1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1999. 7.19-21

경쟁적 전력시장에서의 전력거래 분석에 대한 게임이론접근 연구

박 종 배*, 정 만 호**, 김 발 호§, 정 정 원§§
* 안양대학교 전기전자공학과, ** 한국전력공사, § 홍익대학교 전기전자공학과, §§ 경성대학교 전기전자공학과

A Game Theoretic Study on Power Transactions Analysis in a Competitive Market

Jong-Bae Park*, Man-Ho Joung**, Balho Kim§, Jung-Won Jung§§
* Anyang University, ** Korea Electric Power Corporation, § Hongik University, §§ Kyungsung U

Abstract - This paper presents a game theoretic approach for power transactions analysis in a competitive market. The considered competitive power market is regarded as PoolCo model, and the participating players are restricted by only two generating entities for simplicity in this paper. The analysis is performed on the basis of marginal cost based relations of bidding price and bidding generations. That is, we assume that the bidding price of each player is determined by the marginal cost when the bidding generation is pre-determined. This paper models the power transaction as a two player game and analyzes by applying the Nash eauilibrium idea. The generalized game model for power transactions covering constant-sum(especially zero-sum), and nonconstant-sum game is developed in this paper. Also, the analysis for each game model are performed in the case studies. Here, we have defined the payoff of each player as the weighted sum of both player's profits.

1. 서 론

현재, 전 세계의 전력산업은 큰 변혁기에 직면하고 있다. 즉, 규모의 경제에 기초한 기존의 수직통합 독점형 전력산업 체제에서 기능 분할에 기초한 시장경쟁 체제로 변화하고 있다. 이러한 전세계적인 전력산업 구조 개편의 추진 근본 배경에는 전력을 공공재로 인정하던 기존의 개념과는 달리 전력 또한 대부분의 사용재와 마찬가지로 소비자의 상품 선택 권리를 보장하고자 하는데 있다. 전력산업에의 경쟁 도입은 생산 및 판매 부문의 효율성 제고를 통한 전기 요금의 감소, 전기사업자의 비용 감소 및 합리적 이윤 보장을 통한 국가적 에너지 자원의 최적 배분, 발전시장에의 민간 자본 및 해외 자본 유치를 통한 리스크의 분배 등의 부가 이익을 가져올 것으로 기대된다.

이러한 경쟁적 전력시장에서의 계통운용은 과거와는 매우 다른 형태가 될 것이다. 기존의 비용최소화 측면에서의 계통운용은 어떤 발전회사가 독점적 위치에 있을 때, 즉 모든 발전기를 소유하고 있을 때에만 의미가 있고, 경쟁적 전력시장에서는 복수개의 발전회사들이 각자의 이득의 최대화에만 유일한 관심을 보일 것으로 전망된다. 따라서, 각 발전사업자는 각자의 최대이득을 보장하는 발전전력을 시장에 팔려고 시도할 것인데, 이러한 상황을 기존의 수학적 최적화 이론에 기초하여 모델링하는 것에는 많은 한계점을 가지고 있다.

미시경제학 분야에서 고전적 독과점 이론에 대한 새로운 접근법으로서 제시된 게임이론(game theory)은 그 응용이 점점 확산되어 가고 있는 추세이다.[1] 최근 들어 경쟁적 전력시장에서의 상황을 모델링하기 위하여 게임이론을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. A.Haurie 등[3]은 전력회사와 소규모 열병합발전소와의 전력거래를 2인 게임모형으로 분석하였고 A. Maeda 등[4]은 전력회사와 비상업적 발전소(non-commercial power plant)와의 거래 요금 결정을 위하여 게임 이론을 적용한 바 있다. 또한, R.W.Ferrero 등[5]은 경쟁적 전력시장 상황에서의 가격 결정 메카니즘을 게임이론을 이용하여 분석하였고 이를 통해 계통운용자(Pool coordinator) 또는 규제기관 등이 바람직한 방향으로 경쟁을 유도할 수 있는 방법론을 제시한 바 있다. 이들은 다른 연구를 통하여[6] 경쟁적 전력시장에서 경쟁자들에 대한 정보가 부족할 경우에서의 각 게임참여자들의 이득을 최대화할 수 있도록 하기 위하여 게임이론을 적용, 분석하였다.

일반적으로 게임이란[2], 두 명 이상의 참가자들이 자기의 최대 이익을 추구하면서 어느 누구도 혼자서는 그 결과를 도출해낼 수 없는 경쟁적 상황을 의미한다. 일반적으로 게임은 경기자(player), 전략(strategy), 그리고 게임의 보수(payoff) 등의 요소들로 구성된다. 경기자는 어느 한 개인 혹은 단체로 정의되며 전략을 결정하는 주체이다. 전략이란 참가자의 선택 변수로서 참가자가 취할 수 있는 행동을 의미한다. 또한, 게임의 보수란 각 경기자가 받는 이득의 크기를 나타낸다. 이는 각 경기자가 어떤 전략을 채택했느냐에 의하여 결정되며, 통상의 경우 보수는 효용 단위나 화폐 단위로 표시된다.

각 경기자의 보수의 합이 일정한 게임을 정합게임(constant-sum game)이라 하고, 반면에 각 경기자의 보수의 합이 일정하지 않은 게임, 즉, 각 경기자들이 전략을 변경할 때마다 보수의 합이 변할 경우를 비정합게임(nonconstatnt-sum game)이라고 한다. 또한 정합게임 중 각 경기자의 보수의 합이 영인 게임을 특별히 영합게임(zero-sum game)이라고 한다.

실제의 경제 현상을 게임이론으로 분석할 경우, 실제 상황을 그대로 반영하는, 즉 다수의 경기자를 모두 포함하여, 게임 모형을 분석하는 것은 매우 복잡하기 때문에 비교적 간단한 2인 게임(two player game)으로 모형화하여 분석한 후 경기자의 수를 확장시키는 것이 일반적이다. 본 논문에서도 2인 게임으로 전력거래를 분석하였지만 동일한 접근 방법론을 적용하면 경기자의 수가 늘어날 경우에도 분석이 가능하다.

본 논문에서는 PoolCo 모형에서의 전력거래를 2인 게임으로 모형화하여 분석하였다. 본 논문에서 제시된 게임 모형은 정합 게임과 비정합 게임을 모두 포함할 수 있도록 일반화하였고, 이는 각 경기자들의 보수함수를 각 경기자들의 경제적 이득에 대한 가중합으로 정의함으로써 가능하였다. 사례연구에서는 정합 게임과 비정합 게임의 경우에 대하여 내쉬 평형 개념을 적용하여 해를 도출하였다.

2. 게임의 정식화

2.1 전력거래 게임

본 논문에서는 풀코(PoolCo) 모형에서의 전력 거래를 분석하기 위하여 2인 게임이론을 적용하였다. 본 논문에

서 적용한 게임 모형에서는 각 시장 참여자(즉, 각 발전사업자)들은 게임의 경기자(player)들로, 각 참여자들의 입찰가격과 입찰전력량은 게임의 전략(strategy)으로 모형화하였다. 이때 입찰가격은 한계비용에 기초한다고 가정하여(이는 완전경쟁시장일 경우에 일치한다) 입찰가격과 입찰발전량이 서로 연관되는 것을 기준으로 분석하였다. 또한 각 경기자들의 수익(payoff)은 자기 자신의 경제적 이득과 상대편의 경제적 이득의 가중합으로 정의하였는데, 이는 전력거래 시장에서의 자신의 이득을 극대화하려는 의도와 동시에 상대방의 이득을 극소화하여 경쟁자를 시장에서 탈락시키고자 하는 의도를 목적함수에 반영한 것이다. 본 논문에서는 경기자의 수익으로 정의되는 자신의 이득과 상대방의 이득의 가중 합에 대한 가중치 결정을 통하여 게임의 특성을 반영하였다. 본 논문에서의 전력거래는 경기자들이 각자의 이득을 최대화하기 위하여 상호 경쟁하고, 각 경기자들의 수익에 대한 모든 정보가 경기자들에게 공개되는 비협조적 완전정보 게임(non-cooperative complete information game)으로 정식화하였고, 이를 전력거래 게임이라고 정의하였다. 또한 전력거래 게임에서의 해답은 비협조적 게임에서의 내쉬 평형으로 정의하였다.

2.2 전력거래 게임의 정식화

발전회사의 발전비용(단기변동비용)은 일반적으로 발전량에 대한 이차함수로 표시될 수 있고, 발전회사 i의 발전량을 P_i라고 하면 그 때의 비용함수는 아래와 같다.

$$C_i = C(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \qquad (1)$$

발전회사 i가 전력시장에서 단위 전력당 λ의 가격(즉, PoolCo 모형에서의 현물시장 가격이 λ로 결정된 경우)으로 P_i의 전력량을 판매하였을 때 얻어지는 경제적인 이득은 아래의 등식으로 표현된다.

$$B_i(\lambda, P_i) = \lambda P_i - C_i(P_i) = \lambda P_i - a_i - b_i P_i - c_i P_i^2 \qquad (2)$$

본 논문에서 정의한 전력거래 게임의 경기자들은 각 발전회사들로, 각 경기자들의 전략은 전력시장에서 발전회사들이 입찰하는 입찰 가격과 입찰 발전량으로 정의된다. 입찰가격은 한계비용에 기초한다는 가정하에서, 경기자 i의 입찰 가격을 ρ_i^{bid}, 입찰 발전량을 P_i^{bid}라고 할 때, 입찰 가격과 입찰 발전량은 아래와 같은 관계가 있다. 이는 식 (1)을 발전량에 대하여 편미분을 실시하면, 그때의 한계비용을 구할 수 있고, 이 한계비용 값으로 입찰 가격이 결정되므로 입찰전력량을 아래와 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$P_i^{bid} = \frac{\rho_i^{bid} - b_i}{2c_i} \qquad (3)$$

따라서 각 경기자들의 전략은 입찰 가격이나 입찰 발전량의 두 가지 중 한 가지만으로 정의가 되고, 나머지 한 가지는 식 (3)에 의하여 결정된다. 경기자들의 수익은 자신의 경제적인 이득과 상대방의 경제적 이득의 가중합으로 정의되고, 경기자 i의 수익 U_i은 상대 경기자를 j라 할 때 아래의 등식 (4)로 표현된다.

$$U_i = \alpha_i B_i(\lambda, P_i^{allocated}) - \beta_i B_j(\lambda, P_j^{allocated}) \qquad (4)$$

여기서,

$$0 \le \alpha_i \le 1 : \text{실수}$$
$$0 \le \beta_i \le 1 : \text{실수}$$
$$\alpha_i + \beta_i = 1$$

식 (4)의 두 계수 α_i와 β_i는 자신과 상대방의 경제적 이득에 대한 경기자 i의 선호도를 나타내는 계수로서, α_i는 자신의 경제적 이득에 대한, β_i는 상대방의 경제적 이득에 대한 선호도를 나타낸다. 예를 들어, 상대방의 수익에는 관심이 없고 오직 자신의 수익 극대화에만 관심이 있을 경우에서는 $\alpha_i = 1$, $\beta_i = 0$가 될 것이다.

3. 사 례 연 구

사례 연구는 아래 표와 같은 운전특성을 나타내는 가상의 두 발전기(발전회사)를 대상으로 수행하였다.

(표 1) 대상 발전회사 자료

	비용함수 계수			한계발전량	
	a [원/h]	b [원/MWh]	c [원/MW²h]	최소발전량 [MW]	최대발전량 [MW]
발전회사 i	0	6	0.22	50	250
발전회사 j	0	2	0.42	50	200

본 장에서 고려한 사례 연구에서는 전체 전력수요를 300[MW]로, 수급조건을 만족시키지 않는 거래는 성립되지 않는 것으로 가정하였고(즉, $P_i^{bid} + P_j^{bid} \ge L$), 수요의 가격에 대한 탄력성, 송전손실 및 송전계통의 신뢰도 및 안전도 등에 대한 운용 고려 상황 등은 모두 무시하였다. 각 경기자들이 선택할 수 있는 모든 전략들은 아래의 (표 2)와 같이 가정하였다.

(표 2) 각 경기자들의 모든 전략

	발전회사 i					발전회사 j			
전 략	S_i^1	S_i^2	S_i^3	S_i^4	S_i^5	S_j^1	S_j^2	S_j^3	S_j^4
입찰 가격	28	50	72	94	116	44	86	128	170
입 찰 발전량	50	100	150	200	250	50	100	150	200

3.1 정합 게임

경기자 i(혹은 경기자 j)는 상대방의 경제적 이득을 최소화하는 것을, 경기자 j(혹은 경기자 i)는 자신의 경제적 이득을 최대화하는 것을 목적으로 하여 전력거래를 하는 것으로 거래의 특성을 정의하였다. 이 때 각 경기자들의 보수함수는 식 (4)에서 정의된 일반형에서 경기자들의 특성을 반영하도록 α_i와 β_i의 계수를 설정하여 결정된다. 즉, 경기자 i는 자신의 경제적 이득은 관심이 없고 상대방의 경제적 이득은 자신의 손실로 간주할 것이므로 α_i의 값을 0으로, β_i의 값을 1로 결정할 수 있다. 또한 경기자 j는 상대방의 경제적 이득은 관심이 없고 자신의 경제적 이득만을 최대화하려 하므로 α_j의 값을 1로, β_j의 값을 0으로 결정할 수 있다. 따라서 각 경기자들의 보수함수는 아래의 등식으로 정의된다.

$$U_i = -B_j(\lambda, P_j^{allocated}) \qquad (5)$$
$$U_j = B_j(\lambda, P_j^{allocated}) \qquad (6)$$

위와 같이 정의된 경기자들의 보수함수는 서로의 합이 항상 일정하므로 정합게임이고 특히 합이 영인 특성을 갖게 되므로 이렇게 모형화된 게임은 영합게임임을 알 수 있다.

(표 3)은 이렇게 정의된 게임에 대한 보수표(payoff table)이다. 각 칸의 내용은 각 경기자들이 해당되는 전략을 취하였을 경우의, 두 경기자들의 보수값을 나타낸 벡터값으로 (U_i, U_j)와 같이 표현되었다. (표 3)에서 음영으로 표시된 칸은 내쉬 평형을 이루는 전략의 조합으로부터 계산된 보수벡터를 나타낸다.

(표 3) 정합 게임의 보수표

단위 : 원

	S_j^1	S_j^2	S_j^3	S_j^4
S_I^1	×	×	×	×
S_I^2	×	×	×	(-16800, 16800)
S_I^3	×	×	(-9450, 9450)	(-15750, 15750)
S_I^4	×	(-5000, 5000)	(-8400, 8400)	(-12600, 12600)
S_I^5	(-4650, 4650)	(-7200, 7200)	(-5250, 5250)	(-7350, 7350)

3.2 비정합 게임

경기자 i와 j는 자신의 경제적 이득을 극대화할 뿐만 아니라 상대방의 경제적 이득을 극소화하는 것도 동시에 고려하여 전력시장에 참여하는 상황을 반영한 경우가 비정합게임이 된다. 이 때 각 경기자들의 보수함수를 결정하는 두 계수 α와 β는 자신의 경제적 이득 극대화에 대한 선호도와 상대방의 경제적 이득 극소화에 대한 선호도의 상대적 비율로부터 얻어질 수 있다. 사례연구에서는 각 경기자들이 자신의 경제적 이득 극대화에만 관심이 있는 경우와 자신의 경제적 이득 극대화에 주 관심이 있지만 상대방의 경제적 이득 극소화에도 약간의 관심이 있는 경우의 두 가지 경우를 고려하였다.

즉, 자신의 경제적 이득 극대화에만 관심이 있는 게임의 두 경기자의 보수함수는 두 계수를 $\alpha=1$, $\beta=0$으로 결정하여 아래의 등식으로 정의된다.

$$U_i = B_i(\lambda, P_i^{allocated}) \quad (7)$$

$$U_j = B_j(\lambda, P_j^{allocated}) \quad (8)$$

또한, 자신의 경제적 이득 극대화에 보다 많은 관심을 갖지만 상대방의 경제적 이득 극소화에도 관심이 있는 게임의 경우에서는 α의 값이 β의 값보다는 클 것이며, 이들의 합은 1이 될 것이다. 특별한 경우로서, 두 계수의 값을 각기 $\alpha=0.7$, $\beta=0.3$로 결정하여 사례 연구를 실시하였고 이때의 보수함수는 아래와 같이 될 것이다.

$$U_i = 0.7 \cdot B_i(\lambda, P_i^{allocated}) - 0.3 \cdot B_j(\lambda, P_j^{allocated}) \quad (9)$$

$$U_j = 0.7 \cdot B_j(\lambda, P_j^{allocated}) - 0.3 \cdot B_i(\lambda, P_i^{allocated}) \quad (10)$$

위와 같이 모형화된 두 게임들은 모두 각 경기자들의 보수함수들의 합이 각 경기자들의 전략이 변함에 따라 일정하지 않으므로 비정합 게임들이다.

(표 4)는 경기자들이 자신의 경제적 이득 극대화에만 관심을 갖는 게임, (표 5)는 경기자들이 자신의 경제적 이득 뿐만 아니라 상대방의 경제적 이득도 똑같이 관심을 갖는 게임에 대한 보수표들이다. 이 두 보수표들에서 각 칸의 내용은 (표 3)과 같이, (U_i, U_j)로 표현되었다. (표 4)와 (표 5)에서 음영으로 표시된 칸은 내쉬 평형을 이루는 전략의 조합으로부터 계산된 보수벡터를 나타낸다.

(표 4) $\alpha=1$, $\beta=0$인 게임의 보수표

단위 : 원

	S_j^1	S_j^2	S_j^3	S_j^4
S_I^1	×	×	×	×
S_I^2	×	×	×	(14200, 16800)
S_I^3	×	×	(13350, 9450)	(19650, 15750)
S_I^4	×	(8800, 5000)	(15600, 8400)	(24000, 12600)
S_I^5	(13750, 4650)	(13200, 7200)	(16750, 5250)	(27250, 7350)

(표 5) $\alpha=0.7$, $\beta=0.3$인 게임의 보수표

단위 : 원

	S_j^1	S_j^2	S_j^3	S_j^4
S_I^1	×	×	×	×
S_I^2	×	×	×	(4900, 7500)
S_I^3	×	×	(6510, 2610)	(9030, 5130)
S_I^4	×	(4660, 860)	(8400, 1200)	(13020, 1620)
S_I^5	(8230, -870)	(7080, 1080)	(10150, -1350)	(16870, -3030)

4. 결 론

본 논문에서는 경쟁적 전력시장에서의 전력거래를 분석하기 위하여 2인 게임이론을 적용하였다. 또한, 2인 게임을 영합게임, 정합게임, 비정합게임으로 모형화하였고 이들을 동시에 고려할 수 있는 보수함수를 정의하였다. 이러한 게임이론에 기초한 전력거래의 분석은 각 게임 참여자들에게 균형점을 제공하여 주며, 따라서 각 게임 참여자들은 이러한 정보에 의하여 입찰 전력 및 가격을 결정하면 두 참여자 모두 최선의 방안이 된다.

제시한 게임 이론을 사례연구에 적용하여, 정합게임일 경우와 비정합 게임일 경우의 네쉬 균형점을 도출하였다.

[참 고 문 헌]

[1] John von Neumann, Oskar Morgenstern, Princeton University Press, Theory of Games and Economic Behavior, 1944.

[2] H.S.Bierman and L.Fernandez, "Game Theory with Economic Applications," Addison-Wesley, 1998.

[3] A.Haurie, R.Loulou and G.Savard, "A two-player game model of power cogeneration in new England," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 37, No. 9, Sep. 1992.

[4] 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, August 19992, pp. 1052-1059

[5] R. W. Ferrero, S. M. Shahidehpour and V.C.Ramesh, "Transaction Analysis in Deregulated Power Systems using Game Theory," IEEE Transactions on Power System, Vol. 12, No. 3, August 1997.

[6] 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, Feb., 1998.