2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2000.7.17-20

선물 시장에서의 전력거래 위험 고려 방법론 연구

박 종 배*, 정 만 호**, 김 발 호§, 김 진 호§§
* 안양대학교 전기전자공학과, ** 한국전력공사, § 홍익대학교 전기전자공학과, §§ 서울대학교 전기공학부

A Study on Methodology for Considering Risk in Power Transactions in Futures Market

Jong-Bae Park*, Manho Joung**, Balho Kim§, Jin-Ho Kim§§
* Anyang University, ** Korea Electric Power Corporation, § Hongik University, §§ Seoul National Univesity.

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

전력산업은 현재 커다란 변화에 직면하고 있다. 즉, 규모의 경제에 기초한 기존의 수직통합 독점형 전력산업 체제에서 기능 분할에 기초한 시장경쟁 체제로 변화하고 있다. 전 세계에 걸쳐 각국은 전력산업의 구조개편을 추진하고 있는데, 그 주요한 목표로는 경쟁을 통한 효율성 증진과 전기요금의 인하, 독점의 철폐로 인한 새로운 자본유치 및 민간 부문과의 위험 공유, 기업논리 적용에 따른 전력산업의 투자 및 운영의 효율 향상 등을 들 수 있다. 그 동안 전력사업은 규모의 경제, 전기의 특성상 중앙집중 관리의 필요성 등의 이유로 독점사업형태로 운영되는 것이 일반적 추세였으나, 가스터빈 등의 기술 발전에 따라 발전부문의 규모의 경제의 상실, 정보통신 기술진보에 따른 전력계통의 운용에 다수의사 반영 기능에 따라 경쟁과 선택(competition and choice)라는 시장경제 원리를 적용할 수 있게 되었다.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.

이러한 경쟁적 전력시장에서의 계통운용은 과거와는 매우 다른 형태가 될 것인데, 기존의 비용최소화 측면에서의 계통운용은 어떤 발전회사가 독점적 위치에 있을 때, 즉 모든 발전기를 소유하고 있을 때에만 의미가 있는 반면, 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[2]은 전력회사와 소규모 열병합발전소와의 전력거래를 2인 게임모형으로 분석하였고 A. Maeda 등[3]은 전력회사와 비상업적 발전소(non-commercial power plant)와의 거래 요금 결정을 위하여 게임 이론을 적용한 바 있다. 또한, R.W.Ferrero 등[4]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.

일반적으로 게임이란[5], 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.

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 전력 선물 거래를 분석하기 위하여 2인 게임이론을 적용하였다. 선물 시장이란 일반적으로 현물시장에서의 가격변동에 대비하여 위험을 줄이기 위해 시장참여자들이 참여하여 거래하는 시장이다[6]. 본 논문에서 적용한 게임 모형에서는 각 시장 참여자(즉, 각 발전사업자)들은 게임의 경기자(player)들로, 각 참여자들의 전력 선물 주문가격과 주문전력량은 게임의 전략(strategy)으로 모형화하였다. 또한 각 경기자들의 보수(payoff)은 전력 선물 및 현물 거래를 통한 수익의 평균과 분산의 함수로 정의하였는데, 수익의 평균은 최대화하고 수익의 분산은 최소화할 때 높은 보수를 받도록 하였다. 본 논문에서의 전력 선물 거래는 경기자들이 각자의 보수를 최대화하기 위하여 상호 경쟁하고, 각 경기자들의 보수, 선물시장의 수요 등에 대한, 모든 정보

가 모든 경기자들에게 공개되는 비협조적 완전 정보 게임(non-cooperative complete information game)으로 정식화하였고, 이를 전력 선물 거래 게임이라고 정의하였다. 또한 전력 선물 거래 게임에서의 해답은 비협조적 게임에서의 내쉬 평형으로 정의하였다. 또한 본 논문에서는 전력회사의 주문 가격에 대한 조건을 이용하여 경우를 나누어, 2인 전력 선물 거래 게임의 내쉬 평형을 분석하였다.

2. 전력 선물 거래 게임

2.1 기본 가정

본 논문에서는 선물시장에서의 전력거래를 중점적으로 분석하기 위하여 다음과 같은 몇 가지의 기본적인 가정을 하였다. 첫째, 현물 전력시장에서의 각 발전기의 할당발전량은 정해져 있으며, 또한 할당된 모든 발전기의 발전량의 합은 그 시간대의 계통 총 수요와 같다. 이를 수식으로 표현하면 다음 등식 (1)과 같다.

$$\sum_{i=1}^{N} P_{i,t_s}^{allocated} = L_{t_s} \tag{1}$$

여기서, N = 할당된 발전기의 수

t_s = 현물시장 거래시점

$P_{i,t_s}^{allocated}$ = i 발전기의 현물시장(t_s 시점) 할당발전량

L_{t_s} = t_s에서의 계통 부하

둘째, 현물시장에서의 전력가격은 임의의 확률분포를 갖는 확률변수이다. 이러한 가정은 전력가격이 본질적으로 불확실성을 가지고 있으며, 이로 인해 전력 현물시장에 위험(risk)이 존재한다는 것을 의미한다. 따라서, 합리적인 시장참여자들은 이러한 위험을 관리(risk hedging)할 수 있는 방법(mechanism)을 원하게 되며, 결과적으로 본 논문에서 제안하고자하는 선물시장에서의 거래를 통해 전력거래에서 발생하는 위험을 줄이려고 하게 된다.

셋째, 전력 선물시장의 수요 D_{t_f}는 선물 가격에 대한 함수 $D_{t_f}(\rho_f)$로 표현되며, 이 함수는 식 (2)와 같은 단조 감소의 특성을 갖는다.

$$D_{t_f}(\rho_f^1) > D_{t_f}(\rho_f^2) \quad , where\ \rho_f^1 < \rho_f^2 \tag{2}$$

넷째, 계통의 송전손실 및 송전계통의 신뢰도 및 안전도 등에 대한 운용 고려 상황 등은 모두 무시하였다.

2.2 전력 선물 거래 게임 요소 결정

본 논문에서는 전력 선물 거래를 분석하기 위하여 2인 게임이론을 적용하였다. 본 논문에서 적용한 게임 모형에서는 각 시장 참여자(즉, 각 발전사업자)들은 게임의 경기자(player)들로, 각 참여자들의 전력 선물 주문가격과 주문전력량은 게임의 전략(strategy)으로 모형화하였다. 또한 각 경기자들의 보수(payoff)은 전력 선물 및 현물 거래를 통한 수익의 평균과 분산의 함수로 정의하였는데, 수익의 평균은 최대화하고 수익의 분산은 최소화할 때 높은 보수를 받도록 하였다. 본 논문에서의 전력 선물 거래는 경기자들이 각자의 보수를 최대화하기 위하여 상호 경쟁하고, 각 경기자들의 보수, 선물시장의 수요 등에 대한, 모든 정보가 모든 경기자들에게 공개되는 비협조적 완전 정보 게임(non-cooperative complete information game)으로 정식화하였고, 이를 전력 선물 거래 게임이라고 정의하였다. 또한 전력 선물 거래 게임에서의 해답은 비협조적 게임에서의 내쉬 평형으로 정의하였다.

2.3 보수 분석

발전회사 i가 t_s시간대의 전력 현물 거래에 대한 t_f시간대의 전력 선물 거래시장에서 단위 전력당 $\rho_{t_f}^{settled}$의 가격으로 $P_{i,t_f}^{settled}$의 전력량에 대한 계약을 맺고, t_s시간대의 전력 현물 시장에서 단위 전력당 λ_{t_s}의 가격으로 $P_{i,t_s}^{allocated}$의 전력량을 판매하였을 때 얻어지는 경제적인 이득 B_{i,t_s}는 아래의 등식 (3)로 표현된다. 여기에서, C_{i,t_s}는 발전회사 i의 t_s시간대의 발전비용을 의미한다.

$$B_{i,t_s} = \lambda_{t_s} P_{i,t_s}^{allocated} + \rho_{i,t_f}^{settled} P_{i_{t_f}}^{setteld} - \lambda_{t_s} P_{i_{t_f}}^{setteld} - \overline{C}_{i,t_s} \tag{3}$$

경기자들의 보수 U_{i,t_s}는 식 (3)에서 정의한 수익의 평균과 분산의 함수로 정의되는데 등식 (4)과 같이 표현된다. 여기에서, $E_{i,t_s}^{threshold}$는 발전회사 i가 선물 시장에 참여할, 수익 평균의 최소값으로서 이보다 적은 값의 수익 평균을 갖는 선물 거래 전략은 취하지 않는다는 것을 의미하며, k는 임의의 상수이다. 또한, $E(B_{i,t_s})$는 수익의 평균을, $\sigma(B_{i,t_s})$는 수익의 표준편차를 나타낸다.

$$U_{i,t_s} = \frac{E(B_{i,t_s}) - E_{i,t_s}^{threshold}}{\sigma(B_{i,t_s}) + k} \tag{4}$$

현물시장에서의 전력가격 λ_{t_s}의 확률밀도함수를 $f_{\lambda_{t_s}}(\lambda)$라고 할 때, λ_{t_s}의 평균 $E(\lambda_{t_s})$와 표준편차 $\sigma(\lambda_{t_s})$는 아래의 등식 (5)와 (6)으로 표현된다.

$$E(\lambda_{t_s}) = \int \lambda f_{\lambda_{t_s}}(\lambda)\, d\lambda \tag{5}$$

$$\sigma(\lambda_{t_s}) = \sqrt{\int \{ lmabda - E(\lambda_{t_s}) \}^2 d\lambda} \tag{6}$$

이 때, 수익의 평균과 분산은 아래의 등식 (7)와 (8)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} E(B_{i,t_s}) &= E(\lambda_{t_s} P_{i,t_s}^{allocated} + \rho_{i,t_f}^{settled} P_{i_{t_f}}^{setteld} - \lambda_{t_s} P_{i_{t_f}}^{setteld} - \overline{C}_{i,t_s}) \\ &= E(\lambda_{t_s}) P_{i,t_s}^{allocated} + \rho_{i,t_f}^{settled} P_{i_{t_f}}^{setteld} - E(\lambda_{t_s}) P_{i_{t_f}}^{setteld} \\ &\quad - \overline{C}_{i,t_s} \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \sigma(B_{i,t_s}) &= \sigma(\lambda_{t_s} P_{i,t_s}^{allocated} + \rho_{i,t_f}^{settled} P_{i_{t_f}}^{setteld} - \lambda_{t_s} P_{i_{t_f}}^{setteld} - \overline{C}_{i,t_s}) \\ &= \sigma(\lambda_{t_s}) P_{i,t_s}^{allocated} - \sigma(\lambda_{t_s}) P_{i_{t_f}}^{setteld} \end{aligned} \tag{8}$$

따라서, 식 (4)으로 표현된 발전회사 i의 보수는 다음의 식 (9)과 같이 표현된다.

$$U_{i,t_s} = \frac{E(\lambda_{t_s}) P_{i,t_s}^{allocated} + \rho_{i,t_f}^{settled} P_{i_{t_f}}^{setteld} - E(\lambda_{t_s}) P_{i_{t_f}}^{setteld} - C_{i,t_s} - E_{i,t_s}^{threshold}}{\sigma(\lambda_{t_s}) P_{i,t_s}^{allocated} - \sigma(\lambda_{t_s}) P_{i_{t_f}}^{setteld} + k} \tag{9}$$

이때, 발전회사 i가 선물시장에서 계약을 맺게될 조건은 식 (10)과 같고, 그 때의 계약 가격과 계약 용량은 주문 가격과 주문 용량과 같다.

$$P_{i,t_f}^{order} \le D_{t_f} - \sum_{k \in \Omega_i} P_{k,t_f}^{order} \qquad \text{(10}$$
$$where,\ \Omega_i = \{ k | \rho_{k,t_f}^{order} < \rho_{i,t_f}^{order} \}$$

3. 내쉬 평형 분석

본 논문에서는 전력회사의 주문 가격에 대한 조건을 이용하여 경우를 나누어, 2인 전력 선물 거래 게임의 내쉬 평형을 분석하였다. 전력 시장에 참여하는 두 전력회사 i와 j가 있고, 전력회사 i의 주문 가격이 전력회사 j의 주문 가격보다 낮다고 가정하자. 이때, 전력회사 i가 계약을 체결하기 위한 조건은 식 (10)에 따라 아래의 식 (11)과 같다.

$$P^{order}_{i,t_f} \le D_{t_f}(\rho^{order}_{i,t_f}) \qquad (11$$

이때, 식 (9)에서 표현된 발전회사 i의 보수를 최대화하기 위하여서는 식 (12)의 조건이 성립하여야 한다.

$$P^{order}_{i,t_f} = P^{settled}_{i,t_f} = D_{t_f}(\rho^{order}_{i,t_f}) = D_{t_f}(\rho^{settled}_{i,t_f}) \qquad (12$$

식 (12)를 식 (9)에 대입하면, 발전회사 i의 보수는 전회사 i의 주문 가격 ρ^{order}_{i,t_f} 만의 함수 $U_{i,t_f}(\rho^{order}_{i,t_f})$로 표현되고, 식 (13)의 극점 조건으로부터 보수를 최대화하는 $(\rho^{order}_{i,t_f})^*$를 해석적으로 구할 수 있다.

$$\frac{\partial U_{i,t_f}(\rho^{order}_{i,t_f})}{\partial \rho^{order}_{i,t_f}} = 0 \qquad (13$$

이렇게 구해진 $(\rho^{order}_{i,t_f})^*$는 식 (12)의 조건을 만족하므로, 보수를 최대화하는 주문 발전량 $(P^{order}_{i,t_f})^*$은 식 (12의 조건에 $(\rho^{order}_{i,t_f})^*$를 대입하여 구할 수 있다.

발전회사 i가 최대의 보수를 얻기 위하여 $(\rho^{order}_{i,t_f})^*$의 가격에 $(P^{order}_{i,t_f})^*$의 발전량을 주문한다고 가정하면, 발전회사 j가 계약을 체결하기 위한 조건은 식 (10)에 따라 아래의 식 (14)와 같다.

$$P^{order}_{j,t_f} \le D_{t_f}(\rho^{order}_{j,t_f}) - (P^{order}_{i,t_f})^* \qquad (14$$

이때, 발전회사 j의 보수를 최대화하기 위하여서는 식 (15)의 조건이 성립하여야 한다.

$$\begin{aligned} P^{order}_{j,t_f} = P^{settled}_{j,t_f} &= D_{t_f}(\rho^{order}_{j,t_f}) - (P^{order}_{i,t_f})^* \\ &= D_{t_f}(\rho^{settled}_{j,t_f}) - (P^{order}_{i,t_f})^* \end{aligned} \qquad (15$$

식 (15)의 조건에 따라, 발전회사 j의 보수는 발전회사 j의 주문 가격 ρ^{order}_{j,t_f} 만의 함수 $U_{j,t_f}(\rho^{order}_{j,t_f})$로 표현되고, 식 (16)의 극점 조건으로부터 보수를 최대화하는 $(\rho^{order}_{j,t_f})^*$를 해석적으로 구할 수 있다.

$$\frac{\partial U_{j,t_f}(\rho^{order}_{j,t_f})}{\partial \rho^{order}_{j,t_f}} = 0 \qquad (16$$

이렇게 구해진 $(\rho^{order}_{j,t_f})^*$는 식 (15)의 조건을 만족하므로, 보수를 최대화하는 주문 발전량 $(P^{order}_{j,t_f})^*$를 조건으로부터 구할 수 있다.

위에서 구해진 두 발전회사의 최적 보수 전략, $S^* = \left[\{(\rho^{order}_{i,t_f})^*, (P^{order}_{i,t_f})^*\}, \{(\rho^{order}_{j,t_f})^*, (P^{order}_{j,t_f})^*\}\right]$가 내쉬 평형을 이루기 위해서는 다음의 두 가지 조건이 필요하다. 첫째, 발전회사 j가 $(\rho^{order}_{i,t_f})^*$보다 낮은 가격으로 주문할 때 얻을 수 있는 최대의 보수가 S^* 하에서의 보수보다 작거나 같아야 한다. 둘째, 발전회사 i가 $(\rho^{order}_{j,t_f})^*$보다 높은 가격으로 주문할 때 얻을 수 있는 최대의 보수가 S^* 하에서의 보수보다 작거나 같아야 한다. 이 두 조건을 만족할 때, 내쉬 평형은 식 (17)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} &\left[\{(\rho^{order}_{i,t_f})^{Nash}, (P^{order}_{i,t_f})^{Nash}\}, \{(\rho^{order}_{j,t_f})^{Nash}, (P^{order}_{j,t_f})^{Nash}\}\right] = \\ &\left[\{(\rho^{order}_{i,t_f})^*, (P^{order}_{i,t_f})^*\}, \{(\rho^{order}_{j,t_f})^*, (P^{order}_{j,t_f})^*\}\right] \end{aligned} \qquad (17)$$

4. 결 론

본 논문에서는 2인 게임이론을 적용하여 전력 선물 거래를 분석하였다. 본 논문에서 적용한 게임 모형에서는 각 발전사업자들을 게임의 경기자(player)들로, 각 발전사업자들의 선물 주문가격과 주문전력량을 게임의 전략(strategy)으로 모델링하였다. 또한 각 경기자들의 전력 선물 및 현물 거래를 통한 수익의 평균과 분산을 각 경기자의 보수(payoff) 함수로 정의하였으며, 수익의 평균은 최대화하고 수익의 분산은 최소화할 때 높은 보수를 받도록 하였다. 이러한 전력 선물 거래는 경기자들이 각자의 보수를 최대화하기 위하여 상호 경쟁하고, 각 경기자들의 보수, 선물시장의 수요 등에 대한 모든 정보가 모든 경기자들에게 공개되는 비협조적 완전 정보 게임이라는 가정으로 모델링하였으며, 전력 선물 거래 게임에서의 해답은 비협조적 게임에서의 내쉬 평형으로 얻을 수 있었다. 또한 본 논문에서는 전력회사의 주문 가격에 대한 조건을 이용하여 경우를 나누어, 2인 전력 선물 거래 게임의 내쉬 평형을 분석하였다.

[참 고 문 헌]

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

[2] 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.

[3] 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

[4] 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.

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

[6] Robert W. Kolb, Futures, Options & Swap, 2nd Edition, BlackWell Press, 1997.

[7] 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.