

國家原子能科技研究院
委託研究計畫研究報告

配電饋線三相負載變動與不平衡改善之策略研究

**Study on Three-Phase Unbalance Improving Strategies Considering
Load Variations of Distribution Feeders**

計畫編號：112A010

受委託機關(構)：國立彰化師範大學

計畫主持人：黃維澤

研究期程：中華民國 112 年 1 月至 112 年 12 月

研究經費：新臺幣 65 萬元

國原院聯絡人員：蔡穆昆

報告日期：112 年 12 月 11 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.....	6
三、 文獻探討.....	7
(一) 一般三相不平衡改善方法.....	7
(二) 現代三相不平衡先進改善方法.....	7
貳、 研究方法與過程	9
一、 正常與非正常運轉拓樸下電力潮流與三相不平衡率	9
(一) 非正常運轉之全饋線轉供.....	9
(二) 非正常運轉之饋線分段轉供.....	17
二、 配電饋線之分散式能源與負載統計模型	23
三、 三相不平衡目標式與改善策略	30
(一) 三相不平衡問題與目標式.....	30
(二) 最佳化相別配置演算法.....	33
參、 主要發現與結論	39
一、 區域配電網三相不平衡改善模擬平台	39
二、 模擬數值結果	41
(一) 三相不平衡改善指標-三相電壓不平衡率	41
(二) 三相不平衡改善指標-零序電壓不平衡率	42
(三) 三相不平衡改善指標-負序電壓不平衡率	44
(四) 三相不平衡改指標-中性電流	46
三、 結論.....	48
肆、 參考文獻.....	50

中文摘要

為因應現代配電網負載變動與不平衡問題，本計畫建立區域配電網三相負載平衡最佳化模擬平台。在配電自動化架構下可從配電調度中心(DDCC)與饋線調度中心(FDCC)獲得匯流排電壓、電流、實功、虛功，與饋線元件等資料，使電網資訊掌握度愈趨完整。故本計畫以實際配電網資訊建立饋線模型，再調整饋線之負載抽接點相別以改善三相不平衡問題，進而降低電壓與電流不平衡率、零序與正序電壓不平衡率、中性線電流、線路損失，提高饋線電力品質。本計畫將台電區域電網資料以及歷史負載資料以程式語言轉換為配電系統模擬開源工具 OpenDSS 檔案，透過 API 進行饋線拓樸調整並獲得正常運轉與非正常運轉之三相電力潮流，搭配最佳化演算法求解最佳三相負載最適配置，研究成果有助於改善目前配電網併入分散式資源後之三相不平衡程度。

英文摘要

To address the issues of load variations and imbalance in modern distribution system, this project aims to establish a simulation platform for optimizing three-phase load balancing in regional distribution networks. Based on the distribution automation, comprehensive data such as bus voltages, currents, real power, active power, and feeder elements can be obtained from the distribution dispatch and control center (DDCC) and feeder dispatch and control center (FDCC), resulting in a more complete understanding of the power grid. Therefore, this project utilizes actual distribution network information to create a feeder model. The load tapped-off points are then adjusted to improve three-phase imbalance issues, consequently reducing voltage and current imbalances, zero-sequence and negative-sequence voltage imbalances, neutral line currents, line losses, and enhancing feeder power quality. This project involves converting Taiwan Power Company's regional grid data and historical load data into OpenDSS files, a distribution system simulator, using Python programming language. The feeder topology adjustments are performed through an API, obtaining three-phase power flow under normal and abnormal operating conditions, and employing optimal algorithms to solve for the optimal three-phase load arrangement. The outcomes are helpful for improving the unbalanced conditions of distribution networks after the interconnection of distribution energy resources.

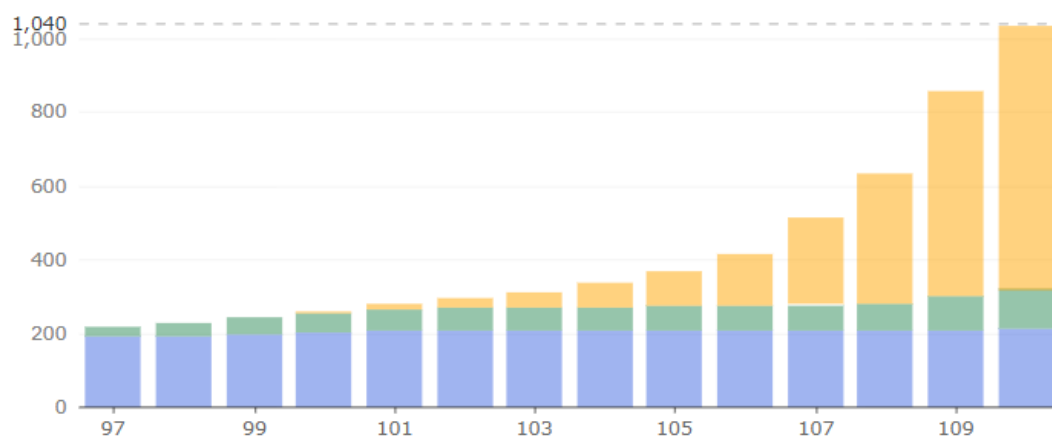
壹、計畫緣起與目的

一、計畫緣起

負載變動不僅是電力調度上所面臨的挑戰，亦是配電系統運轉與控制上的一大困難。除傳統動態以及靜態負載，如住宅型、工業型、商業型、住商混合型等負載模型，大量再生能源併網也造成配電網不小的衝擊。我國政府積極發展再生能源，太陽光電和離岸風電是主要推動項目，針對太陽光電，政府陸續實施了「太陽光電 2 年推動計畫」、「109 年 6.5 GW 達標計畫」和「地面型專案」等政策，旨在達到 2025 年太陽光電總裝置容量達到 20 GW 的目標。在風力發電方面，透過「風力發電 4 年推動計畫」，專注於陸域風電和離岸風電的發展。對於離岸風電，政府採取了先示範、次潛力、後區塊的 3 階段策略，並在 2019 年底完成了首座離岸示範風場（128 MW），預計到 2025 年，風力發電的裝置容量將達到 6.9 GW。此外，針對用電大戶，已於 2020 年 12 月底公告用電大戶條款，明確了契約容量在 5,000 kW 以上的用電大戶需履行相應的義務。這包括設置再生能源發電設備、購買再生能源電力及憑證、設置儲能設備，以及繳交相應的代金等。圖 1 所示為台電系統歷年再生能源裝置容量[2]，其中以太陽光電為最大宗。根據「台電再生能源發電系統併聯技術要點」，低於 100 kW 發電設備得併接於單相三線 110 V/220 V 或三相三線 220 V 或三相四線 220 V/380V 系統；100 kW 以上未滿 500 kW 者得併接於三相四線 220 V/380V 系統；100 kW 以上未滿 10 MW 者得併接於 11.4 kV 系統；100 kW 以上未滿 20 MW 者得併接於 22.8 kV 系統。併接於 11.4 kV 與 22.8 kV 者在正常及轉供條件下允許逆送至上一電壓等級之最大電力不得超過主變壓器之 80%；且其責任分界點電壓變動率在加計同一饋線已核准發電設備後應在 3% 以內。綜上所述，大量的小型太陽光電併入配電網影響電壓變動甚鉅，這也將連帶造成配電饋線之負載變動以及不可控因素提高，其中單相太陽光電之不確定性也可能造成三相不平衡率提高。

台電系統歷年再生能源裝置容量

單位: 萬瓩



110 年再生能源裝置容量結構



圖 1 台電系統歷年再生能源裝置容量[2]

此外，為確保電力系統的穩定性，台電於 2021 年底推出電力交易平台，專責負責維持電網頻率所需的儲能系統提供的「調頻備轉」服務。據台電統計，目前已經通過可調度的容量約為 54.5 MW。然而，民間業者對參與調頻輔助的儲能量的登記申請已經達到 4.5 GW，遠超過政府在 2025 年所制定的 1 GW 的目標。[3]。而 5 MW 儲能系統須參與長效型調頻備轉(EdReg)，若併入配電系統，對其衝擊可見一斑。而提到儲能系統，則不可不考慮現今電動車充電對於電網之影響。截至 2022 年 9 月，台灣電動車共銷售 10,344 輛，與 2021 年相比，成長高達 25%，將來在下班後期間大量的充電需求，加上此時太陽光電驟降，將嚴重影響電力調度以及配電系統之電壓變動。在另一方面，除了目前電動車的使用方式，即由電網供應電力至電動車電池，這種過程被稱為「Grid to Vehicle」(G2V)。相反地，「Vehicle-to-Grid」(V2G) 充電樁設備被視為一種分散式電源，可成為電網的極佳備援電力。為應對電動車數量增長帶來的用電需求，各大充電樁設備供應商已

經開始投入研發 V2G 充電樁。[4]。隨著未來充電需求增加，電動車將成為「移動式的行動電源」，提供電網的電力需求，而此技術也又更考驗電力公司的運轉控制能力。

為了將變電所電力饋送至各個負載，或者為了將分散式能源送至鄰近電網甚至逆送回變電所，大量配電變壓器分散在配電網中。台電之配電饋線為三相四線多重接地之結構，主幹線上除了單相、三相配電變壓器，亦有單相、兩相、或者三相分歧線從主幹線拉至各地區之用戶。加上台電為了節省空間與成本，裝設大量的非對稱結構變壓器如 U-V 接等，將三相負載轉為兩相電，造成嚴重的三相不平衡。綜上所述，隨機變動之三相負載、單相或兩相分歧線，以及非對稱結構之變壓器為台電三相不平衡之主要因素。

二、計畫目的

根據上述背景，本計畫研究在分散式電源與負載組合之配電饋線下，如何改善三相不平衡。首先，蒐集國內外之相關文獻，並探討傳統、現代，以及先進之相位調整方法。為了應用在實際電網中，本研究蒐集由配電調度中心(DDCC)與饋線調度中心(FDCC)之饋線實際量測負載、饋線拓樸、變壓器相別與接線等資料進行饋線建模，並建立配電饋線之分散式能源與負載統計模型，以利分析三相不平衡改善前後之淨負載特性，亦可簡化潮流解析時間。接著，在不同拓樸架構下進行電力潮流解析，並分析不同架構下三相不平衡率。最後，研擬配電饋線三相不平衡改善之目標式，以高性能且快速求解之群體智能演算法進行負載抽接點之相位重新配置，以改善三相不平衡改善，所提出之方法預期可改善配電饋線之三相電壓不平衡率、零序電壓不平衡率、負序電壓不平衡率、降低中性線電流、線路損失等。

三、文獻探討

為提供清潔、穩定且安全的電力供應，全球先進國家正積極投入智慧電網、提升配電網運轉相關研究和實際系統建置，包括穩定配電網供電品質、最佳配置配電結構、再生能源高滲透以及需求面負載管理。在這方面，國內的專家學者也積極參與相關研究，包括本計畫涉及的研究範疇，例如再生能源高滲透對輸配電系統穩定度的影響、分散式能源的模擬分析、再生能源預測與穩定度模擬、配電網狀態估測、配電網饋線的最佳重構方式以及最佳三相負載配置。然而，目前的研究仍未充分整合台電區域實際系統資料，特別是在配電網最佳化三相負載配置方面，以改善不平衡率等電力品質指標。因此，這突顯了本計畫提出的研究方向的前瞻性和急迫性。接下來，將分別詳細說明與本研究計畫相關的研究現況。

(一) 一般三相不平衡改善方法

在變動負載下之三相不平衡改善策略，文獻[5]提出了一種基於細菌覓食之粒子群演算法(BF-PSO)之分歧線與配電變壓器相位調整策略。該問題的目標函數包括配套饋線的中性點電流、調相成本、電壓降以及線損。在文獻[6]中，提出了一種啟發式回溯搜索算法來調整主饋線和分歧線的三相配置，以實現配電網之相位平衡。該作者選取一條有 2754 個用戶的實際饋線進行模擬並充分考慮其負載特性。文獻[7]和[8]提出了免疫算法來推導分歧線和配電變壓器的相位安排，並選取台電 271 家用戶之實際饋線進行模擬，測試饋線中性點電流已降低至中性點過流限值以下。文獻[9]設計了一個專家系統來推導分歧線和配電變壓器的三相平衡策略，在台電工程師執行策略後，由 SCADA 系統採集測試饋線的相電流和中性電流，以驗證其能夠實際降低中性電流。文獻[10]提出了一種用於最佳化相位調整之混合整數規劃公式。

(二) 現代三相不平衡先進改善方法

除了一般配電變壓器與分歧線調整，文獻[11]整理了改善三相不平衡之各種方法，其中包含使用儲能系統以及電力電子之相位平衡設備等。S. M. Fazeli 開發了一種單相解耦實虛功控制邏輯之分散式靜態同步補償器 (Distributed Static Synchronous Compensator, DSTATCOM)，以重新平衡三相實功與電壓[12][13]。S. Yan 等人開發了一種新的三相 Electric spring (ES)及其控制邏輯，用於智慧建築的

三相負載平衡[14]。F. Shahnian 等人為 DSTATCOM 開發了最佳位置與控制方法以達到相位平衡[15]。A. Alsulami 等人評估了靜態無功補償器 (Static Var Compensator, SVC) 在減輕網絡電壓/電流的負序成分方面之動態性能[16]。H. Chiu 等人開發了一種用於三相功率因數校正轉換器之均流方法，以消除三相電流不平衡[17]。S. Beharrrysingh 開發了一種靜態平衡器，它本質上是一個互連的星形自耦變壓器，用於低壓網絡中的相位平衡[18]。S. Liu 等人基於之客戶相位識別數據[19]，開發了一種在線相位切換方法以減輕相位不平衡，其實質上是開發了一種整合相位識別和在線切換技術。相位平衡器的一個優點是對不斷變化的三相不平衡具強大的適應性；換句話說，相位平衡器可在線重新平衡三相以響應不斷變化的三相不平衡。

控制分散式能源改善三相不平衡先進作法方面，S. Chen 等人開發了一種用於相位平衡之博弈方法，其中非合作博弈激勵電動車對於電網和電動車充電皆有利[20]。S. Sun 等人開發了儲能控制法，以平衡負載不確定性下之各階段控制[21]。T. Hong 等人制定了直流微電網集中運行方案，在尖峰負載下實現變電站變壓器三相全面平衡；若微電網容量不足，則部分達三相平衡[22]。P. Lico 等人開發了一種控制算法，用於協調和控制單相電動車充電器以實現相位平衡[23]。KH Chua 等人開發了一種儲能控制策略，輔助單相太陽光電以執行相位平衡[24]。C. C. Bajo 等人開發了一種用於三相太陽光電之單相控制策略以執行相位平衡[25]。F. Shahnian 等人發了一種用於單相太陽光電變流器的控制方法，提供無功功率從而減少電壓不平衡[26]。E. VegaFluentes 等人制定了單相電動車充電與三相電源之協調策略；當充電開始時，充電器將連接到饋線的輕載相別，降低三相不平衡，並增加電動車之可併網容量[27]。

貳、研究方法與過程

本研究針對台電區域配電網之三相不平衡問題進行改善，在建立台電電網模型後，在正常與非正常拓樸下執行電力潮流解析並分析其三相不平衡率，並建立配電饋線分散式能源與負載統計模型以加速潮流解析並觀察其三相負載特性。最後，研究三相不平衡目標式並以演算法求解其改善策略。

一、 正常與非正常運轉拓樸下電力潮流與三相不平衡率

電力系統除一般正常運轉，故障或變電所設備預防性維護所引發的饋線轉供也是必須考量的運轉情境，本節首先提出非正常運轉之饋線模型切換策略，在進一步針對其三相不平衡進行分析。

(一) 非正常運轉之全饋線轉供

在故障發生時，通常會啟動故障偵測、隔離、恢復機制(Fault detection, isolation, restoration, FDIR)，故障區域定位後執行饋線開關跳脫，並投入另一端地常開開關進行饋線轉供，達到恢復供電。而變電所預防性維護時，通常也不會操作太多饋線開關，將饋線斷路器(Feeder circuit breaker, FCB)跳脫並投入另一側常開開關，由另一條饋線負擔原本兩條饋線的負載。圖 2 顯示了維護饋線負載轉移之大多數情況，其中灰色部分為停電轉供之饋線。以台電系統而言，配電變電所(Distribution substation, D/S)有雙繞組或三繞組的 161 kV/11.4 kV 或 161 kV/22.8 kV 變壓器，容量為 60 MVA；而二次變電所(Secondary substation, S/S)中的變壓器為雙繞組的 161 kV/11.4 kV 25 MVA。饋線全停之負載轉移可以在變電所外部進行，亦可在變電所內部進行，但必須在非維護中的主變壓器。其中較特別的是，若一條饋線無法轉移到正常運行的饋線，則可以先轉移到一條維護饋線，在將兩條饋線一起轉供。圖 3 是所提出之負載轉移策略工作流程， s' 是能夠將饋線 f' 轉移到正常運行饋線的常開開關； s'' 是能夠將饋線 f'' 轉移到已轉移至正常運行饋線之維護饋線的常開關。如果有任何饋線無法轉移到正常運行的饋線，則結束流程。

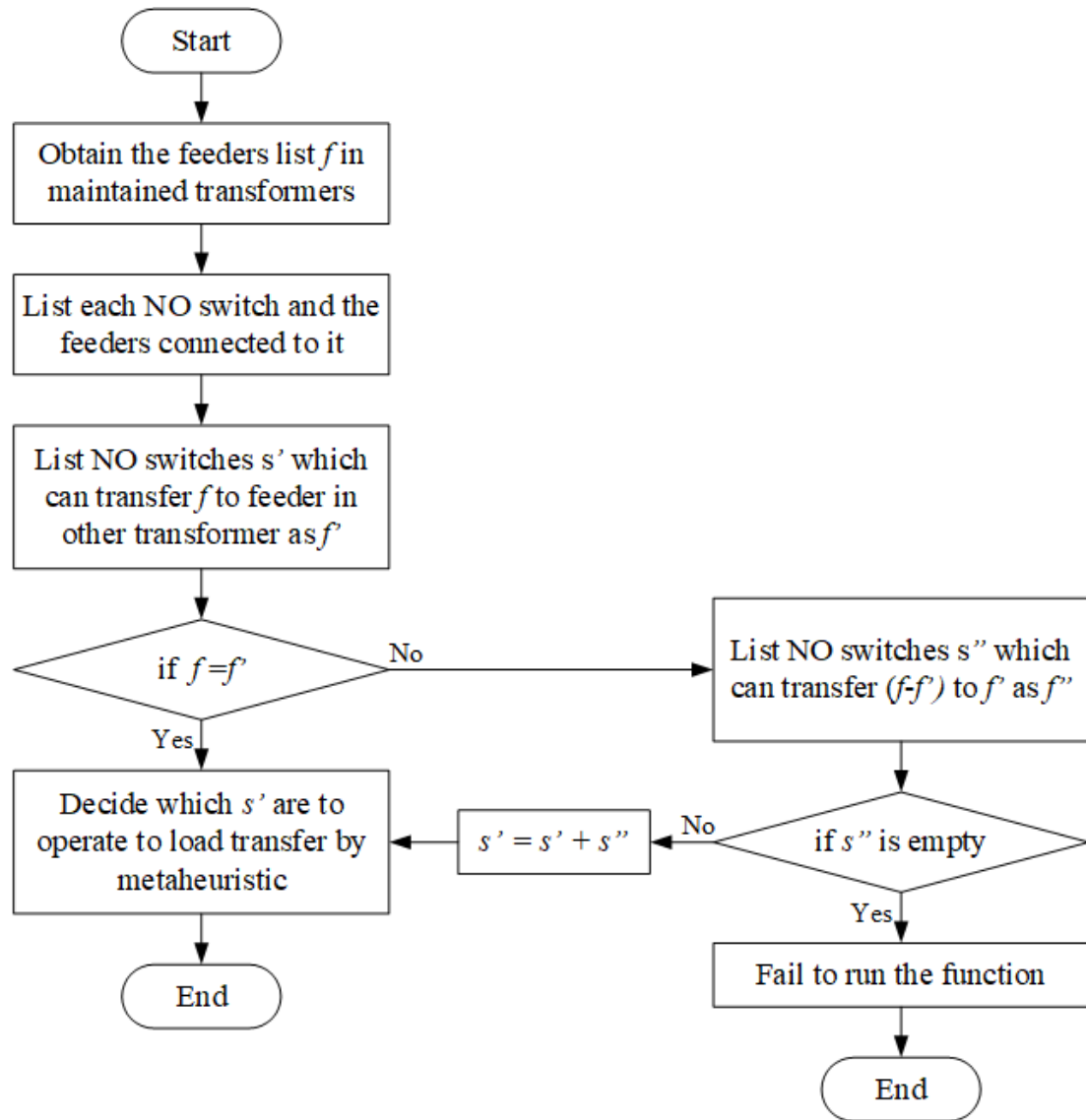


圖 3 停電轉供流程

陣列 s' 包含所有能夠將維護的饋線轉移到其他饋線之常開開關。以圖 4 為例，有四個常開開關可以將饋線 $f1$ 轉移到 $f5$ ，三個常開開關可以將 $f3$ 轉移到 $f5$ 或 $f6$ ，四個常開開關可以將 $f4$ 轉移到 $f5$ 或 $f7$ 。即使沒有常開開關可以將 $f2$ 轉移到正常運行的饋線，兩個常開開關也可以將 $f2$ 轉移到 $f1$ 或 $f3$ ，而其又可以轉移到 $f5$ 和 $f6$ ，已完成轉供。綜上所述，轉供問題有著多種排列組合的可能，本研究採用群體智能演算法，每個個體代表著每個轉供饋線使用的常開開關，在饋線電流與主變壓器容量限制下，可藉由群體不斷迭代後收斂至最佳或者次佳解，求得轉供結果。

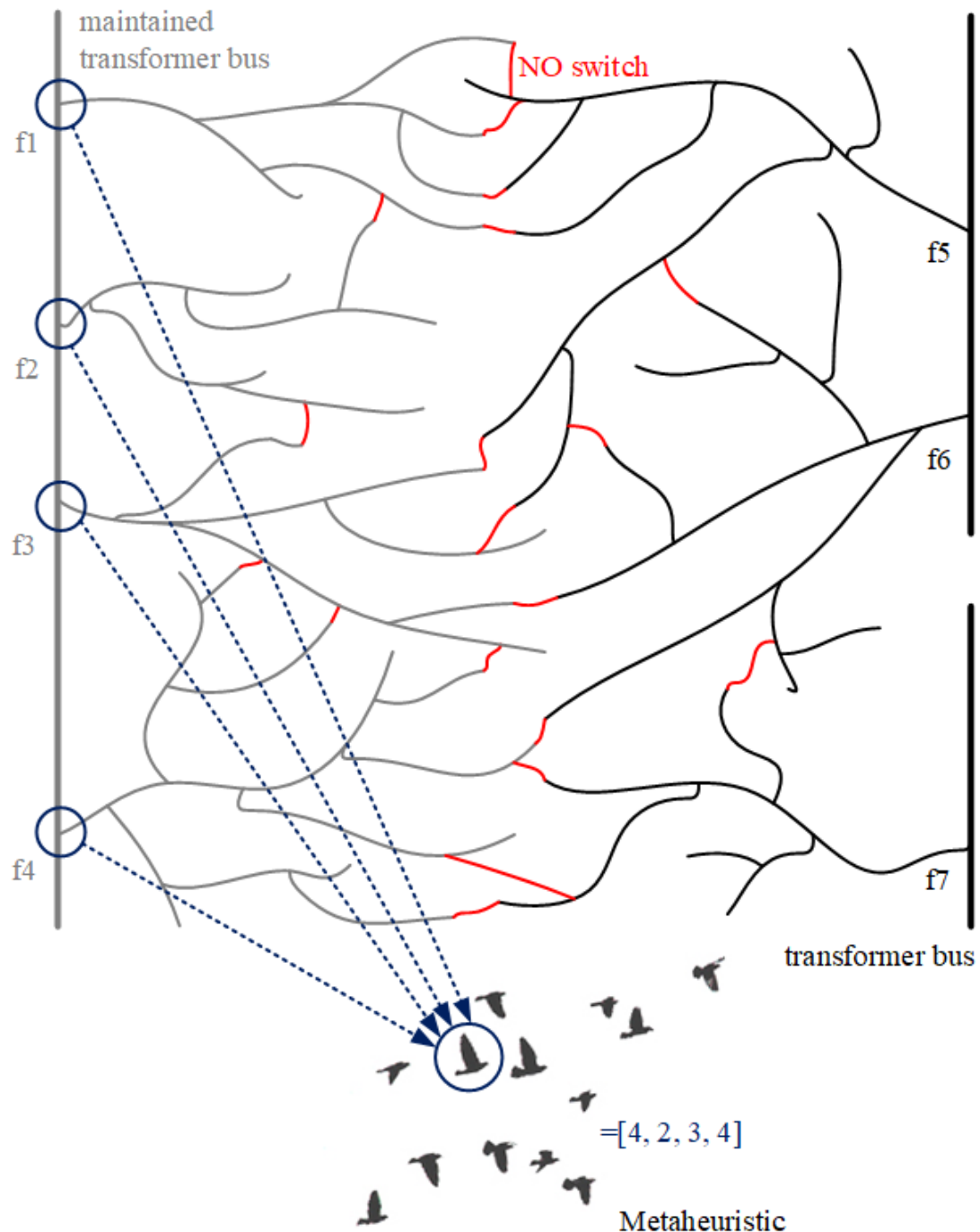


圖 4 應用群體智能演算法於停電轉供示意圖

以下由台電實際配電網為例，進行上述全饋線停電轉供策略模擬。在 3 個變電所 B、C、E 中，模擬變電所 B 之主變壓器 B#1 進行停電維護，其下游所有饋線轉供，為了防止轉供後單一條饋線電流過高，演算法之目標函式為最小化所有饋線電流之統計標準差，這意味著轉供後各饋線負載要盡可能均衡分布。此次模擬採用鯨群演算法(Whale optimization algorithm, WOA)，鯨群數量與迭代次數與分別為 100。圖 5 與圖 6 分別為經演算法之轉供前後之地理圖資資訊，可看出饋

線 B21~B25 被轉供至其他條饋線。

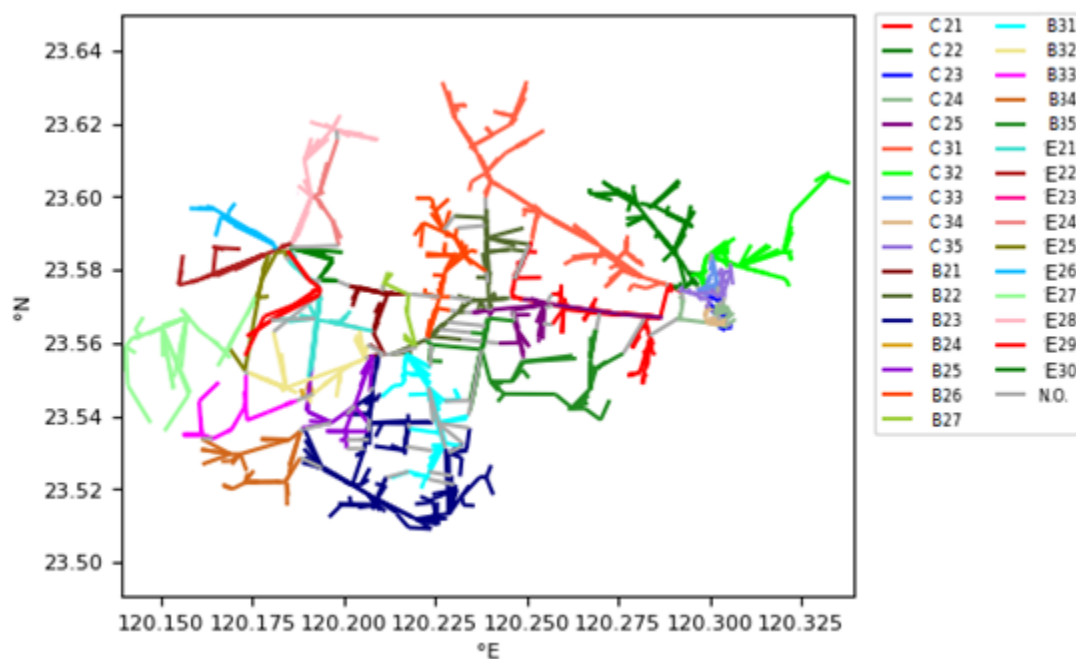


圖 5 全饋線轉供之地理圖資-轉供前

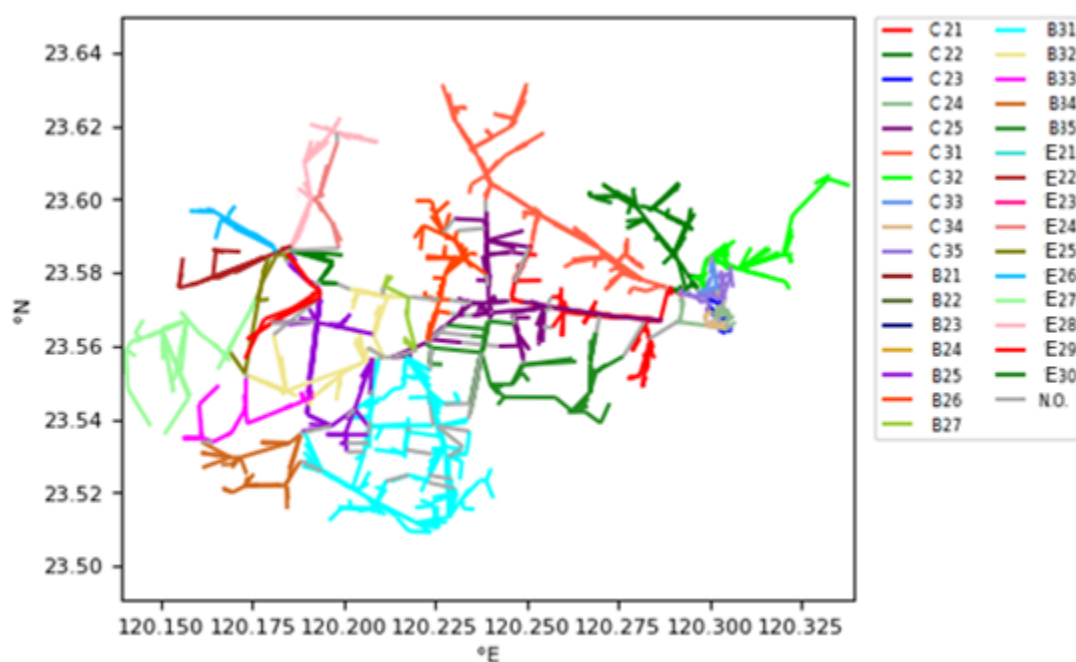


圖 6 全饋線轉供之地理圖資-轉供後

圖 7、圖 8，與圖 9 分別為全饋線轉供前後之各變電所下游各饋線電流，可看出饋線 B21~B25 被轉供至饋線 B31、C25，以及 E21。其中饋線 B31 之 A 相最大電流將超過 400A。

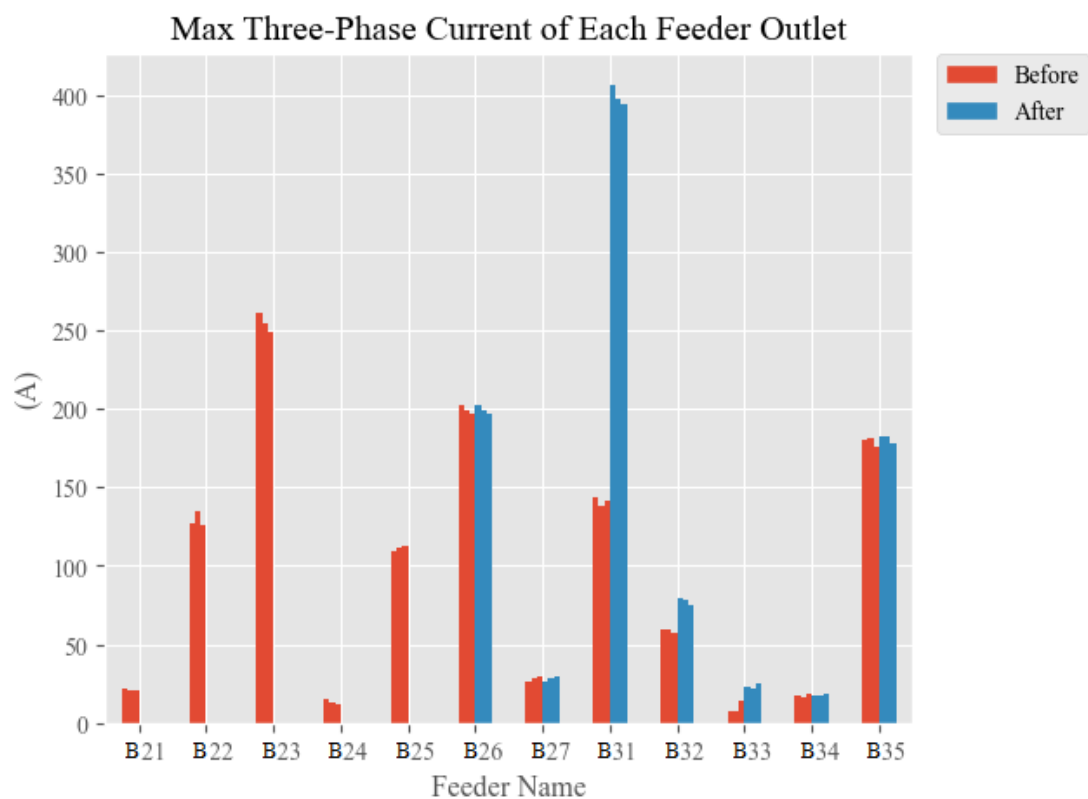


圖 7 全饋線轉供前後之變電所 B 各饋線電流

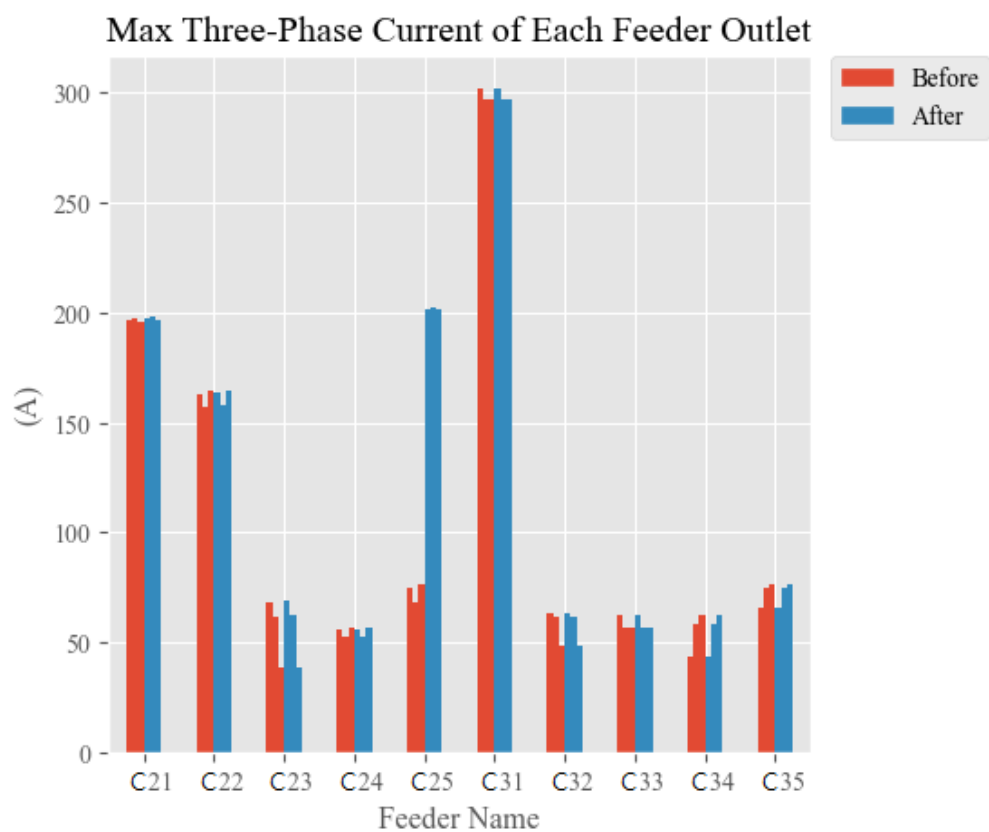


圖 8 全饋線轉供前後之變電所 C 各饋線電流

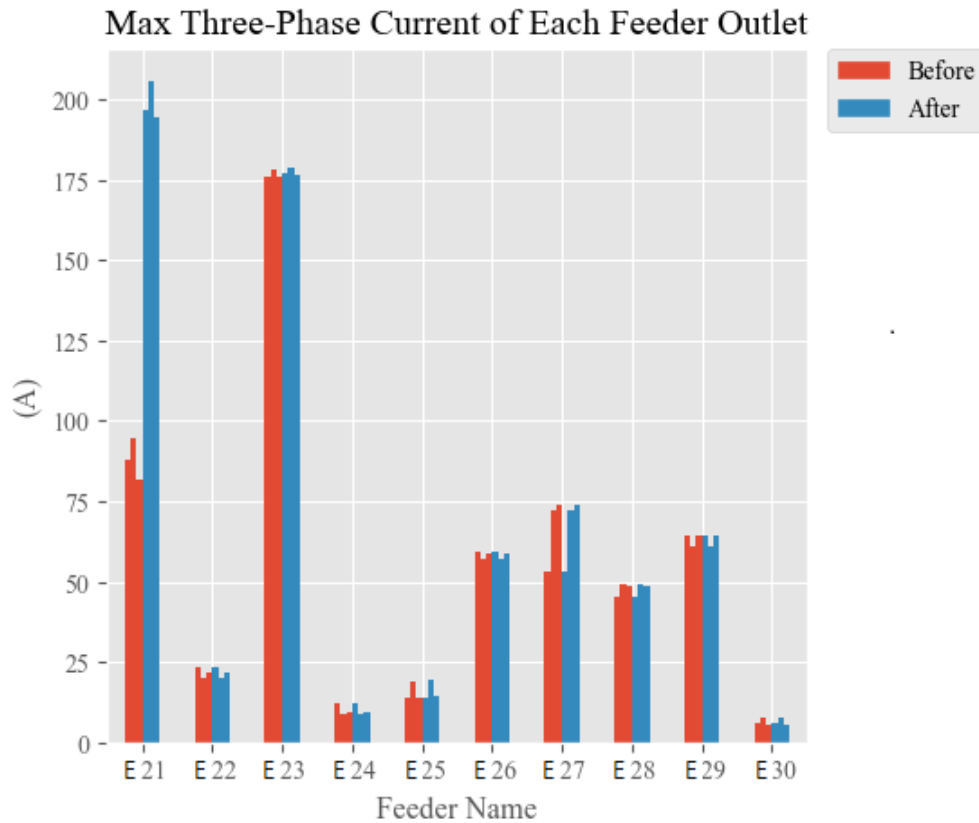


圖 9 全饋線轉供前後之變電所 D 各饋線電流

圖 10 與圖 11 分別為全饋線轉供前後之各饋線最大中性電流與線路損失，由於轉供饋線與被轉供饋線皆有三相不平衡，若兩條饋線同相別電流均較高，則轉供後將發生不平衡程度疊加的情形，其中饋線 B31 的中性電流上升了 9.6 A，而其線路總損失亦大幅上升了 379 kWh。雖此次模擬之不平衡程度還在正常的運轉範圍，不至於造成饋線出口小勢能過流電驛(Low-energy over-current relay, LCO)跳脫，然而若有兩條三相不平衡嚴重的饋線轉供時很有可能造成 LCO 的誤動作，故三相不平衡指標如中性電流等應納入停電轉供演算法限制中。

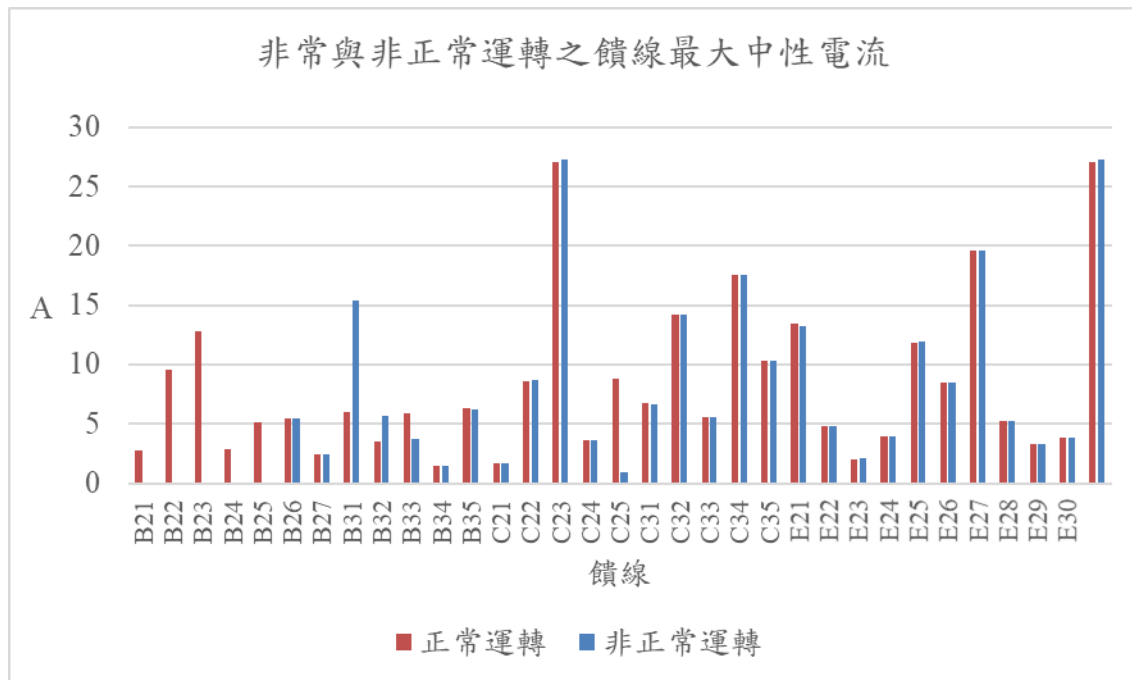


圖 10 全饋線轉供前後之各饋線最大中性電流

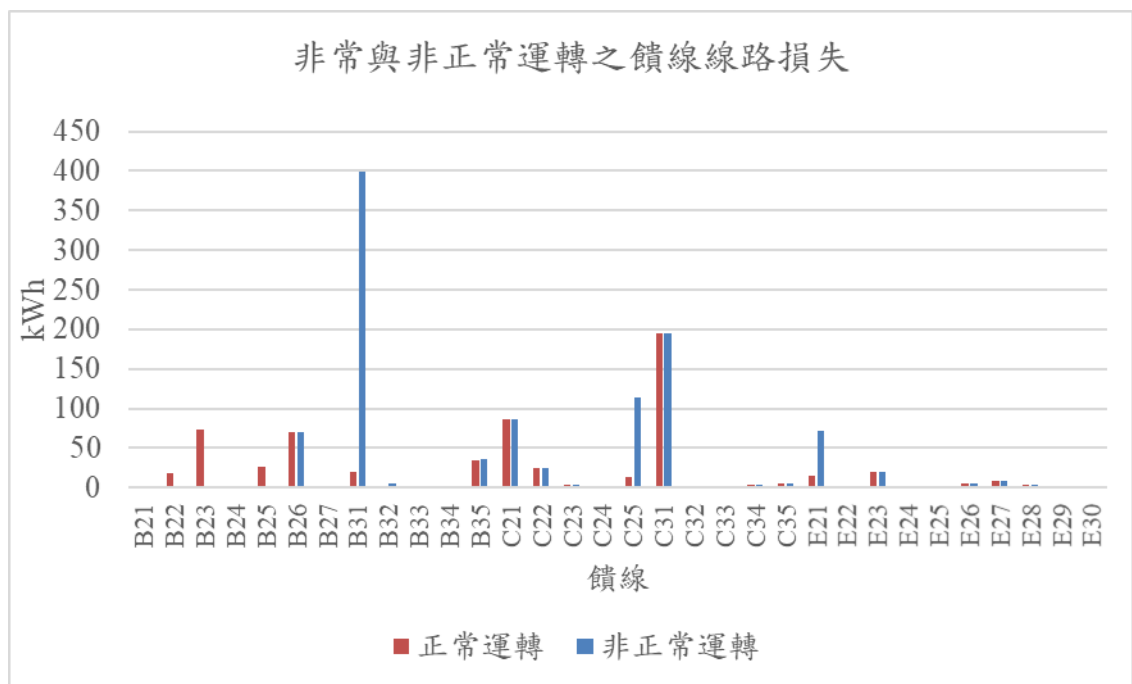
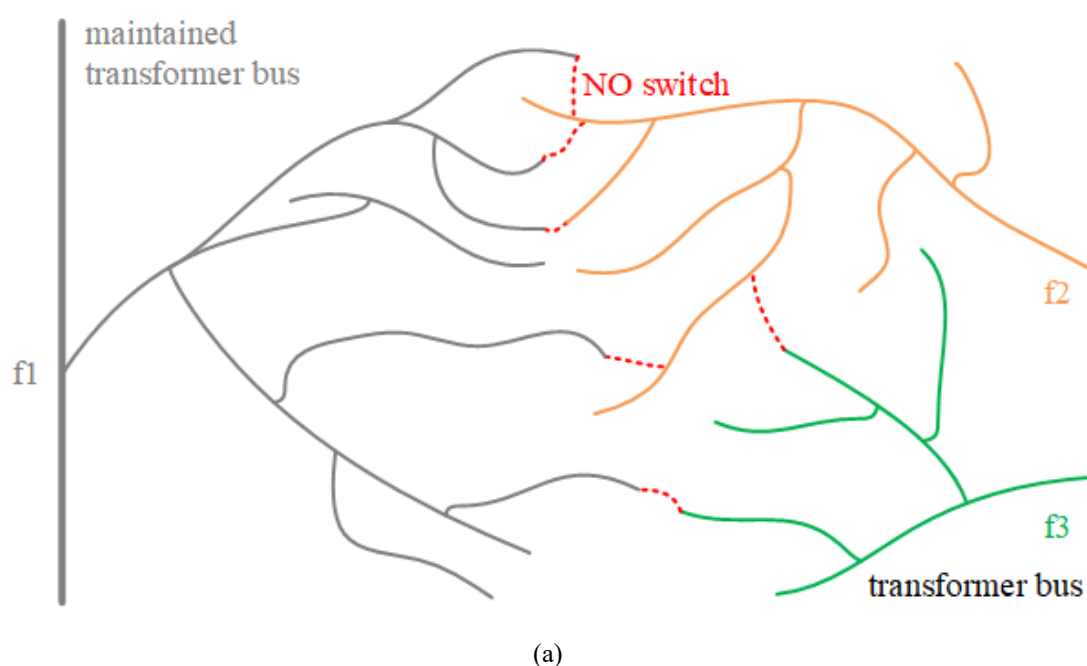


圖 11 全饋線轉供前後之各饋線線路損失

(二) 非正常運轉之饋線分段轉供

由前一小節模擬結果得知，若以全饋線進行轉供，可能將一個重載的饋線轉移到另一個重載饋線，在尖峰情境下可能會因饋線電流超過限制而無法轉供。因此，本研究提出分段轉供策略，將重載饋線分別轉移到兩個饋線，以相互分擔流量。以圖 12 說明，圖 12 (a) 顯示了一個停電饋線 f1，其可轉移到兩個正常運行的饋線 f2 和 f3。如果將整個饋線 f1 轉移到 f2，f2 上的電流將超過 400 安培。因此有兩個選擇，一種如圖 12 (b) 所示，將饋線 f1 分別轉移到饋線 f2 和 f3；另一種如圖 12 (c) 所示，將整個饋線 f1 轉移到饋線 f2，然後將 f2 的一部分轉移到 f3，以避免過載。

實際上，圖 12 (b) 和 (c) 對於演算法而言概念應相同，即整條饋線轉移到另一條之後，檢查其是否過載。若是，找到過載饋線所有的常開開關，嘗試使用其中一個將饋線的一部分轉移到另一個正常運行的饋線，直到兩者電流皆符合饋線流量限制。



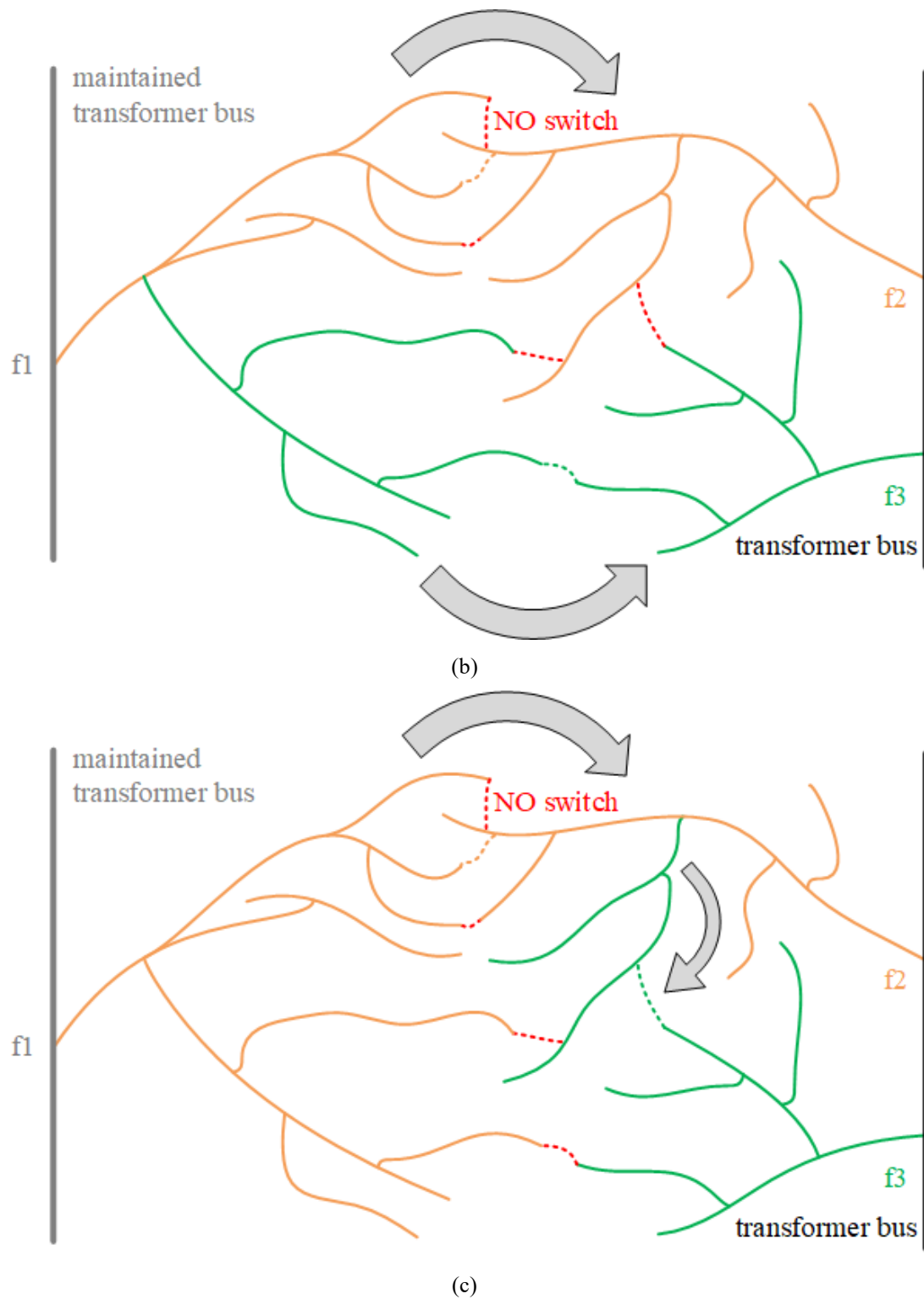


圖 12 饋線分段轉供示意圖

圖 13 所示為饋線分段轉供策略流程，其中 I_{separate} 由系統運轉者定義，代表著分段轉供時機，若饋線電流超過設定值則啟用分段轉供策略。 η 為饋線負載差異因子，其最大值為 0.3，其意味著若分段轉供無法使兩饋線電流差異減小(30%以下)，則無法達到分段轉供目的，結束策略流程。

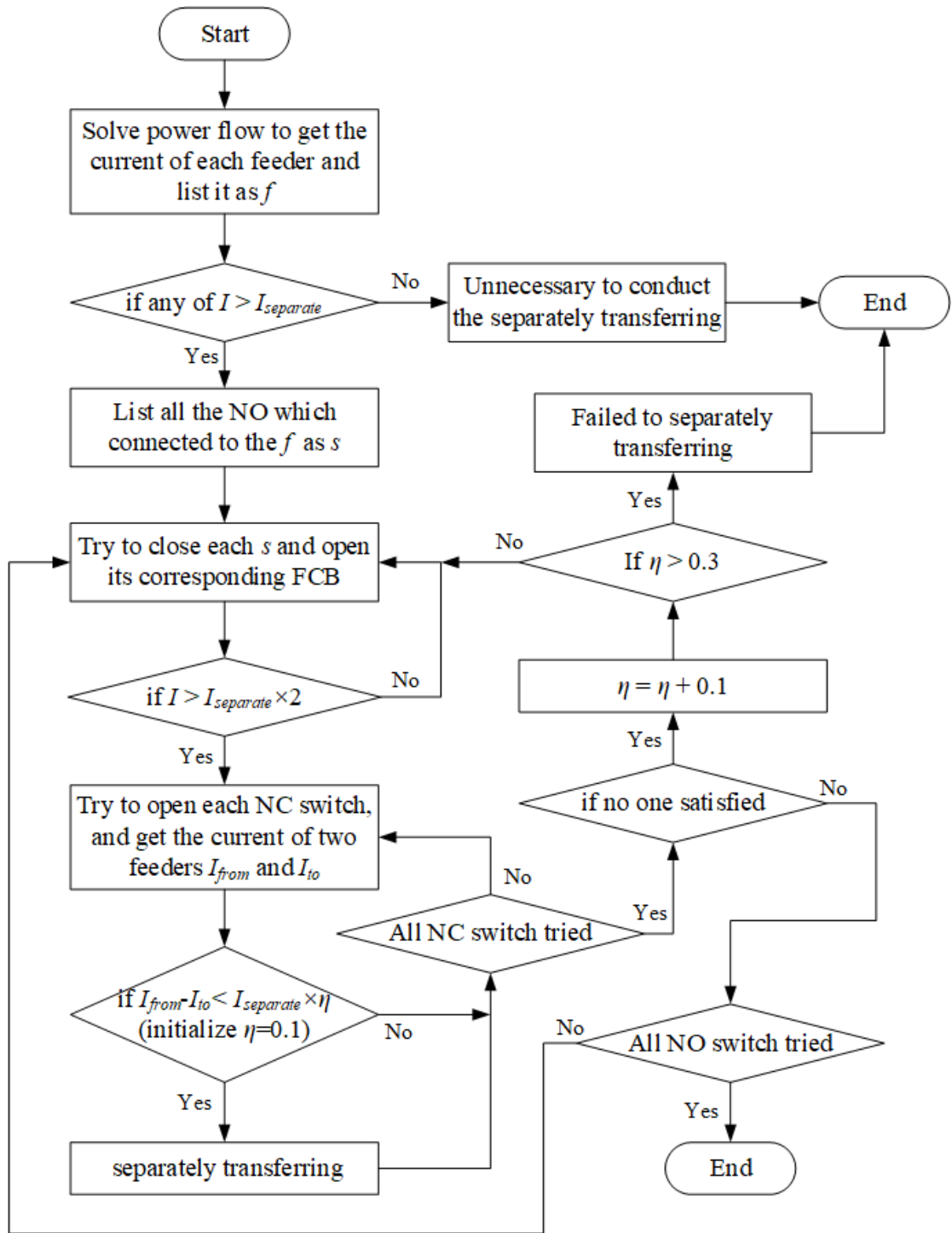


圖 13 饋線分段轉供流程圖

以下接續上一小節之台電配電網全饋線停電轉供策略模擬。在 3 個變電所 B、C、E 中，模擬變電所 B 之主變壓器 B#1 進行停電維護，造成饋線 B31 超過電流限制 400A，將執行饋線分段轉供策略。圖 14 與圖 15 分別為經演算法之轉供前後之地理圖資資訊。

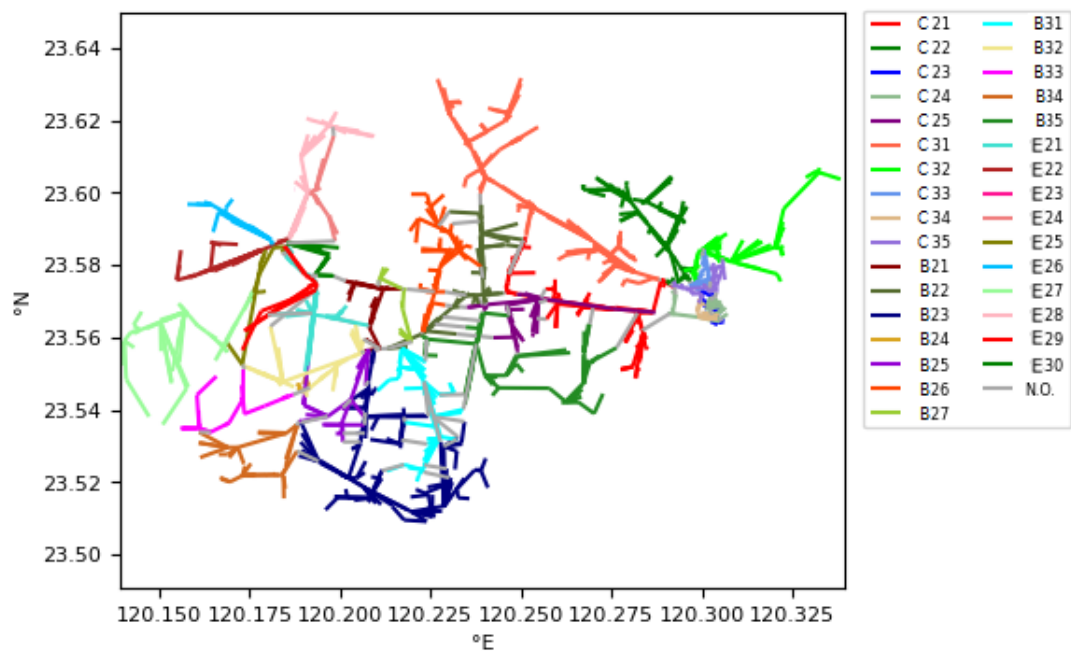


圖 14 饋線分段轉供之地理圖資-轉供前

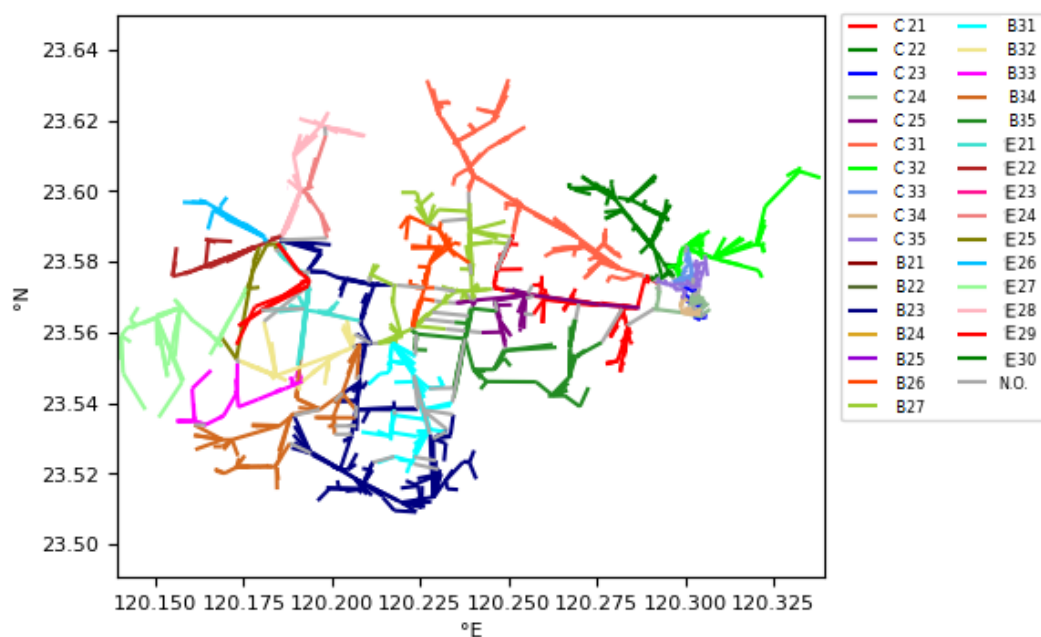


圖 15 饋線分段轉供之地理圖資-轉供後

圖 16、圖 17，與圖 18 分別為饋線分段轉供前後之三個變電所下游各饋線電流，可看出原本饋線 B31 電流被饋線 B26、B27、B34 所分擔，整體最大電流由全饋線轉攻策略之約 400A 降低為約 300A，提升了供電可靠度。

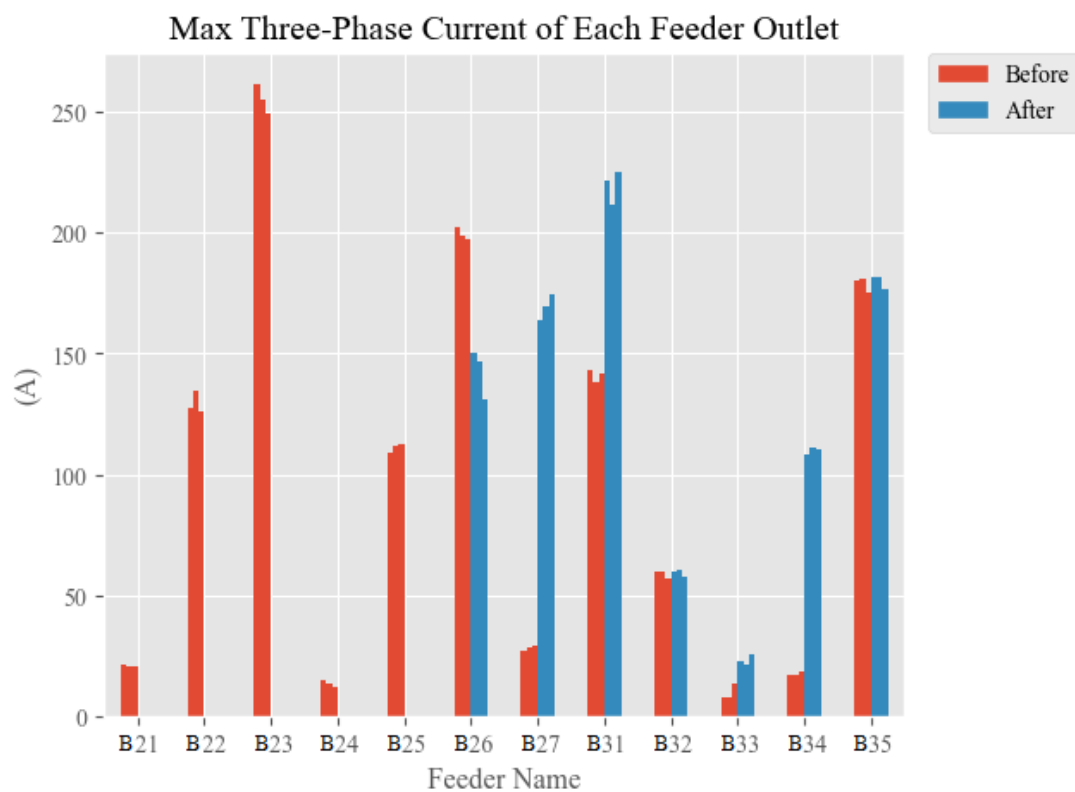


圖 16 饋線分段轉供前後之變電所 B 各饋線電流

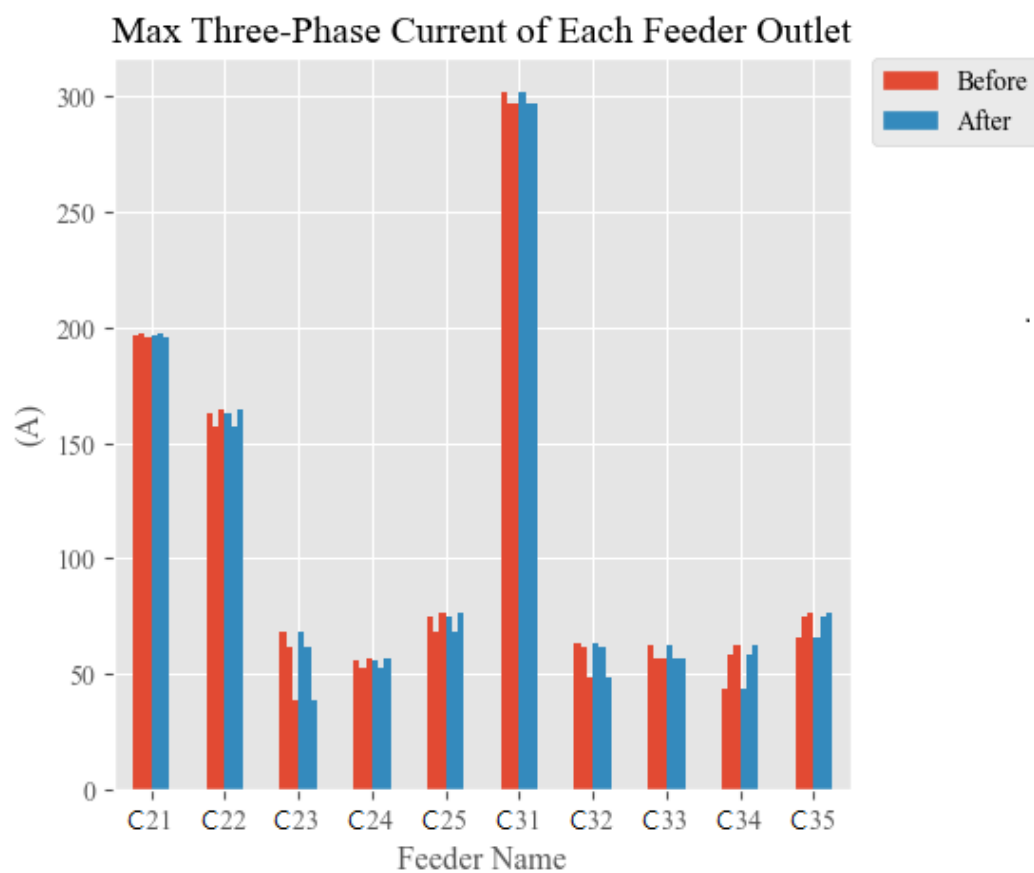


圖 17 饋線分段轉供前後之變電所 D 各饋線電流

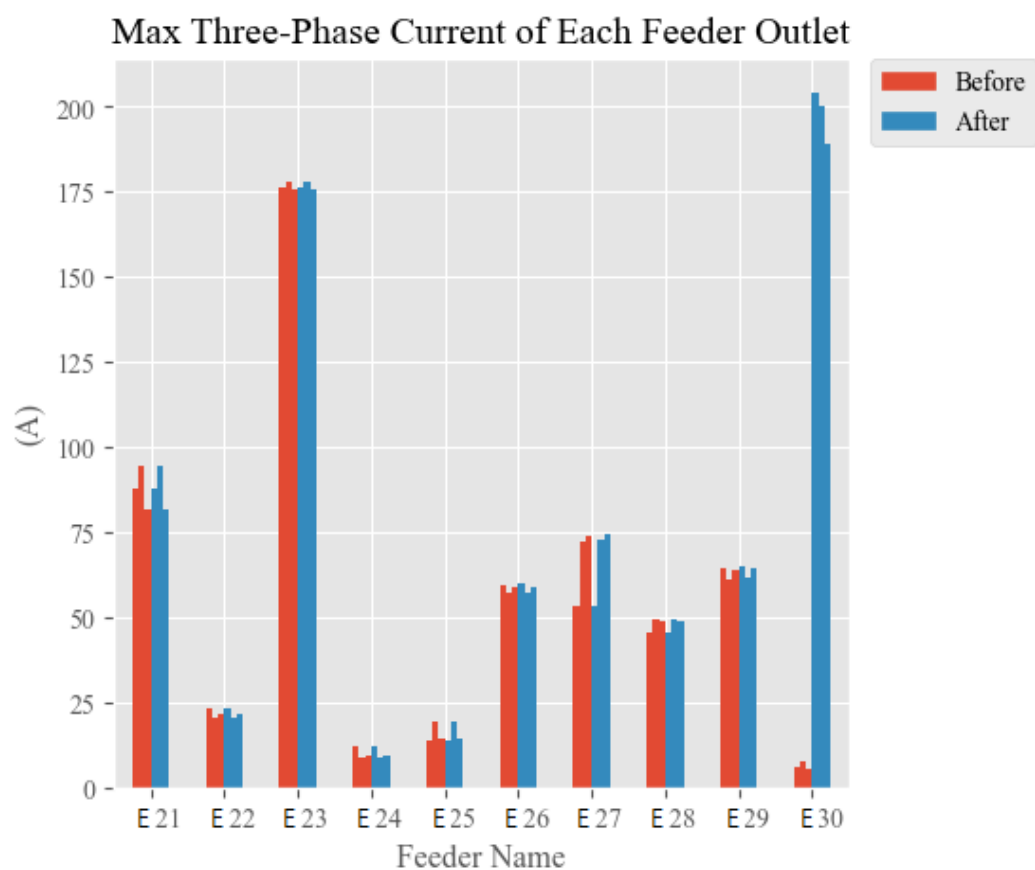


圖 18 饋線分段轉供前後之變電所 E 各饋線電流

二、配電饋線之分散式能源與負載統計模型

本研究所取得之歷史負載資料皆是由饋線終端設備(Feeder terminal unit, FTU)所量測而得，其包含饋線出口端電壓、三相電流、實功，以及虛功。然而，有鑒於實際資料因各種因素的缺失，如裝置先後順序不一致、設備零件缺失、通訊斷線等，若以原始資料導入模擬平台將會造成饋線模型失效。此外，負載曲線以及分散式能源發電曲線在饋線等級一般不會有太大的變動，故從日曲線來看，每日的趨勢通常很接近，尤其是每個星期的同一天。故若要執行某個季節的最佳化模擬，執行 3 個月之連續電力潮流以及平均 24 小時潮流，所得到的結果並沒有太大的差異，然前者花費的運算資源與時間可能為後者的數十倍乃至於數百倍。因此，本節建立饋線之分散式能源與負載統計模型，不僅增加模擬平台的資料表現與可參考性，亦可供運轉者觀察負載變動關係。

首先，圖 19 為某饋線一整年量測之電壓電流相乘所得之視在功率曲線，可看出部分資料可能因負載轉供或量測錯誤等原因造成失準，亦有部分資料為空值或為零。若以原始資料進行負載建模，其一可能造成電力潮流解析發散，其二所計算的最大電力資料可能若再不合理的區間。本研究以統計學的標準分數(Standard score)，又稱為 Z 分數(Z-score)進行離群值的篩選，其公式如式(1)所示。

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

x ：被標準化之原始分數

μ ：母體之平均值

σ ：母體之標準差

以統計學而言，99.9%的分數會落在三個標準差內，故將原始負載資料之 Z 分數大於 3 之值視為離群值，並將其從模擬資料剔除。Z 分數小於 3 之資料經過標么化後建入配電系統模擬軟體 OpenDSS，其篩選結果如圖 20 所示。

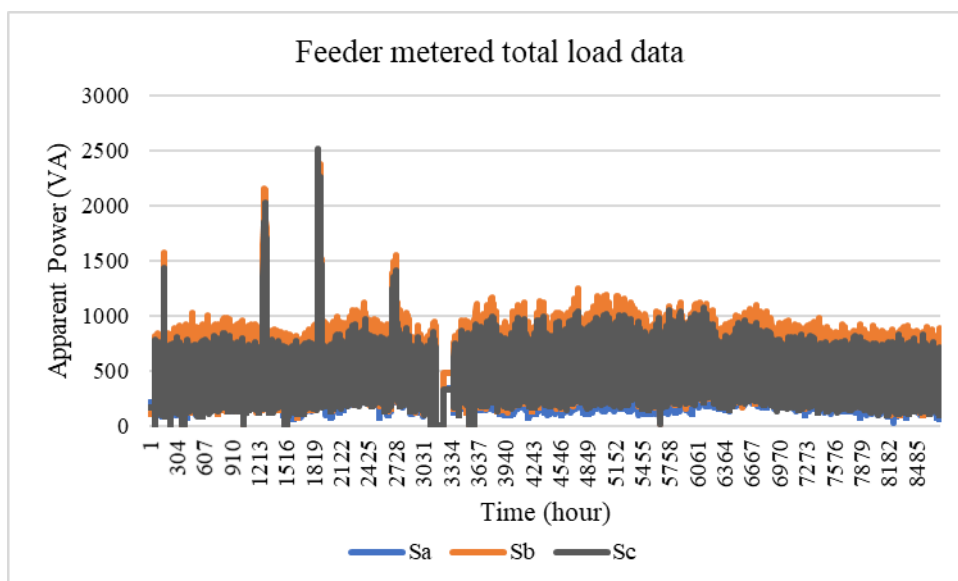


圖 19 饋線視在功率原始資料

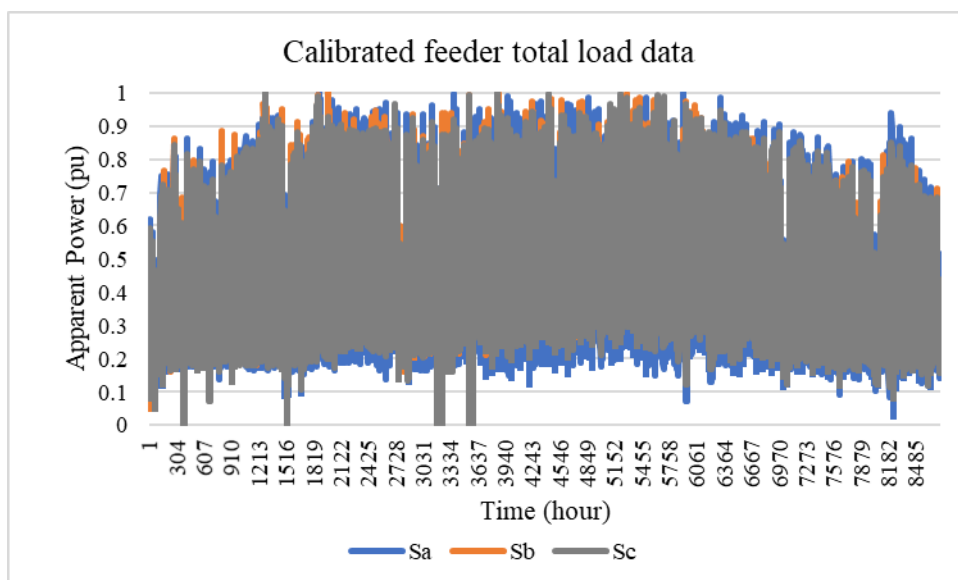


圖 20 去除離群值之標么化饋線功率

本研究將台電雲林區處配電系統之 23 個變電所饋線負載資料進行篩選，並可根據運轉者需求，建立日間、夜間、全日、工作日，以及非工作日之負載以及再生能源統計模型。以濁水(XM)變電所與豐田(XT)變電所為例，圖 21、圖 22、圖 23，以及圖 24 分別為其篩選後負載曲線以及全日負載統計模型。由於分散式再生能源資料無法取得，故以台灣區域實際資料作為假設，並同樣建立統計模型，太陽光電與風力發電之每月全日發電量統計模型如圖 25 所示。

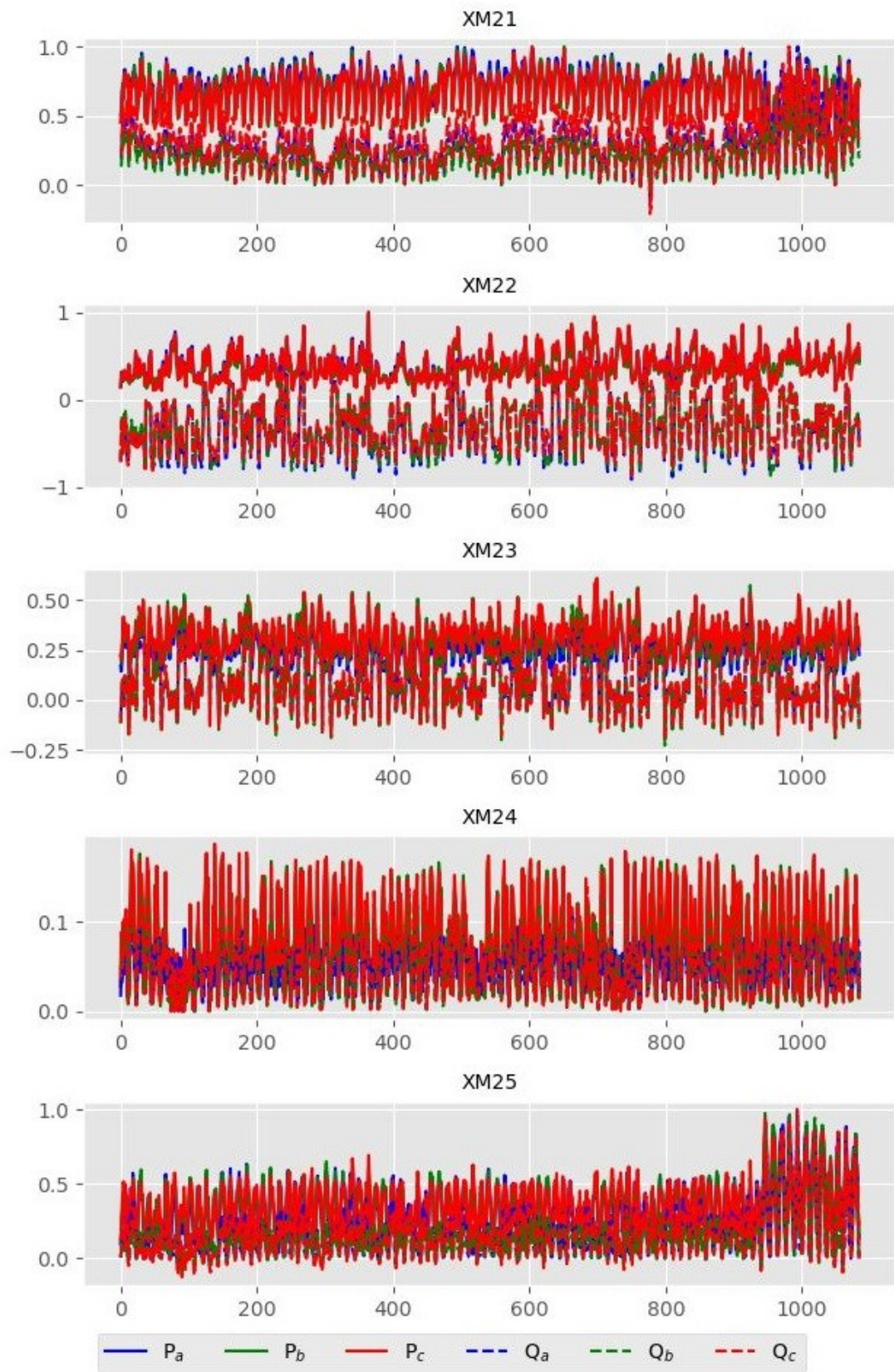


圖 21 XM 變電所夏季篩選資料

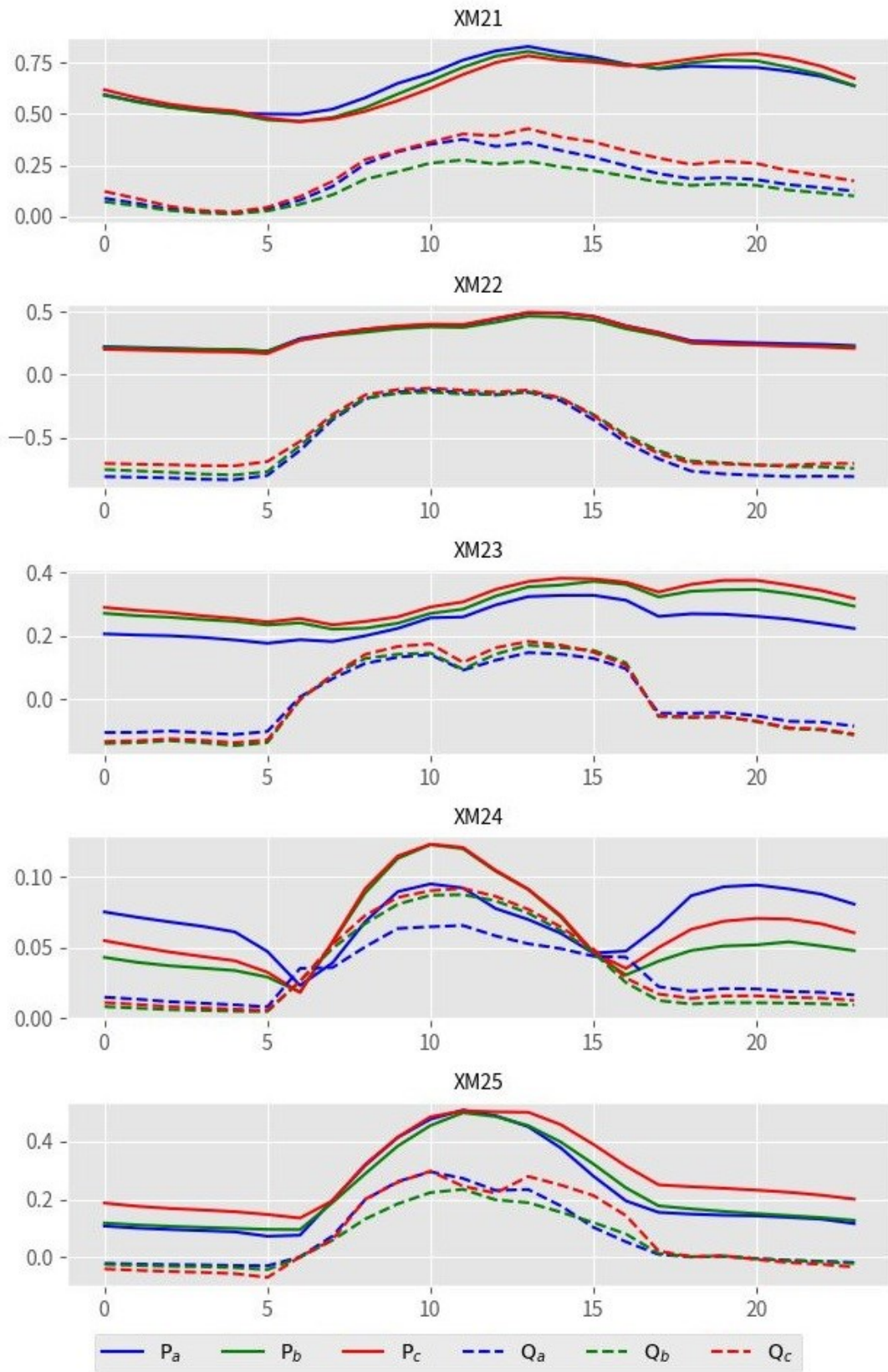


圖 22 XM 變電所統計模型

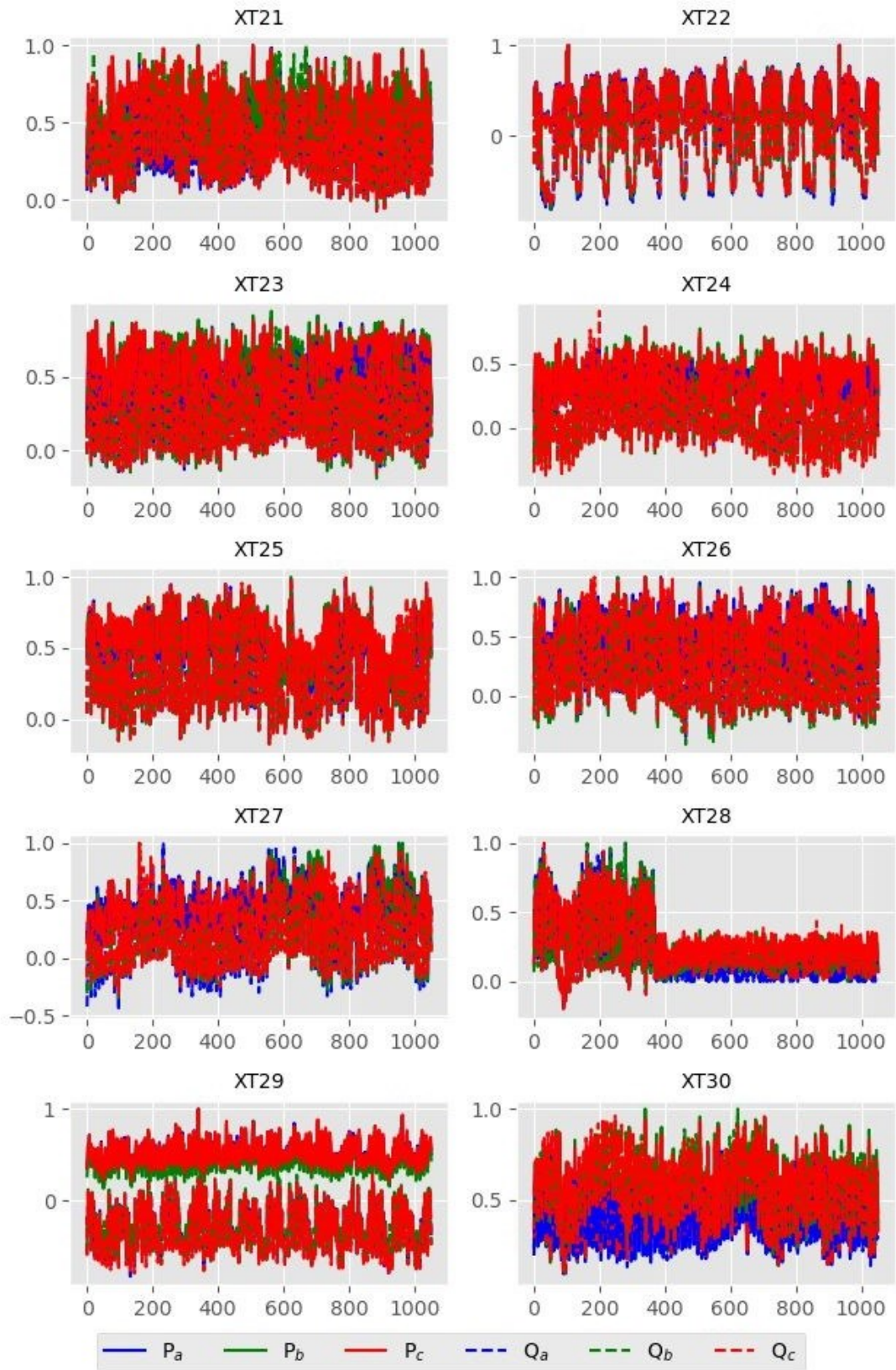


圖 23 XT 變電所夏季篩選資料

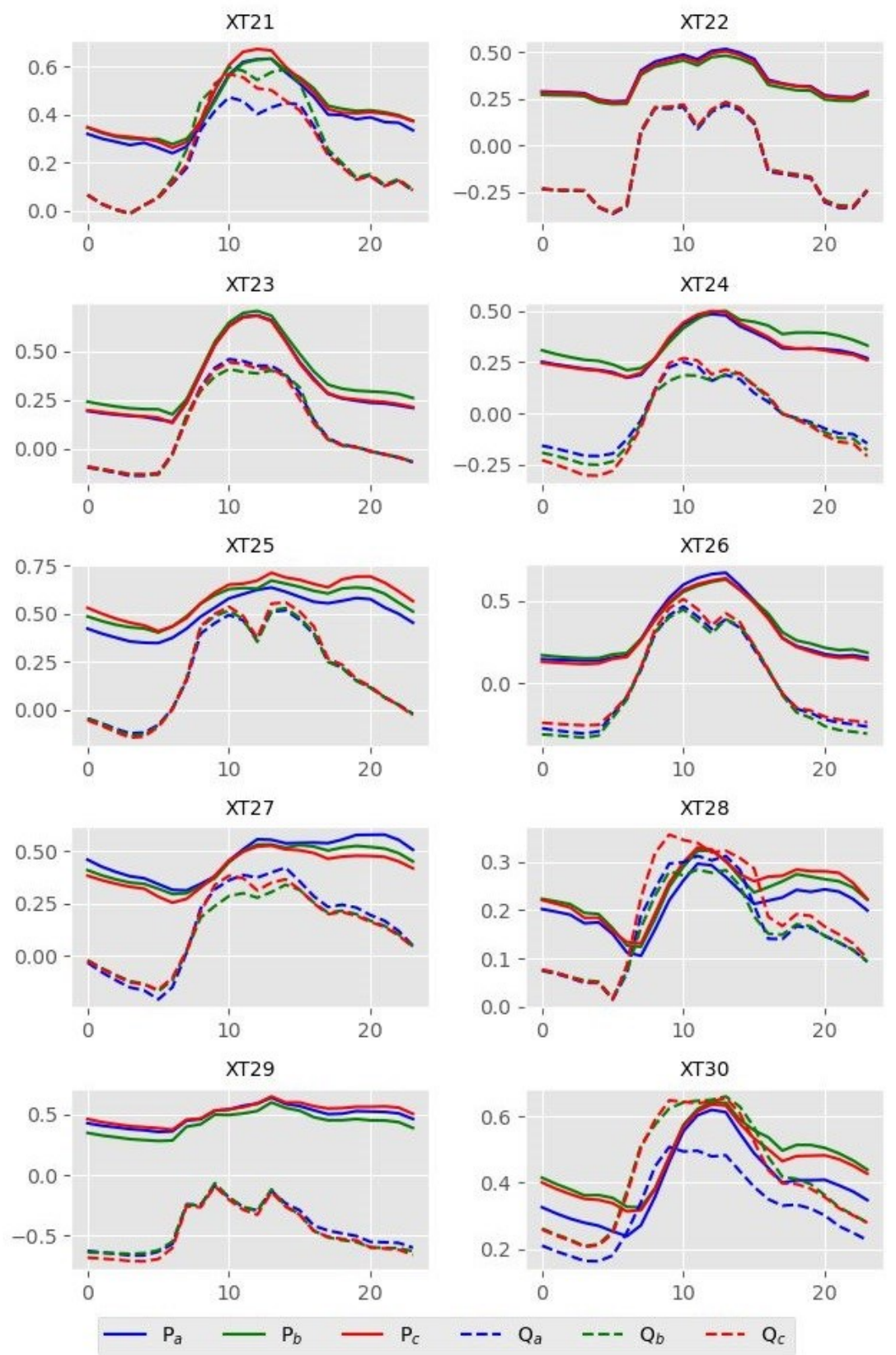


圖 24 XT 變電所統計模型

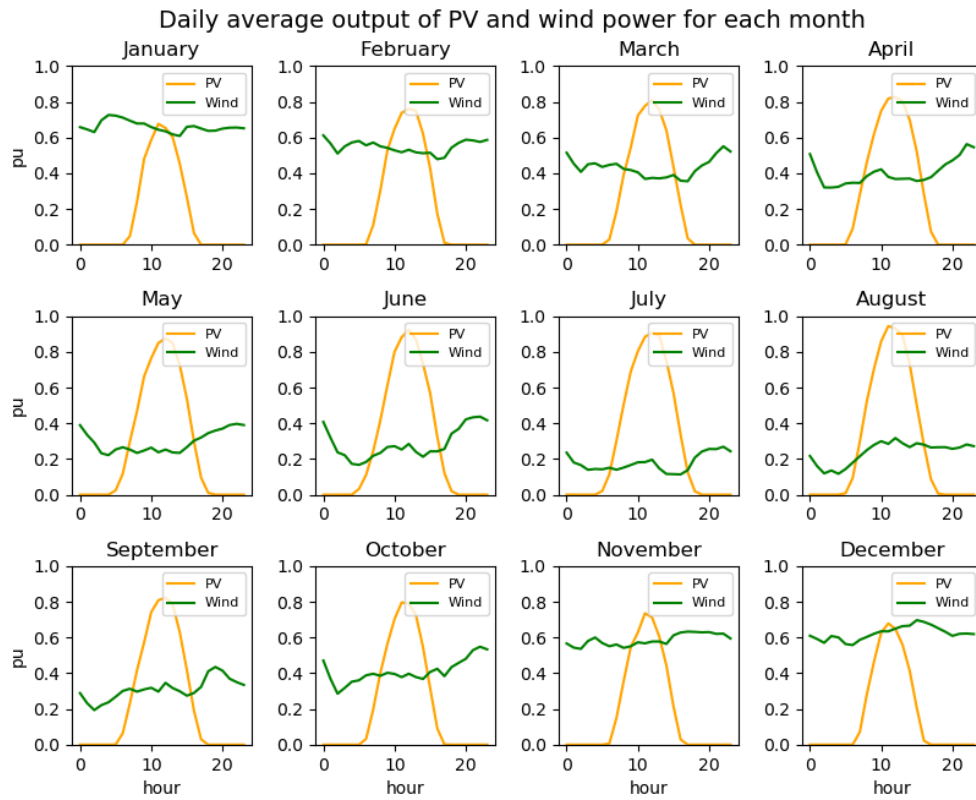


圖 25 再生能源統計模型

三、 三相不平衡目標式與改善策略

在配電系統中，三相不平衡為不可避免之問題，過去電力公司往往依循報表人工調整負載抽接點之相位配置。現今配電系統資料愈趨完整，故本計畫透過 DDCC 取得之負載與相位資料，結合演算法改善台電三相不平衡問題。

(一) 三相不平衡問題與目標式

圖 26 至圖 31 為台電常見之配電變壓器模型，分別為單相兩線式、單相三線式、三相三線式 U-V 接(open wye-open delta)、三相四線式 U-V 接、三相三線式 Y 接，以及三相三線式 Δ 接。其中單相與 U-V 接變壓器為三相不平衡之可控因素，可透過演算法進行相位重新配置，進而降低三相不平衡程度。

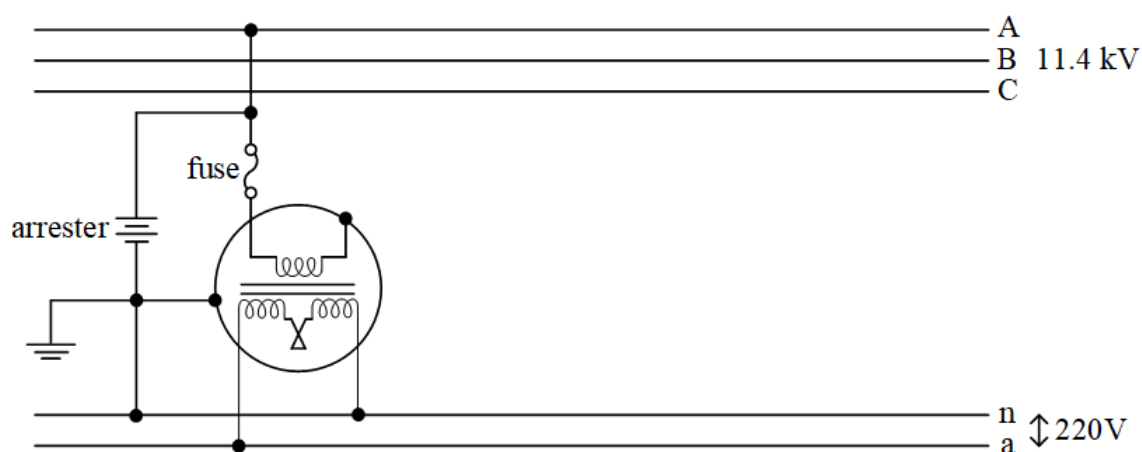


圖 26 單相兩線式配電變壓器

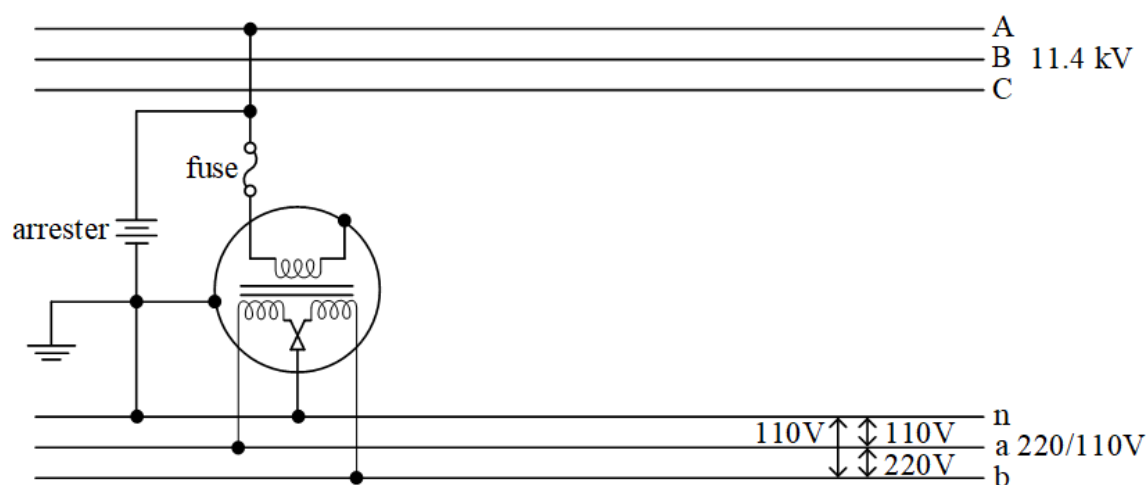


圖 27 單相三線式配電變壓器

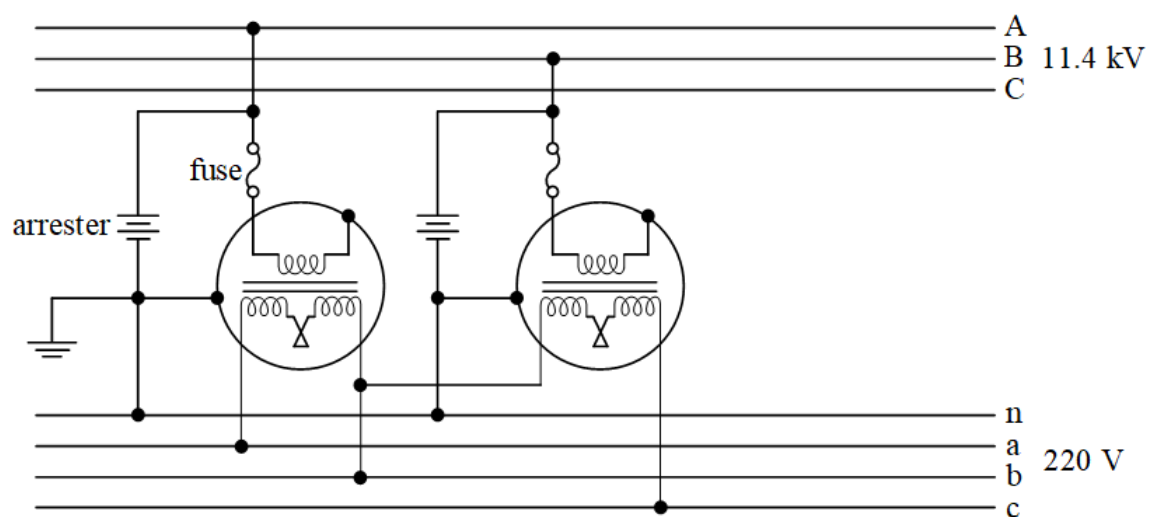


圖 28 三相三線式 U-V 接配電變壓器

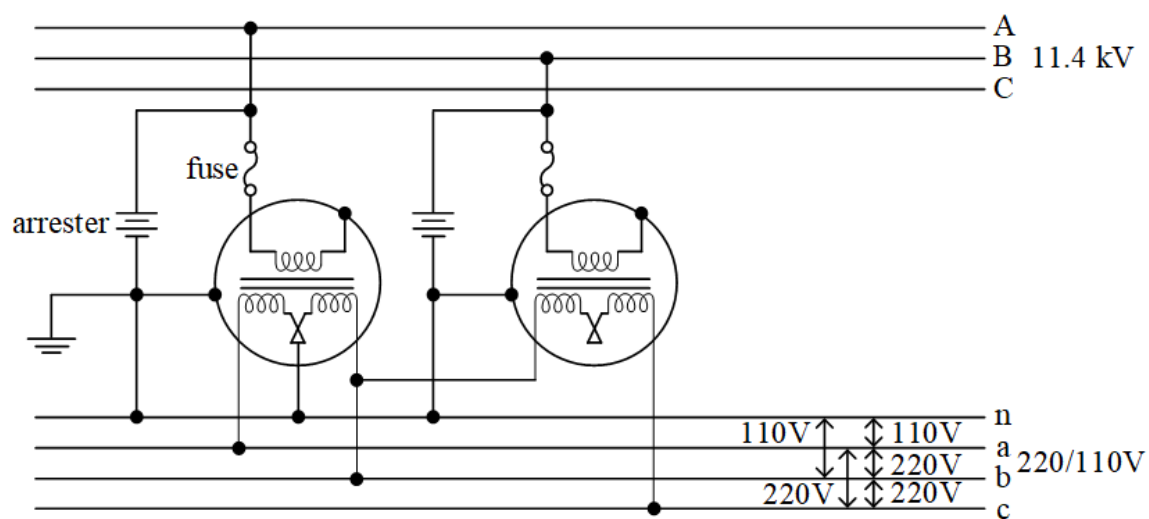


圖 29 三相四線式 U-V 接配電變壓器

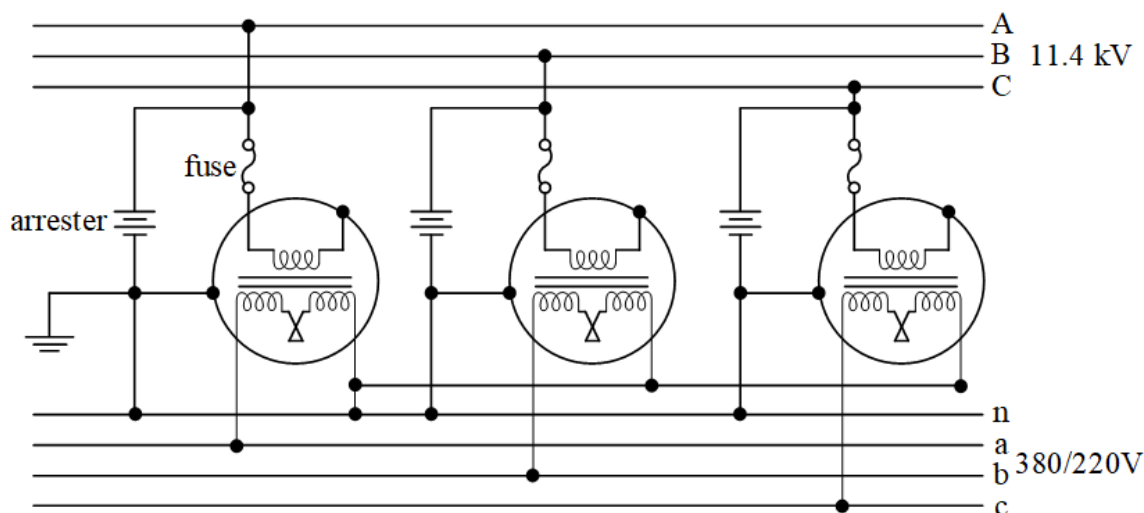


圖 30 三相三線式 Y 接配電變壓器

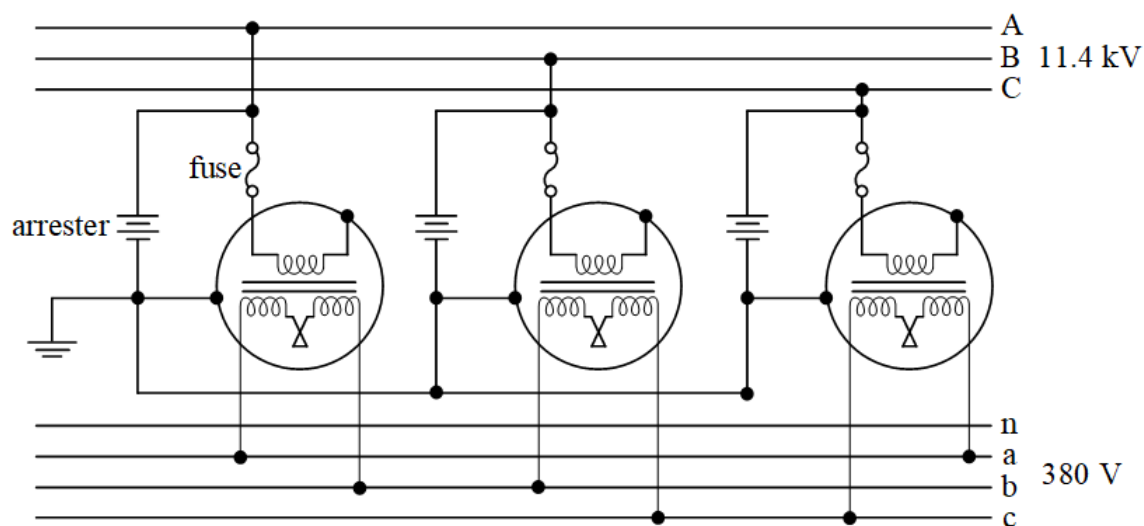


圖 31 三相三線式 Δ 接配電變壓器

三相電壓不平衡率是指電力系統之三相電壓大小值不相等或者相位差非 120 度。以前者而前，將計算三相電壓不平衡率(Three-phase voltage unbalance rate, TPVUR)。首先，透過公式(2)計算平均電壓。接著，將每個相位的測量值減去平均電壓，以找到最大差值。這個差值代表著與平均值的最大偏差。最後，將平均電壓和最大偏差相除，得到電壓不平衡率，即公式(3)所示。

$$U_{avg} = \frac{U_a + U_b + U_c}{3} \quad (2)$$

$$TPVUR = \frac{\max[|U_a - U_{avg}|, |U_b - U_{avg}|, |U_c - U_{avg}|]}{U_{avg}} \quad (3)$$

其中 U_a 、 U_b 、 U_c 為三相之相電壓。

考慮到大小值和相位差，使用對稱成分的概念會更加準確。這種方法將三相電壓不平衡系統分解為三個獨立的對稱系統，即正序系統、負序系統和零序系統。一般而言，三相不平衡主要由負序與零序成分引起的低壓系統電壓不平衡所導致，零序電壓不平衡率(Zero-sequence voltage unbalance rate, ZSVUR)與負序電壓不平衡率(Negative-sequence voltage unbalance rate, NSVUR)分別如式(4)與(5)所示。

$$ZSVUR = \frac{U_0}{U_1} \times 100\% \quad (4)$$

$$NSVUR = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (5)$$

其中 U_0 、 U_1 、 U_2 分別為零序、正序、負序電壓，由式(6)、(7)，與(8)所示。

$$U_0 = \frac{1}{3}(\overline{U}_a + \overline{U}_b + \overline{U}_c) \quad (6)$$

$$U_1 = \frac{1}{3}(\overline{U}_a + e^{j120^\circ} \overline{U}_b + e^{j240^\circ} \overline{U}_c) \quad (7)$$

$$U_2 = \frac{1}{3}(\overline{U}_a + e^{j240^\circ} \overline{U}_b + e^{j120^\circ} \overline{U}_c) \quad (8)$$

上述指標皆有其參考價值，故本研究將台電配電模型利用 OpenDSS 執行電力潮流解析，再計算各母線之 TPVUR、ZSVUR、NSVUR，以及中性線電流，作為改善策略之目標式。

(二) 最佳化相別配置演算法

為了改善配電系統三相不平衡率，本研究將調整負載抽接點相別配置，即為饋線上台電所屬配電變壓器以及用戶自設變壓器之一次側接點。由台電配電系統可看到單相、兩相、三相變壓器，單相共有 3 種接法；兩相變壓器通常為 V-V 或 U-V 接或者兩台單相變壓器，共有 3 種接法；三相變壓器則共有 6 種接法。此外，除了將兩相負載抽接點相別對調外，也可能將兩相都接到較輕載之相別，如

圖 32 圖 33 與所示。

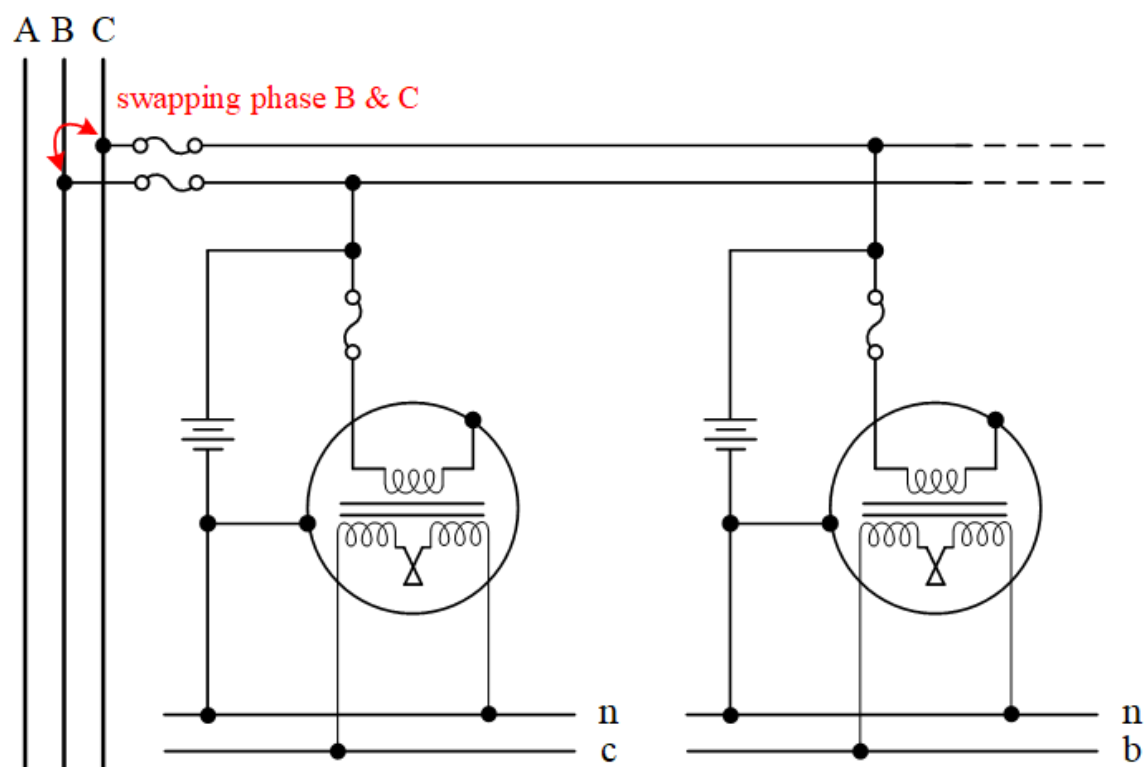


圖 32 負載抽接點調相方式-兩相對調

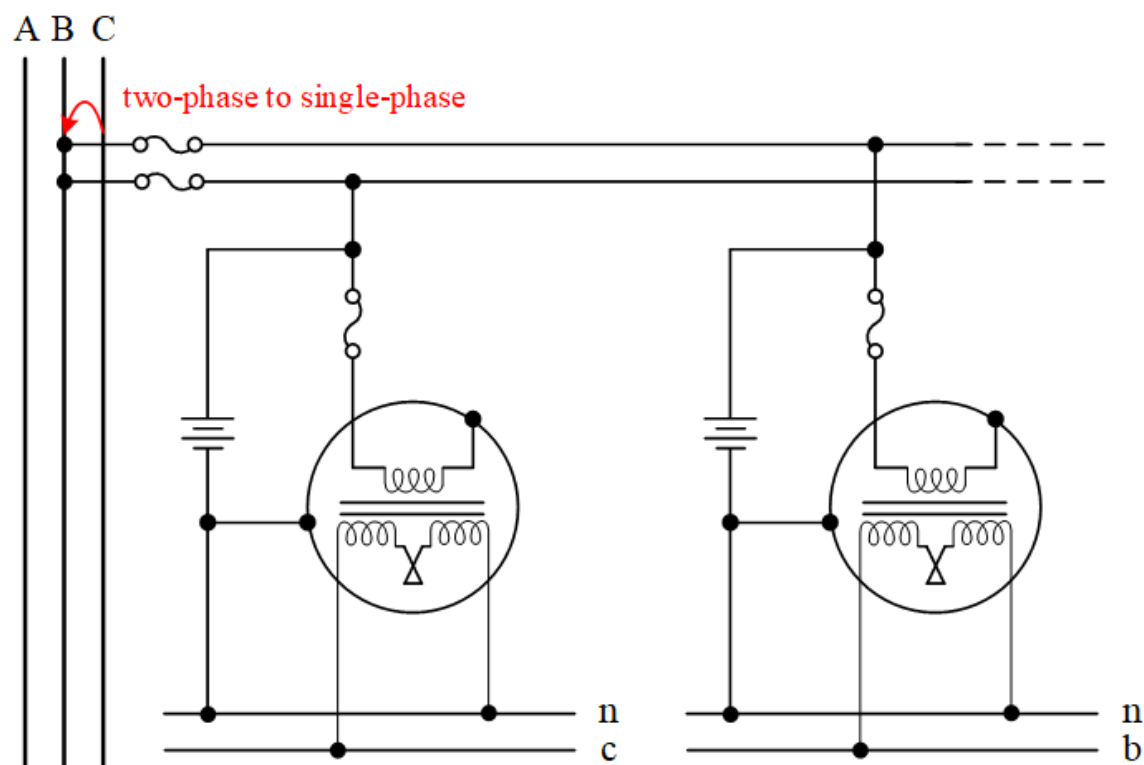


圖 33 負載抽接點調相方式-單相集中

上述每種負載抽接點皆有不同的形式，考慮到整條饋線甚至到整個主變壓器、整個變電所，系統越大其排列組合越多。若系統越大則 OpenDSS 執行電力潮流解析時間則越長，為了在可接受的模擬時間求解較佳的相位調整策略，本研究採用群體智能演算法，每個個體代表著每個負載抽接點的組合型式，目標函式為最小化三相不平衡指標，經迭代收斂後求得較佳解或次佳解，如圖 34 所示。

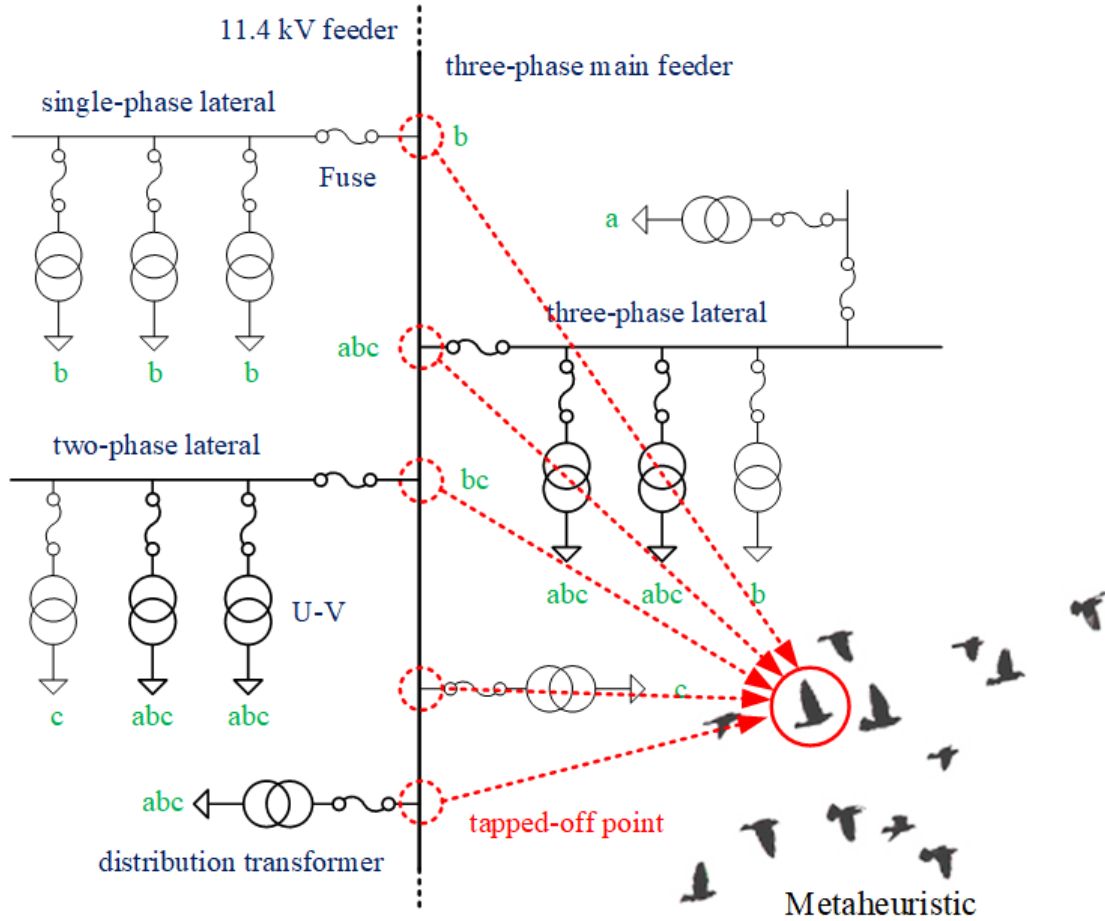


圖 34 群體智能演算法應用於相位重新配置示意圖

本研究選擇了 97 種群體智能演算法，以測試何者性能適用於求解相別配置問題。在此使用式(9)之 Rastrigin 測試函數進行測試，其最佳解為 0。由於負載抽接點可能上百個，故其維度設定為 1000，為了快速求解，將個體數與迭代次數僅設定為 100，所列為其測試結果。

$$f(x) = AN + \sum_{i=1}^{N-1} [x_i^2 - A \cos(2\pi x_i)] \quad (9)$$

表 1 群體智能演算法之性能比較

種類	演算法	最佳解	時間(s)
演化型	進化規劃演算法(EP)	1430.59	1.7393
演化型	進化策略演算法(ES)	1327.87	1.1499
演化型	迷因演算法(MA)	1457.49	61.6680
演化型	基因演算法(GA)	243.89	2.2161
演化型	微分進化演算法(DE)	1640.17	1.7896
演化型	花粉傳播演算法 (FPA)	1302.48	1.6788
演化型	珊瑚礁演算法 (CRO)	790.84	1.0114
群體型	粒子群演算法(PSO)	1176.72	1.5479
群體型	細菌覓食演算法(BFO)	1450.91	98.6289
群體型	貓群演算法(CSO)	1322.67	13.0541
群體型	人工蜂群演算法(ABC)	517.17	1.6217
群體型	蟻群演算法(ACO-R)	1554.17	14.1039
群體型	布穀鳥搜尋演算法(CSA)	1311.01	1.7384
群體型	螢火蟲演算法(FFA)	1396.59	128.6033
群體型	煙火演算法(FA)	1243.72	3.7302
群體型	蝙蝠演算法(BA)	1614.18	1.3508
群體型	果蠅演算法(FOA)	1610.07	7.1612
群體型	社交蜘蛛演算法(SSPO)	814.02	5.0994
群體型	灰狼演算法(GWO)	0.00	1.4382
群體型	蟻獅演算法(ALO)	395.11	45.6541
群體型	飛蛾撲火演算法(MFO)	1594.78	6.2505
群體型	大象放牧演算法(EHO)	237.50	1.4632
群體型	Jaya 演算法(JA)	1529.19	1.2881
群體型	鯨群演算法(WOA)	0.00	1.5210
群體型	蜻蜓演算法(DO)	607.17	9.7629
群體型	鳥群演算法(BSA)	662.77	1.7214
群體型	花斑鬣狗演算法(SHO)	1527.61	7.7898
群體型	樽海鞘演算法(SSO)	382.12	1.3145
群體型	機器人搜救演算法(SRSR)	73.00	3.5057
群體型	蚱蜢演算法(GOA)	844.01	18.6007
群體型	郊狼演算法(COA)	0.00	1.8910
群體型	飛蛾搜索演算法(MSA)	639.26	1.5419
群體型	海獅演算法(SLO)	1077.42	1.3225
群體型	裸鼴鼠演算法(NMRA)	0.00	1.5898
群體型	尋路演算法(PFA)	17.28	17.2630
群體型	旗魚群演算法(SFO)	0.01	2.5861

種類	演算法	最佳解	時間(s)
群體型	哈里斯鷹演算法(HHO)	0.00	2.3936
群體型	蝠鱚覓食演算法(MRFO)	0.00	2.5871
群體型	白頭鷹演算法(BES)	0.00	3.7849
群體型	麻雀演算法(SSA)	0.00	2.6714
群體型	飢餓遊戲演算法(HGS)	0.00	1.5100
群體型	天鷹演算法(AO)	1.03	1.8591
群體型	海洋捕食者演算法(MPA)	659.92	1.5648
群體型	蜜獾演算法(HBA)	0.00	1.7564
群體型	沙貓群演算法(SCSO)	0.00	23.6071
群體型	金槍魚群演算法(TSO)	0.00	1.2746
群體型	非洲禿鷲演算法(AVOA)	0.00	1.5738
群體型	人工大猩猩部隊演算法(AGTO)	0.00	2.8125
群體型	人工兔演算法(ARO)	0.00	1.9458
物理型	模擬退火演算法(SA)	712.19	31.1906
物理型	風驅動演算法(WDO)	3.20	1.5968
物理型	多節演算法(MVO)	622.66	10.3714
物理型	拔河演算法(TWO)	1234.07	10.2132
物理型	電磁場演算法(EFO)	1410.37	0.1865
物理型	核反應演算法(NRO)	0.04	11.9202
物理型	亨利氣體溶解度演算法(HGSO)	165.05	1.5289
物理型	原子搜索演算法(ASO)	1215.67	7.2446
物理型	平衡演算法(EO)	0.00	1.6147
物理型	阿基米德演算法 m (ArchOA)	0.00	1.7593
人類型	文化演算法(CA)	736.02	1.6496
人類型	帝國競爭演算法(ICA)	606.21	1.8690
人類型	教與學演算法(TLO)	0.00	3.4228
人類型	腦力激盪演算法(BSO)	702.82	1.5807
人類型	排隊搜索演算法(QSA)	995.34	13.7363
人類型	搜救演算法(SARO)	658.45	6.5286
人類型	生活選擇演算法(LCO)	0.00	1.3464
人類型	社交滑雪演算法(SSDO)	0.08	1.6306
人類型	知識共享演算法(GSKA)	1049.88	22.6247
人類型	冠狀病毒群體免疫演算法(CHIO)	1469.06	2.3059
人類型	法醫調查演算法(FBIO)	0.00	13.3354
人類型	大逃殺演算法(BRO)	1345.89	2.1167
人類型	學生心理演算法(SPBO)	660.86	112.5203
生物型	侵入性雜草演算法(IWO)	607.66	5.0625

種類	演算法	最佳解	時間(s)
生物型	生物地理學演算法(BBO)	181.31	11.0256
生物型	病毒種群搜索演算法(VCS)	0.00	24.3609
生物型	緞面涼亭鳥演算法(SBO)	383.28	11.0099
生物型	蚯蚓演算法(EOA)	0.00	3.2603
生物型	牛羚群演算法(WHO)	709.53	9.5321
生物型	黏菌演算法(SMA)	0.00	33.3366
生物型	藤壺交配演算法(BMO)	0.00	1.2653
生物型	海鞘群體演算法(TSA)	990.96	1.4653
生物型	共生生物搜尋演算法(SOS)	0.00	4.8110
生物型	海鷗優化演算法(SOA)	227.81	1.2245
系統型	生殖中心演算法(GCO)	1608.49	2.1425
系統型	水循環演算法(WCA)	791.68	1.1859
系統型	人工生態系統演算法(AEO)	0.00	2.8091
數學型	爬山演算法(HC)	1526.59	0.6967
數學型	交叉熵演算法(CEM)	1572.44	1.5113
數學型	正餘弦演算法(SCA)	91.29	8.7757
數學型	梯度演算法 (GBO)	0.15	2.8330
數學型	算數演算法(AOA)	0.00	4.3641
數學型	混沌遊戲演算法(CGO)	0.00	5.4156
數學型	類帕累托順序抽樣演算法(PSS)	927.59	23.6346
數學型	向量的加權平均值(INFO)	2.28	2.7477
數學型	龍格-庫塔演算法(RUN)	0.00	4.6598
數學型	圓形搜索演算法(CCSA)	791.93	1.1470
音樂型	和聲搜索演算法(HS)	215.54	7.9369

測試結果顯示 GWO、WOA、COA、NMRA、SFO、HHO、MRFO、BES、SSA、HGS、HBA、SCSO、TSO、AVOA、AGTO、ARO、NRO、EO、ArchOA、TLO、LCO、SSDO、FBIO、VCS、EOA、SMA、BMO、SOS、AEO、AOA、CGO，與 RUN 可求得或接近最佳解 0，然而 SCSO、NRO、FBIO、VCS，與 SMA 花費時間過高。其餘皆可做為改善三相不平衡之潛在演算法。

參、主要發現與結論

一、區域配電網三相不平衡改善模擬平台

為了因應區域配電網不同饋線之模擬需求，本研究開發區域配電饋線最佳三相負載配置平台，如圖 35 所示，其主要功能彙整於表 2。其包含了正常運轉與非正常運轉之電力潮流解析，以及三相負載相別重新配置策略演算功能，可能電網運轉者依據不同需求自定義使用。本系統以台電歷史負載與電網架構進行饋線建模，透過經測試可行之演算法進行求解，系統性的自動完成配電系統運轉規劃，可使電力公司告別傳統人工排查工作，亦提高了現代配電網大數據之附加價值。

表 2 模擬平台功能簡介

項目	簡介
匯入	匯入 FTU 歷史資料、電網模型。
模擬基本設定	設定停電轉供、負載換相、是否以統計模型執行快速模擬等。
最佳化目標	設定目標函式權重。
限制條件	設定饋線電流限制、主變壓器容量限制、分段轉供時機等。
演算法	選擇演算法，設定個體數與迭代次數。
模擬時間與標的系統	設定模擬時段、標的變電所、饋線。
電網地理資訊	執行演算後顯示所選標的系統地理資訊。
負載曲線	執行演算後顯示所選標的饋線負載曲線。
資訊欄	顯示平台使用資訊。
結果輸出	演算完成後，輸出相位配置表、改善前後電力潮流、不平衡率資訊等。

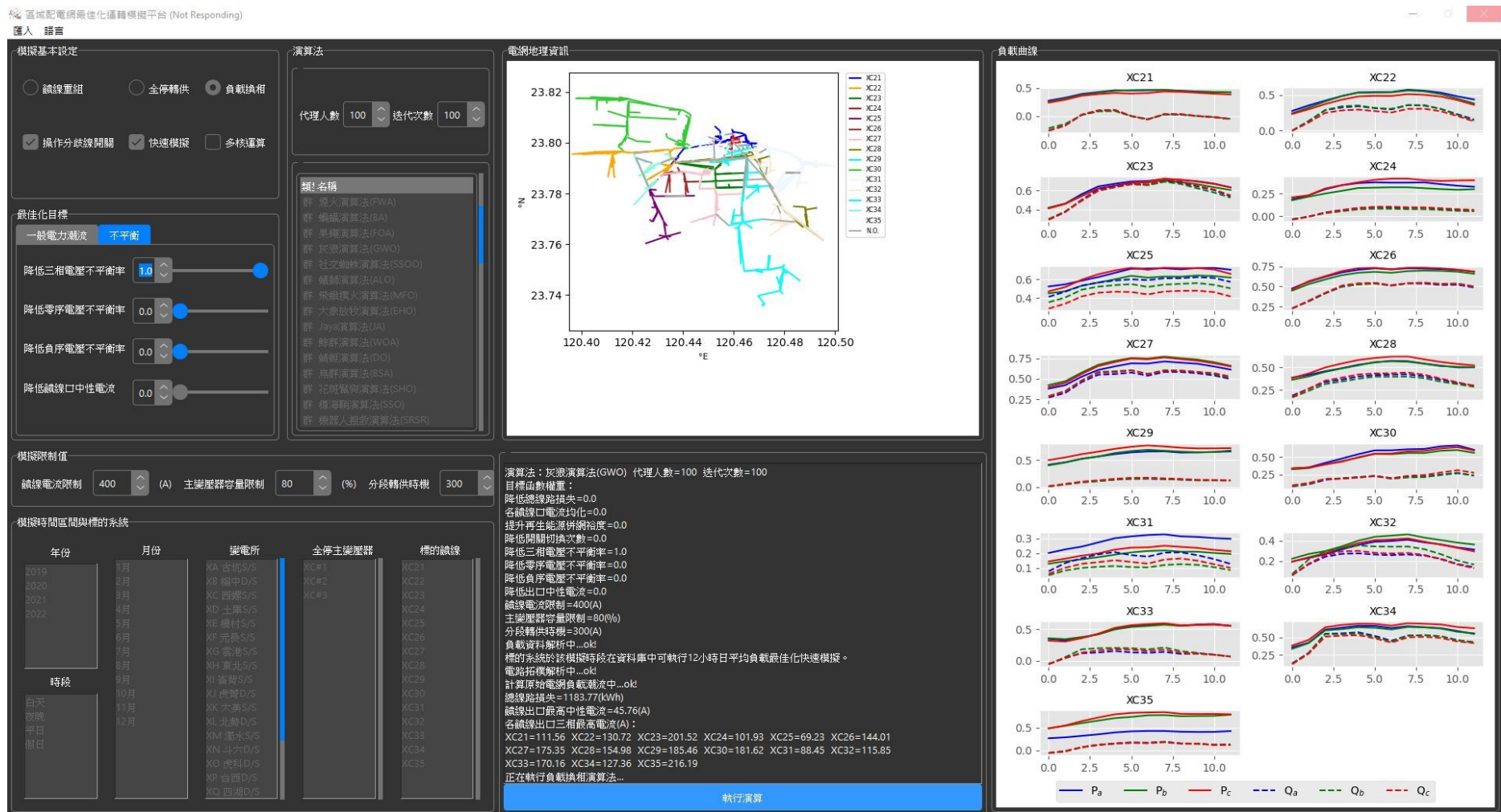


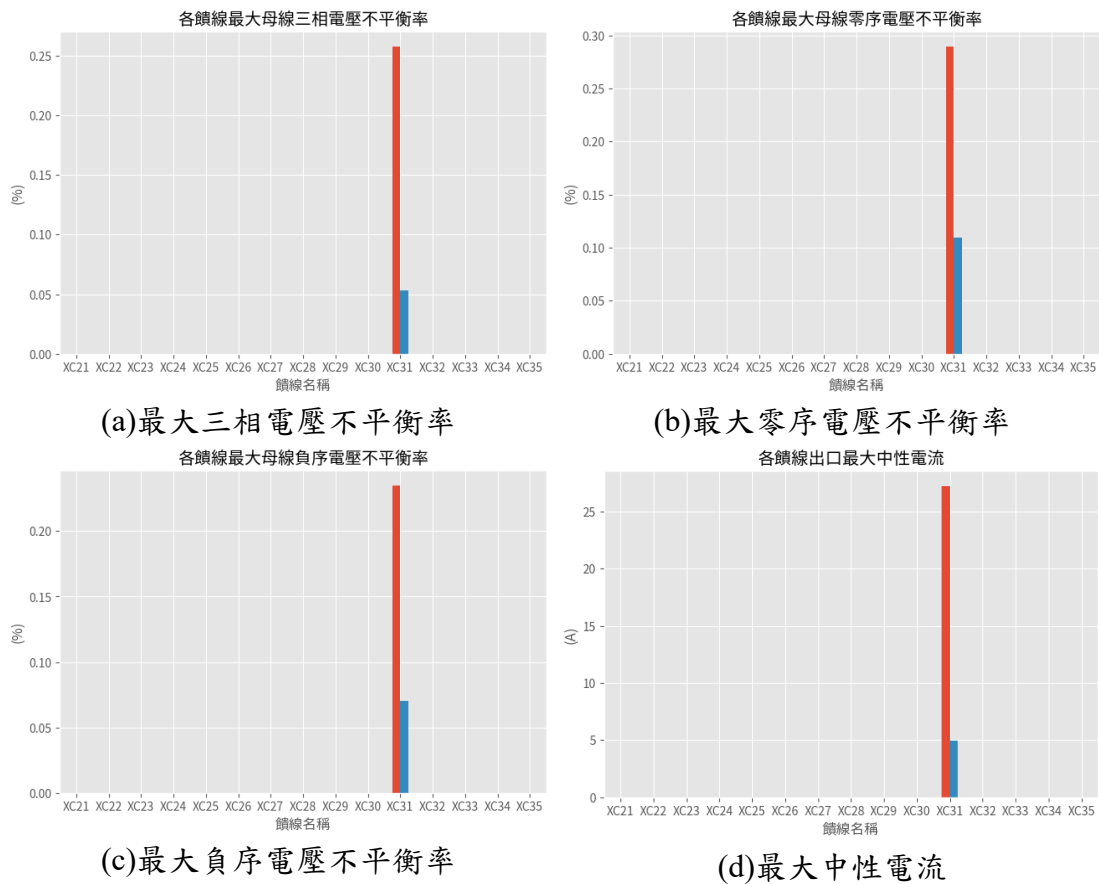
圖 35 最佳相位配置模擬平台

二、模擬數值結果

本節呈現本研究之三相不平衡改善演算法之模擬結果，並在相等模擬條件下，針對第二章所述之各三相不平衡指標進行最佳化演算。

(一) 三相不平衡改善指標-三相電壓不平衡率

一般配電變壓器相別重新檢討會以一條饋線一季做一次，故本研究以饋線 XC31 為例，模擬時段為 2022 年夏月白天平均負載。採用灰狼演算法(GWO)進行最佳化演算，狼群數量與迭代次數分別為 100，目標函數為最小化三相電壓不平衡率，如式(3)。圖 36 (a)~(e)分別呈現變壓器相別調整前後饋線最大三相電壓不平衡率、最大零序電壓不平衡率、最大負序電壓不平衡率、出口最大中性電流、最大三相電流、線路總損失。圖 37 為本次模擬迭代過程。



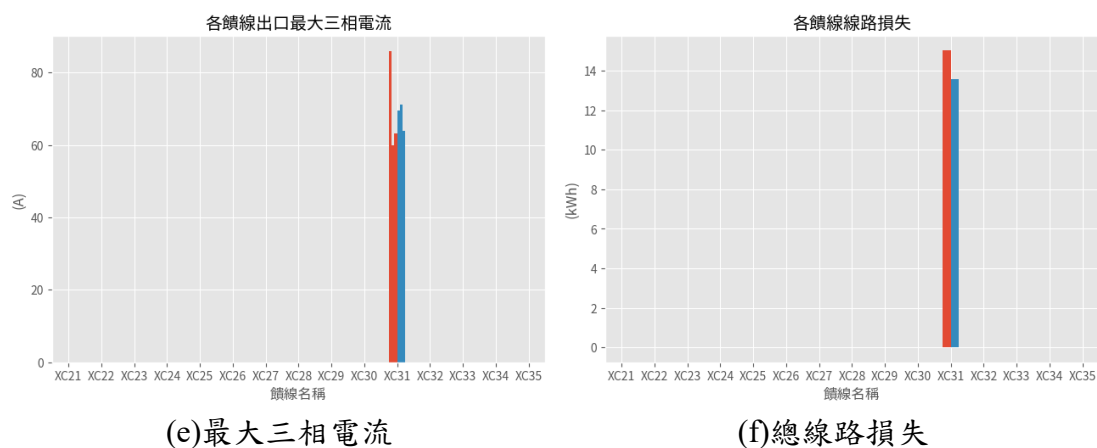


圖 36 饋線 XC31 負載換相模擬結果-目標降低三相電壓不平衡率

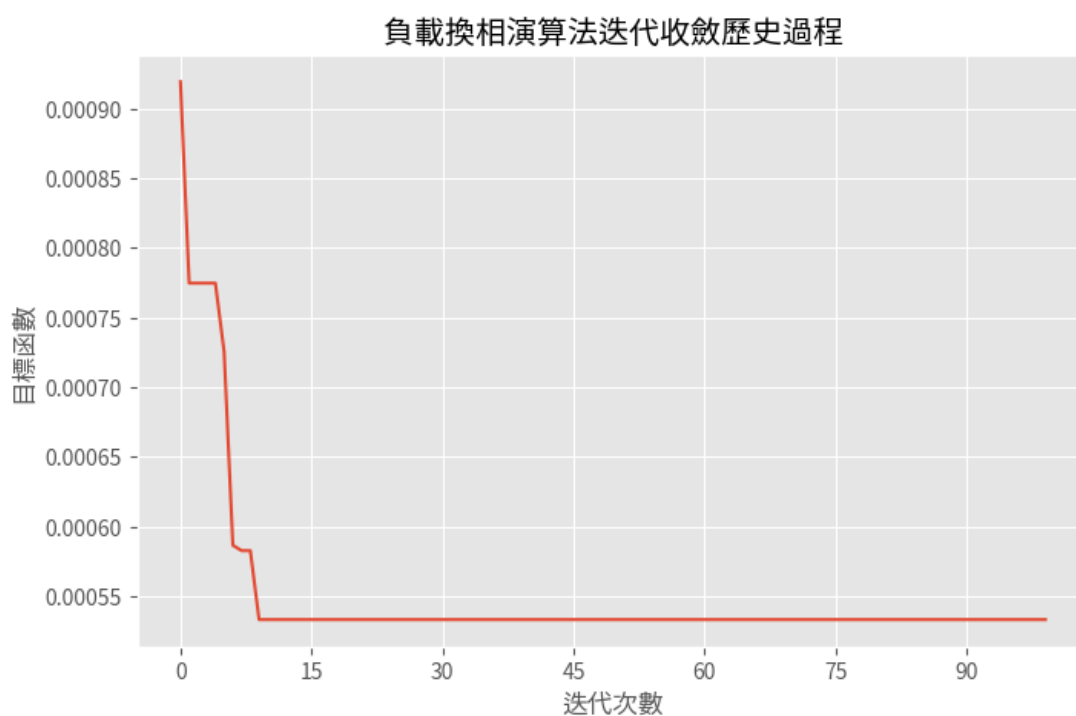


圖 37 灰狼演算法迭代過程

(二) 三相不平衡改善指標-零序電壓不平衡率

為了比較各項不平衡指標，故同樣以饋線 XC31 模擬，模擬時段、演算法、群體數量與迭代次數皆相同，目標函數改為最小化零序電壓不平衡率，如式(4)。圖 38 (a)~(e)分別呈現變壓器相別調整前後饋線最大三相電壓不平衡率、最大零序電壓不平衡率、最大負序電壓不平衡率、出口最大中性電流、最大三相電流、線路總損失。圖 39 為本次模擬迭代過程。

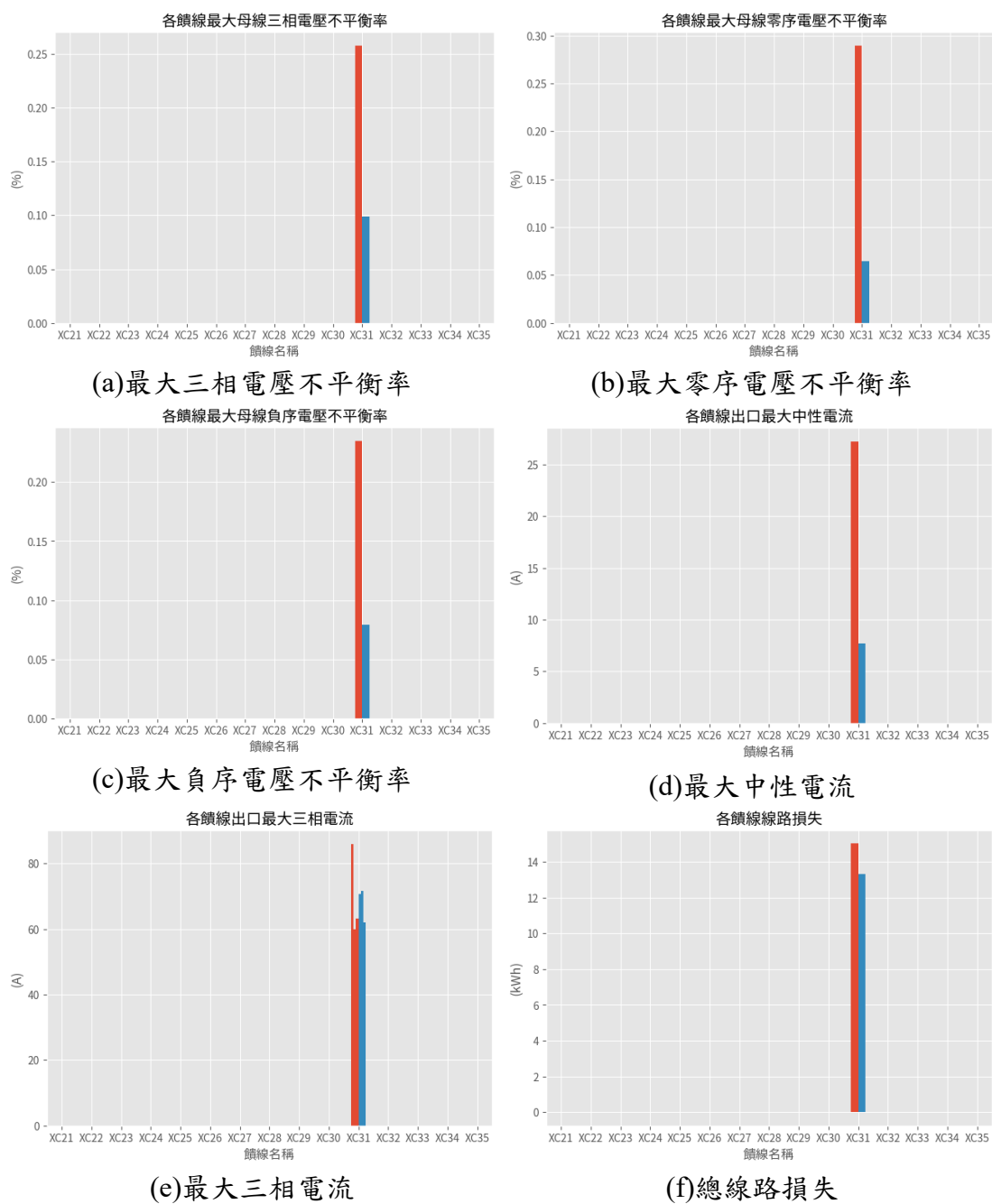


圖 38 饋線 XC31 負載換相模擬結果-目標降低零序電壓不平衡率

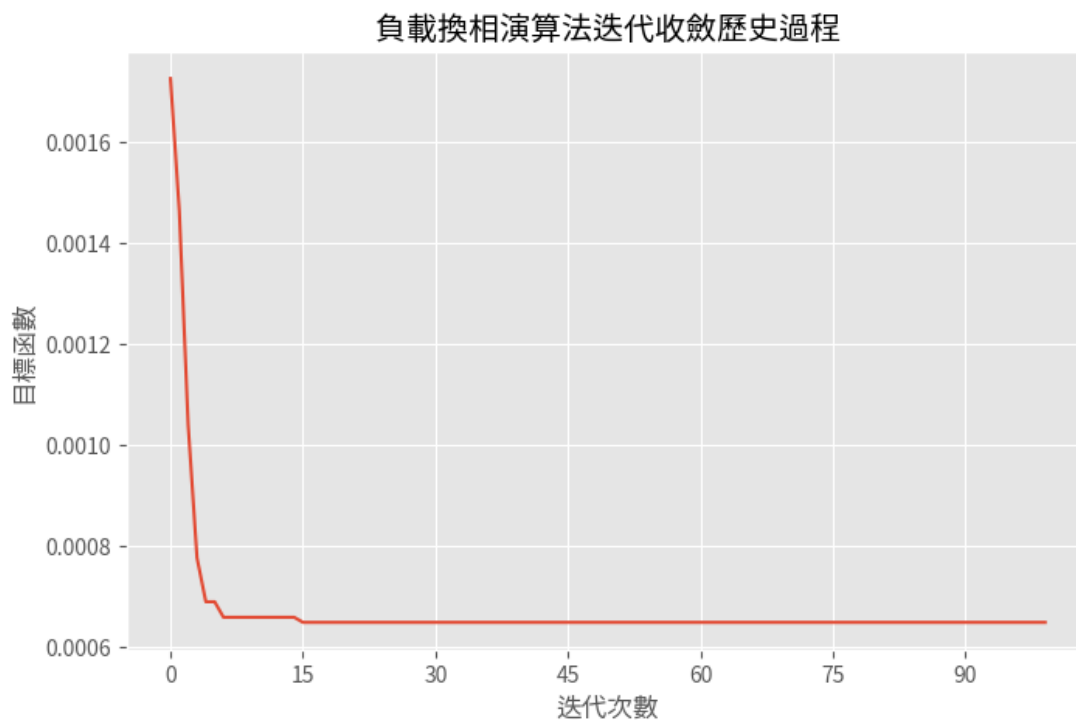
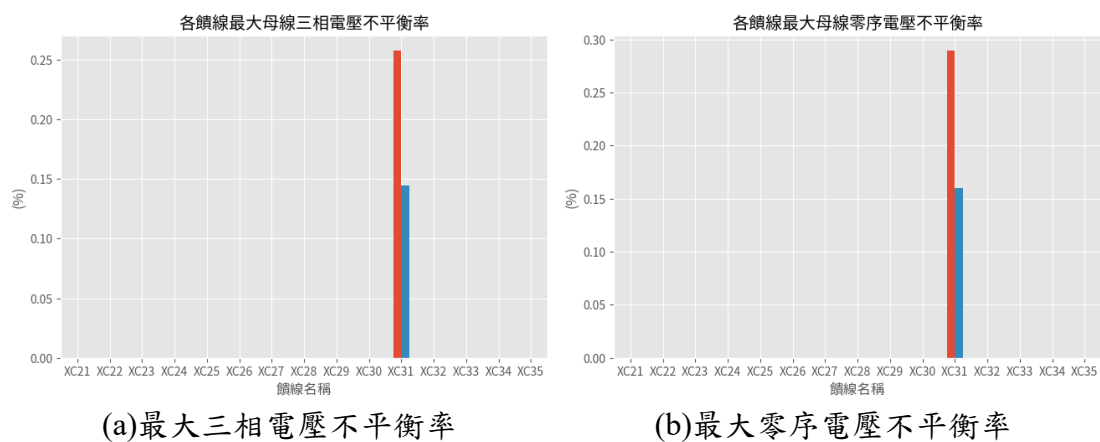


圖 39 灰狼演算法迭代過程

(三) 三相不平衡改善指標-負序電壓不平衡率

為了比較各項不平衡指標，故同樣以饋線 XC31 模擬，模擬時段、演算法、群體數量與迭代次數皆相同，目標函數改為最小化負序電壓不平衡率，如式(5)。圖 40 (a)~(e)分別呈現變壓器相別調整前後饋線最大三相電壓不平衡率、最大零序電壓不平衡率、最大負序電壓不平衡率、出口最大中性電流、最大三相電流、線路總損失。圖 41 為本次模擬迭代過程。



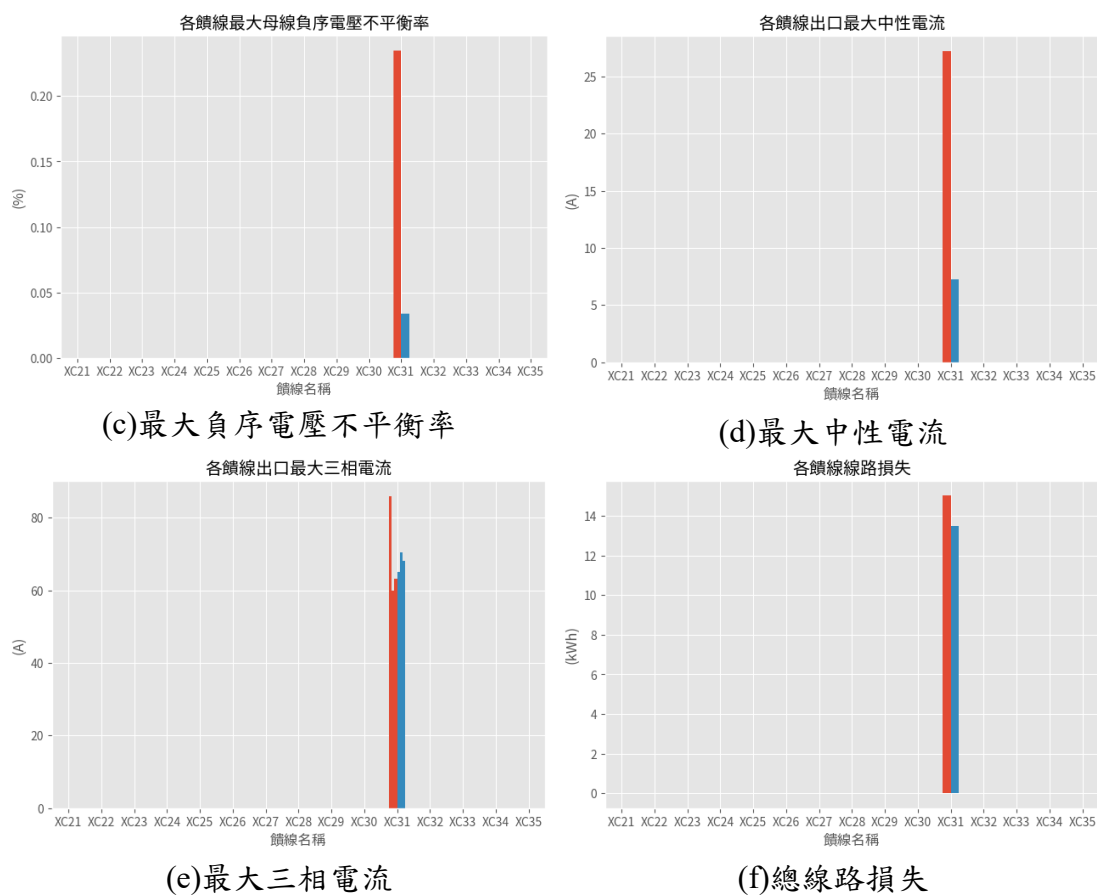


圖 40 饋線 XC31 負載換相模擬結果-目標降低-負序電壓不平衡率

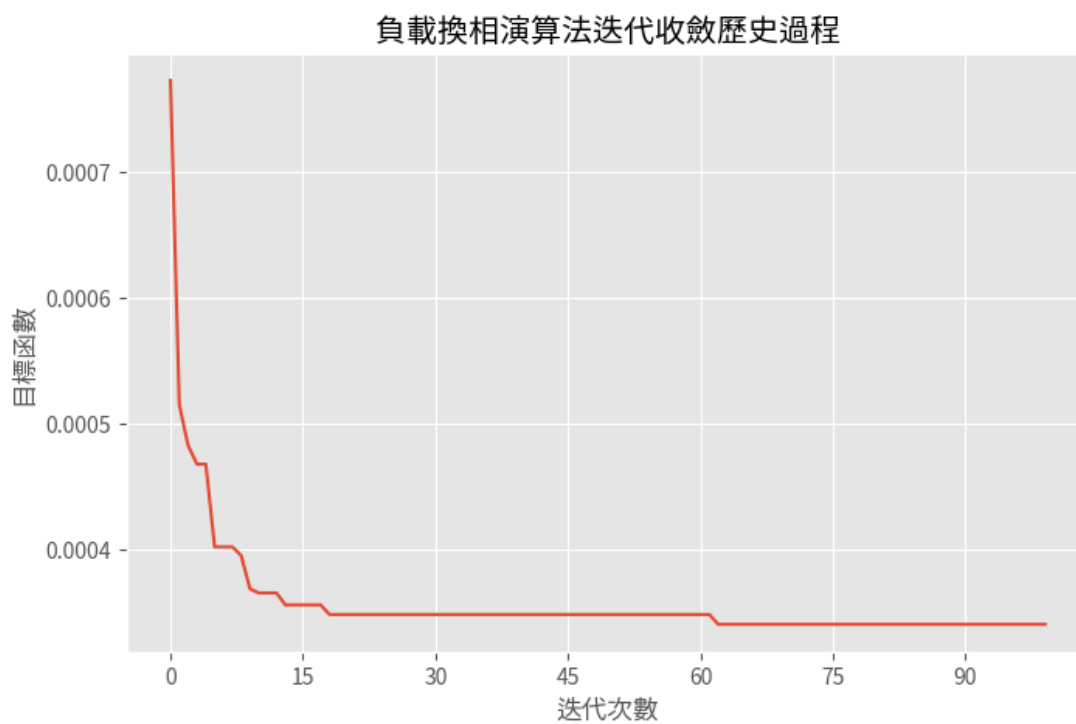


圖 41 灰狼演算法迭代過程

(四) 三相不平衡指標-中性電流

為了比較各項不平衡指標，故同樣以饋線 XC31 模擬，模擬時段、演算法、群體數量與迭代次數皆相同，目標函數改為最小化中性電流。圖 42 (a)~(e)分別呈現變壓器相別調整前後饋線最大三相電壓不平衡率、最大零序電壓不平衡率、最大負序電壓不平衡率、出口最大中性電流、最大三相電流、線路總損失。圖 43 為本次模擬迭代過程。

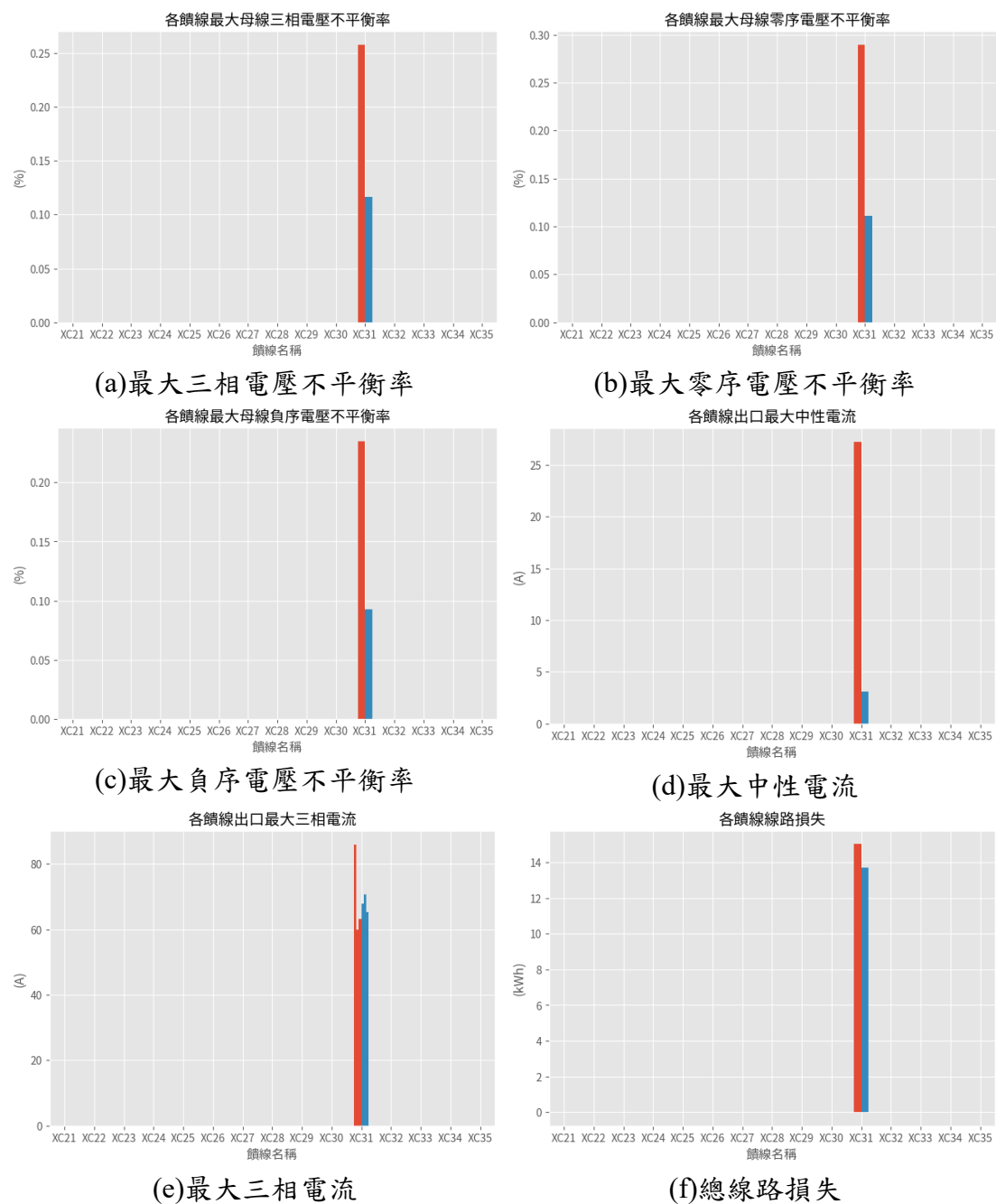


圖 42 饋線 XC31 負載換相模擬結果-目標降低中性電流

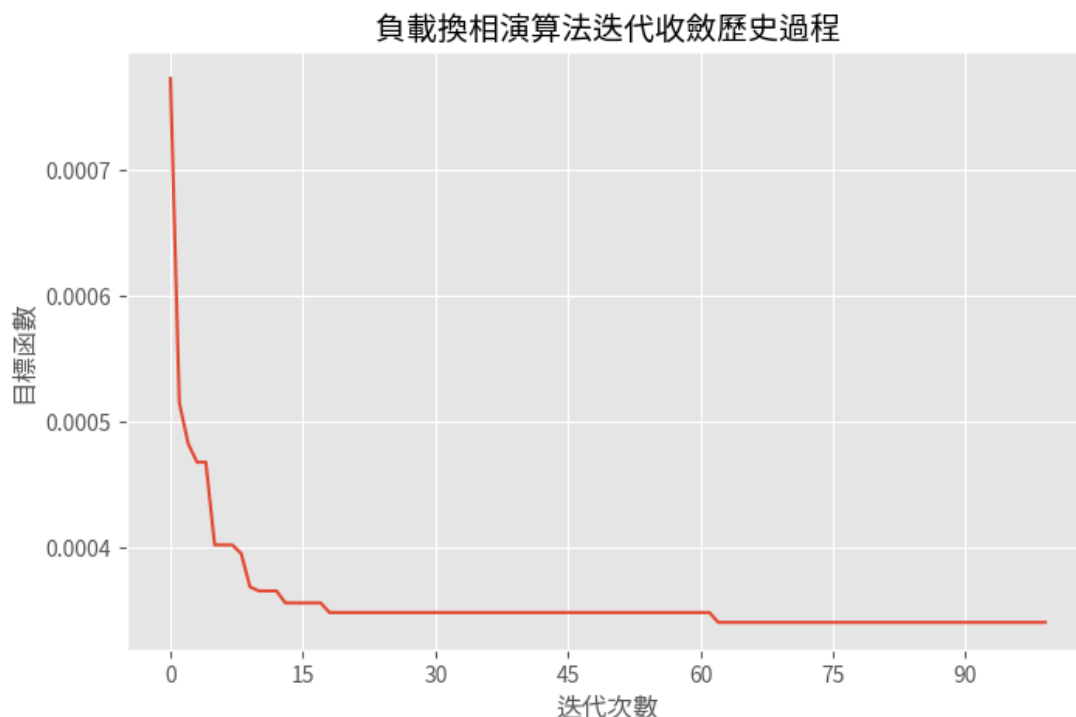


圖 43 灰狼演算法迭代過程

表 3 彙整饋線 XC31 針對以上 4 個改善三相不平衡指標之最佳化模擬結果，可看出四種指標在以其為最佳化目標時將達到最佳結果。三相電壓不平衡率最高可從 0.26% 降低至 0.06%；零序電壓不平衡率最高可從 0.29% 降低至 0.06%；負序電壓不平衡率最高可從 0.24% 降低至 0.03%；中性線電流最高可從 27 A 降低至 3A。而 12 小時之總線路損失從 15.2 kWh 降低至約 13.5 kWh 左右，4 種最佳化目標對於線路損失影響不大。對於電網運轉者而言，可依據饋線所面臨的問題，從本研究所開發之模擬平台選擇饋線、時段、最佳化目標等執行模擬，而不需以人工方式調整變壓器相別。

表 3 模擬結果彙整

	原始數值	最佳化數值			
		最佳化目標 TPVUR	最佳化目標 ZSVUR	最佳化目標 NSVUR	最佳化目標 中性電流
TPVUR	0.26 %	0.06 %	0.10 %	0.14 %	0.12 %
ZSVUR	0.29 %	0.11 %	0.06 %	0.16 %	0.11 %
NSVUR	0.24 %	0.07 %	0.06 %	0.03 %	0.09 %
中性電流	27 A	5 A	7 A	7 A	3 A
線路損失	15.2 kWh	13.4 kWh	13.2 kWh	13.5 kWh	13.7 kWh

三、 結論

本計畫根據制定的目標和工作項目執行。首先，廣泛收集並整理來自國內外應對分散式發電、儲能與負載組合之配電饋線在改善三相不平衡之先進技術報告、期刊與會議資料，並研究現代配電饋線在調整相別、使用相位平衡器與控制分散式能源等改善三相不平衡先進作法，作為本計畫立論參考依據。其次，其透過台電區處之配電饋線拓樸資料、FTU 歷史量測資料，建立配電饋線模型，並以 OpenDSS 進行三相電力潮流解析。其中潮流解析分為正常運轉與非正常運轉，如停電全饋線轉供與分段饋線轉供，計算其三相不平衡率。接著建立建立配電饋線之分散式能源與負載統計模型，用以分析三相不平衡改善前後淨負載變動特性，並簡化最佳化模擬流程。綜合上述模型，利用群體智慧演算法調整饋線負載抽接點相別，並以三相電壓不平衡率、零序電壓不平衡率、負序電壓不平衡率，以及中性線電流做為目標式，執行最佳演算以改善台電三相不平衡問題。

表 4 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，並完成期末報告一篇、國際期刊及國內研討會論文投稿各一篇。本研究建立區域配電網三相不平衡改善模擬平台，研究成果將目前台電配電系統三相不平衡問題以實際系統資料配合群體演算法進行最佳化，深具實務價值與學術貢獻。

表 4 本計畫執行甘特圖

工作項目 \ 月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
國內外因應分散式發電、儲能與負載組合之配電饋線在改善三相不平衡之先進技術報告、期刊與會議資料蒐集與彙整。												
研究現代配電饋線在調整相別、使用相位平衡器與控制分散式能源等改善三相不平衡先進作法。			※									
計算正常運轉與非正常運轉拓樸下之電力潮流與三相不平衡率分析。					※							
建立配電饋線之分散式能源與負載統計模型，並分析三相不平衡改善前後淨負載變動特性。								※				
研擬配電饋線三相不平衡改善之目標式，並提出三相不平衡改善策略方法。												
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）	10%	15%	25%	35%	40%	50%	60%	70%	80%	85%	95%	100%
預定查核點	第 1 季：完成研究現代配電饋線在調整相別、使用相位平衡器與控制分散式能源等改善三相不平衡先進作法。											
	第 2 季：完成計算正常運轉與非正常運轉拓樸下之電力潮流與三相不平衡率分析。											
	第 3 季：完成建立配電饋線之分散式能源與負載統計模型，並分析三相不平衡改善前後淨負載變動特性。											
	第 4 季：完成研擬配電饋線三相不平衡改善之目標式，並提出三相不平衡改善策略方法。											

肆、參考文獻

- [1]. <https://www.re.org.tw/knowledge/more.aspx?cid=201&id=3966>
- [2]. https://www.taipower.com.tw/tc/chart_m/b25_%e7%99%bc%e9%9b%bb%e8%b3%87%e8%a8%8a_%e8%b3%bc%e5%85%a5%e9%9b%bb%e5%8a%9b%e6%a6%82%e6%b3%81_%e6%ad%b7%e5%b9%b4%e5%86%8d%e7%94%9f%e8%83%bd%e6%ba%90%e8%a3%9d%e7%bd%ae%e5%ae%b9%e9%87%8f.html
- [3]. <https://ec.ltn.com.tw/article/paper/1533275>
- [4]. https://www.digitimes.com.tw/iot/article.asp?id=0000652240_B1X3WFZG3J2JMN1121VCD
- [5]. R. A. Hooshmand and S. Soltani, "Fuzzy Optimal Phase Balancing of Radial and Meshed Distribution Networks Using BF-PSO Algorithm," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 1, pp. 47-57, Feb. 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2167991.
- [6]. Chia-Hung Lin, Chao-Shun Chen, Hui-Jen Chuang and Cheng-Yu Ho, "Heuristic rule-based phase balancing of distribution systems by considering customer load patterns," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 2, pp. 709-716, May 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.846077.
- [7]. M.-Y Huang et al., "Three-phase balancing of distribution feeders using immune algorithm," Generation, Transmission & Distribution, IET., 2008, 2. 383 - 392. 10.1049/iet-gtd:20070206.
- [8]. C. H. Lin et al., "Optimal Phase Arrangement of Distribution Feeders Using Immune Algorithm," 2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISAP.2007.4441596.
- [9]. C. -H. Lin, C. -S. Chen, H. -J. Chuang, M. -Y. Huang and C. -W. Huang, "An Expert System for Three-Phase Balancing of Distribution Feeders," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 3, pp. 1488-1496, Aug. 2008, doi: 10.1109/TPWRS.2008.926472.
- [10]. Jinxiang Zhu, Mo-Yuen Chow and Fan Zhang, "Phase balancing using mixed-integer programming distribution feeders," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 13, no. 4, pp. 1487-1492, Nov. 1998, doi: 10.1109/59.736295.

- [11]. K. Ma, L. Fang and W. Kong, "Review of distribution network phase unbalance: Scale, causes, consequences, solutions, and future research directions," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 479-488, Sept. 2020, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.03280.
- [12]. S. M. Fazeli, H. W. Ping, N. B. A. Rahim, and B. T. Ooi, "Individual phase decoupled P-Q control of three-phase voltage source converter," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. 11, pp. 1219–1228, Nov. 2013.
- [13]. S. M. Fazeli, H. W. Ping, N. B. A. Rahim, and B. T. Ooi, "Individual phase control of 3-phase 4-wire voltage-source converter," *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 9, pp. 2354–2364, Sep. 2014.
- [14]. S. Yan, S. C. Tan, C. K. Lee, B. Chaudhuri, and S. Y. R. Hui, "Electric springs for reducing power imbalance in three-phase power systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 7, pp. 3601–3609, Jul. 2015.
- [15]. F. Shahnia, A. Ghosh, G. Ledwich, and F. Zare, "Voltage Unbalance reduction in low voltage distribution networks with rooftop PVs," in *Proceedings of the 20th Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2010, pp. 1–5.
- [16]. A. Alsulami, M. Bongiorno, K. Srivastava, and M. Reza, "Balancing asymmetrical load using a static var compensator," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*, 2014, pp. 1–6.
- [17]. H. J. Chiu, T. H. Wang, L. W. Lin, and Y. K. Lo, "Current imbalance elimination for a three-phase three-switch PFC converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 2, pp. 1020–1022, Mar. 2008.
- [18]. S. Beharrysingh, "Phase unbalance on low-voltage electricity networks and its mitigation using static balancers," Ph.D. dissertation, Loughborough University, London, 2014.
- [19]. S. Y. Liu, X. Y. Cui, Z. Z. Lin, Z. K. Lian, Z. A. Lin, F. S. Wen, Y. Ding, Q. Wang, L. Yang, R. Y. Jin, and H. F. Qiu, "Practical method for mitigating three-phase unbalance based on data-driven user phase identification," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 2, pp. 1653–1656, Mar. 2020.
- [20]. S. B. Chen, Z. W. Guo, Z. Y. Yang, Y. J. Xu, and R. S. Cheng, "A game theoretic approach to phase balancing by plug-in electric vehicles in the smart grid," *IEEE*

- Transactions on Power Systems, vol. 35, no. 3, pp. 2232–2244, May 2020
- [21]. S. Sun, B. Liang, M. Dong, and J. A. Taylor, “Phase balancing using energy storage in power grids under uncertainty,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 5, pp. 3891–3903, Sep. 2016
- [22]. T. Q. Hong and F. de Leon, “Centralized unbalanced dispatch of smart distribution DC microgrid systems,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 4, pp. 2852–2861, Jul. 2018.
- [23]. P. Lico, M. Marinelli, K. Knezovic, and S. Grillo, “Phase balancing by means of electric vehicles single-phase connection shifting in a low voltage Danish grid,” in Proceedings of the 50th International Universities Power Engineering Conference, 2015, pp. 1–5.
- [24]. K. H. Chua, J. Wong, Y. S. Lim, P. Taylor, E. Morris, and S. Morris, “Mitigation of voltage unbalance in low voltage distribution network with high level of photovoltaic system,” Energy Procedia, vol. 12, pp. 495–501, 2011.
- [25]. C. G. Bajo, S. Hashemi, S. B. Kjsær, G. Y. Yang, and J. Østergaard, “Voltage unbalance mitigation in LV networks using three-phase PV systems,” in 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2015, pp. 2875–2879.
- [26]. F. Shahnia, R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich, and F. Zare, “Voltage imbalance analysis in residential low voltage distribution networks with rooftop PVs,” Electric Power Systems Research, vol. 81, no. 9, pp. 1805–1814, Sep. 2011.
- [27]. E. Vega-Fuentes and M. Denai, “Enhanced electric vehicle integration in the UK low-voltage networks with distributed phase shifting control,” IEEE Access, vol. 7, pp. 46796–46807, Apr. 2019.