

PBP(Price Based Pool) 발전경쟁시장에서의 최적입찰전략수립

강 동 주 문 영 환 오 태 규 김 발 호*
 한국전기연구원 홍익대학교*

Optimal Bidding Strategy of Competitive Generators under Price Based Pool

Kang, Dong-Joo Moon, Young-Hwan Oh, Tae-Kyoo Kim, Balho*
 KERI Hong-ik University*

Abstract - The restructuring of power industry is still going on all over the world for last several decades. Many kinds of restructuring model has been studied, proposed, and applied. Among those models, power pool is more popular than others. This paper assumes the power pool market structure having competitive generation sector, and a new method is presented to build bidding strategy in that market. The utilities participating in the market have the perfect information on their cost and price functions, but they don't know the strategy to be chosen by others. To define one's strategy as a vector, we make utility's cost/price function into discrete step function. An utility knows only his own strategy, so he estimates the other's strategy using stochastic methods. For considering these conditions, we introduce the Bayesian rules and noncooperative game theory concepts. Also additional assumptions are included for simplification of solving process. Each utility builds the strategy to maximize his own expected profit function using noncooperative Bayesian game. A numerical example is given in case study to show essential features of this approach.

1. 서 론

과거 수십년 동안 전 세계에 걸쳐 많은 나라들이 전력산업 구조개편을 수행해오고 있으며, 기존의 수직 통합적 독점체제를 경쟁체제로 바꾸고 있다. 나라별로 수많은 구조개편모델이 제안되고 시도되어 왔지만 그 중에서도 가장 보편적인 모델은 풀(Pool) 형태의 전력시장구조이다. 풀 체제에서는 공급자가 자신의 한계비용을 고려하여 입찰에 응하게 되며, 그 결과에 의해 투입 발전순서가 결정된다[1]. 입찰의 방식에 따라 크게 세 가지 모델로 구분할 수 있는데, 한계비용을 그대로 입찰가격으로 적용시키는 경우 CBP(cost based pool)가 되며, 발전업자의 이득을 일정량 부가하여 요금(price) 방식을 적용하는 방식을 PBP(price based pool)라 한다. 그리고 마지막으로 발전업자와 수요가 양측이 동시에 입찰에 의해 공급곡선과 수요곡선이 만나는 지점에서 시장가격과 공급량을 결정하는 방식을 양방향입찰 전력시장, TWBP(two way bidding pool)라 한다. 우리나라의 경우 현재 한전전력거래소(KPX)에서 CBP를 운영 중이며 궁극적으로 TWBP를 지향한다. 하지만 그 전에 발전사업 부문에 우선적으로 경쟁체제를 도입하는데 이 때 PBP를 적용하기로 되어있다. 이 경우 민영화된 다수 발전사업자들은 KPX의 주관하에 입찰에 응하게 되며, 개별 발전사업자들은 각자의 이득을 극대화하기 위해 상대방의 전략을 예측하고 그에 따른 자신의 전략을 수립하여 입찰에 응하게 될 것이다.

2. 본 론

본 논문에서는 발전업자의 비용함수를 불연속적인 계단 함수형태로 정의한다. 발전사업자는 임의의 G_n (MW)을 발전하는데 들어가는 비용 C_n 에 자신의 이득 성분을 더하여 P_n 으로 입찰에 응하게 된다. 그리하여 그림 1과 같이 발전비용함수 $C(G_n)$ 에 대응하는 입찰요금함수 $P(G_n)$ 이 유도된다. 본 논문에서 비용함수와 요금함수를 불연속함수로 설정한 것은 발전사업자의 입찰전략을 (G_n (발전량), P_n (입찰가격))의 벡터 형태로 정의하기 위해서이다. 이 경우 발전사업자의 이득함수를 $PF_n(G_n) = \rho_{MCP}G_n - C_n(G_n)$ 로 표현할 수 있다. 여기서 ρ_{MCP} 는 시장체결가격(Market Clearing Price)으로서 입찰에 참여한 발전사업자들이 제시한 가격 중 가장 높은 값으로 결정된다[2]. 불연속적인 비용·요금 함수와 더불어 문제의 단순화를 위해 기본적으로 다음과 같은 가정을 부여한다.

- 1) 한계입찰가격($dP_n/dG_n \equiv P_n/G_n$)은 계통에 투입되는 두 사업자의 불연속적인 n 번째 투입 단위를 통틀어서 P_n/G_n 이 가장 높은 값으로 정의한다.
- 2) 한계입찰가격이 작은 발전사업자가 계통 투입의 우선권을 가진다.
- 3) 두 사업자는 서로 상대방의 선택 가능한 전략들에 대한 정보를 가진다. 하지만, 구체적으로 어떤 특정 전략을 선택할 지에 대해서는 알지 못한다. 즉, A사업자는 B사업자가 $S'_B, S''_B, \dots, S^*_B$ 의 선택 가능한 전략들을 가지고 있음을 알 수 있지만, 그 n 개의 전략 중 어느 전략을 선택할 지에 대해서는 확실하게 알 수 없고 확률적으로 추정할 뿐이다.
- 4) 게임이론에서의 내쉬균형공리에 의하면 두 사업자는 입찰 게임에 있어서 i) 자신의 이득 극대화를 위해 최선의 전략(best response strategy)을 택하고 ii) 자기 예상실현의 특성(self-fulfilling property)에 의해 상대방의 전략을 추정하여 자신의 전략을 결정하게 되지만 [3]. 본 논문에서는 해석의 편의를 위해 두 사업자가 공히 자신의 n 개 전략들에 대한 선택에 있어 동일한 확률($1/n$)로 선택한다고 가정한다.
- 5) 입찰 참여 발전사업자가 2인이라고 가정하였기 때문에 두 사업자의 입찰 발전량의 합 $G^*_A + G^*_B$ 이 계통전체부하 D_n 보다 작은 경우($G^*_A + G^*_B < D_n$) 나머지 부하량은 제 3의 발전업자가 시장가격으로 공급한다고 가정한다.
- 6) 반대로 $G^*_A + G^*_B > D_n$ 인 경우 계통투입순서 두 번째 발전사업자는 첫 번째 발전사업자가 발전하고 남은 부하를 할당받게 된다.
- 7) G_n (MW)의 입찰가격 P_n 은 G_{n+1} (MW)의 비용 C_n 보다 작은 값을 가진다($P_n < C_{n+1}$).

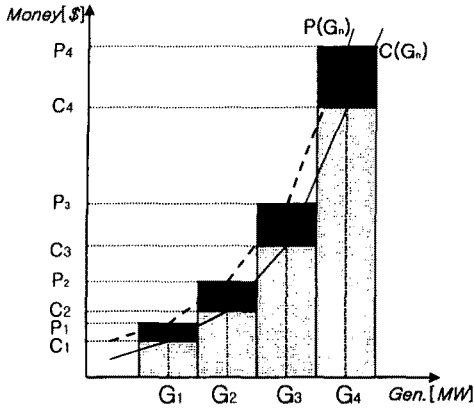


그림 1 불연속적 발전비용함수와 판매요금함수

G_n : 발전량(MW)
 C_n : G_n (MW)의 발전비용(\$)
 P_n : G_n (MW)의 판매가격(\$)
 $C(G_n)$: G_n 에 대한 발전비용함수
 $P(G_n)$: G_n 에 대한 판매요금함수

경쟁적 입찰 상황을 연출하기 위해 두 발전사업자의 비용·요금 함수를 다음과 같이 설정한다(4).

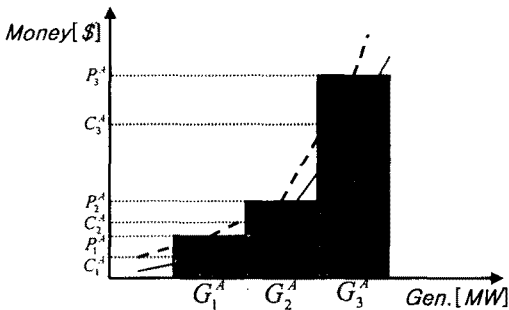


그림 2 A사업자의 비용·요금 함수

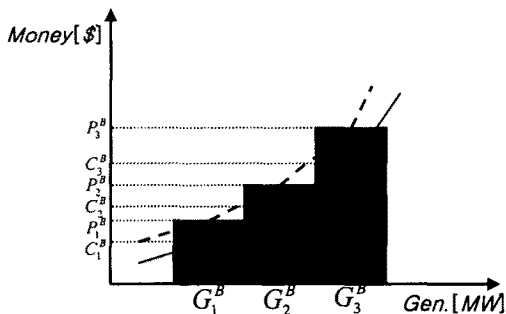


그림 3 B사업자의 비용·요금 함수

A사업자의 전략을 $S_A^1 = (G_A^1, \rho_A^1)$, $S_A^2 = (G_A^2, \rho_A^2)$, $S_A^3 = (G_A^3, \rho_A^3)$. B사업자의 전략을 $S_B^1 = (G_B^1, \rho_B^1)$, $S_B^2 =$

(G_B^2, ρ_B^2) , $S_B^3 = (G_B^3, \rho_B^3)$ 로 표현한다. 여기서 ρ_A^1 , ρ_B^1 은 두 A, B 사업자의 한계입찰가격을 나타낸 것으로 P_A^1/G_A^1 , P_B^1/G_B^1 로부터 각각 구할 수 있다. 두 사업자의 개별 3가지 전략에 대한 대응 관계와 그에 따른 이득 관계를 다음과 같은 표로 정리할 수 있다.

	S_B^1	S_B^2	S_B^3
S_A^1	(PF_A^{11}, PF_B^{11})	(PF_A^{12}, PF_B^{12})	(PF_A^{13}, PF_B^{13})
S_A^2	(PF_A^{21}, PF_B^{21})	(PF_A^{22}, PF_B^{22})	(PF_A^{23}, PF_B^{23})
S_A^3	(PF_A^{31}, PF_B^{31})	(PF_A^{32}, PF_B^{32})	(PF_A^{33}, PF_B^{33})

표 1 대응 전략별 기대 이득

여기서 (PF_A^i, PF_B^j) 는 A, B 사업자의 각 전략별 대응 이득벡터를 나타내며 i 는 A사업자의 전략을 j 는 B사업자의 전략을 나타낸다. 입찰의 결과 A사업자의 한계입찰가격이 B사업자보다 낮은 값을 가진다면 A사업자가 발전 투입의 우선권을 가지게 되며 PF_A^i 와 PF_B^j 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[PF_A^i = \rho_{MCF} G_i - C_i(G_i), \quad PF_B^j = \rho_{MCF} G_j - C_j(G_j)]$$

여기서 n 은 총부하를 공급하기 위해 불연속적($n=1, 2, \dots, k$)으로 투입되는 마지막 단위 발전량을 가리키는 지수이다($i=1, 2, \dots, l; j=1, 2, \dots, m; l+m=n$)

예를 들어 표 1에서 제 1행 1열의 (PF_A^{11}, PF_B^{11}) 은 A사업자가 S_A^1 , B사업자가 S_B^1 의 전략을 선택했을 경우의 두 사업자가 획득하게 되는 이득(profit) 벡터이다. A사업자가 3가지 선택 가능한 전략들 중의 어느 하나를 구사할 경우 얻게 되는 이득은 B사업자의 개별 전략에 대한 이득(profit) 기대치의 합으로 구할 수 있다. 그러므로 A사업자가 S_A^1, S_A^2, S_A^3 의 전략을 선택하였을 경우의 이득 기대치는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 PF_A^1 &= PF_A^{11} P(S_B^1 | S_A^1) + PF_A^{12} P(S_B^2 | S_A^1) + PF_A^{13} P(S_B^3 | S_A^1) \\
 PF_A^2 &= PF_A^{21} P(S_B^1 | S_A^2) + PF_A^{22} P(S_B^2 | S_A^2) + PF_A^{23} P(S_B^3 | S_A^2) \\
 PF_A^3 &= PF_A^{31} P(S_B^1 | S_A^3) + PF_A^{32} P(S_B^2 | S_A^3) + PF_A^{33} P(S_B^3 | S_A^3)
 \end{aligned}$$

B사업자의 경우도 마찬가지로

$$\begin{aligned}
 PF_B^1 &= PF_B^{11} P(S_A^1 | S_B^1) + PF_B^{12} P(S_A^2 | S_B^1) + PF_B^{13} P(S_A^3 | S_B^1) \\
 PF_B^2 &= PF_B^{21} P(S_A^1 | S_B^2) + PF_B^{22} P(S_A^2 | S_B^2) + PF_B^{23} P(S_A^3 | S_B^2) \\
 PF_B^3 &= PF_B^{31} P(S_A^1 | S_B^3) + PF_B^{32} P(S_A^2 | S_B^3) + PF_B^{33} P(S_A^3 | S_B^3)
 \end{aligned}$$

의 식들로 표현 가능하다(5). 두 사업자는 선택 가능한 3개의 전략을 동일한 확률 1/3로 선택하게 되므로 그에 따라 이득 기대치가 가장 높은 임의의 전략 S_A^* , S_B^* 을 선택하게 되며 그 두 전략의 교차점 (S_A^*, S_B^*) 가 이 입찰 게임에서의 균형점이 된다. 내쉬 균형 이론의 공리를 엄격히 적용할 경우 두 사업자는 표 1의 대응전략별 기대 이득의 결과를 가지고 합리성에 근거하여 서로 상대방의 전략을 예측하며 자신의 최선전략을 탐색하는 과정을 거치게 되지만(3), 본 논문에서는 해석의 편의를 위한 가정 4)에 의해 두 사업자가 공히 세 가지 전략에 대한 동일한 선택 의지를 가지게 되므로 기댓값이 가장 높은 전략을 기계적으로 선택하게 되는 의사 결정 알고리즘으로 설정하였다.

3. 사례 연구

임의의 두 발전사업자 A, B의 비용·요금 함수를 다음과 같이 정의한다.

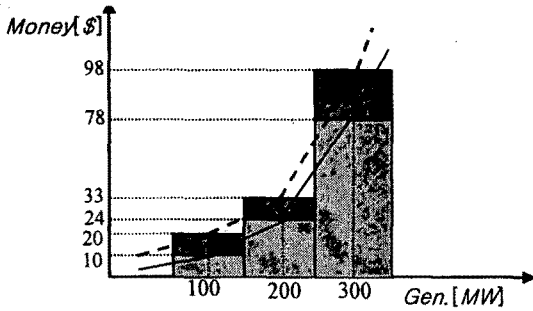


그림 4 A 발전사업자

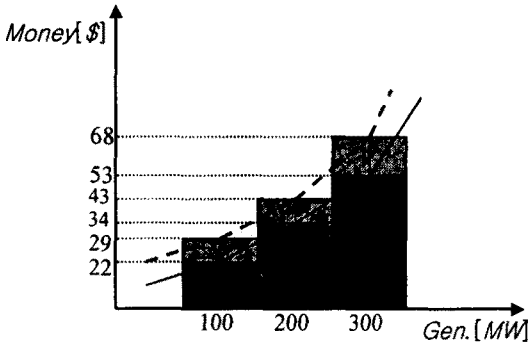


그림 5 B 발전사업자

2절 본문 표 1과 같이 두 사업자의 대응 전략별 기대 이득을 계산하여 표로 정리하면 다음과 같다. 단 계산의 편의를 위해 두 사업자가 자신의 선택 가능한 세 가지 전략 중 하나를 택하는 확률은 1/3로 통일한다.

$S_A \backslash S_B$	(100, 0.290)	(200, 0.215)	(300, 0.227)
(100, 0.200)	(6.33, 2.33)	(3.83, 3.00)	(4.23, 3.80)
(200, 0.165)	(11.33, 2.33)	(6.33, -0.17)	(7.13, 0.23)
(300, 0.327)	(2.90, 3.33)	(7.57, 10.47)	(0, 15.3)

표 2 사례연구의 대응 전략별 기대 이득

A, B 두 사업자의 세 가지 전략별 ($i, j=1,2,3$) 이득 S_A^i, S_B^j 를 각각 $\sum_{j=1}^3 S_A^i, \sum_{i=1}^3 S_B^j$ 에 의해 구하여 표 3에 정리하였다.

$S_A \backslash S_B$	S_B^1	S_B^2	S_B^3	
S_A^1	(6.33, 2.33)	(3.83, 3.00)	(4.23, 3.80)	4.80
S_A^2	(11.33, 2.33)	(6.33, -0.17)	(7.13, 0.23)	8.10
S_A^3	(2.90, 3.33)	(7.57, 10.47)	(0, 15.3)	3.49
	2.66	4.33	6.44	

표 3 A, B의 전략별 이득

2절 본문의 시작 가정 4)에서 명시한 대로 이 세 전략은 동일한 1/3 확률로 선택한다 가정하였으므로 이 게임의 균형점 (S_A^0, S_B^0)를 결정할 수 있다.

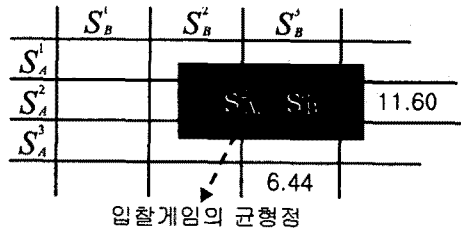


그림 6 균형점의 결정

4. 결 론

이제까지 본 논문에서는 경쟁적 발전 시장에서 두 명의 발전사업자를 가정하고 그 두 사업자가 발전입찰경쟁에서 서로 경쟁하게 되는 상황을 설정하여 비협조 게임을 적용·해석하였다. 발전사업자의 선택 가능한 전략을 규정하기 위해 발전비용·요금함수를 계단함수형태로 도입하였으며, 해석의 편의를 위해 전략의 두 가지 선택사항인 발전량 G_n 과 입찰가격 p_n 을 1:1 함수 형태로 대응시켜 전략의 개수를 최소화하였다. 본 논문의 초점은 발전비용·요금 함수에 근거하여 전략을 규정하고 다수의 선택 가능한 전략에 대한 확률개념을 적용, 베이저안 게임으로 정식화하는데 있기 때문에 부가적으로 몇 가지 가정을 적용하였고 이는 향후 연구에서 보완해 나가야 할 측면이다. 또한 연구를 계속 진행하여 n 명 상황, 연속적 비용·요금 함수를 도입하여 보다 일반적인 해석 도구로서 발전시킬 계획이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 박종근, 김발호, 박종배, 정도영 "전력산업구조개편개론", 기초전력공학공동연구소, pp. 3-35, 2000
- [2] Fusahuan Wen and A. Kumar David, "Optimal Bidding Strategy and Modeling of Imperfect Information Among Competitive Generators", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 16, No. 1, pp. 15-21, February 2001
- [3] 박주현, "게임이론의 이해", 도서출판 해남, pp. 50-58, 1998
- [4] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg "Power Generation, Operation, and Control", Wiley, pp. 49-50, 1996
- [5] Sheldon Ross, "Stochastic Processes", Wiley, pp. 33-35, 1996