

경쟁적 전력시장에서의 적정 직거래 계약가격 설정에 관한 연구

정 구 형 강 동 주* 김 발 호
 홍익대학교 전기정보제어공학과 *한국전기연구원

Designing the Optimal Bilateral Contract in the Competitive Electricity Market

Chung, Koohyung *Kang, Dongjoo Kim, Balho
 Hongik Univ. *KERI

Abstract - Although the electricity market structure worldwide may be different in kinds, there generally exists long-term forward market and short-term spot market. Particularly, the bilateral contract in long-term forward market fixes the price between a genco and a customer so that the customer can avoid risks due to price-spike in spot market. The genco also can make an efficient risk-hedge strategy through this bilateral contract. In this paper, we propose a new mechanism for evaluating the optimal bilateral contract price using game theory. This mechanism makes a customer reveal his/her own willingness to purchase electricity so that a fair bilateral contract price can be derived.

1. 서 론

전 세계의 전력산업은 급격한 변화를 경험하고 있다. 이러한 변화의 본질은 전력산업의 규제완화와 경쟁의 도입이다. 따라서, 기존의 중앙집중적인 자원배분 및 운영 대신에, 전력은 전반적 또는 부분적인 경쟁을 통해 발전 사업자와 소비자 사이에서 거래된다.

전력거래를 위한 시장구조는 전 세계적으로 매우 다양한 형태를 가지고 있지만, 대체로 장기 선도시장과 단기 현물시장으로 구성되어 있다. 현물시장 가격은 전력 판매의 입찰을 통해 결정되며, 이러한 현물시장에서의 입찰전략 선택에 대한 연구는 매우 다양하게 수행되었다 [1]. 한편, 장기 선도시장에서 체결되는 직거래 계약은 사전에 발전사업자와 소비자 간 거래가격을 확정함으로써, 제한된 설비용량 하에서의 현물시장 가격변동으로부터 소비자를 보호할 수 있다. England & Wales, 노르웨이, 호주 및 San Diego에서의 경험은 대부분의 소비자들이 현물가격에 연계된 요금보다는 직거래 계약을 통한 고정요금 형태를 선호한다는 것을 보여주고 있다 [3]. 그 결과, 발전사업자는 이를 통해 리스크를 최소화할 수 있는 효과적인 헷지전략을 수립할 수 있으며, 이러한 헷지계약의 포트폴리오로부터 수입의 상당부분을 취할 것으로 예상된다. 그러나, 장기 선도시장 특히 직거래 계약을 통한 가격결정 매커니즘에 대한 연구는 가격예측에 대한 초보적인 검토만 있었을 뿐 계약당사자(발전사업자/소비자)를 중심으로 한 실질적인 연구는 전무한 상태이다.

본 논문에서는 게임이론을 이용하여 적정 직거래 계약을 산정하기 위한 새로운 기제(mechanism)를 설계한다. 이 기제는 소비자가 자발적으로 직거래 계약에 의한 자신의 실제 전력구매의사를 드러내도록 하여, 발전사업자가 최적의 전력판매 포트폴리오를 수립할 수 있도록 하는 적정 직거래 계약가격을 유도한다.

2. 직거래 계약에서의 정보 문제

소비자는 자신의 총수요 가운데 일부를 직거래 계약을 통해 구매하고자 한다[4]. 이때, 계약량은 소비자가 현물시장에서의 가격변동 위험에 대해 어느 정도 회피하고자 하는가에 따라 달라질 수 있다. 소비자는 장기 선도 계약으로 전력구매에 따른 리스크를 최소화할 수 있으며, 단기 현물시장을 통해 총 구매비용을 최소화할 수 있는 기회를 얻을 수 있다. 따라서, 소비자는 이와 같은 두 가지 목적을 동시에 달성할 수 있도록 서로 다른 시장에서의 구매량을 할당하게 된다.

발전사업자 또한 소비자와 마찬가지로 전력판매에 대한 리스크를 최소화함과 동시에 이익을 최대화하고자 한다. 이를 위해서는 소비자의 직거래 계약량을 정확히 파악함으로써 최적의 전력판매 포트폴리오를 수립해야 한다. 이러한 소비자의 구매의사를 고려하지 않고 직거래 계약가격을 설정할 경우, 소비자는 자신의 이익(즉, 소비이익)을 최대화하기 위해 구매의사를 왜곡할 유인을 가지며, 이는 결국 발전사업자가 자신의 이익을 향상시킬 수 있는 기회를 잃게 되는 결과를 초래한다. 예를 들어 발전사업자가 지나치게 높은 직거래 가격을 설정할 경우, 소비자는 직거래 계약으로 구매하고자 하는 전력량보다 적은 양을 구매하게 되며, 이로 인해 발전사업자는 안정적인 전력판매의 기회를 잃게 되어 보다 높은 리스크에 노출된다. 이와 반대로 지나치게 낮은 판매가격을 설정할 경우, 소비자는 실제 구매의사보다 많은 전력량을 직거래 계약으로 구매하기 때문에, 발전사업자는 다른 소비자 및 현물시장에서 판매할 수 있는 전력량의 감소로 인해 자신의 이익을 향상시킬 수 있는 기회를 잃게 된다.

그러나, 소비자의 직거래 구매의사는 자신의 개인정보(private information)이기 때문에, 발전사업자는 이에 대해 알지 못한다. 따라서, 발전사업자는 소비자에 대한 개인정보 없이도 최적의 전력판매 포트폴리오를 수립할 수 있는 기제를 고안해야 한다.

3. 기제 설계

이러한 정보문제를 해결하기 위해, 기제설계(mechanism design)라고 불리는 경제학적 기법이 개발되었다. 이는 특별한 형태의 불완비 정보게임(incomplete information game)으로, 기제란 주인(principal)이라 불리는 정보비보유자(uninformed player)와 대리인(agent)이라 불리는 정보보유자(informed player)에 의해 수행되는 일련의 게임규칙을 의미한다[9].

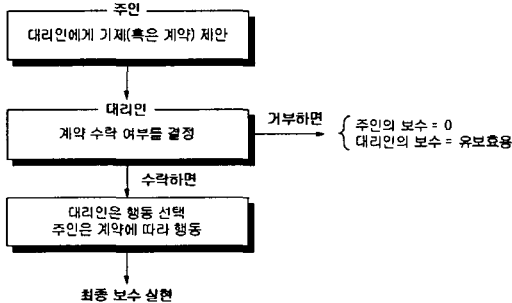
기제가 설계자의 목적에 적합하도록 하기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 특성을 만족해야 한다. 우선 주인은 대리인이 계약을 수락하도록 하기 위해 유보효용(reservation utility) 이상을 가져다 주는 계약을 제안해야 한다. 만약 계약을 수락함으로써 얻는 기대보수가 유보효용보다 낮다면, 대리인은 계약을 거부할 것이다. 이와 같이 대리인이 주인의 제안을 수락하도록 하기 위한 조건을 개인합리성(individual rationality) 또는

참여계약(participation constraint) 조건이라 한다.

기제는 이러한 참여조건과 함께 유인양립(incentive compatibility) 조건을 만족해야 한다. 유인양립 조건이란 대리인이 자신의 실제 개인정보를 제시하는 것이 최적이 되도록 하는 조건을 의미한다. 기제설계에서는 이러한 상태를 대리인이 자신의 개인정보를 “정직하게 말하는(truth-telling)” 것이 균형이 된다고 한다. 그러나, 유인양립 조건은 대리인이 반드시 정직하게 말한다는 것을 의미하지 않는다. 이는 단지 대리인이 자신의 개인정보를 “정직하게 말할 경우 최대이익을 얻을 수 있다”는 것을 의미한다.

3.1 소비자 이익함수

본 논문에서는 다음과 같은 유형의 기제를 설계한다. 우선 소비자는 발전사업자에게 직거래 계약량을 제시한다. 이때, 제시한 계약량은 반드시 자신의 실제 구매의사량(현물시장에 대한 위험회피도)과 동일할 필요는 없다. 소비자가 계약량을 제시하면, 발전사업자는 이에 대한 거래가격을 결정한다. 이에 대한 전체적인 흐름은 <그림 1>에서 보여주고 있다.



<그림 1> 기제설계 게임의 구조

경제학에서의 한계효용체감의 법칙에 의해 소비자의 한계효용은 전력구매량에 따라 감소한다. 소비자의 한계효용이 선형으로 감소한다고 가정하면, 한계효용함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$u(\theta) = b_0 - kD\theta \quad (1)$$

단, D 는 소비자의 총수요를 의미하며, θ 는 직거래 구매의사(또는 현물시장에 대한 위험회피도)로써, $0 \leq \theta \leq 1$ 의 값을 갖는다. 따라서, 소비자가 해당 발전사업자와의 직거래 계약을 통해 구매하는 전력량은 $D\theta$ 로 계산된다. θ 값은 소비자의 개인정보이며, 발전사업자는 이를 알지 못한다. b_0 은 최초로 소비되는 전력 한 단위의 가치이며, k 는 추가 전력소비에 대한 한계효용의 변화율을 의미한다. 본 논문에서는 발전사업자가 소비자의 한계효용함수의 계수인 b_0 와 k 를 정확하게 추정하고 있다고 가정한다.

소비자의 총효용은 이와 같은 한계효용의 적분값이 된다. 식 (1)에서 정의한 한계효용함수에 대한 총효용은 다음과 같다.

$$U(\theta) = \int_0^\theta u(\theta) d\theta = b_0\theta - \frac{1}{2}kD\theta^2 \quad (2)$$

본 논문의 기제에서는 소비자가 제시한 구매량에 대해 발전사업자가 λ 의 가격을 설정한다. 소비자는 발전사업자가 설정한 가격으로 자신이 제시한 구매량을 구매하기 위해서는 $F(\theta) = \lambda D\theta$ 을 지불해야 한다. 그러므로, 이러한 직거래 계약을 통해 얻게 되는 소비자의 이익함수는 다음과 같이 정의된다.

$$B(\theta) = U(\theta) - F(\theta) = b_0\theta - \frac{1}{2}kD\theta^2 - \lambda D\theta \quad (3)$$

만약 소비자가 직거래 계약으로 전력을 구매하고자 하지 않을 경우, 즉 $\theta=0$ 일 경우에는 0의 이익을 얻게 되며, 이는 소비자의 유효효용으로 정의된다.

3.2 계약 설계

발전사업자는 소비자가 제시한 계약량에 대해 최적의 전력판매 포트폴리오를 수립할 수 있도록 하는 계약가격을 설정해야 한다. 이때, 발전사업자는 다음과 같은 조건을 모두 만족해야 한다.

- 개인합리성 조건 : 발전사업자가 설정한 가격으로 계약을 체결할 경우, 소비자가 얻게 되는 이익은 자신의 유효효용보다 크거나 같아야 한다. 즉, 거래가격은 소비자에게 음이 아닌 이익을 보장해야 한다.

$$B(\theta) \geq 0$$

$$b_0\theta - \frac{1}{2}kD\theta^2 - \lambda D\theta \geq 0 \quad (4)$$

- 유인양립 조건 : 발전사업자가 설정한 가격에 대해, 소비자는 자신의 구매의사를 왜곡하지 않아야 한다. 즉, 거래가격은 소비자가 자신의 실제 직거래 계약의사를 제시할 경우 최대이익을 얻을 수 있도록 유도해야 한다.

$$B(\theta) \geq B(\bar{\theta})$$

$$b_0\theta - \frac{1}{2}kD\theta^2 - \lambda D\theta \geq b_0\bar{\theta} - \frac{1}{2}kD\bar{\theta}^2 - \lambda D\bar{\theta} \quad (5)$$

단, $\bar{\theta}$ 은 소비자가 제시한 직거래 구매의사를 의미한다.

- 실행가능성 조건: 소비자가 제시한 구매량으로 계약을 체결할 경우, 이 계약을 통해 발전사업자는 이익을 얻을 수 있어야 한다. 즉, 거래가격은 해당 계약 한 단위 당 공급비용보다 크거나 같아야 한다.

$$\pi(\bar{\theta}) = \lambda D\bar{\theta} \geq C(\bar{\theta})$$

$$\lambda \geq \frac{C(D\bar{\theta})}{D\bar{\theta}} \quad (6)$$

단, $\pi(\bar{\theta})$ 은 계약량 $D\bar{\theta}$ 을 가격 λ 으로 판매하여 얻는 발전사업자의 수입을 의미하며, $C(\bar{\theta})$ 은 계약량 $D\bar{\theta}$ 을 공급하기 위해 소요되는 발전비용함수를 의미한다.

따라서, 본 논문의 기제는 소비자가 제시한 구매의사의 함수로써, 위의 조건들을 만족하는 해당 직거래 계약 가격을 결정해야 한다.

3.3 최적 거래가격의 유도

만약 기제가 확실히 유인양립이 된다면, 소비자는 자신의 실제 구매의사를 정직하게 제시하는 것이 최적이라고 판단할 것이다. 따라서, 발전사업자는 우선 이러한 유인양립 조건을 만족하는 가격함수를 유도한다. 그리고 나서, 소비자가 제시한 구매의사에 대해 계산된 거래가격이 소비자의 개인합리성 조건을 만족하는가와 발전사업자의 이익을 보장하는가에 대해 평가함으로써, 적정 직거래 가격을 산정할 수 있다.

본 논문의 기제에서, 발전사업자는 소비자의 실제 구매의사 θ 와 제시한 구매의사 $\bar{\theta}$ 의 차이에 따른 예상 이익을 최소화함으로써, 소비자가 자신의 실제 구매의사를 정직하게 제시하도록 하고자 한다. 식 (5)에 의해, 이러한 예상 이익함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} FB(\theta, \bar{\theta}) &= B(\theta) - B(\bar{\theta}) \\ &= b_0(\theta - \bar{\theta}) - \frac{1}{2}kD(\theta^2 - \bar{\theta}^2) - \lambda D(\theta - \bar{\theta}) \\ &= (\theta - \bar{\theta}) \left[b_0 - \frac{1}{2}kD(\theta + \bar{\theta}) - \lambda D \right] \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)을 $\bar{\theta}$ 에 대해 1차 미분하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial FB(\theta, \bar{\theta})}{\partial \bar{\theta}} = -b_0 + kD\bar{\theta} + \lambda D \quad (8)$$

$\bar{\theta}$ 에 대한 최소화의 1차 조건에 의해, 예상 이익함수 $FB(\theta, \bar{\theta})$ 의 1차 미분식 (8)은 0이 되어야 하므로, 최적

거래가격 λ^* 은 다음과 같다.

$$-b_0 + kD\theta + \lambda^*D = 0$$

$$\lambda^* = [b_0 - kD\theta] / D \quad (9)$$

유인양립 조건이 성립함을 증명하기 위해, 위에서 유도한 최적 거래가격 λ^* 값을 식 (5)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$(\theta - \bar{\theta}) \left[-\frac{1}{2}(\theta - \bar{\theta}) \right] \geq 0 \quad (10)$$

식 (10)에 대해, 만약 소비자가 자신의 실제 구매의사보다 적은 전력을 구매하고자 한다면 즉, $\theta > \bar{\theta}$ 이면 $(\theta - \bar{\theta})$ 은 양이 되고 $-\frac{1}{2}(\theta - \bar{\theta})$ 은 음이 되기 때문에 전체 예상 이익은 음이 된다. 반대로 소비자가 자신의 실제 구매의사보다 많은 전력을 구매하고자 한다면 즉, $\theta < \bar{\theta}$ 이면 $(\theta - \bar{\theta})$ 은 음이 되고 $-\frac{1}{2}(\theta - \bar{\theta})$ 은 양이 되기 때문에 이 경우에도 전체 예상 이익은 음이 된다. 따라서, 소비자는 실제 구매의사를 정직하게 제시할 경우 즉, $\theta = \bar{\theta}$ 일 경우 최대 0의 이익을 얻게 되므로, 유인양립 조건은 만족된다.

이와 같이 유인양립 조건을 만족하기 위해 유도된 거래가격은 개인합리성 조건 또한 만족함을 확인할 수 있다. 식 (4)의 개인합리성 조건을 거래가격에 대해 정리하면, 다음과 같은 조건을 유도할 수 있다.

$$\lambda \leq [b_0 - kD\theta] / D \quad (11)$$

따라서, 최적 거래가격은 개인합리성 조건과 유인양립 조건을 동시에 만족하므로, 현시원리(revelation principle)[10]에 의해 소비자는 자신의 실제 구매의사를 정직하게 제시하게 된다.

최종적으로 위의 거래가격이 실행가능성 조건 (6)을 만족한다면, 발전사업자는 이 가격으로 직거래 계약을 체결함으로써 최적의 전력판매 포트폴리오를 수립할 수 있다.

3.4 최적 거래가격에 대한 해석

식 (9)의 결과로부터, 최적 거래가격에 대한 다음과 같은 특성을 확인할 수 있다.

- 최적 거래가격은 소비자의 구매량에 따라 감소하는 형태의 가격체계를 갖는다. 따라서, 발전사업자는 많은 양의 전력을 구매하는 소비자에게 낮은 가격을 부과하는 할인형태의 가격차별을 통해, 소비자가 자신의 구매량을 증가시키도록 유도한다. 결과적으로, 이러한 가격차별은 소비자가 자신의 이익을 최대화하기 위해 자발적으로 실제 구매의사를 드러내도록 하는 유인으로 제공된다.
- 최적 거래가격은 소비자가 구매한 전력량에 대한 한계효용을 자신의 전체 수요로 나눈 값으로 결정된다. 만약 발전사업자가 소비자의 구매의사를 정확히 알고 있다면, 발전사업자는 소비자가 지불할 용의가 있는 최대금액을 거래가격으로 설정하여 소비자의 이익을 모두 차지할 수 있다. 즉, 발전사업자는 식 (3)의 소비자 이익함수를 0으로 하는 거래가격

$$\lambda' = [b_0 - \frac{1}{2}kD\theta] / D$$

로 계약을 체결함으로써, 소비자의 이익을 모두 자신의 수입으로 취할 수 있다. 그러나, 발전사업자가 소비자의 구매의사를 알지 못할 경우엔 식 (9)에 의해 최적 거래가격이 $\lambda^* = [b_0 - kD\theta] / D$ 로 결정되므로, 판매되는 전력

한 단위당 $\lambda' - \lambda^* = \frac{1}{2}k\theta$ 만큼의 수입 상승의 기회를 상실하게 된다. 이는 소비자가 자신의 실제 구매의사를 정직하게 제시하도록 하기 위해 발전사업자가 지급하는 "정보비용(information payment)"이 된다. 따라서, 소비자는 자신의 실제 구매의사를 정직하게

제시함으로써 $(\lambda' - \lambda^*)D\theta = \frac{1}{2}kD\theta^2$ 의 최대이익을 얻을 수 있게 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 게임이론을 이용하여 적정 직거래 계약 가격을 산정하기 위한 새로운 기제(mechanism)를 설계하였다. 소비자의 직거래 구매의사는 소비자 자신의 개인정보(private information)이기 때문에, 발전사업자는 이에 대해 알지 못한다. 본 논문의 기제는 소비자가 자발적으로 자신의 실제 전력구매의사를 드러내도록 하여, 발전사업자가 최적의 전력판매 포트폴리오를 수립할 수 있도록 하는 최적 직거래 계약가격을 유도하였다.

본 논문에서 도입한 다소 비현실적인 가정으로 인해 그 결과가 매우 해석적인 것으로 판단되지만, 본 논문의 결과가 향후 도매경쟁 전력시장에서의 직거래 계약설계를 위한 기본적인 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 보다 완성된 직거래 계약설계를 위해서는 다수의 소비자에 대한 고려 및 소비자 이익함수 추정에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] K. Bhattacharya, M. H. Bollen, and J. E. Daalder, *Operation of Restructured Power Systems*: Kluwer Academic Publishers, 2001
- [2] A. J. Wood, and B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*: John Wiley & Sons, 1996
- [3] E. D. Kee, "Vesting contracts: A tool for electricity market transition", *The Electricity Journal*, Vol. 14, Issue 6, pp. 11-22, Jul. 2001.
- [4] Y. Liu, and X. Guan, "Purchase allocation and demand bidding in electric power markets", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 18, No. 1, pp. 106-112, Feb. 2003
- [5] C. Silva, B. F. Wollenberg, and C. Z. Zheng, "Application of mechanism design to electric power markets", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-7, Feb. 2001
- [6] M. Farioglu, and F. L. Alvarado, "Designing incentive compatible contracts for effective demand management", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 15, No. 4, pp. 1255-1260, Nov. 2000.
- [7] M. Farioglu, and F. L. Alvarado, "Using utility information to calibrate customer demand management behavior models", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 16, No. 2, pp. 317-322, May, 2001.
- [8] H. R. Varian, *Microeconomics Analysis*, 3rd ed: W. W. Norton & Company Inc., 1992
- [9] P. K. Dutta, *Strategies and Games*: MIT Press, 1999
- [10] R. B. Myerson, "Incentive compatibility and the bargaining problem", *Econometrica* 47, pp. 61-73, 1979

본 논문은 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소(02-전-01) 주관으로 수행된 논문임.