

선형으로 입찰하는 현물시장의 최적입찰전략분석

김진호
기초전력공학공동연구소

박종배
건국대학교

박종근
서울대학교

Analysis of Spot Market Auctions with Linear Offer Curve

Jin-Ho Kim
EESRI

Jong-Bae Park
Konkuk University

Jong-Keun Park
Seoul National University

Abstract - 현재, 전세계의 전력산업은 수직 통합적 독립산업에서 부분간 경쟁산업으로 변화하고 민영화를 통한 시장경쟁원리가 도입되고 있다. 이러한 전세계적 전력산업 구조개편에 발맞추고, 전력산업에서의 효율을 제고하기 위하여 우리 나라도 전력산업에 시장경쟁 체제를 도입하고 발전산업에 민영화를 추진하고 있다. 이러한 새로운 시장 환경아래에서 전력거래가 원활하게 이루어지고, 시장이 안정화되기 위해서는 정부, 전력거래소, 발전회사 등과 같은 시장참여자들이 전력시장을 분석할 수 있는 방법론 및 모델을 확보하고 있어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 전력시장을 분석하기 위한 방법론으로 게임이론을 적용하여 각 발전회사가 선형함수(linear offer curve)로 입찰하는 현물시장에서 각 발전회사의 최적입찰전략 및 시장균형을 분석하고자 한다. 이를 통해 각 발전회사는 현물시장에서 자신의 이익을 최대화하기 위한 최적의 입찰전략을 수립하는데 이용할 수 있게 되며, 규제자 및 시장운영자는 현물시장을 예측 분석할 수 있다.

1. 서 론

경쟁적 전력시장의 경우, 과거 비용최소화 관점의 수학적 최적화를 시도하였던 방법과는 달리 새로운 해석 기법들이 필요하게 된다 [1]. 또한, 목적함수의 형태도 비용최소화에서 수익 및 수입의 최대화로 변경하여 생각하여야 한다. 뿐만 아니라, 규제자나 시장운영자는 시장 참여자들이 시장의 영향력 등을 이용하여 시장을 왜곡하고 있지는 않은가를 감시하기 위해 전력시장을 시뮬레이션 할 수 있는 방법을 요구하게 되었다. 과거의 수학적 기법에 기초한 전통적인 분석방법론들은 이러한 문제에 바로 적용할 수 없는데, 그 이유는 각 시장참여자(수학적 문제로 정식화하였을 경우 의사결정의 단위로 생각할 수 있음)가 다른 시장참여자의 정보를 모두 알고 있지 않으며, 또한 목적함수 역시 각 개별 참여자의 독립변수로 표현된 값의 단순 합으로는 표현되지 않기 때문이다. 따라서, 이러한 문제의 경우, 게임이론을 이용하여 문제를 정식화하고 분석하는 기법들이 그 대안으로 제시되고 있다 [2-4].

경쟁적 전력시장의 발전회사들은 자신의 수익을 최대화할 수 있는 입찰전략을 필요로 하게 되었으며, 이를 해결하기 위한 많은 노력들이 시도되어 오고 있다 [3, 5]. 시장가격 (market clearing price)을 예측하여 예측된 가격보다 조금 낮게 입찰하는 방식으로 입찰전략을 수립하기도 하고, 경쟁회사의 입찰전략을 예측 분석하여 이를 이용하는 방식으로 입찰전략을 수립하기도 하며, 게임이론을 이용하여 최적의 입찰전략을 수립하기도 한다 [6-8]. 본 논문에서는 현물전력시장 분석을 위해 게임이론을 적용하였으며, 각 발전회사가 선형함수(linear offer curve)로 입찰하는 현물시장에서 각 발전사업자의 최적입찰전략 및 시장균형을 분석하고자 한다. 이를 통해 각 발전회사는 현물시장에서 자신의 이익을 최대화하기 위한 최적의 입찰전략을 수립하는데 이용할 수 있

게 되며, 시장운영자는 현물시장을 예측하고 분석할 수 있게 된다.

2. 현물시장 모델링 및 게임 정식화

본 논문에서는 게임이론을 이용하여 단순화된 현물전력시장을 분석하고자 한다. 각 발전회사는 자신의 입찰을 다른 발전회사가 모른 상태로 현물시장에 제출하며, 현물시장은 단일가격으로 운영된다고 가정하였다.

2.1.1 현물시장 모델링

본 논문에서는 현물시장에 두 개의 발전회사가 있다고 가정하였으며, 각 발전기의 최대출력 제한만을 고려하였다 ($q_i \leq q_i^{max}, q_i = i$ 발전기출력, $i=1,2$). 시장의 수요 d 와 가격 p 은 일차 선형의 관계를 가지고 그 기울기는 음수로 가정하였으며, 식 (1)에 주어져 있다. 정해진 가격에 발전회사가 팔고자하는 전력량을 나타내는 각 발전회사의 입찰함수 $B_i(\cdot)$ 는 양의 기울기를 가지는 일차함수로 가정하였으며 식 (2)에 주어져 있고, 각 발전기의 비용함수 $C_i(\cdot)$ 는 식 (3)에 주어져 있으며, 발전비용을 나타낸다.

$$p = \alpha - \omega \cdot d, \alpha > 0, \omega > 0 \tag{1}$$

$$B_i(q_i) = b_i \cdot q_i, b_i > 0, i = 1, 2 \tag{2}$$

$$C_i(q_i) = \frac{1}{2} r_i (q_i)^2, i = 1, 2 \tag{3}$$

2.2 게임 정식화

본 논문에서 제안한 게임은 완비정보 정적게임으로 정식화되었으며, 게임의 모든 경기자들은 동시에 게임을 하게되며 게임을 하는데 필요한 최소한의 정보는 모든 경기자가 알고 있다고 가정하였다. 즉, 현물시장의 모든 발전회사들은 입찰에 관한 의사결정을 동시에 행동으로 옮기게 된다. 본 논문에서는 두 개의 발전회사가 게임에 임한다고 하였으며, 이 때 i 발전회사의 전략은 일차선형 입찰곡선의 기울기 값인 b_i 이다. i 발전회사의 보수는 현물시장수입에서 발전비용을 뺀 값으로 정의되며 아래 식 (4)에 주어져 있다. 현물시장 입찰게임의 해는 내쉬 균형 (Nash equilibrium)으로 정의하였으며 아래 식 (5)와 같은 방법으로 구해진다.

$$\Pi_i(p, q_i) = p \cdot q_i - C_i(q_i), i = 1, 2 \tag{4}$$

$$b_i^{Nash} = \arg \max_{b_i} \Pi_i, \text{ for } b_i^{Nash}, i \neq j, i, j = 1, 2 \tag{5}$$

3. 내쉬 균형 분석

3.1 콤포지트 입찰곡선

본 논문에서는 각 발전회사의 입찰곡선을 조합하여

컴포지트 입찰곡선을 정의하였으며, 아래 그림 1에 주어
져 있다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 컴포지트 입찰곡선
은 세 부분으로 나누어 생각할 수 있음을 알 수 있으며,
첨자 l, h 는 두 발전회사 가운데 최대입찰가격이 높은
회사를 h , 낮은 회사를 l 로 표현하여 일반화하였다.

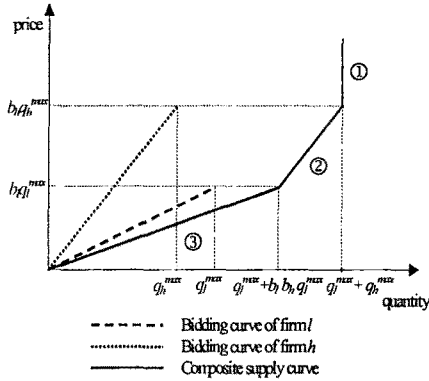


그림 1. 컴포지트 입찰곡선

또한 본 논문에서는 발전회사의 입찰결과를 두 가지
로 나누어 고려하였는데, 첫 번째는 시장가격이 발전회
사의 최대입찰가격보다 큰 경우이며, 이 경우에는 발전
회사가 시장에 입찰한 최대 출력을 시장에 팔 수 있게
된다 ($q_i = q_i^{\max}$). 두 번째는 그렇지 않은 경우로, 이
경우에는 시장가격과 입찰가격에 따라 발전회사의 낙찰
발전량이 결정된다 ($q_i = \frac{p}{b_i}$). 그림 1에서 컴포지트
입찰곡선이 세 부분으로 이루어져 있기 때문에, 본 논문
에서는 시장의 균형을 이 세 가지 경우로 나누어 고려하
기로 한다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, 컴포지트 곡선의
세 영역과 수요곡선이 만나는 세 가지 경우에 대하여 본
논문에서의 내쉬 균형을 분석하고 이를 통해 게임의 해
를 도출하고자 한다.

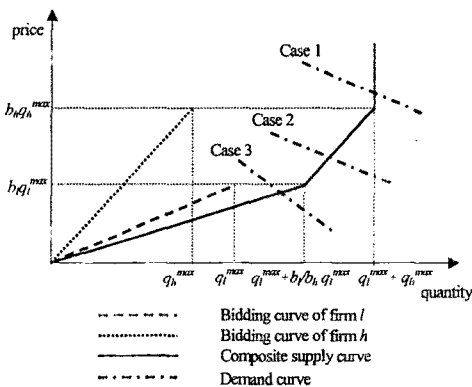


그림 2 내쉬 균형 케이스

3.2 내쉬 균형 케이스 분석

1) Case 1

이 경우, 시장가격이 두 발전회사의 최대입찰가격보
다 크므로, 각 발전회사의 낙찰발전량 및 시장가격은 다
음과 같이 결정된다.

$$q_l = q_l^{\max}, \quad q_h = q_h^{\max} \quad (6)$$

$$p = \alpha - \omega(q_l^{\max} + q_h^{\max}) \quad (7)$$

또한, 식 (7)로 표현된 시장가격이 발전회사 h 의 최대
입찰가격보다 커야 하므로, 각 발전회사의 입찰전략, 즉
입찰곡선의 기울기는 다음과 같이 결정된다.

$$b_l \leq \frac{q_h^{\max} b_h}{q_l^{\max}}, \quad b_h < \frac{\alpha - \omega(q_h^{\max} + q_l^{\max})}{q_h^{\max}} \quad (8)$$

2) Case 2

이 경우, 시장가격이 발전회사 l 의 최대입찰가격보다
는 높고 발전회사 h 의 최대입찰가격보다는 낮게 형성되
기 때문에, 발전회사 h 및 l 의 낙찰발전량, 그리고 시장
가격은 다음과 같이 결정된다.

$$q_l = q_l^{\max}, \quad q_h = \frac{p}{b_h} \quad (9)$$

$$p = \frac{(\alpha - \omega q_l^{\max}) b_h}{b_h + \omega} \quad (10)$$

시장가격 p 가 발전회사 l 의 최대입찰가격보다는 높고
발전회사 h 의 최대입찰가격보다는 낮아야 한다는 조건
을 이용하면, 발전회사 h 및 l 의 입찰전략 b_l, b_h 값은
다음과 같은 조건으로 결정된다.

$$b_h \geq \frac{\alpha - \omega(q_l^{\max} + q_h^{\max})}{q_h^{\max}} \quad (11)$$

$$b_h > \frac{\omega b_l q_l^{\max}}{\alpha - (b_l + \omega) q_l^{\max}} = -\omega - \frac{\alpha\omega - \omega^2 q_l^{\max}}{q_l^{\max} b_l - (\alpha - \omega q_l^{\max})} \quad (12)$$

$$b_l < \frac{(\alpha - \omega q_l^{\max}) b_h}{(b_h + \omega) q_h^{\max}} = \frac{(\alpha - \omega q_l^{\max})}{q_l^{\max}} \cdot \left(1 - \frac{\omega}{b_h + \omega}\right) \quad (13)$$

3) Case 3

이 경우, 시장가격이 발전회사 l 의 최대입찰가격 및
발전회사 h 의 최대입찰가격보다 낮게 결정되므로, 발전
회사 l 및 h 의 낙찰발전량 및 시장가격은 다음과 같이
결정된다.

$$q_l = \frac{p}{b_l}, \quad q_h = \frac{p}{b_h} \quad (14)$$

$$p = \alpha - \omega d = b_l q_l = b_h q_h \quad (15)$$

위의 마찬가지로 방법으로 발전회사 h 및 l 의 입찰전략
 b_l, b_h 값을 구하면 다음과 같다.

$$\text{If } b_l \geq \frac{\alpha - \omega q_l^{\max}}{q_l^{\max}}, \quad b_h \geq \frac{q_l^{\max} b_l}{q_h^{\max}} \quad (16)$$

$$\text{If } b_l < \frac{\alpha - \omega q_l^{\max}}{q_l^{\max}}, \quad \frac{q_l^{\max} b_l}{q_h^{\max}} \leq b_h \leq -\omega - \frac{\alpha\omega - \omega^2 q_l^{\max}}{q_l^{\max} b_l - (\alpha - \omega q_l^{\max})} \quad (17)$$

위의 세 가지 경우에 대하여 내쉬 균형이 존재하는 발전

