

電力合約市場下之競標與最佳調度資訊系統

黃琮暉 黃仲麒 楊智評 蕭英男

遠東科技大學自動化控制學系

744 台南縣新市鄉中華路 49 號

摘要

近年來綠能環保相關議題受到社會大眾之重視，石油危機的崛起，發電廠之燃料成本節節上升下，各先進國家為求降低供電成本、提高電力品質及提昇整體產業生產力，均積極推動電力自由化。此外，更修改傳統 OPF 之目標函數為「社會福利」最大化，為電業市場造就更多的商機，達到買賣方雙贏的局面。最後，本文提出在自由化的競爭市場中，建立一套人性化、操作容易且可處理大量標單的投標環境，提供發電業和配電業雙方一個公平、公開、公正之競標系統。

關鍵詞：電力自由化，社會福利，最佳化電力潮流，競標

Optimal Dispatch and Bidding Information Systems for the Power Contracting Market

CONG-HUI HUANG, CHUNG-CHI HUANG, ZHI-PING YANG and YING-NAN XIAO

Department of Automation and Control Engineering, Far East University

No.49, Chung Hua Rd., Hsin-Shih, Tainan County 744, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

In recent years, environmental issues related to green energy have received much emphasis in the international community. Because of the oil crisis, fuel costs of power plants have increased. In order to actively promote the deregulation of electricity supply to achieve lower costs, all advanced countries have improved power quality and overall industry productivity. In addition, the objective function of traditional optimal power flow has been amended to become part of "social welfare" thus maximizing the market for the electricity industry. This creates more business opportunities achieving a win-win situation for buyers and sellers. This paper proposes the liberalization of market competition in order to establish a standard single-bid environment that is human-based, easy to operate and that can handle a large number of bids, providing an open and fair system of competitive bidding for both the power generation and distribution industries.

Key Words: power deregulation, social welfare, optimal power flow, competitive bidding

一、前言

近年來台灣由於環保意識的抬頭、新建電廠土地的不易取得、夏季用電尖峰時段備載容量的不足造成限停電現象、及南電北送輸電失衡...等問題,使得電力事業的發展似已遇瓶頸。因此政府與台電正積極的於電力供需面上推動多項措施以紓解困境:例如加強宣導用戶節約能源、鼓勵民間汽電共生廠的興建、加強能源開發、努力延長機組使用年限、加強能源開發、及開放民營獨立電廠的申請。另一方面,為加強效率鼓勵自由競爭以抑制電價,政府亦正逐步推動電力事業及自由化等等。

在電力事業方面,開放民營電廠為電力自由化之第一步。經濟部為落實電業自由化政策、創造自由競爭環境、提升電業經營績效並促進電力穩定供應,自民國 84 年起辦理開放民營電廠作業,兩階段共計核准 11 家業者籌設電廠,總裝置容量達 1,030 萬瓩。汽電共生廠方面,目前國內汽電共生廠商已有 46 家,總發電量高達 373 萬瓩,其中有 165 萬瓩的電力提供給台電。台電公司也將在民營化的階段中,將目前垂直整合的發電、輸電、配電一體的架構,逐步的將某些部分獨立出來,成為一種屬於水平分割的經營模式。

世界各國在電力自由化的發展中已有不少的經驗可供借鏡。如英國、澳洲等正欲實施自由化或已實施中的國家,都曾遭遇相當多的問題,因此若能適當的提出一些相關的研究,將可做為我國實施自由化的參考,不過電力自由化的問題相當繁雜,我們只將重點著重於電力池模式中電力交易所 (power exchange, PX) 與獨立系統操作者 (independent system operator, ISO) 撮合競標標單與加入輔助服務以維持系統穩定的探討,並且以牛頓演算法 (Newton method) 結合順序二次規劃法 (sequential quadratic programming, SQP) 為最佳化問題的求解工具,此法常使用於組合最佳化問題的研究 (如電力系統的發電排程,經濟調度等),其他有關於系統調度與運轉更深入的相關問題將留待將來繼續研究。

二、自由化市場之趨勢

電業自由化環境下,傳統上按照各機組的發電成本高低來依序調度 (cost-based operation) 的供電方式,演變為以電力市場買賣雙方透過「競價機制」(competitive bidding mechanism),並以投標價格 (bid price) 高低為調度順序的操作方式,至系統需求滿足為止 [5]。隨著電業自由化之階段演變,電力產業架構會逐漸改變,電力市場根據國情、地

域與環境的不同,陸續可能會有各種新的參與者或不同角色的加入 [1],如圖 1 所示。

傳統上按照各機組的發電成本高低來依序調度的供電方式,將改以投標價格高低為調度順序的操作方式,至系統需求滿足為止,標價太高則無權加入系統發電。圖 2 之簡例為綜合所有現貨市場,供電方 (GenCos) 與需求方 (DisCos) 的標單而成的累積競標曲線,經由 ISO 進行競標的撮和與排程之後,可得到初步的市場現貨價格和電力調度結果,其中,市場結清價格曲線和供給端之累積競標曲線兩條曲線所圍成之面積即為參與成員的盈餘,亦即利潤 (或稱社會福利)。

以 PX 的角色而言,在所謂前一天 (或前一小時) 的競價排程中, PX 將會在規定的時限內接受市場供給端 (supply-side) 與需求端 (demand-side) 成員的標單 (bids),然後經過 PX 綜合所有供給端與需求端的標單而成為累積

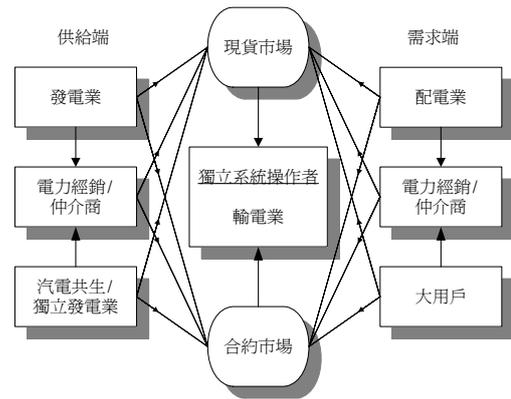


圖 1. 新電力市場的架構

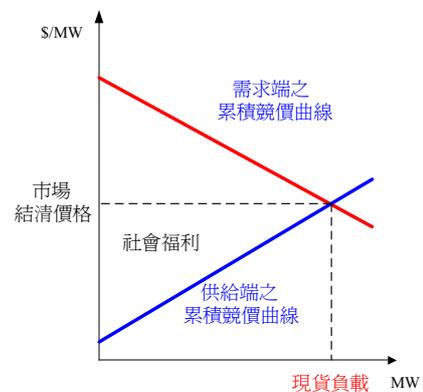


圖 2. 供電/需求方累積競標曲線之簡例

競價曲線。其中，「社會福利」(social welfare) 為市場所有參與成員的利益。PX 及 ISO 可能以最大化「社會福利」的目標來進行標價的撮合與「資源排程」。之後，可得到市場結清價格(或稱現貨價格)和電力調度結果 [12]。

在自由化之市場解制與競爭機能的經營環境下，不僅為電力市場創造更多的商機，在價格與服務品質競爭的多元化下，也連帶讓各市場參與者彼此間存在著更多的商業競爭，並帶動能源生產及消費品質提昇，促使自由化之電業市場更加活絡。各參與者為了爭奪電力市場大餅，經營方式由監控營運轉為利潤導向與顧客導向的電業市場，以達到供給者與消費者雙贏的局面 [2]。簡而言之，電力自由化之意義在於政府解除部分管制，創造自由競爭環境，並允許電力用戶可自由選擇購電對象。而電力自由化之目的，則在於提升電業經營績效，保障用戶權益 [4]。

(一) 世界電力市場自由化之演變

自由化的演變必須根據各國的狀況及實際需要而設計，許多歐美先進國家民營化及自由化的發展與經驗，將可作為我們的借鏡。本節將以英國、澳洲及其他國家的自由化發展為例，介紹各新進國家的電力事業演進過程，其次分析台灣目前的狀況及需求，進而研擬適合台灣的演進過程，和提出在此轉型過程中我們所將遭遇的問題和挑戰。

1. 英國

英國(英格蘭及威爾斯)自 1989 年以來，陸續進行電業自由化，目前發電與售電兩部門已經開放自由競爭，輸電與配電業則仍維持管制型態。發電業(包括核能發電廠)均已完成民營化，主要有 4 家，另有 22 家獨立發電廠。輸電業則僅有 1 家，名為全國輸電網路公司(National Grid Company, NGC)，擁有輸電網路並負責電力交易、調度及負載預測，亦即所謂「電力池」(power pool)。

英國的電力交易架構是以強制電力池為核心。所有發電廠的能量標準均以每天一定時間前投入電力池中，地區性電力公司亦將所需的電力告知電力池，然後由電力池於規定時間進行撮合的工作。電力池的運作如同一現貨市場，運作方式以每半小時為一單位將一天區分為 48 個區段。

2. 澳洲

澳洲在解制之前各州沒有相互的連結，而且每州也是由一家獨立的電力公司負責。澳洲電力事業區分為東澳洲和西澳洲兩部分，其中西澳洲的電力事業大都是垂直整合的國營事業。澳洲電力事業解制的第一步是將輸電部門完全獨立出

來，故於 1991 年 7 月成立國家電網委員會(National Grid Management Council, NGMC)，其職責為全澳洲輸電系統的運作、協調地方與中央的紛爭。東澳洲電力事業的改革較快，例如維多利亞省(Victoria)在 1993 年電業進行水平分割，由維多利亞州發電公司負責發電的一切事宜，其發電公司也允許民營獨立電廠(IPP)的加入，並在未來轉換經營方式，以便與 IPP 公平競爭。輸電方面由國家電力公司(National Electricity)負責輸電事宜，但仍然為一獨佔事業。配電方面由將州政府電力服務公司(Electricity Services Victoria)分割成多家經營，這些配電公司將受州政府電力管理委員會(The State Electricity Commission of Victoria)監督，同時也鼓勵汽電共生的加入。

3. 其他國家

除上述國家外，中南美洲國家如墨西哥、智利、阿根廷、委內瑞拉及哥倫比亞仍在發展中，電力產業規模亦小，而亞洲各國，由於經濟成長快速，供電量不足已成為許多國家經濟發展上的困擾，其電業自由化之經驗皆稍嫌不足。雖然各國在電業發展的方向上稍有不同，但在電業自由化的潮流下，重新檢討傳統垂直整合電業的經營型態，則是一致的趨勢。

(二) 台灣電力市場自由化之建議

以台灣電力公司獨佔電力市場之情況，伴隨著電業法的修正，國內電力經營僅開放發電業者之建廠和供電，對於輸電、配電和售電業短期內均無大幅度之變更，且電業法修正草案亦明文禁止電業經營者有交叉補貼之行爲，並規定修法後應成立獨立、超然的「電力調度中心」，避免台電控制電網的運作，基本上與其他國家自由化之大方向相近。

我國自由化尚未開始，而其他國家已行之有年，無論成功或失敗，其經驗都值得我國參考，做為未來電力市場藍圖規劃之借鏡。「錯誤的不是市場機制，而是鬆綁的政策及市場規則」，電業自由化的最終目的在確保供電穩定性的原則下追求「競爭」及「效率」提升，如何藉由市場規則來達成，值得我國相關單位深思。

三、競標系統規劃

本文之電力交易市場參考挪威之雙邊競標模式，發展出「累積合成曲線法」之撮合方式；參考紐西蘭之電力交易市場，發展出「競標曲線高低配法」之撮合方式。

(一) 累積合成曲線

本節考量供給端和需求端競標的電力市場，標單設計如同加州電力市場 [8, 11, 14]，且參考挪威電力市場 [9] 的情形，發展出「累積合成曲線法」之撮合方式。假設雙邊的標單經由 PX 撮合，同時，也將最後得標發電業的標單，定義為系統邊際價格即市場結清價格，其電力市場架構圖如圖 3 所示。

已知現貨市場中有數家發電業及數家配電業，其中發電業 i 提出予 ISO 之競標曲線為

$$\lambda_i = a_i \cdot s_i + b_i \quad (1)$$

其中 λ_i 為發電業 i 的供給函數， a_i, b_i 為發電業 i 供給函數的斜率及截距， s_i 為發電業 i 之發電量大小，其他第 k 家發電業所提出之競標曲線則為

$$\lambda_k = a_k \cdot s_k + b_k, \quad k \neq i, k = 1, \dots, K \quad (2)$$

而配電業 j 提出予 ISO 之競標曲線為

$$\lambda_j = a_j \cdot s_j + b_j \quad (3)$$

其中 λ_j 為配電業 j 的需求函數， a_j, b_j 為發電業 j 需求函數的斜率及截距， s_j 為配電業 j 之需求量大小，其他第 m 家配電

業所提出之競標曲線則為

$$\lambda_m = a_m \cdot s_m + b_m, \quad m \neq j, m = 1, \dots, M \quad (4)$$

如同 Grainger 與 Stevenson [7] 所推導，我們可以個別累積合成所有供給端和需求端的競爭曲線，如

$$\lambda_T = e \cdot s_T + f \quad \lambda_d = g \cdot s_d + h \quad (5)$$

式中

$$g = \left(\frac{1}{a_j} + \sum_{m \neq j} \frac{1}{a_m} \right)^{-1} \quad e = \left(\frac{1}{a_i} + \sum_{k \neq i} \frac{1}{a_k} \right)^{-1} \quad (6)$$

$$f = e \cdot \left(\frac{b_i}{a_i} + \sum_{k \neq i} \frac{b_k}{a_k} \right) \quad h = g \cdot \left(\frac{b_j}{a_j} + \sum_{m \neq j} \frac{b_m}{a_m} \right) \quad (7)$$

其中

e, f : 累積供給曲線的斜率及截距；

g, h : 累積需求曲線的斜率及截距；

λ_T : 發電業之累積供給曲線；

λ_d : 配電業之累積需求曲線。

ISO 為了得到最大化之「社會福利」，本節所採用的累積需求函數為線性遞增函數，而累積需求曲線則為線性遞減函數。已知式 (5)，當忽略傳輸線之潮流限制及損失時，ISO 求解

$$\lambda_i = \lambda_j = \lambda_T = \lambda_d = \lambda_M \quad (8)$$

限制條件為

$$\frac{\lambda_i - b_i}{a_i} + \sum_{k \neq i} \frac{\lambda_k - b_k}{a_k} = \frac{\lambda_j - b_j}{a_j} + \sum_{m \neq j} \frac{\lambda_m - b_m}{a_m} \quad (9)$$

$$\because s_i + \sum_{k \neq i} s_k = s_j + \sum_{m \neq j} s_m$$

替代式 (8)，代入式 (9)，我們可以獲得市場結清價格 λ_M 如同下式

$$\lambda_M = \frac{\left(\frac{b_i}{a_i} + \sum_{k \neq i} \frac{b_k}{a_k} \right) - \left(\frac{b_j}{a_j} + \sum_{m \neq j} \frac{b_m}{a_m} \right)}{\left(\frac{1}{a_i} + \sum_{k \neq i} \frac{1}{a_k} \right) - \left(\frac{1}{a_j} + \sum_{m \neq j} \frac{1}{a_m} \right)} \quad (10)$$

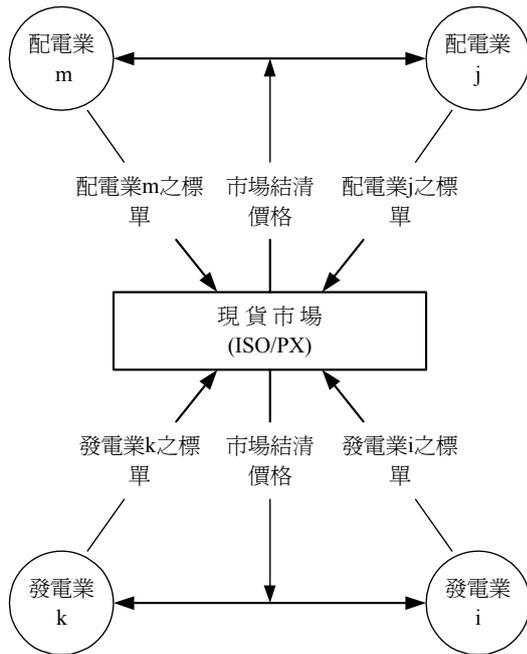


圖 3. 電力市場架構

其中

d ：現貨負載之大小

λ_M ：市場結清價格

爲了簡化之緣故，假設其他發電業累積合成爲發電業 k 、其他配電業累積合成爲配電業 m ，如圖 4 所示。一般而言，兩條累積合成曲線必有一個交叉點，其交叉點之 X 軸座標爲成交量 (MW)，其交叉點之 Y 軸座標爲市場結清價格 ($\$/MWh$)。

(二) 競標曲線高低配

參考紐西蘭電力交易所之撮合方式，現貨交易由電力交易所負責撮合買賣雙方間之交易，其價格完全由市場競爭後決定，屬於市場價格的機制。電力買賣的業者可在任一家電力經紀商投標 (或稱下單)，經電力交易所匹配成功後，並由 ISO 確認為安全的一筆交易，再由電力經紀商幫助發電方及配電方簽訂購售電合約，並與代輸單位 (或爲輸電公司) 簽定代輸合約，建立起賣方與買方之間之交易計畫。電力交易所與電力市場參與者之間的關係如圖 3 所示。

於競標過程中，我們未考慮價格以外的因素，即單純的現貨市場競標。電力交易所扮演撮合買賣的角色。買賣方經過審慎的評估之後，提出自己的價格與電量。發電業送出可輸出電力之數量及其欲出售價格，構成電力供給曲線，配電業送出電力需求之數量及願意購買之價格，構成電力需求曲線，最後電力交易所負責撮合買賣雙方之競標標單，其作法係將電力供給曲線依競標價格高低作遞升排列，將電力需求曲線作遞降排列，如圖 5。撮合方式通常以賣價最低與買價最高的雙方優先得標，其次再撮合其餘的對象，直到滿足系統供需平衡爲止，最後一家得標發電業之競標價格定義爲

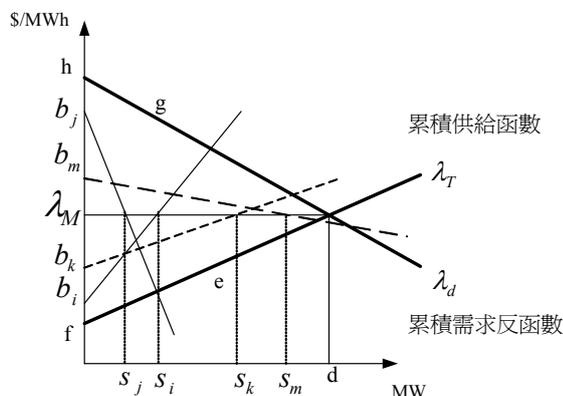


圖 4. 競標撮合曲線

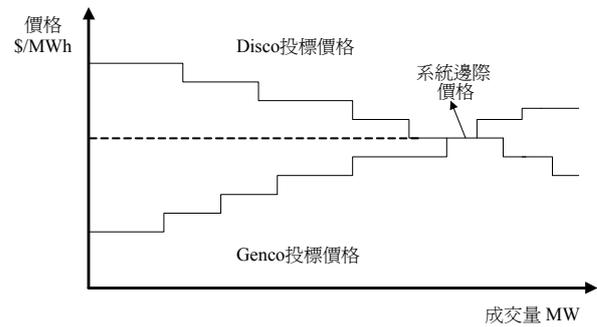


圖 5. 電力供給及需求曲線

「系統邊際價格」，之後將結果送交獨立系統操作者作系統安全度的分析。

電力交易所第一階段決標的考量爲價格的最佳化配比，並未考量電力買賣的規劃是否造成輸電網路的不穩定性與線路的擁擠現象，因此第一階段經濟考量的決標結果必須送給獨立系統操作者進行確認，若有違反穩定度考量則退回原決標結果，再次進行此時段之競標。

四、最佳化電力潮流

最大化之最佳化電力潮流程式 (optimal power flow, OPF)，在電力池交易模式中，應用於市場參與成員投標至電力交易所之決標標單造成系統壅塞時，ISO 退回該時段之標單，通知各成員進行該時段新一次之競標，並公佈最佳競標標單供參與成員參考。此 OPF 不僅具有負載潮流的能力，並且能將傳輸線路的效應表示於含限制式的最佳化問題當中。一個實用 OPF 的程式，不僅能夠找到「期望運轉點」的有效工具，更能正確地了解在追求利潤最大化的自由化環境下系統的狀態，且經由對偶變數，可隨之求得節點現貨價格；經由原始變數，可以得知電力實功、虛功電力調度的結果 [10, 15]。另外，OPF 已逐漸爲能源管理系統 (energy management system, EMS) 中線上電力調度 (on-line dispatch) 所實際採用，其發展出的閉路 (close-loop) 實虛功控制已經是有些先進之電力公司用來解決傳統電力系統上電力過載 (overload)，與電壓違反限制 (violation) 等問題的重要工具。

參考紐西蘭電力市場之情形，若 PX 之決標標單未造成系統壅塞，則系統依據此決標標單運作；若標單造成系統壅塞，本節假設 ISO 退回該時段之競標標單，並通知市場參與成員重新進行該時段之競標，且 ISO 公佈最佳標單供成

員參考。基於上述因素，本節研發出目標函數為「社會福利」最大化之最佳化電力潮流，經由求解此 OPF 可得各參與成員競標之最佳容量及市場節點價格，以供參與成員進行新一次競標之參考。

因傳統 OPF (目標函數為發電成本最小化) 僅考慮市場中供給端的費用，為了在市場模型中加入消費者函數，消費者利益的觀念必定要先介紹。消費者利益代表消費者經由使用一個產品而得到的價值，消費者利益可用數學表示式定義為 $B(d)$ 。它和供給者成本函數類似，但它是一個負數值。一旦消費者利益定義後，社會福利被定義為消費者利益總量減去供應者成本總量 $B(d)-C(s)$ [13]。

為了在電力系統交易中得到社會福利最大化，只需修正傳統 OPF 的目標函數，使其包含一個消費者利益函數 $B(d)$ 。這個函數建立了消費者使用實功和虛功所得到的利益。

$$\max_{s, x} B(d) - C(s)$$

s.t.

$$h(x, s, d) = \begin{bmatrix} \hat{h}(x) - \hat{s} + \hat{d} \\ \bar{h}(x) \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

$$g(x, s, d) = \begin{bmatrix} s_{\min} - s \\ s - s_{\max} \\ d - d_{\max} \\ \bar{g}(x) \end{bmatrix} \leq 0$$

為了解決上述這個問題，其 Lagrange 函數如下所示

$$L = B(d) - C(s) + \lambda_h^T h(x, s, d) + \lambda_g^T g(x, s, d)$$

$$= \left(\begin{array}{l} B(d) - C(s) + \lambda_h^T [\hat{h}(x) - \hat{s} + \hat{d}] + \lambda_h^T [\bar{h}(x)] \\ + \lambda_{gs\min}^T [s_{\min} - s] + \lambda_{gs\max}^T [s - s_{\max}] \\ + \lambda_{gd\min}^T [d_{\min} - d] + \lambda_{gd\max}^T [d - d_{\max}] + \lambda_g^T \bar{g}(x) \end{array} \right) \quad (12)$$

最大化的問題可以由 KKT 決定必要的條件來解決

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \lambda_h^T \frac{\partial h(x, s, d)}{\partial x} + \lambda_g^T \frac{\partial g(x, s, d)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial s} = -\frac{\partial C(s)}{\partial s} - \tilde{\lambda}_{hs} - \lambda_{gs\min} + \lambda_{gs\max} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial d} = \frac{\partial B(d)}{\partial d} + \tilde{\lambda}_{hd} - \lambda_{gd\min} + \lambda_{gd\max} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_h} = h(x, s, d) = 0$$

$$\lambda_g^T g(x, s, d) = 0$$

$$g(x, s, d) \leq 0$$

$$\lambda_g \geq 0$$

(13)

其中

x = 敘述變數和其他控制

$$s = \begin{bmatrix} s_p^T & s_q^T \end{bmatrix}^T = \text{供給者函數向量 (包含實功、虛功);}$$

$$d = \begin{bmatrix} d_p^T & d_q^T \end{bmatrix}^T = \text{消費者函數向量 (包含實功、虛功);}$$

$$\hat{s} = \begin{bmatrix} \hat{s}_p^T & \hat{s}_q^T \end{bmatrix}^T = \text{供給者不存在時, 供給者之擴充向量;}$$

$$\hat{d} = \begin{bmatrix} \hat{d}_p^T & \hat{d}_q^T \end{bmatrix}^T = \text{消費者不存在時, 消費者之擴充向量;}$$

$$C(s) = C(s_p, s_q) = \sum_s C_k(s_p, s_q) = \text{供給者成本函數}$$

$$B(d) = B(d_p, d_q) = \sum_d B_k(d_p, d_q) = \text{消費者利益函數}$$

$$h(x, s, d) = \begin{bmatrix} \hat{h}(x) - \hat{s} + \hat{d} \\ \bar{h}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_p(x, s_p, d_p) \\ h_q(x, s_q, d_q) \\ \bar{h}(x) \end{bmatrix} = \text{等式限制式}$$

$$h_p(x, s_p, d_p) = \hat{h}_p(x) - \hat{s}_p + \hat{d}_p = \text{實功潮流方程式}$$

$$h_q(x, s_q, d_q) = \hat{h}_q(x) - \hat{s}_q + \hat{d}_q = \text{虛功潮流方程式}$$

$$g(x, s, d) = \begin{bmatrix} s_{\min} - s \\ s - s_{\max} \\ d_{\min} - d \\ d - d_{\max} \\ \bar{g}(x) \end{bmatrix} = \text{不等式限制式}$$

L, \bar{L} = Lagrange 函數

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_h^T & \lambda_g^T \end{bmatrix}^T = \text{Lagrange 乘數向量}$$

$$\lambda_h = \begin{bmatrix} \lambda_h^T & \lambda_h^T \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \lambda_{hp}^T & \lambda_{hq}^T & \lambda_{\bar{h}}^T \end{bmatrix}^T = \text{電力潮流方程式和}$$

其他方程式限制式的 Lagrange 乘數

$$\lambda_g = \begin{bmatrix} \lambda_{gs\min}^T & \lambda_{gs\max}^T & \lambda_{gd\min}^T & \lambda_{gd\max}^T & \lambda_{\bar{g}}^T \end{bmatrix}^T = \text{不等式限制式的 Lagrange 乘數}$$

$$p = \begin{bmatrix} p_s^T & \vdots & p_d^T \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} p_{sp}^T & p_{sq}^T & \vdots & p_{dp}^T & p_{dq}^T \end{bmatrix}^T = \text{供給者和消費者的價格向量}$$

$$D(p) = \frac{\partial B(d)}{\partial d} \text{ 的逆轉換函數}$$

$S(p) = \frac{\partial C(s)}{\partial s}$ 的逆轉換函數

式 (13) 的解答將可滿足電力市場中社會福利最大化之目標。本論文中採用牛頓法來求解 OPF 的各種目標函數。Lagrange 乘數由最佳化電力潮流提供有關電力系統中重要經濟資料的解而決定，它可被定義為遵守各限制之目標函數的微分。所以執行 OPF 中電力潮流方程式所得之 Lagrange 組合，為提供能量服務到電力系統匯流排的邊際成本。這就是發展節點價格定律的核心，也是允許使用 OPF 在電力池中設計的要素 [6]。

如圖 6 所示，各參與成員之競標均需透過電力池來交易，將電力容量及其價格下單至電力池操作員中。下一節將展示直接代表供應商邊際成本曲線的標單，當系統壅塞時，電力池操作員假設傳送的標單是直接關係到供應商的真實邊際成本曲線 [3]，且為了決定系統中各供應商之標單和各節點的價格，需求解最大化社會福利之 OPF。

基於上述觀念提出了電力市場由供應商傳送線性標單曲線而構成，如圖 7 所示。每個供應商傳送它們要售出備轉容量的最低價格 P_{\min} 和其伴隨著線性曲線之斜率 m_s 。利用這些標單，電力池操作員(如電力交易所或獨立系統操作者)

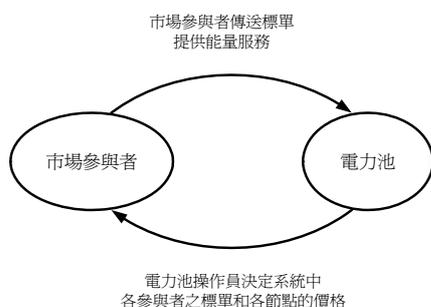


圖 6. 電力池資訊潮流

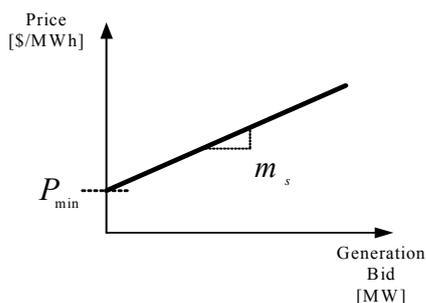


圖 7. 線性價格相依之供應者標單

在假設參與者是傳送它們真實邊際價格下，求解 OPF。接受處理標單的數量根據 OPF 的答案而決定。

本文在競標撮合方法上提出的兩種方法(競標曲線高低配、累積合成曲線)，可適用於多種電力池交易市場模式(如紐西蘭、挪威、美國 PJM 及加州...等市場)。在最佳化電力潮流上，提出應用牛頓法，在自由化下提供系統競標最佳標單，解決決標標單造成系統壅塞之問題。其問題模式係將競標標單結合於自由化之議題中，而僅須稍加修改傳統交流最佳化電力潮流之描述，以「社會福利」最大化為目標，並從中獲得以競價為基礎的最佳電力調度和節點現貨價格之結果。同時，測試結果也建議市場參與者決定本身最佳的標單，以滿足系統之供需平衡。本章節提供的求解方法，將能給予 ISO 在面對此新的電業環境時，一個有效的決策支援。

五、系統測試與討論

於本章節所要描述的是將第二章至第四章所闡述的問題，透過範例測試來加以說明並分析其結果。所提出之方法已由 MATLAB 撰寫成程式，並於個人電腦 PC PENTIUM 4 上執行成功。範例一是競標價格高低配和累積合成曲線之比較，範例二是現貨交易之最佳化電力潮流問題，其測試範例均以 IEEE 30 Bus [13] 為計算資料，其架構如圖 8 所示。

由圖 8 所示的 30 Bus 系統中，此系統共有 26 個參與成員，其中包括 6 家發電業 (GenCo1, GenCo2, ..., GenCo6) 和 20 家配電業 (DisCo1, DisCo2, ..., DisCo20) 參與市場投標，並有 41 條傳輸線連接此 26 個參與成員。發電業者送出競標價格與競標容量之標單以提供市場需求，假設其競標資

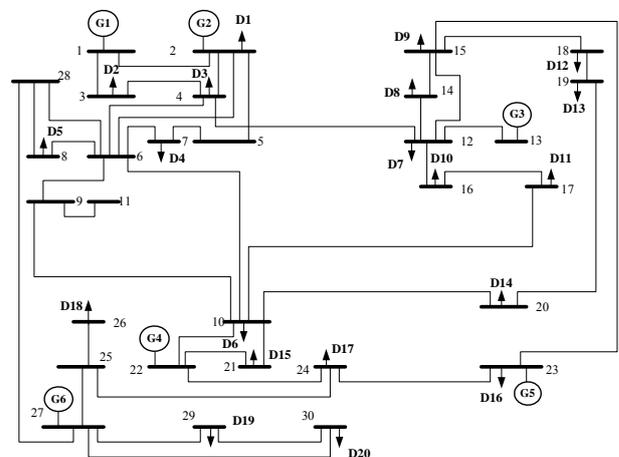


圖 8. IEEE 30 Bus 系統圖

料如表 1 所示。而配電業者送出競標價格與競標容量之標單以滿足各自需求，其競標資料如表 2 所示。電力交易所依據發電業與配電業之競標標單進行撮合以達到市場之供需平衡，其標單撮合方式於本文中利用 (1) 競標價格高低配法和 (2) 累積合成曲線法來完成市場競標。

(一) 範例一：競標價格高低配和累積合成曲線之比較

1. 競標價格高低配法

競標價格高低配顧名思義是將參與成員之標單依價格高低進行匹配，將各發電業之競標標單依價格高低由低至高作升幕排列，構成一梯形供給遞增累積曲線，將各配電業之競標價格由高至低作降幕排列，構成一梯形需求遞減累積曲線。電力交易所將供給累積曲線和需求累積曲線作匹配撮合，發電業由競標價格最低者優先得標，由低至高撮合，配電業則由競標價格最高者優先得標，由高至低撮合，直到供給曲線和需求曲線交於一點為止。其執行撮合高低配結果如圖 9 所示。

由圖 9 所示，可知供給累積曲線和需求累積曲線撮合後會得到一交點，此交點左方的參與成員均得標，交點右方之參與成員則未得標。由此交點垂直對應到 X 軸，可得到一市場結清容量，而最後一家得標發電業之競標價格稱之為市場結清價格。所有配電業均依據市場結清價格付費，發電業

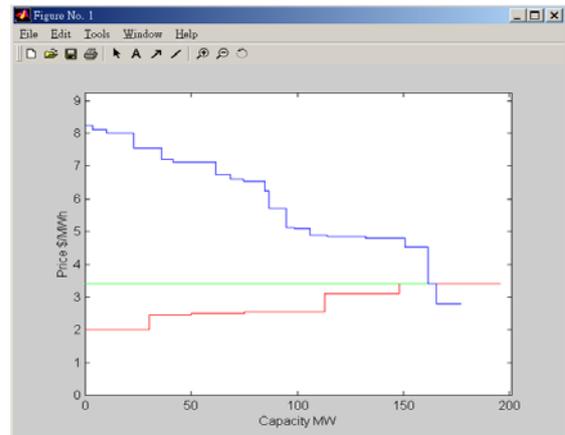


圖 9. 競標價格高低配撮合圖

則依據標單之競標價格售出電力。發電業之撮合結果如表 3 所示，配電業之結果如表 4 所示，交易市場利益如表 5 所示。其中，「購電總金額」之定義為此競標時段所有配電業應付金額總和，計算方式為：(購電總金額) = \sum (結清價格) \times (結清容量)；「售電總金額」定義為所有發電業之售出金額總和，計算方式為：(售電總金額) = \sum (得標價格) \times (得標容量)；「社會福利」定義為此交易時段之市場利益，計算方式為：(社會福利) = (購電總金額) - (售電總金額)。回到圖 9 所示，供給曲線和結清價格之間的部分即「社會福利」。

2. 累積合成曲線法

如前節所示，參與成員提予 ISO 之競標曲線為式 (1)，其中 a 為競標斜率， b 為競標價格。假設發電業之競標標單為表 6 所示，配電業之競標標單為表 7 所示。

累積合成曲線法顧名思義是將所有參與成員之競標標單累積合成為競標曲線進行匹配。將各 GenCo 之競標曲線累積合成為一供給遞增累積合成曲線 ($\lambda_s = 0.0065s + 2.6491$)。將各 DisCo 之競標曲線累積合成為一需求遞減累積合成曲線 ($\lambda_d = -0.0123s + 5.8462$) 將供給累積合成曲線和需求累積合成曲線撮合，結果如圖 10 所示。

表 3. 發電業得標資料 (競標價格高低配法)

發電業者	得標價格 (\$/MWh)	得標容量 (MW)	發電業者	得標價格 (\$/MWh)	得標容量 (MW)
GenCo1	2.54	38.0	GenCo4	3.41	13.7
GenCo2	2.00	30.0	GenCo5	3.12	35.0
GenCo3	2.51	25.0	GenCo6	2.45	20.0

表 1. 發電業競標資料 (競標價格高低配法)

發電業者	競標價格 (\$/MWh)	競標容量 (MW)	發電業者	競標價格 (\$/MWh)	競標容量 (MW)
GenCo1	2.54	38.0	GenCo4	3.41	48.0
GenCo2	2.00	30.0	GenCo5	3.12	35.0
GenCo3	2.51	25.0	GenCo6	2.45	20.0

表 2. 配電業競標資料 (競標價格高低配法)

配電業者	競標價格 (\$/MWh)	競標容量 (MW)	配電業者	競標價格 (\$/MWh)	競標容量 (MW)
DisCo1	4.52	11.0	DisCo11	6.74	7.0
DisCo2	2.80	12.2	DisCo12	5.12	3.6
DisCo3	8.24	3.5	DisCo13	5.10	7.6
DisCo4	6.54	10.0	DisCo14	8.12	6.4
DisCo5	6.25	2.1	DisCo15	8.00	13.0
DisCo6	3.40	3.6	DisCo16	7.54	13.2
DisCo7	7.21	5.2	DisCo17	7.12	20
DisCo8	4.85	18.0	DisCo18	4.80	5.5
DisCo9	4.90	8.2	DisCo19	5.70	8.1
DisCo10	4.80	13.0	DisCo20	6.60	6.3

表 4. 配電業得標資料 (競標價格高低配法)

配電業者	得標價格 (\$/MWh)	得標容量 (MW)	配電業者	得標價格 (\$/MWh)	得標容量 (MW)
DisCo1	3.41	11.0	DisCo11	3.41	7.0
DisCo2	0.00	0.0	DisCo12	3.41	3.6
DisCo3	3.41	3.5	DisCo13	3.41	7.6
DisCo4	3.41	10.0	DisCo14	3.41	6.4
DisCo5	3.41	2.1	DisCo15	3.41	13.0
DisCo6	0.00	0.0	DisCo16	3.41	13.2
DisCo7	3.41	5.2	DisCo17	3.41	20.0
DisCo8	3.41	18.0	DisCo18	3.41	5.5
DisCo9	3.41	8.2	DisCo19	3.41	8.1
DisCo10	3.41	13.0	DisCo20	3.41	6.3

表 5. 交易市場利益資訊 (競標價格高低配法)

結清價格 (\$/MWh)	結清容量 (MW)	購電總金額 (\$/h)	售電總金額 (\$/h)	社會福利 (\$/h)
3.41	161.7	551.39	424.18	127.21

表 6. 發電業競標資料 (累積合成曲線法)

發電業者	競標價格 (\$/MWh)	競標斜率	發電業者	競標價格 (\$/MWh)	競標斜率
GenCo1	2.54	0.040	GenCo4	3.41	0.042
GenCo2	2.00	0.035	GenCo5	3.12	0.039
GenCo3	2.51	0.043	GenCo6	2.45	0.035

表 7. 配電業競標資料 (累積合成曲線法)

配電業者	競標價格 (\$/MWh)	競標斜率	配電業者	競標價格 (\$/MWh)	競標斜率
DisCo1	4.52	0.21	DisCo11	6.74	0.28
DisCo2	2.80	0.32	DisCo12	5.12	0.21
DisCo3	8.24	0.27	DisCo13	5.10	0.20
DisCo4	6.54	0.33	DisCo14	8.12	0.30
DisCo5	6.25	0.35	DisCo15	8.00	0.28
DisCo6	3.40	0.34	DisCo16	7.54	0.25
DisCo7	7.21	0.22	DisCo17	7.12	0.26
DisCo8	4.85	0.28	DisCo18	4.80	0.13
DisCo9	4.90	0.24	DisCo19	5.70	0.17
DisCo10	4.80	0.25	DisCo20	6.60	0.32

由圖 10 所示，可知供給累積合成曲線和需求累積合成曲線撮合後會得到一個交點 λ ，由此交點垂直對應到 X 軸，可得到一市場結清容量，而此交點水平對應到 Y 軸，可得到一市場結清價格。發電業之競標價格低於市場結清價格者均得標，高於者則未得標。配電業之競標價格高於市場結清價格者均得標，低於者則未得標。所有配電業均依據市場結

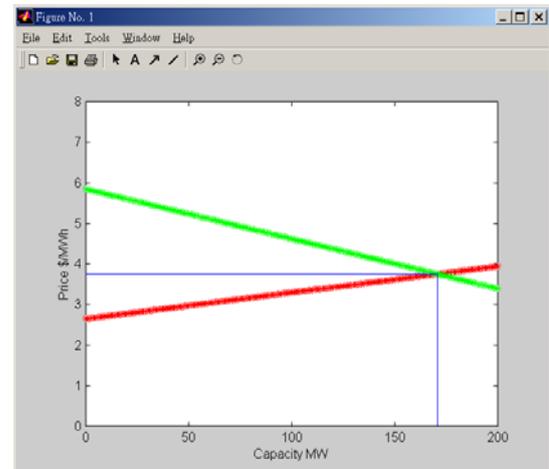


圖 10. 累積合成曲線撮合圖

清價格付費，發電業則依據標單之競標價格售出電力。將節清價格 λ 帶入各參與成員之競標曲線中，即可得各參與成員之成交量 s 。發電業之撮合結果如表 8 所示，配電業之結果如表 9 所示，交易市場利益如表 10 所示。

表 8. 發電業得標資料 (累積合成曲線法)

發電業者	得標價格 (\$/MWh)	得標容量 (MW)	發電業者	得標價格 (\$/MWh)	得標容量 (MW)
GenCo1	2.54	30.28	GenCo4	3.41	8.12
GenCo2	2.00	50.04	GenCo5	3.12	16.19
GenCo3	2.51	28.87	GenCo6	2.45	37.18

表 9. 配電業得標資料 (累積合成曲線法)

配電業者	得標價格 (\$/MWh)	得標容量 (MW)	配電業者	得標價格 (\$/MWh)	得標容量 (MW)
DisCo1	0.00	0.00	DisCo11	3.75	10.67
DisCo2	0.00	0.00	DisCo12	3.75	6.51
DisCo3	3.75	16.62	DisCo13	3.75	6.74
DisCo4	3.75	8.45	DisCo14	3.75	14.56
DisCo5	3.75	7.13	DisCo15	3.75	15.17
DisCo6	0.00	0.00	DisCo16	3.75	15.15
DisCo7	3.75	15.72	DisCo17	3.75	12.95
DisCo8	3.75	3.92	DisCo18	3.75	8.06
DisCo9	3.75	4.78	DisCo19	3.75	11.46
DisCo10	3.75	3.84	DisCo20	3.75	8.9

表 10. 交易市場利益資訊 (累積合成曲線法)

結清價格 (\$/MWh)	結清容量 (MW)	購電總金額 (\$/h)	售電總金額 (\$/h)	社會福利 (\$/h)
3.75	170.69	640.36	418.8	221.56

累積合成曲線之競標由競標斜率 a 和競標價格 b 所構成，此標單中並無投出容量，故成交容量之大小由 a 和 b 決定。以發電業之 GenCo1 為例（如表 5-8 所示），其競標曲線為 $MC(PG1)=0.04s+2.54$ ，市場結清價格（如表 10 所示）為 3.75 (\$/MWh)，將 3.75 帶入 $MC(PG1)$ 中，得到 $s=30.28$ ，故 GenCo1 之成交量為 30.28 (MW)。發電業之競標價格越低者，越容易得標。而競標斜率越低，其成交量越大；反之，則成交量越小。以配電業之 DisCo3 為例（如表 9 所示），其競標曲線為 $MC(L3)=-0.27s+8.24$ ，市場結清價格為 3.75 (\$/MWh)，將 3.75 帶入 $MC(L3)$ 中，得到 $s=16.62$ ，故 DisCo3 之成交量為 16.62(MW)。配電業之競標價格越高者，越容易得標。而競標斜率越低，其成交量越大；反之，則成交量越小。表 9 中，DisCo1 之競標價格 (4.52 \$/MWh) 高於市場結清價格 (3.75 \$/MWh)，但因其他配電業之成交量總和已達市場結清容量，故其成交量為 0 (MW)。

(二) 範例二：現貨交易之最佳化電力潮流問題

本文發展之 OPF 應用於競標標單擁塞時，ISO 退回此時段之標單，並公佈最佳化標單供參與成員參考，再次進行投標。假設系統中發電業和配電業之競標資料如表 1 所示，依「競標價格高低配法」撮合後，其未送交 ISO 之決標標單如表 11 所示。

表 11. 發、配電業得標資料 (壅塞前)

發電業競標資料					
發電業者	競標價格 (\$/MWh)	競標容量 (MW)	發電業者	競標價格 (\$/MWh)	競標容量 (MW)
GenCo1	2.54	38.0	GenCo4	3.41	36.1
GenCo2	2.00	30.0	GenCo5	3.12	35.0
GenCo3	2.51	25.0	GenCo6	2.45	20.0
配電業競標資料					
配電業者	競標價格 (\$/MWh)	競標容量 (MW)	配電業者	競標價格 (\$/MWh)	競標容量 (MW)
DisCo1	3.41	11.0	DisCo11	3.41	7.0
DisCo2	0.00	0.0	DisCo12	3.41	26.0
DisCo3	3.41	3.5	DisCo13	3.41	7.6
DisCo4	3.41	10.0	DisCo14	3.41	6.4
DisCo5	3.41	2.1	DisCo15	3.41	13.0
DisCo6	0.00	0.0	DisCo16	3.41	13.2
DisCo7	3.41	5.2	DisCo17	3.41	20
DisCo8	3.41	18.0	DisCo18	3.41	5.5
DisCo9	3.41	8.2	DisCo19	3.41	8.1
DisCo10	3.41	13.0	DisCo20	3.41	6.3
市場交易利益資訊					
結清價格 (\$/MWh)	結清容量 (MW)	購電總金額 (\$/h)	售電總金額 (\$/h)	社會福利 (\$/h)	
3.41	184.1	627.78	500.57	127.21	

電力交易所將表 11 之決標標單送交 ISO 判斷此決標標單是否符合系統限制，ISO 利用電力潮流 (power flow, PF) 判斷出此決標標單中匯流排 21 和 22 間之流量為 36.32 MW，超過線路限制 32 MW，且匯流排 27 和 29 間之流量為 17.38 MW，超過線路限制 16 MW，則 ISO 判斷此決標標單造成系統壅塞。將此資訊公佈於 AMIF 網站中，以通知各成員此資訊並以 OPF 為基礎公佈最佳標單。

於 OPF 中假設發電業之競標交易成本曲線定義為：

$$C_i(s_i) = b_i(s_i) + a_i s_i^2,$$

配電業之競標交易利益曲線定義為：

$$B_i(d_i) = b_i(d_i) + a_i d_i^2,$$

競標係數 a 和 b 如表 12 所示。其中係數 a 為參與成員此時段之競標斜率，係數 b 為競標價格。由於系統之決標標單造成壅塞之情形並不常見，故成員正常時段投標時，不用送出競標斜率標單，其斜率之處理方式為成員可修改會員資料畫面，修改競標斜率資料，若無修改，則系統以先前登錄資料之斜率作為此 OPF 競標斜率之依據。

表 12 中，係數 a 和係數 b 代表著發電業和配電業之競標標單。係數 a 為參與成員之競標曲線斜率，係數 b 為參與成員之競標價格。本文將此 OPF 之目標函數定義為「社會福利」最大化。各參與成員之標單則依據此目標函數進行撮合，其執行結果如表 13 所示。

表 12. OPF 之競標資料

發電業交易成本曲線： $C_i(s_i) = b_i(s_i) + a_i s_i^2$					
發電業	係數 b	係數 a	發電業	係數 b	係數 a
GenCo1	2.54	0.035	GenCo4	3.41	0.028
GenCo2	2.00	0.034	GenCo5	3.12	0.038
GenCo3	2.51	0.021	GenCo6	2.45	0.028
配電業交易利益曲線： $B_i(d_i) = b_i(d_i) + a_i d_i^2$					
配電業	係數 b	係數 a	配電業	係數 b	係數 a
DisCo1	4.52	-0.1	DisCo11	6.74	-0.1
DisCo2	2.80	-0.1	DisCo12	5.12	-0.1
DisCo3	8.24	-0.1	DisCo13	5.10	-0.1
DisCo4	6.54	-0.1	DisCo14	8.12	-0.1
DisCo5	6.25	-0.1	DisCo15	8.00	-0.1
DisCo6	3.40	-0.1	DisCo16	7.54	-0.1
DisCo7	7.21	-0.1	DisCo17	7.12	-0.1
DisCo8	4.85	-0.1	DisCo18	4.80	-0.1
DisCo9	4.90	-0.1	DisCo19	5.70	-0.1
DisCo10	4.80	-0.1	DisCo20	6.60	-0.1

表 13. OPF 之最佳標單資料 (壅塞後)

發電業最佳標單資料					
發電業者	節點價格 (\$/MWh)	最佳容量 (MW)	發電業者	節點價格 (\$/MWh)	最佳容量 (MW)
GenCo1	4.17	23.32	GenCo4	4.34	16.55
GenCo2	4.19	32.18	GenCo5	4.36	16.27
GenCo3	4.23	40.87	GenCo6	4.21	31.40
配電業最佳標單資料					
配電業者	節點價格 (\$/MWh)	最佳容量 (MW)	配電業者	節點價格 (\$/MWh)	最佳容量 (MW)
DisCo1	4.19	1.66	DisCo11	4.34	11.98
DisCo2	4.24	-7.19	DisCo12	4.42	3.50
DisCo3	4.26	19.91	DisCo13	4.45	3.23
DisCo4	4.28	11.32	DisCo14	4.46	18.29
DisCo5	4.28	9.86	DisCo15	4.35	18.27
DisCo6	4.33	-4.64	DisCo16	4.36	15.92
DisCo7	4.23	14.90	DisCo17	4.39	13.66
DisCo8	4.28	2.86	DisCo18	4.34	2.31
DisCo9	4.32	2.89	DisCo19	4.39	6.53
DisCo10	4.30	2.50	DisCo20	4.45	10.73
市場最佳交易利益資訊					
結清價格 (\$/MWh)	結清容量 (MW)	購電總金額 (\$/h)	售電總金額 (\$/h)	社會福利 (\$/h)	
	158.48	689.05	410.30	278.75	

六、結論

世界各先進國家為求降低供電成本、提高電力品質及提升整體產業生產力，均積極推動電力自由化，電力自由化的發展趨勢使得傳統電力公司由一個整體供電服務型態走向專業的發電、輸電、配電各自獨立的模式。有鑒於此，本文設計一人性化且公平之競標系統，可符合解制下之短期競標（前一週、前一日、前一小時市場）。此外，若決標後之系統將引起線路壅塞甚至其他重大影響，本系統將顯示最佳調度標單於各市場參與者，使其順利完成最佳之競標策略。

參考文獻

1. 李清榮 (民 87)，電業自由化下電力市場競爭發展趨勢，能源季刊，28(2)，62-80。
2. 金立明 (民 89)，雙向合約電力調度及彈性交流傳輸系統應用之研究，國立中山大學電機研究所碩士論文。
3. 林祖嘉 (民 88)，經濟學的世界：中篇，天下出版社，台北。

4. 翁銘廷 (民 91)，電力系統之競價最佳發電機輸出排程，中原大學電機研究所碩士論文。
5. 陳曦照 (民 90)，電業自由化環境下競價為基礎之電力調度及發電業競標策略之研究，國立中山大學電機研究所博士論文。
6. Cardell, J. B., C. C. Hitt and W. W. Hogan (1997) Market power and strategic interaction in electricity networks. *Resource and Energy Economics*, 2(1), 109-137.
7. Grainger, J. J. and W. D. Jr Stevenson (1994) *Power system analysis*, McGraw-Hill, New York, NY.
8. Hao, S. (2000) A study of basic bidding strategy in clearing pricing auctions. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(3), 975-980.
9. Lai, L. L. (2001) *Power System Restructuring and Deregulation*, 1st Ed., Wiley, New York, NY.
10. Momoh, J. A., R. J. Koessler, M. S. Bond, B. Stott, D. Sun, A. Papalexopoulos and P. Ristanovic (1997) Challenges to optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(1), 444-455.
11. Song, H., C. C. Liu and J. Lavarree (1999) Decision making of an electricity supplier's bid in a spot market. *Proceedings of IEEE Power Engineering Society 1999 Summer Meeting*, 2(1), 692-696.
12. The New England Independent System Operator Web Site (2003) ISO New England 2003 demand response programs. Retrieved September 18, 2003, form: <http://www.iso-ne.com>.
13. Weber, J. D. (1999) *Individual Welfare Maximization in Electricity Markets Including Consumer and Full Transmission System Modeling*. Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
14. Wen, F. and A. K. David (2001) Optimal bidding strategies for competitive generators and large consumers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 23(1), 37-43.
15. Willis, L, J. Finney and G. Ramon (1996) Computing the cost of unbundled services. *IEEE Computer Applications in Power*, 9(1), 16-21.

收件：99.10.08 修正：100.01.13 接受：100.02.09