

風力發電系統裝置於配電饋線之最佳規劃與運轉分析

Optimal Planning and Operating of Wind Energy Conversion Systems in the Distribution Feeder

許振廷 劉豐銘 陳侃聲 鄭尊仁 吳國揚
C. T. Hsu F. M. Liou K. S. Chen J. J. Cheng G. Y. Wu

南台科技大學電機系
Department of Electrical Engineering
Southern Taiwan University of Technology
Tainan, Taiwan, R. O. C.

摘要

本文考慮風能轉換系統於配電饋線之最佳裝設位置與運轉策略以使實功損失降至最低，所訂定之目標函數包含電能損失與尖載實功損失成本，而限制條件則有饋線匯流排電壓與風能轉換系統之功率因數。文中使用免疫演算法來解決此最佳化問題並將目標函數與限制條件當作其抗原，以求取風能轉換系統之最佳裝設位置與運轉策略，最後選擇一條台電實際配電饋線作為研究對象，以驗證所提之免疫演算法之實用性與正確性。

關鍵詞：風能轉換系統、配電饋線、免疫演算法

Abstract

This paper presents an optimal location and operating strategy of the wind energy conversion systems (WECS) installed at the distribution feeder to reduce system power loss. The objective function is formulated by including feeder peak power loss and daily energy loss. In addition, the voltage profile of the feeder buses and the power factor of the WECS are considered as constraints. The immune algorithm (IA) is applied to solve the optimization problem by representing the objective function and constraints as antigens. After performing the genetic evolution, an antibody which fits the antigen best is determined to be the optimal location and operating strategy of WECS. To demonstrate the effectiveness of the proposed IA methodology, a practical distribution feeder in Taipower system is selected for computer simulation to solve the optimal location and operating strategy of WECS by evaluating the daily peak power loss and total energy loss.

Keywords: Wind energy conversion systems, Distribution feeder, Immune algorithm

I. 前言

台灣自產能源匱乏，大部分石化原料皆需仰賴進口，近年來因經濟的快速發展，導致台電系統發電量不足而造成限電的危機。另一方面，國人環保意識的抬頭，台電在興建輸、配電變電所與一般大型集中式火力電廠或核能電廠往往遭受到民眾激烈的抗爭。此外，以石化能源為燃料會造成空氣的污染，目前世界各國政府正在大力推廣以再生能源為燃料的發電系統。因此，在未來勢必會出現許多綠色能源型態的發電系統，如風

力、太陽能、燃料電池及生質能發電系統等[1]。

這些小型套裝氣渦輪汽電共生機組及再生能源發電系統為分散式發電機組(distributed generation, DG)，由於DG之設備容量一般較小，所以大部份會與電力公司配電系統並聯，這些DG會對台電現有配電系統之分析、運轉、規劃與保護系統產生重大的影響。本文選擇台電一條放射狀配電饋線為研究對象，考慮有風力發電機加入饋線運轉時，以免疫演算法決定風力發電機之最佳裝設位置，並執行其最佳虛功率控制，使饋線每日之實功損失降至最低。

II. 風能轉換系統

風能轉換系統(Wind Energy Conversion System; WECS)乃藉由空氣流動帶動風力機旋轉，而將動能轉換成電能的系統，圖1所示為其典型之基本架構圖[2]，包括風力發電機、輸配電系統及監控系統，其中風力發電機包括葉片轉子、發電機、增速裝置、控制系統、塔架及機艙等設備；輸配電系統主要包括變壓器及輸配電電纜、配電盤、補償電容器及電源轉換設備；監控系統則包含主電腦、遠端控制器及通訊系統。依照風力發電系統之旋轉電機與電網併聯的應用方式，可歸類成定轉速度和變動速度兩種發電運轉模式。

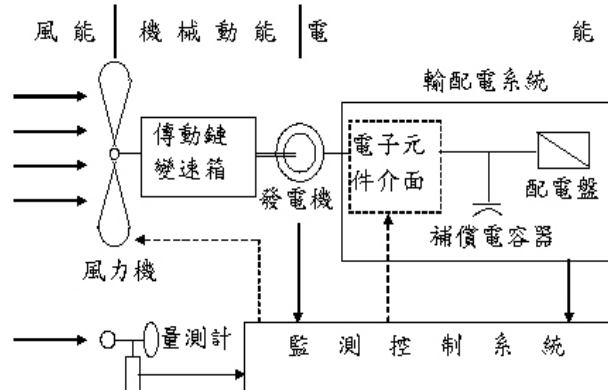


圖1 風能轉換系統之基本架構圖

本文所考慮的風力發電機為丹麥 Vestas 公司所製作，滿載發電量為 1.75MW，當風速達 4m/s 以上時，風力機組自動啟動發電，於風速達 15m/s 即可滿載發電；當風速超過 25m/s 時，風力發電機即自動關機。目前再生能源併聯技術[3]要點中規定，使用感應發電機之功率因數操作範圍應維持在 0.85 落後~0.95 超前間，本文即

將風能轉換系統之功率因數操作在此一區間，並求其最佳運轉模式。

III. 配電系統之模型建立與三相負載潮流分析

本文藉由停限電運轉圖資系統、拓樸分析以及設備減量工作，來獲得配電饋線的電路模型，其建立過程如圖 2 所示[4]。停限電運轉圖資系統將配電設備分為分支及節點二種元件，根據此系統可得配電設備相關屬性資料表，拓樸分析則經由追溯過程建立網路結構，由給定之節點設備或分支設備開始，以分支另一端點為新的起點，而該起點連結到新的節點表示是新的分支，重覆執行此過程直到抵達開路開關或終點，當所有配電設備皆已追溯完畢時，則代表配電饋線之網路模型架構建構完成。

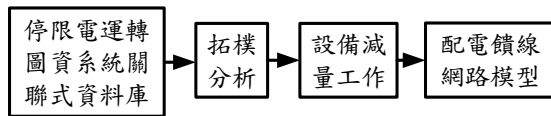


圖 2 建立配電饋線網路模型流程

台電配電饋線線路主幹線為三相導線，亦有相當長度之二相及單相分歧線段，饋線的不對稱常造成三相不平衡及相間互感效應。為增進本研究之準確度，文中使用三相負載潮流程式，考慮三相不平衡及相間互感效應，並根據配電變壓器每小時的負載需求，計算配電饋線每小時線路總損失。

IV. 風能轉換系統之最佳規劃與運轉分析

本文執行含風力發電系統之虛功率控制以使系統之實功損失降至最低，在此節中將介紹最佳化之目標函數與限制條件，此外亦將對所使用之免疫演算法做深入的說明。

4.1 目標函數與限制條件

配電饋線之線路與變壓器乃造成實功損失的原因，文中所訂定之目標函數與限制條件如下列方程式所示，其中目標函數主要考量為每日之電能損失與尖載實功損失成本，而限制條件則有饋線匯流排電壓與風力發電系統之功率因數。

$$F = Ke \sum_{i=1}^{24} P_{loss_i} + K_p \times E_p \quad (1)$$

$$V^{\min} < V_i < V^{\max} \quad (2)$$

$$0.85 \text{ lagging} < WECS_{pf} < 0.95 \text{ leading} \quad (3)$$

其中 P_{loss_i} 、 E_p 分別為該饋線第 i 小時電能損失及尖載實功損失， K_e 為每 kWh 電能損失成本而 K_p 為每 kW 實功損失成本，本計劃所採用之 K_e 、 K_p 分別為 2.1133 元/kWh 與 8.62 元/kW-天。此外，饋線各匯流排之電壓須在其下限(V^{\min})與上限(V^{\max})範圍內，此限制值分別為 0.95pu 與 1.05pu。而風力發電系統之功率因數($WECS_{pf}$)則依再生能源併聯技術規定，控制其在 0.85 落後~0.95 超前之間。

4.2 免疫演算法

免疫演算法是模仿生物系統的機制所衍生的演算法，將抗原當成欲求解的最佳化問題，而抗體則是其可行解。針對抗原來搜尋與它相吻合的抗體亦即問題之可行解，同時學習免疫系統具備的辨識及記憶之特質，在每一代的演化過程之中，將較佳抗體挑出來做株落選擇辨認專一性並大量複製後，存入記憶細胞區成為記憶細胞的一員，並對記憶細胞做篩選只留下較好的抗體，此法可降低搜尋不可行解的機率，並縮小求解空間[5-6]。

免疫演算法的抗體結構首先要定義雜異度和相似度，如圖 3 所示， M 個抗體內有 Z 個基因數，每個基因以 2 位元組成，分別代表一組 WECS 的位置及容量大小，如表 1 所示，其中位元 1 與位元 2 分別為 WECS 可能的裝設位置與容量大小， M 為抗體的總數，代表每個世代中，可行的 WECS 規劃操作模式， Z 為饋線上考慮裝設 WECS 之數目。

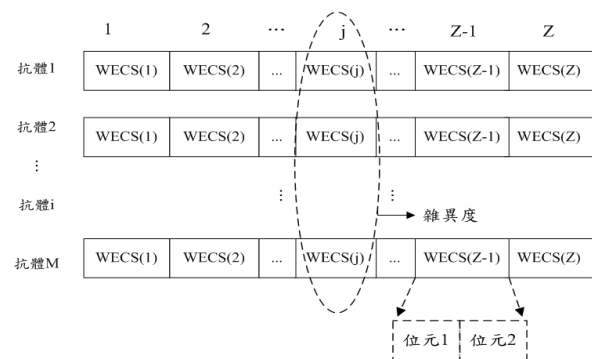


圖 3 抗體之資料結構

表 1 抗體表示說明

位元	位元形式	數值	代表意義
1	十進制	整數	風機裝設位置
2	十進制	整數	風機輸出虛功

雜異度(Diversity)即為舊世代和新世代抗體之間的雜異程度，優秀的抗體會保留下來，增加記憶單元抗體族群的雜異度，可以降低陷入局部最佳點的可能，如圖 3 所示，抗體中第 j 個($j=1,2,3,\dots,Z$)基因的相似程度定義如下：

$$E_j(M) = -\sum_{i=1}^M P_{ij} \log P_{ij} \quad (4)$$

其中 P_{ij} 為所有抗體族群中第 i 個抗體出現和第 j 個基因相同的機率， M 為抗體族群數，當 $E_j(M)$ 為零即表示所有抗體族群第 j 個基因皆相同，若 $E_j(M)$ 取平均值，則全部 Z 個基因的抗體雜異度可定義如下：

$$E(M) = \frac{1}{Z} \sum_{j=1}^Z E_j(M) \quad (5)$$

相似度(Affinity)也是在免疫演算過程中一個重要的定義，在複製比對的過程中，若有相類似的抗體族群，將會影響整體規劃模式的效率，首先要考慮的是抗體與抗體之間的相似度，定義如下：

$$(A_b)_{ik} = \frac{1}{1 + E(2)} \quad (6)$$

其中 $E(2)$ 表示僅考慮新世代抗體及記憶單元內的 i 、 k 兩抗體，假如 i 和 k 兩抗體族群內的基因皆相同，則 $E(2)$ 為零，所以 $(A_b)_{ik}$ 為兩抗體 i 及 k 的相似度，其值介於 1 和 0 之間。另一個需要考慮的為抗體(可行的 WECS 規劃操作模式)及抗原(目標函數)之間的相似程度，定義如下：

$$(A_g)_i = \frac{1}{1 + OPT_i} \quad (7)$$

OPT_i 為目標函數所定義之損失成本，此方程式可求得抗體 i 與抗原之間的相似度。當 $(A_g)_i = 1$ 時，表示抗體能完全消滅抗原，在求解空間中取得最佳可行解。圖 4 所示為以免疫演算法應用於 WECS 最佳規劃與操作以使饋線實功損失降至最低的流程圖。

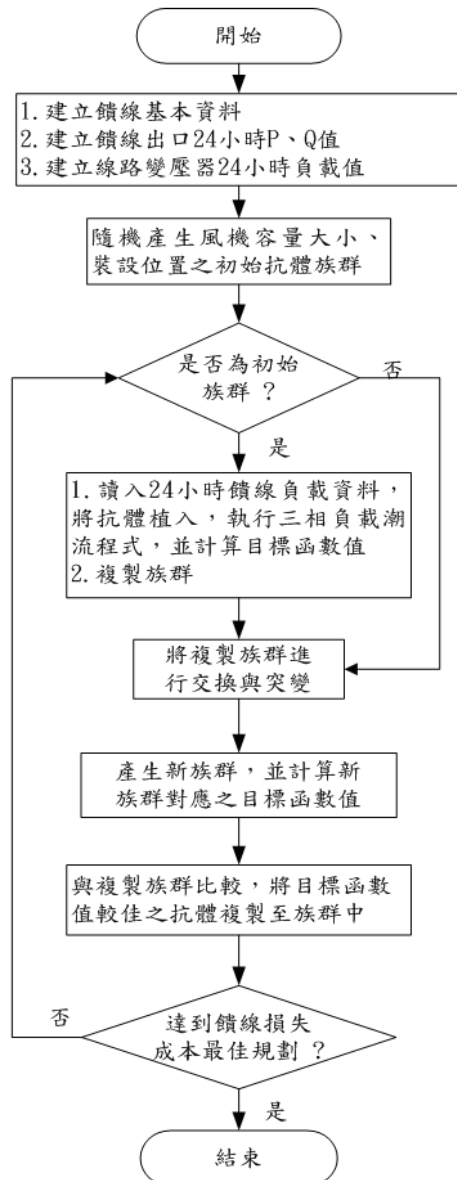


圖 4 以免疫演算法執行最佳風機運轉規劃流程圖

V. 實例分析

本文選擇台南永華二次變電所中的永十線幅射型

配饋線為研究對象(當地政府有意於此饋線設置風機)，經簡化後之饋線單線圖如圖 5 所示，二次側電壓等級為 11.4kV，主饋線長 8.87km，原規劃之 WECS 裝設於 B10 位置。圖 6 與圖 7 所示分別為永十線饋線口典型夏季與冬季日負載曲線，此饋線夏季最大與最小負載為 2 點與 18 點之 610kW 與 380kW，冬季最大與最小負載為 24 點與 17 點之 360kW 與 190kW，冬季時甚至有少量之虛功逆送現象發生，此外由於負載量過輕，當 WECS 加入運轉時，將會產生逆送電力至輸電系統。本文首先建立配電系統三相負載潮流模型，配合 Matlab 程式建立之免疫演算法求取最佳目標函數解，其中抗體庫及記憶單元大小皆設為 100，交換率及突變率分別設為 0.8 及 0.04，執行二種不同狀況模擬分析，事例一考慮在夏季有一台風機併聯狀況，而事例二則為冬季有一台風機併聯狀況。

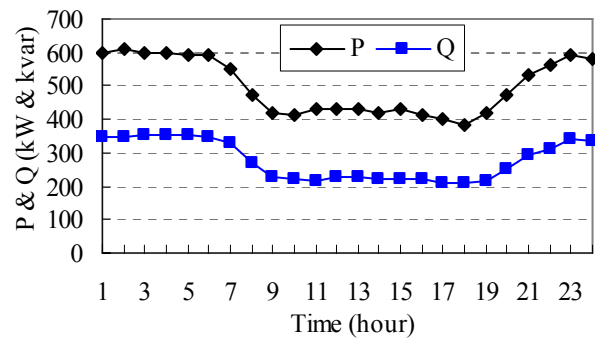


圖 6 永十線饋線口夏季日負載曲線圖

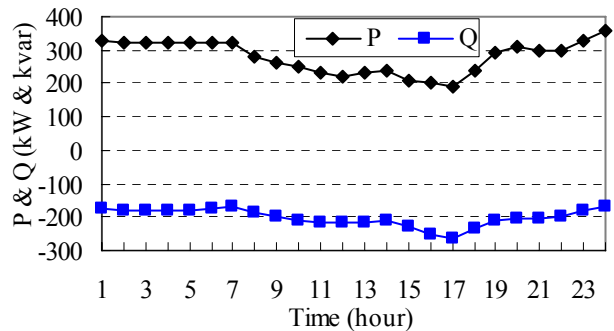


圖 7 永十線饋線口冬季日負載曲線圖

5.1 事例一

本事例為模擬夏季一台風機併聯於配電饋線時，當風機額定輸出實功率設定為 1750kW，以免疫演算法求取風機之最佳裝設位置，其結果為匯流排 B2，然後再與預定裝設位置匯流排 B10 比較，以免疫演算法求取二裝設位置之 24 小時最佳虛功率控制，使饋線實功損失降至最低，圖 8 即為 WECS 裝置在 B2 與 B10 時之最佳虛功率輸出，而圖 9 為此運轉狀況下，各小時之實功損失，由圖可知，原系統各小時的損失皆較 WECS 裝置後小，每日總損失為 417kW，風機裝在 B2 時損失為 450kW，裝在 B10 時損失為 618kW。圖 10 與圖 11 分別為重載與輕載時，饋線各匯流之電壓變動情形，由於該饋線負載過輕，在風機裝設後將有實功逆送情形發生，整條饋線所需之虛功率亦相當小，由圖可知各匯流排之電壓皆可維持在 0.99-1.01pu 間。

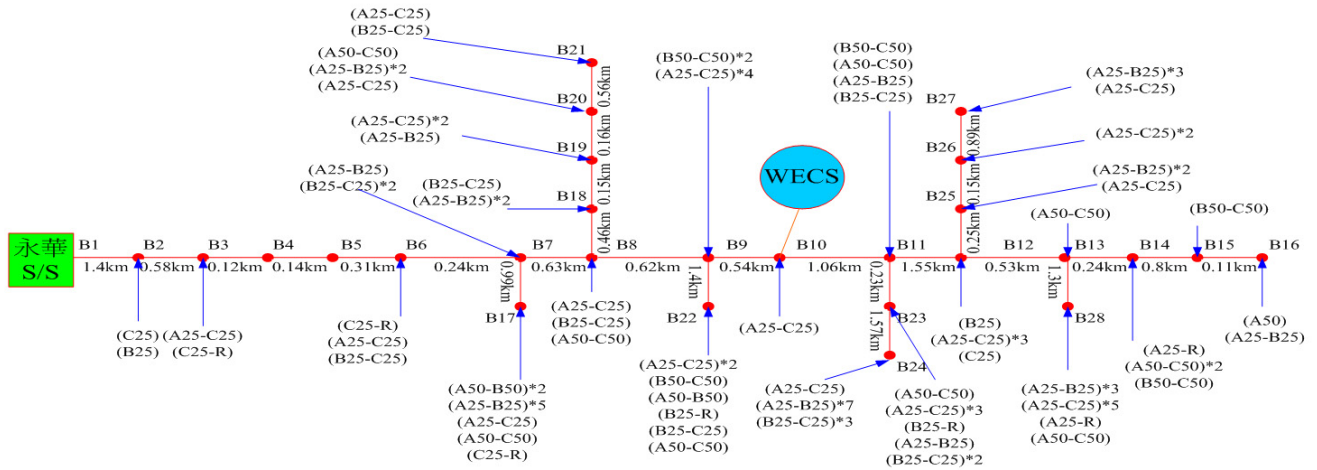


圖 5 簡化後之研究饋線單線圖

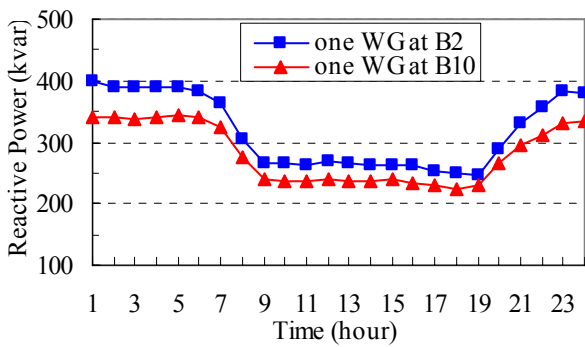


圖 8 事例一之 WECS 虛功輸出

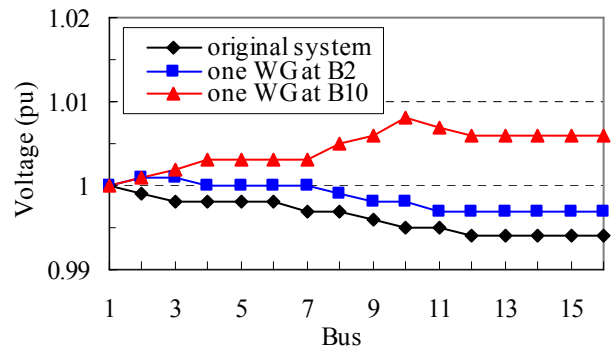


圖 11 事例一輕載時各匯流排之電壓變動情形

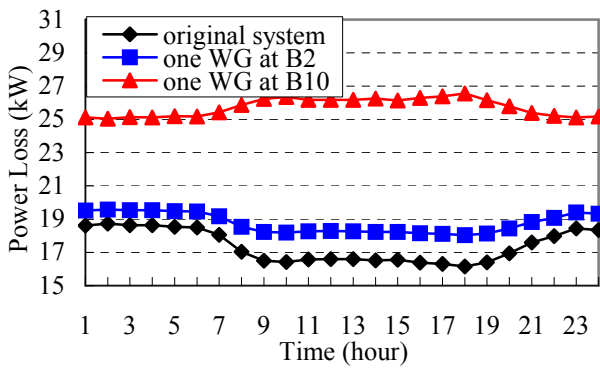


圖 9 事例一之饋線實功損失狀況

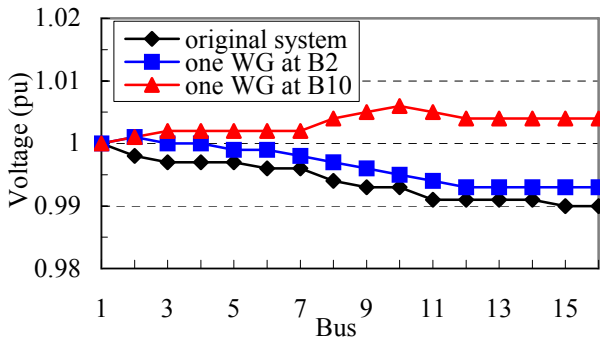


圖 10 事例一重載時各匯流排之電壓變動情形

5.2 事例二

本事例為模擬冬季一台風機併聯於配電饋線之狀況，風機輸出實功率仍設為 1750kW，最佳裝設位置仍是匯流排 B2，圖 12 即為 WECS 裝置在 B2 與 B10 時之最佳虛功率輸出，而圖 13 為各小時之實功損失，由圖可知，WECS 之虛功率為負值，表示系統之功率因數運轉於領先狀況，吸收饋線過多之虛功率。原系統各小時的損失皆較 WECS 裝置後小，每日總損失為 371kW，風機裝在 B2 時損失為 427kW，裝在 B10 時損失為 663kW。圖 14 與圖 15 分別為重載與輕載時，饋線各匯流之電壓變動情形，原系統各匯流排之電壓在 1.0-0.999pu 間，當風機裝設在 B2 時，24 小時各匯流排之電壓皆可維持在 1.0-1.001pu 間；而當風機裝設在 B10 時，各匯流排之電壓則可維持在 1.0-1.008pu 間。

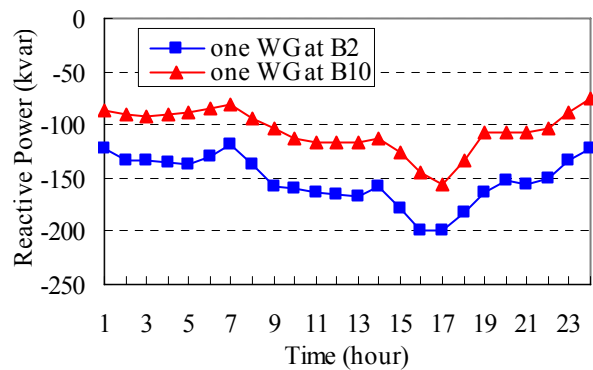


圖 12 事例二之 WECS 虛功輸出

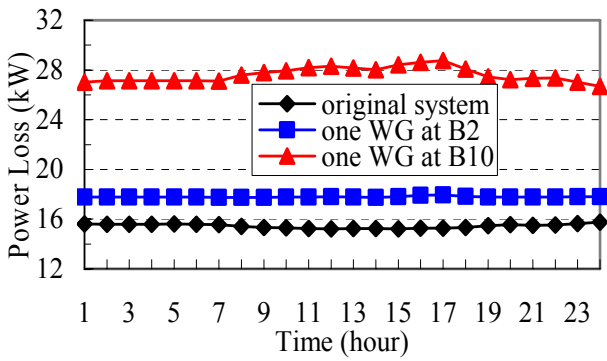


圖 13 事例二之饋線實功損失狀況

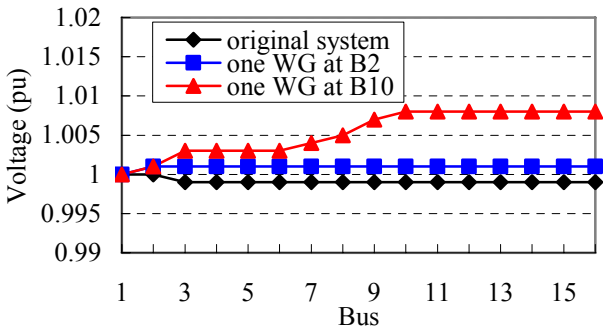


圖 14 事例二重載時各匯流排之電壓變動情形

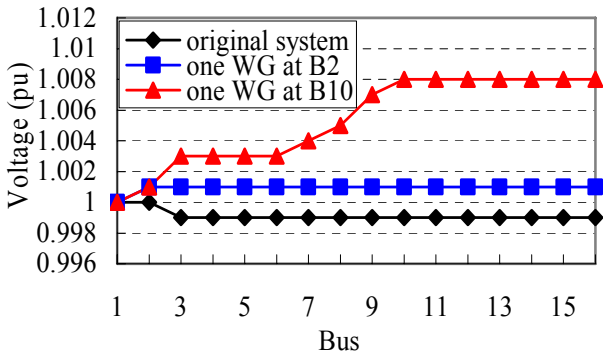


圖 15 事例二輕載時各匯流排之電壓變動情形

經過上述各種不同裝設位置之風機規劃比較，以裝設位置靠近變電所的位置B2為最佳化規劃，隨著裝設位置離變電所越遠損失越大，且夏季全日效益如表2所示，原系統損失成本為1043元/日，一台風力發電機裝置在B2與B10時，損失成本增加至1120與1521元/日。而冬季全日效益如表3所示，原系統損失成本為919元/日，一台風力發電機裝置在B2與B10時，損失成本增加至1057與1649元/日。

VI. 結論

經由本文的研究可以知道，使用免疫演算法可正確獲得風能轉換系統裝置於配電饋線之最佳位置與運轉策略，由於所選擇之配電饋線負載量過低，導致逆送電力的現象出現，所以無論風能轉換系統併聯於饋線任

何地點，皆會使饋線損失增加，但是風機裝置於饋線口時，其損失是最低的。此外，在所有分析事例中，饋線各匯流排的電壓皆可維持在 3%的變動範圍內。所以當有分散式電源併聯於配電饋線時，其裝置容量應小於饋線所需之最大功率需求，以降低饋線之實功損失。

表2 VI30饋線裝置風機之夏季全日效益

	原系統	B2 裝設 一台風機	B10 裝設 一台風機
尖載損失 (kWh)	18.723	19.586	25.046
電能損失 (kWh)	417.035	450.082	617.575
尖載損失成本(元)	161.39	168.83	215.89
電能損失成本(元)	881.32	951.15	1305.12
總計(元)	1042.71	1119.98	1521.01

表 3 VI30 饋線裝置風機之冬季全日效益

	原系統	B2 裝設 一台風機	B10 裝設 一台風機
尖載損失 (kWh)	15.763	17.933	28.755
電能損失 (kWh)	370.712	426.902	662.803
尖載損失成本(元)	135.87	154.58	247.86
電能損失成本(元)	783.42	902.17	1400.7
總計(元)	919.29	1056.75	1648.56

IV. 誌謝

感謝國科會提供本論文之研究經費，本文之計畫編號為 NSC 95-2221-E218-069。

參考文獻

- [1] H. L. Willis and W. G. Scott, "Distributed Power Generation Planning and Evaluation", New York: Marcel Dekker, Inc., 2000.
- [2] N. Hatzigiorgio, M. Donnelly and M. Takasaki, "CIGRE Technical Brochure on Modeling New Forms of Generation and Storage", Nov., 2000.
- [3] "台灣電力公司再生能源電能收購作業要點—併聯要點", 中華民國九十一年六月。
- [4] 吳俊德, "應用免疫演算法於饋線電容器最佳化規劃", 國立中山大學碩士論文, 中華民國九十五年六月。
- [5] N. K. Jeme, "The Immune System," Scientific America, vol. 229, no. 1, pp. 52-60, 1973.
- [6] S. J. Huang, "An Immune-Based Optimization Method to Capacitor Placement in a Radial Distribution System," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 15, no. 2, pp. 744-749, Apr. 2000.