

Moral Hazard for the Available Capacity in Electricity Capacity Markets

김진호* · 박종배†
(Jin-Ho Kim · Jong-Bae Park)

Abstract - In this paper, we investigate how an electricity capacity market design may encourage generators to exaggerate their available capacity. In order for an analytical approach, a two player game model is introduced. We focus on two pure strategy Nash equilibria: an equilibrium at which generators offer their true capacities, and an equilibrium at which generators offer exaggerated capacities. The latter case is caused by asymmetries of information between players and so called 'moral hazard' in terms of the economics literature. This paper shows that, considering practical electricity markets, the moral hazard case is highly probable. Moreover, it is shown that, with the considered capacity market design in the real world, the better the electricity energy market performs, the higher the risk of moral hazard becomes.

Key Words : Electricity capacity markets

1. 서 론

현재 전력산업의 구조와 관련하여 가장 중요하게 고려되고 있는 것 가운데 하나는 용량시장의 설계라고 할 수 있다. 용량시장이 필요 없다고 주장하는 문헌이 있는가 하면 [1], 전력시장의 안정적이고 신뢰성 있는 운영을 위해서는 용량시장이 필수불가결하다고 주장하는 견해도 있다[2]. 이러한 상반된 견해에 대하여, 많은 연구자들은 그 동안 전력 시장 및 용량시장에 대한 다양한 연구를 진행하여어 왔다 [3-7]. Creti와 Fabra는 용량시장 (ICAP)에 대한 연구를 통해, 예비력 (reserve margin)과 용량 부족비율 (capacity deficiency rate)에 대한 최적 결정 (optimal choice)과 같은 규제적인 문제를 언급하였다[3]. Stoft는 예비력시장에 대해 연구하며 용량시장 운영조건 (working condition)에 대하여 분석하였다[4]. Oren[5] 및 Chao와 Wilson[6]은 용량시장을 대신하여 콜-옵션 방식의 용량확보 방안을 제안하였으며, Cramton과 Stoft는 초기 용량시장의 결합을 분석하여, 뉴잉글랜드 시장의 용량시장 설계방안을 제시하였다[7].

용량시장의 문제점으로 지적되고 있는 시장지배력 (market power)과 가격왜곡 (price distortion)의 문제들은 지금까지 앞에서 언급한 여러 문헌들에서 다루어졌다. 그렇지만, 지금까지 용량시장과 관련된 연구에서 거의 다루어지지 않은 문제가 있는데, 이는 바로 용량시장의 과다 용량입찰 문제 즉, 실제 발전가능용량 (available capacity)을 초과하여 용량시장에 용량을 입찰하는 문제이다. 그런데 시장지배력과 가격왜곡 문제는 에너지시장에서도 나타날 수 있는

문제이지만, 실제 발전가능용량을 초과하여 용량시장에 입찰하고 이를 통해 부당한 이익을 추구하는 문제는 용량시장에 국한하여 발생하는 문제라고 할 수 있다. 왜냐하면, 에너지 시장과는 달리 용량시장에서 낙찰된 용량에 대하여는 급전지시가 확률적으로 내려지기 때문에 초과용량 입찰에 대한 개연성이 항상 존재하게 된다.

일반적인 전력시장에서는 시스템 운영자 (independent system operator, ISO)가 전력시장 및 전력계통의 안정적 운영을 위해 적정한 규모의 용량 (capacity resource)을 확보할 의무를 지니게 된다. 이러한 용량을 확보하기 위해, ISO는 통상 용량시장을 개설하여 발전회사들 간의 경쟁을 통해 필요한 용량을 최소의 비용으로 확보하게 된다. 용량시장의 수요 (demand)는 대개의 경우, ISO에 의해 사전에 결정되며, 이러한 용량시장은 단일가격 (uniform market price)으로 청산된다. 그런데, 이러한 용량시장에는, 앞에서 본 바와 같이, 발전회사가 자신의 실제 발전가능용량 (true available capacity) 보다 과장된 용량을 입찰하게 하는 인센티브가 존재할 수 있다. 즉, ISO가 용량시장에서 자신의 실제 발전가능용량을 초과하여 입찰한 발전기에게 실제로 급전지시를 내리지 않는 한, 해당 발전회사는 초과 입찰한 용량만큼 용량요금을 더 받게 되기 때문이다. 이러한 문제는 일반 경제학 문헌에서 도덕적 해이 (moral hazard)로 널리 알려져 있다[8].

이러한 도덕적해이 문제에 대한 분석은 주로 보험분야 (insurance)에서 다루어져 왔으며, 보험회사와 피보험자 사이의 정보의 비대칭성과 불완전정보 등에 기인한 문제들이 연구되었다[8]. 이러한 도덕적해이 문제는 근본적으로 시장 참여자 사이의 정보의 비대칭성 때문에 발생하는 것으로 알려져 있으며, 크게 두 가지의 정보의 비대칭성 즉, 숨겨진 행위 (hidden actions)에 기인한 정보의 비대칭성과 숨겨진 정보 (hidden information)에 기인한 비대칭성으로 구분된다.

† 교신저자, 정회원 : 건국대학 전기공학과 교수 · 공박

E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr

* 정 회 원 : 경원대학 전기정보공학 조교수 · 공박

접수일자 : 2010년 9월 24일

최종완료 : 2010년 11월 25일

연구자에 따라 숨겨진 행위에 기인한 문제만을 도덕적해이라고 제한하는 경우도 있고, 두 가지 경우를 모두 도덕적해이 문제로 정의하는 경우도 있다[9]. 본 논문에서 다루고자 하는 용량시장의 과다용량입찰 문제는 숨겨진 정보에 기인한 문제라고 규정할 수 있는데, 그 이유는 이 문제가 발전회사와 ISO 사이의 정보의 비대칭성 즉, 실제로 정확한 발전가능용량은 발전회사만 알 수 있다는 점에서 문제가 출발하기 때문이다.

본 논문에서는 이러한 용량시장의 과다 발전용량산정 현상을 용량시장의 도덕적해이 문제라고 정의하였으며, 이 문제를 해석적인 방법으로 접근하기 위해 단순화된 전력시장을 모델링하여 이를 대상으로 이론적 분석을 수행하였다. 용량시장 참여자의 행태 분석을 위해 게임 이론 (Game Theory)을 활용하였으며, 두 가지의 순수전략 내쉬균형 (pure strategy Nash equilibrium) 사례를 집중적으로 분석하였다. 즉, 발전회사가 자신의 실제 발전가능용량을 입찰하는 경우 (an equilibrium at which generators offer their true capacities)와 자신의 실제 용량을 초과하여 입찰하는 경우 (an equilibrium at which generators offer the exaggerated capacities)에 대하여 용량시장에 발생할 수 있는 도덕적해이 현상을 분석하였다. 연구 결과, 실제적인 전력시장의 상황을 감안한다 하더라도, 이러한 발전가능용량과다입찰과 관련된 도덕적해이가 발생할 가능성이 매우 높하다는 것을 해석적으로 보였으며, 또한 본 논문에서 모델링된 용량시장 설계에서는 전력시장 운영을 잘 할수록 이러한 도덕적해이의 위험이 증가하는 것을 알 수 있었다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 사용한 용량시장 (capacity market modeling)에 대한 모델링 방법을 제시하고, 3장에서는 모델링된 용량시장에서 시장참여자의 행태를 분석하여 용량시장의 과다입찰과 관련된 도덕적해이 문제를 해석적으로 도출하며, 4장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

2. 용량시장 모델링 (Capacity Market Modeling)

2.1 목적 함수

본 논문에서는 전력시장 운영자인 ISO가 용량시장을 개설하여 운영하며, 용량시장가격은 단일가격으로 결정된다고 가정하였다 (uniform pricing auction). 이러한 용량시장에서 발전회사들은 발전가능용량 (available capacity)을 입찰하며, 경쟁을 통해 더 많은 용량을 낙찰받기 위해 노력한다. 용량시장의 수요 (demand)는 시장운영자인 ISO에 의해 결정된다고 가정하였으며, ISO는 용량시장에서 낙찰된 발전회사에게 확률적으로 급전지시를 내리게 된다고 가정하였다. 본 연구에서는 용량시장의 도덕적해이 문제의 이론적 분석의 용이함을 위해, 용량시장에 참여한 N개의 발전회사 가운데, 두 발전회사는 ISO가 급전지시를 하였을 때 이를 수행할 수 없는 자신의 실제 발전가능용량을 초과하는 용량입찰을 수행하는 도덕적해이와 관련된 전략적 행태를 보인다고 가정하였으며, 나머지 발전회사는 자신의 실제 발전가능용량을 용량시장에 입찰한다고 가정하였다. 따라서, 전략적 행태를 보이는 두 발전회사는 각각 두 가지의 선택, 즉, 실제 발전

가능용량을 용량시장에 입찰하든지, 아니면 실제 용량을 초과하는 발전가능용량을 입찰하는 전략적 행위를 선택할 수 있다. 다음으로, 실제 발전가능용량을 초과하여 용량시장에 입찰하는 발전회사의 전략적 행위가 전력시장에 미치는 영향을 분석하는 것이 본 논문의 목표이므로, 본 논문에서는 자신의 발전가능용량을 초과하여 용량시장에 입찰한 발전회사는 용량시장에서 자신이 입찰한 실제 가능용량을 초과한 값으로 낙찰되는 경우로 문제를 규정하여 용량시장을 모델링하였다. 즉, 전략적 발전회사가 자신의 실제 용량을 초과하여 입찰하는 경우, 초과용량을 낙찰받을 수 있도록 자신의 입찰을 전략적으로 수행할 것이 합리적인 가정이며, 초과용량으로 낙찰되지 않을 경우, 초과용량 입찰에 대한 인센티브가 없게 되는데, 이는 본 논문의 분석 대상이 아니다.

용량시장 모델링을 위해 본 논문에서는 크게 다음의 세 가지 경우 - 두 전략적 발전회사가 모두 실제 용량대로 용량시장에 입찰하는 경우, 한 발전회사만 용량보다 높게 입찰하는 경우, 그리고 마지막으로 두 발전회사가 모두 자신의 용량보다 높게 입찰하는 경우를 상정하였다. 먼저, 만약 전략적인 두 발전회사가 모두 실제 발전가능 용량만을 용량시장에 입찰하는 첫 번째 경우, 각 발전회사의 용량시장 수입 (capacity payment)을 $\Pi_{TT}^i (i=1,2)$ 라고 하면, Π_{TT}^i 는 다음과 같이 표현됨을 알 수 있으며, ISO의 급전지시에 따르지 못할 경우에 발생하지 않으므로 페널티 F 는 없다.

$$\Pi_{TT}^i = p_{TT} * q^i, \quad i=1,2 \quad (1)$$

여기서, p_{TT} 는 전략적인 두 발전회사가 모두 실제 발전가능용량을 용량시장에 입찰하는 경우 용량시장가격이며, q^i 는 각 발전회사의 용량시장 낙찰량임

다음으로, 전략적 발전회사 가운데 한 발전회사만 실제 발전가능용량을 초과하는 용량입찰을 하고, 다른 전략적 발전회사는 실제 발전가능용량을 입찰하는 두 번째 경우를 분석하면 다음과 같다. 이러한 경우, 각 전략적 발전회사의 용량시장 수입을 $\Pi_{TE}^i (i=1,2)$ 라고 하고, $i=1$ 을 실제 발전가능용량을 입찰한 전략적 발전회사의 첨자 T 로 표시하고, $i=2$ 를 실제 발전가능용량을 초과하여 입찰한 전략적 발전회사의 첨자 E 로 표시하면, Π_{TE}^i 는 다음과 같이 표현됨을 알 수 있다.

$$\Pi_{TE}^i = p_{TE} * q^i, \quad i=T,E \quad (2)$$

여기서, p_{TE} 는 한 전략적 발전회사만 실제 발전가능용량을 초과하여 용량시장에 입찰하는 경우 용량시장가격이며, $q^i (i=T,E)$ 는 각 발전회사의 용량시장 낙찰량임

(1)과 (2)를 비교하여 분석하게 되면, 두 전략적 발전회사 가운데, 실제로 전략적 행위를 선택한 발전회사 ()와 그렇지 않은 발전회사 (E)의 용량시장 수입에 다음과 상관관계가 성립함을 알 수 있다.

$$\Pi_{TE}^T < \Pi_{TT}^T \quad (3)$$

$$\Pi_{TE}^E > \Pi_{TT}^E \quad (4)$$

즉, 두 전략적 발전회사 가운데 한 전략적 발전회사만 자신의 실제 용량을 초과하여 용량시장에 입찰하는 경우, 실제 용량을 입찰한 전략적 발전회사의 용량수입 (Π_{TE}^T)은 두 전략적 발전회사가 모두 실제 발전가능용량대로 입찰한 경우에 해당 발전회사가 얻게 되는 용량수입 (Π_{TT}^T) 보다 작음을 알 수 있다. 반면에 실제 발전가능용량을 초과하여 입찰한 전략적 발전회사의 용량수입 (Π_{TE}^E)은, ISO의 급전지시 미이행에 따른 페널티가 무시할 수준이라면, 두 발전회사가 실제 용량대로 입찰한 경우에 얻게 되는 용량수입 (Π_{TT}^E) 보다 크게 되어 (4)를 만족하게 된다. 단, ISO가 부과하는 페널티가 일정 수준 이상으로 용량시장 수입에 상당한 영향을 미치게 되면, (4)의 부등호 방향은 반대로 나타날 수 있다. 즉, 실제용량을 초과하여 입찰하는 발전회사의 급전지시 불이행에 따른 페널티가 과다입찰로 인한 초과이익보다 크면, 해당 발전회사의 용량시장 수입은 두 발전회사가 모두 실제 용량대로 입찰한 경우 용량시장수입보다 작게 된다. 이러한 결과는 수학적 정식화를 거치지 않아도 쉽게 이해할 수 있는데, 이는 실제 발전가능용량을 초과하여 용량시장에 입찰한 전략적 발전회사 (E)의 입찰(즉, 공급)이 두 전략적 발전회사가 모두 실제 용량을 입찰했을 경우라면 실제 용량을 입찰한 전략적 발전회사 (T)가 낙찰 받을 용량시장의 수요의 일부를 가져가기 때문이다. 반대의 경우도 마찬가지로 성립함을 알 수 있다.

그러나, 앞에서 언급한 바와 같이, ISO가 용량시장에 낙찰된 발전회사들에게 실제로 급전지시를 내리는 상황이 발생할 수 있으며, 이러한 경우를 확률적으로 계산하기 위해, 한 발전회사만 용량보다 높게 용량시장에 입찰했을 때, ISO의 급전지시를 이행하지 못할 확률을 r_{TE} 라고 가정하면, 이 경우, 실제 발전가능용량을 초과하여 낙찰된 전략적 발전회사는 ISO의 급전지시를 따르지 못하게 되어 페널티를 물게 된다. 따라서, 이러한 페널티를 고려한 발전회사의 용량시장 수입은 다음과 같이 변하게 된다.

$$\Pi_{TE}^i = (1 - r_{TE}) * p_{TE} * q^i - r_{TE} * f * \Delta q^i, \quad i = E \quad (5-1)$$

$$\Pi_{TE}^i = p_{TE} * q^i, \quad i = T \quad (5-2)$$

여기서, f 는 급전 미이행에 대한 페널티 단가(원/kWh)이고, Δq^i 는 해당 발전회사의 급전지시 미이행량(kWh)임

(4)의 Π_{TE}^E 를 (5-1)에 표시된 값으로 바꾸어도 (4)이 성립하는 것은 앞에서 언급한 바와 같이 급전지시 불이행에 따른 페널티가 과다입찰로 인한 초과이익보다 작을 때 발생하며, 이는 일반적인 용량시장에서 이러한 발전회사의 전략적 행위가 존재할 수 있음을 의미한다. 즉, 본 논문에서는 발전회사가 용량시장에서 초과용량 입찰이라는 도덕적해이를 선

택할 인센티브 즉, 과다용량에 따르는 추가이익 (급전지시 미이행에 따른 확률적 개념의 페널티를 감안하고도 추가이익이 발생하는 시장) 현상이 발생할 수 있는 개연성을 전력시장에서 배제할 수 없다는 전제가 가정되어 있으며, 실제 현실 용량시장에서 이러한 개연성은 존재한다고 보는 것이 합리적이다. 다만, 용량시장에서 급전지시 미이행에 대한 페널티, 이와 관련된 확률, 그리고 이러한 도덕적해이를 방지하기 위한 시장설계 등은 현재 본 논문이 다루는 주제가 아니므로 여기에서는 생략하였다.

마지막으로, 두 전략적 발전회사가 모두 실제 발전가능용량보다 높게 용량시장에 입찰하는 전략적 행태를 보이는 세 번째 경우, 각 발전회사의 용량시장 수입을 $\Pi_{EE}^i (i=1,2)$ 라고 하면, Π_{EE}^i 는 다음과 같이 표현됨을 알 수 있다.

$$\Pi_{EE}^i = (1 - r_{EE}) * p_{EE} * q^i - r_{EE} * f * \Delta q^i, \quad i = 1,2 \quad (6)$$

여기서, p_{EE} 는 전략적인 두 발전회사가 모두 실제 발전가능 용량보다 높은 값을 용량시장에 입찰하는 경우 용량시장 가격이며, q^i 는 각 발전회사의 용량시장 낙찰량, 그리고 r_{EE} 는 두 발전회사가 모두 실제 발전가능 용량보다 높은 값을 용량시장에 입찰하는 경우, ISO의 급전지시를 이행하지 못할 확률임

이와 같이 두 전략적 발전회사가 모두 전략적인 행태를 취하는 경우, 발전회사가 받게 되는 용량시장 수입은 위의 두 가지 경우 (두 회사 모두 실제 용량을 입찰하는 경우와 한 회사만 실제 용량을 입찰하는 경우)의 용량시장 수입과 다음의 상관관계가 있음을 알 수 있다.

$$\Pi_{TT}^i < \Pi_{EE}^i < \Pi_{TE}^E, \quad i = 1,2 \quad (7)$$

$$\Pi_{TE}^T < \Pi_{TT}^T < \Pi_{EE}^E, \quad i = 1,2 \quad (8)$$

(7)에서 볼 수 있는 것과 같이, 한 발전회사만 전략적 행태를 보일 때 전략적 행태를 한 바로 그 발전회사의 관점에서 보면 ($i=E$), 두 전략적 발전회사가 모두 자신의 용량을 초과하는 전략적 입찰행태를 보일 때 발전회사 E의 용량시장 수입 (Π_{EE}^E)은 한 발전회사만 전략적 행태를 보일 때 전략적 행태를 한 발전회사가 얻게되는 용량시장 수입 (Π_{TE}^E) 보다 작은 것을 알 수 있다. 그 이유는 용량보다 높게 입찰하는 행위를 보이지 않던 나머지 전략적 발전회사가 초과입찰이라는 전략을 선택함으로써 해당 발전회사의 수입을 작게 하는 효과를 나타내기 때문이다. 마찬가지로 두 번째 경우에서 실제 용량을 그대로 입찰하는 전략을 선택한 발전회사 ($i=T$)는, 자신과 나머지 다른 전략적 발전회사가 모두 용량을 초과하는 전략적 입찰을 하는 세 번째 경우의 용량시장 수입 (Π_{EE}^E)이 가장 높으며, 두 발전회사가 모두 실제 용량으로 입찰하는 첫 번째 경우의 용량시장 수입 (Π_{TT}^T)이 그 다음으로 높고, 자신만 실제 용량으로 입찰하고 나머지 다른 발전회사는 실제 용량보다 높게 입찰하는 두 번째 경

우의 용량시장 수입이 가장 낮은 것을 알 수 있다. 또한, 확률 r_{EE} 는 r_{TE} 보다 클 것이라는 것을 직관적으로 알 수 있는데, 이는 용량시장에서 초과입찰된 값이 증가하였고, 이에 따라 ISO의 급전지시를 이행하지 못할 확률이 증가한다고 보기 때문이다.

3. 용량시장 참여자 행태 및 도덕적해이 분석

본 논문에서는 게임이론을 적용하여 용량시장의 초과용량 입찰문제를 분석하였다. 2장 용량시장 모델링에서 가정된 바와 같이, 전력시장의 N 발전회사 가운데 2개의 발전회사가 용량시장에서 전략적 의사결정을 수행할 것으로 예상되며, 나머지 N-2 발전회사는 실제 용량대로 입찰에 참여하여 어떤 전략적 행태를 보이지 않는다. 따라서 두 전략적인 발전회사가 용량시장 게임의 참여자로 모델링될 수 있으며, 각 발전회사는 다음 두개의 전략(strategies)을 가지게 된다. 즉, 실제 발전가능용량대로 용량시장에 입찰하는 전략 s_T 와 실제 용량을 초과하여 용량시장에 입찰하는 전략 s_E 를 가진다. 각 발전회사의 보수함수 (payoff) $\Pi_i, (i=1,2)$ 는 용량시장 수입 (capacity payment)에서 ISO의 급전지시 미시행시 발생하는 페널티로 구성된다. 각 발전회사는 이러한 용량시장 게임에서 자신의 기대보수 (expected payoff)를 최대하는 것을 목적으로 전략적 의사결정을 수행하게 된다. 2장에서 정의된 발전회사의 용량시장 수입을 이용하면, 본 논문에서 다루고자 하는 용량시장 게임의 정규 형식 (normal form of representation)은 다음 표 1과 같음을 알 수 있다.

표 1 용량시장 게임의 정규표현

Table 1 Normal form of Representation on Capacity Market

(Π_1, Π_2)	s_T	s_E
s_T	(Π_{TT}^T, Π_{TT}^T)	(Π_{TE}^T, Π_{TE}^E)
s_E	(Π_{TE}^E, Π_{TE}^T)	(Π_{EE}^E, Π_{EE}^E)

표 1에 주어진 용량시장 게임의 정규 표현에서 보는 바와 같이, 행에 표시된 전략집합 (strategies in row)은 발전회사 1의 전략을 나타내고, 열에 표시된 전략집합 (strategies in column)은 발전회사 2의 전략을 나타낸다. 2장에서 정의된 용량시장 전략적 입찰경우별 발전회사의 용량시장 수입을 이용하여, 실제 용량대로 입찰하는 발전회사의 첨자를 T 로 하고, 실제 용량보다 높게 입찰하는 발전회사의 첨자를 E 로 명명할 때, $\Pi_{TT}^T = p_{TT} * q^T$ 이고, $\Pi_{TE}^T = p_{TE} * q^T$ 이며, $\Pi_{TE}^E = (1 - r_{TE}) * p_{TE} * q^E - r_{TE} * f * \Delta q^E$ 이고, $\Pi_{EE}^E = (1 - r_{EE}) * p_{EE} * q^E - r_{EE} * f * \Delta q^E$ 이다. 발전회사 1 및 발전회사 2가 전략 s_T 를 선택할 확률을 각각 r_1 와 r_2 라고 가정하면, 각 발전회사의 기대보수 $E\{\Pi_i\}$ 는 다음과 같이 정의됨을 알 수 있다.

$$E\{\Pi_1\} = r_1 r_2 \Pi_{TT}^T + r_1 (1 - r_2) \Pi_{TE}^T + (1 - r_1) r_2 \Pi_{TE}^E + (1 - r_1) (1 - r_2) \Pi_{EE}^E$$

$$= r_1 r_2 p_{TT} q^T + r_1 (1 - r_2) p_{TE} q^T + (1 - r_1) r_2 \{ (1 - r_{TE}) p_{TE} q^E - r_{TE} f \Delta q^E \} + (1 - r_1) (1 - r_2) \{ (1 - r_{EE}) p_{EE} q^E - r_{EE} f \Delta q^E \}$$

$$E\{\Pi_2\} = r_1 r_2 \Pi_{TT}^T + r_1 (1 - r_2) \Pi_{TE}^E + (1 - r_1) r_2 \Pi_{TE}^T + (1 - r_1) (1 - r_2) \Pi_{EE}^E$$

$$= r_1 r_2 p_{TT} q^T + r_1 (1 - r_2) \{ (1 - r_{TE}) p_{TE} q^E - r_{TE} f \Delta q^E \} + (1 - r_1) r_2 p_{TE} q^T + (1 - r_1) (1 - r_2) \{ (1 - r_{EE}) p_{EE} q^E - r_{EE} f \Delta q^E \}$$

(9-1) 및 (9-2)와 같이 주어진 기대보수 함수로 정식화된 용량시장 게임의 해를 구하기 위해, 본 논문에서는 순수전략 내쉬균형 (pure strategy Nash equilibrium) 개념을 채택하였으며, 이에 따라 용량시장 게임의 해는 다음의 두 가지 경우로 나누어 분석할 수 있음을 알 수 있으며, 이러한 두 가지 경우 중, 실제 용량보다 높게 용량시장에 입찰하는 전략적 행위 즉, 도덕적해이가 발생함을 알 수 있다.

1) Case-1 : $\Pi_{TT}^T > \Pi_{TE}^E$ 이고 $\Pi_{TE}^T > \Pi_{EE}^E$ 인 경우

Case-1은 두 발전회사가 모두 실제 용량대로 용량시장에 입찰하는 경우에 두 발전회사에게 가장 큰 보수를 제공하게 된다. 즉, 발전회사 1이 전략 s_T 를 선택하고 발전회사 2도 전략 s_T 를 선택할 때, 전략쌍 $\{s_T, s_T\}$ 는 다른 전략쌍들에 대하여 우월전략 (dominant strategy)이 되며, 이에 따라, 두 발전회사의 내쉬균형 $\{s^{NE}, s^{NE}\}$ 은 전략쌍 $\{s_T, s_T\}$ 이 된다. 이 경우, 두 전략적 발전회사는 모두 실제 용량대로 시장에 입찰하게 되며, 이러한 균형은 시장운영 관점에서 보면 가장 바람직한 결과라고 할 수 있다. 따라서 시장운영자는 용량시장의 균형이 이 상태에 존재하기를 원하게 되는데, 이 상태에 균형이 이루어지기 위해서 시장운영자는 급전지시 불이행에 따른 페널티를 높게 설정함으로써 이를 달성할 수 있다. 즉, Case-1의 조건인 $\Pi_{TT}^T = p_{TT} * q^T > \Pi_{TE}^E = (1 - r_{TE}) * p_{TE} * q^E - r_{TE} * f * \Delta q^E$ 를 만족하고, 동시에 $\Pi_{TE}^T = p_{TE} * q^T > \Pi_{EE}^E = (1 - r_{EE}) * p_{EE} * q^E - r_{EE} * f * \Delta q^E$ 를 만족하기 위해서 시장운영자 (ISO)는 높은 페널티 계수 f 를 설정할 수 있고, 이에 따라 발전회사는 실제 자신의 용량대로 용량시장에 입찰하는 균형에 묶이게 된다. 그러나, 이와 관련하여 실제 전력시장에서 적용이 어려운 문제점이 존재한다. 즉, 급전지시 미이행 확률인 r_{TE} 또는 r_{EE} 값이 매우 작기 때문에, 발전회사들이 이 균형에 머무르게 하기 위해서 시장운영자가 설정해야 하는 페널티 계수 f 의 값이 매우 커져야 한다는 것이다. 문제는 발전회사 입장에서는 현실적으로 이것을 쉽게 받아 들일 수 없다는 것이다. 그 이유는 페널티 계수가 매우 높다는 것 자체에 대해 발전회사가 쉽게 동의할 수 없으며, 특히, 실제 자신의 용량대로 입찰한 발전회사의 경우에도 다른 기술적 이유 등에 의해 얼마든지 급전지시를 100% 이행하지 못할 경우가 발생하기 때문에, 단순히 자신의 용량을 초과하여 입찰하는 전략적인 발전회사

의 전략적 입찰행위를 방지하기 위한 이러한 매우 높은 급전지시 불이행 페널티는 현실적으로 구현하기 쉽지 않은 문제이다.

2) Case-2 : $\Pi_{TT}^T < \Pi_{TE}^E$ 이고 $\Pi_{TE}^T < \Pi_{EE}^E$ 인 경우

Case-2는 두 발전회사가 모두 실제 용량보다 높게 용량 시장에 입찰하는 경우에 두 발전회사에게 가장 높은 보수를 제공하게 된다. 즉, 발전회사 1이 전략 s_E 를 선택하고 발전회사 2도 전략 s_E 를 선택할 때, 전략쌍 $\{s_E, s_E\}$ 는 다른 전략쌍들에 대하여 우월전략 (dominant strategy)이 되며, 이에 따라, 두 발전회사의 내쉬균형 $\{s^{NE}, s^{NE}\}$ 은 전략쌍 $\{s_E, s_E\}$ 이 된다. 이 경우, 두 전략적 발전회사는 모두 실제 용량보다 높게 용량시장에 입찰하게 되며, 이러한 균형은 시장운영 관점에서 보면 가장 바람직하지 않은 결과이지만, 전략적인 발전회사 관점에서는 자신의 이익을 최대화하는 해라고 할 수 있다. 이러한 상태가 발생하는 이유는 ISO의 급전지시 확률 즉, 전략적 발전회사의 급전지시 미이행 확률 r_{TE} 또는 r_{EE} 이 현실적으로 작기 때문이며, 앞에서 분석한 바와 같이, 급전지시 불이행 페널티를 ISO가 원하는 수준으로 높게 설정할 수 없기 때문에 발생하게 된다. 특히 급전지시 (또는 미이행) 확률 관점에서 보면, ISO의 급전지시 확률 r_{TE} 또는 r_{EE} 이 낮을 수록 용량시장에서 전략적 발전회사에 의한 도덕적해이의 위험은 더 증가하게 된다. 그런데 여기서 매우 중요한 한가지 사항은 용량시장에 낙찰된 발전회사에 대한 이와 같은 급전지시 확률은 전력시장이 수급측면이나 계통운영측면에서 안정적으로 운영될 수록 더 낮아진다는 것이다. 즉, 수요가 보다 정확하게 예측되고, 이에 따라 발전계획이 보다 정확하게 수행되며, 계통운영이 원활하게 수행되는 등 전력수급이 안정적으로 유지되고 전력시장이 안정적으로 운영될수록, 용량시장에서의 급전지시 확률은 더 낮아지게 되며, 이에 따라, 발전회사들의 발전가능용량 입찰과 관련된 도덕적해이의 위험이 더 높아지는 문제를 초래하게 된다. 이 문제는 용량시장 설계에 내재된 근본적인 결함으로 인해 발생하는 문제이며, 이러한 용량시장 설계하에서는 발전회사의 전략적 의사결정을 방지하기 어렵다. 본 논문에서는 이와 같은 전력시장 특히, 용량시장에서 발전회사들의 전략적인 행위로 인한 위험이 존재할 수 있음을 해석적으로 보였으며, 향후 이러한 문제를 해결하기 위한 새로운 용량시장 설계방안에 대한 연구를 수행할 계획이다.

4. 사례 연구

본 논문에서는 용량시장의 초과용량 입찰과 관련된 시장 참여자의 전략적 행위에 대한 사례연구를 다음과 같이 제시하고자 한다. 용량시장은 논문에서 가정한 바와 같이 단일 가격으로 청산되는 시장으로 하였으며, 용량시장 수요는 ISO에 의해 결정되고, 발전회사는 가격과 양을 모두 용량시장에 입찰한다. 다음 표는 사례연구를 위한 용량시장 관련 데이터를 나타내고 있다.

표 2 사례연구 시스템 개요

Table 2 System Configuration on Case Study

용량시장 형태	단일가격청산 (uniform pricing auction)
용량시장 수요함수	ISO 결정
발전회사 수	N (2개 발전회사 전략적 행위)
발전회사 실제 가용용량	100[kW]
급전지시 미이행 확률	0.05

우선 2개의 전략적 발전회사를 포함한 모든 발전회사가 실제 자신의 용량에 따라 용량시장에 입찰하는 경우를 분석하면 다음과 같다. 시장가격은 ISO가 결정한 수요곡선과 발전회사들이 입찰한 공급곡선이 교차하는 점에서 결정된다. 두 발전회사가 대칭이라고 할 때, 발전회사가 선택할 수 있는 전략쌍은 (s_T, s_T) , (s_E, s_T) , 그리고 (s_E, s_E) 세가지 경우이다. 각각의 경우에 대한 시장분석 결과는 다음과 같다.

1) 첫 번째 경우 : (s_T, s_T)

두 발전회사가 실제 용량대로 입찰하는 전략을 선택하는 경우로, 그림 1에서 보는 바와 같이, 우하향하는 수요곡선과 실선으로 나타난 우상향하는 공급곡선(s_T, s_T)의 교차하는 지점에서 균형을 이뤄 시장이 청산된다. 용량시장의 청산가격을 100[원/kW]이라 하고, 두 전략적 발전회사의 낙찰량을 100[kW]라고 가정하면, 각 발전회사의 보수는 다음과 같이 계산된다 (용량시장운영에 대한 구체적인 분석과정은 매우 광범위한 연구를 필요로하기 때문에 본 논문의 연구에서 제외하였으며, 또한 비-전략적인 발전회사는 본 논문의 분석 대상이 아니므로 이에 대한 분석도 생략하였다.)

$$\begin{aligned} \Pi_{TT}^i &= \Pi_{TT}^T = p_{TT} * q^T \\ &= 100[\text{원}/kW] * 100[kW] = 10,000[\text{원}], \quad i = 1,2 \end{aligned} \tag{10-1}$$

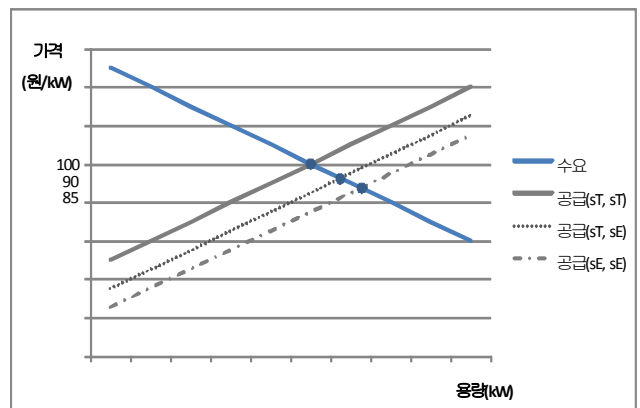


그림 1 사례연구 : 발전회사 전략별 용량시장청산

Fig. 1 Case Study : GenCo's Capacity Auction Strategies

2) 두 번째 경우 : (s_T, s_E) 또는 (s_E, s_T)

두 발전회사 중 한 발전회사는 실제 용량대로 입찰하고 다른 발전회사는 실제 용량보다 높게 입찰하는 전략을 선택하는 경우로, 그림 1에서 보는 바와 같이, 수요곡선은 동일하나 시장의 공급이 증가하였기 때문에 공급곡선은 우측으로 이동하고 이에 따라 점선으로 표시된 우상향하는 공급곡선(s_T, s_E)이 되며, 두 곡선이 교차하는 지점에서 균형을 이뤄 시장이 청산된다. 이 때 가격은 감소하고 용량은 증가하게 되며, 실제 용량보다 높게 입찰한 발전회사는 첫 번째 경우 (s_T, s_T) 보다 큰 값을 낙찰받지만, 실제 용량대로 입찰한 발전회사는 작은 값을 낙찰받는다. 이 때 용량시장의 청산가격을 90[원/kW]이라 하고, 실제 용량보다 높게 입찰한 발전회사의 낙찰량을 120[kW], 실제 용량대로 입찰한 발전회사의 낙찰량을 90[kW]라고 하면, 청산용량은 210[kW]로 10[kW] 증가한다. 각 발전회사의 보수는 다음과 같이 계산된다.

$$\Pi_{TE}^T = p_{TE} * q^T = 90[\text{원}/\text{kW}] * 90[\text{kW}] = 8,100[\text{원}]$$

$$\begin{aligned} \Pi_{TE}^E &= (1 - r_{TE}) * p_{TE} * q^E - r_{TE} * f * \Delta q^E \\ &= 0.95 * 90[\text{원}/\text{kW}] * 120[\text{kW}] - 0.05 * f * 20[\text{kW}] \\ &= 10,260 - f[\text{원}] \end{aligned} \quad (10-2)$$

3) 세 번째 경우 : (s_E, s_E)

두 발전회사 모두 실제 용량보다 높게 입찰하는 전략을 선택하는 경우로, 그림 1에서 보는 바와 같이, 수요곡선은 동일하나 시장의 공급이 다시 증가하였기 때문에 공급곡선은 우측으로 더 이동하고 이에 따라 파선으로 표시된 우상향하는 공급곡선(s_E, s_E)이 되며, 두 곡선이 교차하는 지점에서 균형을 이뤄 시장이 청산된다. 이 때 가격은 감소하고 용량은 증가하게 되며, 실제 용량보다 높게 입찰한 두 발전회사는 모두 첫 번째 경우 (s_T, s_T) 보다 큰 값을 낙찰받는다. 이 때 용량시장의 청산가격을 85[원/kW]이라 하고, 발전회사의 낙찰량을 각각 120[kW]라고 하면, 청산용량은 240[kW]로 30[kW] 증가한다. 각 발전회사의 보수는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Pi_{TE}^i &= \Pi_{EE}^E = (1 - r_{EE}) * p_{EE} * q^E \\ &\quad - r_{EE} * f * \Delta q^E, \quad i = 1, 2 \\ &= 0.95 * 85[\text{원}/\text{kW}] * 120[\text{kW}] \\ &\quad - 0.05 * f * 20[\text{kW}] = 9,690 - f[\text{원}] \end{aligned} \quad (10-3)$$

(10-1), (10-2), 그리고 (10-3)의 결과를 바탕으로, 순수전략 내쉬균형의 정규형태로 발전회사의 전략적 행위를 고려한 용량시장 청산결과를 나타내면 다음 표 3과 같다.

표 3 용량시장 게임 정규표현 : 시장청산 결과

Table 3 Normal form of representation on Capacity market Game : Result of Market Clearing

(Π_1, Π_2)	s_T	s_E
s_T	(10,000 , 10,000)	(8,100 , 10,260 - f)
s_E	(10,260 - f , 8,100)	(9,690 - f , 9,690 - f)

따라서, 3장에서 분석된 Case-1에서 균형이 이루어지기 위한 조건은 발전회사-2가 전략 s_T 또는 s_E 를 선택하는 것과 관계없이 발전회사-1의 전략 s_T 가 우월전략이어야 하고, 반대의 경우도 동일한 조건이어야 함과 동등하므로, 이를 만족하는 조건은 페널티계수 f 가 다음을 만족해야 한다.

$$f > 1,590 \quad (11-1)$$

다음으로, Case-2에서 균형이 이루어지기 위한 조건은 발전회사-2가 전략 s_T 또는 s_E 를 선택하는 것과 관계없이 발전회사-1의 전략 s_E 가 우월전략이어야 하고, 반대의 경우도 동일한 조건이어야 함과 동등하므로, 이를 만족하는 조건은 페널티계수 f 가 다음을 만족해야 한다.

$$f < 260 \quad (11-2)$$

따라서, 3장에서 분석한 바와 같이, 모든 발전회사가 실제 용량대로 입찰하는 결과를 도출하기 위해서는 ISO가 매우 높은 페널티비용을 설정하는 것이 가능하나, 이 예에서 보는 바와 같이, 용량시장의 페널티를 용량시장 청산가격의 15배 이상으로 설정하는 것은 현실적으로 불가능하므로, 발전회사가 실제 용량대로 입찰할 가능성은 매우 낮다고 할 수 있다. 반면, 현실적으로 가능한 페널티비용의 수준 즉, 청산가격의 2~3배 수준에서 이 비용을 설정하게 되면, 용량시장의 균형은 Case-2에서 발견할 수 있으며, 이는 본 논문에서 주장하는 바와 같이, 발전회사가 실제 용량보다 높게 입찰하게 하는 전략적 행위를 유도하여 시장의 도덕적해이가 증가하게 됨을 보여주고 있다. 한편, 페널티수준이 두 균형 사이 값으로 결정되면, 다른 발전회사의 전략적 선택에 따라 자신의 전략적 선택이 변하게 되어, 시장의 균형은 존재하지 않는다. 즉, 발전회사-1이 $s_T(s_E)$ 를 선택하면, 발전회사-2의 우월전략은 $s_T(s_E)$ 이고, 발전회사-2가 $s_T(s_E)$ 를 선택하면, 발전회사-1의 우월전략은 $s_T(s_E)$ 이므로, 시장의 균형이 존재하지 않는다.

마지막으로 그림 2는 급전지시 미이행 확률에 따른 발전회사의 보수 변화를 보여주고 있는데, 급전지시 미이행 확률이 감소할수록 전력회사의 보수가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 전력시장이 안정적으로 운영될수록 급전지시 미이행 확률이 감소하고, 이에 따라 용량시장에서는 오히려 발전회사의 전략적 행위의 위험이 증가한다는 것을 보여주고 있다.

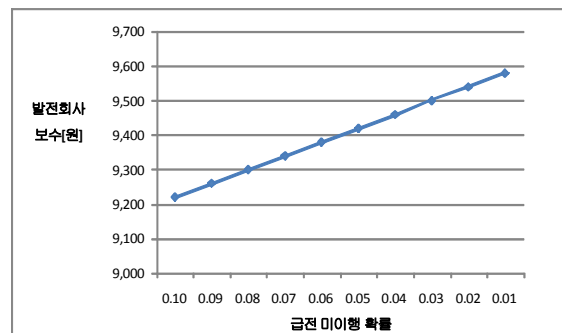


그림 2 급전미이행 확률에 따른 발전회사 보수 변화
Fig. 2 GenCo's Payoff on Undispachable Probability

5. 결 론

용량시장은 안정적인 전력시장 운영을 위해 매우 중요한 요소로 고려되고 있으나[7], 용량시장이 제대로 작동하기 위해서는 용량시장 설계가 시장참여자에게 전략적 행위를 유도하는 경제적인 유인책을 제공해서는 안된다. 본 연구에서는 현재 용량시장 설계에서 발생할 수 있는 문제점을 발전회사의 과다용량 입찰과 관련된 도덕적해이의 위험 관점에서 해석적으로 제시하였다. 현재 실제적인 용량시장을 모델링하기 위해 논문의 주제와 불필요한 부분을 제거한 단순화된 용량시장을 모델링하였으며, 용량시장에서 발전회사의 전략적 행위를 분석하기 위해, 게임이론을 적용하였다. 이를 통해, 두 가지 형태의 순수전략 균형점을 구하였으며, 각 균형의 조건 및 이에 대한 시장의 해석을 제공하였다. 또한, 용량시장의 초과입찰과 관련된 발전회사의 도덕적해이의 위험이 나타나는 균형상태를 분석하였으며, 실제 전력시장의 상황을 고려하면 이러한 위험이 전력시장에 상존할 수 있다는 것을 알아냈다. 특히, 전력시장이 안정적으로 운영될수록 용량시장에서의 도덕적해이의 위험은 더 커진다는 것을 밝혀냈으며, 이러한 용량시장의 결함을 해소하기 위한 용량시장 설계가 필요함을 제시하였다. 본 논문은 현재 널리 통용되는 용량시장의 기본적 설계개념이 발전회사의 전략적 행위를 유인하여 시장의 도덕적해이를 증가시킬 수 있다는 용량시장의 취약점을 해석적으로 입증하였으며, 향후, 이를 해결하기 위한 연구를 추진할 계획이다. 또한, 본 논문에서 다루지 못한 시장의 모든 참여자가 전략적 행위를 할 경우 용량시장의 영향 분석에 대한 보다 광범위한 주제로 향후 연구를 확장할 계획이다.

참 고 문 헌

[1] P. CRAMTON, P.: 'Review of the reserves and operable capacity markets: New England's experience in the first four months', White Paper, Market Design Inc., 1999

[2] BESSER, J.G., FARR, J.G. and TIERNEY, S.F.: 'The political economy of long-term generation adequacy: Why an ICAP mechanism is needed as part of standard market design', The Electricity Journal, Aug./Sept. 2002, Vol. 15, No. 7, pp. 53-62

[3] CRETU, A. and FABRA, N.: 'Capacity markets for electricity', Center for the Study of Energy Markets, Paper CSEMWP-124, Feb. 2004

[4] STOFT, S.: 'The demand for operating reserves: Key to price spikes and investment', IEEE Trans. on Power Systems, May 2003, Vol. 18, No. 2, pp. 470-478

[5] OREN, S.: 'Generation adequacy via call options obligations: safe passage to the promised land', The Electricity Journal, Nov. 2005, Vol. 18, No. 9, pp. 28-42

[6] CHAO, H.P. and WILSON, R. 'Resource adequacy and market power mitigation via option contracts', Electric Power Research Institute, Draft, March18,2004

[7] CRAMTON, P. and STOFT, S.: 'A capacity market that makes sense', The Electricity Journal, Aug./Sept. 2005, Vol. 18, No. 7, pp. 43-54

[8] MAS-COLELL, A. and WHINSTON, M.D.: 'Microeconomic Theory' (Oxford University Press, Inc., 1995)

[9] HART, O.D. and HOLMSTROM, B.: 'The theory of contracts' in Advances in Economic Theory (Fifth World Congress, edited by T. Bewley, New York: Cambridge University Press, 1987)

저 자 소 개



김진호 (金眞鎬)

1971년 11월 27일생. 1995년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동대학 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2001년 동대학 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사). 2004년 부산대 전기공학과 조교수. 현재 경원대 전기공학과 조교수
Tel : 031-750-8825
Fax : 031-750-8571
E-mail : kimjh@kyungwon.ac.kr



박종배 (朴宗培)

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 부교수.
Tel : 02-450-3483
Fax : 02-444-1418
E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr