

예측된 시장가격 정보를 이용한 발전기의 최적 입찰전략

박종배, 조기선, 이기송, 신종린
 건국대학교 전기공학과

An Optimal Bidding Strategy of a Generator Using Forecasted Spot Price Information

Jong-Bae Park, Ki-Seon Cho, Ki-Song Lee, Joong-Rin Shin
 Electrical Engineering Department, Konkuk University

Abstract - This paper discusses on an optimal bidding strategy of a generator in a competitive electricity spot market using the information of predicted spot price with some assumptions. Optimal bidding strategy of a generator is derived by solving a profit-maximizing optimization problem with a constraint where the forecasted spot price is treated as a constant value. The main advantage of this methodology is that the optimal bidding strategy of each generator can be obtained independently where the gaming characteristics of generators are merged into the forecasted spot price.

1. 서 론

경쟁적 전력시장에서의 전력계통의 운용은 모든 자원을 하나의 전력회사가 가지고 있는 상황을 기준으로 하는 기존 비용최소화 접근방식과는 매우 상이하게 된다. 즉, 경쟁 시장에서는 각 개별 발전기 혹은 복수의 발전기를 소유하고 있는 발전사업자의 수익 극대화 문제로 된다.⁽¹⁾ 전력 현물시장에서 이러한 다수의 발전기 사이의 이익 극대화 문제 및 전력시장에서의 전력거래 문제는 게임 이론을 적용하여 균형점을 찾는 문제로 정형화되고 해석될 수 있다. Maeda 및 Kaya 등은 소비자 및 전력회사 사이의 전력거래를 협조게임으로 풀이하였고⁽²⁾, Ferrero 등은 입찰가격과 입찰 물량사이의 관계식을 설정하고, 모든 발전기의 비용정보가 알려진 경우에서의 전력시장 입찰 문제를 정적 및 완전정보 2인 게임으로 해석한 바 있다.⁽³⁾ 또한, Ferrero 등은 게임참여자간에 비완전정보를 가진 상황에서의 전력시장 입찰 문제를 비협조 정적 2인 게임문제로 해석한바 있다.⁽⁴⁾ 국내의 경우, 전력 현물시장에서의 전력거래의 문제를 2인 게임으로 정형화하여 Nash 균형점을 찾는 연구가 제안된 적도 있다.^(5,6)

현물시장에서의 최적 입찰량을 결정하기 위한 다른 접근법으로는 해석적인 방법론의 적용이 있다.

Hao는 시장청산가격 구조를 가지는 전력 경매시장에서 발전사업자의 입찰 행위를 모델링하였고, 발전사업자들의 최적입찰 전략을 분석하였다.⁽⁷⁾ Hao의 연구에서는 모든 발전기의 입찰물량은 동일하며 각 발전기는 하나의 단위 물량만을 가지고, 수요 또한 개개 발전기의 물량의 정수 배를 가지고, 발전사업자들의 비용은 확률분포로 주어진다고 가정하였다. 이러한 가정에서 각 발전사업자들이 그들의 이익을 극대화하기 위한 최적입찰 가격을 확률적인 관점에서 도출하였다. Irene 등은 도매전력시장을 모의하고 시장가격 및 거래물량을 결정할 수 있는 모형을 개발하였으며, 여기서 각 발전사업자의 입찰 전략을 포함하였다. 이들은 시장 균형점을 찾기 위하여 반복법을 적용하였으며 반복 횟수가 늘어나면 입찰 가격을 지속적으로 줄이는 휴리스틱한 방법론을 적용하였다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 각 발전사업자가 t 시간대의 에너지 현물시장 가격을 예측을 통하여 알고 있다는 전제 아래에서 각 발전기의 최적 입찰 물량을 결정하는 문제를 해석적인 방법을 통하여 도출하였다. 이러한 접근법은 시장에서의 게임 요소를 예측 가격으로 변환시킬 수 있으므로 매우 유용하며, 입찰 전략이 매우 간단해진다는데 장점이 있다.

2. 본 론

2.1 기본 가정

일반적으로 특정 시간대 현물시장에서의 전력 가격은 발전기들의 공급측 입찰 자료와 판매사업자의 수요측 입찰 자료를 이용하여 각기 공급자 곡선과 수요자 곡선을 형성하고 공급측 곡선과 수요측 곡선이 만나는 지점에서 시장 가격과 거래 물량이 결정된다.⁽⁹⁾

경쟁적 전력시장에서의 발전기의 입찰정보는 아래의 식과 같이 입찰물량과 그 때의 입찰가격으로 구성된다.

$$P_i = (P_{i,1}, P_{i,2}, \Lambda, P_{i,j}, \Lambda, P_{i,n})^T$$

$$P_i = (P_{i,1}, P_{i,2}, \Lambda, P_{i,j}, \Lambda, P_{i,n})^T \quad (1)$$

여기서, n_i 는 i-발전기의 입찰 구간 수를, $P_{i,j}$ 는 i-발전기의 j-구간 누적 입찰물량(단, $P_{i,1} < P_{i,2} < \Lambda < P_{i,n}$)을, $P_{i,j}$ 는 i-발전기의 j-구간 입찰가격(\$/MWh)(단, $P_{i,1} < P_{i,2} < \Lambda < P_{i,n}$)을 나타낸다.

따라서, i-발전기의 j 구간에서의 입찰은 $(P_{i,j}, P_{i,j})$ 로 구성된다. 구간별 입찰가격은 발전사업자의 전략에 따라 달라질 수 있지만 합리적인 게임 참여자는 아래의 식과 같이 입찰물량 및 그 때의 비용으로부터 결정된다.

$$p_{i,j} = B(P_{i,j}, C_{i,j}) \quad (2)$$

여기서, $C_{i,j}$: i-발전기가 $P_{i,j}$ 의 출력을 낼 때의 비용
 본 연구에서는 식 (1)의 발전기 입찰 구간을 무한개로 가정하였고(즉, 연속적인 입찰로 가정), 식 (2)의 입찰 가격 또한 입찰 물량에 대응하는 한계비용으로 입찰한다고 가정하였다. 이러한 경우, 특정 발전기의 입찰 형태는 입찰물량을 결정하는 문제로 귀결된다.⁽⁴⁾ 즉, i-발전기의 입찰물량을 P_i^{bid} 라고 하였을 때 그 때의 입찰 가격(P_i^{bid})은 아래와 같이 잘 알려진 비용함수의 미분값, 즉, 한계비용으로부터 결정된다.⁽¹⁰⁾

$$p_i^{bid} = \left. \frac{dF_i(P)}{dP_i} \right|_{P_i=P_i^{bid}} = b_i + 2c_i P_i^{bid} \quad (3)$$

여기서, $F_i(P) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2$: 발전기 비용함수

a_i, b_i, c_i : i-발전기의 비용계수.

다음으로 본 연구에서는 수요의 가격 탄력성 및 수요측 입찰은 고려하지 않았다. 즉, t 시간대의 수요는 주어져 있다고 가정하였고, t 시간대의 시장가격인 $\hat{\sigma}_t$ 값은 예측을 통하여 알 수 있다는 가정을 적용하였다. 또

한, i -발전기의 입찰 전략의 변경(즉, 입찰 물량의 변경)이 $\hat{\sigma}_i$ 값에 영향을 미치지 않는다고 가정하였다. 또한, 모든 발전기는 각각의 수익 극대화를 추구하는 독립적인 사업자로 가정하였다. 이러한 가정을 적용할 경우, 전력시장을 완전경쟁 시장이라 생각할 수 있게 된다.^[9]

2.2 최적 입찰물량의 결정

앞에서 언급한 기본 가정 및 관련 비용 정보를 이용하여 특정 발전기의 t 시간대 현물시장에서의 최적 입찰물량을 결정하는 방법론을 소개하였다. 우선, i -발전기의 비용함수는 식 (3)에과 같이 $F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2$ 로 주어진다고 가정하였다. i -발전기가 t 시간대의 현물시장에 P_i 만큼의 전력에너지를 판매하고 그 때의 현물시장 가격을 $\hat{\sigma}_i$ 로 가정한 경우, 수입은 $\hat{\sigma}_i P_i$, 비용은 $(a_i + b_i P_i + c_i P_i^2)$ 가 된다. 이러한 현물시장에서 i -발전기의 목적은 수익의 극대화가 되므로 i -발전기의 목적함수는 다음과 같다.

$$\text{Max}_{P_i} [\hat{\sigma}_i P_i - (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2)] \quad (4)$$

$$\text{s.t. } P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max}$$

따라서, 식 (4)를 최대화하는 i -발전기의 t 시간대의 현물시장 입찰량은 아래의 식으로부터 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial P_i} [\hat{\sigma}_i P_i - (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2)] = 0 \Rightarrow P_i^* = \frac{\hat{\sigma}_i - b_i}{2c_i} \quad (5)$$

식 (5)의 최적 입찰량은 식 (4)의 부등식 제약을 만족하여야 하므로, 이를 고려한 최적 입찰물량은 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{cases} P_i^* = \frac{\hat{\sigma}_i - b_i}{2c_i} & \text{if } P_{i,\min} \leq P_i^* \leq P_{i,\max} \\ P_i^* = P_{i,\max} & \text{if } P_i^* \geq P_{i,\max} \\ P_i^* = P_{i,\min} & \text{if } P_i^* \leq P_{i,\min} \end{cases} \quad (6)$$

본 연구에서는 i -발전기의 t 시간대의 최적 입찰량을 예측된 현물시장 가격에 기초하고 있으므로 식 (6)을 예측된 현물시장 가격으로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{cases} P_i^* = \frac{\hat{\sigma}_i - b_i}{2c_i} & \text{if } 2c_i P_{i,\min} + b_i \leq \hat{\sigma}_i \leq 2c_i P_{i,\max} + b_i \\ P_i^* = P_{i,\max} & \text{if } \hat{\sigma}_i \geq 2c_i P_{i,\max} + b_i \\ P_i^* = P_{i,\min} & \text{if } \hat{\sigma}_i \leq 2c_i P_{i,\min} + b_i \end{cases} \quad (7)$$

식 (7)에서 보는 것처럼 특정 발전기의 최적입찰물량의 결정은 t 시간대의 예측시장가격($\hat{\sigma}_i$), 자기 발전기의 비용계수(b_i, c_i), 출력한계값($P_{i,\min}, P_{i,\max}$)으로부터 결정된다는 것을 알 수 있다. 식 (6) 및 식 (7)의 최적 입찰량이 동일한 조건 아래에서의 다른 입찰물량보다도 수익이 커지는 것은 아래와 같은 수식으로부터 알 수 있다.

$$\Delta PF_i = c_i \Delta P_i^2 > 0 \quad (8)$$

여기서, $\Delta P_i = P_i^* - P_i^{bid}$ 를 의미하며, P_i^{bid} 는 i -발전기 임의 입찰물량(단, $P_i^* \neq P_i^{bid}$)을, ΔPF_i 는 i -발전기의 최적입찰과 임의의 입찰에 따른 수익의 차이를 나타낸다.

2.3 최적 입찰전략의 해석

여기에서는 앞에서 언급한 최적 입찰물량의 결정의 문제를 설명한다. t 시간대의 현물가격 예측값이 $\hat{\sigma}_i \leq 2c_i P_{i,\min} + b_i$, $2c_i P_{i,\min} + b_i \leq \hat{\sigma}_i \leq 2c_i P_{i,\max} + b_i$, $\hat{\sigma}_i \geq 2c_i P_{i,\max} + b_i$ 인 경우는 아래 그림에서 보는 바와 같이, 최적 입찰용량은 각각 $P_i^* = P_{i,\min}$, $P_{i,\min} \leq P_i^* \leq P_{i,\max}$, $P_i^* = P_{i,\max}$ 에서 결정됨을 알 수 있다.

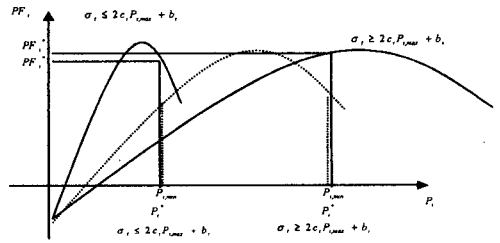


그림 1 입찰물량과 수익과의 관계

Fig. 1 Relationship between Bidding Quantity and Profit
예측된 시장가격과 최적입찰 물량사이의 관계는 아래의 그림과 같이 되며, 예측된 시장가격이 세 가지 영역을 가질 때, 각각의 최적입찰 물량은 두 개의 점과 하나의 직선으로 구성됨을 알 수 있다.

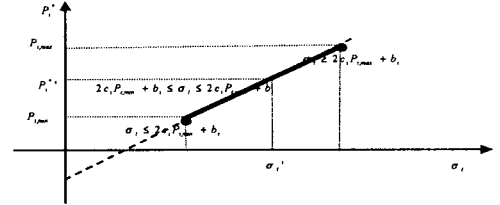


그림 2 예측된 시장가격과 최적입찰물량과의 관계

Fig. 2 Optimal Bidding vs. Estimated Market Price

3. 사례 연구

본 연구에서는 10대의 발전기로 구성되는 전력시스템을 대상으로 사례연구를 수행하였다. 아래의 표는 각 10대의 발전기의 발전기 특성자료를 나타내는 것이다.

표 1의 발전기 가운데 1,2,3은 기저부하용 발전기이며, 4,5,6은 중간부하용, 발전기 7,8,9,10은 첨두부하용 발전기이다. 또한 발전기 설비용량은 1,400MW이며, 수요는 첨두부하인 1,390MW로 가정하였다.

본 연구에서는 우선 모든 발전기가 예측시장가격을 15.3(\$/MWh)인 경우를 대상으로 발전기의 최적입찰물량을 계산하였다. 또한 발전기 설비용량의 한계비용의 범위로부터 유추된 것이며, 표2는 각 발전기의 최적 입찰에 따른 비용 및 편익 자료를 수록한 것이다.

표 2의 최적 입찰에서 발전기 7이 입찰 물량을 조금 늘이거나 줄였을 때의(± 1 MW) 수익의 변화를 살펴보면 아래와 같고, 최적 물량인 37.8MW로 입찰하였을 때 수익이 극대화됨을 알 수 있고, 이는 표 3에 주어졌다.

표 1 발전기 특성 자료

Table 1 Generator Characteristic Data

Unit	c_i (\$/MWh ²)	b_i (\$/MWh)	a_i (\$)	$P_{i,\min}$	$P_{i,\max}$
1	0.00492	6.9990	391.98	135	300
2	0.00573	6.6020	455.76	135	300
3	0.00357	8.0323	287.71	110	300
4	0.01142	8.0543	222.33	68	150
5	0.02028	7.0706	309.54	60	120
6	0.03073	6.8780	150.80	40	80
7	0.09212	8.3415	125.00	25	40
8	0.09224	8.3425	125.25	26	40
9	0.09324	8.3435	126.00	27	40
10	0.09425	8.3445	127.00	30	40

표 2 발전기의 최적 입찰물량 ($\hat{\sigma}_i = 15.3(\$/MWh)$)

Table 2 Optimal Bidding Quantities ($\hat{\sigma}_i = 15.3(\$/MWh)$)

Unit	$\hat{\sigma}_i = 15.3 (\$/MWh)$		비용 및 편익 분석 (\$)			
	P_i^*		발전기별 한계비용	수입	비용	수익
	계산값	할당값				
1	844	300	9.95	4590	2934	1656
2	759	300	10.04	4590	2952	1638
3	1018	300	10.17	4590	3019	1571
4	317	150	11.48	2295	1687	608
5	202	120	11.94	1836	1450	386
6	137	70	11.18	1071	783	288
7	37.8	37.8	15.30	577.84	571.43	6.40
8	37.7	37.7	15.30	577.03	571.08	5.95
9	37.3	37.3	15.30	570.76	567.00	3.75
10	36.9	37.2	15.35	569.16	567.84	1.32

표 3 발전기 7의 입찰물량 변화에 따른 수익의 변화

Table 3 Profit Changes of Unit 7 by Changing Bidding Quantities

Unit	$\hat{\sigma}_i = 15.3 (\$/MWh)$	비용 및 편익 분석 (\$)		
	입찰 물량	수입	비용	수익
7	37.8	577.84	571.43	6.40
7	38.8	593.64	587.34	6.30
7	36.8	563.04	556.73	6.31

각 발전사업자의 예측가격이 다른 경우의 최적 입찰 물량, 수익 등에 대하여 알아보기로 한다. 기저 및 중간부하용 발전기들은 시장가격을 15.0(\$/MWh)으로 예측하였고, 첨두부하용 발전기인 발전기 7, 8, 9, 10은 15.2(\$/MWh), 15.3(\$/MWh), 15.4(\$/MWh), 15.5(\$/MWh)로 예측한 경우이다. 이 때, 각 발전기는 입찰 물량에 대응되는 한계비용으로 입찰한다고 가정하였으므로 시장가격(σ_i)은 15.5(\$/MWh)로 결정된다. 표 4의 수익은 입찰가격에 의하여 결정되는 시장가격(σ_i)을 기준으로 계산된 것이다.

표 4 발전기별 시장가격 예측 값이 다를 경우

Table 4 Bidding with Different Estimated Market Prices

Unit	발전기별 최적 입찰 물량		$\hat{\sigma}_i$	비용 및 편익 분석 (\$)		
	P_i^*			수입	비용	수익
	계산값	할당값				
1	813	300	15.0	4590	2934	1656
2	733	300	15.0	4590	2952	1638
3	976	300	15.0	4590	3019	1571
4	304	150	15.0	2295	1687	608
5	196	120	15.0	1836	1450	386
6	132	70	15.0	1071	783	288
7	37.22	37.22	15.2	565.81	563.16	2.65
8	37.71	37.71	15.3	577.03	571.08	5.95
9	37.84	37.84	15.4	582.74	575.23	7.51
10	37.96	37.23	15.5	577.07	568.30	8.76

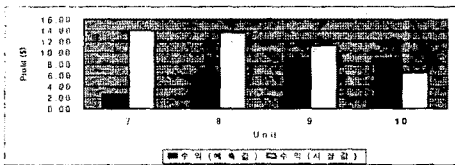


그림 3 예측된 가격과 실제 시장가격에서의 수익 비교
Fig. 3 Comparison of Profits between Estimated Market Price and Real Market Price

상기 그림은 발전기 7, 8, 9, 10을 기준으로 예측된 시장가격과 실제 시장가격을 기준으로 수익을 각기 비교한 것이다. 아래의 그림에서 보는 바와 같이 시장 가격

예측의 정확도 발전기의 수익을 결정하는 주된 요소임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 모든 발전기가 자신의 한계비용으로 입찰가격을 결정하는 경우, 특정시간대의 현물시장에서 독립 발전기가 수익을 극대화할 수 있는 입찰 전략인 최적 입찰물량을 결정하는 방법론을 제시하였으며 그 의미를 해석하였다. 특정 발전기의 입찰전략, 즉 최적 입찰물량의 결정은 각 발전기가 예측하는 현물시장가격에 따라서 달라지며, 예측 시장가격이 정확할 수록 발전기의 기대이윤은 더욱 높아진다. 예측 시장가격이 특정 발전기의 최대출력에서의 한계비용보다도 높아지게 되면, 최대출력으로 입찰하는 것이 이윤을 극대화하는 것이며, 예측 가격이 특정 발전기의 최소출력의 한계비용보다도 낮아지면 최소출력으로, 예측 가격이 특정 발전기의 최대출력과 최소출력에서의 한계비용 내부에 있으면 그 사이의 최적 물량으로 입찰하여야 한다. 본 연구에서는 예측된 시장가격을 주어진 값으로 가정하였지만 향후에는 이를 확률적으로 취급하는 방법론이 개발되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2001학년도 건국대학교 신입교원연구비 지원에 의한 논문입니다.

(참 고 문 헌)

- [1] F. Nishimura, R. D. Tabors, M. D. Ilic, and J. R. Lacalle-Melero, "Benefit Optimization of Centralized and Decentralized Power Systems in a Multi-Utility Environment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 1180-1186, August 1993.
- [2] A. Maeda and Y. Kaya, "Game Theory Approach to Use of Non-Commercial Power Plants Under Time-Of-Use Pricing", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 1052-1059, August 1992.
- [3] R. W. Ferrero, S. M. Shahidehpour, and V. C. Ramesh, "Transaction Analysis in Deregulated Power Systems Using Game Theory", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 3, pp. 1340-1347, August 1997.
- [4] R. W. Ferrero, J. F. Rivera, and S. M. Shahidehpour, "Application of Games with Incomplete Information for Pricing Electricity in Deregulated Power Pools", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 1, pp. 184-189, Feb. 1998.
- [5] 박종배, 정만호, 김발호, 정정원, "경쟁적 전력시장에서의 전력거래분석에 대한 게임이론 접근 연구", 1999 대한전기학회 학술회의, 논문집 C, pp. 1344-1346, 1999년 7월.
- [6] 박만근, 김발호, 박종배, 정만호, "게임이론을 적용한 전력거래 해석", 전기학회논문지A, 제49권, 제6호, pp. 266-271, 2000년 6월.
- [7] S. Hao, "A Study of Basic Bidding Strategy in Clearing Pricing Auctions", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 975-980, August 2000.
- [8] O. N. Irene, M. Claudia, B. Carlos, J. A. Juan, "A Simulation Model for a Competitive Generation Market", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 1, pp. 250-256, February 2000.
- [9] Steven E. Landsburg, Price Theory and Applications, West Publishing Company, 1995.
- [10] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, Inc., 1996.