

基於 FTU 資料負載機率模型之粒子群最佳化演算法改善三相不平衡研究

Study on Improvement of Three-Phase Unbalance by Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Stochastic Load Model of the FTU data

黃維澤¹
Wei-Tzer Huang

林韋辰¹
Wei-Chen Lin

李奕德²
Yih-Der Lee

姜政綸²
Jheng-Lun Jiang

賴惠敏²
Hui-Min Lai

陳冠志¹
Guan-Jr Chen

陳祐安¹
You-An Chen

李宗泰¹
Zong-Tai Li

¹ 國立彰化師範大學工業教育與技術學系
Department of Industrial Education and Technology, National Changhua University of Education

² 核能研究所
The Institute of Nuclear Energy Research

摘要

改善饋線三相不平衡最常見的做法為重新分配各配電變壓器相別，已有許多文獻以最佳化演算法進行相別調整。但於實際系統上，其關鍵在於如何有效獲得各母線有效負載，目前台電區處相對較容易取得的資料通常為變電所饋線出口端 24 小時總負載，或是以饋線終端設備(FTU)量測之饋線中、後段負載資料。故本文提出以 FTU 所得資料為基準，建立等效饋線機率負載模型之方法，並以粒子群最佳化(PSO)演算法對主饋線上各變壓器相別進行調整，模擬結果顯示能降低中性線電流與饋線損失，本文研究成果可提供改善配電網三相不平衡相關研究之參考。

關鍵詞：饋線終端設備、機率負載模型、粒子群最佳化、中性線電流、饋線損失。

Abstract

To improve the three-phase unbalance, the most common method is reconfiguring the phase connection of the distribution transformers, and the several optimization algorithms are proposed in the literature. However, in the practical system, the point is how to obtain the effective load data at each bus of the feeders. At present, Taipower available data is the feeder 24-hour total load, or the feeder middle section total load measured by feeder terminal unit (FTU). Therefore, the method is proposed in this paper, which build the equivalent stochastic feeder bus load model based on FTU data format, and use the particle swarm optimization (PSO) algorithm to rearrange the phase connection of the distribution transformers on the purpose of minimizing the neutral line current end the system total loss. The outcomes of this paper are helpful for the related research for improving three-phase unbalanced in distribution networks.

Keywords: FTU, Stochastic load model, PSO, Neutral current, Feeder loss.

I. 簡介

過去配電系統分析僅需考慮負載模型，其結構單純，主要分為住宅型、商業型與工業型等幾個經典的類別，在負載預測以及區域配電網控制等技術均成熟且行之有年，但由於近年來環保意識與政策面的考量，負載的結構不再只是單純的用電戶。我國政府所揭示未來的電力能源結構將原本不到 5% 的再生能源發電量預期於 2025 年提升至 20%，其中再生能源發電以太陽光電與風力發電為主，太陽光電屋頂型與地面型(含水面型)裝置容量預計分別為 3 GW 與 17 GW；陸域與離岸風力發電裝置容量預計分別為 1.2 GW 與 3 GW(共計 4.2 GW，部分文獻更高達 7 GW)。鑒於單一再生能源案場裝置容量大小，通常大容量的風機併於輸電網；小容量的 PV 併於配電網。綜合上述可知，未來大量的 PV 併網將改變配電網負載模型，如饋線負載驟升、驟降與尖離峰改變等，對於配電端負載衝擊甚鉅。除了鄰近負載，分散式再生能源、需量反應等負載管理措施亦改變配電饋線負載模型。國內現行的需量反應方案分為價格基礎與誘因基礎兩種，其中誘因基礎中的減少用電措施有計畫性抑低用電、臨時性抑低用電，以及透過競價方式抑低用電。尤其台電於 104 年引進需量競價措施後，越來越多配電網上的小型用戶參與競價，106 與 107 年的申請量分別為 9916 MW 與 12370 MW，故未來的需量措施對配電饋線負載造成的衝擊亦不容小覷。綜觀上述，在 PV 大量併網以及需量反應措施與日俱增下，配電饋線負載結構將愈趨複雜且不穩定，在沒有妥善規劃下容易造成三相不平衡問題，進而導致系統損耗升高與因中性線電流過高保護電驛誤動作的情形。

另外，在最佳化演算法方面廣泛應用於各個不同領域之中，其結合了生物習性、演化過程和人工智慧的啟發式演算法問世，如著名的基因演算法(Genetic Algorithm)、粒子群演算法(PSO)等，這些啟發式演算法具有隨機搜尋的特點，因此能有效脫離局部區域而跳往全域進行搜尋，提升找到全域最佳解的機率，再加上具有記憶功能，藉由前一代的經驗而修正當代的尋解方

向，加快了收斂時間，故近 10 幾年來，各類型的啟發式演算法被提出且改良[1]-[7]。

為了改善三相不平衡問題，相比於人工調閱報表無系統化的調整配電變壓器相別，以最佳化演算法學習運算求解可較有效且有系統的得知調整目標。為了最佳化演算法學習求解，需得知各母線三相負載，而在實際系統負載量測上通常只有變電所總負載以及饋線終端設備(FTU)量測之饋線中後段總負載；此外，考量到演算法運算速度問題，在變動的負載中只能求取一個時間點負載。故本論文將 FTU 負載資料等效為各母線三相負載，並建立各母線負載機率模型，求取各相最高機率負載，再以運算速度快且易收斂之粒子群最佳化演算法(PSO)迭代求解出各配電變壓器最佳相位配置，目標函數為最小化系統總損失以及中性線電流大小。

II. 標的系統及等效機率負載模型

2.1 標的系統

本文以台電中部某饋線 A 做為標的系統，其單線圖如圖 1 所示。該系統為 PV 高佔比饋線，裝置容量達 3057.7 kW，母線數量為 55 個，裝置 3 個 FTU 於饋線前、中、後段。其中，FTU 所量測值為該裝置點饋入功率總合，也就是負載加上損耗減去 PV 的值，如式(1)所示。而圖 1 中紅色線標示代表主饋線，台電調整變壓器相位僅考慮主饋線，故本文亦以主饋線 22 個母線做為最佳化目標。

$$Value_{FTU} = S_{load} + S_{loss} - P_{PV,gen} \quad (1)$$

2.2 母線等效最大機率負載

為了求得主饋線母線最佳相位配置，需得知個母線常態三相負載，也就是該母線最高機率負載落點。本文做法首先將饋線負載分為三段，三段總功率為分如式(2)、式(3)與式(4)所示，即為該饋線區段前端與末端 FTU 資料相減。

$$S_{1,total} = Value_{FTU1} - Value_{FTU2} \quad (2)$$

$$S_{2,total} = Value_{FTU2} - Value_{FTU3} \quad (3)$$

$$S_{3,total} = Value_{FTU3} \quad (4)$$

接著依據各母線配電變壓器三相容量，將三個饋線區段線總負載 S_1 、 S_2 與 S_3 依照比例分配至該母線，如式(5)所示，其中 $C_{DTr,i}$ 為各配電變壓器容量。

$$Bus_{load,i} = S_{total} \times \frac{C_{DTr,i}}{\sum_i C_{DTr,i}} \quad (4)$$

由於台電通常以月為單位進行相位調整並前後對照評估效果，故本文以單月預測之總負載，將所得之每條母線負載轉為機率密度函數(Probability density function, PDF)，如圖 2 所示，並取其最大機率點輸入最佳化模型中負載資料。

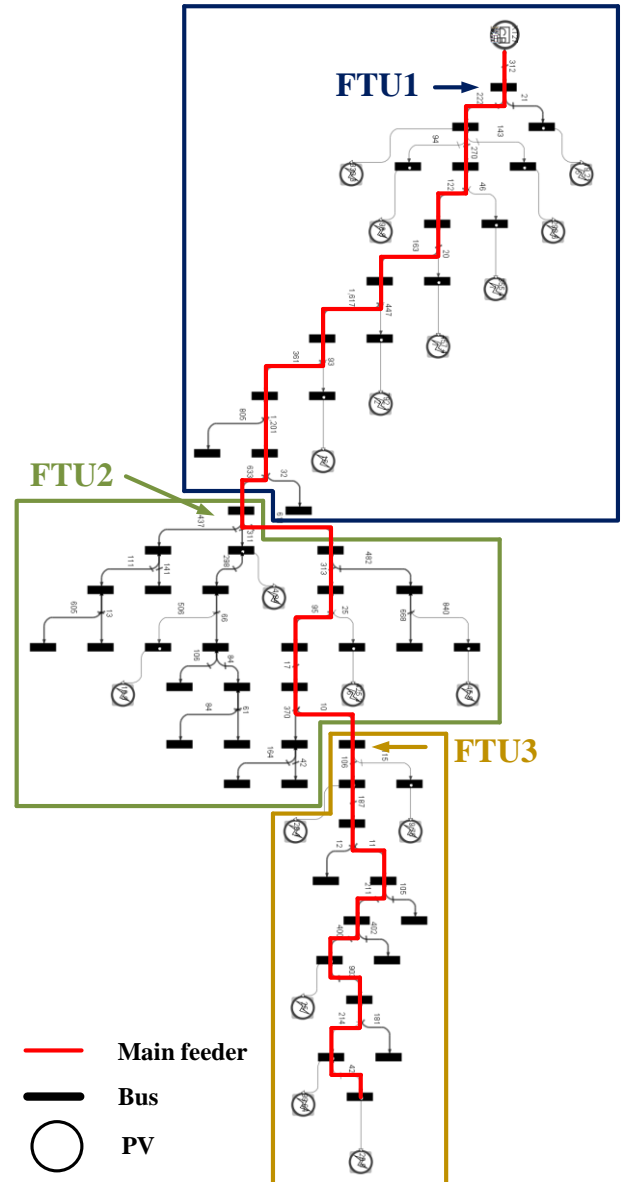


圖 1: 饋線 A 單線圖

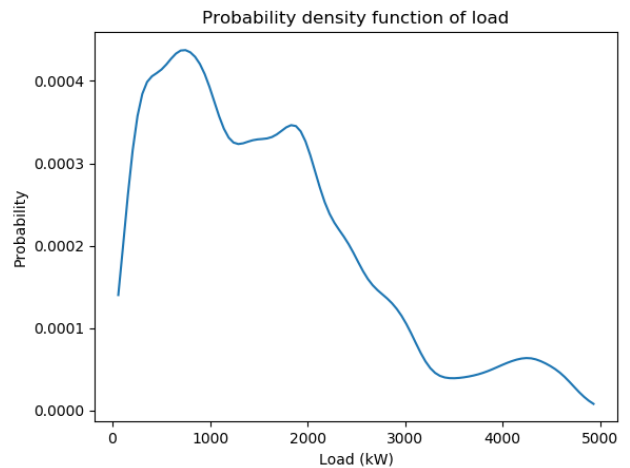


圖 2: 饋線負載之機率密度函數

III. 目標最小化三相不平衡之粒子群最佳化演算法

3.1 粒子群最佳化演算法

粒子群最佳化演算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是一種模擬鳥類群體覓食或是遷移行為的最佳化探索演算法，此方法是由美國的 James Kennedy 和 Russell Eberhart 所提出[8]。粒子群演算法透過觀察生物的移動，藉以推得出當生物在進行遷移或覓食時，會有兩種基礎的行為模式，並依據這兩種模式運作，如圖 3 所示。這兩種模式分別為認知模式(Cognition-only Model)以及社會模式(Social-only Model)。在粒子群最佳化演算法當中，每一個體都稱作粒子(Particle)，每個粒子都代表是問題的一個可能解，並且每個粒子都擁有自己的位置與速度，每個粒子的移動會除了以本身的慣性運動外，還會依據本身移動的最佳經驗，產生認知學習的遷移(Cognitive Learning)來修正下一次移動的方向，也就是所謂的認知模式；此外粒子個體也會與群體當中的最佳經驗進行比較，藉由社會學習(Social Learning)的方式調整方向，這便是社會模式。粒子群演算法透過此兩種模式不斷的迭代演算後，獲得符合問題需求的最佳解，其演算法公式以及求解流程圖如式(5)、式(6)與圖 4 所示。

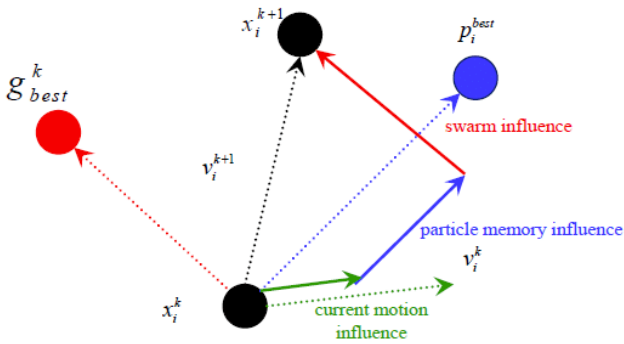


圖 3: PSO 粒子行為模式示意圖

$$V_n^{i+1} = w \times V_n^i + c_1 \times rand \times (P_{bestn}^i - S_n^i) + c_2 \times rand \times (G_{bestn}^i - S_n^i) \quad (5)$$

$$S_n^{i+1} = S_n^i + V_n^{i+1} \quad (6)$$

其中， w 為慣性權重； V_n^i 為粒子 n 在第 i 次迭代時的移動速度， C_1 與 C_2 則是學習因子； $rand$ 為 0 至 1 之間的隨機亂數； P_{bestn}^i 為粒子 n 在第 i 次迭代時的個體最佳解； S_n^i 則是粒子 n 在第 i 次迭代時的位置； G_{bestn}^i 為粒子 n 在第 i 次迭代時的群體最佳解。由於粒子群最佳化演算法需要設定的參數較少，且方法容易實現且搜尋快速，相當適合於解決含有分散式能源之配電系統相位平衡的最佳化組合問題。因此，本文當中將以粒子群最佳化演算法為核心，針對問題進行求解工作。

3.2 OpenDSS 結合 Python 最佳化演算平台

OpenDSS 最先是 Electrotek Concepts 所開發之配電系統模擬分析軟體，而後被美國電力研究所(Electric

Power Research Institute)購置，並於 2008 年以開放式原始碼軟體(OpenSource)的方式，分享於網站中[9]。其主要是使用於配電系統的研究與分析，

相較於市面上其他商售專業分析軟體(如 PSS/E、Cyme PSAF 等)而言，OpenDSS 雖然功能較少，但是以成本及運算速度的考量下，仍是具有相當大的優勢。因此，在本文當中將採用同為免費軟體 Python 透過 COM 介面與 OpenDSS 進行溝通，以 PSO 演算法進行母線相別重構之多目標非線性函數求解。

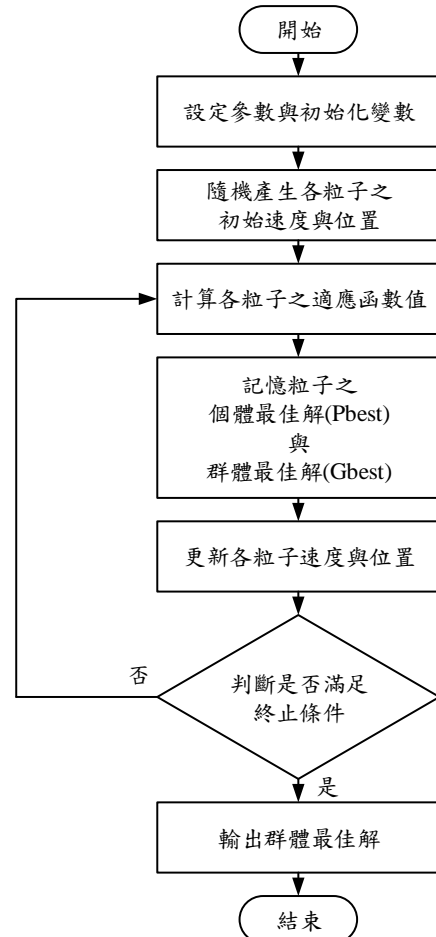


圖 4: PSO 程式流程圖

3.3 相別重構之多目標非線性函數規劃

實際配電系統當中，由於線路的配置不同以及變壓器結構不同、PV 發電三相不平衡以及用戶隨機用電行為，使得配電系統皆有著程度不一的相位不平衡現象存在，當系統處於相位不平衡時，輕則對線路損失以及電動機負載轉矩輸出造成影響，嚴重的話，將導致配電系統當中的保護電驛誤動作，而影響供給電力的品質[10]。針對配電系統當中的相位不平衡問題，在能源管理系統當中，會透過調整配電變壓器與各相線路的連接位置來改善相位不平衡的程度。若以典型的饋線與三相負載連接組合為例，配置方法將會有六種不同的連接方式，可如圖 5 所示[11]。

表 1: PSO 參數設定表

參數名稱						
粒子數量	迭代次數	C1	C2	W1	W2	W3
200	100	2	2	3	5	2

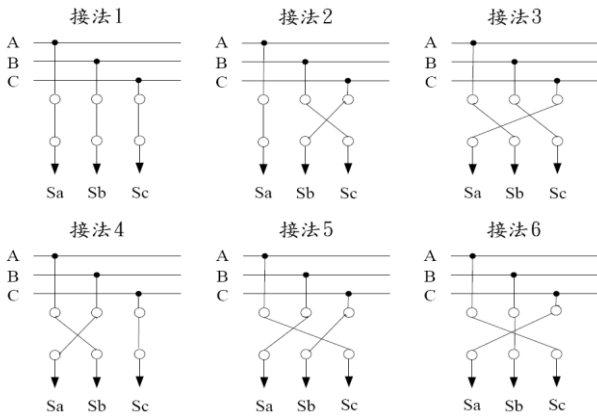


圖 5: 最佳相位配置連接示意圖

在多個相別重構的問題當中，由於問題的複雜性高且多為非線性，因此無法僅以傳統單一目標問題(Single Objective Problem)來進行問題的精確分析，因此本文當中，將採用多目標規劃的方式，提出符合問題需求之多目標非線性函數，以求得問題最佳化結果。在多目標規劃當中，權重法是最早被提出且應用最為廣泛的多目標規劃方法，其依據每個目標式的重要程度，賦予不同比例的權重值，藉以將問題整合成一個單目標函數，由於方法簡單且快速，因此本文將採用權重法來實現最佳化相別配置多目標非線性函數設定。

在目標函數方面，本文最終目標為降低中性線電流以防止保護電驛誤動作，故饋線出口端中性電流為最重要之最佳化指標。然而，為了防止目標解過於趨向饋線出口而忽略了其他位置的不平衡率，總系統損失也必須被考慮進來。此外，為了防止調整相別之母線過多導致現場人員工作增加，調整母線個數亦在本文納入目標函數中。綜合上述評估問題最佳化的目標式，可依據重要程度予以配比權重，規劃出多目標權重公式以及限制條件式如下所示。

$$F = w_1 \times \frac{I_{Nline} - i_{Nline}^{min}}{i_{Nline}^{max} - i_{Nline}^{min}} + w_2 \times \frac{P_{loss} - p_{loss}^{min}}{p_{loss}^{max} - p_{loss}^{min}} + w_3 \times \frac{N_{adj} - n_{adj}^{min}}{n_{adj}^{max} - n_{adj}^{min}} \quad (7)$$

受限於

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad (8)$$

其中 I_{Nline} 為饋線出口中性線電流， P_{loss} 為系統損失，而 N_{adj} 則為調整母線個數； w 為比例權重。

IV. 模擬結果與分析

4.1 系統參數設定

為解決含有分散式能源之配電系統考量相位平衡下之最佳化問題，本節當中，將利用第二節所提出之範例系統，比較範例系統在採用最佳相位配置法前後，對於系統最佳化的改善情況。其中，對於最佳相位配置法問題中的粒子群演算法參數可如表 1 所示。

4.2 迭代求解

本文之 PSO 目標函數 F 粒子迭代求解收斂過程如圖 6 所示，在 200 個粒子、100 次的迭代後，目標函數 F 從 0.4426 降低至 0.402，且可看出其在第 23 次迭代後即達到收斂。

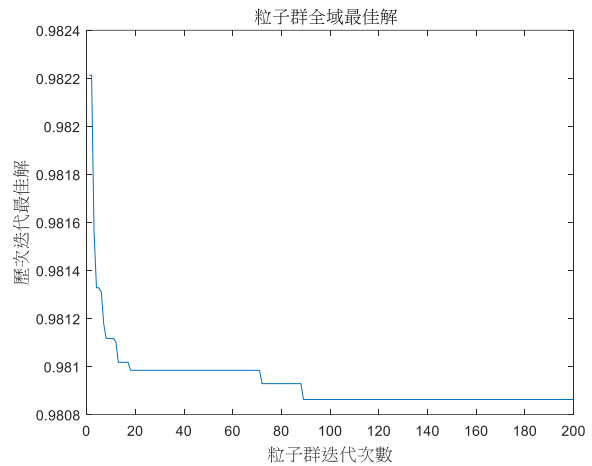


圖 6: 目標函數粒子迭代收斂圖

圖 7 與圖 8 分別為饋線出口中性線電流與系統總損失粒子迭代求解收斂過程，前者在經迭代後從 2.1318 A 降低至 0.0394；後者從 40152 W 降低至 40144 W。其中不難發現當前者明顯降低時，後者則略為上升，在經數次迭代後後者便下降且收斂。這也印證了第三節所提到之防止目標解過於趨向饋線出口而忽略了其他位置的不平衡率。

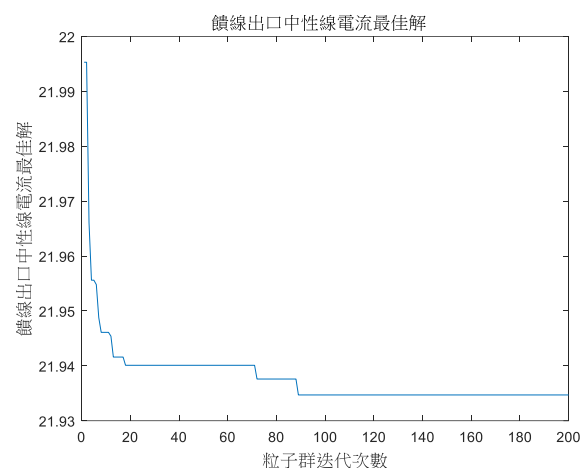


圖 7: 饋線出口中性線電流粒子迭代收斂圖

IV. 結論

本文基於台電 FTU 負載資料形式，建立等校機率負載模型，並以 PSO 演算法對配電變壓器相別進行最佳化配置，在少量的相別調整下，將系統總損失、中性線電流降至最低，以改善系統效率以及防止保護電驛誤動作。本研究不僅以台電常用之負載資料形式作為調整三相不平衡的基準，且計算其當月常態負載落點，符合實際運轉操作需求，可供未來台電區處相別調整作業參考。

誌謝

本研究承蒙核能研究所計畫編號：108A001 之經費補助研究計畫之經費補助，特此感謝。

參考文獻

- [1] X.-S. Yang, "A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm," Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization, pp. 65-74, 2010.
- [2] D. Karaboga and B. Akay, "Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm on Training Artificial Neural Networks," IEEE 15th Signal Processing and Communications Applications, pp. 1-4, 2007.
- [3] X.-L. Li, & Qian, J.-X., "Studies on artificial fish swarm optimization algorithm based on decomposition and coordination techniques," Journal of Circuits and Systems, vol. 8, pp. 1-6, 2003.
- [4] Z. W. Geem, J. H. Kim, and G. Loganathan, "A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search," Simulation, vol. 76, pp. 60-68, 2001.
- [5] S. Łukasik and S. Żak, "Firefly Algorithm for Continuous Constrained Optimization Tasks," First International Conference on Computational Collective Intelligence. Semantic Web, Social Networks and Multiagent Systems, pp. 97-106, 2009.
- [6] H. Ge and Z.-Y. Mao, "Immune algorithm," Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2002., vol. 3, pp. 1784-1788 vol.3, 2002.
- [7] Z. Hong-hao and X. Fan-lun, "A Novel Ant Colony Algorithm with Grouping Strategy Based on Time Model," The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, vol. 1, pp. 3213-3216, 2006.
- [8] J. J. Jamian, M. M. Aman, M. W. Mustafa, G. B. Jasmon, H. Mokhlis, A. H. A. Bakar, et al., "Optimum multi DG units placement and sizing based on voltage stability index and PSO " in 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC) London 2012, pp. 1-6.
- [9] D. Montenegro, M. Hernandez, and G. A. Ramos, "Real time OpenDSS framework for distribution systems simulation and analysis " in Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 2012 Sixth IEEE/PES Montevideo 2012, pp. 1-5.
- [10] C. Tsai-Hsiang and C. Jeng-Tyan, "Optimal phase arrangement of distribution transformers connected to a primary feeder for system unbalance improvement and loss reduction using a genetic algorithm," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, pp. 994-1000, 2000.
- [11] 羅至暉，含分散式資源之配電網最佳相位配置研究，碩士論文，國立彰化師範大學工業教育與技術學系研究所，彰化，2015。

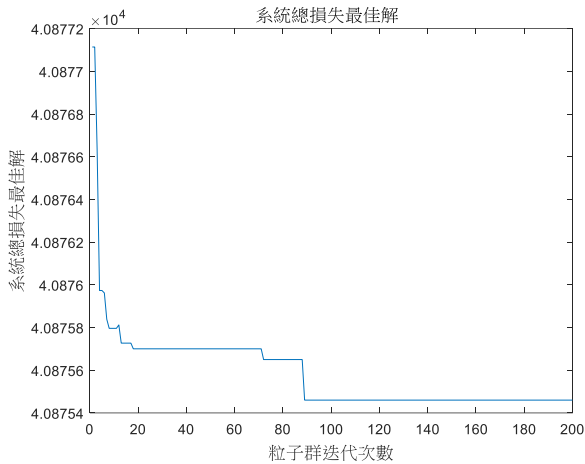


圖 8: 系統總損失粒子迭代收斂圖

4.3 最佳化結果

圖 9 為經 PSO 最佳化相別調整前後饋線中性線電流比較圖，由圖可清楚發現主饋線前端中性線電流有顯著下降，也意味著三相不平衡的改善。圖 10 為相別調整前後饋線饋線總損失，由 41539 W 降低至 40144 W，共下降了 1394 W。

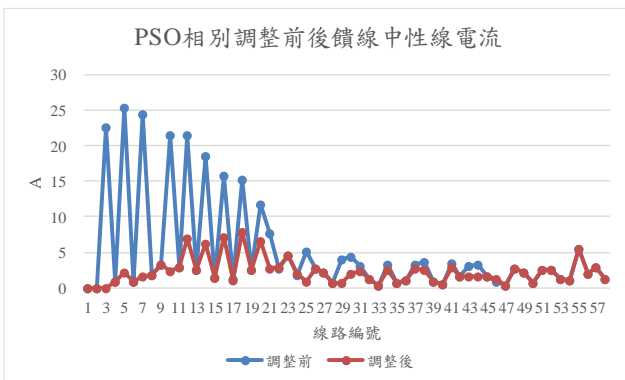


圖 9: PSO 相別調整前後饋線中性線電流

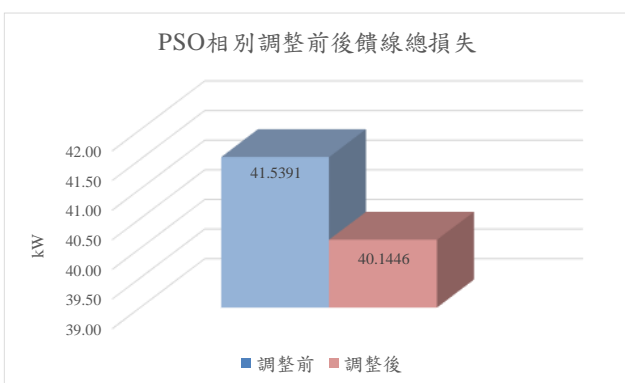


圖 10: PSO 相別調整前後饋線總損失