

行政院原子能委員會核能研究所

委託研究計畫研究報告

優化饋線開關長期操作序列之研究

**Study on Optimizing the Long-term Operation Sequence of Feeder
Switch**

計畫編號：111A009

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 111 年 2 月至 111 年 12 月

研究經費：新臺幣 95 萬

核研所聯絡人員：蔡佳豪

報告日期：111 年 12 月 08 日

目 錄

目 錄 I

中文摘要	2
英文摘要	3
壹、 計畫緣起與目的	4
一、 計畫緣起.....	4
二、 計畫目的.....	9
三、 文獻探討.....	11
貳、 研究方法與過程	14
一、 饋線開關長期操作策略	14
(一) 饋線開關長期操作策略以提高再生能源併網容量.....	14
(二) 擴大分析範圍之饋線開關配置演算法.....	19
二、 饋線開關長期操作序列策略	20
(一) 電力系統模擬軟體開關切換序列功能及測試.....	20
(二) 饋線開關操作序列策略降低對電網之衝擊.....	26
三、 區域配電網之主饋線最佳淨負載平衡演算法	27
參、 主要發現與結論	29
一、 整合區域配電網最佳化開關操作與淨負載平衡策略演算平台與使用者 介面.....	29
二、 模擬數值結果	34
(一) 饋線開關長期操作序列模擬結果.....	34
(二) 最佳淨負載平衡模擬結果.....	35
三、 結論.....	41
肆、 參考文獻.....	43

中文摘要

本計畫建立一套擴大區域範圍之配電網長期開關操作及其序列與三相淨負載平衡最佳化模擬平台，目的為利用操作開關調整饋線拓樸架構以提升區域最大再生能源併網容量，以及利用調整分歧線與主幹線變壓器抽接點相別以達三相淨負載平衡之效果。開關操作與三相淨負載平衡分別為電網運轉規劃上的一項技術，本計畫亦將整合兩技術並探討其對於電網性能如最大再生能源併網容量、線路損失、負載平衡、中性電流等之改善效果。另外，在最佳開關操作技術中，其操作序列亦為一重要的議題。在多個開關操作的排列組合下，找出其優先順序，除了可避免開關兩側過大的電流或相位角差距造成的衝擊，對於電網規劃人員亦可較具系統性的安排作業。故本研究在進行最佳化長期開關操作演算後，將再推導最佳開關操作序列，以提供完善的運轉規劃建議。本計畫擬將台電區域電網資料以及歷史負載資料透過 Python 語言自動轉檔為配電系統模擬軟體 OpenDSS 腳本，搭配高性能之群體智能演算法推導最佳開關操作序列與三相淨負載平衡之策略。並且開發具使用者介面之模擬平台整合上述功能，依據不同需求提供各情境下之運轉規劃建議。

英文摘要

This project aims to establish a wide range regional distribution networks (DNs) optimal simulation platform for long-term operation sequence of feeder switch and three-phase net-load balancing. The objective is to raise the maximum hosting capacity (HC) using operation of switch; and to improve three-phase unbalance by rearranging the phase of the laterals and the distribution transformers on feeder main. Both of switch operation and three-phase load balance are the techniques on DN planning. In this project, both of the techniques will be integrated and study how they improve the maximum HC, conductor loss, load balance, neutral current, etc. Moreover, on the switch operation planning, the operation sequence of them is also an important issue. Under the arrangement and combination of multiple switch operations, figuring out the priority order can not only avoid the impact caused by the high difference of currents or phase angle between both terminals of the switch, but can provide a more systematic strategy for the DN system operators. Therefore, after conducting the switch operation optimization algorithm in this study, the optimal operation sequence of switches is also be calculated in order to provide a complete suggestion for the system planning. This project intends to utilize Python language to convert the DN data of topology and parameter and the historical load data of Taipower to the OpenDSS (a DN simulator) scripts automatically, and use the high-performance swarm intelligence algorithm to search the best strategy on sequence of switch operation and net-load three phases balance. The simulation platform with a user interface will be developed to integrated above functionality, providing the operation suggestion in different scenarios based on user needs.

壹、計畫緣起與目的

一、計畫緣起

隨著經濟發展與生活品質提升，用電用戶對於供電可靠度之要求日漸殷切，短時間停電造成的經濟損失與用戶不便愈來愈無法被容忍。因此，台灣電力股份有限公司(以下簡稱台電)近年來積極推動配電饋線自動化工程，全面建置自動化階層式調度控制系統(Hierarchical Dispatch and Control System, HDCS)，其分為中央調度控制中心(Center Dispatch and Control Center, CDCC)、區域調度控制中心(Area Dispatch and Control Center, ADCC)、配電調度控制中心(Distributed Dispatch and Control Center, DDCC)，以及饋線調度控制中心(Feeder Dispatch and Control Center, FDCC)，其架構如圖 1。其中，在配電饋線自動化系統中包含了饋線上大量裝設之饋線終端設備(Feeder Terminal Unit, FTU)，負責隨時監視現場自動線路開關(Automatic Line Switch, ALS)設備，紀錄其類比或數位資料如電壓、電流、相位角，以及異常狀態等；並定時回傳至變電所內既設資訊末端設備(Feeder Remote Terminal Unit, FRTU)與變電所內新設資訊末端設備(Primary Remote Terminal Unit, PRTU)；FRTU 與 PRTU 負責監控及傳送變電所相關運轉資料回 DDCC 或 FDCC，作為控制中心與 FTU 之間的溝通橋樑，並傳送控制中心發出之控制信號至饋線開關。整合配電端的資訊與調度中心的策略，可進行自動化的故障檢測、隔離與復電(Fault Detection, Isolation, and Restoration, FDIR)，快速應變突發事故，改善傳統耗時費力之工程，並由控制中心提供最佳復電策略，如最低開關操作次數、最高負電用戶數，及大用戶優先復電等，大幅提升系統可靠度。配電饋線自動化系統龐大且功能不勝枚舉，例如有載分抽頭切換器(On Line Tap Changer, OLTC)與電壓調整器之電壓控制、電容器控制、饋線過載控制、過電驛與復閉器等保護設備之自動協調、主變壓器過載及絕緣劣化保護、停電管理系統、圖資系統、計畫性停電排程、最佳化饋線重組、最佳配電變壓器三相配置、直接負載控制、用戶自動卸載、負載特性調查、遙控抄錶、竊電偵測等。除了即時運轉面，配電饋線自動化亦對於電網規畫面有著巨大的效益，由於饋線之拓樸、設備、再生能源等資料以及 FTU 之歷史負載資料皆儲存於調度與控制中心之資料蒐集與監控系統(Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA)中，這意味著只要將饋線模型建立至相關模擬軟體中，即可進行不同電網規劃之情境下的電力

潮流解析，進而改善現行饋線架構，如操作常閉開關與常開開關之饋線重組，以及分歧線與主幹線上配電變壓器之三相接線方式等。然而，配電系統龐大且繁雜，如何梳理龐大的饋線拓撲資料並自動轉檔建立饋線模型並非易事，且在龐大資料下仍需考慮無可避免之不良數據；此外，區域配電網之長期開關操作規劃、三相負載平衡規劃等，若依照傳統人工參閱報表嘗試調整，將可能發生顧此失彼，挖東牆補西牆的結果，缺乏科學根據與系統性的方法無法達到最佳的長期規劃策略。饋線自動化系統提供了大量電網運轉資訊，若可以妥善利用其建立模型，並結合最佳化演算法系統性的推導運轉策略，可提供台電饋線自動化系統卓越的附加價值。因此，本計畫開發一套區域配電網長期開關操作與三相負載平衡策略最佳化模擬平台，可針對不同的運轉需求改善原始系統的不足與缺失，提供調度人員完整的運轉策略建議，使配電自動化系統不僅提升供電可靠度與可掌握性，也可增加其他系統運轉性能與效益。

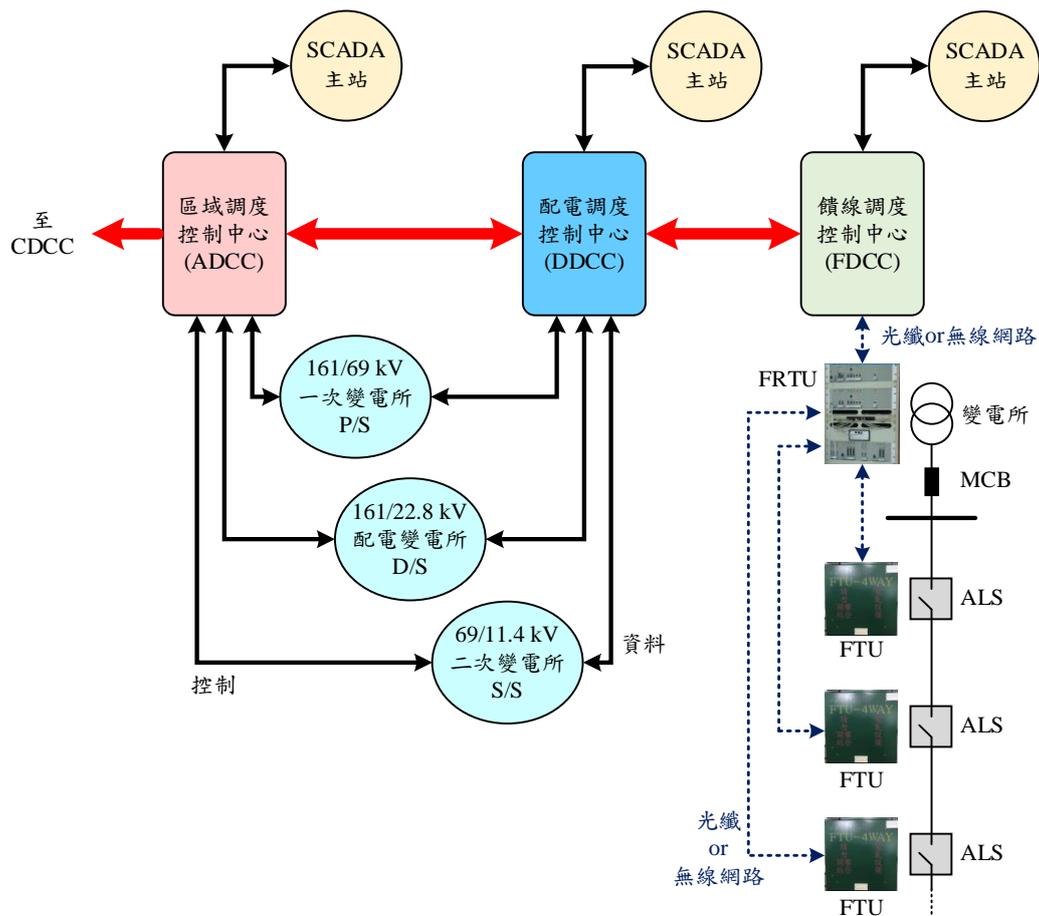


圖 1 調度控制中心與配電饋線自動化系統架構

根據我國經濟部所推動「展綠、增氣、減煤、非核」之能源轉型政策[1]，預計規劃在 2025 年達到 20%再生能源發電量佔比，其中太陽光電(Photovoltaic, PV)目標裝置容量為 20 GW (屋頂型 6 GW 與地面型 14 GW)，風力發電目標裝置容量為 6.9 GW (陸域 1.2 GW 與離岸 5.7 GW)。而由於台灣本島北中南不同的區域特性與經濟狀況，再生能源的發展方式也大相逕庭。圖 2 為截至 109 年 12 月台灣再生能源種類容量分布與歷史裝置容量，其中中南部太陽光電佔了全國總裝置容量之 70%，且呈指數上升中；而風力發電則幾乎位於中部。由於風力機組單支容量較大(可達約 15MW)，將併接於 69 kV 或 161 kV 之輸電網；而單片模組約 300 W 之太陽光電發電廠容量則是可大可小，故其大量分散於配電系統。因此，台灣中南部之配電級再生能能源可併網容量愈趨縮小，如圖 3 所示(紅線表示可併網容量已滿)，故以太陽光電為主之配電級再生能源業者之併網容量競爭亦將日益激烈。綜上所述，為了達成我國政府之能源轉型目標，增加配電饋線之最大可併網容量(Hosting Capacity)為配電網運轉規劃上一大重要指標，國內外產官學業界也陸續修訂併網標準或是提出許多改善運轉手段，如智慧變流器(Smart Inverter)控制、最佳容量與併網位置分布，以及饋線拓樸重組等。

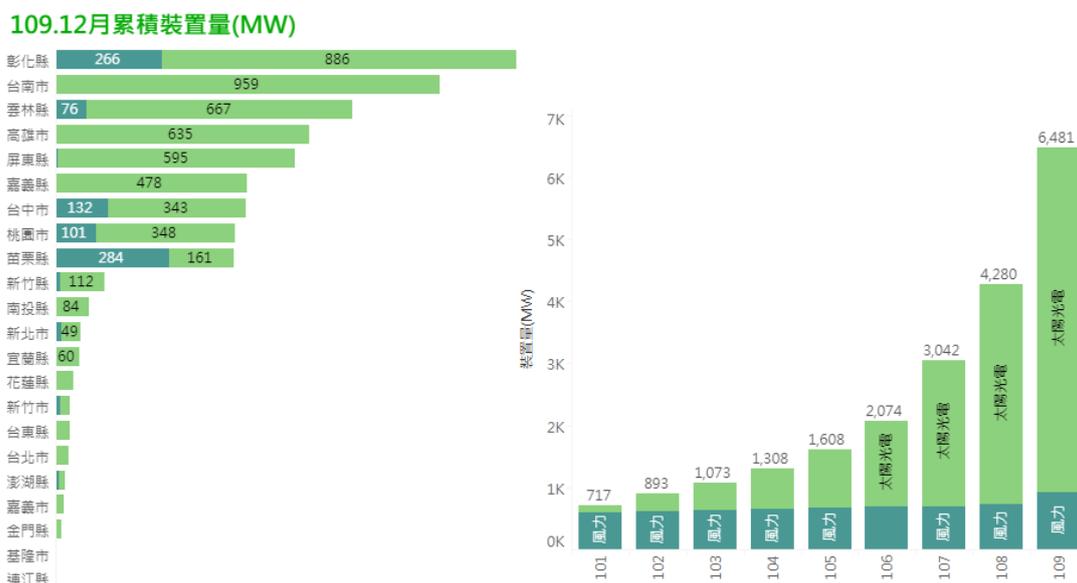


圖 2 台灣再生能源種類容量分布與歷史裝置容量[2]

由於實際的地理位置因素以及引接線路成本考量，目前最佳分散式能源併接位置大多數止步於學術研究；而台電雖有規定太陽光電發電設備功率因數應具有 0.9 超前或滯後之運轉能力，但沒有針對不同併接點太陽光電智慧變流器之電壓/虛功控制點須有不同設定之法規，故最佳智慧變流器控制仍有實務上的困難。所幸台電仍可利用自動化或手動線路開關調整最佳饋線拓樸架構，使得區域電網各節點之等效阻抗差異減小，達到類似最佳分散式能源位置之效果。一般而言，再生能源併網大部分皆是先觸碰到電壓變動率限制，逆送電力會在專線才較有可能達到主變壓器之 80% 容量限制，故在最佳饋線重構時通常以電壓變動率為主要目標函數。

本計畫所提出之區域配電網長期開關操作最佳化模擬平台可對區域最大再生能源併網容量進行最佳化演算，並根據不同季節之負載模型與發電特性提出開關操作建議。然而，開關切換除了須考慮總操作次數外，其操作順序亦為不可忽略的環節。一般轉供之開關操作順序為先關閉常開開關，再將常閉開關打開。其開關之兩側饋線之電壓差、電流差、相位角差皆會影響到其暫態變化，若無妥當規劃，輕則造成電壓閃爍，重則導致設備損壞、保護電驛跳脫等，衝擊電網之電力品質與可靠度。再者，若每組常開開關與常閉開關操作分開考慮，也會如同饋線重構與負載三相配置等策略一樣，發生顧此失彼、左支右絀的問題。此外，饋線之分歧線與主幹線配電變壓器的分配方式，會影響線路之中性線電流大小與相位角，亦須納入考量。淨負載三相平衡除了降低中性線電流，防止小勢能過電流電驛(Low Energy Over-Current Relay, LCO)誤動作，亦可大幅改善饋線線路損失。

綜上所述，對於大區域之配電系統建模、最佳化長期開關操作之饋線重組、最佳淨負載三相平衡、最佳開關操作序列，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，故本計畫將與台電與相關業界與單位研議克服實務困難，將所提理論與方法應用於實際系統中，以呈現本計畫之實際價值。

二、計畫目的

為了增強配電自動化系統附加價值以及達到配電網最佳運轉策略，本計畫提出一套區域配電網最佳化長期開關操作序列與三相淨負載平衡模擬平台。目的為提升配電網之再生能源最大併網容量、減輕開關切換對系統之衝擊、降低中性線電流與線路損耗等。本計畫著重於理論面與實務面的整合，將與台電與相關單位研議目前最迫切需被改善的標的，並取得配電網全尺度資料以利饋線模型建置。目前已知可取得資料為台電配電圖資管理系統(Distribution Mapping Management System, DMMS)轉檔後之區域電網資料，其中包含了變電所名稱、饋線名稱、饋線開關位置與種類、饋線線路規格、長度與連接方式、分歧線點位、配電變壓器位置、相別與容量、再生能源類型、位置與容量等；以及台電 SCADA 中由 FTU 所回傳之電壓、電流等歷史資料。得益於資料的完整性，本計畫可透過 Python 語言將其整合梳理，轉換為配電系統模擬軟體之電網模型，再搭配相關軟體套件與演算法，調整開關操作與三相負載接線方式尋找最佳策略，以達提升再生能源併網容量、降低系統衝擊與損失等效果。

美國電力研究所(Electric Power Research Institute, EPRI)研發了一套專為配電系統三相穩態模擬分析之軟體 OpenDSS(The Open Distribution System Simulator)，其透過標準指令驅動，相比其他模擬軟體需人工拖曳電力元件之方式，較適合本計畫之大量饋線元件轉換。且 OpenDSS 除了傳統電力元件，如三相變壓器、電容器、線路、開關等，亦支持許多新興電網元件如分散式發電(Distribution Generator, DG)、太陽光電、智慧變流器、風力機組、儲能系統等，對於多元的現代電網之建模亦不成問題。此外，OpenDSS 可利用逗號分隔值(Comma Separate Value, CSV)檔建立時間序列負載模型，一次性執行特定時段連續電力潮流解析，適合用於長期開關操作與負載接線調整之模擬。最重要的是，OpenDSS 使用微軟(Microsoft)的元件物件模型(Component Object Model, COM)介面與其他程式語言溝通，如 Python、C#、MATLAB 等，可直接獲取電網模型與三相潮流解析等資料。故本計畫選用 OpenDSS 作為模擬軟體，並以含豐富套件工具之 Python 環境開發協同模擬平台(Co-simulator)，撰寫演算法以推導最佳運轉策略。

現今大部分文獻對於配電網重構、最佳配置等皆是使用啟發式(Heuristic)或元啟發式(Metaheuristic)演算法，這種演算法通常用以求解複雜的問題，以生物、自然、物理、文化等機制為靈感，提出一套獨樹一幟的數學示，雖然鮮有理論支持，但大部分情況都可以在合理的運算時間內求得良好、次佳或者最佳解。配電網開關操作與相別平衡配置為一個極為複雜的問題，尤其在擴大區域時更為難解，限制條件眾多，故依靠元啟發式演算法求解是實務上最可行的方式。某一類的元啟發式演算法通常以多代理人(Multi-agent)亂數搜尋，參考群體生物覓食、狩獵、群居等機制移動，進行全域搜索(Global Search)與局部搜索(Local Search)，故又被稱為群體智能(Swarm Intelligence)。此類演算法以快速與高效率聞名，適合用於複雜且運算時間長之配電網分析。然隨著的群體智能演算法的發展，許多新穎之強韌、高表現、高速度之演算法不斷推陳出新，目前有上百種演算法可使用，本計畫將針對新穎或常見之群體智能演算法進行配電網開關操作與三相負載接線配置之測試，研究較適合應用之演算法。此外，配電網必須保持放射拓樸來維持保護協調策略，故在開關切換演算法上無法隨意亂數調整搜索最佳解，否則將造成孤島、環路、網路等結構。目前文獻關於配電網重構方法，大部分為使用是先建立之拓樸連接方式，或是以限制條件排除環路等拓樸。前者之通用性不足，無法套用到所有系統，在大區域配電網幾乎無法做到；而後者可能造成限制條件將所有演算法亂數產生的拓樸都排除掉，無法執行。故本計畫開發一套通用配電網開關操作之饋線重構演算法，以符合現實面情況。

除了配電網開關操作策略，模擬平台亦將進行開關操作序列與負載相位平衡作之最佳化策略求解，為了達到全面性的最佳化效果以及可彈性輸入模擬時間、模擬標的、最佳化需求，故本計畫開發一套具使用者介面之模擬平台，將電網資料與 FTU 歷史資料轉檔後，可讓電網規劃人員依據其需求輸入參數、標的，以及最佳化目標如最大再生能源併網容量與線路損失等，如圖 4 之平台架構所示，使得本計畫之技術更有亮點與實用性。

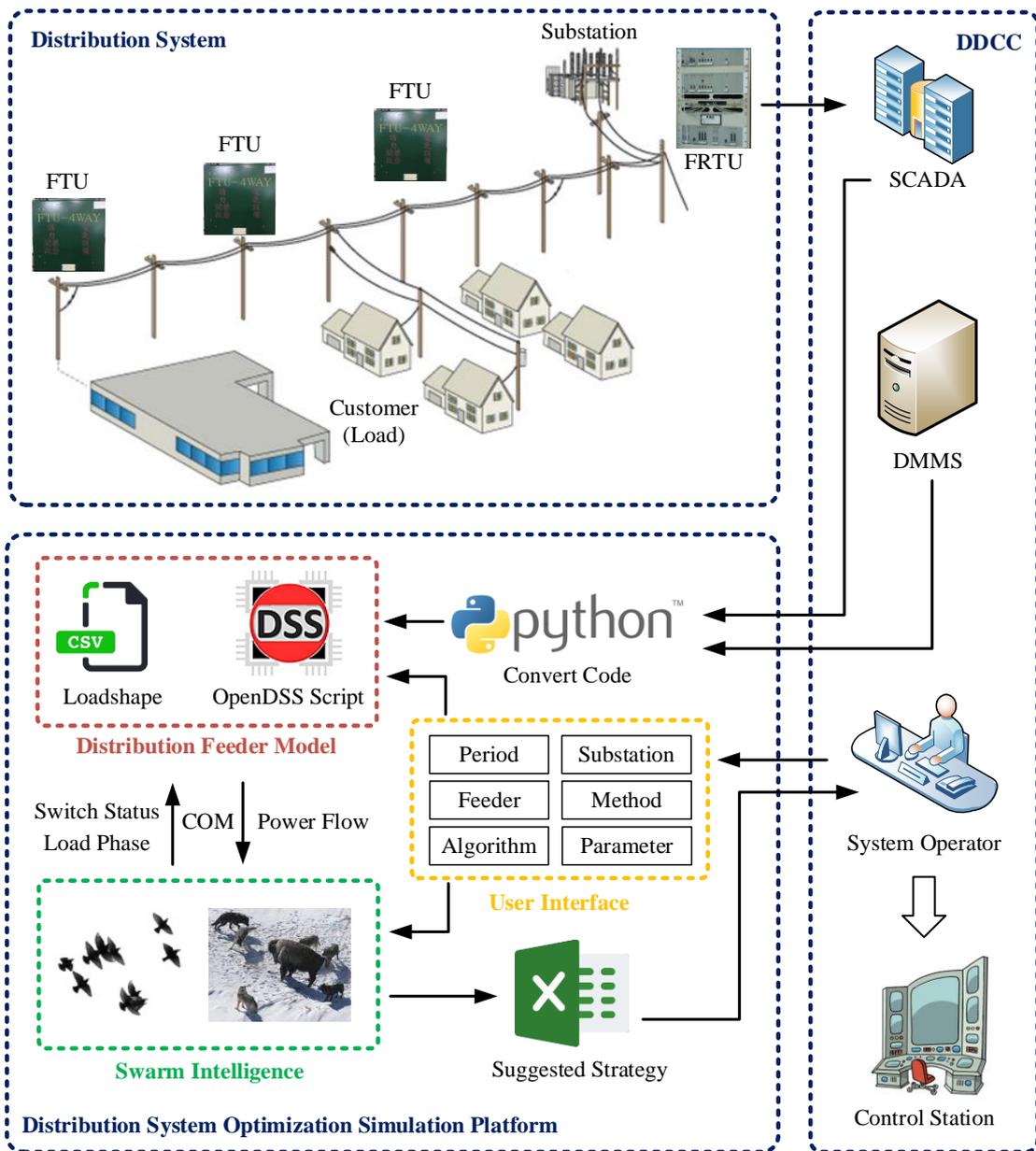


圖 4 本計畫架構

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配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、

配電網狀態估測、配電網最佳化重構、最佳三相配置，以及電力聚合業等，上述研究並未完全整合台電大範圍區域實際系統資料之配電網最佳化長期開關操作序列與最佳化三相負載配置以提升再生能源最大併網容量，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。

在開關操作序列相關研究[4]-[13]方面，[4]透過混合整數線性規劃(Mix-Integer Linear Program, MILP)整合配電網之放射狀、電壓等限制，求解在復電時之開關操作序列。[5]同樣針對配電網復電，其同時考慮饋線開關操作順序與 DG 啟動順序，以混合整數二階錐規劃(Mixed-Integer Second-Order Cone Programming, MISOCP)求解呈現復電結果。[9]探討微電網無縫切換時暫態變化，利用 DG 之下垂控制(Droop Control)使線路潮流降低以減輕開關操作之衝擊，並同時考慮開關切換順序。[11]利用貪婪演算法(Greedy Algorithm)進行配電系統故障定位並計算轉供之開關操作順序，以降低系統平均停電時間(System Average Interruption Duration Index, SAIDI)與系統平均停電次數(System Average Interruption Frequency Index SAIFI)。而國內研究方面也在此議題上有著不少著墨，例如[14]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)推導最佳線路開關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。

而在提升再生能源最大併網容量之相關研究[15]-[27]方面，[15]探討以智慧變流器之電壓-虛功控制(Volt-Var Control)與電壓-實功控制(VO-Watt Control)來減輕配電網過電壓與電壓變動的問題，以提升 PV 最大併網容量。[16]利用啟發是演算法達到最佳 PV 裝置位置與容量，以提升其最大併網容量。[17]開發了隨機模型以分析配電饋線重構後之 PV 最大併網容量，並以電壓限制為主要考量因素。[18]基於正序電流改善逆送電力保護，於小型低壓網路提出 PV 最大併網容量評估法。[19]提出一種新穎策略以增加不平衡之配電系統之 PV 併網裕度。[20]針對集結於低壓測之 PV，以智慧變流器之電壓-虛功控制與變壓器 OLTC 控制來達到最佳電壓控制，以提升 PV 最大併網容量。[21]提出一自適應性強健優化(Adaptive Robust Optimization, ARO)法推導電池儲能系統之配置，減緩三相不平衡與過電壓問題，以增加 PV 最大併網容量與線路損失等。而 DER 裕度的標準亦在不同

的文獻中[22]-[26]有不同的評估方式，[22]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。[23]考慮了 PV、風機以及負載的不確定性來估算 DER 裕度，並以 IEEE 測試系統以及實際澳大利亞饋線驗證其實用性。[27]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。

而在群體智能演算法於配電系統最佳化應用之相關研究[28]- [36]方面，[28]利用粒子群最佳化演算法(Particle Swarm Optimization, PSO)對併網電動車充電站變流器之電壓-虛功控制與配電網分解進行最佳化演算。[29]提出混合基因演算法(Genetic Algorithm, GA)、PSO、交易市場演算法(Exchange Market Algorithm, EMA)之雙循環演算法對配電網投切式電容組之位置與排程進行最佳化；[30]則是利用蝗蟲搜索法(Locust Search, LS)執行最佳電容器位置計算。[31]提出改良式布穀鳥搜索法(Cuckoo Search Algorithm, CSA)應用於配電網故障定位之開關切換。[32]結合深度信念網路(Deep Belief Networks, DBN)與 PSO 對配電系統可靠度進行最佳化分析。[33]提出了改良式被囊群演算法(Tunicate Swarm Algorithm, TSA)用以配電網重構與電容器與 DG 的調度控制。[34]提出了選擇性螢火蟲演算法(Selective Firefly Algorithm, SFA)對配電網進行拓樸重組以達損失最小化的效果。[35]與[36]同樣使用甲蟲演算法(Beetle Swarm Algorithm, BSA)解決配電網重構問題。[36]結合二元 PSO 與 OpenDSS 進行配電網最佳重構演算。

綜合上述國內外與本計畫相關研究可知，不論在智慧電網、改善再生能源最大併網容量、開關操作序列、群體智能演算法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；然有關配電網重構之開關操作序列之研究鮮少，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長期開關操作序列與三相淨負載平衡最佳化策略模擬分析平台，標的系統為台電雲林區處配電網系統。該平台包含了拓撲資料與 FTU 歷史資料轉換饋線模型、配電網饋線開關操作演算法、開關操作序列演算法、三相淨負載平衡演算法、群體智能演算法、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。

一、饋線開關長期操作策略

本節針對區域配電網開關長期操作策略演算法，用以改善配電網再生能源併網容量以及其他目標，並開發擴大範圍之最佳化模擬分析。

(一) 饋線開關長期操作策略以提高再生能源併網容量

一般而言，配電網拓撲結構通常是放射狀或常開環路，只有重載或高可靠性需求之區域才會以長閉環路或互聯網路的形式設計。對於常開環路系統，故障饋線的部分可以通過常開聯絡開關(Tied Switch)、分段開關(Sectionalizer)、復閉器(Recloser)、主環路單元(Ring Main Unit, RMU)、饋線分段單元(Feeder Sectionalizing Unit, FSU)和 SCADA 進行轉供，從而減少停電用戶數量。饋線開關長期操作問題是通過操作常開和常閉饋線開關來找出最佳的饋線放射狀拓撲，以平衡饋線電流，降低線損等。因此，開關操作策略算法必須遵守放射狀拓撲之限制。但由於算法的隨機性，如果開關狀態由演算法之代理人決定，通常不僅會出現環路拓撲，還可能出現孤島狀態。在現今饋線重構文獻已經進行了許多相關研究，並提出了應對這一挑戰的方法。[38]使用演算法的限制式來過濾環路或孤島拓撲，但此方法僅在簡單饋線中可行，若在大系統，如台電真實電網，則大部分的解都將被限制式過濾，無法獲得可行的解。[39]預先確定所有可行的放射狀拓撲並將其儲存在資料庫中，而演算法僅從資料庫中獲取數據以確保永遠選擇到正確的解。同第一個方法，若應用於大系統，則需要花費過多時間來獲取所有可行的拓撲結構，且每次有新的拓撲系統都將重新計算，不具通用性。故本研究提出並開發了一種開關操作技巧，其要旨如下。當一個常開開關閉合，那麼網路就會形成一個環路，演算法會根據拓撲上下游等級來尋找這個環路中的所有開關。接著透過群體智能算法決定打開環路中的一個開關以恢復放射狀拓撲。通過

以上過程，完成了一組常開和常閉開關操作，改變了拓撲結構。接著再操作下一個常開開關，以此類推，直到完成所有常開開關操作則結束該標的系統的開關操作。流程圖如圖 5 所示。

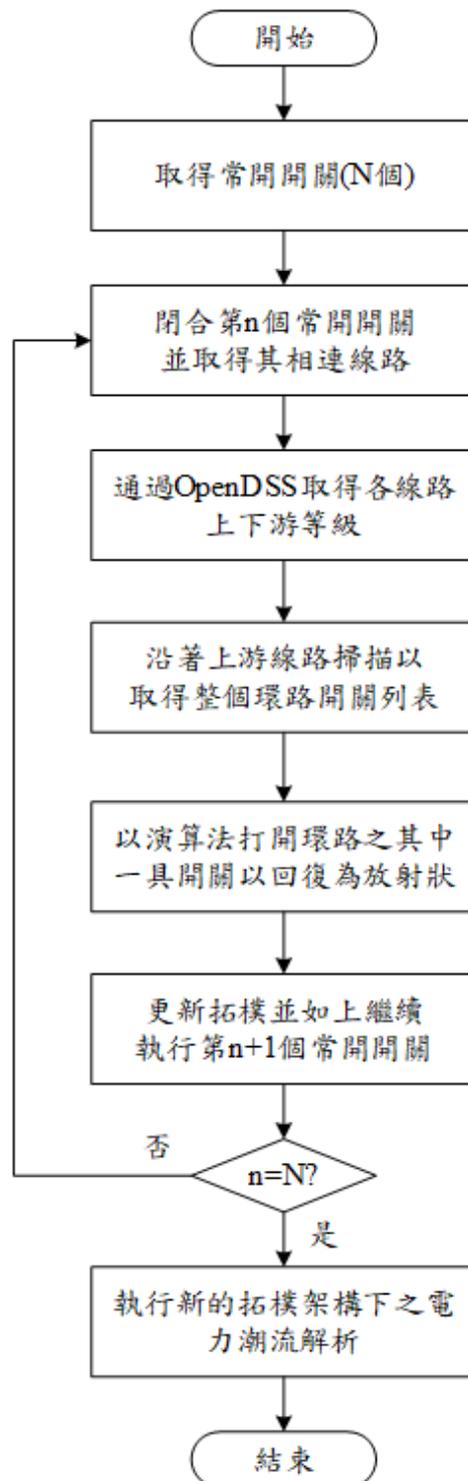


圖 5 所提出之饋線開關操作演算法流程圖

尋找常開點形成之環路是此技術中最困難的任務，因為一個常開開關可能連接到許多線路，並且在各線路的視角中不知道哪條線將形成環路。幸運的是，在 OpenDSS 中可以獲得各線路之上下游等級，這意味著可以確定上游和下游關係，如圖 6 中的數字所示。該示意圖顯示了兩個變電站和四條饋線。變電站為 0 級，與之相連的線路為 1 級，依此類推。因此，從常開點兩端出發往較小上下游等級的線路尋找，直到兩端有相同等級線路時，即可確定為一個環路，如圖 6 中不同顏色所標示。而藉由群體智能演算法決定打開該環路中的一個開關，並且電路拓撲也會發生變化，每個常開點皆依次執行此過程。將獲得一個新的拓撲結構，再由 OpenDSS 求解新的電力潮流，如線損和電壓分布等。圖 6 顯示了大部分的環路類型，描述如下：

1. 同一饋線中的環路
2. 同一主變壓器中兩條饋線之間的環路
3. 同一變電所不同主變壓器中兩條饋線之間的環路
4. 不同變電所不同主變壓器中兩條饋線之間的環路

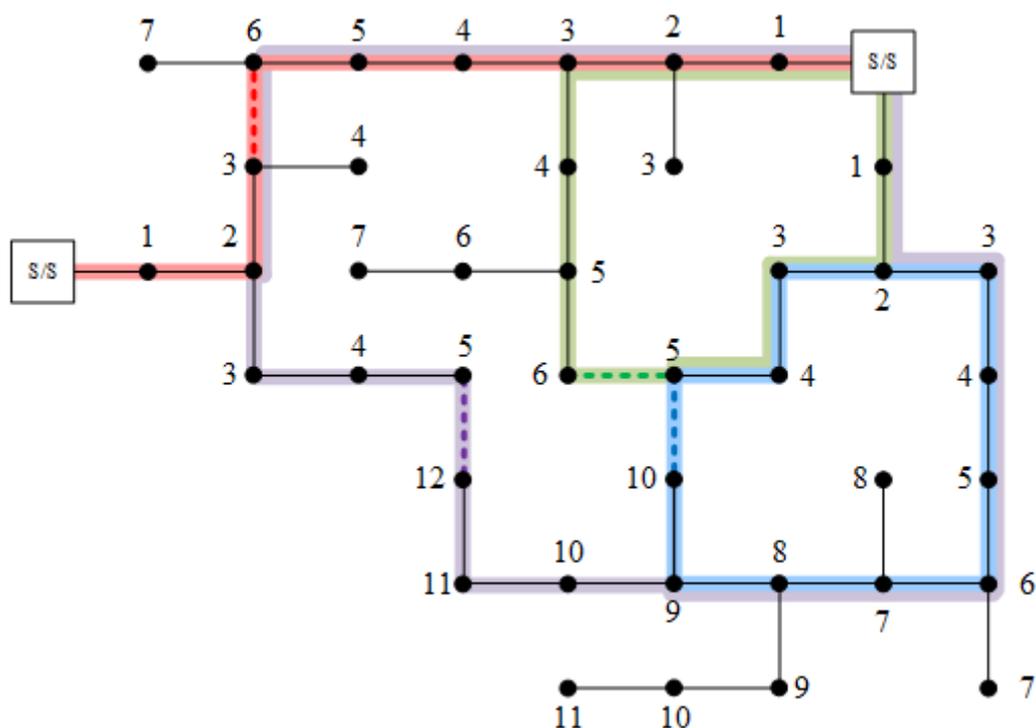


圖 6 重構演算法示意圖

以台電規則，11.4 kV 饋線無論是在二次變電(Secondary Substation, S/S)或是配電變電所(Distribution Substation, D/S)轄區，都可以通過常開聯絡開關進行

轉供；同樣，22.8 kV 饋線無論是 D/S 或是一次變電所(Primary Substation, P/S)轄區也可以相互轉供。

群體智能演算法是受生物集體行為、自然現象等啟發，利用簡單的數學，通過群體系統的機制制定，例如模仿覓食行為和物理現象，在每次迭代中搜索最佳解。不像梯度下降中使用導數函數，群體智能的數學式通常較簡單並且不需花費很長的時間，因此可以快速獲得次家解或者最佳解。故這種算法非常適合用於解決配電網複雜的最佳化問題。故本研究採用群體算法來決定圖 6 中描述的循環中打開的開關的最佳方法，如圖 7 所示，群體中的每個代理人代表環路中須被打開的開關。群體經歷不同的位置進行全域和局部搜索，在迭代結束時找到最佳或次佳解。

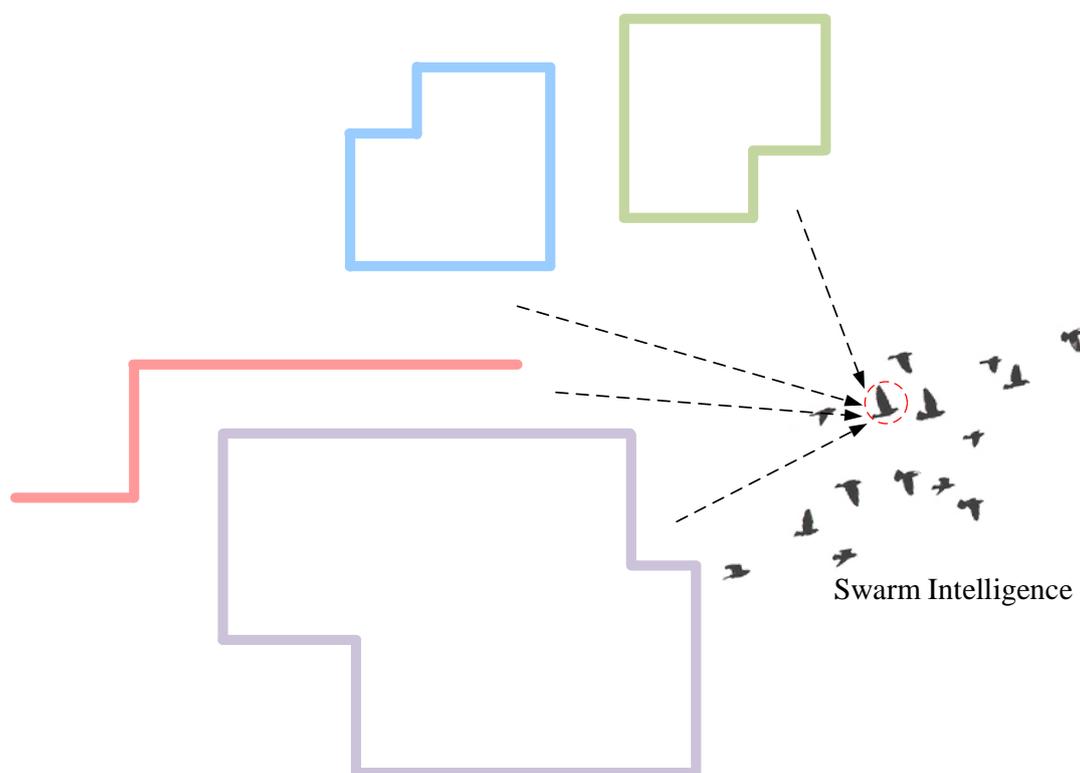


圖 7 應用群體智能演算法之開關操作策略演算法示意圖

配電網的長期面的饋線負載管理(Feeder Load Management, FLM)，可透過開關操作策略來進一步加強。透過開關操作達到配電網結構重組，使得饋線負載趨於均衡，不僅能降低線路損失、母線電壓降，亦能減少重載饋線的不穩定因素。此外，再生能源之可併網量主要取決於其對配電饋線的兩大衝擊，電壓變動率以及線路安全容量，而通常會先被電壓變動率限制。故平衡各饋線的壓降，能夠降

低整理再生能源併網所造成的電壓變動，進而提高其併網容量。故本研究在長期開關操作策略之目標，除了總線路損失與饋線電流均化外，亦新增了提升再生能源併網容量，其計算流程如圖 8 所示。由於電壓變動率與負載、阻抗等有關，在大系統很難精準計算，在此以遞增方式嘗試併網直到超過變動率限制，而各饋線負載與阻抗都不盡相同，且其原始再生能源併網量也不一樣，故可先以原系統電壓變動率決定各饋線遞增併網量之加權因子，每次增加併網量後求解電力潮流併計算電壓變動率，直到所有饋線皆超過台電規範之 3% 限制，即可確定其最大再生能源之併網量。

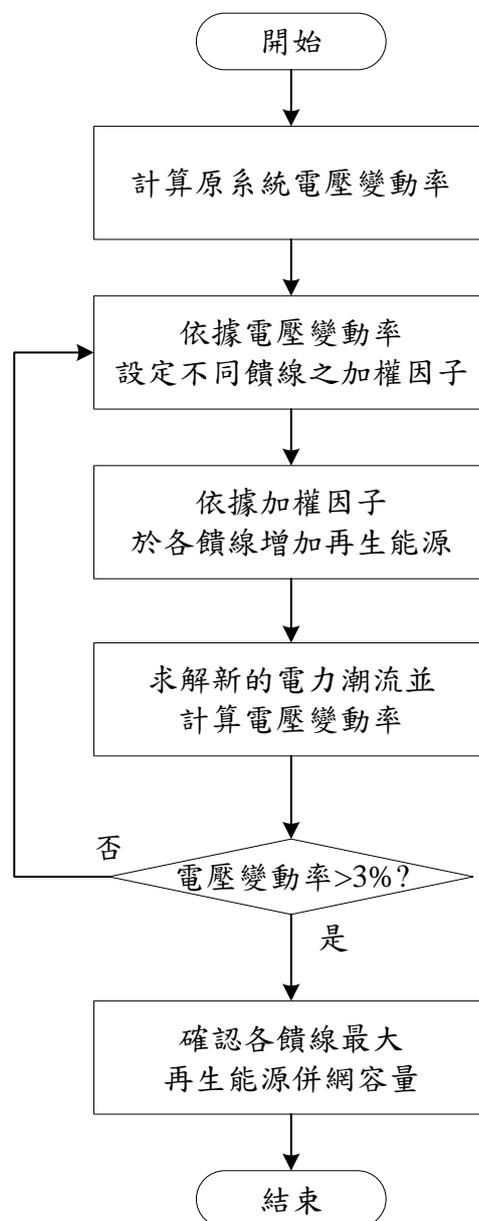


圖 8 再生能源最大併網容量計算流程圖

(二) 擴大分析範圍之饋線開關配置演算法

以 DDCC 或 ADCC 的角度看待配電網之最佳化開關操作策略，若僅在變電所內進行饋線重構與負載轉供是不足的。本研究開發擴大分析範圍之饋線重新配置技術，以達到整個區域配電網或者局部區域之最佳化。圖 9 為擴大分析範圍之饋線配置示意圖，首先將 FTU 資料庫之負載資料以及電網元件資料經過轉檔程式將其轉為 OpenDSS 腳本，並由變電所為單位分類為數個資料夾，再透過 Python 開發之使用者介面(User Interface, UI)提供使用者選擇欲分析範圍，將被選擇之變電所資料夾複製至 RUN 資料夾，再由 RUN 資料夾中的主腳本呼叫各變電所之子腳本，即可達到跨變電所之擴大分析範圍之目的。其中，雖然 OpenDSS 可建置多個搖擺匯流排(Swing Bus)作為不同變電所之電壓源，但是此作法在執行開關操作策略時將於法取得線路上下游等級。故在此設定 161 kV 之電壓源加上一具理想之 161 kV/69 kV 變壓器作為各變電所主變壓器之電壓源。

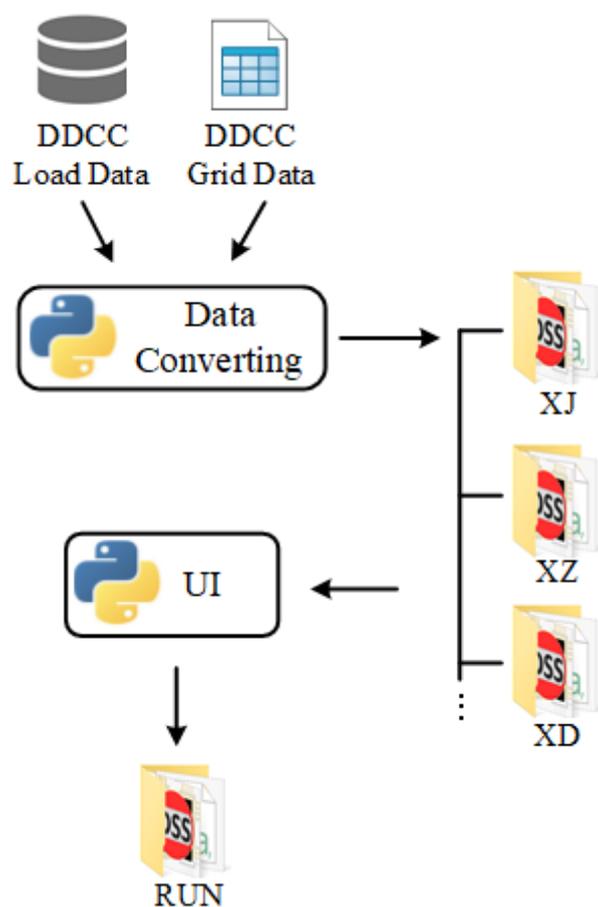


圖 9 擴大分析範圍饋線配置方法示意圖

二、饋線開關長期操作序列策略

本節針對區域配電網開關長期操作序列策略演算法，用以降低開關操作時對網之衝擊，並研究測試與比較不同電力系統模擬軟體之開關切換序列功能。

(一) 電力系統模擬軟體開關切換序列功能及測試

Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) 是一款功能眾多的電力系統模擬分析軟體，其功能包含穩態潮流、暫態穩定度、短路電流、諧波、接地、最佳潮流、保護協調、發電機啟動等。而 ETAP 也有開關序列管理(Switching Sequence Management, SSM)之功能，故本節研究與測試其功能之特性，並與本計畫發開所使用所之 OpenDSS 模擬軟體進行比較。

圖 10 為 ETAP 與所選之範例系統化面，上方功能選單可選取開關序列管理功能。首先透過圖 11 畫面設定欲投切之開關群組與投切順序，以及圖 12 畫面設定投切前後電力潮流解析之母線電壓標么值、設備承載率告警值，設定完成後由圖 13 畫面執行自動執行或者由人工單步執行，而各個執行步驟所發生之告警將同樣列於圖 13 下方。

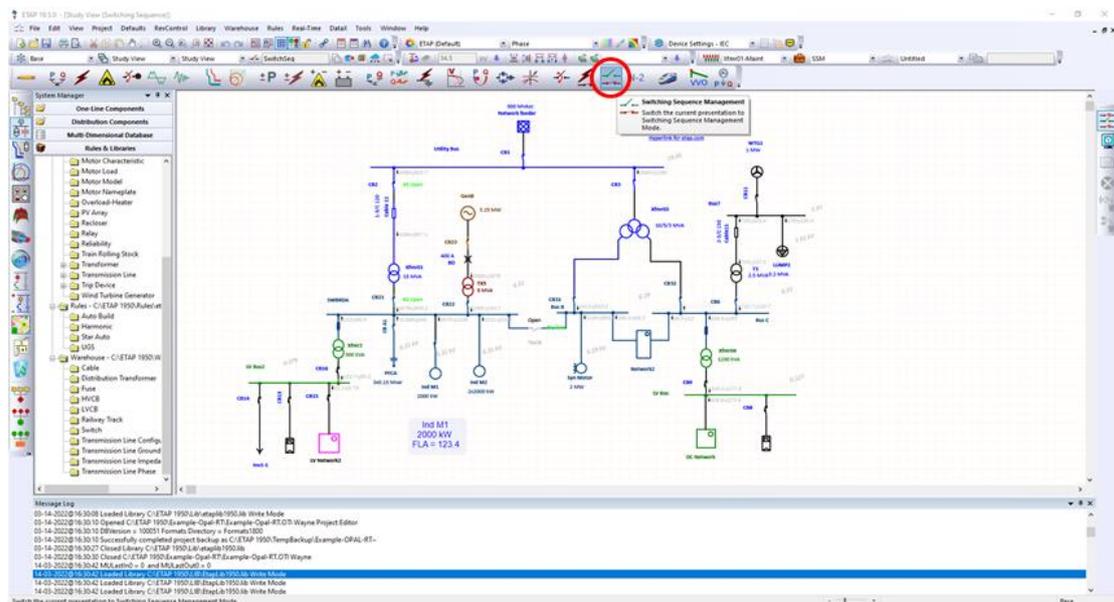
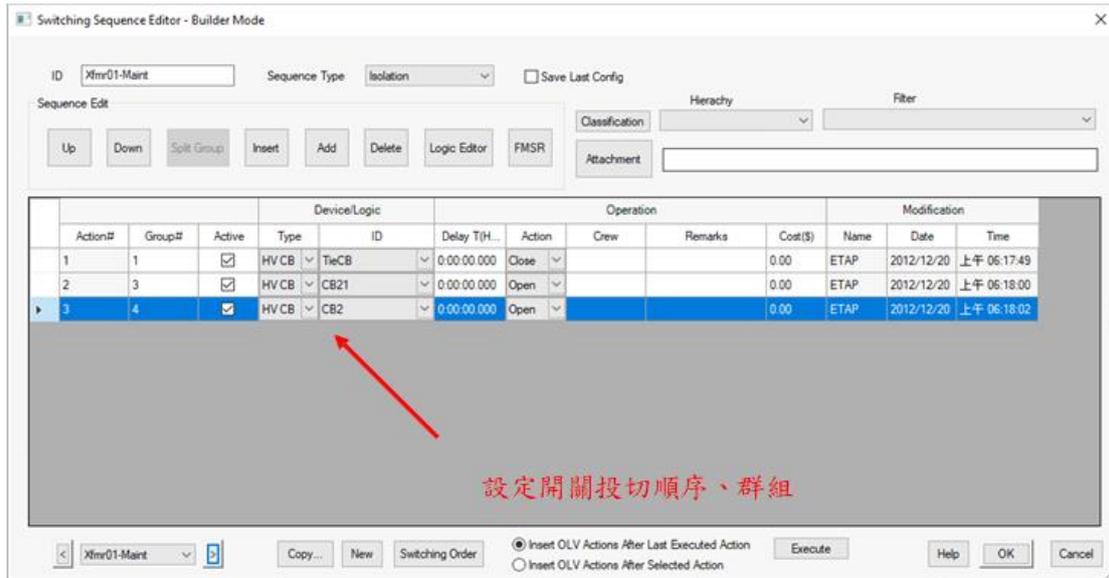
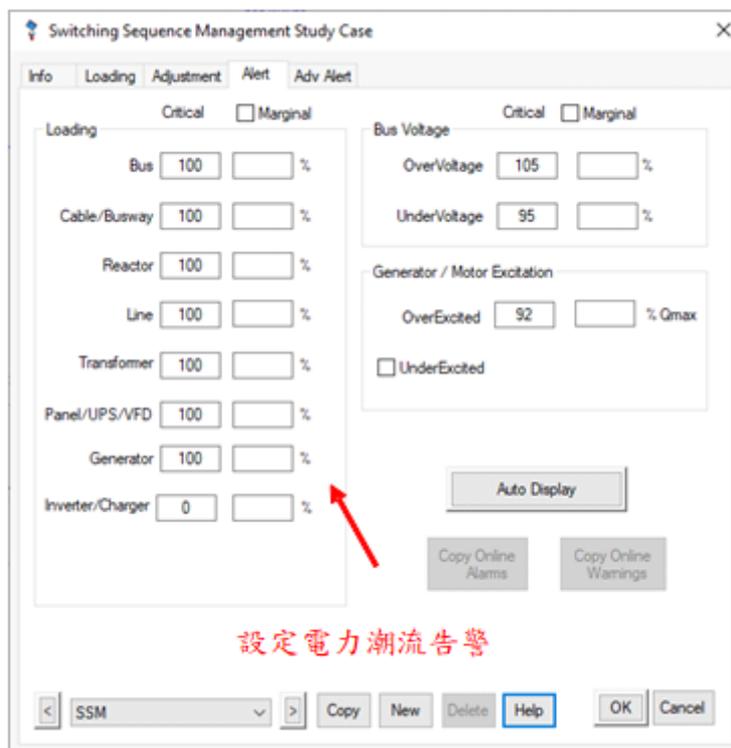


圖 10 ETAP 之測試系統畫面



設定開關投切順序、群組

圖 11 ETAP 之 SSM 設定開關投切順序



設定電力潮流告警

圖 12 ETAP 之 SSM 設定電力潮流告警



圖 13 ETAP 之 SSM 執行開關投切與電力潮流告警

本研究選用 ETAP 內建之 IEC 測試配電系統，模擬情境為變壓器 xfmr01 將進行維護，須將其從系統中隔離，投切開關投切之順序如下，其潮流變化如圖 14、圖 15、圖 16 所示。由圖可知原系統之變壓器 xfmr01 負載為 $4086+j925.7$ ，變壓器 xfmr03 負載為 $2040+j1290$ kVA；經三步驟轉供後變壓器 xfmr01 被隔離，其負載皆被轉移至變壓器 xfmr03 之 $6138+j1550$ kVA。母線平均電壓部分，則是由 6.3 kV 下降至 6.27 kV。上述之操作可觀察到 ETAP 對於開關操作序列之模擬分析對於使用者來說非常直觀，且告警值可由使用者設定並在執行完成後列表整理超出告警範圍者。

- 1.關閉 TieCB
- 2.開啟 CB21
- 3.開啟 CB2

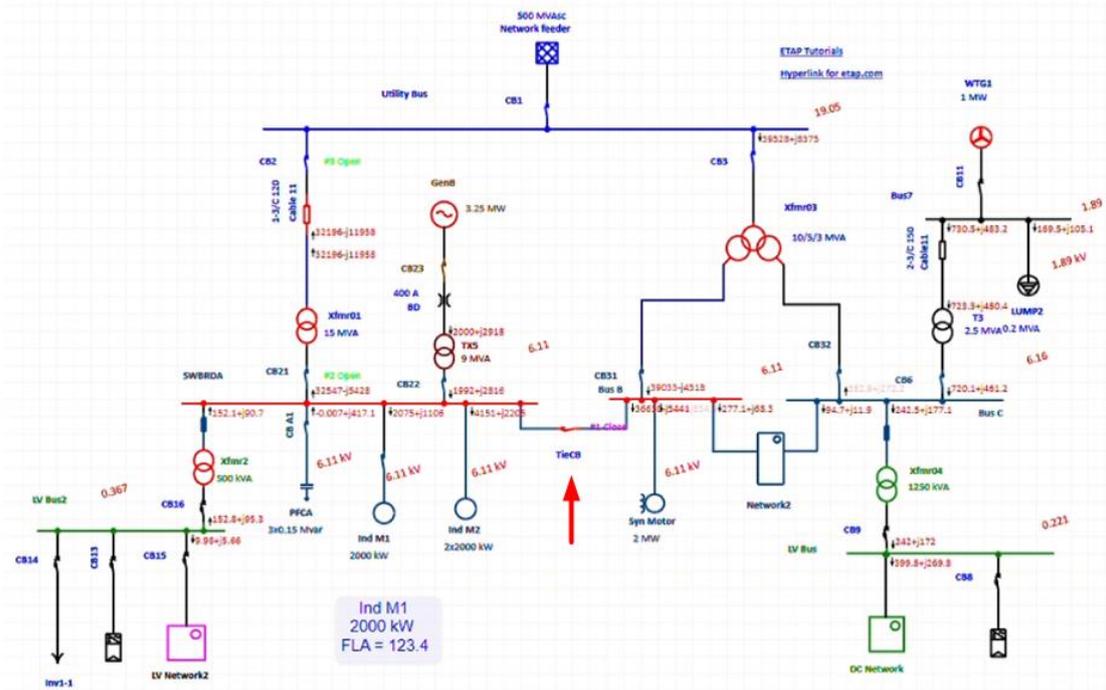


圖 14 ETAP 之 IEC 測試系統 SSM 執行步驟 1-關閉 TieCB

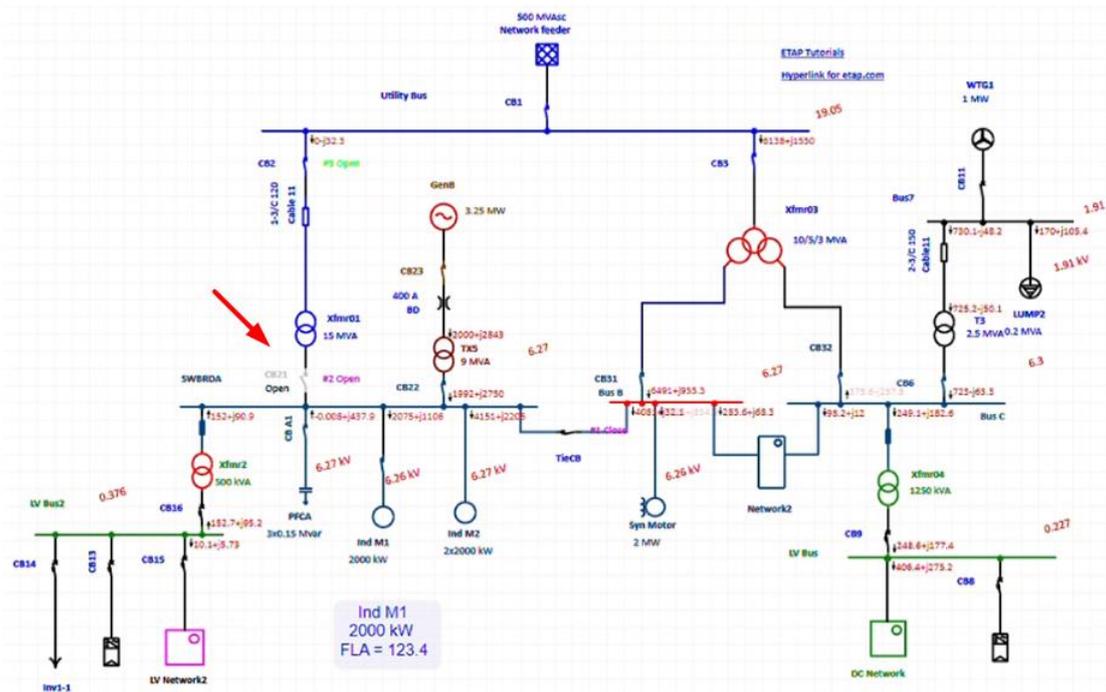


圖 15 ETAP 之 IEC 測試系統 SSM 執行步驟 2-開啟 CB21

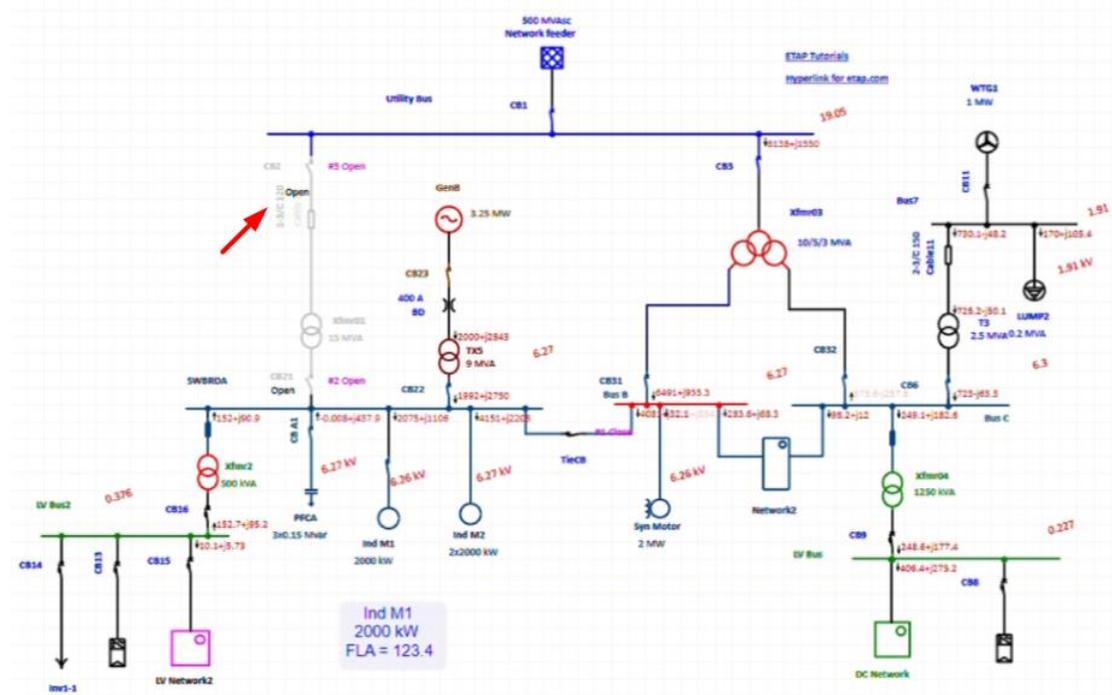


圖 16 ETAP 之 IEC 測試系統 SSM 執行步驟 3-開啟 CB2

OpenDSS 相比於 ETAP 則功能較少，主要為三相穩態潮流解析、故障分析、諧波分析。其開關序列管理也沒有像 ETAP 有獨立設計一個功能，而是要自行撰寫開關投切腳本再輸出潮流解析觀察結果，如圖 17、圖 18 所示。雖然不如 ETAP 方便直觀，但是 OpenDSS 以文字檔建立電網模型較適合台電大型電網，且可容的與 Python 等語言透過 API 介接，並應用演算法與 UI 介面自行開發特定需求軟體，故本研究仍採用 OpenDSS 作為開關操作以及開關操作序列策略演算之模擬軟體。

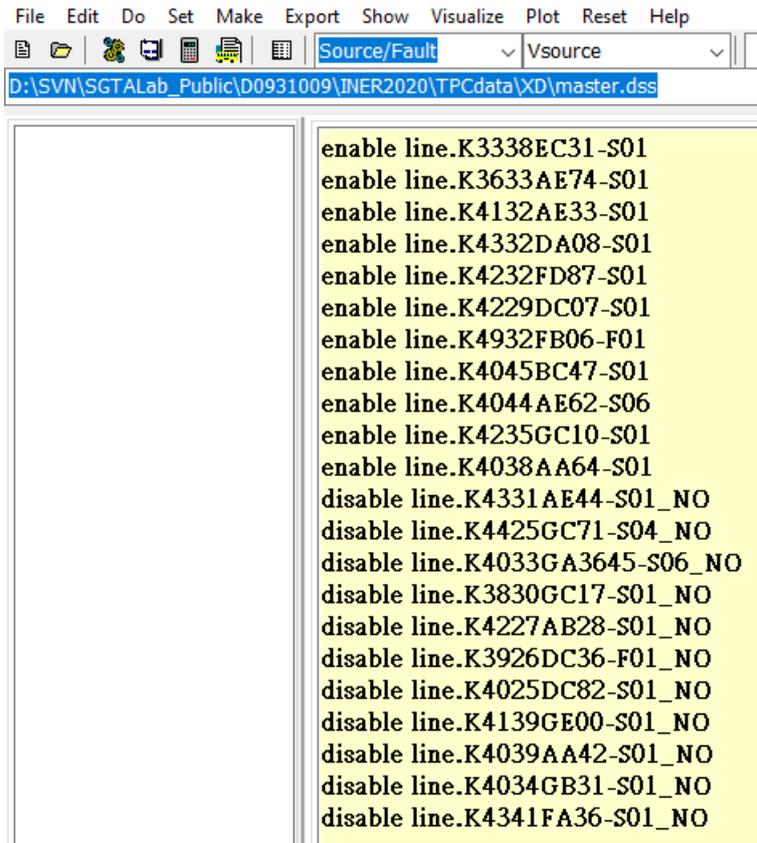


圖 17 OpenDSS 之開關投切腳本

The screenshot shows a Notepad window titled 'RUN_VLN.Txt - Notepad' displaying the output of a power flow analysis. The output is a table of symmetrical component voltages by bus for 3-phase buses.

Bus	Mag:	V1 (kV)	p.u.	V2 (kV)	%V2/V1	V0 (kV)	%V0/V1
source161	97.6		1.05	4.576E-008	4.688E-008	6.349E-009	6.505E-009
source69	41.83		1.05	2.297E-006	5.491E-006	2.721E-009	6.505E-009
xm#2	6.633		1.008	0.009206	0.1388	0.009537	0.1438
xm21	6.633		1.008	0.009206	0.1388	0.01077	0.1624
xm22	6.633		1.008	0.009206	0.1388	0.009756	0.1471
xm23	6.633		1.008	0.009206	0.1388	0.01287	0.194
xm24	6.633		1.008	0.009206	0.1388	0.01417	0.2136
xm25	6.633		1.008	0.009206	0.1388	0.007092	0.1069
k5057bb01-j02	6.586		1.001	0.01311	0.1991	0.02008	0.3049
k5057aa32-j01	6.586		1.001	0.013	0.1974	0.01985	0.3014
k4958ha69-f01	6.609		1.004	0.01017	0.1538	0.01333	0.2016
k5058ac14-j01	6.61		1.004	0.01016	0.1537	0.01343	0.2032
k4858hd22-s01	6.607		1.004	0.01092	0.1653	0.01534	0.2322
k4957fa48-s01	6.591		1.001	0.01244	0.1888	0.01952	0.2962
k4957hb04-j09	6.587		1.001	0.01325	0.2011	0.02126	0.3228
k4957hb04-j12	6.587		1.001	0.01325	0.2011	0.02126	0.3227
k5057ee52-j01	6.58		0.9998	0.01622	0.2465	0.02617	0.3977
k5057ee52-j03	6.58		0.9998	0.01622	0.2465	0.02618	0.3978
k4957hb04-s03	6.587		1.001	0.01325	0.2012	0.02127	0.3229
k4956ge7352-s01	6.589		1.001	0.01283	0.1948	0.02071	0.3143
k4957hb04-s04	6.587		1.001	0.01325	0.2012	0.02127	0.3229
k4859bc48-s01	6.614		1.005	0.01044	0.1579	0.01406	0.2126
k4859ea3580-s01	6.614		1.005	0.01045	0.158	0.01407	0.2127
k5057cc21-j01	6.582		1	0.01536	0.2333	0.02451	0.3723
k5057cc21-j03	6.582		1	0.01536	0.2333	0.02451	0.3723
k5057hb87-i01	6.584		1	0.01477	0.2243	0.02365	0.3593

圖 18 OpenDSS 之潮流解析輸出文件

(二) 饋線開關操作序列策略降低對電網之衝擊

在本章所提之開關操作策略將會輸出模擬之建議開關操作報表，然而若只列出切開之常閉開關以及投入之常開開關而不知其關係，對於使用者來說仍須人工排查檢閱。此外，若毫無章法的投切開關，也可能發生饋線電流、功率角變化過大的情形。故本節提出並開發開關操作序列演算法，首先透過常開開關與常閉開關之所屬饋線推導其投切之 N 組配對組別，再利用群體智能演算法尋找 N 組開關之投切順序策略，以降低開關操作前後饋線電流變化。

在 N 組投切開關組別確認後，群體智能演算法中每個代理人則代表每組開關操作的順序，例如圖 19 所示。其中有 4 組開關投切組合，故總共有 $P_4^4=24$ 種可能開關投切順序組合。然而當 N 較大時， P_N^N 也會非常大，若每個代理人範圍過大演算法將非常容易發散，故此處使用的方法為，每個代理人的維度為 N，每個維度代表投切的開關，如此演算法將會較容易收斂，因為低維度代表先被投切之開關，高維度代表後被投切之開關。

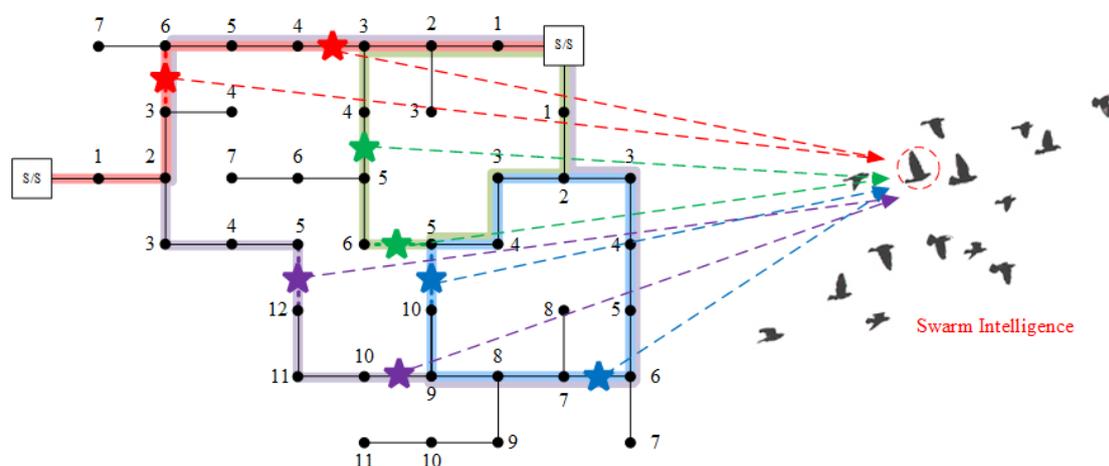


圖 19 應用群體智能演算法之開關操作序列策略示意圖

三、區域配電網之主饋線最佳淨負載平衡演算法

在台電配電系統中，由配電或一次變電所饋入三相四線多重接地饋線，其中包含大量單相分歧線，如圖 20，而三相配電變壓器亦有非對稱結構，如 U-V 接或 V-V 接。因此，若饋線各負載抽接點(Tapped-off point)相位配置不當(圖 21)，則會有嚴重的三相不平衡情形發生，輕則提高線路損失，重則因中性線電流過大導致饋線斷路器(Feeder Circuit Breaker, FCB)上 LCO 誤動作，降低系統穩定性與可靠度。主饋線最佳淨負載相位平衡目的在重新安排饋線上各負載抽接點相別，其方法比開關操作演算法更加單純，將演算法代理人轉換為抽接點相別，經迭代移動後求得最佳線路損失、最低中性電流等。

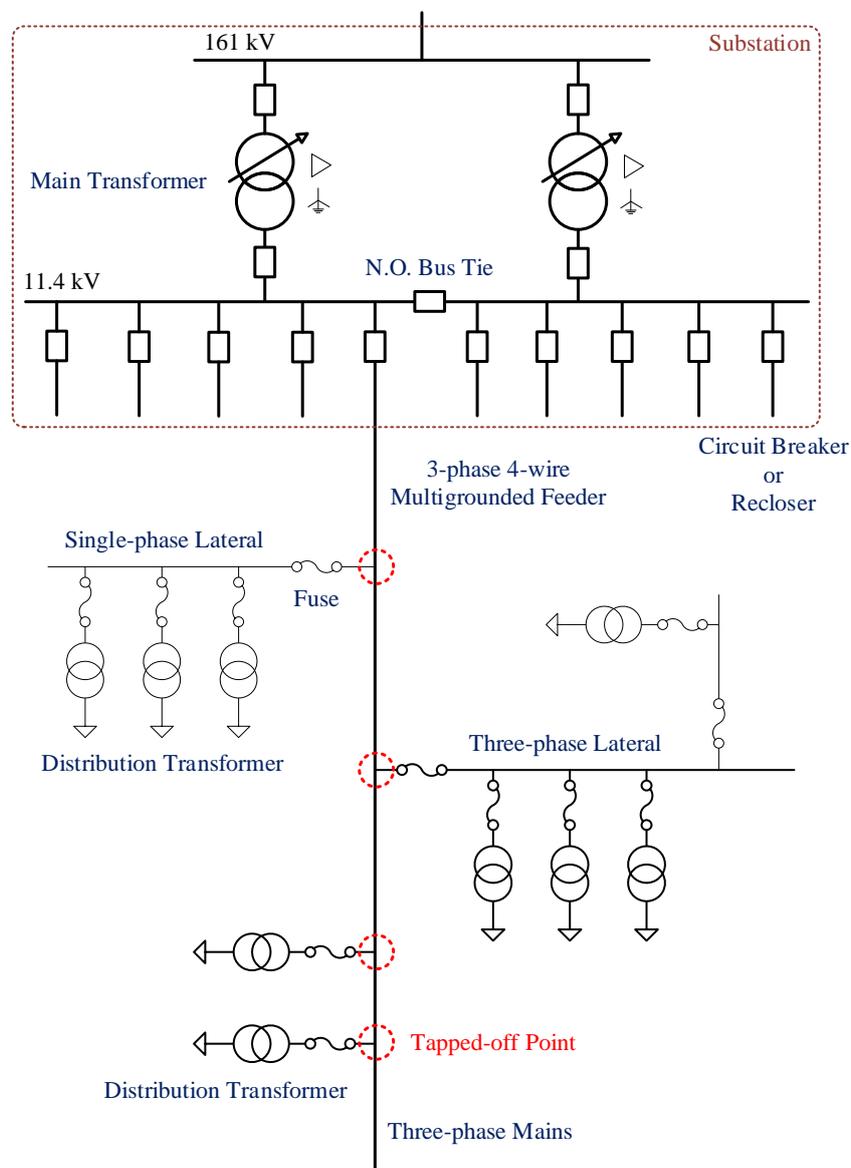


圖 20 典型變電所與饋線模型

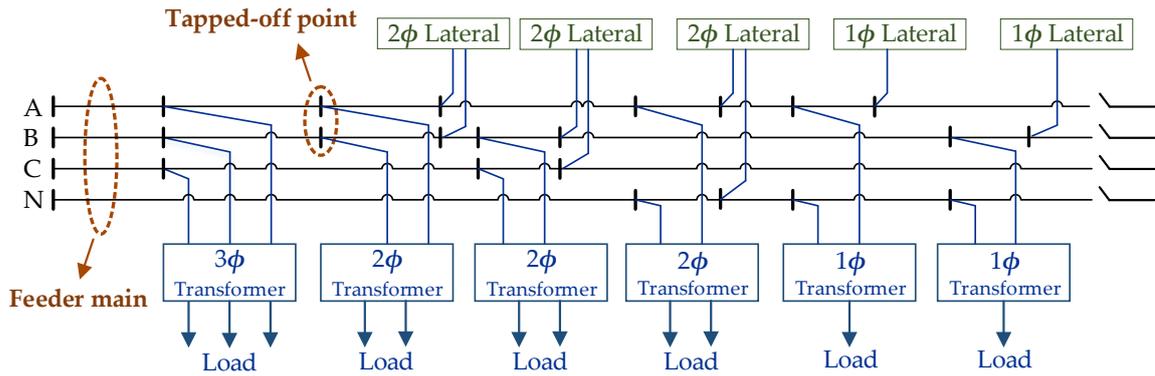


圖 21 三相四線配電饋線負載抽接示意圖

從台電所轉出的檔案中，可看到單相、兩相、三相變壓器，單相變壓器若在分歧線上，則整條進行換相，共有 3 種接法；兩相變壓器在分歧或主幹上則為 V-V 或 U-V 接，若在分歧線上同樣是兩條整條換相，共有 3 種接法；三相變壓器則共有 6 種接法。由於台電尚未提供變壓器相序資料，故目前不考慮相序問題。以群組之代理人表示每個變壓器或分歧線位置，以線路損失或者中性線電流為目標函數，進行迭代求解，如圖 22 所示。

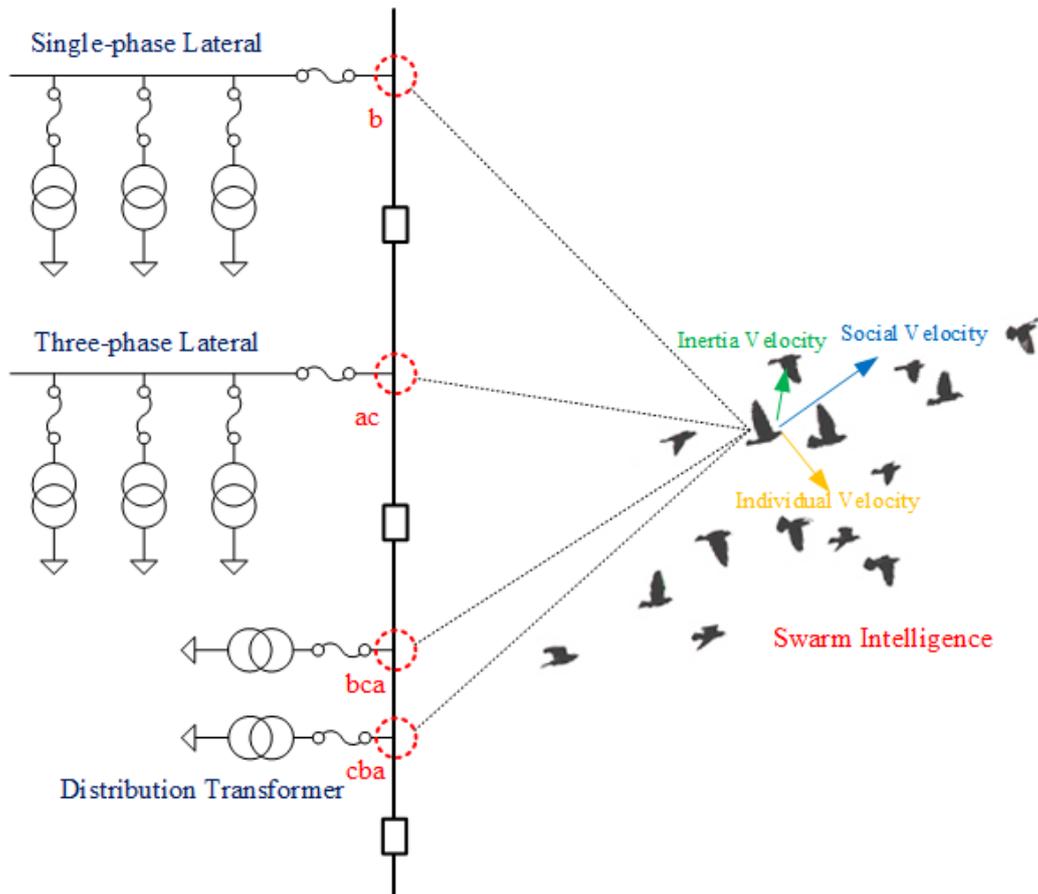


圖 22 群體智能演算法應用於淨負載相位平衡示意圖

參、主要發現與結論

一、整合區域配電網最佳化開關操作與淨負載平衡策略演算平台與使用者介面

圖 23 為模擬平台架構圖，採用 Python 之 tkinter 套件開發使用者介面，以及在使用者輸入參數後，透過 Python 對 OpenDSS 下指令執行最佳化饋線開關操作策略、開關序列策略、淨負載平衡策略模擬分析。圖 24 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，其電網拓樸、元件、歷史負載等皆是由 .set 與 .sql 資料轉出。該平台整合開關操作序列與淨負載平衡演算法，可供使用者選擇最佳化目標、模擬時間、標的系統、演算法種類及其參數、目標函數權重，以圖資系統呈現標的系統狀態並以文字視窗顯示當下模擬的情況說明。

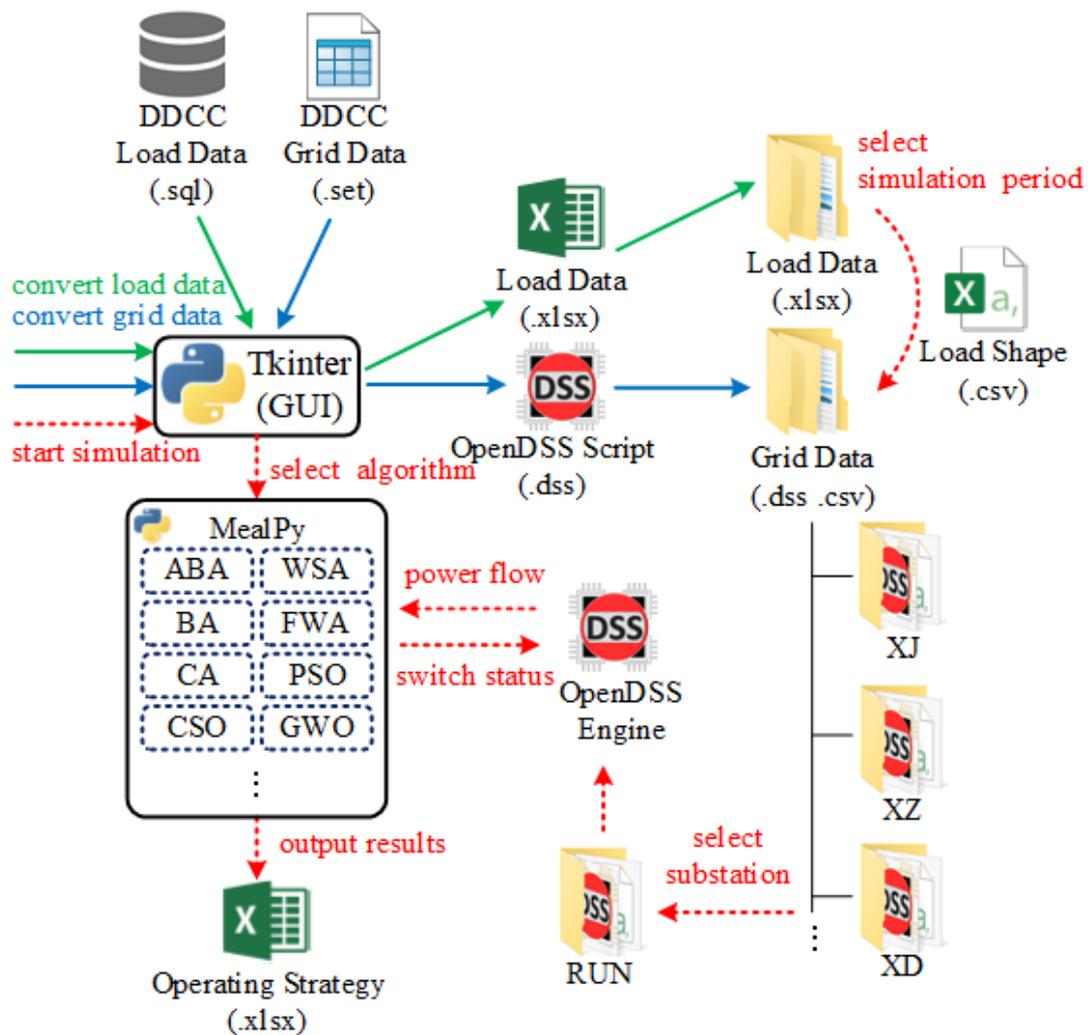


圖 23 模擬平台架構圖

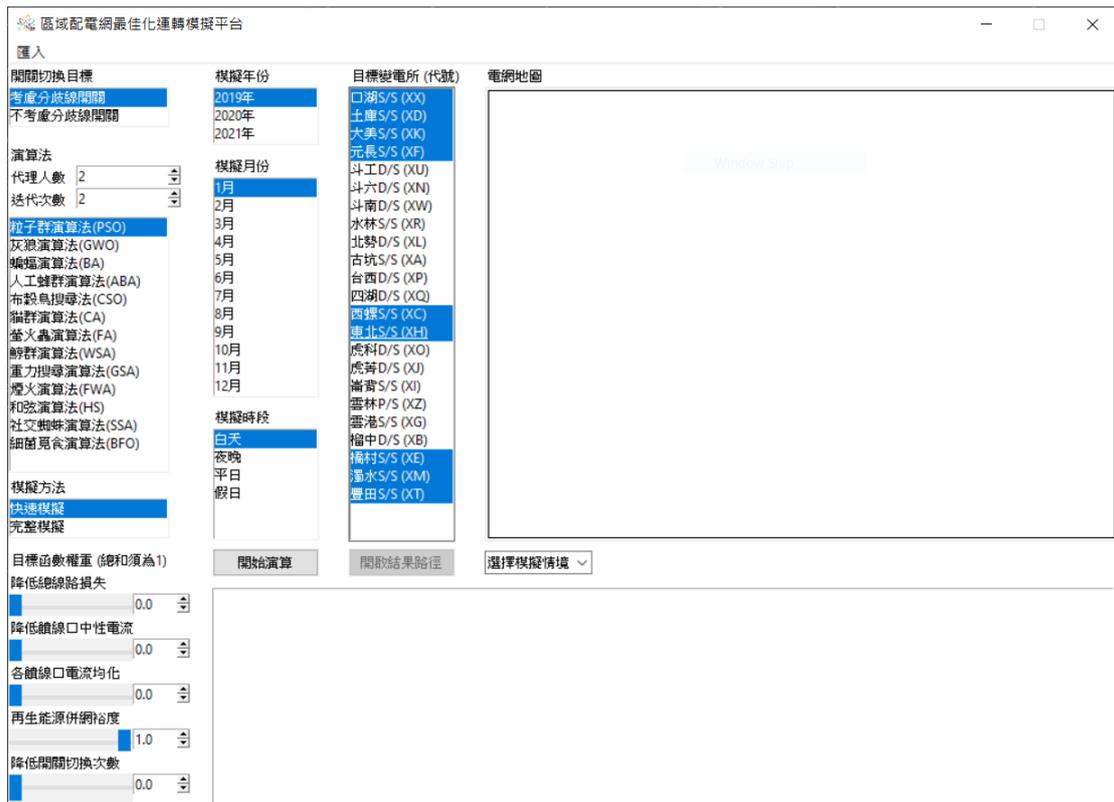


圖 24 使用者介面

圖 25 為檔案內容，其中包含主程式 mian.py，各功能程式.py 檔，以及各資料夾。其中，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。TPCdata)包含了台電雲林區處共 23 座變電所電網模型。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。

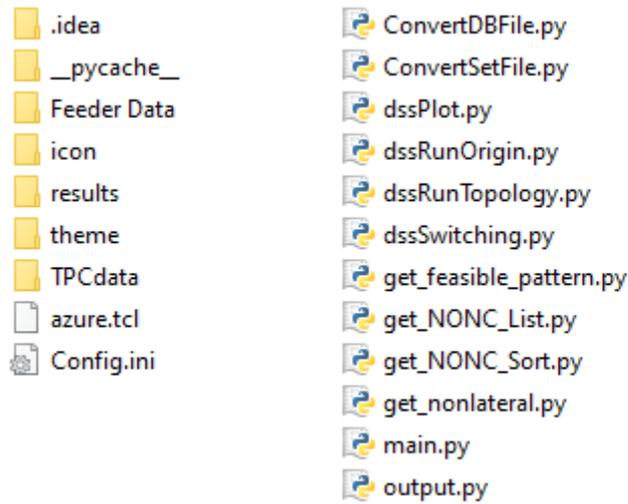


圖 25 平台後台資料夾與檔案內容

模擬結果輸出於資料夾 result 中，最佳化演算執行完成時將會儲存於以系統時間命名之資料夾，輸出之內容包含開關操作前後之電網地理資訊圖、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，以及建議之開關操作序列表、輸入紀錄與模擬輸出結果表，如圖 27、與圖 29 所示。

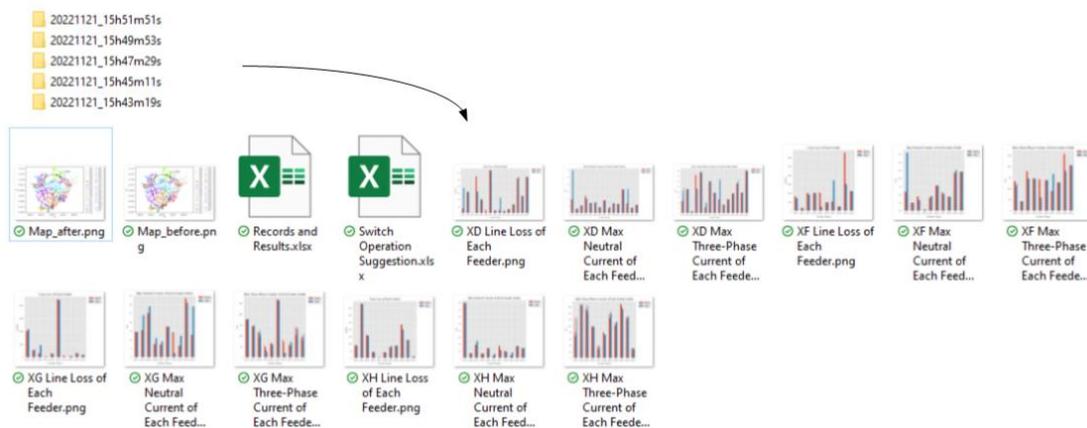


圖 26 模擬結果輸出資料夾(result)內容

開關操作順序	關閉之開關	開啟之開關	關閉開關所屬饋線	開啟開關所屬饋線	最大饋線出口電流變動率
1	K0468PC22-S01_NO	K0765BD40-S01	XE25, XE34	XE34	XE34: 21.8% (174.2 A→150.0 A)
2	K0455BA17-S06_NO	K0454BC11-S04	XE21, XE33	XE33	XE33: 49.3% (64.7 A→51.4 A)
3	K0065ED00-S01_NO	K0263HD21-S01	XE23, XE35	XE23	XE35: 43.4% (79.2 A→111.7 A)
4	K0355FD44-S08_NO	K0355FD44-J01	XE27, XE33	XE33	XE24: 0.0% (19.6 A→19.6 A)
5	K0454GC50-S01_NO	K0454BC11-S03	XE32, XE33	XE33	XE33: 60.8% (51.4 A→32.8 A)
6	K0765BC42-S01_NO	K0765EA80-S01	XE28, XE34	XE28	XE28: 81.0% (102.7 A→21.1 A)
7	K0557AA63-S01_NO	K0558BB90-S01	XE21, XE31	XE31	XE21: 20.1% (61.2 A→71.9 A)
8	K0354EC49-S06_NO	K0354EE6922-J01	XE21, XE27	XE27	XE21: 6.4% (71.9 A→74.4 A)
9	K0164FE72-S01_NO	K0565EE06-S01	XE23, XE30	XE30	XE30: 100.0% (222.0 A→1.8 A)
10	K0164FC91-S01_NO	K0364DA54-S01	XE23, XE30	XE23	XE23: 12.4% (151.0 A→143.8 A)
11	K0860EB03-S01_NO	K1065DA16-S01	XE28, XE32	XE28	XE32: 10.1% (205.7 A→219.2 A)
12	K0167FE09-S01_NO	K0565EE25-S01	XE25, XE35	XE35	XE35: 100.0% (191.1 A→0.0 A)
13	K0263HC62-S01_NO	K0164FB05-S01	XE23, XE26	XE23	XE26: 24.7% (67.9 A→77.9 A)
14	K0465BE98-S01_NO	K0366DA11-F01	XE25, XE30	XE30	XE25: 16.2% (160.1 A→138.8 A)
15	K0256BC06-S01_NO	K0357DD94-S04	XE26, XE27	XE27	XE27: 55.4% (55.6 A→42.8 A)
16	K0256HE14-S01_NO	K0256AD72-S01	XE26, XE27	XE26	XE35: 0.8% (0.0 A→0.0 A)
17	K0860EC72-S01_NO	K0857GD66-S01	XE28, XE32	XE32	XE32: 3.6% (218.7 A→226.5 A)
18	K0367DD23-F01_NO	K0267FD05-S01	XE25, XE30	XE25	XE25: 6.2% (139.4 A→144.2 A)
19	K0765DE84-S01_NO	K0667GC09-S01	XE28, XE34	XE34	XE34: 58.9% (143.6 A→75.6 A)

圖 27 建議開關操作序列表

	A	B	C	D
1	最佳化目標	饋線重組		
2	目標變電所	榴中D/S (XB), 大美S/S (XK), 濁水S/S (XM)		
3	模擬年份	2021年		
4	模擬月份	7月		
5	模擬時段	白天		
6	有效資料	12 / 12		
7	演算法	灰狼演算法(GWO)		
8	代理人數	10		
9	迭代次數	10		
10	目標函數權重			
11	降低總線路損失	0.0		
12	降低出口中性電流	0.0		
13	各饋線口電流均化	1.0		
14	提升再生能源併網裕度	0.0		
15	降低開關切換次數	0.0		

圖 28 輸入紀錄表

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	饋線名稱	線路損失(kWh)		最大出口中性電流(A)		最大出口三相電流(A)					
2		改善前	改善後	改善前	改善後	A相改善前	A相改善後	B相改善前	B相改善後	C相改善前	C相改善後
3	XD21	565.36	21.59	65.03	32.24	163.48	87.82	199.62	59.3	228.35	92.52
4	XD22	17.44	0	18.7	0	68.49	0.01	54.11	0.01	74.62	0.01
5	XD23	0.24	0.24	1.57	1.57	2.9	2.88	3.57	3.55	2.21	2.19
6	XD24	70.37	98.54	26.52	24.3	87.64	101.57	76.63	91.78	91.37	106.66
7	XD25	27.62	27.24	11.27	10.93	-63.22	62.87	-63.89	63.4	-63.58	63.02
8	XD26	13.33	13.53	8.01	7.95	-22.43	22.59	-23.16	23.37	-16.77	16.95
9	XD27	93.53	93.23	4.44	15.83	77.86	80.96	77.05	74.91	78.32	83.47
10	XD28	12.52	12.72	9.82	10.12	64.22	64.5	61.39	61.74	59.51	59.89
11	XD29	65.91	67.01	60.3	60.97	75.26	75.59	86.25	86.75	114.15	114.89
12	XD30	3.85	523.05	7.57	76.26	-20.69	98.62	-15.18	172.24	-19.84	177.74
13	XD31	40.13	39.63	89.79	89.57	-111.57	110.87	-83.11	82.37	-58.5	57.9
14	XD32	152.02	129.3	78.33	60.68	128.68	131.43	99.26	114.82	46.62	66.03
15	XD33	747.52	16.75	81.51	22.65	99.45	17.84	182.2	30.59	181.58	17.64
16	XD34	168.62	166.24	117.36	116.69	-81.48	80.98	77.15	76.43	120.24	118.97
17	XD35	101.81	100.32	53.79	53.9	-100.7	100.05	-93.47	92.61	-90.99	90.05
18	XF21	56.39	712.09	54.99	79.12	-74.12	266.66	-52.42	246.74	-45.09	225.24
19	XF22	49.26	0	17.9	0	-53.94	0.01	-42.15	0.01	-57.92	0.01
20	XF23	79.51	14.19	50.77	9.96	-143.46	60.22	-145.13	66.62	-104.94	56.1
21	XF24	108.25	109.74	4.84	4.99	-99.76	100.57	-97.08	97.85	-95.9	96.65
22	XF25	42.22	42.8	40.95	41.27	-38.84	39.15	-54.76	55.19	-38.65	38.96
23	XF26	56.16	13.86	14.97	14.27	-76.41	43.87	-76.29	33.96	-76.54	36.9
24	XF27	268.44	43.59	10.1	38.25	152.79	78.45	146.9	83.57	156.57	107.61
25	XF28	101.39	113.2	8.47	14.78	186.43	189.04	184.31	184.78	193.8	199.77
26	XF29	37.55	0.25	10.83	8.35	68.34	11.9	64.96	3.04	62.02	4.26
27	XF30	125.29	1016.15	22.37	52.55	100.93	234.18	107.05	271.6	126.08	299.44
28	XG21	111.61	496.59	48.05	59.13	96.11	203.93	103.07	227.5	141.49	268.77
29	XG22	54.73	30.87	15.54	22.08	132.36	89.99	136.26	103.28	131.12	87.36
30	XG23	122.19	45.9	37.91	36.47	172.91	111.79	156.13	110.48	134.54	74.19
31	XG24	182.72	117.44	35.5	58.95	186.94	148.42	175.47	156.41	148.63	103.22
32	XG25	124.56	1.84	24.51	8.21	70.66	12.77	94.81	4.42	94.47	12.16
33	XG31	153.58	260.04	25.73	38.72	-111.99	134.69	-112.56	141	-113.3	137.09
34	XG32	155.78	157.63	20.38	20.94	187.56	189.11	210.08	211.78	194.62	195.92
35	XG33	70.15	356.53	10.39	53.16	121.32	214.34	130.04	231.41	118.18	170.85
36	XG34	30.2	8.34	40.04	12.8	85.34	54.48	77.35	46.48	41.18	39.46
37	XG35	104.88	110.65	53.54	61.47	134.44	140.9	196.16	202.61	163.76	178.12
38	最大值	747.52	1016.15	117.36	116.69	187.56	266.66	210.08	271.6	228.35	299.44
39	總和	4115.13	4961.09								
40											
41	開關切換數	70									

圖 29 模擬輸出結果表

二、 模擬數值結果

本節呈現本研究三大配電網最佳化運轉策略之模擬數值結果，分別為饋線開關長期操作、饋線開關長期操作序列、三相淨負載平衡。

(一) 饋線開關長期操作序列模擬結果

本小節呈現繼前小節之開關操作策略之操作序列最佳化模擬，表 1 所示為 XE S/S 在該開關作策略下之投切順序，開關投切之最大電流變化為 55.3A。

表 1 單一變電所開關操作模擬結果-開關操作序列

操作順序	切開開關	投入開關	切開開關所屬饋線	投入開關所屬饋線	最大饋線出口電流變動率
1	K0455BA17-S06_NO	K0355HB4748-J01	XE21, XE33	XE21	XE33: 29.1% (64.9 A→77.0 A)
2	K0354EC49-S06_NO	K0354EC49-J05	XE21, XE27	XE21	XE24: 0.0% (19.6 A→19.6 A)
3	K0256BC06-S01_NO	K0255HD8050-S04	XE26, XE27	XE27	XE27: 12.1% (56.7 A→56.0 A)
4	K0565FE46-S01_NO	K0465BE08-S01	XE24, XE30	XE30	XE24: 407.2% (19.6 A→74.9 A)
5	K0164FE72-S01_NO	K0263BD40-S01	XE23, XE30	XE23	XE23: 12.5% (151.5 A→170.5 A)
6	K0167FE09-S01_NO	K0268DB56-F01	XE25, XE35	XE25	XE21: 0.0% (52.3 A→52.3 A)
7	K0860EB03-S01_NO	K1060HB50-S01	XE32, XE28	XE32	XE21: 0.0% (52.3 A→52.3 A)
8	K0860EC72-S01_NO	K0859EB18-S01	XE32, XE28	XE32	XE21: 0.0% (52.3 A→52.3 A)
9	K0765DE84-S01_NO	K0867HB32-S01	XE34, XE28	XE28	XE21: 0.0% (52.3 A→52.3 A)
10	K0468FC22-S01_NO	K0665EE32-S01	XE25, XE34	XE34	XE21: 0.0% (52.3 A→52.3 A)
11	K0355FD44-S08_NO	K0355GD87-J01	XE33, XE27	XE33	XE21: 0.0% (52.3 A→52.3 A)
12	K0265DC33-S01_NO	K0565EE36-S01	XE35, XE30	XE30	XE21: 0.0% (52.3 A→52.3 A)
13	K0267BE72-F01_NO	K0266EC83-S01	XE25, XE35	XE25	XE30: 100.0% (37.8 A→0.0 A)

(二) 最佳淨負載平衡模擬結果

本小節以單一饋線以及多饋線兩個模擬分析案例，呈現三相淨負載平衡最佳化策略。首先以大美 S/S (XK)之饋線 XK30 於 2021 年 7 月日間平均負載為例，目標函數為總線路損失，圖 30、圖 31、圖 32 分別呈現變壓器相別調整前後饋線口最大三相電流、最大中性電流、線路總損失，可看出饋線三相電流趨於平衡，最大中性線電流下降 3.1 A，進而降低 12 小時總線路損失 1.9 kWh。圖 33 為饋線地理資訊圖，圖 34 為本次使用粒子群演算法(20 顆粒子、20 次迭代)之迭代過程，錯誤! 找不到參照來源。為變壓器相別調整結果，因篇幅問題無法全部呈現。

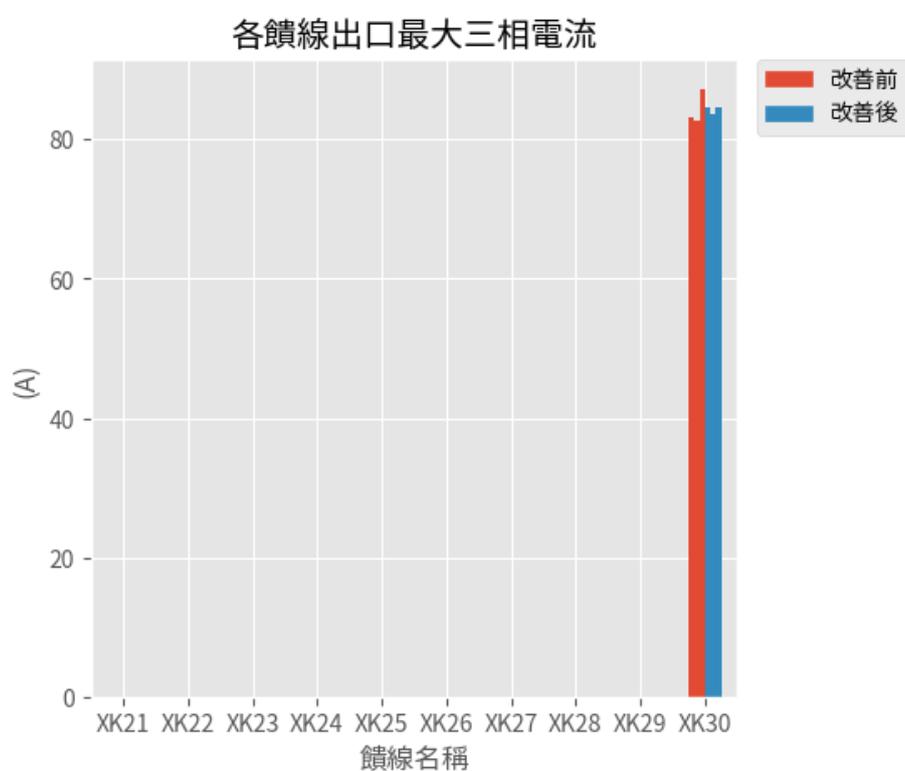


圖 30 單一饋線三相負載平衡結果-饋線 XK30 最大三相電流

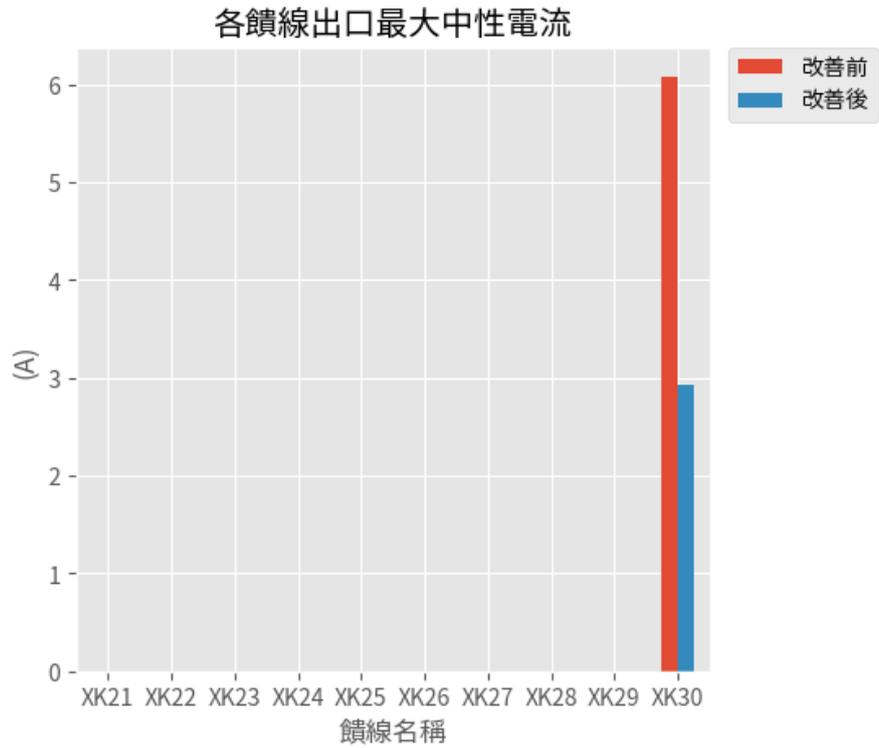


圖 31 單一饋線三相負載平衡結果-饋線 XK30 口最大中性電流

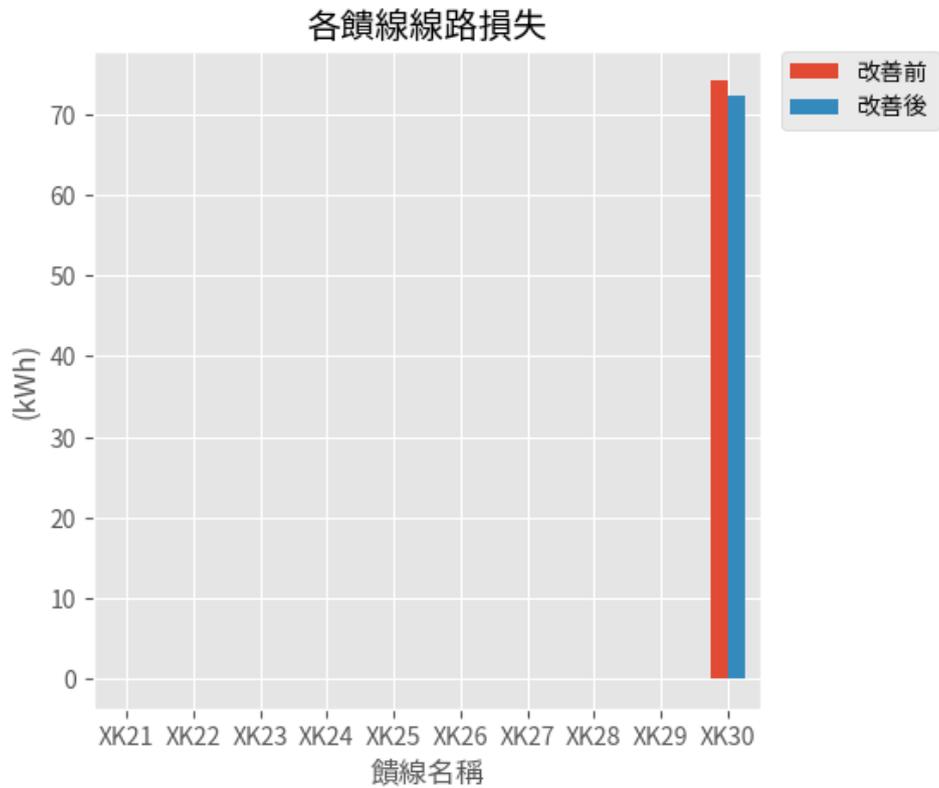


圖 32 單一饋線三相負載平衡結果-饋線 XK30 總線路損失

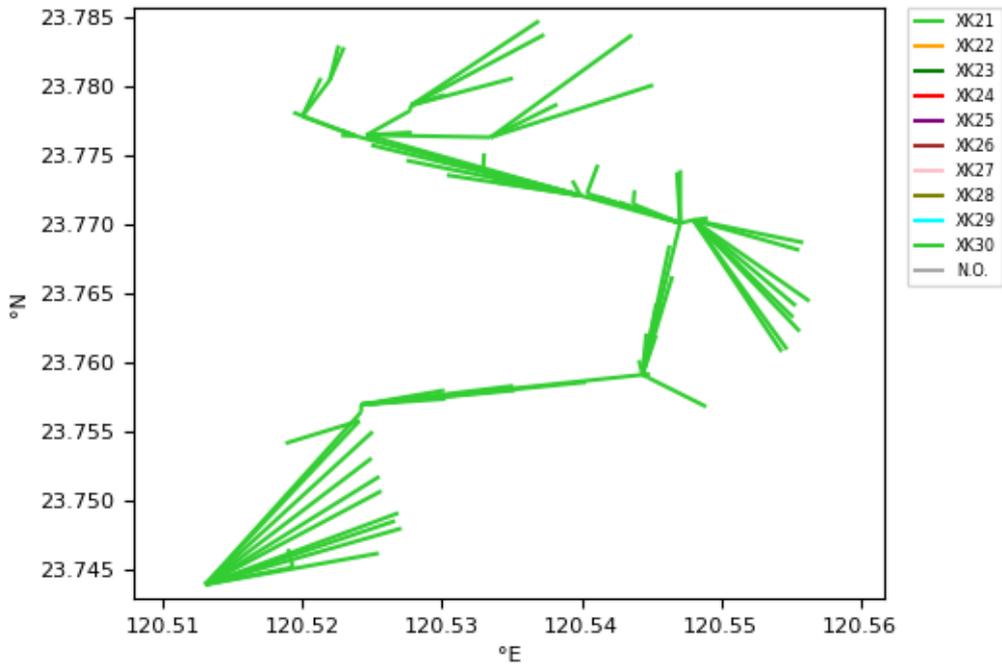


圖 33 單一饋線三相負載平衡結果-饋線 XK30 地理資訊

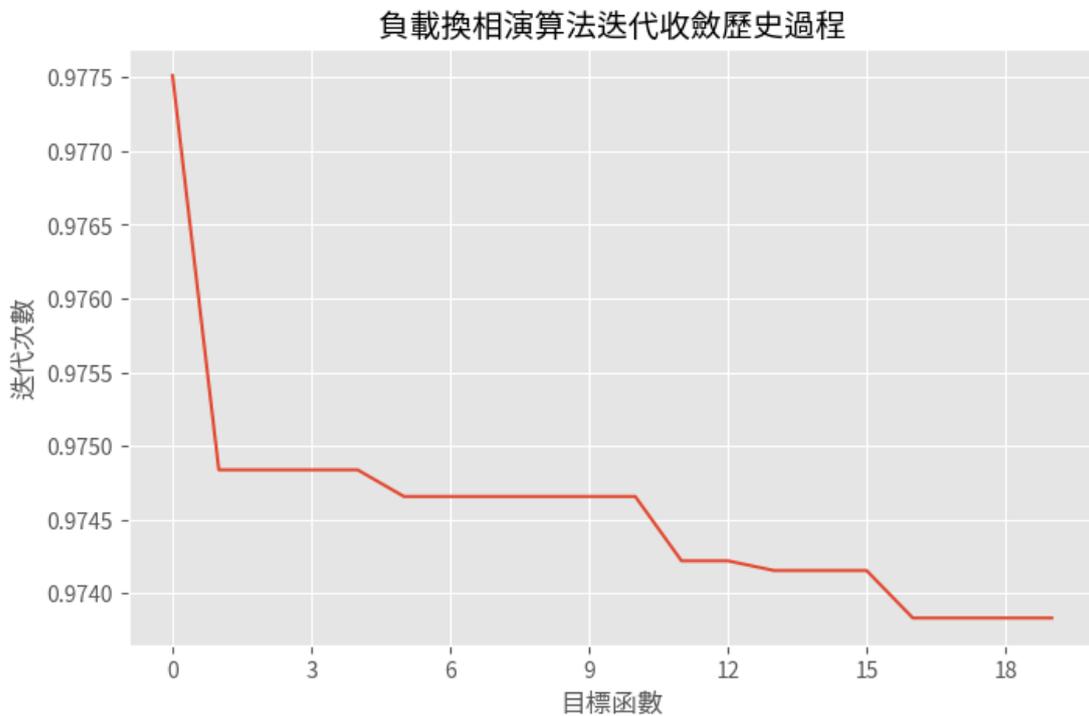


圖 34 單一饋線三相負載平衡結果-粒子群演算法迭代過程

以大美 S/S (XK)於 2021 年 7 月白天平均負載為例，目標函數為總線路損失，圖 35、圖 36、圖 37 分別呈現變壓器相別調整前後饋線口最大三相電流、最大中性電流、線路總損失，可看出饋線三相電流趨於平衡，最大中性線電流下降 27.6

A，進而降低 12 小時總線路損失 11.2 kWh。為圖 38 饋線地理資訊圖，圖 39 為本次使用麻雀演算法(50 隻麻雀、30 次迭代)之迭代過程。

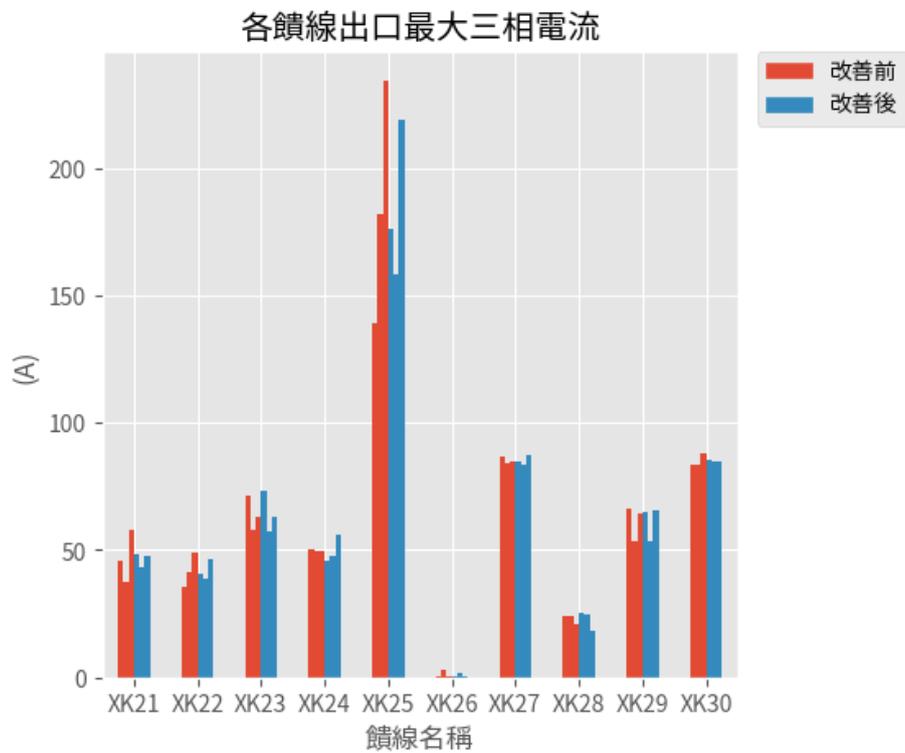


圖 35 多饋線三相負載平衡結果-XK S/S 最大三相電流

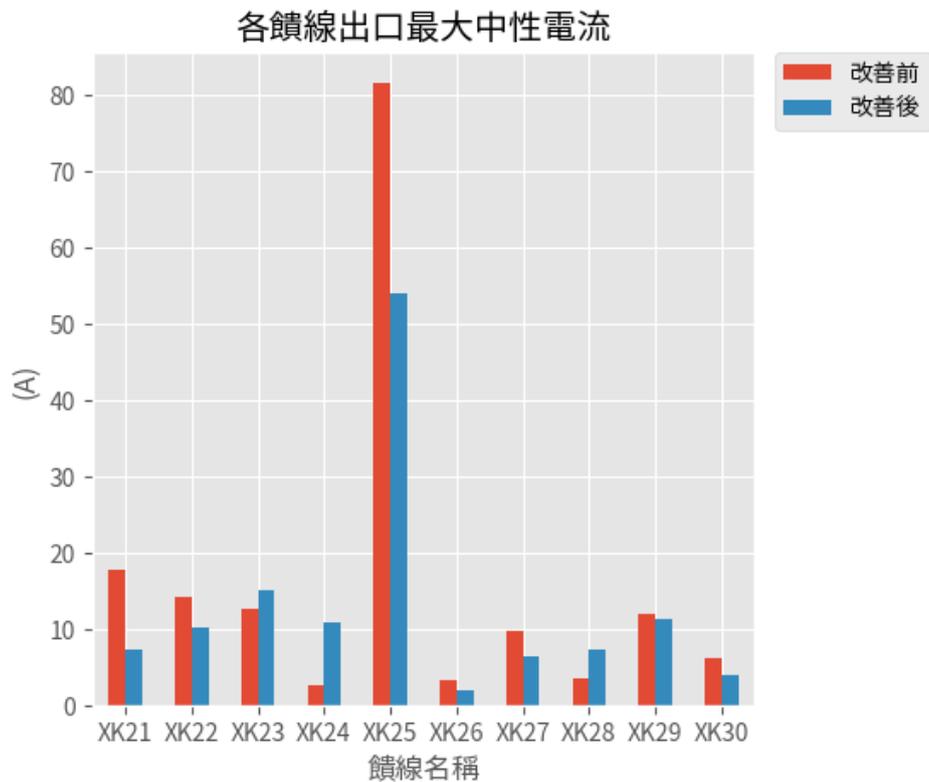


圖 36 多饋線三相負載平衡結果-XK S/S 口最大中性電流

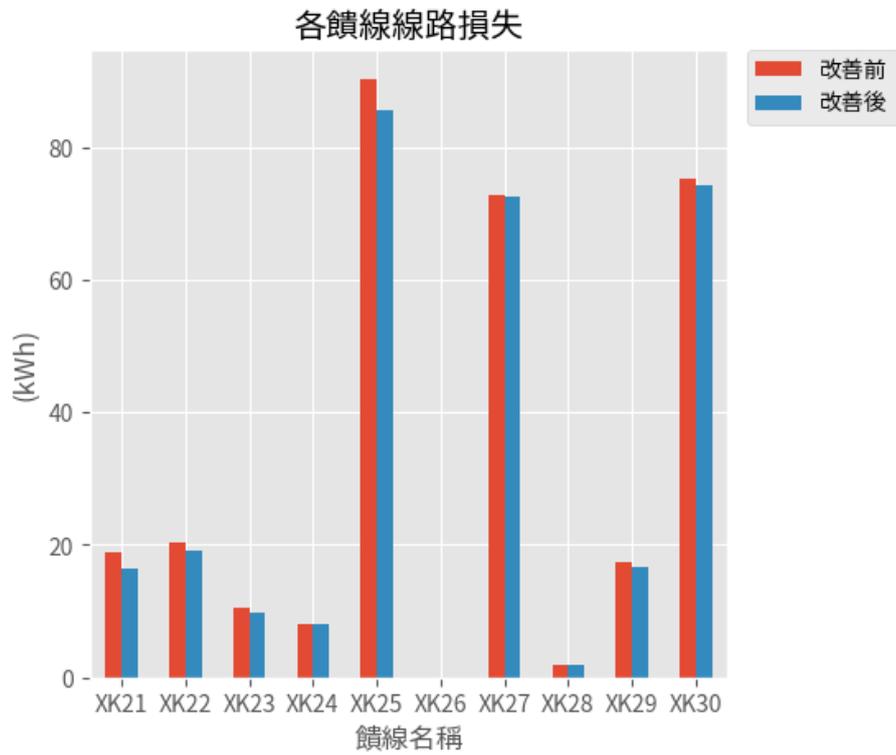


圖 37 多饋線三相負載平衡結果-XK S/S 總線路損失

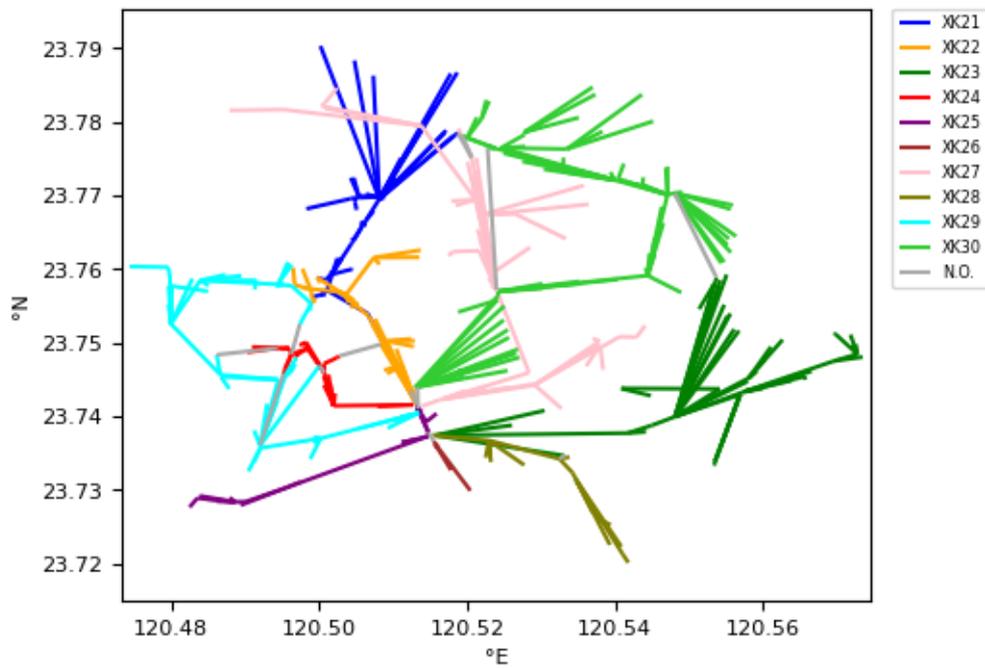


圖 38 多饋線三相負載平衡結果-XK S/S 地理資訊

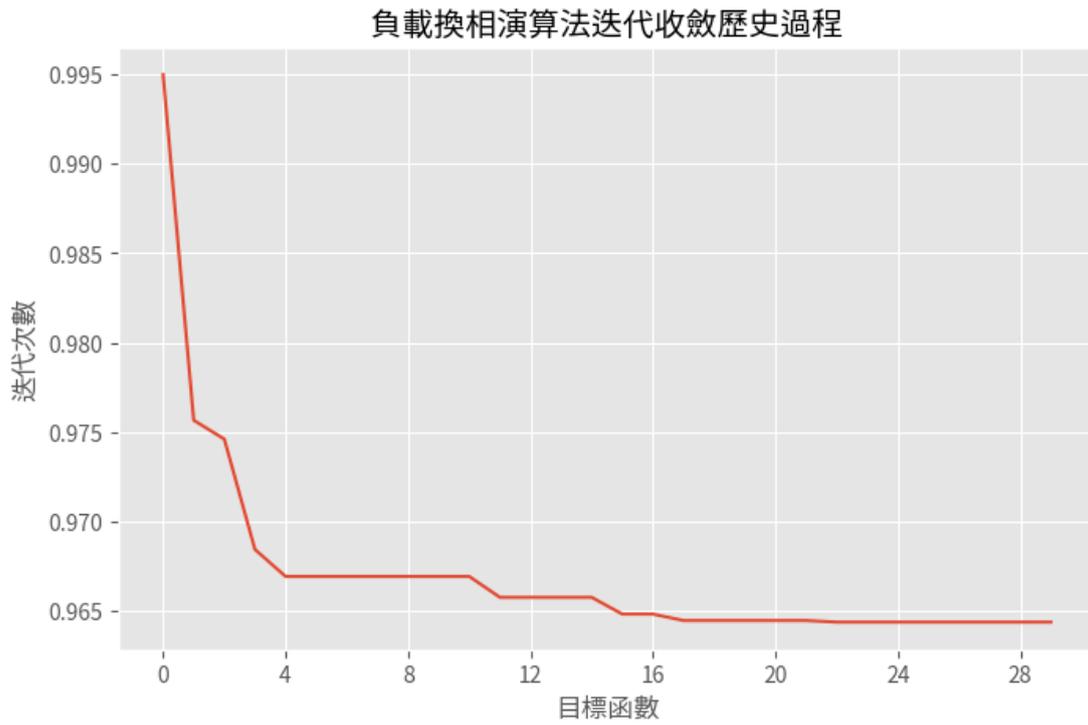


圖 39 多饋線三相負載平衡結果-麻雀演算法迭代過程

三、 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以及再生能源併網裕度之相關文獻，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擴大分析範圍之整合區域電網最佳化饋線長期開關操作序列與三相淨負載平衡模擬平台與使用者介面，其透過台電雲林區處變電所之拓樸資料、FTU 歷史負載資料，自動化建立 OpenDSS 電網模型；並透過所開發之開關操作與序列演算法配合群體智慧演算法，以減少線路損失、中性線電流、平衡饋線負載、提高再生能源最大併網容量為目標，達到以使用者導向之最佳化運轉目標，並可輸出產生相關結果與開關建議報表。模擬結果顯示本研究所開發之模擬平台無論在饋線、變電所，到多個變電所皆可正常運作並提供電網運轉人員相關建議。此外，本研究亦測試 ETAP 軟體在開關投切序列管理功能，並與 OpenDSS 相比其各層面之優劣。

表 2 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，並完成建立一自動化電網開關操作序列策略與三相淨負載平衡平台與使用者介面，研究成果將現有台電具改善空間之問題以實際系統資料配合人工智慧演算法進行最佳化，深具實務價值與學術貢獻。

表 2 本計畫執行甘特圖

工作項目 \ 月	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
蒐集並研究國內外饋線最大再生能源併網容量評估方法之文獻。											
研究電力系統模擬軟體開關切換序列功能及測試。											
開發饋線開關長期操作策略，提高再生能源併網容量。		※									
開發饋線開關長期操作序列策略，降低開關操作對電網之衝擊。											
擴大分析範圍之饋線開關配置演算法開發。					※						
開發區域配電網之主饋線最佳淨負載平衡演算法。											
開發區域配電網之整合主饋線最佳淨負載平衡與開關長期操作演算法。								※			
開發區域配電網最佳化開關操作與淨負載平衡策略平台與使用者介面。											
研究成果彙整與與期末報告撰寫。											※
工作進度估計百分比 (累積數)	20%	30%	40%	45%	50%	60%	70%	80%	85%	95%	100%
預定查核點	第 1 季：完成開發饋線開關長期操作策略，提高再生能源併網容量。										
	第 2 季：完成開發擴大分析範圍之饋線開關配置演算法開發。										
	第 3 季：完成開發區域配電網之整合主饋線最佳淨負載平衡與開關長期操作演算法。										
	第 4 季：完成開發區域配電網最佳化開關操作與淨負載平衡策略平台與使用者介面。										

肆、參考文獻

- [1]. https://www.moea.gov.tw/MNS/populace/Policy/Policy.aspx?menu_id=32800&policy_id=9
- [2]. https://public.tableau.com/app/profile/doenergy/viz/_10794/Dashboard1
- [3]. <https://hcweb.taipower.com.tw/geohc/>
- [4]. I. Dukovska, J. Morren and H. J. G. Slootweg, "Switching Sequence Optimization for Service Restoration in Distribution Networks," *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, 2020, pp. 6-10, doi: 10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248817.
- [5]. H. Sekhavatmanesh and R. Cherkaoui, "A Multi-Step Reconfiguration Model for Active Distribution Network Restoration Integrating DG Start-Up Sequences," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 4, pp. 2879-2888, Oct. 2020, doi: 10.1109/TSTE.2020.2980890.
- [6]. L. T. Marques, A. C. B. Delbem and J. B. A. London, "Service Restoration With Prioritization of Customers and Switches and Determination of Switching Sequence," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2359-2370, May 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2675344.
- [7]. L. T. Marques, A. C. B. Delbem and J. B. A. London, "Service Restoration With Prioritization of Customers and Switches and Determination of Switching Sequence," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2359-2370, May 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2675344.
- [8]. J. C. López, J. F. Franco, M. J. Rider and R. Romero, "Optimal Restoration/Maintenance Switching Sequence of Unbalanced Three-Phase Distribution Systems," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6058-6068, Nov. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2703152.
- [9]. W. T. Elsayed, H. Farag, H. H. Zeineldin and E. F. El-Saadany, "Dynamic Transitional Droops for Seamless Line-Switching in Islanded Microgrids," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 6, pp. 5590-5601, Nov. 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3069852.
- [10]. Z. Du, X. Chu and W. Zhang, "Cooperative sequential reconfiguration for

- distribution networks," *2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2015.7386960.
- [11].D. Fioriti and D. Poli, "Fault localization to improve power system quality in distribution networks: a greedy approach to optimize the switching sequence of remotely-controlled devices," *2021 IEEE Madrid PowerTech*, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/PowerTech46648.2021.9494897.
- [12].M. H. M. Camillo et al., "Determination of switching sequence of Service Restoration in Distribution Systems: Application and analysis on a real and large-scale radial system," *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/TDC.2016.7520034.
- [13].I. Watanabe and M. Nodu, "A genetic algorithm for optimizing switching sequence of service restoration in distribution systems," *Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.04TH8753)*, 2004, pp. 1683-1690 Vol.2, doi: 10.1109/CEC.2004.1331098.
- [14].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。
- [15].R. K. Varma and V. Singh, "Review of Studies and Operational Experiences of PV Hosting Capacity Improvement by Smart Inverters," *2020 IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC)*, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPEC48502.2020.9320116.
- [16].I. A. Essackjee and R. T. F. Ah King, "Increasing Rooftop Photovoltaic Hosting Capacity Using Optimal Placement for Voltage Improvement in Secondary Distribution Network," *2020 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/icABCD49160.2020.9183855.
- [17].R. A. Jacob and J. Zhang, "Distribution Network Reconfiguration to Increase Photovoltaic Hosting Capacity," *2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281922.
- [18].Z. Zhang, K. Wang, Q. Zhao, Y. Tian and L. Li, "Positive Sequence Current Phase-Based Improved Reverse-Power Protection and a PV Hosting Capacity Assessment Method for Spot Networks," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 42529-42539,

- 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977323.
- [19].S. K. Sahu and D. Ghosh, "Photovoltaic Hosting Capacity Increment in an Unbalanced Active Distribution Network," 2021 1st International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICPEE50452.2021.9358688.
- [20].M. S. S. Abad and J. Ma, "Photovoltaic Hosting Capacity Sensitivity to Active Distribution Network Management," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 1, pp. 107-117, Jan. 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3007997.
- [21].B. Wang, C. Zhang, Z. Y. Dong and X. Li, "Improving Hosting Capacity of Unbalanced Distribution Networks via Robust Allocation of Battery Energy Storage Systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 3, pp. 2174-2185, May 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3029532.
- [22].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.
- [23].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.
- [24].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/TSSTE.2018.2819201.
- [25].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 *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 2265-2269, 10 2017, doi: 10.1049/oap-cired.2017.0848.
- [26].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/TSSTE.2016.2529627.
- [27].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.
- [28].T. M. Aljohani, A. Saad and O. A. Mohammed, "Two-Stage Optimization Strategy

- for Solving the VVO Problem Considering High Penetration of Plug-In Electric Vehicles to Unbalanced Distribution Networks," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 4, pp. 3425-3440, July-Aug. 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3077547.
- [29]. A. Jafari, H. Ganjeh Ganjehlou, T. Khalili, B. Mohammadi-Ivatloo, A. Bidram and P. Siano, "A Two-Loop Hybrid Method for Optimal Placement and Scheduling of Switched Capacitors in Distribution Networks," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 38892-38906, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2975714.
- [30]. P. Díaz, M. Pérez-Cisneros, E. Cuevas, O. Camarena, F. A. Fausto Martinez and A. González, "A Swarm Approach for Improving Voltage Profiles and Reduce Power Loss on Electrical Distribution Networks," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 49498-49512, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2868814.
- [31]. X. Huang, Z. Xie and X. Huang, "Fault Location of Distribution Network Base on Improved Cuckoo Search Algorithm," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 2272-2283, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2962276.
- [32]. H. Shan, Y. Sun, W. Zhang, A. Kudreyko and L. Ren, "Reliability Analysis of Power Distribution Network Based on PSO-DBN," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 224884-224894, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007776.
- [33]. T. Fetouh and A. M. Elsayed, "Optimal Control and Operation of Fully Automated Distribution Networks Using Improved Tunicate Swarm Intelligent Algorithm," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 129689-129708, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3009113.
- [34]. C. Gerez, L. I. Silva, E. A. Belati, A. J. Sguarezi Filho and E. C. M. Costa, "Distribution Network Reconfiguration Using Selective Firefly Algorithm and a Load Flow Analysis Criterion for Reducing the Search Space," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 67874-67888, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2918480.
- [35]. Q. Chen, W. Wang, H. Wang, J. Wu and J. Wang, "An Improved Beetle Swarm Algorithm Based on Social Learning for a Game Model of Multiobjective Distribution Network Reconfiguration," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 200932-200952, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3035791.
- [36]. 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.

[37]. R. A. Pegado and Y. P. M. Rodriguez, "Distribution Network Reconfiguration with the OpenDSS using Improved Binary Particle Swarm Optimization," in IEEE Latin America Transactions, vol. 16, no. 6, pp. 1677-1683, June 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8444386.

[38]. H. Sekhavatmanesh and R. Cherkaoui, "A Multi-Step Reconfiguration Model for Active Distribution Network Restoration Integrating DG Start-Up Sequences," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 11, no. 4, pp. 2879-2888, Oct. 2020, doi: 10.1109/TSTE.2020.2980890.

[39]. K. Prasad, R. Ranjan, N. C. Sahoo and A. Chaturvedi, "Optimal reconfiguration of radial distribution systems using a fuzzy mutated genetic algorithm," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1211-1213, April 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2005.844245.