

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 電力系統虛功與實功最佳電力調度之研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 97-2221-E-168-047-  
執行期間：97年08月01日至98年07月31日  
執行單位：崑山科技大學電機工程系

計畫主持人：黃昭明

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：賴秋名  
碩士班研究生-兼任助理人員：陳佳鴻

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 98年09月21日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫期末進度報告

## 電力系統虛功與實功最佳電力調度之研究

### Optimal Reactive and Active Power Dispatch in Power Systems

計畫編號：NSC-97-2221-E-168-047

執行期間：97 年 8 月 1 日至 98 年 7 月 31 日

計畫主持人：黃昭明 教授 崑山科技大學電機工程系

計畫參與人員：賴秋名 陳佳鴻 崑山科技大學電機工程系

#### 一、中文摘要

電力系統的經濟運轉主要包含兩個層面，即虛功調度與實功調度。理論上，虛功調度與實功調度存在耦合關係，亦即二者在調度過程中會相互影響，但由於一般輸電線存在很高的 X/R 比值，在此情況下，可利用解耦觀念將虛功與實功調度分割成兩個獨立的子問題，即 P 問題與 Q 問題，以利於問題的求解。為同時求解此虛功與實功調度問題，本計畫提出混合差分演化法，在固定實功條件下求取虛功調度問題，以獲得最低實功損失下各匯流排電壓與變壓器分接頭設定的最佳解。當完成最佳虛功調度，接著求取虛功固定不變條件下之多目標實功調度問題，以獲得滿足環保與經濟條件下之最佳發電輸出排程。混合差分演化法是一種多點搜尋、以群體演化為基礎之最佳化方法，主要在傳統差分演化法中加入遷移與加速運算子，以在過早收斂與整體搜尋的取捨間獲得平衡。由於混合差分演化法為一極優之最佳化搜尋工具，當應用於求解此虛功與實功調度問題時，能獲得良好的調度結果。本計畫所提出的方法測試於 IEEE 30 個匯流排及台電 345kV 簡化系統，結果顯示，所提出之 HDE 方法在解的品質及執行時間上均優於 DE 及 PSO 方法。

**關鍵詞：**虛功調度，實功調度，多目標調度，混合差分演化法

#### Abstract

Power system economical operation consists of two aspects: reactive power dispatch and active power dispatch. Theoretically, there has the coupling relation between reactive and active power dispatch. That means they will influence each other. However, due to a high X/R ratio exists in the transmission line, the problem of reactive and active power dispatch can then be decomposed into two individual sub-problems by the decoupling concept, i.e., P problem and Q problem, which would be beneficial for the problem resolution. To simultaneously solve the optimal reactive and active power dispatch problem, a hybrid differential evolution (HDE) algorithm is presented in this project. Based on the minimization of active power transmission losses, the optimal solutions of each bus voltage and tap setting of each transformer can then be obtained. After finishing the optimal reactive power dispatch, the active power dispatch is performed accordingly while the reactive power remains unchanged. The optimal generation schedule satisfying both environmental and economic objectives is then obtained by the proposed HDE method. HDE is a multi-point search and population-based optimization method. To have the population holds the diversity characteristic, a migrating phase and an accelerated phase are embedded into the original version of DE. Due to the superiority in optimization, the HDE method can acquire better results when applied to the reactive and active power dispatch problem. The proposed approach has been verified on the IEEE 30-bus and Taipower 345kv simplified systems. Testing results indicate that the proposed HDE has high-quality solution and shorter computation time than DE and PSO methods.

**Keywords :** Reactive power dispatch, Active power dispatch, Multi-objective power dispatch, Hybrid differential evolution

## 二、緣由與目的

電力系統的經濟運轉主要包含虛功調度與實功調度。虛功調度主要目的在於改善匯流排上的電壓大小，使系統實功損失為最小；實功調度則藉調整各發電機組的出力大小，以使燃料成本為最低。理論上，虛功調度與實功調度存在耦合關係，亦即在虛功調度過程中，匯流排上電壓大小的變化除會影響虛功外，也會影響實功發電量；同理，調整匯流排電壓相角也會同時影響實功與虛功輸出。但由於一般輸電線存在很高的 X/R 比值，在此情況下，電壓大小的變化，對於實功較不靈敏，但對於虛功則極為靈敏；同理，電壓相角的變化，對於虛功較不靈敏，但對於實功則極為靈敏。因此，虛功調度與實功調度可視為兩個獨立的問題。

實功調度與虛功調度均屬非線性最佳化問題，且在調度過程中，其相關變數間存在耦合關係(coupling relation)，故欲同時進行實功與虛功的最佳化調度，會產生收斂的問題。1972年，Jolissaint 等[1]提出實功與虛功的解耦觀念，將實功調度與虛功調度分割為兩個獨立的子問題，即 P 問題與 Q 問題，並分別進行最佳化的運算。當進行虛功調度時，需假設實功發電量維持不變；同理，當進行實功調度時，需假設虛功發電量維持不變。作者利用連續線性規劃法(successive linear programming)求解上述問題，並以一個 38 個匯流排、55 條傳輸線系統為例進行研究，以驗證所提出方法的可行性。

在求解最佳虛功調度(Optimal Reactive Power Dispatch, ORPD)問題上，系統實功損失通常可表示為匯流排電壓的函數。因此，虛功控制方法包含：(1)發電機的虛功輸出；(2)靜態虛功補償器；(3)電壓控制匯流排的電壓；(4)可調整的並聯電容器/電抗器；以及(5)變壓器的分接頭設定等。因並聯電容器/電抗器及變壓器的分接頭設定具有離散(discrete)的特性，因此，ORPD 可視為一種非連續、非線性的最佳化問題。

在歷年國外著名期刊上相繼提出甚多求解此 ORPD 問題的方法，如非線性規劃法(Nonlinear Programming, NP)[2]、混合整數規劃法(Mixed-Integer Programming, MIP)[3-4]、內點法(Interior Point, IP)[5-6]、基因演算法(Genetic Algorithm, GA)[7-8]、以及粒子群最佳化法(Particle Swarm Optimization, PSO)[9-10]等。國內在虛功控制方面也投入甚多，台電公司通常利用 OLTC (On-Load Tap Changer)調整匯流排電壓，以改善電壓不足(或偏高)問題；另外，加入電容器以進行虛功補償也是常使用的方法。目前台電配電系統上電容器的投入或切出大都以時控開關控制，但因時控開關的機械及電氣特性會隨使用時間而逐漸漂移，故評估使用無線電技術於配電系統電容器之控制切換則為當務之急，事實上該項技術在國外已行之多年並有顯著成效。另外，台電也於都市採用地下電纜區域利用電抗器進行虛功補償，以改善電壓過高問題。

在實功調度方面，透過調度方法以滿足經濟與環保要求已成為相當重要的研究課題，亦即多目標的調度策略已蔚為一種風氣與趨勢。國外方面，Talaq 等[11]提出最低污染排放下之電力潮流解，形成所謂的最佳電力潮流策略。Yokoyama 等[12]則進一步使用  $\varepsilon$ -constrained 方法求解非劣解(non-inferior solution)，此方法的缺點在於求解過程相當費時；Wong 等[13]則採用權值整合方法求解此多目標最佳化問題。國內目前對於電廠在發電過程中如何降低污染排放量的研究，台電公司方面致力於污染管制設備的裝設、提高發電機組效率、實施負載面的管理措施、及汰換老舊發電設備等措施[14]。雖然國內對於電廠如何在發電過程中降低污染量的研究投入甚多，然對於如何在發電過程中同時考慮虛功與實功調度的研究仍嫌不足。因此，本計畫的重點在於以一次之程式流程獲得最佳之虛功與實功調度解。

## 三、研究方法

### 3.1 虛功調度策略

虛功調度可視為最佳電力潮流的一部分，它不僅是電力品質、經濟運轉、系統安全的一項指標，在一個自由化的電力市場中，它也是輔助服務的項目之一。傳統上，最佳虛功調度的目標函數包含系統實功損失、最大虛功備用量、最小虛功注入量、網路中電壓大小的修正量等，其中系統實功損失與實功、虛功相關控制變數均有關聯，此種目標函數稱為不可分離

目標函數(non-separable objective function)。

虛功調度是藉調整控制變數並滿足一些運轉限制條件，使得實功損失(或其它合適的目標函數)為最小的一種調度方法。基本上，它屬於一種複雜的最佳化問題，其目標函數不僅具有非線性特性，並存在多重區域最佳解。因此，最佳虛功調度即屬於典型的混合整數非線性規劃問題。此問題的控制變數包含發電機的虛功輸出、靜態虛功補償器、匯流排電壓大小、變壓器的分接頭設定、以及並聯電容器/電抗器的輸出，運轉限制條件則包含發電機的虛功容量、負載匯流排(PQ bus)的電壓大小、電壓控制匯流排(PV bus)的相角、以及變壓器的分接頭位置等。另外，靜態虛功補償器的設定以及並聯電容器也可能包含在限制式內。

本計畫中以系統實功損失為最佳虛功調度的目標函數，其數學式子通常可表示如下：

$$f_Q = \sum_{k \in (i,j)} P_{L,k} = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \left[ g_{ij} \left( |V_i|^2 + |V_j|^2 - 2|V_i||V_j| \cos(\delta_i - \delta_j) \right) \right] \quad (1)$$

其中， $f_Q$  為系統實功損失， $P_{L,k}$  為第  $k$  條傳輸線實功損失， $L$  為傳輸線數目， $|V_i|$  為第  $i$  個匯流排電壓大小， $|V_j|$  為第  $j$  個匯流排電壓大小， $g_{ij}$  為第  $i$  個匯流排與第  $j$  個匯流排間的輸電線電導， $\delta_i$  為第  $i$  個匯流排電壓相角， $\delta_j$  為第  $j$  個匯流排電壓相角。

上式須滿足一些運轉限制條件，分述如下：

### (1) 功率平衡限制條件

求解電力潮流的主要目標在於滿足功率平衡限制條件，如下所示：

$$P_{Bi} - P_{Di} - P_{Li} = 0 \quad (2)$$

$$Q_{Bi} - Q_{Di} - Q_{Li} = 0 \quad (3)$$

且

$$P_{Li} = \sum_{j=1}^L |Y_{ij}| \times |V_i| \times |V_j| \times \cos(\phi_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (4)$$

$$Q_{Li} = \sum_{j=1}^L |Y_{ij}| \times |V_i| \times |V_j| \times \sin(\phi_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (5)$$

其中， $P_{Bi}$  為第  $i$  個匯流排注入實功， $P_{Di}$  為第  $i$  個匯流排實功負載， $P_{Li}$  為第  $i$  個匯流排實功損失， $Q_{Bi}$  為第  $i$  個匯流排注入虛功， $Q_{Di}$  為第  $i$  個匯流排虛功負載， $Q_{Li}$  為第  $i$  個匯流排虛功損失， $|Y_{ij}|$  為第  $i$  個匯流排與第  $j$  個匯流排間的輸電線導納， $\phi_{ij}$  為第  $i$  個匯流排與第  $j$  個匯流排間的導納相角。

### (2) 虛功發電容量限制條件

為確保電力系統安全運轉，任何時間均須滿足虛功發電容量限制條件，以避免電力系統元件遭受損壞。在求解電力潮流問題中，虛功發電容量限制條件通常使用於發電機匯流排(或稱電壓控制匯流排，PV bus)，如下所示：

$$Q_{Bi,\min} \leq Q_{Bi} \leq Q_{Bi,\max} \quad (6)$$

其中， $Q_{Bi,\min}$  為第  $i$  個匯流排最小注入虛功， $Q_{Bi,\max}$  為第  $i$  個匯流排最大注入虛功。

### (3) 匯流排電壓限制條件

為維持系統穩定運轉，每一條匯流排電壓均須維持在限制條件內。在求解電力潮流問題中，電壓限制條件通常使用於負載匯流排(或 PQ bus)，如下所示：

$$V_{i,\min} \leq |V_i| \leq V_{i,\max} \quad (7)$$

其中， $V_{i,\min}$  為第  $i$  個匯流排電壓下限值， $V_{i,\max}$  為第  $i$  個匯流排電壓上限值。

#### (4) 電容器與變壓器分接頭限制條件

在虛功調度問題中，電容器與變壓器分接頭屬控制變數，亦即經由上述設備的調整可達成最佳虛功調度目標。電容器與變壓器分接頭運轉限制條件如下所示：

$$Q_{C,\min} \leq Q_C \leq Q_{C,\max} \quad (8)$$

$$T_{k,\min} \leq T_k \leq T_{k,\max} \quad (9)$$

其中， $Q_C$  為由並聯電容器  $C$  所產生的虛功， $Q_{C,\min}$  為並聯電容器  $C$  的虛功下限值， $Q_{C,\max}$  為並聯電容器  $C$  的虛功上限值， $T_k$  為變壓器  $k$  的分接頭位置， $T_{k,\min}$  為變壓器  $k$  的分接頭下限位置， $T_{k,\max}$  為變壓器  $k$  的分接頭上限位置。

在大多數的非線性最佳化問題中，可將限制式賦予償罰項(penalty terms)後加入目標函數中形成拉格蘭氏函式，以方便求解。當進行虛功調度時，發電機匯流排(PV bus)電壓、變壓器的分接頭的位置、以及電容器的虛功投入量等均為控制變數，屬自我限制(self-constrained)條件。但負載匯流排(PQ bus)電壓及發電機匯流排(PV bus)的注入虛功則為一般限制條件，故可賦予償罰項後加入目標函數((1)式)中，形成典型的非線性最佳化問題，如下所示：

$$F_Q = f_Q + \sum_{i \in N_V^{\lim}} \lambda_{V_i} (V_i - V_i^{\lim})^2 + \sum_{i \in N_Q^{\lim}} \lambda_{Q_i} (Q_{G_i} - Q_{G_i}^{\lim})^2 \quad (10)$$

其中  $\lambda_{V_i}$  及  $\lambda_{Q_i}$  為償罰因數， $V_i^{\lim}$  及  $Q_{G_i}^{\lim}$  則分別定義如下：

$$V_i^{\lim} = \begin{cases} V_{i,\max}, & \text{if } V_i \geq V_{i,\max} \\ V_{i,\min}, & \text{if } V_i \leq V_{i,\min} \end{cases} \quad (11)$$

$$Q_{G_i}^{\lim} = \begin{cases} Q_{G_i,\max}, & \text{if } Q_{G_i} \geq Q_{G_i,\max} \\ Q_{G_i,\min}, & \text{if } Q_{G_i} \leq Q_{G_i,\min} \end{cases} \quad (12)$$

### 3.2 實功調度策略

本計畫中，除考慮燃料成本與污染排放量兩個目標函數外，未來在解制後因代為輸電所應支付的代輸成本亦納入考慮，以下將說明考慮上述目標函數時的實功調度方法。

#### (1) 最低燃料成本調度方法

最低燃料成本調度策略為一種傳統電力調度方式，其發電機組之燃料成本一般可用發電量之二次連續曲線函數表示：

$$F(P_G) = \sum_{i=1}^N a_i + b_i P_{G_i} + c_i P_{G_i}^2 \quad (\$/h) \quad (13)$$

上式除須滿足(2)式之功率平衡限制條件外，尚須滿足實功發電容量的限制條件，如下所示：

$$P_{G_i,\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i,\max} \quad i=1, 2, 3, \dots, N \quad (14)$$

其中， $F(P_G)$  為總發電成本， $N$  為可供調度之發電機的數目， $P_{G_i}$  為第  $i$  部發電機組發電量， $P_{G_i,\min}$  為第  $i$  部發電機組之最小發電量， $P_{G_i,\max}$  為第  $i$  部發電機組之最大發電量， $a_i$ 、 $b_i$ 、及  $c_i$  為燃料成本係數，其值通常由電廠提供，並且與機組之燃料型式及運轉效率有關。

另外，(1)式之系統實功損失  $f_Q$  在實功調度場合通常可表示為  $B$  損失係數的函數，如下所示：

$$f_Q = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{G_i} B_{ij} P_{G_j} \quad (15)$$

而對於所獲得的調度解，皆不能使系統每一條輸電線有過載發生。其輸電線過載預防限制條件可採用安全邊限(Security Margin, SM)值決定系統是否過載，如下所示

$$F_s = \sum_{i=1}^L (P_i^c - P_i) \quad (16)$$

$$SM = F_s, \quad \text{if } P_i^c - P_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, L$$

$$= 0, \quad \text{if } P_i^c - P_i < 0 \quad \text{for any } i$$

其中， $P_i$  為第  $i$  條傳輸線實功， $P_i^c$  為第  $i$  條傳輸線之最大傳輸容量， $P_i^c - P_i$ ：說明第  $i$  條傳輸線是否過載。

## (2) 最低電力代輸成本調度方法[15]

目前國內外文獻中對於以單一目標函數方式進行最低電力代輸成本的調度策略探討甚少，一般均著重於其計價種類及方式。本計畫中以百萬瓦哩法作為計算電力代輸成本的計價方式，如下式所示：

$$C(h) = \sum_{\text{all } k} C_k^l \times |P_k(h)| \times L_k \quad (17)$$

其中， $C(h)$  為針對第  $h$  交易所應支付的代輸成本， $k$  為線路編號， $C_k^l$  為第  $k$  條線路每單位長度( $l$ )成本的加權值， $|P_k(h)|$  為第  $h$  交易在第  $k$  條線路上所引起的電力潮流實功絕對值， $L_k$  為第  $k$  條線路的長度。

在(17)式中， $P_k(h)$  值可簡單由直流電力潮流[16]獲得，如下所示：

$$P_k(h) = \frac{1}{x_k} [\Delta\theta_k(h)] \quad (18)$$

其中， $x_k$  為第  $k$  條線路電抗值， $\Delta\theta_k(h)$  為第  $h$  交易在第  $k$  條線路上所引起的電壓相角變化量(近端電壓相角減遠端電壓相角)。

## (3) 最低污染調度方法

最低污染調度模式中之污染排放量可以發電量之二次連續多項式函數表示如下：

$$E(P_G) = \sum_{i=1}^N \alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2 \quad (\text{ton / h}) \quad (19)$$

$$\text{且 } E_C(P_G) = \psi \times E(P_G) \quad (\$/\text{h}) \quad (20)$$

其中， $E(P_G)$  為發電過程中所排放的污染量， $E_C(P_G)$  為污染排放成本， $\psi$  為每單位污染排放量的成本，其單位為( $\$/\text{ton}$ )， $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、及  $\gamma_i$  為污染排放量係數。

上二式仍須滿足(2)式之功率平衡限制條件、(14)式之機組上下限制條件、及(16)式之輸電線過載預防限制條件。

(19)式中所考慮的污染量僅就單一污染物質而言(如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  及粒狀污染物(particulate materials, PM)等)，其中各項污染濃度的獲得，可透過曲線擬合(curve fitting)技術而得。

## (4) 多目標電力調度策略

近年來，由於社會多元化的趨勢越來越明顯，使得各項決策往往須考慮多方面的目標，而且這些目標常常不易同時滿足操作者需求，因此多目標決策及多目標規劃方法乃顯得更為

重要。

另一方面，台灣社會由於環保意識的高漲，使得幾乎所有的決策都必須兼顧經濟效益以及環保要求，然而此兩者卻常常互相衝突；經濟效益高，往往具有較大的環境衝擊；低污染，則通常較不具經濟效益。電力調度的問題即屬於此一典型的問題。此外，為因應未來解制後的電力市場，本計畫中除同時考慮上述兩種目標函數外，因代為輸電所應支付的代輸成本亦納入考量。因此，多目標電力調度策略可表示如下：

$$C_T(P_G) = w_1 \times F(P_G) + w_2 \times \varpi \times C(h) + w_3 \times \psi \times E(P_G) \quad (21)$$

其中， $F(P_G)$ 為燃料成本(如(13)式)， $C(h)$ 為代輸成本(如(17)式)， $E_C(P_G)$ 為污染排放成本(如(20)式)， $\varpi$ 為代輸成本常數， $w_1$ 、 $w_2$ 及 $w_3$ 分別為燃料成本、代輸成本、及污染量的權值，上式仍須滿足一般之運轉限制條件。

### 3.3 考慮虛功與實功之調度策略

圖 1 說明考慮虛功與實功之詳細調度流程，由該流程可知，虛功與實功須分別求解。亦即當利用 HDE 最佳化方法求解 Q 問題時，須維持實功與相角在先前計算值；當利用 HDE 最佳化方法求解 P 問題時，則須保持虛功與電壓大小在先前計算值，以節省計算時間並確保模式能夠收斂。圖 1 中，程式停止條件係以求解 Q 問題與 P 問題中搖擺會流排上實功注入量的絕對誤差為基準，當低於設定容忍值時結束程式執行；另一方面，當程式已達最大疊代次數時亦結束程式執行。

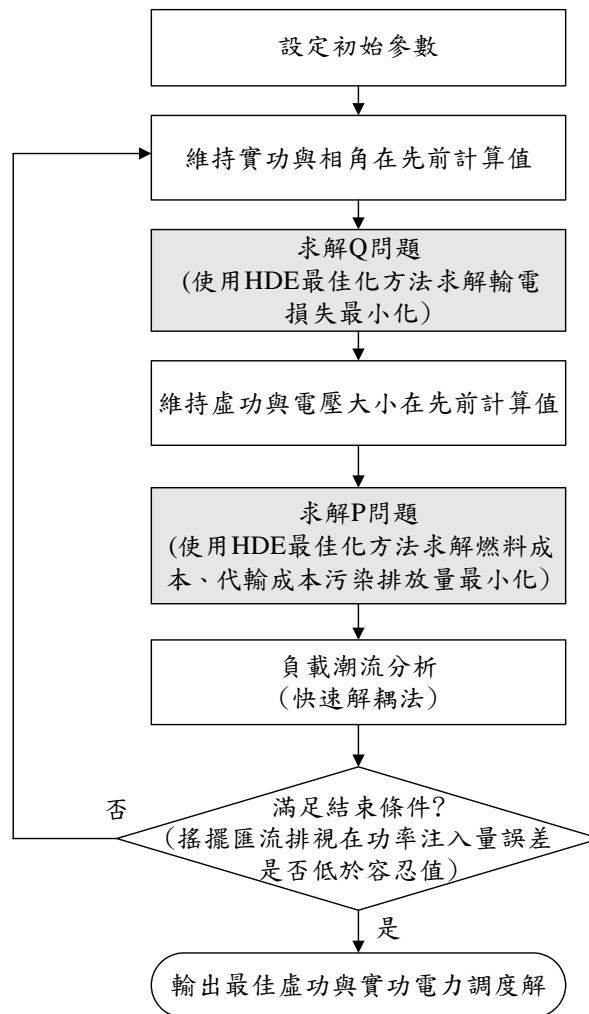


圖 1 考慮虛功與實功之調度流程

### 3.4 混合差分演化法

混合差分演化法主要在傳統的差分演化過程中加入遷移(Migrant)與加速運算子，以在太早收斂與整體搜尋的取捨間獲得平衡。混合差分演化法的基本演化策略，包含隨機產生初始族群、複製、突變(差分)、交配(重組)、遷移、選取及加速等運算，以下將詳述這些過程。

#### 1. 產生初始族群

初始族群的產生方法一般採用均勻分佈函數隨機產生，其族群的分佈須能涵蓋整體的參數搜尋區間，如下所示：

$$p_i = [p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{ij}, \dots, p_{iM}], \quad i = 1, \dots, J \quad (22)$$

$$\text{且 } p_{ij} = p_{ij,\min} + \sigma \times (p_{ij,\max} - p_{ij,\min}) \quad (23)$$

其中， $p_i$  為第  $i$  個隨機產生的族群個體， $M$  為族群個體的維度，即族群個體內基因的數目， $J$  為族群大小， $p_{ij}$  為第  $i$  個族群個體中第  $j$  個基因， $p_{ij,\max}$  為基因  $p_{ij}$  的最小值， $p_{ij,\min}$  為基因  $p_{ij}$  的最大值， $\sigma$  為介於 0 與 1 之間的均勻分佈常數。

在虛功調度中，初始族群代表 PV 匯流排上電壓大小、變壓器上的分接頭設定、及電容器的虛功投入量；在實功調度中，初始族群代表各發電機組上電壓大小。

#### 2. 複製(Reproduction)產生後代

父代族群中，對於每一個個體  $p_i$ ，可利用下式產生後代  $p_i'$ ：

$$p_i' = \lambda \times p_{best} + (1 - \lambda) \times p_i + f_p \times \sum_{k=1}^K (p_{i_a}^k - p_{i_b}^k), i = 1, \dots, J \quad (24)$$

其中， $p_i'$  為複製之第  $i$  個子代， $p_{best}$  為父代中最佳的族群個體， $\lambda$  為介於 0 與 1 之間的常數， $f_p$  為干擾常數， $p_{i_a}^k$ 、 $p_{i_b}^k$  為第  $i$  個父代中隨機選取兩個不同的第  $k$  組族群個體， $K$  為干擾向量數目。

上式中， $\lambda \times p_{best} + (1 - \lambda) \times p_i$  項為一差分向量， $f_p \times \sum_{k=1}^K (p_{i_a}^k - p_{i_b}^k)$  項為一擾動向量。在演化初期，為能進行廣泛搜尋，干擾常數  $f_p$  通常設成較大的數；至演化末期，由於族群已收斂至較小區域， $f_p$  再轉為較小的數，以使族群能順利收斂。

#### 3. 突變(Mutation)或差分(Differential)

子代產生方法除可利用複製運算外，也可利用突變運算。突變的目地在於使整個族群具備更佳的適應性與創造性，而不侷限於某些特定族群。突變方法為增加一個差量至族群個體中，如下所示：

$$p_i' = p_i + f_m \times (p_{i_a} - p_{i_b}) \quad (25)$$

其中， $p_i'$  為突變後的族群個體， $p_{i_a}$ 、 $p_{i_b}$  為第  $i$  個父代中隨機選取的兩個不同的族群個體， $f_m$  為突變率，其值介於 0 與 1 之。

#### 4. 重組(Recombination)或交配(Crossover)

重組運算的目的在於使突變之後的子代族群個體具有參差性(diversity)，因此突變後的子代須進行重組運算。重組方法為將第  $i$  個父代與突變後的子代依據重組率( $R_r$ )進行基因的重組，以產生新的族群個體，如下所示：

$$p_{ij}' = \begin{cases} p_{ij}, & \text{if } rand_{ij} > R_r \\ p_{ij}', & \text{if } rand_{ij} \leq R_r \end{cases} \quad (26)$$

其中， $p_{ij}'$  為重組後訊代第  $i$  個族群個體中第  $j$  個基因， $p_{ij}$  為父代第  $i$  個族群個體中第  $j$  個基



因， $rand_{ij}$  為隨機產生(正常分配函數)之第  $i$  個族群個體中第  $j$  個基因值， $R_r$  為重組率，其值介於 0 與 1 之間。

上式說明若隨機產生之第  $i$  個族群個體中第  $j$  個基因值大於重組率，則其基因值修正回突變前的數值；否則，其基因值維持突變後的數值。

## 5. 選取(Selection)

選取的目的在於產生更佳的后代，如下所示：

$$p_i'(t+1) = \begin{cases} p_i(t+1), & \text{if } f(p_i(t+1)) < f(p_i(t)) \\ p_i(t), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$

其中， $p_i(t+1)$  為第  $i$  個族群個體在第  $t+1$  次疊代時的適應值(fitness value，其值愈小愈好)， $p_i(t)$  為第  $i$  個族群個體在第  $t$  次疊代時的適應值。

上式說明若第  $i$  個族群個體  $p_i$  在下一代疊代時若其適應值有所改善，則將被選取成為下一代的族群個體；否則，下一代的族群個體即被原有的族群個體所取代。經過實驗後發現，此選取運算會把一些良好的族群個體淘汰掉，因此本計畫把選取運算改成挑選前幾名較好的群族做下一代的父代做疊代運算。

## 6. 遷移(Migrant)

遷移運算的目的在於再生新多樣的族群個體，遷移的方法為以子代中最佳族群個體的基因為基點作上下遷移的動作，如下所示：

$$p_{ij}' = \begin{cases} p_{ij,best}' + \phi_i \times (p_{ij,min}' - p_{ij,best}'), & \text{if } \delta < \frac{p_{ij,best}' - p_{ij,min}'}{p_{ij,max}' - p_{ij,min}'} \\ p_{ij,best}' + \phi_i \times (p_{ij,max}' - p_{ij,best}'), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

其中， $p_{ij,best}'$  為第  $i$  個子代中最佳族群個體之第  $j$  個基因， $p_{ij,min}'$  為第  $i$  個子代族群個體之第  $j$  個基因的最小值， $p_{ij,max}'$  為第  $i$  個子代族群個體之第  $j$  個基因的最大值， $\phi, \delta$  為介於 0 與 1 之間的隨機均勻分佈值。

須留意的是，上述遷移運算的執行只有當族群的參差度小於設定容忍值才啟動，如下所示：

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^M \frac{\eta_{ij}}{(M \times (J-1))} < \varepsilon_1 \quad (29)$$

其中，

$$\eta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{(p_{ij}' - p_{ij,best}')}{p_{ij,best}'} > \varepsilon_2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (30)$$

(29)及(30)式中， $\varepsilon_1$  為族群參差的容忍度， $\varepsilon_2$  為一項常數， $\varepsilon_1$  及  $\varepsilon_2$  由使用者決定； $\eta_{ij}$  為基因參差指標， $\eta_{ij}$  值越小，代表第  $i$  個子代族群個體之第  $j$  個基因  $p_{ij}'$  越接近最佳值， $i \neq b$  則代表該族群個體不能為最佳的族群個體  $p_{ij,best}'$ 。上式說明若  $\varepsilon < \varepsilon_1$ ，則執行遷移運算，以使族群跳脫局部最佳解；否則，維持原 DE 的運算。

## 7. 加速運算(Acceleration operation)

加速與遷移為兩個互為取捨(trade-off)的運算。由(28)至(30)式可知，遷移運算可提升搜尋空間的探索程度並提高族群之全域搜尋能力；然而，探索的空間若過於寬廣反而易導致收斂速度過於緩慢。因此，HDE 中加入「加速運算」功能以修正此缺點。

當族群歷經突變、重組等運算後仍無法有效改善適應值時，則可採取加速運算使現有最佳族群個體快速趨近到更佳的點，如下所示：

$$p_{i,best}'(t+1) = \begin{cases} p_{i,best}(t+1), & \text{if } f(p_{i,best}(t+1)) < f(p_{i,best}(t)) \\ p_{i,best}(t+1) - \alpha \nabla f, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (31)$$

其中， $f(p_{i,best}(t+1))$  為第  $i$  個族群個體在第  $t+1$  次疊代時的最佳適應值， $f(p_{i,best}(t))$  為第  $i$  個族群個體在第  $t$  次疊代時的最佳適應值。

上式中， $\nabla f$  為最佳適應值的梯度 (gradient)，通常利用有限差分 (finite difference) 予以近似， $\alpha \in (0,1]$  為一加速因子，其值可隨梯度下降特性適時調整。

上式中， $\alpha$  剛開始時設定為 1，並獲得新的族群個體  $p_{i,new}(t+1)$ ，此新的族群個體的適應值與  $f(p_{i,best}(t+1))$  比較，若滿足梯度下降特性，即  $f(p_{i,new}(t+1)) < f(p_{i,best}(t+1))$ ，則  $p_{i,new}(t+1) = p_{i,best}'(t+1)$ ，此新的最佳族群個體  $p_{i,best}'(t+1)$  將取代族群中最差的個體並成為下一代族群的候選之一。另一方面，若不能滿足梯度下降特性，則減少  $\alpha$  值並重複上述步驟，直至滿足梯度下降特性或  $\alpha \nabla f$  值已很小。

#### 四、測試結果

為驗證所提出方法的可行性，本計畫中以 IEEE 30 個匯流排及台電 345kV 簡化系統為例進行研究，所提出之 HDE 方法並與 DE 及 PSO 方法進行比較，程式撰寫方面均利用 Matlab 軟體在個人電腦 PC-Pentium IV 上執行。

##### 4.1 IEEE 30 個匯流排系統

本測試系統具有 30 個匯流排、6 部發電機組、41 條輸電線，如圖 2 所示，其中 bus 1 為搖擺匯流排，bus 2、5、8、11、13 為 PV bus，其餘為 PQ bus；另外，輸電線 4-12、6-9、6-10、28-27 分置有分抽頭變壓器，bus 3、bus 10 及 bus 24 分置有電容器以取得虛功注入量。因此，在虛功最佳化過程中，控制變數包含 PV bus 的電壓大小、變壓器的分抽頭設定值、及電容器上的虛功注入量，PV bus 的電壓大小設定在 0.9 p.u. 至 1.1 p.u. 之間，變壓器的分抽頭設定值設定在 0.95 p.u. 至 1.05 p.u. 之間，為便於最佳化的運算，上述 14 個控制變數均設為連續變數。表 1 顯示各 PV bus 上虛功發電量的限制範圍，另 PQ bus 上的電壓限定在 0.9 p.u. 至 1.1 p.u. 之間。

虛功最佳化結果將可提供最低輸電損失下的電力潮流解，在此基礎上，進行最佳實功調度。表 2 所示為各發電機組之燃料成本與污染量係數，各發電機組之發電量上下限值亦包含在此表中，其他相關匯流排資料詳見文獻[12]。表 3 為 HDE 與 PSO 方法之參數設定值，圖 3 顯示虛功與實功調度下，PSO、DE 及 HDE 三種方法之收斂情形，其中圖 3(a) 為最後一次疊代時虛功調度收斂曲線，DE 方法於第 23 次疊代收斂至 2.8978 MW，PSO 方法於第 20 次疊代收斂至 2.1650 MW，HDE 方法於第 20 次疊代收斂至 1.7223 MW，HDE 方法獲得較低的輸電損失；圖 3(b) 為最後一次疊代時實功調度收斂曲線，DE 方法於第 21 次疊代時總成本收斂至 550.1949，PSO 方法於第 20 次疊代收斂至 549.8996，HDE 方法於第 17 次疊代收斂至 544.5859，HDE 方法獲得較低的成本適應值；圖 3(c) 為虛功/實功調度收斂曲線，縱座標為虛功調度時搖擺匯流排上視在功率注入量與實功調度時搖擺匯流排上視在功率注入量的絕對值誤差，三種方法在疊代初期均產生較大的變化量，DE 方法於第 22 次疊代以後變化量維持在 0.01 p.u. 以內，PSO 方法於第 23 次疊代以後變化量維持在 0.01 p.u. 以內，HDE 方法於第 17 次疊代以後變化量維持在 0.01 p.u. 以內。

表 4 顯示最佳虛功/實功調度情況下，不同方法的實功損失結果比較，其中快速解耦法的結果為僅進行電力潮流解，不進行最佳化程序，其所獲得的實功損失為 5.2830 MW，以此

為基準，做為最佳化程序改善的依據。由結果可知，DE 方法可節省 45.1486%的實功損失，PSO 方法可節省 59.0195%的實功損失，HDE 方法可節省 67.3992%的實功損失，亦即 HDE 方法可節省發電機組的發電量，表 5 顯示最佳虛功/實功調度情況下不同方法所獲得的控制變數值。

表 6 顯示最佳虛功/實功調度情況下不同方法的實功調度結果比較，其中燃料成本、代輸成本及 NO<sub>x</sub> 污染量的權值分別設定為 0.34、0.33 及 0.33，由表中可知，DE 方法所獲得的燃料成本、代輸成本及 NO<sub>x</sub> 污染量分別為 628.9571(\$/h)、73.7208(\$/h)及 0.1923(ton/h)，PSO 方法所獲得的結果分別為 617.9705 (\$/h)、71.0113 及 0.2012 (ton/h)，HDE 方法所獲得的結果則分別為 616.8360 (\$/h)、72.4395 及 0.1934 (ton/h)。上述結果說明 HDE 方法獲得較低的燃料成本，代輸成本較 DE 方法為低，NO<sub>x</sub> 污染量則較 PSO 方法為低，另外，HDE 方法獲得的總成本為最低。

為評估上述三種方法的靈敏度分析，本計畫隨機執行程式 30 次，以探討其收斂過程中總成本適應值的收斂情形，其結果顯示於表 7 中。由表中總成本變化量可知，所提出的 HDE 方法能獲得較穩定的結果；另在平均執行時間上，HDE 方法雖收斂速度較快，但因加入遷移及加速的運算，在相同疊代次數下，反而較其他兩種方法耗費較多時間。

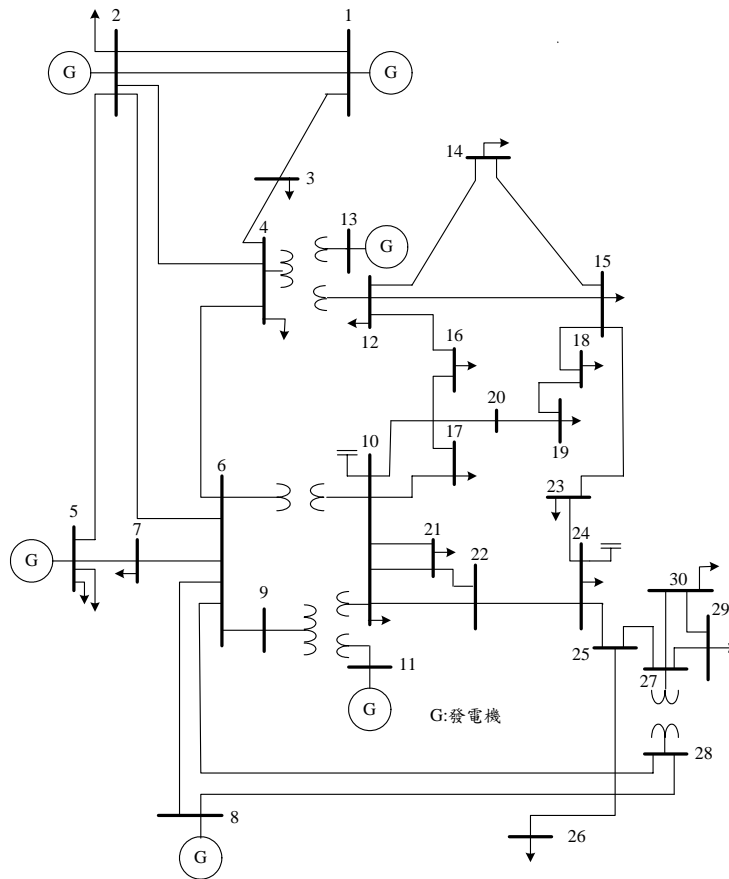


圖 2 IEEE 30 個匯流排、6 部發電機組系統

表 1 PV bus 上虛功發電量的限制

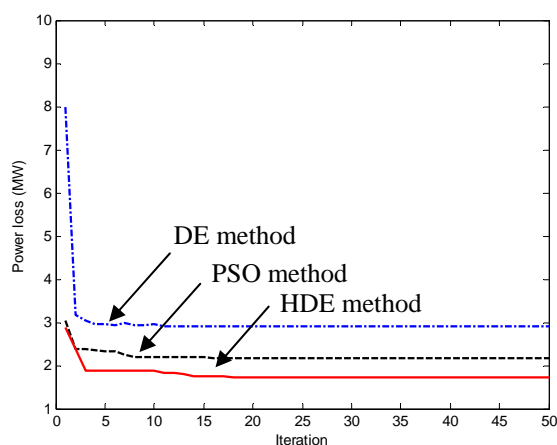
Bus	$Q_{Bi,min}$ (p.u.)	$Q_{Bi,max}$ (p.u.)
2	-0.4	0.5
5	-0.4	0.4
8	-0.1	0.4
11	-0.06	0.24
13	-0.06	0.24

表 2 IEEE 系統燃料成本與污染量係數及發電量上下限

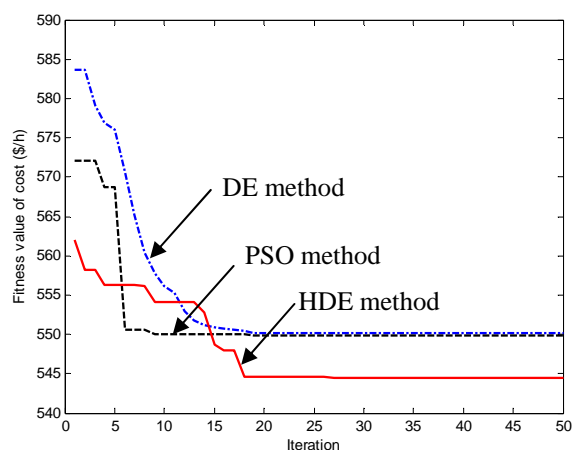
機組 編號	燃料成本係數			污染量係數( $10^{-2}$ )			$P_{Gi,min}(p.u)$	$P_{Gi,max}(p.u)$
	$a$	$b$	$c$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	0.05	1.50
$P_{G1}$	10	200	100	4.091	-5.554	6.490	0.05	1.50
$P_{G2}$	10	150	120	2.543	-6.047	5.638	0.05	1.50
$P_{G3}$	20	180	40	4.257	-5.094	-4.586	0.05	1.50
$P_{G4}$	10	100	60	5.326	-3.550	3.380	0.05	1.50
$P_{G5}$	20	180	40	4.258	-5.094	4.586	0.05	1.50
$P_{G6}$	10	150	100	6.131	-5.555	5.151	0.05	1.50

表 3 IEEE 系統 HDE 與 PSO 之參數設定

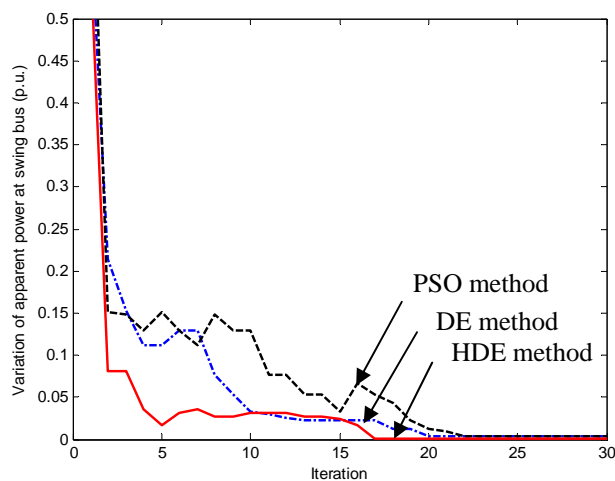
HDE		PSO	
總疊代次數	30	總疊代次數	30
個別疊代次數	50	個別疊代次數	50
族群大小	30	族群大小	30
干擾向量數目	2	最大與最小慣性 權值 $[\omega_{max} \omega_{min}]$	[0.1 0.9]
干擾常數	0.8		
突變率	0.25	加速因子 $[\alpha_1 \alpha_2]$	[0.35 0.35]
重組率	0.6		



(a)最後一次疊代虛功調度收斂曲線



(b)最後一次疊代實功調度收斂曲線



(c)搖擺會流排上視在功率變化量(p.u.)收斂曲線

圖 3 IEEE 系統虛功與實功調度下不同方法的收斂曲線

表 4 IEEE 系統最佳虛功/實功調度情況下不同方法的實功損失結果比較

方法	$\sum P_G$ (MW)	$\sum Q_G$ (MVar)	$P_{loss}$ (MW)	$Q_{loss}$ (MVar)	節省實功損失
快速解耦法	288.6830	102.7660	5.2830	-23.4340	
DE 方法	286.2970	99.4560	2.8978	-26.7440	45.1486%
PSO 方法	285.5650	96.4960	2.1650	-29.7040	59.0195%
HDE 方法	285.1223	91.8180	1.7223	-34.4030	67.3992%

註： $\sum P_D = 283.4$  (MW)， $\sum Q_D = 126.2$  (MW)

表 5 IEEE 系統最佳虛功/實功調度情況下不同方法所獲得的控制變數值(p.u.)

控制變數	DE	PSO	HDE	控制變數	DE	PSO	HDE
$V_1$	1.0032	0.9826	1.0798	$T_{6-9}$	1.0320	0.9944	0.9556
$V_2$	0.9943	1.0079	1.0511	$T_{6-10}$	0.9781	1.0151	1.0015
$V_5$	0.9874	0.9651	1.0582	$T_{28-27}$	1.0144	0.9717	0.9815
$V_8$	1.0520	1.0317	1.0847	$Q_3$	0.0000	0.0000	0.0000
$V_{11}$	0.9873	0.9521	1.0439	$Q_{10}$	0.1910	0.1898	0.1865
$V_{13}$	1.0004	1.0035	1.0939	$Q_{24}$	0.0420	0.0432	0.0465
$T_{4-12}$	1.0200	1.0013	1.0069				

表 6 IEEE 系統最佳虛功/實功調度情況下不同方法的實功調度結果比較

方法	$P_{G1}$ (pu)	$P_{G2}$ (pu)	$P_{G3}$ (pu)	$P_{G4}$ (pu)	$P_{G5}$ (pu)	$P_{G6}$ (pu)	$\sum P_G$ (pu)	燃料成本 (\$/h)	代輸成本 (\$/h)	NO <sub>x</sub> 污染量 (ton/h)	成本適應值 (\$/h)
DE	0.2151	0.5488	0.7346	0.5835	0.3880	0.3930	2.8630	628.9571	73.7208	0.1923	550.1858
PSO	0.1189	0.3346	0.8832	0.6570	0.5037	0.3582	2.8556	617.9705	71.0113	0.2012	549.2453
HDE	0.1990	0.3709	0.7408	0.6446	0.4352	0.4607	2.8512	616.8360	72.4395	0.1934	541.5229

註：成本適應值的計算如(21)式，其中  $w_1=0.34$ 、 $w_2=w_3=0.33$ 、 $\omega=6$ 、 $\psi=3000$

表 7 IEEE 系統三種不同方法的靈敏度分析 (隨機執行 30 次)

方法	平均總成本	最低總成本	最高總成本	總成本變化量	平均執行時間(分)
DE 方法	551.3326	549.8996	554.1023	4.2027	17.02
PSO 方法	551.3125	550.1949	554.2231	4.0282	16.86
HDE 方法	544.7989	544.5859	546.3125	1.7266	17.45

## 4.2 台電 345kV 簡化系統

本測試系統如圖 4 所示，具有 33 個匯流排、16 部發電機組，系統內各匯流排上發電機組係將原系統內多部發電機組等效而成，其淨出力容量為原單一機組容量之和。在 16 部發電機組中，包含 3 部核能機組、9 部火力發電機組、3 部慣常水力發電機組、及 1 部抽蓄水力機組，所有發電機組中，核能與水力機組視為必須運轉(must-run)機組，其發電量在本計畫中視為固定不變。在 33 個匯流排中，包含 15 個 PV 匯流排(bus 9、11、15、16、18、20、21、22、27~33)、16 個 PQ 匯流排、以及 1 個搖擺匯流排(bus 1)。

在虛功最佳化過程中，控制變數為 PV bus 的電壓大小，其值設定在 0.9 p.u. 至 1.1 p.u. 之間。在實功最佳化過程中，控制變數為各發電機組出力大小，如表 8 所示，各發電機組之燃料成本係數亦列在表中，CO<sub>2</sub> 污染量係數則依據下列公式計算[19]：

(1) 燃油時 CO<sub>2</sub> 排放總量(公斤/時)

$$= \text{熱率(即 Heat Rate, 單位: Gcal/h)} \times 4.1868(\text{J/cal}) \times \text{碳排放係數(重油 21.1(kgC/GJ)、輕油 20.2(kgC/GJ))} \times \text{碳氧化率 0.99}$$

(2) 燃煤時 CO<sub>2</sub> 排放總量(公斤/時)

$$= \text{熱率(即 Heat Rate, 單位: Gcal/h)} \times 4.1868(\text{J/cal}) \times \text{碳排放係數 } 25.8(\text{kgC/GJ}) \times \text{碳氧化率 } 0.98$$

(3) 燃氣時 CO<sub>2</sub> 排放總量(公斤/時)

$$= \text{熱率(即 Heat Rate, 單位: Gcal/h)} \times 4.1868(\text{J/cal}) \times \text{碳排放係數 } 15.3(\text{kgC/GJ}) \times \text{碳氧化率 } 0.995$$

圖 5 顯示虛功與實功調度下，PSO、DE 及 HDE 三種方法之收斂情形，其中圖 5(a)為最後一次疊代時虛功調度收斂曲線，DE 方法於第 48 次疊代收斂至 426.42 MW，PSO 方法於第 46 次疊代收斂至 394.9 MW，HDE 方法於第 44 次疊代收斂至 375.0 MW，HDE 方法獲得較低的輸電損失；圖 5(b)為最後一次疊代時實功調度收斂曲線，DE 方法至第最後一次疊代時成本適應值收斂至 17,218,942(\$/h)，PSO 方法於第 47 次疊代收斂至 16,865,098(\$/h)，HDE 方法於第 41 次疊代收斂至 16,542,678(\$/h)，HDE 方法獲得較低的成本適應值；圖 5(c)為虛功/實功調度收斂曲線，縱座標為虛功調度時搖擺匯流排上視在功率注入量與實功調度時搖擺匯流排上視在功率注入量的絕對值誤差，三種方法在疊代初期均產生較大的變化量，DE 方法於第 20 次疊代以後變化量維持在 0.1 p.u.以內，PSO 及 HDE 方法均於第 17 次疊代以後變化量維持在 0.08 p.u.以內。

表 9 顯示最佳虛功/實功調度情況下，不同方法的實功損失結果比較，其中快速解藕法所獲得的實功損失為 496.5 MW，以此為基準，做為最佳化程序改善的依據。由結果可知，DE 方法可節省 14.12%的實功損失，PSO 方法可節省 20.46%的實功損失，HDE 方法可節省 24.47%的實功損失，亦即 HDE 方法可節省發電機組的發電量，表 10 顯示最佳虛功/實功調度情況下不同方法所獲得的控制變數值。

表 11 顯示最佳虛功/實功調度情況下不同方法的實功調度結果比較，其中燃料成本、代輸成本及 CO<sub>2</sub> 污染量的權值分別設定為 0.34、0.33 及 0.33，由表中可知，DE 方法所獲得的燃料成本、代輸成本及 CO<sub>2</sub> 污染量分別為 15,607,913(\$/h)、164,413(\$/h)及 3,931,289 (ton/h)，PSO 方法所獲得的結果分別為 14,731,799 (\$/h)、164,938(\$/h)及 3,886,864 (ton/h)，HDE 方法所獲得的結果則分別為 14,016,092(\$/h)、164,823 (\$/h)及 3,841,249 (ton/h)。上述結果說明 HDE 方法獲得較低的燃料成本與 CO<sub>2</sub> 污染量，代輸成本較 DE 方法為低；另外，HDE 方法獲得較低的成本適應值。表 12 為上述三種方法的靈敏度分析，由表中總成本變化量可知，所提出的 HDE 方法能獲得較穩定的結果；另外，HDE 方法因加入遷移及加速的運算，在相同疊代次數下，反而較其他兩種方法耗費較多的執行時間。

## 五、計劃成果自評

本計畫提出混合差分演化法於虛功與實功調度問題，計畫中將最佳虛功與最佳實功調度分割為兩個分別獨立的問題。在最佳虛功調度策略上，以輸電損失為目標函數，亦即在固定實功條件下求取虛功調度問題，以獲得最低實功損失下各匯流排電壓與變壓器分接頭設定的最佳解；在最佳實功調度策略上，則以燃料成本、代輸成本及 CO<sub>2</sub> 污染量為目標函數，形成多目標實功調度問題。透過上述之求解過程，可在一次之程式流程中同時獲得最佳虛功與最佳實功調度解。

由最佳虛功調度結果可知，所提出的 HDE 方法不僅可獲得較低的輸電損失，收斂速度也較其他方法為快；另由實功調度結果可知，HDE 方法能以較快速度收斂至較低的成本適應值。整體而言，HDE 方法能提供較佳的收斂特性，包含收斂速度、收斂穩定度及所獲得的最佳解。

綜合上述分析，本計畫研究內容與原計畫相符，並已達成預期目標，研究成果亦具備學術與應用價值，所提出之 HDE 方法未來可應用在其它電力相關問題上。

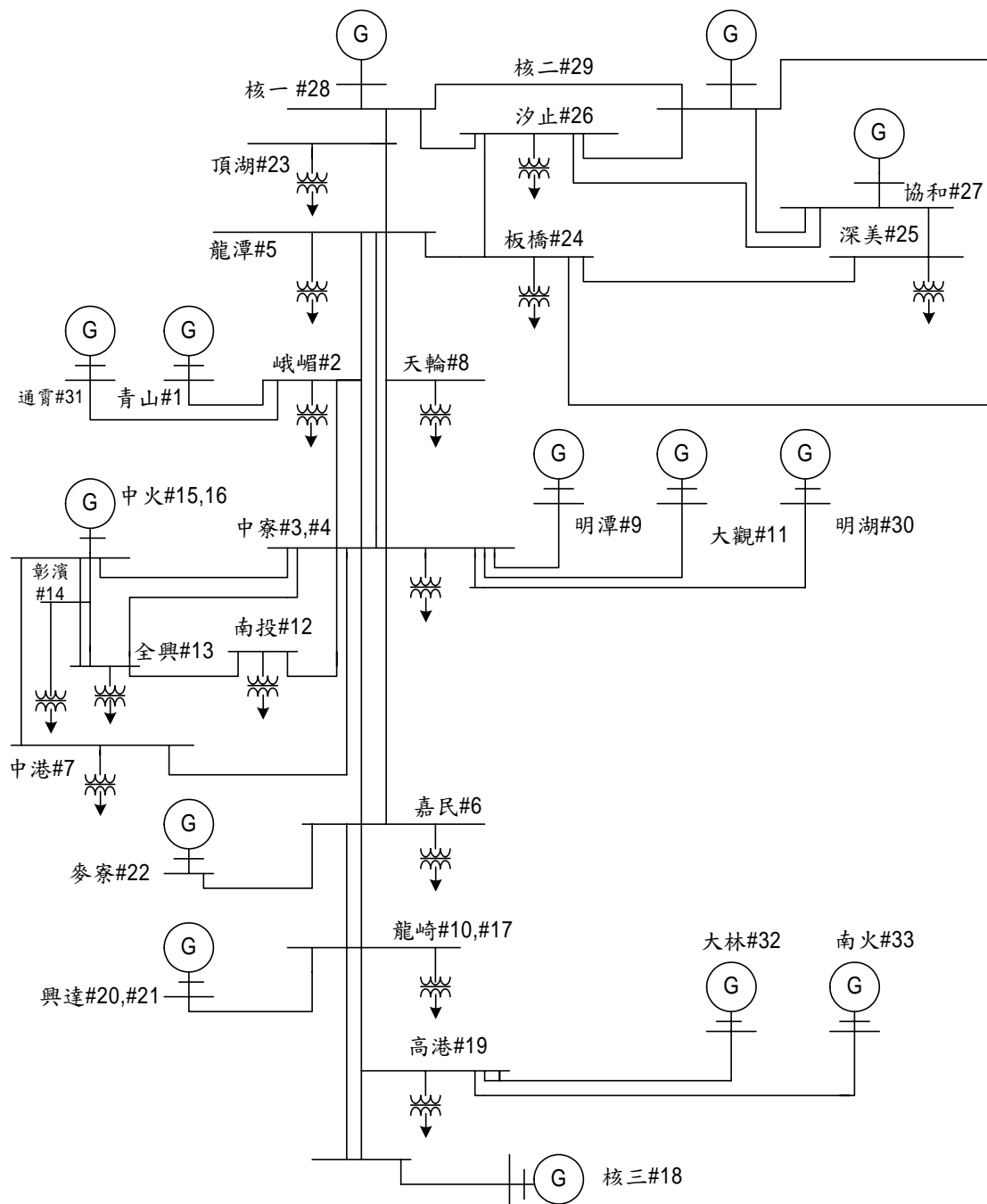
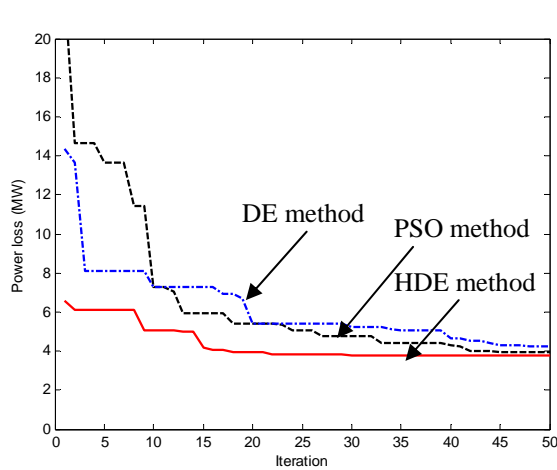


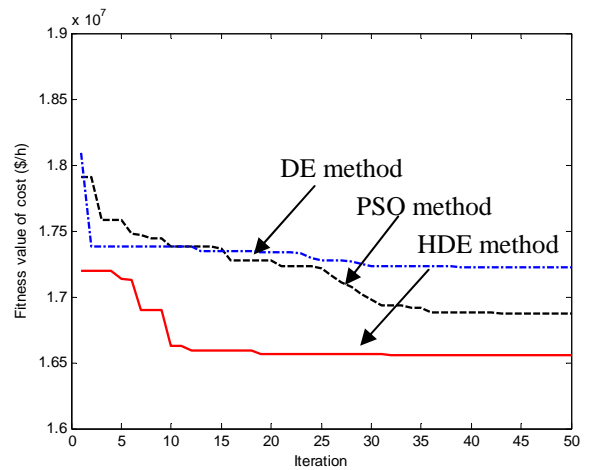
圖 4 台電 345kV 簡化系統

表 8 台電 345kV 簡化系統之各發電機機組的燃料成本曲線與發電量上下限

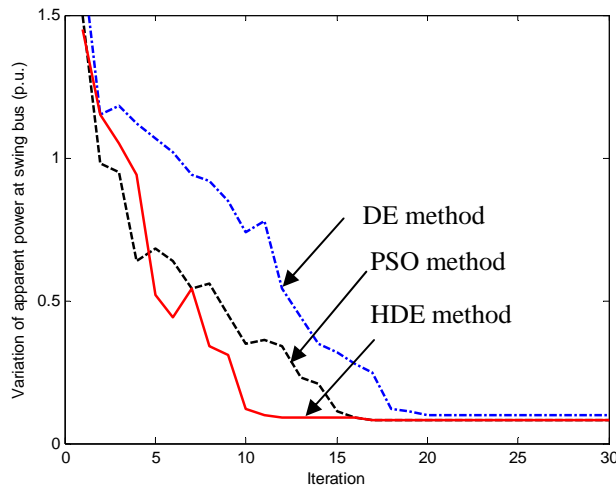
機組名稱	編號	燃料型態	常數 (NT\$)	一次係數 (NT\$/MW)	二次係數 (NT\$/MW <sup>2</sup> )	發電量下限 (MW)	發電量上限 (MW)
青山	---	水力	---	---	---	936.7	937.7
明潭	---	水力	---	---	---	870	871
大觀	---	水力	---	---	---	200	201
中火 1	$P_{G1}$	煤	36295.83	442.586	0.01511	1020	3120
中火 2	$P_{G2}$	煤	36295.83	442.586	0.01511	1020	3120
核三	---	核能	-	-	-	1820	1821
興達 1	$P_{G3}$	煤	41188.38	529.885	0.05477	728	2767.5
興達 2	$P_{G4}$	煤	41188.38	529.885	0.05477	728	2767.5
麥寮	$P_{G5}$	煤	36295.83	442.586	0.01511	1020	2880
協和	$P_{G6}$	油	63425.35	928.957	0.25798	520	2910
核一	---	核能	---	---	---	1150	1151
核二	---	核能	---	---	---	1810	1811
明湖	---	水力	---	---	---	600	601
通霄	$P_{G7}$	氣	226848.9	2766.16	0.09444	1145	1717
大林	$P_{G8}$	油	45253.27	907.236	0.50542	700	3150
南火	$P_{G9}$	氣	145183.3	1770.34	0.06044	867	1300.5



(a)最後一次疊代虛功調度收斂曲線



(b)最後一次疊代實功調度收斂曲線



(c)搖擺會流排上視在功率變化量(p.u.)收斂曲線

圖 5 台電 345kV 簡化系統虛功與實功調度下不同方法的收斂曲線



表 9 台電 345kV 簡化系統之最佳虛功/實功調度情況下不同方法的實功損失結果比較

方法	$\sum P_G$ (MW)	$\sum Q_G$ (MVar)	$P_{loss}$ (MW)	$Q_{loss}$ (MVar)	節省實功損失
快速解藕法	23174.2	-350576.9	496.5	-351785.4	
DE 方法	23104.1	-347980.8	426.4	-349179.3	14.12%
PSO 方法	23072.6	-343654.4	394.9	-344852.9	20.46%
HDE 方法	23052.7	-346536.4	375.0	-347734.9	24.47%

註：1. 發電量包含核能機水力機組

2.  $\sum P_D = 22677.7$  (MW),  $\sum Q_D = 1198.5$  (MW)

表 10 台電 345kV 簡化系統之最佳虛功/實功調度情況下不同方法所獲得的控制變數值(p.u.)

控制變數	DE	PSO	HDE	控制變數	DE	PSO	HDE
$V_9$	1.016049	0.994079	1.006854	$V_{27}$	1.014503	1.070040	0.921249
$V_{11}$	1.018233	1.017940	1.021234	$V_{28}$	1.058929	0.979846	0.913112
$V_{15}$	1.014676	0.994818	1.007685	$V_{29}$	0.955078	0.967407	1.004058
$V_{16}$	1.013399	1.021812	1.021516	$V_{30}$	1.020558	0.947248	0.983454
$V_{18}$	1.008565	0.999337	1.00375	$V_{31}$	0.963025	1.060237	0.926332
$V_{20}$	1.025523	1.023826	1.023844	$V_{32}$	1.015583	1.008848	1.037035
$V_{21}$	1.030481	1.059320	1.094685	$V_{33}$	1.029720	1.030673	0.993671
$V_{22}$	0.972738	1.012619	0.960414				

表 11 台電 345kV 簡化系統之最佳虛功/實功調度情況下不同方法的實功調度結果比較

機組	$P_{G1}$ (MW)	$P_{G2}$ (MW)	$P_{G3}$ (MW)	$P_{G4}$ (MW)	$P_{G5}$ (MW)	$P_{G6}$ (MW)	$P_{G7}$ (MW)	$P_{G8}$ (MW)	$P_{G9}$ (MW)	$\sum P_G$ (MW)	燃料成本 (\$h)	代輸成本 (\$h)	CO <sub>2</sub> 污染量 (tonh)	成本適應值 (\$h)
	中火1	中火2	興達1	興達2	麥寮	協和	通宵	大林	南火					
DE	311792	312000	152524	174470	147363	102000	141457	102529	129294	1573429	15,607,913	164,413	3,931,289	17,218,942
PSO	3084.14	312000	127970	112282	266664	109487	124341	102000	106422	1569580	14,731,799	164,938	3,886,864	16,865,098
HDE	311945	312000	102000	118914	288000	102000	114500	102000	102000	1553359	14,016,092	164,823	3,841,249	16,542,678

註：成本適應值計算如(21)式，其中  $w_1=0.34$ 、 $w_2=w_3=0.33$ 、 $\varpi = 100$ 、 $\psi = 5$

表 12 台電 345kV 簡化系統之三種不同方法的靈敏度分析 (隨機執行 30 次)

方法	平均總成本	最低總成本	最高總成本	總成本變化量	平均執行時間(分)
DE 方法	17,219,002	17,218,942	17,221,053	2111	18.75
PSO 方法	16,865,499	16,865,098	16,866,221	1123	18.05
HDE 方法	16,542,878	16,542,678	16,543,121	443	19.12

### 參考文獻

- [1] C. H. Jolissaint, N. V. Arvanitidis, and D. G. Luenberger, "Decomposition of Real and Reactive Power Flows: A Method Suited for On-Line Applications," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-91, No. 2, pp. 661-670, March/April 1972.
- [2] S. S. Sachdeva and R. Billinton, "Optimum Network VAR Planning by Nonlinear Programming," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-92, No. 4, pp. 1217-1225, July 1973.
- [3] S. R. Tyer, K. Ramachandran, and S. Hariharan, "Optimum Reactive Power Allocation for Improved System Performance," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 6, pp. 1509-1515, June 1984.
- [4] K. Aoki, M. Pan, and A. Nishikori, "Optimum VAR Planning by Approximation Method for Recursive Mixed-Integer Linear programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 4, pp. 1741-1747, November 1988.
- [5] S. Granville, "Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods," *IEEE Transactions on*

- Power Systems*, Vol. 9, No. 1, pp.136-146, February 1994.
- [6] J. A. Momoh, S. X. Guo, E. C. Ogbuobiri, and R. Adapa, "The Quadratic Interior Point Methods Solving Power System Optimization Problems" *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 3, pp.1327-1336, August 1994.
- [7] K. Iba, "Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm for Optimal Planning Based Upon Successive Linear Programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 2, pp.685-692, May 1994.
- [8] Q. H. Wu, Y. J. Cao, J. Y. Wen, "Optimal Reactive Power Dispatch Using an Adaptive Genetic Algorithm," *International Journal of Electric Power & Energy Systems*, Vol. 20, pp. 563-569, August 1998.
- [9] H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama, S. Takayama, and Y. Nakanishi, "A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 4, pp. 1232-1239, November 2000.
- [10] B. Zhao, C. X. Guo, and Y. J. Cao, "A Multiagent-Based Particle Swarm Optimization Approach for Optimal Reactive Power Dispatch," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 2, pp. 1070-1078, May 2005.
- [11] J. H. Talaq, Ferial, and M. E. El-Hawary, "Minimum Emission Power Flow," *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 9, No.1, pp. 429-435, February 1994.
- [12] R. Yokoyama, S. H. Bae, T. Morita and H. Sasaki, "Multiobjective Optimal Generation Dispatch Based on Probability Security Criteria," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 317-324, February 1988.
- [13] K. P. Wong, B. Fan, C. S. Chang and A. C. Liew, "Multi-Objective Generation Dispatch Using Bi-Criterion Global Optimisation," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 4, pp. 1813-1819, November 1995.
- [14] 台灣電力公司網站: <http://www.taipower.com.tw>
- [15] 經濟部能源委員會, 電力調度費率結構及計算公式之研究, 90年12月。
- [16] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation Operation and Control*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
- [17] 台灣電力公司, 火力發電廠空氣污染改善之績效指標, 環境保護處, 86年8月。
- [18] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, Inc., 1980.
- [19] 黃昭明、楊宏澤、洪穎怡、洪紹平及劉幹博, 1999年6月, 考慮燃料成本與CO<sub>2</sub>排放量電力調度之研究, 台電工程月刊, 第610期, 第32-48頁。

# 可供推廣之研發成果資料表

可申請專利

可技術移轉

日期：98年9月21日

<p><b>國科會補助計畫</b></p>	<p>計畫名稱：電力系統虛功與實功最佳電力調度之研究                  計畫主持人：黃昭明                  計畫編號：NSC-97-2221-E-168-047 學門領域：電力工程</p>
<p><b>技術/創作名稱</b></p>	<p>電力系統虛功與實功最佳電力調度軟體應用</p>
<p><b>發明人/創作人</b></p>	<p>黃昭明</p>
<p><b>技術說明</b></p>	<p>電力系統的經濟運轉主要包含兩個層面，即虛功調度與實功調度。理論上，虛功調度與實功調度存在耦合關係，亦即二者在調度過程中會相互影響，但由於一般輸電線存在很高的 X/R 比值，在此情況下，可利用解耦觀念將虛功與實功調度分割成兩個獨立的子問題，即 P 問題與 Q 問題，以利於問題的求解。為同時求解此虛功與實功調度問題，本計畫提出混合差分演化法，在固定實功條件下求取虛功調度問題，以獲得最低實功損失下各匯流排電壓與變壓器分接頭設定的最佳解。當完成最佳虛功調度，接著求取虛功固定不變條件下之多目標實功調度問題，以獲得滿足環保與經濟條件下之最佳發電輸出排程。混合差分演化法是一種多點搜尋、以群體演化為基礎之最佳化方法，主要在傳統差分演化法中加入遷移與加速運算子，以在過早收斂與整體搜尋的取捨間獲得平衡。由於混合差分演化法為一極優之最佳化搜尋工具，當應用於求解此虛功與實功調度問題時，能獲得良好的調度結果。本計畫所提出的方法測試於 IEEE 30 個匯流排及台電 345kV 簡化系統，以驗證所提出方法的可行性。結果顯示，所提出之 HDE 方法在解的品質及執行時間上均優於 DE 及 PSO 方法。本研究所提出方法乃利用 Matlab 軟體在個人電腦上執行，其執行結果則詳列於成果報告中。</p> <p>Power system economical operation consists of two aspects: reactive power dispatch and active power dispatch. Theoretically, there has the coupling relation between reactive and active power dispatch. That means they will influence each other. However, due to a high X/R ratio exists in the transmission line, the problem of reactive and active power dispatch can then be decomposed into two individual sub-problems by the decoupling concept, i.e., P problem and Q problem, which would be beneficial for the problem resolution. To simultaneously solve the optimal reactive and active power dispatch problem, a hybrid differential evolution (HDE) algorithm is presented in this project. Based on the minimization of active power transmission losses, the optimal solutions of each bus voltage and tap setting of each</p>

	<p>transformer can then be obtained. After finishing the optimal reactive power dispatch, the active power dispatch is performed accordingly while the reactive power remains unchanged. The optimal generation schedule satisfying both environmental and economic objectives is then obtained by the proposed HDE method. HDE is a multi-point search and population-based optimization method. To have the population holds the diversity characteristic, a migrating phase and an accelerated phase are embedded into the original version of DE. Due to the superiority in optimization, the HDE method can acquire better results when applied to the reactive and active power dispatch problem. The proposed approach has been verified on the IEEE 30-bus and Taipower 345kv simplified systems. Testing results indicate that the proposed HDE has high-quality solution and shorter computation time than DE and PSO methods. The proposed approach was implemented using the Matlab language on a personal-computer (PC). Details of the results have been presented in the final report.</p>
<p><b>可利用之產業 及 可開發之產品</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可利用之產業：公民營電力公司</li> <li>2. 可開發之產品：電力系統虛功與實功最佳電力調度軟體應用</li> </ol>
<p><b>技術特點</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 利用一組程式同時求解電力系統虛功與實功最佳電力調度問題為一新型的方法。</li> <li>2. 本技術經驗證在解的品質及執行時間上均差分演化法及粒子群演化法為優。</li> <li>3. 本技術利用 Matlab 軟體設計一套電力系統虛功與實功最佳電力調度程式，對於公民營電力公司而言，該程式內所採用之混合差分演化法可協助電力調度人員快速獲得精確的調度解。</li> </ol>
<p><b>推廣及運用的價值</b></p>	<p>台電公司對於電廠在發電過程中如何降低污染排放量的研究，主要致力於污染管制設備的裝設、提高發電機組效率、實施負載面的管理、及汰換老舊發電設備等措施；而本計畫所提出的方法在最佳實功調度方面主要透過電力調度手段達到抑制 CO<sub>2</sub> 污染排放效果。因此，本計畫的研發成果未來可提供台電公司進行發電機組之降低 CO<sub>2</sub> 污染排放調度時的參考依據。</p>

1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。

**2. 本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。**

3. 本表若不敷使用，請自行影印使用。