

# 再生能源高滲透孤島電網機組排程之研究

## Study on Unit Commitment of an Islanded Power Network with High Renewable Energy Penetration

陳在相<sup>1</sup>      吳宗軒<sup>1</sup>      黃維澤<sup>2</sup>      楊念哲<sup>1</sup>  
Tsai-Hsiang Chen   Chung-Hsuan Wu   Wei-Tzer Huang   Nien-Che Yang  
劉庭佑<sup>1</sup>      張永瑞<sup>3</sup>      李奕德<sup>3</sup>      何元祥<sup>3</sup>  
Ting-Yu Liu      Yung-Ruei Chang      Yih-Der Lee      Yuan-Hsiang Ho

<sup>1</sup> 國立臺灣科技大學電機工程學系  
Department of Electrical Engineering, National Taiwan University of Science and Technology  
<sup>2</sup> 國立彰化師範大學  
Department of Industrial Education and Technology, National Changhua University of Education  
<sup>3</sup> 核能研究所  
The Institute of Nuclear Energy Research

### 摘要

本文根據研究標的的歷史負載、再生能源發電資料、溫度資料，分析負載日的相似性，將用電曲線相近的歷史資料歸納為同一類型，預測模組可以預測日前 24 小時之負載需求、再生能源發電量，接著以實際的時間序列數據進行驗證，以確定預測方法可用性與準確性，並將其做為機組排程之依據。機組排程為決定機組發電狀態與發電機起停優先順位的系統運轉重要問題，本文採用基因演算法以最低成本為目標函數進行日前組排程，模擬結果能輔助電力調度人員做出更準確之孤島電網機組排程與調度。

關鍵詞：孤島電網、機組排程、基因演算法、預測。

### Abstract

This paper is based on the historical load data, generation data, and temperature data to analyze the similarity of the electrical load curve in the historical data. The proposed model can predict the day-ahead load demand and renewable energy generation. Next, the time series actual load is used as validation to determine the availability and accuracy of the proposed method. The simulation results show that the proposed method is helpful for the unit commitment of islanded power networks. Unit commitment plays vital role in day-ahead system operation; therefore, the genetic algorithms is used to solve the unit commitment problem. The simulation results show that it is capable of solving the unit commitment of islanded power network, and it can be provided for the system operator to make more accurately decision of unit commitment.

Keywords: islanded power network, unit commitment, genetic algorithms, prediction.

### I. 簡介

本文以離島電網作為標的系統，以其所轄電網進行

既有發電機組、再生能源發電與負載需求對電廠調度之影響、相對應之備轉容量因應，故研擬負載需求預測及再生能源發電預測演算法與電力調度運轉排程演算法，作為電廠人員調度運轉之參考依據，達到穩定供電及降低離島燃油發電成本之效益。

研究標的因當地日照度強、風力大，再生能源的發展在地理環境部分擁有優勢，發電部分主要採柴油引擎發電機，發電成本高昂且易造成環境的污染，因此近幾年來再生能源發電逐漸得到了重視，且地域非常適合推廣以潔淨能源為架構之微電網系統。藉由大量建設管控再生能源設備來有效利用天然資源，可轉移主電網之尖峰負載、提昇電能調度與運作效率，充分達到節能減碳效果。

機組選定的優劣好壞，不但影響系統供電穩定性，同時亦影響發電成本之經濟性，在有效率且安全穩定的前提下去規劃各發電機組的發電情況來達到最低成本的付出是一個複雜的問題，其中包括要考慮到發電機本身運轉的燃料成本以及機組先天的限制才能做出有效率的發電機組調度[1]；因此，電力系統經濟運轉此一課題即孕育而生，而機組排程就是在規劃系統經濟運轉中的一項重要工作。

### II. 基因演算法應用於最低成本之機組排程方法

#### 2.1 基因演算法的運作程序

本研究所採用的雙點交配法(Two-Point crossover)：選擇染色體中的固定兩個位置將串列截斷，將兩個基因在截斷之間的所有編碼進行互換，圖 1 所示。

基因演算法的停止條件主要取決於其適應值是否符合問題的所有要求，由於演算法並不能夠百分之百的得到最精準的解，因此需重複驗證判斷，若達到停止條件即結束整個基因循環的流程，可分為以下三種：

(1) 演化代數：設定基因演算多少代數後停止，此優點為能控制計算時間，但無法確定是否收斂、無法保證為最佳解。

(2) 達到目標：設定一目標值，若已經達到目標則停止。當問題難度較低時，此方法能確保求解的速度與品質，但是必須要知道目標的範圍。

(3)系統解收斂：若連續很多個群體，在還沒產生突變前的基因個體都相同，在歷經多個世代的適應值都相同，表示系統已達到收斂的狀況，已是該次基因演算法的最佳解。

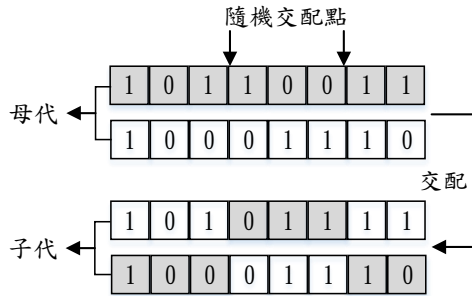


圖 1 雙點交配

## 2.2 目標函式

機組排程及其子問題經濟調度皆為最佳化之問題，主要目的在滿足所有限制式條件下，找出目標函數的極大值或極小值。使用基因演算法的目的為在滿足已知的負載條件下，尋找出發電機組在各個時段的使用時機以及最佳的發電量。為了符合經濟效益的目的，最優先考慮到的就是成本問題，已最低成本以及適當的安全性為前題下，排程出適當的機組運轉組合。本論文在計算的成本以兩種所構成，及發電成本(Generation cost)以及啟動成本(Start-Up cost)，其目標方程式如式(1)。

$$\text{Min } F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N U_i(t) [FC_i(P_i(t)) + S_i^{up}(1 - U_i(t-1))] \quad (1)$$

其中，

F：機組排程總運轉成本；

T：排程週期；

$FC_i(P_i(t))$ ：第  $i$  台機組在時段  $t$  的燃料成本函數；

$U_i(t)$ ：第  $i$  台機組在時段  $t$  的狀態；

$P_i(t)$ ：第  $i$  台機組在時段  $t$  的發電量；

$S_i^{up}$ ：第  $i$  台機組的起機成本；

火力發電機之成本函數可以用式(2)之二次方程式來表示：

$$FC_i(P_i(t)) = a_i + b_i P_i(t) + c_i P_i^2(t) \quad (2)$$

其中， $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  分別為機組的燃料成本係數。

## 2.3 限制條件

為了滿足系統能在最低成本的情況下還能維持整體的安全運轉，必須滿足一些限制條件，以下為本研究所考慮的限制條件：

### 2.3.1 發電發組發電量限制(Generation Limits)

一部發電機組有最大和最小出力容量限制，意即當一部發電機組上機時，必須達到其最小的發電量才能正常供電，且最多不得超過其最大的發電量；其方程式如(3)式所示。

$$U_i(t) \cdot P_i^{\min} \leq U_i(t) \cdot P_i(t) \leq U_i(t) \cdot P_i^{\max} \quad (3)$$

其中  $P_i^{\min}$ ：第  $i$  台機組的最小發電量

$P_i^{\max}$ ：第  $i$  台機組的最大發電量

### 2.3.2 電力系統供需平衡(Power System Balance)

為了維持電力系統的安全運轉，在任何時段之發電機組發電量應滿足該時段的總負載量、輸電線路損失；其方程式如(4)所示。

$$\sum_{i=1}^N U_i(t) \cdot P_i(t) = P_g(t) \quad (4)$$

其中， $P_g(t)$  為時段  $t$  的系統負載需求。

### 2.3.3 熱機備轉容量限制(Spinning Reserve)

為了防止電力系統因突發狀況或者無法預測之系統負載大幅變動而導致供電不足，除了負載所需的發電量外必須給予系統額外的發電容量以做為緊急調度之用，稱之為備轉容量，一般而言，大部分的考慮最低成本的備轉容量皆為總負載需求  $P_d(t)$  的 10% [2,3]，其方程式如(5)所示

$$\sum_{i=1}^N U_i(t) \cdot P_i^{\max}(t) \geq P_d(t) - P_R(t) + P_{SR}(t) \quad (5)$$

### 2.3.4 最小起機、停機時間(Minimum up, Down time)

由於火力發電機組因為其溫度和壓力變化緩慢的特性，在機組運轉時有其最小起機與停機時間，意思是當機組為運轉狀態下，必須持續多久時間才能停機，相反的，停機之後必須持續一段時間才能夠再次運轉[4]，其方程式如(6)、(7)所示。

$$X_i^{on}(t) \geq M_i^{on} \quad (6)$$

$$X_i^{off}(t) \geq M_i^{off} \quad (7)$$

其中， $X_i^{on}(t)$ ：第  $i$  台機組在時段  $t$  的連續起機時間；

$X_i^{off}(t)$ ：第  $i$  台機組在時段  $t$  的連續停機時間；

$M_i^{on}$ ：第  $i$  台機組最小起機時間；

$M_i^{off}$ ：第  $i$  台機組最小停機時間。

## 2.4 系統應用說明

進行機組排程總組合計算時，一開始必須取得每台機組的資料，表 1 為研究標的於未來 2025 年情況下預計運轉之 10 台柴油發電機組的系統參數資料，藉由演算法求得最低成本的機組排程結果。以成本係數所求出之成本尚須乘上一燃料單價成本才為真實所需花費，燃料單價成本會隨著不同的時空背景有不同價格，因研究標的之發電機組種類皆為柴油發電機，燃料單價成本為相同的單位，故在此將忽略不予計算。

表 3 至表 5 中所敘述之一期機組、二期機組、三期機組皆指表 1 中提及的柴油發電機組。

表 1 柴油發電機組系統模擬參數資料

機組名稱	柴油機容量(MVA)	最小發電量(MW)	最大發電量(MW)	成本係數(a)	成本係數(b)	成本係數(c)	起機成本	最小起機時間(h)	最小停機時間(h)
一期#1	10.2	4	7.7	15	1.9161	0.0661	7	4	2
一期#2	10.2	4	7.7	15	1.9161	0.0661	7	4	2
一期#3	10.2	4	7.7	15	1.9161	0.0661	7	4	2
一期#4	10.2	4	7.7	15	1.9161	0.0661	7	4	2
二期#1	9.7	4.1	7.8	13	1.8518	0.0657	7	3	2
二期#2	9.7	4.1	7.8	13	1.8518	0.0657	7	3	2
二期#3	9.7	4.1	7.8	13	1.8518	0.0657	7	3	2
二期#4	9.7	4.1	7.8	13	1.8518	0.0657	7	3	2
三期#1	13.8	5.5	10.5	12	1.7966	0.0615	10	5	3
三期#2	13.8	5.5	10.5	12	1.7966	0.0615	10	5	3

### III. 情境模擬與測試結果

#### 3.1 情境模擬

研究標的近年來因觀光業蓬勃發展致使用電量需求逐年增加，為了瞭解未來電力負載可能的成長方向，必須針對往年用電情況分析並預測負載量，以藉此規畫配電系統或者發電機組的建設，達到電力穩定供應之目標。本論文使用最小平方方法(Least square)計算公式求得未來研究標的的負載預測值，圖 2 為負載預測程序圖，主要是利用研究標的歷史統計資料套入公式(8)與(9)求出成長率 a，接著再套入公式(7)，計算求得研究標的之未來負載量。

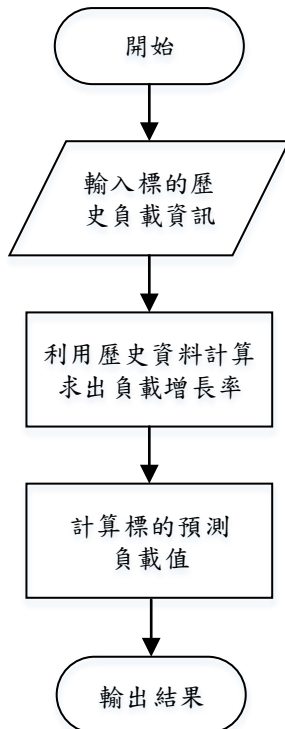


圖 2 長期負載預測流程圖

運用上述所介紹之流程將春、夏、秋、冬四個季節之年平均尖峰負載作為標的歷史負載資訊，預測各季節於未來的負載值，得以下列計算公式推算：

$$Y_n = (1+a)^n Y \quad (7)$$

其中  $Y_n$ ：負載預測計算值(第 n 年度)

$a$ ：負載年增長率

$n$ ：欲預測之年度

$Y$ ：基準負載值

負載年成長率之計算：

$$\text{Log}(1+a) = \frac{\sum_{i=1}^T (n_i - n_a)(y_i - y_a)}{\sum_{i=1}^T (n_i - n_a)^2} \quad (8)$$

$$\text{令 } Q = \frac{\sum_{i=1}^T (n_i - n_a)(y_i - y_a)}{\sum_{i=1}^T (n_i - n_a)^2}$$

$$a = \exp(Q) - 1 \quad (9)$$

由(9)式可以求得負載年增長率，其中：

$n_a$ ：為歷史負載之平均值

$y_a$ ：為年份數值之平均值

圖 3 為長期負載成長預測曲線圖，利用前述所介紹的編碼方式，實際套用到研究標的系統當中，圖中由上而下分別是夏、秋、春、冬四個季節之預測成長曲線，利用這些曲線所推斷出之 2025 年各季節平均尖峰負載，將其進行標么化並套用代入各季節之日負載曲線，並分別考慮再生能源滲透率達 10%、20% 及 30% 之情境，本論文計算再生能源滲透率之方法為依據加州獨立電力調度中心(California ISO)發布之再生能源觀察報告[5]，利用一日當中之尖峰負載與再生能源發電量尖峰時刻之值作為比較，以此考慮系統在不同的季節以及不同的再生能源發電量占比的機組排程策略，藉由模擬數據間的抵換關係，可提供電力公司在

不同需求下的決策，另一方面，也可經由此機組排程策略分析當再生能源發展規模擴大的情況下，對系統供電可靠性的影響。

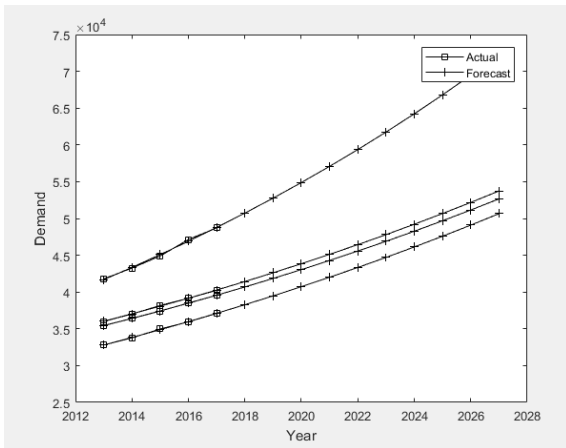


圖 3 長期負載成長預測曲線圖(單位:MW)

### 3.2 冬季模擬情境

冬季模擬情境如圖 4 所示，負載需求由 23.6 MW 至 42.9 MW 之間變化，第一個小時的發電機是由第一小時負載量決定開幾台發電機，且每台最低發電量為半載，低於半載則不開，表 3 為 10%再生能源滲透機組排程表，基因演算法所規劃開啟台數為凌晨時段的三台，早上至下午的五台至晚上的六台，備轉容量平均為 9.02 MW。表 4 為 20%再生能源滲透機組排程表，基因演算法所規劃台數於 12 點至 15 點間少開一台二期機組，備轉容量平均為 8.5 MW。表 5 為 30%再生能源滲透機組排程表，基因演算法所規劃開啟台數與 20%滲透率時相比於 11 點、16 點間同樣少開一台機組，備轉容量平均分別為 14.87 MW 與 9.32 MW。

表 2 冬季模擬情境能源組成表

單位(MW)		10%再生能源滲透率		20%再生能源滲透率		30%再生能源滲透率		
小時	負載需求	風力發電量	太陽能發電量	機組發電需求	太陽能發電量	機組發電需求	太陽能發電量	機組發電需求
Hour1	31.3	2.8	0.0	28.5	0.0	28.5	0.0	28.5
Hour2	27.3	3.0	0.0	24.3	0.0	24.3	0.0	24.3
Hour3	24.9	2.6	0.0	22.3	0.0	22.3	0.0	22.3
Hour4	23.9	3.5	0.0	20.4	0.0	20.4	0.0	20.4
Hour5	23.7	3.5	0.0	20.1	0.0	20.1	0.0	20.1
Hour6	24.7	3.1	0.0	21.6	0.0	21.6	0.0	21.6
Hour7	27.5	3.1	0.0	24.4	0.0	24.4	0.0	24.4
Hour8	29.7	2.9	0.0	26.8	0.0	26.8	0.0	26.8
Hour9	31.3	3.5	0.6	27.2	1.3	26.5	1.9	25.9
Hour10	32.0	3.0	1.1	27.9	2.2	26.8	3.3	25.7
Hour11	32.5	2.7	2.2	27.6	4.4	25.4	6.6	23.2
Hour12	32.6	3.4	3.0	26.2	6.0	23.2	9.0	20.2
Hour13	32.9	3.0	3.5	26.4	7.0	22.9	10.4	19.4
Hour14	31.9	2.8	3.0	26.0	6.0	23.1	8.9	20.1
Hour15	31.7	3.0	2.1	26.6	4.1	24.6	6.2	22.5
Hour16	31.9	2.7	1.8	27.4	3.6	25.7	5.4	23.9
Hour17	34.3	2.7	1.4	30.1	2.9	28.7	4.3	27.2
Hour18	38.5	3.5	0.7	34.2	1.5	33.5	2.2	32.7
Hour19	42.1	3.6	0.3	38.3	0.5	38.0	0.8	37.8
Hour20	41.6	3.2	0.0	38.5	0.0	38.5	0.0	38.5
Hour21	42.6	2.7	0.0	40.0	0.0	40.0	0.0	40.0
Hour22	43.0	2.8	0.0	40.2	0.0	40.2	0.0	40.2
Hour23	40.7	3.0	0.0	37.8	0.0	37.8	0.0	37.8
Hour24	36.1	3.4	0.0	32.7	0.0	32.7	0.0	32.7



Hour14	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	76.3
Hour15	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	82.5
Hour16	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	86.0
Hour17	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	105.6
Hour18	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	120.2
Hour19	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	144.1
Hour20	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	146.4
Hour21	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	150.2
Hour22	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	151.4
Hour23	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	144.1
Hour24	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	120.2

#### IV. 結論

電力調度人員必須妥善地運用系統中的發電機組來滿足負載變動的需求，以確保電力系統能夠在安全的考量下更有效率的運轉。本文針對最低成本進行機組排程，最低成本方法為在滿足電力供需平衡、備轉容量、機組最小上下線時間等限制條件下，進而求出再生能源高滲透率情況下之最低發電成本的機組調派組合。本文提出從能源預測至機組排程此一控制策略，期能在適當的情況下，給予電廠規劃調度人員參考使用。

#### 誌謝

本研究承蒙科技部計畫編號：MOST 107-3113-E-042A-004-CC2 之經費補助研究計畫之經費補助，特此感謝。

#### 參考文獻

- [1] Electrical Generation Unit Commitment Planning, Application survey© LINDO Systems, August 2008.
- [2] 陳維德，「應用免疫演算法最佳化火力機組調派」，碩士論文，國立台北科技大學電機工程系，民國九十七年。
- [3] Senjyu, T., H. Yamashiro, K. Uezato and T. Funabashi. "A unit commitment problem by using genetic algorithm based on unit characteristic classification," IEEE/Power Eng. Soc. Winter Meeting, Vol. 1, pp58-63, Jan.2002.
- [4] Jeong-Do Park, Hyun-Jong Kook, Young-Hyun Moon, Chul-Gyun Shin, "Unit Commitment Algorithm Considering the Effects of Economic Dispatch", IEEE/Power Eng. Soc. Winter Meeting, Conference Proceedings, Jan.2000.
- [5] California ISO. "RENEWABLES WATCH", May 13. 2017