

螢火蟲演算法於多種燃料供應選擇之最佳經濟調度

江昭龍

南開科大電子工程系所/教授

t129@nkut.edu.tw

摘要

本文提出一種整合型最佳化演算法，可有效求解考慮多重燃料選擇之電力機組運轉問題。本文結合了「螢火蟲演算法」(Firefly Algorithm, FA)及「參數更新技術」(Multiplier updating, MU)。本文所提出的 FA-MU 在求解考慮「多重燃料選擇」的最佳經濟調度問題上，具有下列優點；1)可自動調適的處罰參數以處理限制條件、2)僅需使用少量族群來求解可降低運算時間。最後經與過去參考文獻的結果比較，驗證本文的成果應用於最佳經濟調度問題上，確實具有效能及實用價值，且完全符合系統限制條件的要求。

關鍵詞：螢火蟲演算法，經濟調度，多種燃料選擇。

Abstract

This paper presents a Firefly Algorithm with multiplier updating (FA-MU) for power economic dispatch of units having multiple fuel options. The proposed method integrates the FA and the MU that has merits of 1) automatically adjusting the randomly given penalty to a proper value, and 2) requiring only a small-size population for the economic dispatch problem with multiple fuel options. Numerical results indicate that the proposed algorithm is more suitable than previous approaches in the practical application. Moreover, the proposed algorithm provides an efficacious approach and conforms to system constraints for power economic dispatch with multiple fuel options.

Keywords: firefly algorithm; economic dispatch; multiple fuel options.

1. 前言

電力機組運轉長久以來都是電力系統的熱門研究主題，在傳統的電力系統機組運轉問

題上，通常都單純地只使用一種燃料來規劃系統運轉成本，但是在實際操作上電力系統的發電機組，可能同時具有「多種燃料供應」(煤、天然氣或原油等)的選擇情況，導致研究電力經濟調度問題時就必須考慮到應該於何時供應何種燃料才能使系統全部機組運轉達到最經濟的成本。事實上每部發電機均同時有 2~3 種的燃料可供選用，因此若只是簡單地將發電機的成本曲線以(某燃料)固定的二階函數來簡化處理，則電力機組運轉的成本自然就不夠精確。所以合理的表示方法應該將每部發電機的成本曲線，以一組(多種燃料)非線性方程式來表示，而非以某個二階方程式來簡化處理。因為多重燃料選擇影響的事實，使得最佳電力機組運轉的研究，形成必須解決一個具有眾多等式限制 (Equality constraint) 及不等式限制 (Inequality constraint) 的非線性最佳化問題 (Nonlinear optimization problem)，也因此增加了求解此非線性最佳化問題的困難度，進而衍生出開發一種能夠精確求解又具有效率的演算法之迫切需求，因此電力系統的最佳化演算法，便是一個相當值得投入研究的方向。

目前已有一些文獻，研究過在求解最佳電力機組運轉時，加入多種燃料供應選擇 (Multi-Fuels Options) 的考慮，例如：階層法 (Hierarchical method, HM) [1]。霍普菲爾類神經法 (Hopfield neural network, HNN) [2]。適應型霍普菲爾類神經法 (Adaptive Hopfield neural network, AHNN) [3]。進化規劃法 (EP) [4]。改良型基因演算法 (Improved genetic algorithm, IGA)[5, 6]。混合整數編碼的差分進化與動態規劃法 (Hybrid integer coded differential evolution-dynamic programming, HICDEDP)[7]。而於自然界中，螢火蟲是一種群居性高且具趨光性的物種，它通常出現在熱帶高溫的潮濕地區，利用規律性發光來吸引同伴。螢火蟲約有 2000 多種，且每個特定品種螢火蟲各有其獨特的閃爍模式。螢火蟲發光的功能包括以下三種：第一種功能為求偶；第二種為吸引獵物；第三種為發出保護預警機制。

雄螢火蟲會發出特定閃爍速度和時間量的光來吸引雌螢火蟲，而同一種類的雌螢火蟲也會以同樣的發光模式回應。

本文擬應用螢火蟲發光求偶的特性，其中發光的強度與距離平方成反比，此外空氣也會吸收光，使光的強度會隨距離增加而變弱。結合此兩個因素，使螢火蟲之發光可見度被侷限在有限距離內，通常彼此間在夜晚之溝通距離約為幾百公尺。在螢火蟲群中，螢火蟲會往較亮的螢火蟲飛行，經過多次的移動，即會聚集到最亮的螢火蟲周圍，而此時最亮的螢火蟲即可視為所欲求解問題的最佳解。

Michalewicz [8]在1996年提出「動態處罰函數」(Dynamic penalty function)，使用動態處罰函數的求解效果會比使用靜態處罰函數佳的原因在於，搜尋初期動態處罰函數能以較小的處罰值來保留較多的基因型態，而在搜尋的後期增大處罰參數值，使得搜尋所得的最佳解落於合理區(Feasible region)之內。因此如何來設定處罰參數的大小值，使其在求解過程中，能夠適當調整處罰參數的技術將是求解效能的重要關鍵。參數更新技術(MU) [9, 10]為一種能自動調整處罰參數的更新技術，此參數更新技術可避免求解過程中，因擴展拉格朗奇函數(Augmented Lagrangian function, ALF) [11]的變數搜尋空間變形(扁平化)，所造成的求解困難。有鑑於螢火蟲演算法[12~19]已應用於多項工程最佳化問題，且具有優異的求解效能，因此本文擬整合螢火蟲演算法(FA)及參數更新法(MU)，針對多種燃料選擇之電力機組運轉成本問題，發展出一套可實際應用的FA-MU演算法，不僅可滿足系統的限制條件要求並且解出最佳的機組運轉答案，可提供給電力業者實質有用的電廠機組運轉規劃參考。

2. 系統描述

考慮多重燃料選擇之電力機組運轉成本問題的成本目標函數可表示如(1)式所示；

$$\min f = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (\$/h) \quad (1)$$

$$F_i(P_i) = \begin{cases} a_{i1} + b_{i1}P_i + c_{i1}P_i^2, & \text{fuel 1, } P_i \leq P_i \leq \bar{P}_i \\ a_{i2} + b_{i2}P_i + c_{i2}P_i^2, & \text{fuel 2, } P_{i1} \leq P_i \leq P_{i2} \\ \vdots & \vdots \\ a_{ik} + b_{ik}P_i + c_{ik}P_i^2, & \text{fuel k, } P_{ik-1} \leq P_i \leq \bar{P}_i \end{cases} \quad (2)$$

其中符號意義表示，

i ：代表發電機編號、

$F_i()$ ：代表編號第 i 台發電機之成本方程式、

P_i ：代表編號第 i 台發電機之發電量、

a_{ik} 、 b_{ik} 及 c_{ik} ：則分別代表編號第 i 台發電機使用第 k 種燃料時之成本係數、

而系統必須滿足下列兩個限制條件；

(1)發電平衡限制式

$$\sum_{i \in \Omega} P_i = P_D + P_L \quad (MW/h) \quad (3)$$

其中符號意義表示， P_D 表示系統的總負載需求，而 P_L 則表示系統的傳輸損失量。

(2)發電量範圍限制式

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (MW/h) \quad (4)$$

P_i^{\min} 、 P_i^{\max} 分別代表第 i 台發電機之發電下限與上限。所以，由上述(1)~(4)式我們也可看出當系統的運轉組數越多或每部機組可選用的燃料種類越多，則希望求出最佳發電成本的解答也就越艱難了。而應用本文的演算法(FA-MU)將能有效的求解出系統最佳解答，且滿足所有的系統限制條件要求。

3. 最佳化演算法(FA-MU)

3.1 螢火蟲演算法

本文所使用的螢火蟲演算法(FA)，是以螢火蟲的趨光特性為原則，並假設滿足以下三個理想化規則：1)所有螢火蟲是不分性別的，即假設每隻螢火蟲均受其他螢火蟲吸引。2)任兩隻螢火蟲的吸引力會正比於亮度，並與距離成反比，即於任何兩個閃爍的螢火蟲中，較不亮的螢火蟲會朝較亮的螢火蟲移動，而最亮的螢火蟲則是隨機移動。3)螢火蟲的亮度與目標函數相關，當目標函數求取最大值時，亮度與目標函數成正比；當目標函數求取最小值時，則可透過適應函數的轉換，使其與亮度成比例關係，據以引導至期望值之範圍內。

在螢火蟲演算法中，計算相對亮度時需考慮以下兩個因素，亦即螢火蟲的光強度及螢火蟲間的距離，即以螢火蟲 X_i 與螢火蟲 X_j 為例，兩者間的距離 r_{ij} 可由(5)式求得，而螢火蟲 X_i 觀視螢火蟲 X_j 的相對亮度 I_{ij} 可由(6)式求得。

$$r_{ij} = \left\| X_i - X_j \right\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (5)$$

$$I_{ij} = I_j * e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (6)$$

在上式中， $x_{i,k}$ 代表第 i 個螢火蟲的第 k 個控制變數座標； I_j 為螢火蟲 X_j 亮度； γ 為空氣對光的吸收係數。為使演算法之計算更有效率，可將(6)式的指數部分用泰勒級數展開，即如(7)式所示。故當螢火蟲距離趨近於零時，以近似求取相對亮度，如(8)式所示。

$$e^{-\gamma r^2} \approx 1 - \gamma r^2 + \frac{1}{2} \gamma^2 r^4 + \dots \approx \frac{1}{1 + \gamma r^2} \quad (7)$$

$$I_{ij} = \frac{I_j}{1 + \gamma r_{ij}^2} \quad (8)$$

而當螢火蟲遇到比自己更亮的螢火蟲時，受到的吸引力會因亮度及距離改變，因此在螢火蟲演算法中，吸引力會受到螢火蟲發光強度、螢火蟲間的距離及空氣對光的吸收係數影響。今假設空氣對光的吸收係數固定為 γ ，則螢火蟲間的吸引函數如下：

$$\beta(r) = \beta_0 * e^{-\gamma r^2} \quad (9)$$

其中 β_0 為在螢火蟲彼此距離 $r=0$ 時的吸引常數、 r_{ij} 為兩隻螢火蟲間的距離。此時需說明的是相對亮度及吸引函數都會受到空氣對光的吸收係數影響，當距離趨近於零時，相對亮度可視為另一隻螢火蟲的亮度 $I_{ij} \simeq I_j$ ，吸引函數亦可視為常數 $\beta(r) = \beta_0$ ，此時發光強度不會與距離平方成反比，但當距離趨近於無限大時，相對亮度可視為零， $I_{ij} \simeq 0$ ，此時吸引函數可視為單位脈衝函數 $\beta(r) \rightarrow \delta(r)$ ，意謂著所有螢火蟲間吸引力幾乎為零，亦代表螢火蟲靠發光溝通的距離趨近於零，此即類似模擬螢火蟲處於多霧的地區，此時其僅能隨機移動飛行。由此可知，空氣對光的吸收係數對螢火蟲間的相對亮度及吸引函數影響甚大，因此需審慎評估吸收係數的大小。又在螢火蟲演算法中，螢火蟲之飛行方式會受到螢火蟲本身的位置及較亮的螢火蟲位置改變。以螢火蟲 X_i 飛往相對亮度較大的螢火蟲 X_j 為例，其飛行方式如下所示：

$$X_{i+1} = X_i + \beta(r) * (X_j - X_i) + \alpha * (rand - \frac{1}{2}) \quad (10)$$

其中 α 為螢火蟲隨機飛行係數， $\alpha \in [0, 1]$ ； $rand$ 則是介於 0 到 1 的亂數。經由上式之推導，可協助掌握螢火蟲之飛行方式，進而與(8)式結合，可推得其亮度，再擇定亮度最高者，即等效於目標函數之最佳解，故可用於求解最佳化問題。而因該演算法已同時融入隨機移動之觀念，故有助於降低求解過程中陷入局部解的機率，可增加其求解的效能。

3.2 參數更新技術(MU)

通常我們考慮的一般性具有限制條件的最佳化問題，以最小化為例時，可表示成如下式：

$$\begin{aligned} & \min f(x) \quad , x^L \leq x \leq x^U \\ \text{subject to } & h_k(x) = 0, \quad k = 1, \dots, m_e \\ & g_k(x) \leq 0, \quad k = 1, \dots, m_i \end{aligned} \quad (11)$$

其中， x 代表一個 D 維度的連續變數，而 (x^L, x^U) 分別代表其變數的下限與上限。 $h_k(x)$ 和 $g_k(x)$ 則分別表示等式限制條件及不等式限制條件，其中等式限制條件及不等式限制條件的數目分別為 m_e 和 m_i 。

處罰函數法 (Penalty function method, PFM) 經常被應用於處理限制條件上，利用處罰函數將各限制條件併入目標函數中，將原具限制條件的最佳化問題轉換為一不具限制條件的題目。轉換後的目標函數如下式：

$$P(x) = f(x) + \sum_{k=1}^{m_e} \alpha_k h_k^2(x) + \sum_{k=1}^{m_i} \beta_k \langle g_k(x) \rangle_+^2 \quad (12)$$

其中的 α_k 和 β_k 均為正值的處罰參數值，而上式的最後一項括號運算則定義為 $\langle g_k \rangle_+ = \max \{g_k, 0\}$ 。

雖然處罰函數法觀念簡單及容易應用，但是主要的缺點在於不易針對各限制條件，訂出適當的處罰參數值，而當處罰參數變得相當大時，這些被處罰項都將面臨搜尋空間扁平化的情況，往往所得到的答案均座落在邊界附近，因而造成求解的困難。

拉格朗奇函數 (Lagrange function) [9, 11] 經常被利用來改善處罰函數的缺失。擴展拉格

朗奇函數 (ALF) [11] 則是組合了拉格朗奇函數及處罰函數，可表示成如下式所示：

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

其中，拉格朗奇乘積子 (Lagrange Multipliers)：等式限制條件的 $\nu = (\nu_1, \dots, \nu_{m_e})$ 和不等式限制條件的 $\nu = (\nu_1, \dots, \nu_{m_i})$ 均為正值。

由上式中我們可觀察到，當各限制條件均為線性函數時， $L_a(x, \nu, \nu)$ 在疊代求解的過程中，變數的搜尋空間將不會變形，因為整個的 ALF 與原目標函數 $f(x)$ 的關係只是簡單的平移，如此即使使用較小的處罰參數亦可能搜尋出最佳解。但是，如果當各限制條件有些為非線性函數時， $L_a(x, \nu, \nu)$ 將會因為處罰參數設定不當，而造成變數的搜尋空間變形。本文應用的具自動調適處罰函數參數的更新技術 (MU) 將能克服上述的缺點。

3.3 FA-MU

本文整合「螢火蟲演算法 (FA)」及「參數更新技術 (MU)」，將其合併成一種可有效求解考慮多重燃料選擇之電力機組運轉問題。圖 1 為本文整合 FA 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 FA，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 $L_a(x, \nu, \nu)$ 上邊界 (Upper bound of L_a) 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 (Dual problem) 的鞍點 (Saddle-point) [10]。

4. 系統模擬

本文將以某具 10 部機組的發電系統來測試考慮「多種燃料供應選擇」的最佳電力機組運轉問題，系統負載需求分別為 2600MW 與 2700MW。每部發電機組成本模型均為二階函數，且每一部發電機組均有兩~三種燃料可供選擇，系統資料完全如參考文獻[1]所示。本文的模擬程式以 Fortran-90 程式構成，在 P4-3.0G 雙核心的個人電腦進行測試，本文所提之最佳化演算法 FA-MU (內, 外) 迴路疊代

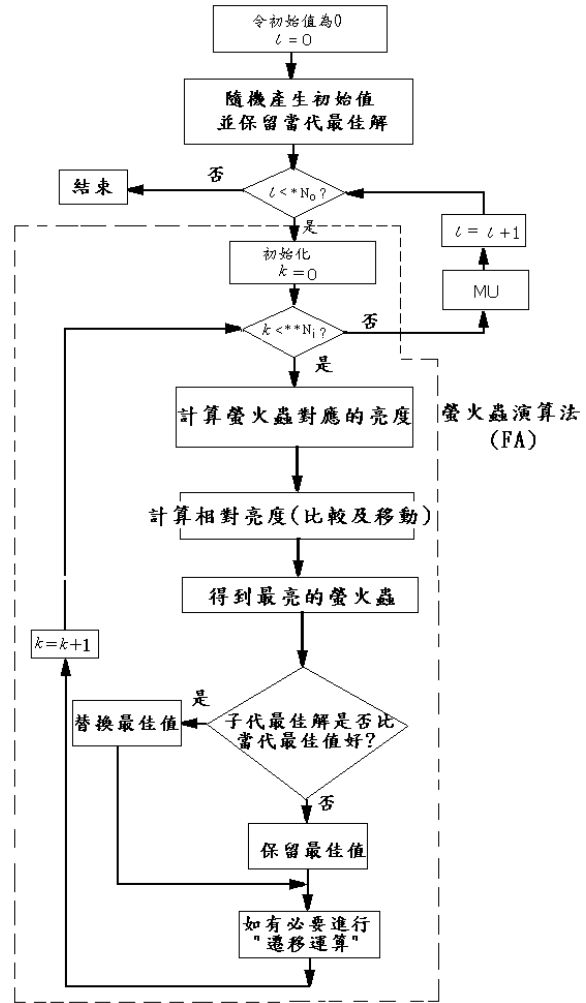


圖 1 本文所提出整合 FA 與 MU 的演算法流程圖
* N_0 ：最大外迴路疊代數
** N_k ：最大內迴路疊代數

世代數均設定為 (30, 3000)，而族群大小 (N_p) 均設定為 10。

為展現本文之整合型 FA-MU 的搜尋效能，並與過去的文獻結果[1~ 4, 7]之求解性能的優劣比較。參考文獻[1]所提之階層法 (HM)、參考文獻[2]霍普菲爾類神經法 (HNN)、參考文獻[3]適應型霍普菲爾類神經法 (AHNN)、參考文獻[4]進化規劃法 (EP) 及參考文獻[7]混合整數編碼的差分進化與動態規劃法 (HICDEDP)。依照本例題的系統特性 [1]，本例題之系統須搜尋 10 個發電量變數 (10 部機組)，且必須同時滿足負載平衡等式限制 (h_l) 和 10 個機組發電量範圍限制不等式。因此，本例題的系統可將 ALF、目標函數及各限制條件分別表示如 (14) ~ (17) 式所示；

$$L_a(x, v, \nu) = f(x) + \left\{ [h_1(x) + \nu_1]^2 - \nu_1^2 \right\} + \sum_{k=1}^{20} \beta_k \left\{ [g_k(x) + \nu_k]^2 - \nu_k^2 \right\} \quad (14)$$

其中，目標函數：

$$\min_{x=(P_1, P_2, \dots, P_{10})} f(x) = \sum_{i=1}^{10} F_i(P_i) \quad (15)$$

$$F_i(P_i) = \begin{cases} a_{i1} + b_{i1}P_i + c_{i1}P_i^2, & \text{fuel 1, } \underline{P}_i \leq P_i \leq \bar{P}_{i1} \\ a_{i2} + b_{i2}P_i + c_{i2}P_i^2, & \text{fuel 2, } P_{i1} \leq P_i \leq P_{i2} \\ \vdots & \vdots \\ a_{ik} + b_{ik}P_i + c_{ik}P_i^2, & \text{fuel } k, P_{i,k-1} \leq P_i \leq \bar{P}_i \end{cases} \quad (16)$$

而且必須滿足系統的限制條件要求：

$$\begin{aligned} h_1: & \sum_{i=1}^{10} P_i - P_d = 0 \\ g_1: & P_1 - P_1^{\max} \leq 0 \\ & \vdots \\ \text{subject to } g_{10}: & P_{10} - P_{10}^{\max} \leq 0 \quad (17) \\ g_{11}: & P_1^{\min} - P_1 \leq 0 \\ & \vdots \\ g_{20}: & P_{10}^{\min} - P_{10} \leq 0 \end{aligned}$$

為展現本文所提 FA-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)，第(18)式為本例題的系統限制條件違背總量：希望以 SCV 來顯示出本文所使用的 MU 之優點。

$$SCV = h_1 + \sum_{k=1}^{20} \max \{ g_k, 0.0 \} (MW) \quad (18)$$

表 1 及 表 2 分別依照系統的負載需求，同時列出參考文獻[1]的結果 HM，參考文獻[2] HNN、參考文獻[3] AHNN、參考文獻[4] EP、參考文獻[7] HICDEDP 及本文所提 FA-MU 演算法的結果，其中 TP 表示系統總發電量、TC 代表系統之發電成本。由這兩個表中可比較出，本文所提出之 FA-MU，的確具有比過去文獻結果有更優質的求解品質。同時也可比較出本文所提出之 FA-MU 不僅具有較佳的電力機組運轉成本，而且完全符合系統所有限制條件的要求，而參考文獻[1, 2]的方法因為 SCV

不為零，代表並非完全滿足系統的限制條件要求。本文所提出之 FA-MU 不僅具有較佳的解答品質而且完全符合系統的限制條件要求，因此可驗證出對於求解電力機組運轉問題上，本文提出的演算法具有比過去文獻結果具有更好的實用性。

5. 結論

本文提出一種整合型最佳化演算法，可有效求解考慮多重燃料選擇之電力機組運轉問題。本文的 FA-MU 具有下列優點：1)可自動調適的處罰參數以處理限制條件、2)僅需使用少量族群來求解可降低運算時間。經與過去參考文獻的結果比較，驗證出本文的成果不僅具有上述兩項的優點，且比過去文獻表現出更優異的搜尋性能，因此能求得最佳的解答。所以本文所提之演算法應用於電力機組運轉問題上，確實具有效能及實用價值，且完全符合系統限制條件的要求。

參考文獻

- [1] C. E. Lin and G. L. Viviani, "Hierarchical economic dispatch for piecewise quadratic cost functions," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, PAS-103, No. 6, pp. 1170-1175, 1984.
- [2] J. H. Park, Y. S. Kim, I. K. Eom, and K. Y. Lee, "Economic load dispatch for piecewise quadratic cost function using Hopfield neural network," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 8, No. 3, pp. 1030-1038, 1993.
- [3] K. Y. Lee, A. Sode-Yome, and J. H. Park, "Adaptive Hopfield neural network for economic load dispatch," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 13, No. 2, pp. 519-526, 1998.
- [4] T. Jayabarathi and G. Sadasivam, "Evolutionary programming-Based economic dispatch for units with multiple fuel options," *European Trans. on Electrical Power*, Vol.10, No. 3, pp. 167- 170, 2000.
- [5] C. L. Chiang and C. T. Su, "Adaptive improved genetic algorithm for economic dispatch of units with multiple fuel options," *Cybernetics and Systems*, Vol. 36, No. 7, pp. 687-704, 2005.
- [6] 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.
- [7] R. Balamurugan, and S. Subramanian, "Hybrid integer coded differential evolution-dynamic programming," *Energy Conversion & Management*, Vol. 49, Issue 4, pp. 608-614, 2008.
- [8] Z. Michalewicz and M. Schienauer, "Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems," *Evolutionary Computation*, Vol. 4, No. 1, 1996, pp 1-32.
- [9] C. L. Chiang, C. T. Su, and F. S. Wang, "Augmented Lagrangian method for evolutionary optimization of mixed-integer nonlinear constrained problems," *Intern. Math. J.*, Vol.2, No. 2, 2002, pp. 119-154.
- [10] C. L. Chiang, "Improved Immune Algorithm for Power Economic Dispatch Considering Units with Prohibited Operating Zones and Spinning Reserve," *International Journal of Engineering and Technology*, Vol.6, No. 4, pp. 320- 325, 2014.
- [11] M. J. D. Powell, "Algorithms for nonlinear constraints that use Lagrangian function", *Math. Programming*, Vol. 14, 1978, pp. 224-248.
- [12] X. S. Yang, *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*, Lunver Press, UK, 2008.
- [13] X. S. Yang, S. S. S. Hosseini, and A. H. Gandomic, "Firefly algorithm for solving non-convex economic dispatch problems with valve loading effect," *Applied Soft Computing*, Vol. 12, pp. 1180–1186, 2012.
- [14] R. K. Sahu, S. Panda, and S. Padhan, "A hybrid firefly algorithm and pattern search technique for automatic generation control of multi area power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 64, pp. 9-23, 2015.
- [15] K. Naidu, H. Mokhlis, A. H. A. Bakar, V. Terzija, and H. A. Illias, "Application of firefly algorithm with online wavelet filter in automatic generation control of an interconnected reheat thermal power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 63, pp. 401-413, 2014.
- [16] N. Taher, A. A. Rasoul, and R. Alireza, "Reserve constrained dynamic economic dispatch: a new fast self-adaptive modified firefly algorithm," *IEEE Systems Journal*, Vol. 6, No. 4, pp. 635-646, Dec. 2012.
- [17] 黃世杰，楊叔軒，蘇偉府，劉憲宗，林鵬遠，"應用螢火蟲演算法於地下電纜被覆損失之改善"，*第三十一屆電力工程研討會論文集*，pp.1850-1856, 2010。
- [18] 梁瑞勳，劉建宏，"以含局部隨機搜索的增強型螢火蟲演算法做虛功率運轉規劃"，*第三十四屆電力工程研討會論文集*，pp.278- 283, 2013。
- [19] C. L. Chiang, "Firefly Algorithm for Power Economic Emission Dispatch," *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Technologies and Engineering Systems (ICITES 2014), Lect. Notes Electrical Eng.*, Vol. 345, pp. 1- 6, Kaohsiung, Taiwan., 19 – 21 December 2014.

表 1 測試結果比較($P_D = 2600\text{MW}$)

Unit	NM [1]		HNN [2]		AHNN [3]		EP [4]		HICDEDP[7]		FA-MU	
	Fuel type	Gen	Fuel type	Gen	Fuel type	Gen	Fuel type	Gen	Fuel type	Gen	Fuel type	Gen
1	2	216.4	2	215.3	2	218.1	2	210.1	2	216.5442	2	216.54
2	1	210.9	1	210.6	1	210.4	1	207.1	1	210.9058	1	210.90
3	1	278.5	3	278.9	1	278.8	1	269.5	1	278.5441	1	278.49
4	3	239.1	3	238.9	3	239.1	3	236.8	3	239.0967	3	239.08
5	1	275.4	1	275.7	1	275.8	1	263.6	1	275.5194	1	275.46
6	3	239.1	3	239.1	3	239.1	3	237.1	3	239.0967	3	239.12
7	1	285.6	1	286.2	1	285.4	1	275.6	1	285.7170	1	285.83
8	3	239.1	3	239.1	3	239.1	3	237.2	3	239.0967	3	239.05
9	3	343.3	1	343.5	1	341.9	3	402.2	1	343.4934	1	343.48
10	1	271.9	1	272.6	1	272.4	1	260.8	1	271.9861	1	272.05
TP (MW/h)	2599.3		2599.8		2600.0		2600.0		2600.0		2600.00	
P_D (MW/h)	2600											
SCV (MW)	0.7		0.2		0.0		0.0		0.0		0.00	
TC (\$/h)	574.03		574.26		574.37		574.75		574.3808		574.37	

表 2 測試結果比較($P_D = 2700\text{MW}$)

Unit	NM [1]		HNN [2]		AHNN [3]		EP [4]		HICDEDP[7]		FA-MU	
	Fuel type	Gen	Fuel type	Gen	Fuel type	Gen	Fuel type	Gen	Fuel type	Gen	Fuel type	Gen
1	2	218.4	2	224.5	2	228.2	2	225.2	2	218.2499	2	218.34
2	1	211.8	1	215.0	1	214.8	1	215.6	1	211.6626	1	211.72
3	1	281.0	3	291.8	1	291.7	1	291.8	1	280.7228	1	280.51
4	3	239.7	3	242.2	3	242.3	3	242.1	3	239.6315	3	239.43
5	1	279.0	1	293.3	1	293.3	1	293.7	1	278.4973	1	278.46
6	3	239.7	3	242.2	3	242.2	3	241.9	3	239.6315	3	239.77
7	1	289.0	1	303.1	1	302.3	1	301.6	1	288.5845	1	288.90
8	3	239.7	3	242.2	3	242.3	3	242.8	3	239.6315	3	239.35
9	3	429.2	1	335.7	1	354.2	1	356.6	3	428.5216	3	428.86
10	1	275.2	1	289.5	1	288.9	1	288.7	1	274.8667	1	274.66
TP (MW/h)	2702.2		2699.7		2700.0		2700.0		2700.0		2700.00	
P_D (MW/h)	2700											
SCV (MW)	0.2		0.3		0.0		0.0		0.0		0.00	
TC (\$/h)	625.18		626.12		626.24		626.26		623.8092		623.81	