k^d + v_k^d \tag{19}$$

$$P_i = \frac{\left|FS_i - FS_b\right|}{FS_{\max} - FS_{\min}}$$
(20)

7. 螢火蟲演算法(Firefly Algorithm, FA)

FA 是由 Yang 於 2008 年提出[44],受到螢火蟲的閃光行為和生物發光通 信現象的啟發。FA 可由以下規則說明:(a)螢火蟲會被它的亮度吸引;(b) 吸引力與它們的亮度成正比,而亮度較低的螢火蟲會被明亮的吸引,亮 度與它們之間的距離成反比;(c)螢火蟲隨機移動,而兩隻螢火蟲的亮度 相同。任意一對兩隻螢火蟲的位置函數可用式(21)表示。

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta e^{-\gamma r_{ij}^2} \left(x_j^t - x_i^t \right) + \alpha_t \varepsilon_t$$
(21)

式(21)中, $\beta e^{-\gamma r_i^2} (x'_j - x'_i)$ 是因為螢火蟲 x'_i 的吸引力和一個 $\alpha_i \varepsilon_i$ 隨機參數。 其中, β 是螢火蟲吸引力值; r_{ij} 是螢火蟲i和螢火蟲j之間的距離; γ 是 介質光吸收係數。該算法的終止標準基於任意預定義的疊代次數或預定 義的適應值。

8. 鯨魚演算法(Whale Swarm Algorithm, WSA)

該算法由 Zhen 等人於 2017 年提出[45],四個規則總結了 WSA 中鯨魚 通過超聲波相互交流以進行狩獵的行為,亦即:(a)搜索區域內的所有鯨 魚都通過超聲波相互通信;(b)每條鯨魚都能夠計算到其他鯨魚的距離; (c)每條鯨魚的適應度決定了它自己發現食物的質量和數量;(d)適應度也 決定了鯨魚的運動,它由比它適應度更好的鯨魚中最近的一條來引導。 鯨魚 X 由其更好的和最近的鯨魚 Y 引導的隨機運動可以式(22)與(23)表 示。

$$\rho_{XY} = \rho_0 e^{-\eta \cdot d_{XY}} \tag{22}$$

$$x_{i}^{t+1} = x_{i}^{t} + rand(0, \rho_{X,Y}) \times (y_{i}^{t} - x_{i}^{t})$$
(23)

9. 引力搜尋演算法(Gravitational Search Algorithm, GSA)

GSA 是由 E. Rashedi 等人在 2009 年提出[46], 它是根據萬有引力定律 和質量相互作用的概念所得,該演算法使用牛頓物理學理論,其搜索粒 子是質量的集合。每個質量都有其位置、慣性質量以及主動和被動引力 質量。質量的位置意味著一個解,而它的重力和慣性質量對應於適應度 函數。根據牛頓定律,所有這些物體都會因為重力而相互吸引。由於這 個力,所有這些物體都會向質量更重的物體移動。要實現 GSA,第一步 是初始化粒子,然後根據目標函數評估適應度;第二步是計算引力常數, 引力值可以經由式(24)計算所得,其中 G_0 和 α 的值會隨著時間的推移而 减小以控制搜索空間;第三步,通過式(25)和式(26)計算每個粒子的質量, Fit,(t) 表示第 i 個粒子在 t 時刻的適應度值;此外, Fit,hert(t) 表示在時間 t 的最佳和最差適應度。第四步是計算每個粒子的重力加速度,可由運動 定律計算,如式(27)所示;最後,分別通過式(28)和式(29)更新粒子速度 及其位置,其中, ε 是一個小常數, $R_{ii}(t)$ 是時間 t 粒子 i 和 j 之間的歐 幾里得距離;此外, $M_{pi}(t)$ 是t時刻與粒子i相關的被動引力質量, $M_{pi}(t)$ 是 t 時刻與粒子 j 相關的主動引力質量。一般來說, $M_{pi}(t)=M_{ai}(t)=M_{i}(t), i=1,2,...,N$ 。在疊代過程中,GSA 在滿足停止 標準時結束。

$$G(t) = G_0 e^{\left(-\frac{\alpha t}{T}\right)}$$
(24)

$$m_{i}(t) = \frac{Fit_{i}(t) - Fit_{worst}(t)}{Fit_{best}(t) - Fit_{worst}(t)}$$
(25)

$$\mathbf{M}_{i}(t) = \frac{\mathbf{m}_{i}(t)}{\sum_{j=1}^{N} \mathbf{m}_{j}(t)}$$
(26)

$$\alpha_{i}(t) = \frac{F_{i}(t)}{M_{i}(t)} = G(t) \sum_{j=1}^{N} rand_{j} \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{M_{i}(t) \left(R_{ij}(t) + \varepsilon\right)} \times \left|x_{j}(t) - x_{i}(t)\right|$$
(27)

$$v_i(t+1) = rand_i v_i(t) + \alpha_i(t)$$
(28)

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$$
(29)

10. 煙火演算法(Firework Algorithm, FWA)

FWA 係由 Tan 和 Zhu 在 2010 年提出[47],受到觀察煙火爆炸的啟發。 在該演算法中,使用了兩種類型的爆炸,即搜索過程,並且適當地設計 了保持火花多樣性的機制。每個煙火產生的爆炸火花數可以用式(30)表 示,每個煙火的爆炸幅度定義為式(31),其中,y_{max} 和 y_{min} 分別是 f(x_i)的 最大值和最小值。此外, m 和 A 是用來控制爆炸次數和爆炸火花幅度的 參數, ζ是最小的常數,用來避免零分誤差。

$$s_{i} = m \times \frac{y_{\max} - f(x_{i}) + \xi}{\sum_{i=1}^{n} (y_{\max} - f(x_{i})) + \xi}$$
(30)

$$A_{i} = A \times \frac{f(x_{i}) - y_{\min} + \xi}{\sum_{i=1}^{n} (f(x_{i}) - y_{\min}) + \xi}$$
(31)

在 FA 中,目標函數計算出的當前最佳位置在當前位置中是最佳的,並 且始終保留用於下一次爆炸生成;隨後,根據它們與其他位置的距離選 擇 n-1 個位置,以保持火火的多樣性。一個位置 x_i和其他位置之間的一 般距離可以式(32)表示,其中,K是煙火和火花的所有當前位置的集合。 接者,位置 x_i的選擇機率定義如式(33)所示。

$$R(x_{i}) = \sum_{j \in K} d(x_{i}, x_{j}) = \sum_{j \in K} ||x_{i} - x_{j}||$$
(32)

$$p(x_i) = \frac{R(x_i)}{\sum_{j \in K} R(x_i)}$$
(33)

在該演算法中,每一代爆炸選擇並引燃n個煙火和位置,在爆炸後,獲 得併評估火花的位置,找到最佳位置時將停止FA;否則,就從目前的火 花和煙火中選擇其他地點進行下一代爆炸。

二、 饋線簡化模型與動態架構下負載計算

(一) 雙端饋線簡化模型

在配電網智慧運轉趨勢下,饋線自動化要求即時與快速反應,因此在做決策 運算不容耗費太多時間甚至因疊代過程發散而無法求解,造成後續決策影響甚鉅。 本計畫所開發之重構(Reconfiguration)方法具備應用於營業區處所轄數個 161 kV/22.8 kV 配電變電所(Distribution Substation, DS)、69 kV/11.4 kV 二次變電所 (Secondary Substation, SS)大範圍 22.8 kV 或 11.4 kV 一次配電網(Primary Distribution Networks)能力,故在嚴謹的工程分析要求的精確度範圍內做必要的 簡化將有助於本計畫所提方法的實務應用。如圖9所示為連接三個配電變電所的 部分一次配電網示意圖,各饋線均保持放射狀拓樸,並配置饋線出口端斷路器 (Feeder Circuit Breaker, FCB)、四路開闢(4-Way Switch)、二路開闢(2-Way Switch) 與負載開關(Load Breaker Switch, LBS)等開關設備引出連接至配電變壓器或其他 分歧線。因此,每條饋線經上述開關引出之負載抽接點(Tapped-off point)為數眾 多,且點與點之間距離長短不一,再加上配電網普遍存在三相不平衡現象,以及 較高 R/X 比等特性,使得配電網三相電力潮流不易收斂,故本計畫提出將圖 7 所示之FTU 量測饋線段以一等效饋線段及其整合負載與分散式能源(包含再生與 非再生能源)簡化模型進行電力潮流解析,藉由減少饋線負載抽接點數,確保程 式收斂, 達快速求解 FTU 量測饋線段之末端電壓與線路損失目的, 以及應用於 大範圍饋線開關重構之求解。



圖 9 一次配電網示意圖

由於區域配電網拓樸模型多變、拓樸複雜,透過饋線簡化模型,可將繁複多 數的線路、變壓器、負載及再生能源縮減成單一線路與負載,簡化過後的模型能 夠更方便計算,且與原系統差異不至於過大。一般饋線簡化模型分為以下幾種: 壓降模型(Voltage-drop model)、線損模型(Line loss model),以及混合壓降-線損模 型(Hybrid model),本節將依序推導各簡化模型之數學運算式。

1) 壓降模型

圖 10 左為單端饋電之饋線或分枝線的單相或三相單線圖,圖中共有 m 個離 散負載(Discrete Loads)沿著饋線分布,離散負載可為均勻分布(Uniformly Distributed)或非均勻分布(Non-uniformly Distributed)方式,本研究採用實際饋線 較常出現之非均勻分布負載。故假設各負載功率與線路長度皆不相同,如式(34) 與(35),則可得各線段電壓如式(36),而末端壓降則可化簡為式(37)。

$$P_1 \neq P_2 \neq P_3 \neq \cdots \neq P_m \tag{34}$$

$$l_1 \neq l_2 \neq l_3 \neq \dots \neq l_m \tag{35}$$

$$V_{ai} = z \cdot l_i \cdot \sum_{j=1}^{i} P_j \tag{36}$$

$$V_{O} = \sum_{i=1}^{m} V_{Oi} = \sum_{i=1}^{m} (z \cdot l_{1} \cdot \sum_{j=1}^{i} P_{j}) = z \cdot \sum_{i=1}^{m} (l_{1} \cdot \sum_{j=1}^{i} P_{j})$$

$$= z \cdot L_{eq} P_{t} = z \cdot \sum_{i=1}^{m} (l_{1} \cdot \sum_{j=1}^{i} P_{j})$$
(37)

其中, P_m與l_m為負載功率與線路長度, z 為線路阻抗, L_{eq}為圖 10 右簡化後之等 效線路長度, P_i為負載總和, 此方法不考慮線路損失與變壓器模型, 且假設各線 路阻抗相同。

故可得式(38)之簡化線路等效長度。因此,原始拓撲與簡化拓撲之壓降將會 將近,故此簡化方法稱為壓降模型。

$$L_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{m} (l_1 \cdot \sum_{j=1}^{i} P_j)}{P_i}$$
(38)



圖 10 壓降模型簡化單線圖

2) 線損模型

圖 11 左為單端饋電之饋線或分枝線的單相或三相單線圖,圖中共有 m 個離 散負載(Discrete Loads)沿著饋線分布,假設各負載功率與線路長度皆不相同,如 式(34)與(35),則可得各線段損失如式(39),而總線路損失則可化簡為式(40)。

$$L_{lossi} = r \cdot l_i (\sum_{j=1}^{i} P_j)^2$$

$$L_{loss} = \sum_{j=1}^{i} loss_i = \sum_{j=1}^{m} [r \cdot l_i (\sum_{j=1}^{i} P_j)] = r \cdot \sum_{i=1}^{m} [l_i (\sum_{j=1}^{i} P_j)^2]$$

$$= r \cdot L_{eq} P_t^2 = r \cdot \sum_{i=1}^{m} [l_i (\sum_{j=1}^{i} P_j)^2]$$
(39)
(39)

其中,r為線路電阻,L_{eq}為圖 11 右簡化後之等效線路長度,P_i為負載總和,此 方法不考慮電壓降與變壓器模型,且假設各線路阻抗相同。

故可得式(41)之簡化線路等效長度。因此,原始拓樸與簡化拓樸之線路損失 將會將近,故此簡化方法稱為線損模型。





圖 11 線損模型簡化單線圖

3) 混合壓降-線損模型

同時符合壓降模型與線損模型之雙重條件則稱為混合壓降-線損模型,如圖 12所示。其簡化為兩條線路與兩個負載,其中 k 為總負載分配為兩個負載 P_a 與 P_b 之比例常數, k₁ 為總線路長度分配為兩條線路長度 L_a 與 L_b 之比例常數, P_t 為負 載總和, L, 為總長度。



圖 12 混合壓降-線損模型簡化單線圖

首先考慮壓降部分, L_{vD}為 1)壓降模型所求之等效長度,故在圖 12 混合模型可得式(42),再經由式(43)與式(44)簡化後得到 k₁。

$$L_{VD}P_{t} = L_{a}(P_{a} + P_{b}) + L_{b}P_{b}$$

$$= L_{a}P_{a} + L_{a}P_{b} + L_{b}P_{b}$$

$$= k_{1}L_{t}(1-k)P_{t} + k_{1}L_{t}P_{t} + (1-k_{1})L_{t}kP_{t}$$

$$= k_{1}L_{t}P_{t} - k_{1}kL_{t}P_{t} + k_{1}kL_{t}P_{t} + (1-k_{1})L_{t}kP_{t}$$

$$= k_{1}L_{t}P_{t} + (1-k_{1})L_{t}kP_{t}$$

$$= (k_{1} + k - kk_{1})L_{t}P_{t}$$
(42)

$$\frac{L_{v_D}}{L_t} = k_1 + k - kk_1 = k_1(1-k) + k$$

$$k_1 = \frac{\frac{L_{v_D}}{L_t} - k}{1-k}$$
(43)

接著考慮線損部分, L_{loss}為 2)線損模型所求之等效長度,故在圖 12 混合模型可得式(45),再經由式(46)與式(47)簡化後亦可得到 k₁。

$$L_{loss}P_t^2 = k_1 L_t P_t^2 + (1 - k_1) L_t (kP_t)^2$$

= $(k_1 L_t + k^2 L_t - k_1 k^2 L_t) P_t^2$ (45)

$$\frac{L_{loss}}{L_{t}} = k_{1} + k^{2} - k_{1}k^{2} = k_{1}(1 - k^{2}) + k^{2}$$

$$(46)$$

$$k_{1} = \frac{\frac{L_{toss}}{L_{t}} - k^{2}}{(1 - k^{2})}$$
(47)

故將式(44)及式(47)經(48)解聯立後,可求得 k 值,如式(49)。最後將求得之 k 值代回式(44)與式(47)可得兩 k₁,再解聯立後即可求出 k₁,如式(50)與(51)。

$$\frac{\frac{L_{VD}}{L_t} - k}{1 - k} = \frac{\frac{L_{loss}}{L_t} - k^2}{(1 - k^2)}$$
(48)

$$k = \frac{L_{VD} - L_{loss}}{L_t - L_{VD}} \tag{49}$$

$$k_{1} = \frac{\frac{L_{VD}}{L_{t}} - \frac{L_{VD} - L_{loss}}{L_{t} - L_{VD}}}{1 - \frac{L_{VD} - L_{loss}}{L_{t} - L_{VD}}} = \frac{\frac{L_{loss}}{L_{t}} - \left(\frac{L_{VD} - L_{loss}}{L_{t} - L_{VD}}\right)^{2}}{1 - \left(\frac{L_{VD} - L_{loss}}{L_{t} - L_{VD}}\right)^{2}}$$
(50)

$$k_{1} = \frac{L_{t}L_{loss} - L_{VD}^{2}}{L_{t}^{2}2L_{t}L_{VD} + L_{t}L_{loss}}$$
(51)

由 k1 可得簡化線路等效長度。因此,原始拓樸與簡化拓樸之壓降以及線路 損失將會將近,故此簡化方法稱為混合壓降-線損模型。

(二) 含動態系統架構之精進負載計算

透過變電所自動化與饋線自動化功能以重構方式進行一次配電網最佳配置, 可在正常運轉下切換四路或二路開關進行各饋線間負載(包含負載與分散式能源 之淨負載量)平均分配以達負載平衡、提高裕度。其中,精確掌握負載為首要之 務,由於本計畫採用 FTU 量測負載資料進行配電網最佳配置以提升饋線裕度, 因此依據標的系統過去 FTU 歷史資料紀錄中歸納推導出所屬開關、配電變壓器 與高低壓負載歸屬關係,建立精確地 FTU 所轄配電變壓器容量與數量及其負載 量估算模式,可克服因饋線開關狀態改變後,導致 FTU 涵蓋量測區域饋線段範 圍改變造成之誤差,如圖 13 所示,連接二條饋線常開開關(Normally Open Switch) 由 J4 改變為 S1,造成 FTU1、FTU2、FTU4 量測饋線段改變,因此,必須重新 計算 FTU 轄區內各配電變壓器容量與數量及其負載量,用以確保基於 FTU 量測 負載資料進行配電網配置之正確性。



(b) 開闢切換後圖 13 開闢切換前後 FTU 量測範圍示意圖

三、 整合 TPU 與 FTU 之邊緣計算單元

本計畫整合邊緣計算單元 TPU 於饋線終端設備 FTU 內,並在 FTU 旁裝設 環境監控箱以取得即時環境資料,進行負載預測和邊緣計算。本章介紹透過 DNP3 和 RS485 通訊協定取得 FTU 量測資料和環境監控箱資料,並以深度學習 之長短期記憶法預測 FTU 負載,下一章將介紹所本研究所提出之邊緣計算架構 與其延伸應用。

(一) TPU與FTU之通訊連線與SQLite 資料庫存取

TPU與FTU之間使用 DNP3 之通訊協定, DNP3(Distributed Network Protocol 3)是由 Westronic 公司(現今 GE Harris 公司)於 1990 年開發,並於 1993 年釋 出的開放式標準。DNP3 是現今電力設施 SCADA 系統的主要協定,並且廣泛應 用於運輸、石油、天然氣、水、廢水等工業領域[48]-[50]。

DNP3 支援多種不同的型態的資料,且可夾帶在單一封包訊息中,允許在幾 乎全部的資料中加上時間戳記和支持精確時間同步,還能傳輸包括資料品質、設 備狀況和事件等資料,使得使用 DNP3 通訊協定傳輸的資料具有強大且精準的特 性。DNP3 亦支援異常回報(Report-by-Exception)和主動回應(Unsolicited Response), 前者僅在數值變動時才會回報,後者在事件發生時,外站(Outstation)不必等待主 站(Master)輪詢(Integrity Poll),外站會自動回報給主站。

DNP3 是基於 IEC 60870-5 標準,使用 OSI 七層網路架構中的三層,分別是: 應用層(Application Layer)、資料鏈結層(Data Link Layer)和實體層(Physical Layer), 此結構稱為增強性能架構(Enhanced Performance Architecture, EPA)。此外, DNP3 在應用層中加入「傳輸功能(Transport Function)」,類似「層」的功能,作為處理 大量訊息的一種功能。傳輸功能有時候又被稱為偽層(pseudo layer)。DNP3 架構 圖如圖 14 所示。



圖 14 DNP3 架構圖

a) DNP3 應用層

應用層是 EPA 和 OSI 模型中的最上層。它與 DNP3 用戶的軟體和較低的層 連接。應用層提供標準化的功能、資料格式和程序,以便有效傳輸數據採集值、 屬性和控制命令。圖 15 為應用層片段結構,包含三個部分,分別是應用層標頭 (Application Header)、物件標頭(Object Header)和 DNP3 物件(DNP3 Object)。每個 片段都以包含訊息控制資訊的應用層標頭開始。但單獨的應用層標頭通常不足以 傳達完整訊息,所以需要在應用標頭後面加上物件標頭,物件標頭指定了 DNP3 物件的類型、格式和身份,最後是 DNP3 物件, DNP3 物件內容為要傳輸的資料。

Application Header	First Object Header	First DNP3 Object	•••	Last Object Header	Last DNP3 Object
	incauci			Incauci	

圖 15 DNP3 應用層片段

4)應用層標頭

應用層標頭有要求標頭(Request Header)及回應標頭(Response Header),前者為主站對外站之要求動作或訊息,後者為外站回應至主站的要求動作或訊息。要求標頭和回應標頭的格式如圖 16 所示。要求標頭與回應標頭皆包含 1 個位元組的應用控制(Application Control)與功能碼(Function Code),而回應標頭多了 2 個位元組的內部指示(Internal indications)。

Application Request Header										
Application Control (1 octet)			ol	Function Code (1 octet)						
Application Requ								He	eader	
Application Control (1 octet)			ol	Function Code (1 octet)					Internal indications (2 octet)	\$
1 7	6	5	4	3	2	1	0	۱	bit position	
FIR	FIN	CON	UNS		SE	EQ				

圖 16 應用層標頭格式

應用控制內為1位元的FIR、FIN、CON和UNS以及4位元的SEQ。詳細 說明如表1。

FIR	FIR=0 表示不是訊息的第一個片段。
	FIR=1 表示是訊息的第一個片段。
FIN	FIN=0表示不是訊息的最後一個片段。
	FIN=1 表示是訊息的最後一個片段。
CON	CON=0表示不應返回應用層確認訊息。
	CON=1 表示應返回應用層確認訊息。
UNS	UNS=0 表示序列號碼與主站要求或請求的回應訊息有關。
	UNS=1 表示序列號碼與主動的回應訊息有關。
SEQ	SEQ 用於驗證是否以正確的順序接收片段並檢測重複的片段。SEQ 字串的範圍為 0 到
	15,以1為間隔依序遞增並做餘運算(modulo),在序列號碼為15時,下一個號碼為0重
	新開始計數。序列號碼亦分為請求(solicited)和主動(unsolicited)兩組,前者用於請求要求、
	回應和確認,後者用於主動的回應和確認。兩組序列號碼間沒有任何關係。

表1應用控制位元說明

功能碼的長度為1位元組,其功能是用來識別訊息的目的,主站的要求訊息 使用的功能碼範圍為 0x00 到 0x80,外站的回應訊息使用的功能碼範圍為 0x81 到 0xFF。常用的功能碼如表 2 所示。

Message Type	Code	Name
Confirmation	0x00	Confirm
Request	0x01	Read
Request	0x02	Write
Request	0x03	Select
Request	0x04	Operate
Response	0x81	Response
Response	0x82	Unsolicited Response

表 2 功能碼定義

內部指示的長度為2位元組,其功能是表示外站內的某些狀態和錯誤情況, 格式如圖17表示。

表 3 為每個位元的簡易說明,例如:IIN1.4 代表地 1 個位元組的第 4 個位元, 其功能為外站回報主站需要時間同步,如果該位元被外站啟用的話,在主站回傳 時間同步或者清除該位元 (設定為 0) 前,外站無法自行清除。



圖 17 內部指示格式

Bit	Name	Brief description
IIN1.0	BROADCAST	A broadcast message was received.
IIN1.1	CLASS 1 EVENTS	The outstation has unreported Class 1 events.
IIN1.2	CLASS 2 EVENTS	The outstation has unreported Class 2 events.
IIN1.3	CLASS 3 EVENTS	The outstation has unreported Class 3 events.
IIN1.4	NEED TIME	Time synchronization is required.
IIN1.5	LOCAL CONTROL	One or more of the outstation's points are in local control mode.
IIN1.6	DEVICE TROUBLE	An abnormal, device-specific condition exists in the outstation.
IIN1.7	DEVICE RESTART	The outstation restarted.
IIN2.0	NO FUNC CODE	The outstation does not support this function code.
	SUPPORT	
IIN2.1	OBJECT UNKNOWN	Outstation does not support requested operation for objects in the
		request.
IIN2.2	PARAMETER ERROR	A parameter error was detected.
IIN2.3	EVENT BUFFER	An event buffer overflow condition exists in the outstation, and at
	OVERFLOW	least one unconfirmed event was lost.
IIN2.4	ALREADY	The operation requested is already executing. Support is optional.
	EXECUTING	
IIN2.5	CONFIG CORRUPT	The outstation detected corrupt configuration. Support is optional.
IIN2.6	RESERVED 2	Reserved for future use. Always set to 0.
IIN2.7	RESERVED 1	Reserved for future use. Always set to 0.

表3 內部指示個別位元說明

5) 物件標頭

單獨的應用層標頭無法提供完整的訊息時,物件標頭能提供補充訊息,讓 DNP3的指令完整,例如:需要類比輸入點類型資料或外站在傳送資料時應使用的 整數或浮點數格式。物件標頭包括物件類型欄位(Object Type Field)、限定欄位 (Qualifier Field)和範圍欄位(Range Field)。其格式如圖 18 所示。


圖 18 物件標頭格式

物件類型欄位由 Group 和 Variation 組成,其資料長度都是一個位元組。Group 為主站請求或外站回應中包含的資料類型或數值,例如:類比輸入、二進輸入、 時間數值等型態。Variation 為 DNP3 物件的資料格式,例如:16 位元整數、32 位 元整數、半精浮點數和雙精浮點數。

限定欄位和範圍欄位是互相有關連的,因為範圍欄位的結構和內容取決於限 定欄位位元組內的數值。Res 為保留字元,供未來使用,其值應設為 0。Object Prefix Code 如表 4 所示,其功能為在物件標題後如果有 DNP3 物件的話需要在 DNP3 物件前加入前綴值。Range Specifier Code 如表 5 所示,其功能為如果使用 範圍字串,則表示其包含的內容及其大小。

Code (Hex)	Description	Size of object prefix
0	Objects are packed without an index prefix.	—
1	Objects are prefixed with an index.	1-octet
2	Objects are prefixed with an index.	2-octet
3	Objects are prefixed with an index.	4-octet
4	Objects are prefixed with an object size.	1-octet
5	Objects are prefixed with an object size.	2-octet
6	Objects are prefixed with an object size.	4-octet
7	Reserved for future use.	

表 4 Object Prefix Code 說明

Code (Hex)	Description	Size of object prefix
0	Range field contains 1-octet start and stop indexes.	2
1	Range field contains 2-octet start and stop indexes.	4
2	Range field contains 4-octet start and stop indexes.	8
3	Range field contains 1-octet start and stop virtual addresses.	2
4	Range field contains 2-octet start and stop virtual addresses.	4
5	Range field contains 4-octet start and stop virtual addresses.	8
6	No range field is used. This implies all values.	0
7	Range field contains 1-octet count of objects	1
8	Range field contains 2-octet count of objects	2
9	Range field contains 4-octet count of objects	4
А	Reserved for future use.	—
В	Variable format qualifier, range field contains 1-octet count of objects.	1
С	Reserved for future use.	—
D	Reserved for future use.	_
Е	Reserved for future use.	_
F	Reserved for future use.	—

表 5 Range Specifier Code 說明

6) DNP3 物件

DNP3 物件是來自一個點或其他結構的資料的編碼表示,根據其 Group 和 Variation 編號進行編排格式,以便在訊息中傳輸。一條訊息可能包含多個物件, 每個物件代表在指定時間的點的瞬間值或向輸出點發出的命令。

b) DNP3 傳輸功能層

傳輸功能層實際上是應用層的一個子層,它位於應用層與資料鏈結層的中間, 負責轉譯應用層與資料鏈結層的資料。由於應用層的資料長度可能會大於資料鏈 結層所允許的資料長度,因此傳輸功能層會將應用層的資料拆解為資料鏈結層的 所允許的長度,並加上一位元組的傳輸標頭(Transport Header),組合起來稱為傳 輸片段(Transport Segments)。其格式圖 19 所示。



1) 傳輸標頭

傳輸標頭由1個位元組組成,是傳輸片段中的第一個位元組。在提交到資料 鏈結層進行傳輸之前,應用層的每個資料片段都會加入一個傳輸標頭。從資料連 接層接收到傳輸片段後,在組合應用層的片段之前會將傳輸標頭移除。其格式如 圖 20 所示。



圖 20 傳輸標頭

FIN 欄位寬度為1個bit, FIN=0表示後面還有更多跟隨的傳輸片段。FIN=1 表示傳輸片段序列中的最後一個傳輸片段。

FIR 欄位寬度為1個 bit, FIN=0表示不是傳輸片段序列中的第一個傳輸片段。FIN=1表示是傳輸片段序列中的第一個傳輸片段。

SEQUENCE 欄位寬度為 6 個 bit。它用於驗證傳輸片段是否以正確的順序接 收,並防止傳輸片段重複或遺失。它的範圍為 0 到 63,以 1 為間隔依序遞增並 做餘運算(modulo),在序列號碼為 63 時,下一個號碼為 0 重新開始計數。在這 個序列中的傳輸片段包含一個應用層片段。其運作規則如表 6 所示。

表 6 SEQUENCE 欄位規則說明

Rule 1	傳輸片段序列只能從 FIR=1 的傳輸片段開始。
Rule 2	傳輸片段序列只能從 FIN=1 的傳輸片段結束。
Rule 3	當沒有傳輸片段序列正在進行時,任何沒有接收到 FIR=1 的傳輸片段都將被
	丟棄。
Rule 4	一個具有 FIR=1 的傳輸片段可能帶有從 0 到 63 的任何序列號碼,與之前的
	傳輸歷史無關。
Rule 5	在傳輸片段序列開始傳送以後:
	— 每個後續接收的傳輸片段應有一個序列號碼,該序列號碼從前一個傳輸
	片段增加1。
	— 在進行傳輸的過程中,如果接收到具有 FIR=1 的傳輸片段將讓全部先前
	傳送的傳輸片段序列被丟棄,並且新的傳輸片段序列會以新接收的傳輸片段
	作為其第一個 SEQUENCE 開始。
	— 接收到與前一個傳輸片段相同 octet 的傳輸片段將會被丟棄。
	— 接收到一個傳輸片段的 FIR=0 且序列號碼不為預期增加的號碼,與前一
	個傳輸段不同時,該傳輸片段應該被丟棄,且整個正在傳輸的片段應該要終
	止並且丟棄。
Rule 6	傳輸片段序列可能只有單一個傳輸片段,則該段的 FIR 和 FIN 皆等於1。
Rule 7	當收集到一個完整的傳送片段序列時,其應用層資料才會被傳遞到應用層。

2)應用層資料

一個傳輸片段由一個傳輸標頭和1到249個位元組的應用層資料組成。 為了獲得最大的傳輸效率,通常會使用盡可能大的傳輸片段大小。其運作規 則如表7所示。

表7應用層資料規則說明

Rule 1	每個傳輸片段可能包含1到249個位元組的應用層資料。除了最後一個片段
	外,不需要所有片段都具有相同的大小;允許在段系列中改變段大小。接收
	者應接受不同大小的傳輸片段。
Rule 2	傳輸功能保留應用層片段位元組的順序。在接收端時,應用層片段會按順序
	重新組合。
	— 應用層資料會被分成適當大小的部分或一個位元組。
	— 第一個應用層資料,位元組內的數值為0,由第一個傳輸片段傳輸,且該
	片段的 FIR=1 和 SEQUENCE 為 N。
	— 如果有下一個應用層資料,則放入傳輸片,SEQUENCE為(N+1) mod 64。
	— 應用層資料依序遞增並放入傳輸片段的模式會一直持續到被發送的最後
	一部分。
	— 最後一個片段的 FIN=1。

c) DNP3 資料鏈結層

在 DNP3 協定中,資料鏈結層有兩個主要目的。首先,它通過通訊通道將應 用層資料雙向傳輸到目標設備。在執行傳輸任務時,資料鏈結層對從上層傳輸下 來的傳輸區片段進行編碼,構建資料鏈結訊框,然後將該訊框發送到通訊管道進 行傳輸。在執行接收任務時,傳輸片段從傳入驗證的資料鏈結訊框中提取出來, 並傳遞到上層。其次,資料鏈結層會管理資料鏈結訊框、流量控制和錯誤處理並 提供連結狀態指示。

資料鏈結訊框有一個固定長度的標頭區塊,稱為區塊0,後面再跟隨著其他 的資料區塊。每個區塊以16 位檢查碼(Cyclic redundancy check, CRC)結束。其格 式如圖21 所示。

37

Octet transmission order	→	Block transmission	order	
Start 0x05 0x64 Len Header Block (Block 0)	Ctrl Destination LSB MSE	a Source CRC 3 LSB MSB LSB MSB		
	Use	er Data (16 octets)		CRC LSB MSB
1 st Data Block (Block 1)				
	Use	er Data (16 octets)		CRC LSB MSB
2 st Data Block (Block 2)				
		•••		
	User Data (16 c	octets)	CRC LSB MSB	

Nth Data Block (Block N)

圖 21 資料鏈結層訊框格式

資料鏈結訊框的標頭由2個Start 位元組、1個Len 位元組、1個Ctrl 位元組、

兩個 Destination 位元組、1 個 Source 位元組和1 個 CRC 位元組組成。

1) Start 位元組

Start 位元組的第1個位元組為 0x05, 第2個位元組為 0x64。

2) Len 位元組

Len 是指跟隨在 Start 和資料區塊中的非 CRC 位元組的長度總和,包括 Ctrl、 Destination 和 Source 以及 User Data。Len 的最小值為 5,表示只有標頭區塊,而 包含 User Data 的最大值為 255。

3) Ctrl 位元組

Ctrl 包含訊框的傳送方向、交易發起者、錯誤與流量控制和功能碼。其格式如圖 22 所示,表 8、

表9、

表 10 為每位元的詳細說明。

7	6	5	4	3	2	1	0	•
	DDM	FCB	FCV	1	EUNCTION CODE			bit position
DIK	FKIVI	0	DFC	FUNCTION CODE				

圖 22 Ctrl 位元組格式

DIR	DIR=0 表示是從 Outstation 發起的訊框。
	DIR=1 表示是從 Master 發起的訊框。
	傳送端應設置 DIR 位元以指示資料鏈結訊框的物理傳輸源。接收端則應忽略此位
	元。該位元可用於除錯或測試。
PRM	FIN=0 表示資料鏈結層交易由 Master 或 Outstation 完成。
	FIN=1 表示資料鏈結層交易由 Master 或 Outstation 啟動。
FCB	FCB用於偵測傳送端到接收端的訊框是否遺漏和重複。當接收端接收到 FCV=1 的訊
	框和與 Outstation 符合預期的 FCB 時,它可以被判斷為新的要求。當 Outstation 偵
	測到這種情況時,它會在下一條訊息中切換它預期的 FCB 狀態,並設置 FCV=1。
FCV	FCV=0 表示忽略 FCB 位元的狀態。
	FCV=1 表示 FCB 位元的狀態是有效的,並且接收到的訊息中的 FCB 位的狀態應根
	據其預期狀態進行檢查。
DFC	DFC=1 表示接收緩衝區不可用或接收端的資料鏈結層忙碌中。
	DFC=0表示接收緩衝區可用且接收端的資料鏈結層已準備就緒。
Function	Function Code 代表與資料鏈結訊框相關的功能或服務。 Function Code 中的值的定
Code	義取決於資料鏈結層訊息是從 Master 發送到 Outstation 還是從 Outstation 發送到
	Master ,
	表9與
	表 10 為 Function Code 的詳細說明。

表 8 Ctrl 位元組個別位元說明

表 9 Primary-to-second	ary (PRM=1)) function codes 說明	Ŧ
-----------------------	-------------	---------------------	---

Primary function code	Function code name	Service function	FCV bit	Respouse function codes permitted from Secondary Station
0	RESET LINK STATES	重至遠端連結	0	0 or 1
1	TEST LINK STATES	測試連接功能	1	0 or 1
11	CONFIRMED USER DATA	傳送應用層資料,雲要確認	1	0 or 1
15	UNCONFIRMED USER DATA	# # # # # # # # # # # # # # # # # # #	0	沒有接收端的資料連接回應
9	REQUEST LINK STATUS	要求連接狀態	0	11
Other	—	保留		15 或沒有回應

表 10 Secondary-to-primary (PRM=0) function codes 說明

Secondary	Function code name	Service function
function code		
0	ACK	肯定的應答
1	NACK	否定的應答
11	LINK_STATUS	連接狀態
15	NOT_SUPPORTED	不支援
Other	—	保留

4) Destination 位元組

Destination 位元組代表目標的站的地址。第一個位元組(Low Order Octet)為 最低有效位元(Least Significant Bit, LSB),第二個位元組(High Order Octet)為最低 有效位元(Most Significant Bit, LSB),其格式如圖 23 所示。

7	6	5	4	3	2	1	0	▲
Lo	w Order (Octet(LS	B)	Hig	gh Order	Octet(M	SB)	bit position

圖 23 目標地址格式

5) Source 位元組

Destination 位元組代表來源的站的地址。第一個位元組(Low Order Octet)為 最低有效位元(Least Significant Bit, LSB),第二個位元組(High Order Octet)為最低 有效位元(Most Significant Bit, LSB),其格式如圖 24 所示。



圖 24 來源地址格式

6) User Data 位元組

User Data 代表使用者資料,或者說屬於資料鏈結層的更高層資料。設計資料鏈結層的目的在於提供更高層傳輸的服務,所以無須知道傳輸的內容。User Data 最多能包含 250 個位元組,每個資料區塊包含 16 位元組的 User Data,如果 User Data 無法被 16 整除,剩餘的資料會放置於最後一個資料區塊。

CRC 位元組

每個資料區塊的最後一定會加上 CRC 位元組,以確保資料完整性,例如: 標頭區塊內的 Start、Len、Ctrl、Destination、Source 皆用於標頭 CRC 的計算。 這些 CRC 都會在接收的訊框中接受查驗,只有通過查驗的有效資料才會被傳送 到傳輸功能層。圖 25 為讀取 FTU 資料之核心程式碼,第 60 行為使用 DNP3 格 式讀取 FTU 裝置之三相電壓、電流、實功和虛功的程式碼,並使用 socket 透過 UDP 協定送出 DNP3 指令。第 66 行為接收 FTU 裝置所回傳之封包,並在第 69

行解析和儲存置 SQLite。



圖 25 讀取 FTU 核心程式碼

圖 26 為讀取環境監控箱資料之核心程式碼,第 172 到 179 行為使用 RS485 通訊協定讀取濕度、溫度和照度的程式碼,並同時解析環境監控箱回傳的資料, 在第 182 行儲存置 SQLite。圖 27 為自動讀取 FTU 與環境監控箱核心程式碼,使 用 apscheduler 模組,設定每 5 秒自動讀取 FTU 與環境監控箱資料,並儲存至 SQLite,供 LSTM 負載預測使用。圖 28 為 SQLite 儲存結果。



圖 26 讀取環境監控箱核心程式碼

201	[] if name == "main":
202	create_env_db()
203	create_FTU_db()
204	<pre>scheduler = BackgroundScheduler()</pre>
205	<pre>scheduler.add_job(read_env, 'interval', seconds=5)</pre>
206	<pre>scheduler.add_job(read_AI, 'interval', seconds=5)</pre>
207	<pre>scheduler.start()</pre>
208	try:
209	<pre># This is here to simulate application activity (</pre>
210	🖨 while True:
211	<pre>time.sleep(1)</pre>
212	except (KeyboardInterrupt, SystemExit):
213	
214	scheduler.shutdown()

圖 27 自動讀取 FTU 與環境監控箱核心程式碼

6 N	ew Database 🛛 🔒 O	pen Database	Write Ch	anges 🛛 📽 Reve		DB Browser n	or sQI	lice - /nom	e/ha	ruka	Data	Base/	FIU.	ab		
Dat	abase Structure B	rowse Data E	dit Pragmas	Execute SQL	le Ne	ew Database	🗟 Ор	en Databas	se 📮	Q	Vrite (es	₿¢ R	ever	t Changes 🛛 🔞
Tab	e: 🔲 env	- 8 3		Ne	Datat	ase Structure	Вгоу	vse Data	Edit	Prag	mas	Exe	ecute	SQL		
	Time	Temperature	e Humidity	Irradiation	Table:	AI	•	8 8	\$					4	*	Pilter in any
	Filter	Filter	Filter	Filter		Time		AI_0	AI_1	AI_2	AI_3	AI_4	AI_5	AI_6	AI_7	AI_8
1	2021-08-10 14:54:24	24.5	53.2	0.0		Filter		Filter								Filter
2	2021-08-10 14:54:23	24.5	53.2	0.0	6702	2021-08-17 09	:35:02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.599998474121
3	2021-08-10 14:54:30	24.5	53.1	0.0	6703	2021-08-17 09	:35:07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.599998474121
4	2021-08-10 14:54:33	3 24.5	53.1	0.0	6704	2021-08-17 09	:35:12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.599998474121
5	2021-08-10 14:54:36	5 24.5	52.9	0.0	6705	2021-08-17 09	:35:17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.599998474121
6	2021-08-10 14:54:39	24.5	52.9	0.0	6706	2021-08-17 09	:35:22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.599998474121
7	2021-08-10 14:54:42	2 24.5	52.8	0.0	6707	2021-08-17 09	:35:27	57.349	5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.599998474121
8	2021-08-10 14:54:45	5 24.5	52.8	0.0	6708	2021-08-17 09	:35:32	78.599	5	з	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.599998474121
9	2021-08-10 14:54:48	3 24.5	52.6	0.0	6709	2021-08-17 09	:35:37	85.5	4	5	0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.599998474121
10	2021-08-10 14:54:53	24.5	52.6	0.0	6710	2021-08-17 09	:35:42	77.550	4	4	0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.599998474121
11	2021-08-10 14:54:54	24.5	52.6	0.0	6711	2021-08-17 09	:35:47	72.949	4	3	0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.599998474121
12	2021-08-10 14:54:57	24.5	52.5	0.0	6712	2021-08-17 09	:35:52	75.5	4	4	0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.599998474121
13	2021-08-10 14:55:00	24.5	52.4	0.0	6713	2021-08-17 09	:35:57	76.0	4	4	0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.599998474121
14	2021-08-10 14:55:03	3 24.5	52.2	0.0	6714	2021-08-17 09	:36:02	76.0	4	4	0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.599998474121
15	2021-08-10 14:55:0	5 24.5	52.2	0.0	6715	2021-08-17 09	:36:07	75.5	4	4	0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.599998474121

圖 28 自動讀取 FTU 與環境監控箱資料蒐集結果

(二) 整合氣象環境資料之負載預測

LSTM 法為 Hochreiter[51]於 1997 年所提出,屬於機械學習內的深度學習分枝,特點是在神經單元內加入遺忘門(Forget Gate),免除梯度消失等因傳統遞歸神經網路(Recurrent Neural Network, RNN)問題,如圖 29 所示。Ospina 等人亦提出以此法搭配穩定小波轉換(Stationary Wavelet Transform, SWT)取得 PV 發電之預測結果,與傳統 LSTM 法相比可減少約 30%的 RMSE 誤差,但增加約一倍的運算時間[52]。



圖 29 典型 LSTM 神經網路

數學表示式分別由式(52)至(57)所示,其中 $b_i \ b_f \ b_o$ 與b表示為偏差向量, 記憶體單元 \overline{c}_i 用來儲存經由激勵函數所得出之長期記憶參數,狀態變數 C_{t-1} 與 H_{t-1} 表示為前次迭代之記憶體參數與輸出向量。

$$i_{t} = \sigma(W_{i}H_{t-1} + U_{i}X_{t} + b_{i})$$
(52)

$$f_{t} = \sigma(W_{f}H_{t-1} + U_{f}X_{t} + b_{f})$$
(53)

$$o_{t} = \sigma(W_{o}H_{t-1} + U_{o}X_{t} + b_{o})$$
(54)

$$\overline{c}_{t} = tanh(W_{c}H_{t-1} + UX_{t} + b)$$
(55)

$$C_t = f_t C_{t-1} + i_t \overline{c}_t \tag{56}$$

$$H_t = o_t \tanh(C_t) \tag{57}$$

若有 N(W) 個 LSTM 單元則整體所需記憶體,可以由式(58)表示,用於電腦 記憶體容量評估。其餘計算細節與程式編寫技巧,可參考 Brownlee 之說明[53]。 $M = 4(N(W)(N(W)+1)+N(X_t)N(W))+N(H_t)(N(W)+1)$ (58) 以饋線之負載為模型,輸入的參數有年(2020-2021)、月(1-12)、日(1-31)、小時(0-23)、星期(1-7)、溫度(18.7-33.9°C)與濕度(44-99%)等共計有七種,輸出的為 負載功率一種;資料時間長短約為 10 個月份(5040 筆)並分成歷史資料與預測資 料,前者作為模型訓練;後者作為預測輸入資料以驗證預測功率。真實的運轉預 測時,預測資料由環境監控箱資料取得。使用 LSTM 為預測法則。圖 30 為整體 關係示意。



圖 30 預測程序、輸入與輸出關係

本計畫以虎菁變電所氣象資料進行預測,LSTM 核心程式碼如圖 31 所示, 單一饋線負載預測平均耗時 164,741 秒。



圖 31 LSTM 核心程式碼

四、 應用邊緣計算於配電網模擬分析

本計畫提出以邊緣計算單元 TPU 實現精準動態架構負載計算,利用饋線上 的 FTU 和環境監控箱取得所需資料,進行負載預測和邊緣計算。本研究利用深 度學習演算法、配電網模擬軟體、Python 語言等工具,實現在饋線各邊緣端進行 負載預測、潮流解析、壓降與損失計算,以及最佳化饋線拓樸重構等技術,系統 架構圖如圖 32 所示。此方法可以免除大量資料回傳於饋線調路中心之伺服器, 在邊緣計算後將重要資料回傳即可,亦可結合邊緣端之環境監控設備,進行較準 確之負載預測。



圖 32 整合 FTU 與環控箱之配電網邊緣計算架構

(一) 含動態系統架構之邊緣負載計算

將饋線上所有 FTU 透過 TPU 整合,以通訊協定相互傳輸資料,可將其二路 或四路開關狀態以及量測負載告知有常開開關互連之鄰近饋線 FTU,如圖 33 所 示。那麼即可以第二節之第(二)小節之動態架構來進行精準負載分配。對於後續 之電力潮流解析、負載預測,以及最佳化重構演算法等,都能以較趨於實際的情 況考慮並進行演算。



圖 33 動態系統架構之邊緣負載計算示意圖

(二) TPU 電網建模解析損失與末端壓降

OpenDSS 是由美國電力研究所(Electric Power Research Institute, EPRI)在 2008 年所開放的免費模擬軟體[54][55],是一個全面性的電力網路系統模擬分析 工具,主要用於電力公司配電系統的研究與評估,廣泛應用在智慧電網的研究。 OpenDSS 適合用於多種不同的電力系統應用研究如多相交流電路分析、配電規 劃分析、年負載率和發電模擬、分散式資源併網分析、風力發電機規劃模擬,軟 體內建多種模組,如電力潮流分析、諧波、動態和故障分析等等。故本計畫選用 該軟體建立電力網路模型並執行電力潮流及短路故障分析。

相較於其他輸配電系統模擬軟體而言, OpenDSS 的主要特點如下:

- a) 以開放原始碼軟體(open-source)模式,在 SOURCEFORGE.NET 網站上分享。
- b)支援變動式負載(loadshape),藉由修改 loadshape,可應用於再生能源、儲能、 電動車充電等等分析。
- c) 動態模式可以產生干擾的模擬。
- d)可以建模任意配置的n相線,而不只是傳統的單相與三相。
- e) 可以建模任意相、任意繞組的變壓器, 而不只是傳統的雙繞組或三繞組而已。
- f)控制器可以由電路元件分別建模,用戶可以利用簡單的程式建立控制器,可應 用於測試配電自動化演算法與智慧電網。
- g)因應智慧電網的研究需求,提供電錶模型來進行模擬的監測。
- h) 複雜的電路可以輕易求解諧波模擬分析。

OpenDSS 有兩種執行方式,其一為獨立的執行程式,提供主模擬引擎(Main Simulation Engine)供使用者輸入程式(Scripts)後編譯、執行輸出結果(Scripts Result)。而此結果亦可寫回至使用者介面,供使用者做動態連結的分析。其二為 利用 COM Engine 設計為導向的模式,可支援跨平台整合應用程式,例如以 Matlab、 Excel、Python 和 VB 等,使用者可以開發動態連結程式庫(User Written DLLs) 呼叫 OpenDSS,透過 COM Interface 以動態連結方式進行整合協同計算、分析, 如圖 34 所示。



由於 OpenDSS 中的 COM(Component Object Model)是一種介面技術,僅在 微軟(Microsoft)的 Windows 作業系統外掛程式應用程式介面(Application Programming Interface, API),然而 TPU 是 Linux 系統,所以 COM Interface 無法 在 TPU 上運作,必須透過 CFFI 重新編譯 OpenDSS 原始碼,讓 OpenDSS 得以在 TPU 上執行,以下是安裝步驟:

- a) Step1:Build & install klusolve (Ver:legacy)
 - 1) \$ mkdir DSS_Extensions && cd DSS_Extensions
 - 2) \$ git clone https://github.com/dss-extensions/klusolve.git -b legacy
 - 3) \$ cd klusolve
 - 4) \$ mkdir build && cd build
 - 5) \$ cmake .. DUSE_SYSTEM_SUITESPARSE=OFF
 - 6) \$ cmake --build . --config Release or make -j4
 - 7) \$ copy ./klusolve/lib/linux_arm64/libklusolve.so to ./dss_capi/lib/linux_arm64
- b) Step2:Build dss_capi
 - In DSS_Extensions folder, git clone https://github.com/dss-extensions/dss_capi.git -b 0.10.x
 - 2) Rename folder dss capi to dss capi 0.10.x
 - 3) copy Step1's "klusolve" folder to dss_capi_0.10.x folder
 - 4) \$ cd dss_capi_0.10.x
 - 5) \$ export PATH="\$PATH:/home/haruka/fpc-3.2.0/bin"
 - 6) \$ bash build_linux_arm64.sh
 - 7) Go to ./dss_capi_0.10.x/release, extract dss_capi_linux_arm64.tar.gz, copy "dss_capi" folder to ./DSS_Extensions
- c) Step3:Build&Install dss_python
 - 1) \$ sudo apt-get install -y libffi-dev
 - 2) \$ pip install cffi
 - 3) Rename folder dss_python to dss_python_0.10.x
 - 4) In DSS_Extensions folder, git clone

https://github.com/dss-extensions/dss_python.git -b 0.10.x

5) \$ cd dss_python

6) \$ python setup.py build

7) \$ python setup.py install

8) \$ sudo gedit ~/.bashrc

9) Go to the last line, paste

LD_LIBRARY_PATH=/usr/local/lib/python3.6/dist-packages/dss_python-0.10.7

.post1-py3.6-linux-aarch64.egg/dss

(this path should be /usr/local/lib/python3.6/dist-packages/dss/)

source ~/.bashrc

d) copy "dss capi/lib/linux_arm64/libklusolve.so" to "/usr/local/lib" >

"/usr/local/lib64" 、 "/lib" 、 "/lib64", then run "sudo ldconfig".

安裝完成後,使用 IEEE 13 Node Test Feeder 測試 OpenDSS 在 TPU 是否能正 常運作和運算精度。圖 35 為測試程式碼。表 11 展示了 IEEE 13 Node Test Feeder 的運算結果,由結果可得知 OpenDSS 在 PC 與 TPU 上計算結果並無明顯差異。



圖 35 IEEE 13 Node Test Feeder 測試程式碼

表 11 PC(Windows)與 TPU(Linux)誤差值比較

	PC			TPU			error(%)		
Va(PU)	Vb(PU)	Vc(PU)	Va(PU)	Vb(PU)	Vc(PU)	Va(PU)	Vb(PU)	Vc(PU)	
0.99997518	0.99999785	0.99990421	0.99997518	0.99999785	0.99990421	0	0	0	
0.99988051	0.99998975	0.99989273	0.99988051	0.99998975	0.99989273	0	0	C	
1.05600291	1.04365417	1.0684573	1.05600291	1.04365417	1.0684573	0	0	C	
1.02988934	1.02488462	0.99554955	1.02988934	1.02488462	0.99554955	0	0	C	
1.00620757	1.00624632	0.97633813	1.00620757	1.00624632	0.97633813	0	0	C	
1.00813104	1.03529244	0.95326125	1.00813104	1.03529244	0.95326125	0	9.6514E-13	1.0482E-13	
1.00813103	1.01747798	0.9963174	1.00813103	1.01747798	0.9963174	0	0	C	
1.00175126	1.01570812	0.9942421	1.00175126	1.01570812	0.9942421	0	9.8375E-13	C	
1.0004633	1.03529244	0.95326124	1.0004633	1.03529244	0.95326124	0	9.8659E-13	1.0482E-13	
1.02872747	1.03774035	0.95104173	1.02872747	1.03774035	0.95104173	0	0	1.0506E-13	
1.03288097	1.02685616	0.94914202	1.03288097	1.02685616	0.94914202	-9.674E-13	0	1.0527E-13	
1.00813105	1.02679737	0.97875081	1.00813105	1.02679737	0.97875081	0	9.7312E-13	C	
1.00614578	1.03529246	0.99825368	1.00614578	1.03529246	0.99825368	0	0	1.0009E-13	
		0.95326126			0.95326126			1.0482E-13	
		0.95117296			0.95117296			1.0505E-13	

待 LSTM 預測完成後,即可以使用預測負載進行電力潮流解析,程式碼如 圖 36 所示,第8 行到第12 行會導入相關 dss 檔,在第13 行計算電力潮流,第 15 行到第20 行會輸出饋線電壓,第21 行到第25 行會輸出線路總損失,表12 與表13 分別為電池潮流解析結果之壓降與損失。



圖 36 電力潮流解析程式碼

Voltage drop (pu)							
Line	Phase A	Phase B	Phase C				
632-645	-0.0054	0.0266	-				
632-633	0.0030	0.0019	0.0027				
632-671	0.0315	-0.0114	0.0393				

表 12 IEEE 13 Node Test Feeder 電力潮流解析-壓降

633-634	0.0241	0.0186	0.0191
645-646	0.0017	0.0021	0.0000
671-680	0.0000	0.0000	0.0000
671-684	0.0019	0.0775	-
671-692	0.0000	0.0000	0.0000
684-611	0.0200	-	0.0000
684-652	0.0055	-	0.0000
692-675	0.0065	-0.0023	0.0019

Line Loss (W > var)						
Element	Total(W)	Total(var)				
Transformer.SUB	32.29	262.47				
Transformer.REG1	122.09	123.86				
Transformer.REG2	65.35	67.08				
Transformer.REG3	135.09	136.85				
Transformer.XFM1	5552.67	10096.27				
Capacitor.CAP1	0.00	-593487.50				
Capacitor.CAP2	0.00	-92455.57				
Line.650632	60737.64	196015.70				
Line.632670	12990.63	41494.51				
Line.670671	22728.76	72334.15				
Line.671680	0.00	-4.17				
Line.632633	824.49	1056.14				
Line.632645	2767.36	2400.77				
Line.645646	527.49	419.75				
Line.692675	4162.96	2419.34				
Line.671684	579.49	470.68				
Line.684611	382.40	387.35				
Line.684652	799.83	230.88				
Line.671692	0.01	0.00				

表 13 IEEE 13 Node Test Feeder 電力潮流解析-損失

(三)即時負載模型之最佳化饋線重組

本研究以長期紀錄之 FTU 負載資料與環境溫度、溼度、照度資料,以 LSTM 模型進行訓練,除了可以進行日前負載預測,亦在 TPU 上透過通訊協定取得 FTU 即時量測之負載資料以及環境監控箱之即時環境資料,進行即時負載預測。由於 預測與實際量測值可能有不可抗拒之差距,但趨勢應大致相似,故透過其兩者間 方均根誤差(Root-mean-square deviation, RMSE)修正,以符合實際情形,其架構 如圖 37 所示。各個邊緣運算單元可將預測之饋線即時負載回傳至伺服器,以供 其透過第一節所述之最佳化饋線重構演算法計算出當下運轉情形下最佳之饋線 拓樸,當有需要時饋線調度者將可參考其建議之重組方法,進行系統規劃上的調 整,無論是正常運轉情形或是故障轉供情形,皆可以在降低伺服器主機運算負擔 下,達到最快速的系統規劃。



圖 37 即時負載預測架構

參、主要發現與結論

一、 最佳化饋線重構模擬結果

(一) 模擬平台使用者介面

圖 38 為模擬平台架構圖,採用 Python 之 tkinter 套件開發使用者介面,在使 用者輸入參數後,透過 Python 對 OpenDSS 下指令執行最佳化饋線重構模擬分析。 圖 39 為本研究開發之區域配電網最佳化饋線重構模擬平台之使用者介面,其標 的系統為台電雲林區處之配電變電所(Distribution Substation, D/S)與二次變電所 (Secondary Substation, S/S)所轄之 11.4 kV 與 22.8 kV 低壓放射狀饋線,其電網拓 樸、元件、歷史負載等皆是由.set 與.sql 資料轉出。該平台可供使用者選擇式模 擬年分、月份、演算法種類及其參數、目標函數權重,並以文字視窗顯示當下模 擬的情況說明。



圖 38 模擬平台架構圖



圖 39 使用者介面

圖 40 為後台資料夾與檔案內容,其中包含執行檔 main.exe,各功能程式.py 檔,以及各資料夾。其中,演算法資料夾(Algorithm)存放 10 個群體優化演算法.py 檔,FTU 資料夾(Feeder Data)存放著由.sql 整體轉換出之歷史 FTU 電壓、電流資 料。圖 41 為電網資料夾(TPCdata)與檔案內容,其中包含了台電雲林區處共 23 座配電變電所與二次變電所電網模型。每個變電所資料夾內,則存放了由.set 檔 經程式自動轉出之 OpenDSS 腳本,其中包含主變壓器、線路、負載、分散式能 源、開關、座標等參數;以及再生能源(太陽光電與風力發電)與饋線負載曲線。 其中,饋線負載曲線是經 FTU 量測資料庫之.sql 檔取出歷史電壓、電流資料轉換 而成,再根據使用者選取的模擬時段與模擬方法,經程式整理後轉出。使用者在 選取"開始演算"後,程式將整理上述資料,然後透過演算法與 OpenDSS 引擎連 結,計算最佳化饋線重構之電力潮流解析。





圖 40 平台後台資料夾與檔案內容

圖 41 電網資料夾(TPCdata)與檔案內容

🔊 XA23.csv

🔊 XA24.csv

🔊 XA25.csv

🔊 XA26.csv

🔊 XA27.csv

🔊 XA28.csv 🗞 XA29.csv 🗞 XA30.csv 🛃 XA.png

饋線負載曲線

電網地圖

on XR

o XT XU

🛃 XW

🥑 XX

🛃 XZ

圖 42 為模擬結果輸出資料夾(result)內容,最佳化演算執行完成時將會儲存 於以變電所代號與系統時間命名之資料夾,輸出之內容包含重構後之電網地圖、 目標函數迭代收斂歷史過程、饋線重構前後之各饋線三相最大電流、最大中性電 流、線路損失,以及建議之開闢切換表、輸入紀錄與模擬輸出結果表,兩表的內

容如圖 43、圖 44,與圖 45 所示。其中,建議開闢切換表會將須操作之開闢以不 同顏色呈現,而中性電流超過 70A 者亦如是,以利平台使用。



圖 42 模擬結果輸出資料夾(result)內容

	А	В	С
1	開闢名稱	原始開闢狀態	建議開關狀態
1566	K2966EB92-J01	Close	Close
1567	K2966GB11-J01	Close	Close
1568	K2965AD06-F01	Close	Close
1569	K2866DA88-F01	Close	Open
1570	K2967EB50-J01	Close	Close
1571	K2965EC2524-J02	Close	Close
1572	K2866AC65-J01	Close	Close
1573	K2965EC2524-J04	Close	Close
1574	K2965CE43-J03	Close	Close
1575	K2965DC37-J01	Close	Close
1576	K2867HA60-J01	Close	Close
1577	K2965EC2524-J05	Close	Close
1578	K2766HA31-J04	Close	Close
1579	K2766HA31-J03	Close	Close
1580	K2965EC2524-J01	Close	Close
1581	K2967GC34-J01	Close	Close
1582	K2966HA36-J03	Close	Close
1583	K2965DE13-F01	Close	Close
1584	K2966GB8512-J1	Close	Close
1585	K2866GB07-J06	Close	Close
1586	K2965AD15-J02	Close	Close
1587	K2965AD15-J01	Close	Close
1588	K2965AD15-J04	Close	Close
1589	K2965AD15-J03	Close	Close
1590	K2865HC43-J01	Close	Close
1591	K2866ED80-J01	Close	Close
1592	K2965DD65-J01	Close	Close
1593	K2965EE2623-J04	Close	Close
1594	K2967GC82-J01	Close	Close
1595	K2965CE43-J06	Close	Close
1596	K2965CE43-J05	Close	Close
1597	K3166AA82-S06_NO	Open	Close
1598	K3066HA58-S06_NO	Open	Close
1599	K2966BC61-S01_NO	Open	Close
1600	K2765CA76-S01 NO	Open	Open

圖 43 建議開關切換表

	A	В	С	D	Е
1	最佳化目標	饋線重組			
2	目標變電所	西螺S/S (XC)			
3	模擬年份	2019年			
4	模擬月份	1月,2月,3月,4月,5月,6月	月,7月, 8月,	9月,10月,1	1月,12月
5	模擬時段	白天,夜晚,平日,假日			
б	演算法	改良灰狼演算法(EMG	WO)		
7	代理人數	100			
8	迭代次數	50			
9	目標函數權重				
10	降低總線路損失	0			
11	降低出口中性電流	0			
12	各饋線口電流均化	1			
13	降低開關切換次數	0			

圖 44 輸入紀錄表

	А	В	С	D	E	F	G
1	饋線名稱	線路損耗(kWh)		最大出口中性電	流(A)	最大出口電流(A))
2		改善前	改善後	改善前	改善後	改善前	改善後
3	XC21	110.6145081	266.3562646	11.28406811	24.04962349	97.49826813	148.2105408
4	XC22	129.2890321	335.9210877	28.65913963	17.03079987	129.0848694	161.6805115
5	XC23	284.6555673	286.5665753	25.50995255	26.29075813	164.473053	165.2773132
б	XC24	118.8054437	82.18850344	14.48921013	29.51037788	86.81855011	76.37814331
7	XC25	23.54157878	190.1230709	34.05369568	35.76979065	62.84695435	142.2032318
8	XC26	59.91789116	6.611958479	70.95145416	24.13650703	189.5702972	89.65330505
9	XC27	179.2796492	537.5139791	19.80765533	31.36959839	134.3231964	206.7106018
10	XC28	252.9919603	149.5744223	25.23086739	48.39569473	178.9224548	143.3348541
11	XC29	588.6760616	214.0515397	20.10148811	33.88856506	214.8787231	150.9210815
12	XC30	1200.067429	719.3692041	10.88273907	21.15366364	336.2935791	261.7016907
13	XC31	182.6123494	216.5009101	32.17605591	30.29384804	114.146492	121.1291351
14	XC32	355.5419776	452.9490168	10.75222588	25.21700287	128.9206543	131.8891144
15	XC33	430.6707494	468.8326512	19.55268097	24.05908012	148.6649017	161.6086578
16	XC34	21.75947714	21.80086106	27.65812492	27.72835922	75.90284729	76.02035522
17	XC35	198.3428829	202.3762228	8.677161217	13.0152607	153.53508	154.3431091
18	最大值	1200.067429	719.3692041	70.95145416	48.39569473	336.2935791	261.7016907
19	總和	4136.766557	4150.736268				
20							
21	開闢切換數	60					

圖 45 模擬輸出結果表

(二) 電網自動化建模

本研究依據台電雲林區處配電網於 SCADA 中轉出之.set 檔,建立 OpenDSS 之饋線模型,並透過 python 之 matplotlib 套件繪製電網地圖,圖 46 至圖 51 所示。 電網地圖不只呈現.set 檔之原始饋線拓樸,在最佳化饋線重構演算後亦會生成重 構後之電網地圖,如圖 42 所示,不同顏色區分之饋線可讓使用者利用電網地圖 與圖 43 之建議開關切換表相互參照,使得使用上更清楚直觀。電網地圖上灰色 線段為打開之線路開關,黃色圓形為分散式能源位置,並依據大小表示其裝置容 量, 白色方塊為變電所位置。



圖 46 電網地圖(XA、XB、XC、XD)



圖 47 電網地圖(XE、XF、XG、XH)



圖 48 電網地圖(XI、XJ、XK、XL)



圖 49 電網地圖(XM、XN、XO、XP)



圖 50 電網地圖(XQ、XR、XT、XU)



圖 51 電網地圖(XW、XX、XY)

配電饋線由於保護協調成本問題,一般採用放射狀規劃,饋線在重構前後均 需符合放射狀的條件,方可不影響保護協調策略。在饋線自動化建模以及重構演 算法,本研究利用 Python 讀取 OpenDSS 拓樸階層,在前章所述之重構演算法之 下,配合拓樸階層以判斷放射狀規則,以符合實際面之開關切換策略。



圖 52 OpenDSS 拓樸階層

另外,在大數據分析時,不良數據檢測(Bad data detection)為不可或缺的技術, 本系統之資料庫亦面臨不良數據之挑戰,其可能導致電力潮流解析無法收斂,或 是模擬結果失準等問題。以圖 53 之饋線 XD23 量測負載為例,其中有數筆明顯 不合理之數據,自動饋線建模程式將利用統計學上之 Z 分數 (Standard Score, 又稱 Z-score)篩選之,如式(59),其中 X 為各點數據、μ 為平均值、σ 為標準 差。 Z>3 之數據將會被移除,再將負載標么化後,則可得到圖 54 之負載模型。

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \tag{59}$$

圖 55 為饋線 XD24 量測負載,其中疑似有饋線轉供情形,在正常運轉情況 下不考慮,同理可利用 Z 分數來修正之,如圖 56 所示。饋線負載為空值之時間 點,將取交集後再執行最佳化演算,以符合實際運轉情形。



圖 55 饋線 XD24 量測之負載資料



(三) 最佳化饋線重構提高再生能源併網裕度結果

就台電而言,配電饋線可併入每單位 500 kW 之再生能源,其併網裕度取決 於電壓變動率、逆送電流,以及饋線負載等因素。若饋線負載分布不均,重載饋 線中後段之電壓變動率較高,輕載饋線之逆送電流過大,都可能降低再生能源併 網裕度。本研究以饋線重構均化各饋線電流,以達到提高再生能源併網裕度之效 果,假設各饋線最大電流為式(60),目標函數以各饋線三相最大電流之變異數 (Variance),如式(61)所示。

$$I_j = I_1, I_2, \dots, I_n$$
 (60)

$$F_{obj} = \frac{\sum_{j=1}^{n} (I_j - I_{\mu})^2}{n}$$
(61)

其中 n 為饋線個數, I_{μ} 為其三均值(Trimean), 如(62), $Q_1 \times Q_2 \times Q_3$ 為其 3 個四分位數(Quartile)。

$$I_{\mu} = \frac{Q_1 + 2Q_2 + Q_3}{4} \tag{62}$$

本報告以雲林橋村變電所(XE S/S)為例,在本研究開發之饋線重構平台,以 各饋線口電流均化為目標,對其進行最佳化模擬,平台輸入參數如圖 57 所示。

最佳化目標	饋線重組			
目標變電所	橋村S/S (XE)			
模擬年份	2019年			
模擬月份	1月,2月,3月,4月,5月,6月	月,7月,8月 ,	,9月,10月,1	1月,12月
模擬時段	白天,夜晚,平日,假日			
演算法	灰狼演算法(GWO)			
代理人數	100			
迭代次數	100			
目標函數權重				
降低總線路損失	0			
降低出口中性電流	0			
各饋線口電流均化	1			
降低開關切換次數	0			

圖 57 模擬輸入參數

圖 58 為灰狼演算法之迭代歷史紀錄,目標函數為式(61)於重構前後之比值。 各饋線最大電流之變異數由 49.97 A 降至 25.97 A,模擬輸出結果如圖 59 所示。



圖 58 目標函數迭代歷史紀錄

饋線名稱	線路損耗(kWh)		最大出口中性電	流(A)	最大出口電流(A))
	改善前	改善後	改善前	改善後	改善前	改善後
XE21	72.18	266.24	26.61	27.73	59.49	99.03
XE22	80.01	80.25	3.8	3.81	75.33	75.43
XE23	127.09	127.44	17.69	17.7	103.67	103.85
XE24	7.23	7.25	17.27	17.31	62.89	62.99
XE25	39.52	190.41	14.12	24.24	41.62	115.11
XE31	168.72	304.5	9.94	25.55	97.24	132.89
XE32	342.15	231.31	40.8	30.06	168.39	130.28
XE33	154.55	233.92	26.32	29.2	129.27	134.35
XE34	35.03	35.03	10.72	10.68	66.59	66.61
XE35	149.2	149.24	16.3	16.32	112.45	112.47
XE26	26.53	26.46	10.84	10.84	62.19	62.08
XE27	733.87	332.67	24.51	17.27	206.28	131.64
XE28	300.09	144.75	24.1	26.5	144.01	106.21
XE29	182.24	152.41	26.73	27.53	141.02	122.8
XE30	334.81	334.21	32.43	32.34	127.07	126.9
最大值	733.87	334.21	40.8	32.34	206.28	134.35
總和	2753.22	2616.08				
開關切換數	16					

圖 59 模擬輸出結果

橋村變電所重構前後之各饋線三相最大電流,由其最大值由原本的206A下 降至134A,最小值由原本的41A上升至62A,變異數亦改善了24A,各饋線 負載相較原本更為平均。重構前後之各饋線線路總損失,其最大值由733 kWh 下降至 334 kWh,總和由 2753 kWh 下降至 2616 kWh,由於線路損耗與電流的平 方成正比,故電流均化後線路損耗也會降低,尤其是饋線 XE27,由於最大電流 下降了約 75 A,其損耗改善量最是可觀。重構前後之各饋線出口最大中性電流, 雖然中性線電流與三相平衡有關,此次模擬亦無將中性線電流選為目標函數,但 由於三相最不平衡的饋線 XE32 電流下降了大約 8 A,故最大中性線電流從。圖 60 (同圖 47 左上)與圖 61 分別為本次最佳化模擬前後之電網地圖,使用者除了利 用建議開關切換表,亦可利用兩圖觀察演算前後之差異。



圖 60 饋線重構前拓樸



圖 61 饋線重構後拓樸
二、 整合動態系統架構與饋線簡化測試結果

(一) 饋線簡化測試結果

本研究以圖 62 之範例饋線模型作為饋線簡化之標的,以測試前章推導之饋線簡化公式,該饋線長度共 12190 m,淨負載為 1010 kW。圖 63 為透過壓降簡 化模型簡化後之饋線單線圖,表 14 為饋線簡化前後之母線電壓,其末端電壓分 別為 0.98267 pu 與 0.98257 pu,其誤差僅為 0.01017%。



圖 63 壓降簡化模型單線圖

表 14 壓降模型於饋線簡化前後之母線電壓

原始	模型	壓降簡化模型				
母線編號	電壓(pu)	母線編號	電壓(pu)			
D/S	0.99706	D/S	0.99702			
Bus1	0.99584	Bus1	0.98257			
Bus2	0.98674					
Bus3	0.98358					
Bus4	0.98267					

圖 64 為透過線損簡化模型簡化後之饋線單線圖,表 15 為饋線簡化前後之線 路損失,其總線路損失分別為 6216.07 W+j16477.00 var 與 0.619 W+j16.413 var, 以是在功率來看其誤差僅為 0.38892%。



圖 64 線損簡化模型單線圖

	原始模型		線損簡化模型				
線路起迄	線損(W)	線損(var)	線路起迄	線損(kW)	線損(kvar)		
D/S-Bus1	728.04	1929.81	D/S-Bus1	0.619	16.413		
Bus1-Bus2	4549.15	12058.47					
Bus2-Bus3	834.98	2213.29					
Bus3-Bus4	103.91	275.43					
總損耗	0.622	16.477					

表 15 線損模型於饋線簡化前後之線路損失

壓降模型與線損模型在負載集中計算得到之饋線長度分別為7224m與5184 m,比原始饋線之總長度12190m短許多。這是由於負載電流I集中,在相同的 線路阻抗Z下,對於電壓降V=IZ影響較大,故推導出之等效線路長度需較短 才可計算出相同之電壓降;而電流集中對於線路損失S_{loss}=I²Z則影響更鉅,故 線損模型之等效線路長度相較壓降模型來的更短。此概念也可套用在前一節饋線 重構均化演算法,電流較均勻的配電網其平均電壓降與總線路損失必定會比均化 前來的低,除了有益於負載管理、負載轉供,亦會改善再生能源併網裕度。 圖 65 為透過混合壓降-線損簡化模型簡化後之饋線單線圖,兩條線路等效長 度分別為 3772 m 與 8424 m,總長度為 12196 m;兩個等效負載分別為 595.5 kW 與 414.1 kW,總負載為 1009.6 kW。由於同時考慮壓降與線損,其等效總長度與 總負載與原始饋線相近。表 16 與表 17 分別為饋線簡化前後之母線電壓與線路損 失,末端電壓分別為 0.98267 pu 與 0.98268 pu,其誤差僅為 0.001017%;其總線 路損失分別為 6.216 W + j16.477 var 與 6.211 W + j1.6464 var,以是在功率來看其 誤差僅為 0.081926%。無論是壓降與線損的表現,混合模型都達到比各別壓降與 各別損失模型較低的誤差。



圖 65 混合壓降-線損簡化模型單線圖

原始	模型	壓降簡化模型				
母線編號	電壓(pu)	母線編號	電壓(pu)			
D/S	0.99706	D/S	0.99706			
Bus1	0.99584	Bus1	0.98955			
Bus2	0.98674	Bus2	0.98268			
Bus3	0.98358					
Bus4	0.98267					

表 16 混合壓降-線損模型於饋線簡化前後之母線電壓

表 17 混合壓降-線損模型於饋線簡化前後之線路損失

	原始模型		線損簡化模型				
線路起迄	線損(kW)	線損(kvar)	線路起迄	線損(kW)	線損(kvar)		
D/S-Bus1	0.728	1.930	D/S-Bus1	4.506	11.943		
Bus1-Bus2	4.549	12.058	Bus1-Bus2	1.705	4.520		
Bus2-Bus3	0.835	2.213	總損耗	6.211	16.464		
Bus3-Bus4	0.104	0.275					
總損耗	6.216	16.477					

(二) 動態架構下之饋線簡化測試結果

在大規模的電網重構演算法中,為了加速模擬時間而使用饋線簡化模型,但 由於饋線拓樸在演算過程中不斷變化,故饋線簡化模型亦須考慮動態架構下的拓 樸與負載。本研究以圖 66 為範例之範例雙端饋線模型進行動態架構下之饋線簡 化計算,其中變電所A與變電所B所轄饋線間有著長開聯絡開關 N.O.,以下呈 現在 N.O.閉合後所有饋線轉供至變電所A 或變電所B,以壓降模型、線損模型, 以及混合壓降-線損模型簡化饋線拓樸之數值結果,如表 18 所示,而圖 67 為其 簡化單線圖,可看出如同前一節之結果,其損失與線損均可近似原始模型,在未 來擴大規模之饋線重構演算法中可以簡化模型大幅降低運算時間。



圖 66 範例雙端饋線模型單線圖

數值結果	末端電壓	總實功線損	總虛功線損					
簡化模型	(pu)	(kW)	(kvar)					
(常開點 NO 閉合,變電所 B 之饋線轉供至變電所 A)								
原始模型	0.94425	39.258	101.413					
雙端壓降與線損模型	0.94423	39.934	105.854					
雙端混合模型	0.94517	39.879	105.709					
(常開點 NO 閉台	合,變電所A之饋	員線轉供至變電所	B)					
原始模型	0.95621	30.201	80.056					
雙端壓降與線損模型	0.95536	29.747	78.852					
雙端混合模型	0.95628	29.970	79.443					

表18 動態雙端饋線簡化模型之數值結果



圖 67 動態架構之簡化饋線單線圖

三、 TPU 之 FTU 長短期負載預測與電網潮流解析結果

本研究透過氣象資料與FTU歷史負載資料進行長期(日前)負載預測,並透過 TPU 與整合FTU 與環境監控箱,進行短期(即時)負載預測。預測方法使用前章 所述之機器學習長短期記憶法LSTM,並將台電電網模型建置於TPU,以負載預 測結果進行電力潮流解析。

(一) 長期預測結果

本研究以台電濁水二次變電所所轄饋線之 FTU 歷史負載與中央氣象局林內 測站資料,進行長期之日前負載預測,圖 68 至圖 72 為五條饋線 XM21、XM22、 XM23、XM24、XM25 於 2020 年 4 月 18 日之三相饋線負載預測。LSTM 訓練模 型參數如表 19 所示,表 20 為負載預測與實際值之誤差,誤差估測方式以 RMSE 計算,如式(63)所示。由於饋線負載均以其尖峰標么化,故誤差估算上會顯得較 小。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}}$$
(63)

其中,N為預測資料筆數, xi 為預測負載資料,xi 為實際負載資料。

表 19 LSTM 模訓練型參數

訓練輸入	訓練輸出	疊代次對
張量維度	矩陣維度	
6552x24x21	24x7	15

表 20 日前負載預測誤差分析

A 相	B 相	C 相	訓練速度
2.891%	2.60%	2.532%	165575 sec



圖 68 饋線 XM21 負載日前預測結果



圖 69 饋線 XM22 負載日前預測結果



圖 70 饋線 XM23 負載日前預測結果



圖 71 饋線 XM24 負載日前預測結果



圖 72 饋線 XM25 負載日前預測結果

(二) 短期預測結果

圖 73 為 FTU 於 2021 年 12 月 1 日之三相饋線負載預測,採用 FTU 與環境 監控箱所量測之三相負載、溫度、濕度、照度資料作為訓練模型輸入,並以五分 鐘為週期進行負載預測,再經由其 RMSE 修正。LSTM 訓練模型參數如表 21 所 示,表 22 為負載預測與實際值之 RMSE 誤差。

表 21 LSTM 訓練模型參數

訓練輸入	訓練輸出	疊代次數
張量維度	矩陣維度	
84x12x21	12x1	15

表 22 即時負載預測誤差分析

A 相	B 相	C 相	訓練速度
4.445%	4.206%	5.113%	634 sec



圖 73 FTU 負載日前預測結果

(三) 邊緣計算單元電網模型與電力潮流解析

本計畫於 arm 架構 TPU 之作業系統 ubuntu 18.04 執行 OpenDSS 之電力潮流 解析,於第貳章之第四(二)節測試與一般 CPU 電腦之作業系統 windows 10 其結 果無異,確認其可行性,再於 TPU 建置台電雲林變電所模型並執行潮流解析, 以濁水(XM)變電所為例,執行畫面如圖 74。圖 75 為其繪製之電網地圖(同圖 49 左上),而潮流解析之母線電壓與線路損失如圖 76 與圖 77 所示。



圖 74 TPU 潮流解析之環境介面



圖 75 濁水(XM)變電所電網地圖





圖 77 濁水(XM)變電所線路損失

四、結論

本計畫依據所擬定目標與工作項目。首先,廣泛蒐集並彙整有關配電網之最 佳化重構與人工智慧、群體智慧等最佳化演算法方法用以提高區域配電網運轉效 能之相關文獻,作為本計畫立論參考依據;其次,以 Python 程式語言為基礎建 立一套區域電網最佳化饋線拓樸重構平台與使用者介面,其透過台電雲林區處二 次變電所與配電變電所之拓樸資料、FTU 歷史負載資料,自動化建立 OpenDSS 電網模型;並透過所開發之通用饋線重構演算法與群體智慧演算法,達到以使用 者導向之最佳化饋線重構,並可輸出產生相關結果與開關建議報表。其次,為了 在精準計算FTU所轄區域負載分配,本研究亦提出了動態架構之負載計算方法, 並可透過邊緣計算單元達到更貼近現況之負載計算。另外,為了在未再可擴大區 域分析,本計畫推導並驗證饋線簡化模型,使其在電壓降與線路損失表現與原始 模型相近。

另一方面,本計畫提出以邊緣計算單元 TPU 整合 FTU 與環境監控箱,透過 DNP3 與 Modbus 通訊協定傳輸資料並儲存至本地資料庫。除了可進行長期之日 前負載預測,亦可透過即時環境與負載資料進行短期之即時負載預測,達到每5 分鐘之 FTU 所轄區域負載預測,並進行邊緣電力潮流解析,可將其資訊傳送至 調度中心主機,進行最佳化饋線重構等演算,除了可較精準得到區域預測之負載, 亦降低了主機的運算負擔。

表 23 為本計畫擬定之預定進度甘梯圖與工作項目,已依照進度完成,並建 立一自動化最佳饋線重組平台與使用者介面,以及結合邊緣計算單元於饋線終端 設備,本計畫研究成果除了可以強化變電所與饋線自動化功能外,亦可整合至負 載長短期預測應用之相關研究。

85

表 23 本計畫執行甘特圖

月工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
蒐集與彙整國內												
外配電最佳化配												
置與負載預測相												
關文獻與技術資												
料。												
完成標的配電網												
元件參數、負載與												
再生能源等資料												
蒐集、統計與分												
析。												
推導 FTU 所轄區												
域饋線段含再生			×.									
能源與負載之雙			~~									
端饋線簡化模型。												
建立 FTU 歷史資												
料之動態系統架												
構精進負載計算												
演算法與程式模												
組。												
整合動態系統架												
構負載計算模式												
於饋線簡化模												
型,並完成測試與												
驗證。												
建立提高饋線再												
生能源併網裕度												
之最佳化重構程						Ж						
式,以分配饋線再												
生能源發電。												
建立自動化饋線												
重構模擬平台與												
使用者介面。												
完成張量處理器												
(Tenser Processing												
Unit, TPU)與饋線												
終端設備(Feeder									*			
Terminal Unit,												
FIU) 通訊連線測												
試,並將 FTU 量												

測資料存取至												
SQLite 資料庫。												
完成以邊緣計算												
單元實現精準動												
態架構負載計算。												
匯入氣象與 FTU												
資料,建立長短期												
負載預測程式。												
於 TPU 建立區域												
電網電路模型及												
電力潮流解析,以												
計算區域電網損												
失及末端壓降。												
建立以邊緣計算												
單元建立區域饋												
線段電力潮流解												
析電網模型。												
以邊緣計算單元												
解析之動態即時												
負載模型進行最												
佳化饋線重組模												
擬驗證。												
研究成果彙整與												×.
與期末報告撰寫。												~
工作進度估計百							600 (o - o /	a - a /	
分比(累積數)	10%	20%	30%	40%	45%	50%	60%	70%	80%	85%	95%	100%
	第 1	季:尝	E 成 F	L TU éfi	· 誆 區	域饋約	自野全	再生自	上源的	自載	之能站	皆能。
	簡化相	莫型推	. 導。	, ,				···				0.020.01-
	第23	<u>× 二 ;</u> 季:字	成提	高饋編	2.再生	能源住	并網裕	唐之	最佳化	重構	程式。	, ,
預定查核點	始了。	, <u>,</u> 未・	<u>-</u> - - у тр	II da I		3-11-15	伯田	<u><u> </u></u>			山次小	ーちも
	あ 2 ℃	ヂ・元 Ⅵ はっ =	成 IP 冬料 庄	∪與」	FIU 1	也訊理		武'亚	「府□	∪ 重	测 頁形	†仔収
	王 SQ		117件/理	· ۲	· 四 -	日儿,	1 加 小	チル	しょき 11-2 まり	444		
	弟 4 3	孚・完	成邊	隊計算	-甲兀	取佳亻	匕饋線	重組	 擬 			

肆、參考文獻

- [1]. S. Ahmadi, V. Vahidinasab, M. S. Ghazizadeh, K. Mehran, D. Giaouris and P. Taylor, "Co-optimising distribution network adequacy and security by simultaneous utilisation of network reconfiguration and distributed energy resources," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 13, no. 20, pp. 4747-4755, 22 10 2019, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.0824.
- [2]. Z. Yin, X. Ji, Y. Zhang, Q. Liu and X. Bai, "Data-driven approach for real-time distribution network reconfiguration," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 14, no. 13, pp. 2450-2463, 3 7 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1733.
- [3]. Z. Li, W. Wu, B. Zhang and X. Tai, "Analytical Reliability Assessment Method for Complex Distribution Networks Considering Post-Fault Network Reconfiguration," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 35, no. 2, pp. 1457-1467, March 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2936543.
- [4]. M. A. Muhammad, H. Mokhlis, K. Naidu, A. Amin, J. F. Franco and M. Othman, "Distribution Network Planning Enhancement via Network Reconfiguration and DG Integration Using Dataset Approach and Water Cycle Algorithm," in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 8, no. 1, pp. 86-93, January 2020, doi: 10.35833/MPCE.2018.000503.
- [5]. Q. Chen, W. Wang, H. Wang, J. Wu, X. Li and J. Lan, "A Social Beetle Swarm Algorithm Based on Grey Target Decision-Making for a Multiobjective Distribution Network Reconfiguration Considering Partition of Time Intervals," in IEEE Access, vol. 8, pp. 204987-205013, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3036898.
- [6]. H. R. Esmaeilian and R. Fadaeinedjad, "Energy Loss Minimization in Distribution Systems Utilizing an Enhanced Reconfiguration Method Integrating Distributed Generation," in IEEE Systems Journal, vol. 9, no. 4, pp. 1430-1439, Dec. 2015, doi: 10.1109/JSYST.2014.2341579.
- [7]. Y. Gao, W. Wang, J. Shi and N. Yu, "Batch-Constrained Reinforcement Learning for Dynamic Distribution Network Reconfiguration," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 6, pp. 5357-5369, Nov. 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.3005270.
- [8]. F. Ding and K. A. Loparo, "Hierarchical Decentralized Network Reconfiguration for Smart Distribution Systems—Part I: Problem Formulation and Algorithm Development," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 2, pp. 734-743, March 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2337260.
- [9]. F. Ding and K. A. Loparo, "Hierarchical Decentralized Network Reconfiguration

for Smart Distribution Systems—Part II: Applications to Test Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 2, pp. 744-752, March 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2337280.

- [10]. Huating Xu, Zhihong Yu, Jinxiu Hou, Yawei Wei, et al., "Deep Reinforcement Learning-Based Tie-Line Power Adjustment Method for Power System Operation State Calculation" IEEE Access, Vol. 7, pp. 156160-156174, 2019.
- [11]. Mohammad Amin Heidari, "Optimal network reconfiguration in distribution system for loss reduction and voltage-profile improvement using hybrid algorithm of PSO and ACO" CIRED - Open Access Proceedings Journal, Vol. 2017, Iss. 1, pp. 2458–2461, 2017.
- [12]. 吳家駿,應用免疫算法於配電系統運轉策略之研究,碩士論文,國立中山大學電機工程學系,高雄,2001年。.
- [13].P. Hasanpor Divshali and L. Söder, "Improving Hosting Capacity of Rooftop PVs by Quadratic Control of an LV-Central BSS," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 1, pp. 919-927, Jan. 2019, doi: 10.1109/TSG.2017.2754943.
- [14].J. F. B. Sousa, C. L. T. Borges and J. Mitra, "PV hosting capacity of LV distribution networks using smart inverters and storage systems: a practical margin," in IET Renewable Power Generation, vol. 14, no. 8, pp. 1332-1339, 8 6 2020, doi: 10.1049/iet-rpg.2019.1054.
- [15].S. Lakshmi and S. Ganguly, "Simultaneous optimisation of photovoltaic hosting capacity and energy loss of radial distribution networks with open unified power quality conditioner allocation," in IET Renewable Power Generation, vol. 12, no. 12, pp. 1382-1389, 10 9 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5389.
- [16].P. H. Divshali and L. Söder, "Improving PV Dynamic Hosting Capacity Using Adaptive Controller for STATCOMs," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 34, no. 1, pp. 415-425, March 2019, doi: 10.1109/TEC.2018.2873057.
- [17].S. M. Ismael, S. H. E. Abdel Aleem, A. Y. Abdelaziz and A. F. Zobaa, "Practical Considerations for Optimal Conductor Reinforcement and Hosting Capacity Enhancement in Radial Distribution Systems," in IEEE Access, vol. 6, pp. 27268-27277, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2835165.
- [18].F. Capitanescu, L. F. Ochoa, H. Margossian and N. D. Hatziargyriou, "Assessing the Potential of Network Reconfiguration to Improve Distributed Generation Hosting Capacity in Active Distribution Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 1, pp. 346-356, Jan. 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2320895.
- [19]. Y. Fu and H. Chiang, "Toward Optimal Multiperiod Network Reconfiguration

for Increasing the Hosting Capacity of Distribution Networks," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 5, pp. 2294-2304, Oct. 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2801332.

- [20].J. Xiao, Y. Li, X. Qiao, Y. Tan, Y. Cao and L. Jiang, "Enhancing Hosting Capacity of Uncertain and Correlated Wind Power in Distribution Network With ANM Strategies," in IEEE Access, vol. 8, pp. 189115-189128, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3030705.
- [21]. D. Jakus, R. Čađenović, J. Vasilj and P. Sarajčev, "Maximizing distribution network hosting capacity through optimal network reconfiguration," 2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM), Ljubljana, Slovenia, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/EEM.2019.8916230.
- [22].R. A. Jacob and J. Zhang, "Distribution Network Reconfiguration to Increase Photovoltaic Hosting Capacity," 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Montreal, QC, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281922.
- [23]. Y. Takenobu, S. Kawano, Y. Hayashi, N. Yasuda and S. Minato, "Maximizing hosting capacity of distributed generation by network reconfiguration in distribution system," 2016 Power Systems Computation Conference (PSCC), Genoa, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/PSCC.2016.7540965.
- [24].M. Alturki and A. Khodaei, "Increasing Distribution Grid Hosting Capacity through Optimal Network Reconfiguration," 2018 North American Power Symposium (NAPS), Fargo, ND, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/NAPS.2018.8600645.
- [25].R. Torquato, D. Salles, C. Oriente Pereira, P. C. M. Meira and W. Freitas, "A Comprehensive Assessment of PV Hosting Capacity on Low-Voltage Distribution Systems," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 2, pp. 1002-1012, April 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2798707.
- [26].H. Al-Saadi, R. Zivanovic and S. F. Al-Sarawi, "Probabilistic Hosting Capacity for Active Distribution Networks," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 13, no. 5, pp. 2519-2532, Oct. 2017, doi: 10.1109/TII.2017.2698505.
- [27].M. S. S. Abad, J. Ma, D. Zhang, A. S. Ahmadyar and H. Marzooghi, "Probabilistic Assessment of Hosting Capacity in Radial Distribution Systems," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 9, no. 4, pp. 1935-1947, Oct. 2018, doi: 10.1109/TSTE.2018.2819201.
- [28].F. Ebe, B. Idlbi, J. Morris, G. Heilscher and F. Meier, "Evaluation of PV hosting capacities of distribution grids with utilisation of solar roof potential analyses," in CIRED - Open Access Proceedings Journal, vol. 2017, no. 1, pp. 2265-2269,

10 2017, doi: 10.1049/oap-cired.2017.0848.

- [29].S. Wang, S. Chen, L. Ge and L. Wu, "Distributed Generation Hosting Capacity Evaluation for Distribution Systems Considering the Robust Optimal Operation of OLTC and SVC," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 3, pp. 1111-1123, July 2016, doi: 10.1109/TSTE.2016.2529627.
- [30]. A. Arshad and M. Lehtonen, "A Stochastic Assessment of PV Hosting Capacity Enhancement in Distribution Network Utilizing Voltage Support Techniques," in IEEE Access, vol. 7, pp. 46461-46471, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2908725.
- [31]. Y. Wang, Q. Chen, N. Zhang and Y. Wang, "Conditional Residual Modeling for Probabilistic Load Forecasting," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 7327-7330, Nov. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2868167.
- [32].S. E. Razavi, A. Arefi, G. Ledwich, G. Nourbakhsh, D. B. Smith and M. Minakshi, "From Load to Net Energy Forecasting: Short-Term Residential Forecasting for the Blend of Load and PV Behind the Meter," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 224343-224353, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3044307.
- [33].B. Liu, J. Nowotarski, T. Hong and R. Weron, "Probabilistic Load Forecasting via Quantile Regression Averaging on Sister Forecasts," in *IEEE Transactions* on Smart Grid, vol. 8, no. 2, pp. 730-737, March 2017, doi: 10.1109/TSG.2015.2437877.
- [34].J. Xie, T. Hong and J. Stroud, "Long-Term Retail Energy Forecasting With Consideration of Residential Customer Attrition," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2245-2252, Sept. 2015, doi: 10.1109/TSG.2014.2388078.
- [35].Y. Wang, Q. Xia and C. Kang, "Secondary Forecasting Based on Deviation Analysis for Short-Term Load Forecasting," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 500-507, May 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2052638.
- [36]. K. Methaprayoon, W. Lee, S. Rasmiddatta, J. R. Liao and R. J. Ross, "Multistage Artificial Neural Network Short-Term Load Forecasting Engine With Front-End Weather Forecast," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 6, pp. 1410-1416, Nov.-dec. 2007, doi: 10.1109/TIA.2007.908190.
- [37]. C. Feng, M. Sun and J. Zhang, "Reinforced Deterministic and Probabilistic Load Forecasting via Q-Learning Dynamic Model Selection," in *IEEE Transactions* on Smart Grid, vol. 11, no. 2, pp. 1377-1386, March 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2937338.
- [38].J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization" Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, pp. 1942-1948, 1995.

- [39].S. Mirjalilia, S. M. Mirjalilib, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," Advances in Engineering Software, vol. 69, pp. 46-61, March 2014.
- [40].X. S.Yang, "A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm" Studies in Computational Intelligence, Vol. 284, pp. 65-74, 2010.
- [41]. D. Karaboga, "An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization" Technical report, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer, 2005.
- [42].X.-S. Yang; S. Deb (December 2009). Cuckoo search via Lévy flights. World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC 2009). IEEE Publications. pp. 210–214.
- [43]. S.-C Chu, P.-W. Tsai, J.-S. Pan, "Cat Swarm Optimization," PRICAI 2006, LNAI 4099, pp. 854–858, 2006.
- [44].X. S. Yang, "Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms". Luniver Press, UK, 2008.
- [45].B. Zeng, L. Gao, and X.-Y. Li, "Whale swarm algorithm for function optimization," ICIC 2017: Intelligent Computing Theories and Application, pp. 624-639, 2017.
- [46]. E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, and S. Saryazdi, "GSA: A Gravitational Search Algorithm," Information Sciences, vol. 179, no. 13, pp. 2232-2248, June 2009.
- [47]. T. Tan, Y. Zhu, "Fireworks algorithm for optimization," International Conference in Swarm Intelligence, 2010.
- [48].DNP Overview of the DNP3 Protocol DNP.org, [Online], Available: http://www.dup.org. [Accessed 6 June 2015].
- [49]. "IEEE Standard for Electric Power Systems Communications-Distributed Network Protocol (DNP3)," in IEEE Std 1815-2012 (Revision of IEEE Std 1815-2010) , vol., no., pp.1-821, 10 Oct. 2012, doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6327578.
- [50].陳韶羽,整合 DNP3與 Modbus 協定實現電力系統監控,國立臺北科技大學 自動化科技研究所,碩士論文,台北市,2015年。
- [51].S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long Short-Term Memory," Neural Computation, vol. 9, no. 8. doi: 10.1162/neco.1997.9.8.1735. pp. 1735-1780, 1997.
- [52]. J. Ospina, A. Newaz, and M. O. Faruque, "Forecasting of PV plant output using hybrid wavelet-based LSTM-DNN structure model," IET Renewable Power Generation, vol. 13, no. 7. doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5779. pp. 1087-1095, 2019.
- [53].J. Brownlee, Long Short-term Memory Networks with Python: Develop Sequence Prediction Models with Deep Learning. 2017.
- [54].R. C. Dugan, Thomas E. McDermott, "An Open Source Platform for Collaborating on Smart Grid Research," 2011 IEEE Power and Energy Society

General Meeting, 24-29 July 2011, pp. 1-7.

[55].D. Montenegro, M. Hernandez, G. A. Ramos, "Real time OpenDSS framework for distribution systems simulation and analysis," 2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 3-5 Sept. 2012, pp. 1-5.