

最佳動態經濟調度演算法

江昭龍*

南開科技大學電子工程系(所)教授
t129@nkut.edu.tw

黃啟瑞

南開科技大學電子工程系(所)助理教授
crhuang@nkut.edu.tw

摘要

本文整合了「 ε -限制技術」、「改良型免疫演算法」及「參數更新技術」，來分析水火協調系統動態經濟調度。本文所提出的演算法具有下列優點：1) 考慮實際電力系統運轉操作情形的水火協調動態經濟調度、2) 開發出具有效能的改良型免疫演算法僅需使用少量族群來求解可降低運算時間增加效率、和 3) 可自動調適目標函數的處罰參數以處理限制條件。經過例題測試比較，已驗證出本文的確具有上述的優點，而且本文的成果比過去的研究更接近真實系統的運轉操作狀況，應用在水火協調動態經濟調度問題上，不僅具有更優質的解答且完全滿足系統限制條件的要求，確實具有效能及實用價值。

關鍵詞：免疫演算法、水火協調、動態經濟調度。

Abstract

This paper has developed an optimization of dynamic economic dispatch for hydrothermal power systems. This project has integrated the ε -constraint technique, the improved immune algorithm (IIA), and the multiplier updating. This combination has the following merits: 1) applicable for the dynamic economic dispatch of hydrothermal power systems; 2) developing the IIA and using only a small population for reducing computational time; and 3) adaptive multiplier updating equipped to handle system constraints. This study has referred to previous papers for comparing the results. System simulations have demonstrated that the proposed approach has the advantages mentioned above for solving problems of dynamic economic dispatch for hydrothermal power systems.

Keywords: Immune Algorithm, Hydrothermal Power System, Dynamic Economic Dispatch.

1. 前言

由於水力機組的反應速度快，因此也是系統備轉容量的主要來源[1]，國內、外相關文獻[2, 3]雖已有一些方法被提出，但是其中加入考慮火力機組閘門點現象[4]、或加入考慮火力機組的發電污染卻不多見，有的只是傳統的水火協調方法，且少有考慮污染問題[5]。依據 1997 年聯合國氣候變化綱要公約之「京都議定書」希望各國將大氣中的溫室氣體含量穩定在一個適當的水平，及 2009 年哥本哈根氣候變遷會議中，要求世界各國針對碳排放責任提出討論。在國、內外，雖然已有一些文獻[6]，研究如何在考慮污染限制的情況下，來進行最佳的電力經濟調度設計，但是實際以「多目標」、「動態經濟調度」的方式來規畫者卻是不多。

2. 系統方程式

2.1 考慮閘門點現象時的成本函數

考慮閘門點現象時，發電機組實際的成本曲線可以如[7]表示成(1)式；

$$F_1(P_{st,i}) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_s} [a_i + b_i P_{st,i} + c_i P_{st,i}^2 + | e_i \sin \{ f_i (P_{st,i}^{\min} - P_{st,i}) \}] (\$) \quad (1)$$

其中 F_1 是考慮閘門點現象時的發電成本， $P_{st,i}$ 為第 t 時間之第 i 發電機的發電量， a_i 、 b_i 和 c_i 為第 i 發電機的二次發電成本曲線係數， e_i 和 f_i 為第 i 發電機因閘門點現象影響的成本係數， N_s 為全部火力發電機的數目，而 T 則為全部排程時間的數目(若 $T=24$ 則為一天的排程)。

2.2 考慮發電污染時的成本函數

環境污染目標函數 F_2 ，傳統燃料中的二氧化硫、氮化物和一氧化碳氣體等，對於環境的污染可以參考文獻[6]表示成(2)式所示；

$$F_2(P_{st,i}) = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^{N_s} [\alpha_i + \beta_i P_{st,i} + \gamma_i P_{st,i}^2 + \xi_i e^{\zeta_i P_{st,i}}] \quad (1b) \quad (2)$$

其中 α_i , β_i , γ_i , ξ_i , 和 ζ_i 的為第 i 發電機發電污染特性曲線的係數。

2.3 系統限制條件

1. 水火協調發電負載平衡:電力調度首先必須滿足負載平衡式, 如(3)所示;

$$\sum_{i=1}^{N_s} P_{st,i} + \sum_{j=1}^{N_h} P_{ht,j} - P_{t,D} - P_{t,L} = 0, t=1, \dots, T \quad (3)$$

其中 $P_{t,D}$ 為第 t 時間之負載需求, 而 $P_{t,L}$ 為第 t 時間之傳輸的實功損失。其中系統傳輸的實功損失可以(4)式求得[1]; 而其中之 B_{ij} 、 B_{0ij} 與 B_{00} 均為傳輸損失係數矩陣。

$$P_{t,L} = \sum_{i=1}^{N_s+N_h} \sum_{j=1}^{N_s+N_h} P_{t,i} B_{ij} P_{t,j} + \sum_{i=1}^{N_s+N_h} B_{0ij} P_{t,i} + B_{00} \quad (4)$$

而 $P_{ht,j}$ 為第 t 時間之第 j 台水力發電機產生的實功, 其計算式如下[8];

$$P_{ht,j} = C_{h1,j} V_{ht,j}^2 + C_{h2,j} Q_{ht,j}^2 + C_{h3,j} V_{ht,j} Q_{ht,j} + C_{h4,j} V_{ht,j} + C_{h5,j} Q_{ht,j} + C_{h6,j} \quad (5)$$

其中 $C_{h1,j}$ 、 $C_{h2,j}$ 、 $C_{h3,j}$ 、 $C_{h4,j}$ 、 $C_{h5,j}$ 、 $C_{h6,j}$ 分別為第 j 台水力發電機的發電係數。 $V_{ht,j}$ 、 $Q_{ht,j}$ 分別為第 j 台水力發電機在第 t 時間之蓄水量與排放量。

2. 發電機組的發電量限制:另外每一台水力或火力發電機組的發電量也必須符合其發電限制量, 如(6)及(7)所示;

$$P_{s,i}^{\min} \leq P_{st,i} \leq P_{s,i}^{\max} \quad (6)$$

$$P_{h,j}^{\min} \leq P_{ht,j} \leq P_{h,j}^{\max} \quad (7)$$

其中 $P_{s,i}^{\min}$ 和 $P_{s,i}^{\max}$ 則分別代表第 i 部火力發電機的最小和最大發電量限制, 而 $P_{h,j}^{\min}$ 和 $P_{h,j}^{\max}$ 則分別代表第 j 部水力發電機的最小和最大發電量限制。

3. 水力動態平衡:而每一座水庫之水力運用需考慮水庫之上下游河川流入、流出量、水力發電排放量、溢流量等因素, 其計算如(8)所示;

$$V_{ht,j} = V_{ht-1,j} + I_{ht,j} - Q_{ht,j} - S_{ht,j} + \sum_{k=1}^{R_{u,j}} (Q_{hkt-\tau_k,j} + S_{hkt-\tau_k,j}) \quad (8)$$

其中, $V_{ht,j}$ 為第 j 水庫於第 t 時間的蓄水量、 $I_{ht,j}$ 為第 t 時間從上游流入第 j 水庫的流入水量、 $S_{ht,j}$ 為第 t 時間由第 j 水庫流出至下游的流出水量、 $R_{u,j}$ 為因為距離關係, 上游水庫的排放量延遲了 R_u 時間才進入第 j 水庫、 $Q_{hkt-\tau_k,j}$ 為上游第 k 水庫的排放量延遲了 τ_k 才在第 t 時間流入第 j 水庫、而 $S_{hkt-\tau_k,j}$ 為上游第 k 水庫的溢流量延遲了 τ_k 才在第 t 時間流入第 j 水庫。

4. 水庫蓄水量限制:而每一座水庫之蓄水量均有一定的限制範圍, 如(9)所示;

$$V_{h,j}^{\min} \leq V_{ht,j} \leq V_{h,j}^{\max} \quad (9)$$

其中, $V_{h,j}^{\min}$ 和 $V_{h,j}^{\max}$ 則分別代表第 j 座水庫的最小和最大蓄水量限制。

5. 水庫排水量限制:而每一座水庫發電時之排水量均有一定的限制範圍, 如(10)所示;

$$Q_{h,j}^{\min} \leq Q_{ht,j} \leq Q_{h,j}^{\max} \quad (10)$$

其中, $Q_{h,j}^{\min}$ 和 $Q_{h,j}^{\max}$ 則分別代表第 j 座水庫發電時最小和最大之排水量限制。

重新整理第(1)至(10)式, 以多目標的方式, 來表示此考慮閘門點現象與發電污染的「水火協調系統最佳動態經濟調度問題」, 可整理如(11)式所示;

$$\begin{aligned} & \min_{P_{i,t}(t=1, \dots, T \text{ and } i=1, \dots, N_s+N_h)} [F_1(P_{t,i}), F_2(P_{t,i})] \\ \text{Subject to } & \sum_{i=1}^{N_s} P_{st,i} + \sum_{j=1}^{N_h} P_{ht,j} - P_{t,D} - P_{t,L} = 0, t=1, \dots, T \\ & P_{s,i}^{\min} \leq P_{t,i} \leq P_{s,i}^{\max}, \quad i=1, \dots, N_s, \quad t=1, \dots, T \\ & P_{h,j}^{\min} \leq P_{ht,j} \leq P_{h,j}^{\max}, \quad j=1, \dots, N_h, \quad t=1, \dots, T \\ & V_{h,j}^{\min} \leq V_{ht,j} \leq V_{h,j}^{\max}, \quad j=1, \dots, N_h, \quad t=1, \dots, T \\ & Q_{h,j}^{\min} \leq Q_{ht,j} \leq Q_{h,j}^{\max}, \quad j=1, \dots, N_h, \quad t=1, \dots, T \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $F_1(P_{t,i})$ 和 $F_2(P_{t,i})$ 分別代表不同單位的目標函數式, 本計劃未列出的其他限制條件, 將可依系統特性可無限擴充一併加入分析。

3. 最佳動態經濟調度演算法

3.1 ε -限制式技術

ε -限制式技術[5]經常被應用於求取最佳化解答(Pareto-optimal solutions)問題上。對於同時有兩個以上的目標函數時，在分析時先保留其中一個目標函數，其餘的目標函數則分別以「 ε -限制式技術」來處理之。為簡化說明，以雙目標(F_1 :電力經濟成本目標函數、 F_2 :污染目標函數)之最佳化問題為例，使用 ε -限制式技術時，可依下式來分析求解；

$$\begin{aligned} & \min_{P_{i,t} \ (i=1, \dots, T \text{ and } i=1, \dots, N_s+N_h)} F_j(P_{i,t}), \quad j=1 \text{ or } 2 \\ \text{Subject to } & F_k(P_{i,t}) \leq \varepsilon_k, \quad k=1 \text{ or } 2, \text{ and } k \neq j \\ & \sum_{i=1}^{N_s} P_{st,i} + \sum_{j=1}^{N_h} P_{ht,j} - P_{t,D} - P_{t,L} = 0, t=1, \dots, T \\ & P_{s,i}^{\min} \leq P_{t,i} \leq P_{s,i}^{\max}, \quad i=1, \dots, N_s, \quad t=1, \dots, T \\ & P_{h,j}^{\min} \leq P_{t,j} \leq P_{h,j}^{\max}, \quad j=1, \dots, N_h, \quad t=1, \dots, T \\ & V_{h,j}^{\min} \leq V_{ht,j} \leq V_{h,j}^{\max}, \quad j=1, \dots, N_h, \quad t=1, \dots, T \\ & Q_{h,j}^{\min} \leq Q_{ht,j} \leq Q_{h,j}^{\max}, \quad j=1, \dots, N_h, \quad t=1, \dots, T \end{aligned} \quad (12)$$

先保留其中一個目標函數，另一個目標函數則以 ε -限制式技術來處理。上式中的 ε_k 為第 k 目標函數的最大限制量(或期望值)。

3.2 IIA

IIA的計算步驟描述如下：設定抗體族群數為 N_p ，設定最大疊代世代數(N_i)，設定抗原結合函數、設定抗體比對數目 N_s (N_s 為整數且 $N_s < N_p$)、設定控制參數初始值($k=0$) $C_k=1$ 、設定控制參數之下降率參數 dr 值(約0.5~0.99)、及設定控制參數之起始參數 T_0 值(約 $10^2 \sim 10^8$)，一般情形下 dr 與 T_0 的設定值須使 C_k 介於 $[0, 1]$ 的範圍中。

步驟 1. 隨機產生初始抗體族群， N_p 個抗體。

步驟 2. 將抗體帶入抗原結合強度函數，計算其(抗原結合強度)函數值。

步驟 3. 選出當代最佳函數值之抗體(R_k)並與歷代最佳函數值之抗體(R_{best})比較，若當代較歷代優良，則以當代取代歷代，記憶當代之抗體並更新為歷代最佳函數值之抗體。反之，當代不如歷代優良，則仍然保留原歷代最佳函數值之抗體(R_{best})。

步驟 4. 交配與突變機制之選擇。本文擬參考[9]所提之(Redefined Crossover and Mutation Scheme, RCMS)機制，此改良式子代產生機制有別於傳統的交配與突變機制。整個過程其則是根據控

制參數 C_k ，來決定下一代的交配與突變機制之選擇。進行方式說明如下；於本代 N_p 個抗體中先隨機選取任意兩個抗體，依據控制參數 C_k 產生下一代，如下： $(k$ ：目前之疊代次數) (1) 先任取一亂數 rand1 為 $[0, 1]$ 之間的均勻分佈之隨機數。 (2) 因人工智慧在疊代初期需使用較大的交配率使其快速找到最佳解，在疊代末期使用較大的突變率使其具有跳脫局部最佳解的可能性，所以控制變數 C_k 的設計為； $C_k = d_{r,k-1} * T_0$ 。 (3) 若 $\text{rand1} < C_k$ ：則兩個抗體進行三點式交配法交配。計算交配後的兩個抗體結合強度，並與 R_{best} 比較，再將最優者記憶為最佳抗體。同時將交配後之兩個新抗體置入原族群池中。 (4) 若 $\text{rand1} > C_k$ ：則兩個抗體進行突變，跳至步驟5。

步驟 5. 突變運算。將兩個抗體進行基因微量(在變數範圍內進行+0.05%~+5%)突變。計算突變後的抗體結合強度，並與 R_{best} 比較，再將最優者記憶為最佳抗體。同時將突變後之兩個新抗體置入原族群池中。

步驟 6. 在原族群池中，選取 N_p-N_s 個(抗原結合強度)函數值較優的抗體，當作 N_p-N_s 個下一代抗體。

步驟 7. 隨機由原族群池中任選一個抗體或亂數產生一個初始抗體，當作一個下一代抗體。重覆本步驟，直至下一代族群池中的抗體數目達到 N_p 個為止。

步驟 8. 遷移運算。跟其他隨機演算法一樣，皆有陷入區域最佳解的情形產生。因此本文擬利用遷移運算子[10]來改良傳統的IA，讓抗體有機會跳脫出區域最佳值，以求得全域最佳解的功能。

步驟 9. 菁英主義。將歷代最佳函數值之抗體(R_{best})隨機置換下一代抗體中任一個。為使族群不易發散以增加「菁英主義」運算子來維持適應函數值往收斂的方向前進。

步驟 10. 疊代世代數 $k = k + 1$ ，當 $k < N_i$ ，則回至步驟2，直至 $k \geq N_i$ ，則至下一步驟。

步驟 11. 觀察最佳抗體的結合強度是否收斂，若否，則提高 T_0 值，並回到步驟2。反之若已收斂，則列出最佳抗體及

(抗原結合強度)函數值。

3.3 IIA-MU

本文整合了「 ε -限制技術」、「改良型免疫演算法(IIA)」及「參數更新技術(Multiplier Updating, MU) [10]」, 將其合併成一種可有效求解具限制條件的最佳化演算法。圖 1 為本文整合 IIA 與 MU 的演算法流程圖。在此圖中具有兩個迴路：(1) 在內迴路中本文應用 IIA, 以由外迴路處得到的處罰參數及拉格朗奇乘積子, 求解 ALF。(2) 然後將搜尋得到的 ALF 解答, 傳送至外迴路朝 $L_a(x, \nu, v)$ 上邊界更新。當內外迴路都疊代足夠的世代數後, ALF 將會收斂至對偶問題的鞍點[10]。

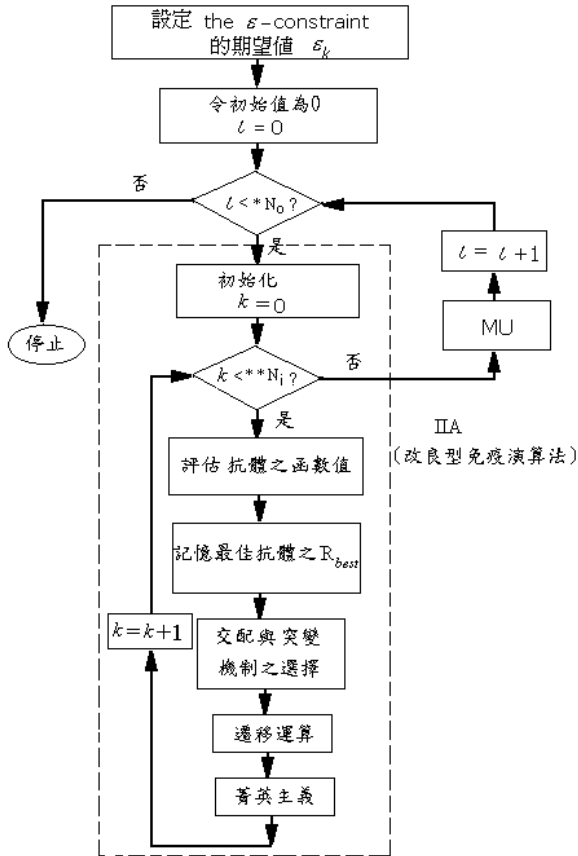


圖 1 本計畫所提出整合 IIA 與 MU 的演算法流程圖

* N_0 : 最大外迴路疊代數

** N_1 : 最大內迴路疊代數

4. 系統模擬

本例題主要用來強調本文之整合型最佳化演算法的搜尋效能, 並將系統傳輸損失納入考慮。並與過去的文獻結果 HMOCA[11]比較求解性能之優劣。本例題系統中包含四個串聯水庫與三部火力機組同時運轉, 依照本例題的

系統特性[12], 將分成 24 個時間區段($T=24$), (1)須搜尋 **168 個變數**(4 座水庫排水量+3 火力機組發電量)*24 個時間區間; (2)且必須同時滿足 **28 條等式限制條件**: 24 個時間區段的負載用電($h_1 \sim h_{24}$)、四座水庫的每日蓄水量終值($h_{25} \sim h_{28}$); 及 (3)必須同時滿足 **289 條不等式限制條件**: 四座水庫 24 時間區間中每一小時($4*24=96$)之水力發電量的最大限制($g_{17} \sim g_{96}$)、四座水庫 24 時間區間中每一小時($4*24=96$)之蓄水量的最大限制($g_{97} \sim g_{192}$)、四座水庫 24 時間區間中每一小時($4*24=96$)之蓄水量的最小限制($g_{193} \sim g_{288}$), 和使系統發電污染(或發電成本)之最小化期望值(g_{289})。

本例題的系統可將 ALF、目標函數及各限制條件分別表示如(13) ~ (22)式所示; 其中 E_{lim} 為系統產生污染之最大限制值, 依參考文獻[12]定為 48797.00 (lb)。

$$L_a(x, \nu, v) = f(x) + \sum_{k=1}^{28} \alpha_k \{ [h_k(x) + \nu_k]^2 - \nu_k^2 \} + \sum_{k=1}^{289} \beta_k \{ \langle g_k(x) + v_k \rangle_+^2 - v_k^2 \} \quad (13)$$

$$Objective : \min_x f(x) = F_1(P_{t,i}) \quad (14)$$

其中;

$$F_1 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^3 [a_i + b_i P_{st,i} + c_i P_{st,i}^2 + | e_i \sin(f_i (P_{st,i}^{min} - P_{st,i})) |] (S) \quad (15)$$

$$F_2 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^3 [\alpha_i + \beta_i P_{st,i} + \gamma_i P_{st,i}^2 + \xi_i e^{(\zeta_i P_{st,i})}] (lb) \quad (16)$$

系統並且須同時滿足下列限制式;

$$h_1 \sim h_{24} : \sum_{i=1}^3 P_{st,i} + \sum_{j=1}^4 P_{ht,j} - P_{t,D} - P_{L,t} = 0 \quad t=1, \dots, 24 \quad (17)$$

$$h_{25} \sim h_{28} : V_{ht,j} - V_{h_end,j} = 0 \quad (18)$$

$$g_{17} \sim g_{96} : P_{ht,j} - P_{ht,j}^{max} \leq 0, j=1, \dots, 4 \quad t=1, \dots, 24 \quad (19)$$

$$g_{97} \sim g_{192} : V_{ht,j} - V_{ht,j}^{max} \leq 0, j=1, \dots, 4 \quad t=1, \dots, 24 \quad (20)$$

$$g_{193} \sim g_{288} : V_{ht,j}^{min} - V_{ht,j} \leq 0, j=1, \dots, 4 \quad t=1, \dots, 24 \quad (21)$$

$$g_{289} : F_2 - E_{lim} \leq 0 \quad (22)$$

上述(18)中之 $V_{h_end, j}$ 為第 j 座水庫於第 24 時間區間的蓄水量。同時為了展現本文所提 IIA-MU 能夠求得完全滿足系統限制條件要求的最佳解，本文訂定了一個系統限制條件違背總量 (Sum of constraint violations, SCV) 的

評估，如第(23)式所示，希望以 SCV 來顯示出本文所使用的 MU 之優點。而本式中 SCV1 與 SCV2 分別代表等式限制條件部分之違背量與不等式限制條件部分之違背量。

$$SCV = SCV1 + SCV2 = \sum_{k=1}^{28} |h_k| + \sum_{k=1}^{289} \max\{g_k, 0.0\} \quad (23)$$

表 1 本文 IIA-MU 所求得的最佳解(考慮 loss, 最佳成本)

	Q_{lb1}	Q_{lb2}	Q_{lb3}	Q_{lb4}	P_{sy1}	P_{sy2}	P_{sy3}
$t=1$	10.1978	8.1394	16.6369	17.6862	20.0000	125.4771	140.0036
$t=2$	5.5663	6.0000	18.1377	14.9842	102.6833	124.9120	139.7685
$t=3$	7.5109	6.0000	20.0079	13.2109	102.6747	124.9210	50.0000
$t=4$	6.9800	6.0000	19.7753	16.3661	20.0000	40.0000	139.7664
$t=5$	8.6234	7.1773	19.3082	16.3964	20.0000	40.0000	139.7638
$t=6$	5.0000	6.0000	18.7314	15.0841	20.0000	124.9103	229.5183
$t=7$	8.7546	6.5391	17.8838	20.0000	102.7283	124.9182	229.5196
$t=8$	8.9338	6.0000	19.5034	19.8600	175.0000	124.9074	229.5356
$t=9$	6.4576	6.0000	20.4592	20.0000	102.6771	209.8106	319.2821
$t=10$	6.3424	6.0000	20.0136	17.9735	102.6765	209.8250	319.2841
$t=11$	8.4169	6.8117	20.0215	17.8634	102.6715	209.8133	319.2992
$t=12$	10.2978	10.6981	18.2817	20.0000	102.9634	210.0451	319.2884
$t=13$	7.5448	8.3144	20.7011	20.0000	102.6809	124.9129	409.0434
$t=14$	7.9567	6.8905	19.2827	20.0000	102.6794	209.8188	229.5240
$t=15$	6.1747	6.0000	19.7586	20.0000	102.6735	124.9121	319.2830
$t=16$	9.5879	8.4541	15.5418	20.0000	102.6774	209.8242	229.5297
$t=17$	7.7386	9.1259	15.8415	19.8304	102.6783	124.9131	319.2919
$t=18$	5.8800	9.2418	14.1761	20.0000	102.6715	209.8189	319.2795
$t=19$	10.1101	10.3965	12.2717	20.0000	102.9326	124.9239	319.2828
$t=20$	5.0000	6.0000	20.8428	16.8801	102.6850	124.9130	409.0727
$t=21$	6.8038	11.2196	26.2880	20.0000	102.6762	209.8169	139.7548
$t=22$	8.2545	15.0000	23.5812	19.9997	20.0000	125.1991	229.5150
$t=23$	11.9746	15.0000	24.6364	20.0000	102.8181	124.9047	139.7543
$t=24$	14.9008	15.0000	17.6400	19.9945	104.1994	126.1650	50.0208

表 1 為使用本計畫所提之整合型演算法 (IIA-MU) 針對例題系統所求出的最佳解。為比較結果，表 2 同時列出參考文獻 [11](HMOCA 法、NSGA-II 法)、傳統的 IA-MU 及本文所提之演算法(IIA-MU)的結果，其中 F_1 、 F_2 和 CPU_time 分別代表水火協調系統的總發電成本(\$)、系統發電所產生之污染總量 (lb)與求解時間(Sec)。

由此表中可觀察到，IIA-MU 所求出之最佳解結果均比 HMOCA[11]與 NSGAI[11]優異。且本計畫所提之參數更新技術(MU)，因

可自動調適處罰函數參數，所以可求得幾乎完全滿足系統 317 條(等式 28 條+不等式 289 條=317 條)限制條件要求的解答(SCV=0.0)。同時在表 2 中也可以很清楚顯示出，IIA-MU 的確比傳統的 IA-MU 具有更好的解答品質。

5. 結論

本文所提之整合型最佳化演算法，整合了 ϵ -限制式技術、IIA 及 MU，且具有下列優點；1)考慮實際電力系統運轉操作情形的動態經

濟調度、2)可自動調適的處罰參數以處理限制條件、和3)開發出改良型免疫演算法，僅需使用少量族群來求解可降低運算時間增加效率。經過例題測試比較，已驗證出本文的確具有上述的優點，而且本文的成果比過去的研究更接近真實系統的運轉操作狀況，應用在水火協調動態經濟調度問題上，不僅具有更優質的解答且完全滿足系統限制條件的要求，確實具有效能及實用價值。

誌謝

本文承國科會支持研究經費(計畫編號 NSC 101-2221-E-252-010)謹此致謝。

參考文獻

[1] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power generation, operation, and control*, New York: Wiley & Sons, the 2nd ed., 1996.

[2] R. H. Liang, M. H. Ke, and Y. T. Chen, "Coevolutionary algorithm based on lagrangian method for hydrothermal generation scheduling," *IEEE Trans. Power systems*, Vol. 24, No. 2, pp. 499-507, May 2009.

[3] M. Basu, "A simulated annealing-based goal-attainment method for economic emission load dispatch of fixed head hydrothermal power systems," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 27, pp. 147-153, 2005.

[4] D. C. Walters and G. B. Sheble, "Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 8, No. 3, pp. 1325-1332, 1993.

[5] C. L. Chiang "Optimal Economic Emission Dispatch of Hydrothermal Power Systems," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 29, Issue 6, pp.

462-469, July 2007.

[6] M. T. Tasy, "Applying the multi-objective approach for operation strategy of cogeneration systems under environmental constraints", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 25, pp. 219-226, 2003.

[7] J. W. Lamont and E. V. Obessis, "Emission dispatch models and algorithms for the 1990's", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 10, No.2, pp. 941- 947, 1995.

[8] L. Lakshminarasimman and S. Subramanian, "short-term scheduling of hydrothermal power system with cascaded reservoirs by using modified differential evolution", *IEE Proc-Gener. Transm. Distrib.*, vol.153, no. 6, pp. 693-700, 2006.

[9] A. G. Bakirtzis, P. N. Biskas, C. E. Zoumas, and V. Petridis, "Optimal Power Flow by Enhanced Genetic Algorithm," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 17, No. 2, pp. 229-236, May 2002.

[10] C. L. Chiang "Improved genetic algorithm for power economic dispatch of units with valve-point effects and multiple fuels," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No.. 4, pp. 1690-1699, Nov. 2005.

[11] Y. Lu, J. Zhou, H. Qin, Y. Wang, and Y. Zhang, "A hybrid multi-objective cultural algorithm for short-term environmental/economic hydrothermal scheduling", *Energy Conversion and Management*, Vol.521, pp. 2121-2134, 2011.

[12] M. Basu, "An interactive fuzzy satisfying method based on EP technique for multiobjective short-term hydrothermal scheduling", *Electric Power Systems Research*, vol.69, pp.277- 285, 2004.

表 2 過去文獻與本文 IIA-MU 所求得的最佳解比較 (最佳成本)

演算法	HMOCA [11]	NSGA-II [11]	IA-MU	IIA-MU
F_1 (\$)	43278	43489	37884.4426	37494.8396
F_2 (lb)	17984	18332	21763.8382	22365.4245
P_L (MW)	-	-	299.27	269.95
SCV1	-	-	0.0	0.0
SCV2	-	-	0.0	0.0
SCV=SCV1 +SCV2	-	-	0.0	0.0
CPU_time(Sec)	-	-	1675.43	602.85