

불완전정보 전력거래 해석을 위한 게임이론의 적용

강동주* 박만근 김발호 박종배
 홍익대학교* 인양대학교

An Application of Game theory to Power Transactions under Incomplete Information

Kang, Dong-Joo* Park, Man-Guen Kim, Balho Park, Jong-Bae
 Hongik University* Anyang University

Abstract - This paper presents a game theory application for analyzing power transactions and market design in a deregulated energy marketplace such as PoolCo. The conventional least-cost approaches for the generation resource schedule can not exactly handle recent real-world situations. A systematic tool using game theory for the market participants is presented such that it determines the net profits through the optimal bidding strategies including the strategies for the bidding prices and bidding generations. We treat this power transaction game as incomplete information one, which means each market participants does not know other's cost function. And the demand elasticity of the energy price is considered for the realistic modeling of the deregulated marketplace.

1. 서론

규제완화가 전력시장에 현실화되면서 이 새로운 환경에서의 계통운영의 효율성을 극대화하기 위한 방안이 당면 과제로 떠오르게 되었다. 또한 경쟁체제로 전환된 전력시장에 참가한 발전사업자나 공급업자는 계통전체의 비용 최소화보다는 자신의 이익을 극대화하는 것에 관심을 집중하게 된다[1,2]. 경쟁체제로 전환된 시장모형은 전력푸울(Pool), 쌍방거래모형(bilateral model), 그리고 양자의 혼합형 세 가지가 있지만, 본 논문에서는 개방된 시장구현을 위해 푸울모형을 채택하기로 한다

2. 개방된 전력시장에서의 전력거래

2.1 전력거래 게임

본 논문에서는 시장에 참가한 전력회사간에 협조가 없는 비협조적인 게임상황과 이 비협조게임에 대한 Nash 균형 개념을 도입하였다. 즉 전력 Pool 내에서 시장참가자 간의 전력거래는 시장참가자 자신들의 이익 극대화를 추구한다는 측면에서 이 비협조적게임이 적용 가능하며, 이러한 문제를 본 논문에서는 전력거래게임이라고 명기했다. 이 게임에서 시장참가자가 높게 입찰하거나 낮게 입찰하는 것들은 전략(price & generation bidding strategies)으로 정의된다. 또한 입찰이 전력 시장에서 무한 반복되어 시장참가자들은 상대의 비용합수에 대한 정확한 정보는 아니지만 각 발전사업자에 대한 타입을 알고 있게 된다. 즉 확률분포에 대한 정보는 가지고 있게 되므로, 이 게임을 불완전정보게임

(incomplete information game)으로 생각할 수 있으며, 전력거래를 통한 경제적 이익인 보상(payoff)에 대한 정보는 알 수 없게 된다[3,4].

2.2 게임이론의 적용

경쟁체제인 전력시장에 게임이론을 적용하기 위해 아래와 같이 몇 가지 가정을 두기로 한다.

- 전력시장에 참여하는 발전사업자들이 입찰한 전력량이 계통전체부하를 공급할 수 있는 충분한 양이어서 시장에서는 전력의 부족 현상이 절대 나타나지 않는다.
- 현물시장에는 부하를 공급하는 둘 또는 그 이상의 시장참가자가 존재한다.
- 시장에서 전력가격에 대한 탄력성이 고려되어 가격에 대해 전력수요가 변동된다. 이러한 시장모형은 초기 전력시장 개방형태인 발전부문에서만 경쟁하는 형태에서 한 단계 진보된 전력시장모형에 적용가능하며, 실제 전력시장에 보다 가깝게 접근한 형태라고 할 수 있다.
- 송전손실과 계통혼잡 같은 계통 제약조건은 본 연구에서는 무시된다.
- 시장에 참가한 발전사업자의 비용함수에 대한 정보는 공개되지 않는다. 따라서 전력시장을 불완전정보게임으로 구현해야 함을 의미한다. 이러한 불완전한 정보 상황은 거의 대부분의 구조개편된 나라들에서 나타나는 상황이며 경쟁체제하에서 볼 때 상대에게 자신의 정보를 공개하지 않는 것은 당연하다.

상대비용함수에 대한 확률적 평균을 Bayes rule을 적용해서 상대방의 타입(type)을 먼저 결정하게 되면 정형화된 형태의 게임으로 변환할 수 있게 된다. 이렇게 되면 완전정보게임에서와 마찬가지로 Nash 균형개념을 도입해서 전력거래를 해석할 수 있다. 여기서 타입(Type)은 각 발전사업자가 추정하고 있는 타 발전사업자의 비용합수의 형태로 정의된다.

- 발전사업자 j 가 추정하고 있는 발전사업자 i 의 타입

$$T_{j-i}^n = C_i^n(P_i) = a_i^n + b_i^n P_i + c_i^n P_i^2$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$$

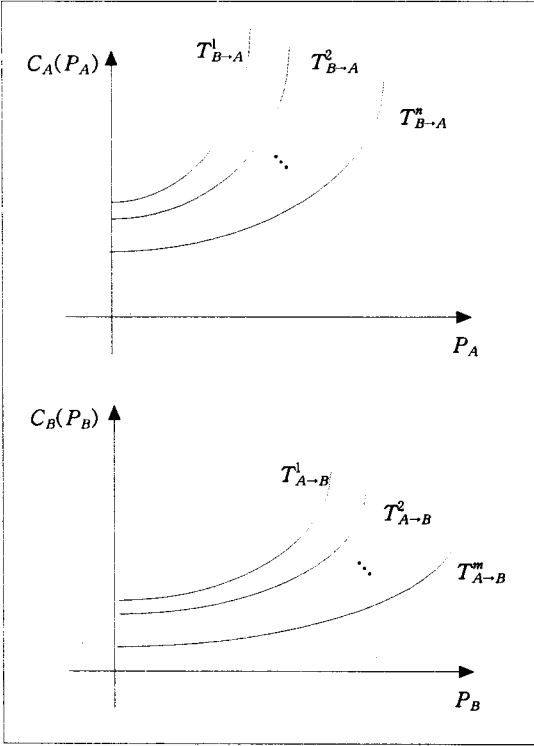
- 발전사업자 (i)의 시간 t 에서의 이득

$$PF_{i,t} = \rho_t P_{i,t}^{\text{allocated}} - C_i(P_{i,t}^{\text{allocated}})$$

ρ_t : 시간 t 에서의 현물가격 (spot price)

$P_{i,t}^{\text{allocated}}$: 발전사업자 i 에게 시간 t 에 할당된 발전량

- 시간 t 에서의 수요탄력성을 고려한 전력수요
 $D_t = D_0 - S\rho_t$



[그림 1] 발전사업자 A, B의 타입

2.3 2개 발전사업자가 참가하는 전력시장 분석

- 발전사업자 B가 추정한 A의 각 타입에 대한 확률

$$\begin{aligned} Pr(T_{B-A}^1) &= Pr_A^1 \\ Pr(T_{B-A}^2) &= Pr_A^2 \\ &\vdots \\ Pr(T_{B-A}^m) &= Pr_A^m \quad (\text{단, } Pr_A^1 + Pr_A^2 + \dots + Pr_A^m = 1) \end{aligned}$$

- 발전사업자 A가 추정한 B의 각 타입에 대한 확률

$$\begin{aligned} Pr(T_{A-B}^1) &= Pr_B^1 \\ Pr(T_{A-B}^2) &= Pr_B^2 \\ &\vdots \\ Pr(T_{A-B}^m) &= Pr_B^m \quad (\text{단, } Pr_B^1 + Pr_B^2 + \dots + Pr_B^m = 1) \end{aligned}$$

- 상대 발전사업자의 비용함수 추정

$$\begin{aligned} m(T_{B-A}) &= \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m Pr(T_{B-A}^i | T_{A-B}^k) T_{B-A}^i \\ m(T_{A-B}) &= \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m Pr(T_{A-B}^i | T_{B-A}^k) T_{A-B}^i \end{aligned}$$

타입이 서로 독립사건임을 가정하고 정리하면,

$$m(T_{B-A}) = \sum_{i=1}^m Pr_A^i a_A^i + \left(\sum_{i=1}^m Pr_A^i b_A^i \right) P_A + \left(\sum_{i=1}^m Pr_A^i c_A^i \right) P_A^2$$

이고, 여기서,

$$a_A^i \triangleq \sum_{k=1}^m Pr_A^k a_A^i$$

$$b_A^i \triangleq \sum_{k=1}^m Pr_A^k b_A^i P_A$$

$$c_A^i \triangleq \sum_{k=1}^m Pr_A^k c_A^i P_A^2 \quad \text{이면,}$$

$$m(T_{B-A}) = a_A^i + b_A^i P_A + c_A^i P_A^2 \quad (1)$$

와 같이 정의된다.

마찬가지로 B의 경우는 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$m(T_{A-B}) = a_B^i + b_B^i P_B + c_B^i P_B^2 \quad (2)$$

이렇게 해서 두 발전사업자는 상대의 비용함수에 대한 확률적 평균값을 알게 되어 확실한 자신의 비용함수와 상대에 대한 확률적 평균값을 가지고 불완전 정보게임을 정형화된 형태로 변화해서 Nash 균형 개념을 적용할 수 있게 된다. 일반적인 시장에서는 재화의 생산량이 시장가격에 따라 탄력성을 갖게 되는데 전력수요도 마찬가지로 시장가격에 따라 결정되게 된다. 두 사업자가 입찰하는 가격에 따라 $\rho_A > \rho_B$, $\rho_A < \rho_B$, $\rho_A = \rho_B$ 의 3가지 경우로 나누어 생각할 수 있다.

- 1) Case 1: $\rho_A > \rho_B$

$$\begin{aligned} \text{A의 전략: } & (\rho_A = K, D_t - \frac{\rho_A - b_B}{2c_B}) \\ & (\rho_B < \rho_A \leq \frac{2D_0 c_B'' - b_B''}{2S c_B'' + 1}) \end{aligned}$$

$$\text{B의 전략: } (\rho_B < \rho_A, \frac{\rho_A - b_B}{2c_B})$$

- 2) Case 2: $\rho_B > \rho_A$

$$\text{A의 전략: } (\rho_A < \rho_B, \frac{\rho_B - b_A}{2c_A})$$

$$\text{B의 전략: } (\rho_B = K', D_t - \frac{\rho_B - b_A}{2c_A})$$

$$(\rho_A < \rho_B \leq \frac{2D_0 c_A' - b_A'}{2S c_A' + 1})$$

- 3) Case 3: $\rho_A = \rho_B$

이 때는 일반적으로 균형점을 찾을 수 없게 된다. 같은 입찰가를 제시한 두 발전사업자 중 한 사업자는 입찰가를 변화시키지 않고 한 발전사업자가 입찰가를 소폭으로 낮추어 입찰할 경우 이득이 더 발생한다면 균형점은 존재하지 않게 된다.

3. 사례연구

시장에 참가한 발전사업자가, 수요가 정해지지 않고 상대 비용함수에 대한 비용함수를 모르는 상태에서 균형전략을 도출하는 과정을 구체적 사례로 검증해 보았다.

시장참가자	비용계수			발전량 한계	
	a_i [\$/h]	b_i [\$/MWh]	c_i [\$/MW ² h]	최소 [MW]	최대 [MW]
A 사업자	0	6.0	0.22	10	250
B 사업자	0	2.0	0.42	20	200

표 1. 발전사업자 A, B의 비용계수

발전사업자 A의 타입	비용계수			타입에 대한 확률
	a_A [\$/h]	b_A [\$/MWh]	c_A [\$/MW ² h]	
T_A^1	0	5.0	0.19	1/4
T_A^2	0	6.0	0.22	1/2
T_A^3	0	7.0	0.27	1/4

시장참가자	비용계수			발전량 한계	
	a_A' [\$/h]	b_A' [\$/MWh]	c_A' [\$/MW ² h]	최소 [MW]	최대 [MW]
$m(T_A)$	0	5.5	0.225	10	250

표 2. B가 추정하고 있는 A의 타입과 확률적 평균

발전사업자 A의 타입	비용계수			타입에 대한 확률
	a_B [\$/h]	b_B [\$/MWh]	c_B [\$/MW ² h]	
T_B^1	0	1.5	0.41	1/5
T_B^2	0	2.0	0.42	3/5
T_B^3	0	3.0	0.47	1/5

시장참가자	비용계수			발전량 한계	
	a_B'' [\$/h]	b_B'' [\$/MWh]	c_B'' [\$/MW ² h]	최소 [MW]	최대 [MW]
$m(T_B)$	0	2.1	0.428	20	200

표 3. A가 추정하고 있는 B의 타입과 확률적 평균

시장수요함수 $D_t = D_0 - S\rho_t$ 의 계수에 대한 정보는 지속적인 게임을 통해 시장참가자들에게 공개되는데 여기에서는 다음과 같이 가정하였다.

$$D_0 = 450$$

$$S = 1.5$$

1) Case 1: $\rho_A > \rho_B$

	A's best response strategy	B's best response strategy
ρ_A	125.66	-
P_A, P_B	(115 , ·)	(· , 147)
D_t	262	
PF_A, PF_B	(10,851.5 , 9,102.24)	

표 4. 발전사업자 A,B의 전략설정에 따른 균형점

2) Case 2 : $\rho_B > \rho_A$

	A's best response strategy	B's best response strategy
ρ_B	-	99.28
P_A, P_B	(212 , ·)	(· , 89)
D_t	301	
PF_A, PF_B	(9,887.6 , 85,331.1)	

표 5. 발전사업자 A,B의 전략설정에 따른 균형점

전력산업은 급속한 규제완화를 통해 완전경쟁체제로의 전환이 모색되고 있다. 시장경쟁 논리의 적용은 전력시장에 참가한 시장참가자들의 이익 극대화라는 명백한 명제를 대두시킨다. 이 시점에서 보다 체계적인 의사 결정 수단으로서 게임이론이 적용될 수 있음을 본 논문의 사례연구를 통해서 보였다.

그리고 시장수요를 가격에 반응하도록 탄력성을 부여하여 실제 상황에 더욱 근접한 분석을 할 수 있었으며, 완전한 경쟁체제가 확립된 상황에서 무한 반복되는 게임을 통해 상대에 대한 전략적인 정보 즉, 상대방 비용함수의 확률분포에 대한 정보를 가진 불완전 정보상황을 고려하여 전력시장을 해석하였다. 이러한 해석방법은 자신의 이익 극대화를 추구하는 발전회사들이 상대에게 자신의 비용함수를 공개하지 않을 것은 명백하므로 경쟁적 전력시장에서의 전력거래 해석에 유력한 대안으로 사려된다.

마지막으로 상대방 비용함수의 추정에 있어서 '연속적인 확률분포'를 적용하는 방안과, 동적게임이론(Dynamic Game Theory)[3,4]을 적용한 시장해석과 다수의 시장참가자가 있는 상황에서의 균형점 도출 등이 향후 연구에 추가될 것이다.

5. 참고문헌

- [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 Trans. on PWRS*, Vol. 8, No. 3, pp.1180-1186, Aug, 1993.
- [2] Hugh Rudnick, Pioneering Electricity Reform in South America, *IEEE Spectrum*, pp. 38-44, Aug. 1996.
- [3] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game Theory*, Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1991.
- [4] H.S. Bierman and L. Fernandez, *Game Theory with Economic Applications*, Addison-Wesley, 1998.