

시장실적을 이용한 전력시장 불완비정보의 추정에 관한 연구

신재홍 이광호
단국대학교 전기공학과

A Study on the Estimation of Incomplete Information in an Electricity Market using the Results of Power Transaction

Jae-Hong Shin Kwang-Ho Lee
Dep. of Electrical Eng, Dankook University

Abstract - 향후 나타날 가격 입찰방식 시장(Price-Bidding Generation Pool; PB)에서는 발전사업자가 전략적으로 제출하는 비용특성에 의해 전력거래가 결정되기 때문에 상대기업의 비용특성을 정확히 안다는 것은 힘들다. 본 연구는 경쟁상황에서 상대기업의 비용특성을 모르는 경우, 비용특성을 추정하고 추정을 통해 입찰 전략을 결정하는 기법을 제안한다. 추정은 시장실적을 이용하여 이루어지며 이득을 최대화시킬 것이라 예상되는 입찰전략을 결정한다. 또한 정확성을 높이기 위해 평균이득 개념을 사용하여 추정을 시도한다.

1. 서 론

향후 우리나라의 전력거래는 PB시장을 통해 이루어진다. 전력거래는 발전기업의 이득에 직접적인 영향을 미치므로 발전기업은 상대기업의 발전특성을 고려하여 전략적인 공급합수를 결정해야 한다. 하지만 경쟁의 도입으로 상대기업의 발전특성을 정확히 알고 입찰에 참여하기란 어렵다.

일반적으로 상대기업의 발전특성을 알고 경쟁을 하는 전력시장을 완비정보 전력시장(이하 완비시장)이라고 발전특성을 모르는 상태에서 경쟁하는 전력시장을 불완비정보(Incomplete Information) 전력시장(이하 불완비시장)이라 한다[1-3].

불완비정보 전력시장에서 발전기업은 이득을 최대화시키는 공급합수를 결정하기 위해 상대기업의 발전특성을 추정하고자 한다. 또한 추정된 정보를 바탕으로 입찰합수를 수립할 것이다[4].

불완비정보 전력시장에서 경쟁사업자의 발전특성을 추정하고 경쟁하는 전력시장에 대한 기존 연구는 상대기업의 발전특성을 초기에 얼마로 가정하느냐에 따라 경쟁의 결과가 다르게 나타나므로 추정의 정확성을 보장할 수 없는 단점을 지닌다.

본 연구에서는 추정의 정확성을 높이기 위해 평균이득 개념을 사용한다. 상대기업의 발전특성을 여러 가지로 가정한 상태에서 나타나는 이득을 분석하여 평균이득을 계산하고 평균이득이 가장 크게 나타나는 가정 값을 사용하여 다시 입찰에 참여하는 방법을 제안한다. 그리고 사례연구에 적용하여 완비시장과 비교한다.

2. 전력시장 모형화

불완비시장에서 나타나는 경쟁을 해석하기 위해서는 발전특성을 알고 있는 경우와 모르는 있는 경우로 구분할 필요가 있다.

전력시장은 한계비용합수와 입찰합수가 시장에서 공개되는지 여부에 따라 완비시장과 불완비시장으로 구분한다. 단, 전력의 거래량, 거래가격 그리고 수요특성은 발전사업자가 항상 알고 있는 것으로 한다.

정식화 모형은 발전사업자 G_1, G_2 가 공급경쟁에 참여한 것을 대상으로 하며 송전선로계약 등의 제약조건은 고려하지 않는다. 한계비용합수, 입찰합수 그리고 수요특성은 일차함수로 정의하며 입찰전략은 한계비용합수의 절편을 전략적으로 선택하는 모형을 사용한다. 발전사업자 i 의 한계비용합수, 입찰합수 그리고 수요특성을 수학적 표현하면 식 (1)~ 식 (3)과 같다.

$$\text{한계비용합수} : C'_i(q_i) = m_i q_i + b_i \quad (1)$$

$$\text{입찰합수} : C''_i(q_i, k_i) = m_i q_i + k_i \quad (2)$$

$$\text{수요특성} : D(\sum q_i) = b_0 - m_0 \sum q_i \quad (3)$$

q_i : 전력거래량, m_i : 한계비용합수의 기울기
 b_i : 한계비용합수의 절편, k_i : 입찰전략
 b_0 : 수요특성의 절편, m_0 : 수요특성의 기울기

수요함수는 전력 수급조건을 포함시켜 나타낸다.

3. 불완비시장의 게임 해석

3.1 최적화 문제의 표현

전력시장에서 시장운영자의 역할은 전력거래를 통해 사회적 후생(Social Welfare; SW)의 의미를 갖는 시장거래가치를 극대화시키는 것이다. 시장운영자의 최적화문제는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\max_{q_i} SW(k_i, q_i) = B(\sum q_i) - \sum C'_i(k_i, q_i) \quad (4)$$

여기서, B 는 소비자 만족정도(Benefit)를 나타내며 수요특성을 총거래량으로 적분함으로써 구할 수 있다. 그리고 C'_i 는 시장운영자가 고려하는 발전비용을 의미하며 입찰합수 C''_i 를 통해 결정된다.

반면, 발전사업자는 전력거래를 통해 이득을 극대화시키는 입찰 전략을 선택하고자 한다. 발전사업자의 이득은 식 (7)과 같이 총수입(Revenue)에서 발전비용을 뺀 값으로 계산된다.

$$\max_{k_i} \Pi_i(k_i, q_i) = p q_i - C_i(q_i, k_i) \quad (5)$$

여기서 C_i 는 실제발전비용을 의미하며 한계비용합수 C'_i 를 q_i 로 적분함으로써 구할 수 있다. 그리고 p 는 전력가격을 의미한다.

시장운영자의 사회적 후생 극대화 목적을 만족시키는 전력거래량은 $\partial SW / \partial q_i = 0$ 로 구할 수 있고 발전기업은 $\partial \Pi_i / \partial k_i = 0$ 를 통해 이득을 극대화시키는 입찰전략을 선택할 수 있다. 편미분 값을 정리하면 식 (7)과 식 (8)과 같다. 그리고 전력가격은 식 (6)과 같이 결정된다.

$$p = m_i q_i + k_i \quad (6)$$

$$\left(\frac{q_1}{q_2} \right) = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} m_2 + m_0 & -m_0 \\ -m_0 & m_1 + m_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 - k_1 \\ b_0 - k_2 \end{pmatrix}, \quad \Delta = m_0 m_1 + m_1 m_2 + m_2 m_0 \quad (7)$$

$$k_1 = \frac{m_0 m_2}{m_0 + m_2} q_1 + b_1, \quad k_2 = \frac{m_0 m_1}{m_0 + m_1} q_2 + b_2 \quad (8)$$

불완비시장에서 식 (8)의 입찰전략을 이용하기 위해서는 상대기업의 한계비용합수 기울기를 알아야 한다. 하지만 불완비시장에서는 상대기업의 한계비용합수를 알 수 없으므로 추정된 값을 이용하여 입찰전략을 수립해야 한다.

반면, 완비시장에서는 식 (7)과 식 (8)을 연립하여 균형상태의 입찰전략을 계산할 수 있다.

3.2 추정과 입찰전략

완비시장은 입찰의 순서가 의미가 없다. 하지만, 불완비시장에서는 추정을 통해 입찰전략을 계산하므로 입찰의 순서는 중요하다.

발전기업의 이득을 극대화 시키는 입찰전략은 식 (7)에 나타나 있다. 한계비용합수의 불완비성으로 인해 실제 값을 알 수 없으므로 상대기업의 한계비용합수를 추정된 값을 이용하여 식 (9)와 같이 입찰전략을 수립한다[4].

$$k_1^{(n)} = \frac{m_0 m_{21}^{(n-1)}}{m_0 + m_{21}^{(n-1)}} q_1^{(n-1)} + b_1, \quad k_2^{(n)} = \frac{m_0 m_{12}^{(n-1)}}{m_0 + m_{12}^{(n-1)}} q_2^{(n-1)} + b_2 \quad (9)$$

$m_{ij}^{(n)}$ 은 발전사업자 G_j 가 n 번째 입찰을 통해 m_i 를 추정된 값을 의미한다. 그리고 $q_j^{(n)}$, $k_i^{(n)}$ 은 각각 n 번째 입찰을 통해 결정된 전력가격, 거래량 그리고 발전사업자 G_i 의 n 번째 입찰전략을 의미한다.

G_1 은 G_2 가 자신의 한계비용합수 기울기를 어떻게 추정했는지 알 수 있는 정보가 없다. 본 연구에서 G_1 은 G_2 가 자신의 한계비용합수를 정확히 추정했다고 판단하고 경쟁하는 전력시장을 가정한다.

n 번째 입찰의 전력가격은 $p^{(n)} = k_2^{(n)} + m_2 q_2^{(n)}$ 으로 결정된다. 그리고 G_1 은 $k_2^{(n)}$ 가 식 (9)와 같이 $m_0 m_1 q_2^{(n-1)} / (m_0 + m_1) + b_2$ 를 통해 수립된다고 판단한다. 그러므로 G_1 은 $k_2^{(n)}$ 수립식을 $p^{(n)}$ 결정식에 대

입하여 식 (10)와 같은 b_2 , m_2 와 $p^{(n)}$ 의 관계를 유도할 수 있다.

$$p^{(n)} = m_0 m_1 q_2^{(n-1)} / (m_0 + m_1) + b_2 + m_2 q_2^{(n)} \quad (10)$$

G_1 이 추정하고자 하는 정보는 b_2 와 m_2 이지만 전력시장에서 얻을 수 있는 정보는 식 (10) 뿐이다. 이때 사용할 수 있는 방법은 b_2 와 m_2 를 고대로 추정하는 방법이다. 예를 들어, m_2 를 가정한 상태에서 b_2 를 추정하고 다시 b_2 와 시장거래실적을 이용하여 m_2 를 추정하는 방법이다. 추정방법을 식으로 나타내면 식 (11)과 식 (12)와 같다.

$$b_{21}^{(n)} = p^{(n)} - m_{21}^{(n-1)} q_2^{(n)} - q_2^{(n-1)} \cdot \{m_0 m_1 / (m_0 + m_1)\} \quad (11)$$

$$m_{21}^{(n)} = [p^{(n)} - q_2^{(n-1)} \cdot \{m_0 m_1 / (m_0 + m_1)\} - b_{21}^{(n-1)}] / q_2^{(n)} \quad (12)$$

여기서, $b_{ij}^{(n)}$ 은 발전사업자 G_j 가 n 번째 입찰을 통해 b_i 를 추정할 값을 의미한다.

b_2 와 m_2 를 번갈아 추정하는 기법을 사용하기 때문에 추정의 결과는 다양하게 나타나게 된다. 결과에 영향을 주는 요인으로는 첫 입찰전략과 입찰전략을 수립하기 위해 필요한 초기의 $m_{21}^{(1)}$ 이다. 이로 인해 G_1 의 이득도 초기값마다 다양하게 나타난다. 예를 들어 G_1 이 초기값 ($k_1^{(1)}, m_{21}^{(1)}$)을 동일하게 해도 이득은 G_2 의 초기값 ($k_2^{(1)}, m_{12}^{(1)}$)에 따라 여러 가지로 나타날 것이고 자신의 초기값 ($k_1^{(1)}, m_{21}^{(1)}$)에 따라라도 영향을 받게 된다.

다양한 시장실적으로 인해 G_1 은 자신과 G_2 의 초기값과 이득의 관계를 알고자 할 것이다. 하지만 G_2 가 초기값을 얼마로 설정했는지를 알 수 있는 정보가 없으므로 자신의 초기값($k_1^{(1)}, m_{21}^{(1)}$)에 대한 여러 가지 이득의 조합만을 얻을 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 G_1 의 초기값마다 평균이득을 계산하고 평균이득이 가장 높게 나타나는 초기값을 선택하여 다시 추정하는 방법을 사용한다.

4. 사례연구

대상계통으로 발전력 제약이 없는 G_1 , G_2 가 공급경쟁에 참여하고 수요는 하나의 집중된 수요특성을 가정한다. G_1 은 $m_1 = 0.45$, $b_1 = 5$ 의 한계비용함수를 갖고 G_2 는 $m_2 = 0.25$, $b_2 = 10$ 의 한계비용함수를 갖는다. 수요특성은 $m_0 = 0.5$, $b_0 = 100$ 의 탄력성을 갖는 입찰함수로 가정한다. 선로제약 등의 계통제약은 고려하지 않는다.

표 1은 발전사업자의 초기값과 평균이득의 관계를 나타낸다. 초기값 $k_1^{(1)}, m_{21}^{(1)}$ 는 각각 6개와 5개의 값으로 구분한다. 즉, G_1 의 초기값 조합을 30개, G_2 의 초기값 조합을 30개로 설정하였다. 따라서 G_1 이 동일한 초기값을 사용해도 G_2 가 30가지의 초기값 경우가 나오므로 G_1 의 하나의 초기값에 대한 이득의 경우는 30가지이다. G_1 의 초기값 $k_1^{(1)}$ 은 5, 7, 9, 13, 17, 21로 설정했고 $k_2^{(1)}$ 은 10, 12, 16, 20, 24, 28로 정했다. 또한 $s_1^{(1)}$ 은 0.1단위로 0.1부터 0.5까지 설정했다. 표 1은 G_1 의 초기값에 따른 평균이득을 의미한다.

〈표 1〉 초기값에 따른 평균이득

평균이득1		$m_{21}^{(1)}$				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$k_1^{(1)}$	5	1140	1185	1198	1195	1190
	7	1139	1164	1181	1190	1194
	9	1136	1176	1189	1189	1186
	13	1129	1166	1180	1183	1182
	17	1120	1154	1169	1174	1176
	21	1108	1140	1156	1164	1168
평균이득2		$m_{12}^{(1)}$				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$k_2^{(1)}$	10	1155	1306	1385	1409	1397
	12	1173	1315	1386	1409	1400
	16	1205	1327	1386	1408	1405
	20	1227	1333	1385	1406	1409
	24	1240	1334	1381	1403	1410.8
	28	1245	1330	1376	1398	1410

표 6에서 G_1 , G_2 가 초기값을 ($k_1^{(1)}, m_{21}^{(1)}$) = (5, 0.3), ($k_2^{(1)}, m_{12}^{(1)}$) = (24, 0.5)와 같이 선택하였을 때, 각각 평균이득이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 G_1 , G_2 는 평균이득이 높게 나타나는 초기값을 이용하여 다시 입찰에 참여 할 것이다.

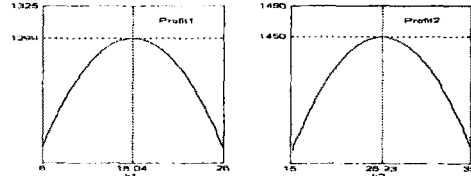
표 2는 선택된 초기값에 대한 결과이다.

〈표 2〉 불완비시장의 내쉬균형

구분	k_1	m_{21}	b_{21}	k_2	m_{12}	b_{12}
불완비시장	16.04	0.33	5.20	25.23	0.47	5.20
완비시장	14.54	X	X	24.73	X	X

수렴상태에서 추정 값은 $m_{21} = 0.33$, $m_{12} = 0.47$, $b_{21} = 5.20$, $b_{12} = 5.20$ 으로 실제값과 차이가 나타나지만 입찰전략은 $k_1 = 16.04$, $k_2 = 25.23$ 로 완비시장과 비교해 약간 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 입찰전략에 대한 추정은 한계비용함수를 추정된 값에 의해 계산되며, $k_{21} = 20.08$, $k_{12} = 14.90$ 의 값을 갖는다.

그림 1과 같이 발전사업자는 추정된 상대기업의 입찰함수에 대해 이득을 계산하고 입찰전략을 수립할 것이다.



〈그림 1〉 내쉬균형 확인

추정된 G_2 의 공급함수에 대해 G_1 의 이득을 계산하면 그림 1의 왼쪽에 표시된 그래프와 같다. 그림에서 알 수 있듯이, G_1 은 $k_1 = 16.04$ 를 선택할 때 이득이 1299로 극대화된다. 또한 G_2 도 같은 논리에 의해 $k_2 = 21.22$ 를 선택할 때 이득이 1450로 극대화된다. 따라서 각 발전사업자는 수렴된 k_1, k_2 에서 이득이 극대화되므로 입찰 전략을 바꿀 유인이 없다. 결국 수렴된 상태는 내쉬 균형의 조건과 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 기존 연구에서 제안한 불완비시장의 해석기법에서 나타나는 문제에 초점을 맞추어 진행하였다. 이를 위해 상대기업의 한계비용함수와 입찰함수를 알고 있는지 모르고 있는지 여부에 따라 완비시장과 불완비시장으로 모형화하였다.

불완비시장에서 경쟁사업자의 한계비용함수를 추정하는 방법은 전력 가격 결정방법과 입찰전략 수립과정을 분석하여 유도하였다. 불완비시장에서는 상대기업의 입찰전략을 모르고 때문에 입찰전략 수립식과 전력가격식을 연립하여 하나의 식을 구성하고 전력가격 정보를 이용하여 한계비용함수 절편과 기울기를 추정하는 기법을 제안하였다. 하지만 초기에 상대기업의 한계비용을 가정한 값과 자신의 입찰전략에 따라 다양한 결과가 나타난다.

상대기업의 한계비용을 가정한 값에 따라 여러 결과가 나타나므로 자신의 입찰전략과 한계비용에 따른 평균이득을 계산하였다. 그리고 평균이득이 가장 높게 나타나는 값을 선택하여 다시 입찰에 참여하는 것을 제안하였다.

사례계통에 적용한 결과, 정보의 부족으로 인해 추정이 부정확하게 이루어지지만 균형상태의 입찰전략은 완비시장과 비슷하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서의 결과는 단일계통에 적용했다는 한계와 단일 부하에 적용했다는 한계를 지닌다. 따라서 사례연구에서 나타난 결과를 일반화시키는 것은 무리가 있다. 하지만 연구 결과는 향후 전력시장의 안정적인 운영을 위한 자료로서 이용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2005-7-110) 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game theory*, MIT Press, 1991.
- [2] T. Li, M. Shahidehpour, "Strategic Bidding of Transmission-Constrained GENCOs with Incomplete Information," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 20, no. 1, pp. 437 - 447, Feb. 2005.
- [3] Y. Zhang, J. Fand, F. Hu, S. Chen and Y. Ni, "Analysis of the network constraints' effects on strategic behavior in an incomplete information environment," *International Conference on Power System Technology*, vol. 1, pp. 428-432, Oct. 2002.
- [4] Jae-Hong Shin and Kwang-Ho Lee, "Analysis on Incomplete Information in an Electricity Market using Game Theory," *KIEE Trans.*, vol. 55A, no. 5, pp.214-219, May. 2006.