

Analysis on Power Transactions of Generation and Operating Reserve Based on Marginal Profits

申 載 弘* · 李 光 浩*
(Jae-Hong Shin · Kwang-Ho Lee)

Abstract - As an electricity industry transforms into a competitive system, an electricity market revolves into a combined market consisting of generation and operating reserve. This paper presents a market model combined by an energy market and an operating reserve market. In a competitive structure, Gencos strive to choose strategic bidding parameters that maximize total profit resulting from an energy market and a reserve market. The primary goal of the paper is to analyze power transactions of generation and operation reserve based on marginal profits and capacity limits at NE(Nash Equilibrium). In case studies, the reserve market and the energy market are compared at the NE from the viewpoints of marginal profits, prices and transaction quantities. It is shown that the marginal profit in an energy market is equal to that in a reserve market, and Gencos strategic bidding is greatly influenced by capacity limit.

Key Words : Electricity Market, Nash Equilibrium, Strategies, Operating Reserve, Marginal Profit

1. 서 론

경쟁체제로 재편된 전력시장을 성공적으로 운영하기 위해서는 전력의 안정적 공급이 최우선적으로 고려되어야 한다. 대규모 정전사태가 발생한 캘리포니아의 경우, 예비력 확보 수단의 제도적 미비가 정전사태의 요인으로 작용했다[1]. 따라서 우리나라 전력시장을 성공적으로 운영하기 위해서는 경쟁적으로 이루어지는 예비력거래를 예상하는 것이 필요하다. 또한 이를 통해 예비력 시장에 대한 제도를 수정 및 보완해 나가야 한다.

통운영자에 의해 실시간으로 급전이 이루어지는 예비력은 에너지와 분리된 시장에서 거래되는 것이 바람직하다[1-5]. 분리된 시장구조에서 발전기업은 에너지 시장 뿐 아니라 예비력 시장에서도 이득을 얻을 수 있다[2,3]. 그러므로 발전기업은 전체 전력시장에서 얻는 이득을 극대화시키기 위한 전략적인 입찰을 한다.

최근 예비력 시장에 관련된 연구는 예비력의 가격결정에 관한 연구와 송전선로 제약을 고려한 예비력 확보연구 등이 진행되고 있다[4,5]. 기존 연구는 단일가격방식(uniform price)과 입찰가방식(pay-as-bidding)을 비교함으로써 시장 운영자(market operator)에게 예비력의 가격을 어떻게 결정하는 것이 효과적인지에 대한 기준을 제시하고[4] 계통 운영자(system operator)에게 송전선로 제약이 예비력에 어떤 영향

을 주는지에 대한 분석을 제공하였다는[5] 측면에서 의미가 있다.

예비력거래는 발전기업간의 경쟁을 통해 이루어지므로 이에 대한 분석이 추가로 진행되어야 한다. 기존 연구 중, 발전기업의 이득을 고려하여 경쟁을 분석한 연구가 있으나 입찰함수의 탄력성에 대한 고려가 부족했기 때문에 발전기업의 전략적인 행태를 분석하는 기법으로는 부족하다[3].

본 연구는 공급함수를 직접 입찰함으로써 경쟁을 분석하는 공급함수법을 사용하여 모형화한다. 공급함수모형은 일차의 입찰함수와 수요특성을 가정한 경우가 대부분이며 입찰전력은 입찰함수의 절편 또는 기울기로 가정한[6].

전력시장 운영규칙을 토대로 볼 때, 예비력은 급전 여부에 따라 정산이 다르게 이루어진다. 예비력으로 지정되었지만 실제 급전이 이루어지지 않는 경우에는 예비력으로 지정된 것에 대해서 정산이 이루어지는 반면 실제 급전이 이루어지는 경우에는 급전량에 대한 추가 정산이 이루어진다[7].

급전량에 대한 추가정산으로 인해 예비력으로 지정되어 발생하는 수익은 발전비용에 관계없이 발전기업에게 이득을 준다. 그러므로 발전용량이 충분하다면, 발전기업은 예비력의 입찰가격을 낮추어 이득을 증가시키는 유인(incentive)이 발생한다. 하지만 공급용량이 충분하지 않은 경우에는 이와 다른 상태가 나타난다.

예비력의 입찰가격을 낮추는 것은 예비력을 많이 거래하여 예비력 시장의 이득을 높이기 위한 것이다. 하지만 예비력의 거래량 증가로 인해 에너지를 거래할 수 있는 용량이 적어지므로 입찰은 계약을 받게 된다. 결국, 공급할 수 있는 발전용량, 즉 최대 발전용량이 충분치 않은 상황에서 나타나는 경쟁은 에너지 시장과 예비력 시장의 한계이득(marginal profit)과 밀접한 관계가 있다.

* 교신저자, 學生會員 : 檀國大 電氣工學科 博士課程

E-mail : sjh138@dku.edu

* 正 會 員 : 檀國大 電氣電子컴퓨터工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 2006年 6月 30日

最終完了 : 2006年 9月 5日

2. 발전 예비력이 포함된 전력시장의 내쉬 균형

2.1 에너지와 예비력의 전력거래

발전기업은 에너지 시장과 예비력 시장의 입찰에 각각 참여할 수 있다[4]. 본 연구에서는 공급함수모형을 사용하여 전력시장을 분석하는데, 한계비용함수와 입찰함수는 모두 일차함수로 가정한다. 에너지 시장의 입찰함수는 한계비용함수의 기울기를 고정시키고 절편을 전략적으로 선택하는 모형을 사용하며 예비력 시장의 입찰함수는 절편을 0으로 하고 기울기를 전략적으로 선택하는 모형을 사용한다. 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$C_{ei}'(q_i) = k_i + m_i q_i \quad (1)$$

$$C_{ri}'(r_i) = s_i r_i \quad (2)$$

$$\bar{C}_i(q_i) = b_i + m_i q_i \quad (3)$$

C_{ei}' : 에너지 시장 입찰함수, C_{ri}' : 예비력 시장 입찰함수
 \bar{C}_i : 한계비용 함수, q_i : 에너지 거래량
 r_i : 예비력 거래량, k_i : 에너지 시장 입찰전략
 s_i : 예비력 시장 입찰전략, b_i : 한계비용함수 절편
 m_i : 한계비용함수 기울기

식 (1)은 에너지 공급에 대한 입찰함수를 의미하고 식 (2)는 예비력 공급에 대한 입찰함수를 의미하며, 식 (3)은 한계비용함수를 나타낸다. 에너지 시장에서의 입찰전략은 한계비용함수의 기울기를 고정시킨 상태에서 절편을 전략적으로 선택하는 반면 예비력 시장의 입찰전략은 예비력 계약에 따른 공급가격으로 한계비용함수에 대해 독립적이다.

반면, 시장운영자는 발전기업이 제시하는 입찰함수와 최대 발전량, 그리고 부하의 수요특성을 고려하여 전력거래를 결정한다. 이때, 전력계통의 안정성을 확보하기 위해 부하의 일정비용을 예비력으로 확보해야 하는데 본 연구는 부하 d 의 10%를 예비율 η 로 가정한다. 즉, $\eta d = \sum r_i$ 로 예비력을 확보하고 η 는 0.1로 설정한다. 그리고 부하의 수요특성 D 는 탄력성을 가지며 부하 d 에 따라 절편 b_0 와 기울기 m_0 를 갖는 $D(d) = b_0 - m_0 d$ 로 가정한다.

예비력의 가격에 관련된 기존 연구[4]에서 입찰가방식이 동일가격방식에 비해 시장지배력(market power)을 줄일 수 있다는 결과를 발표했으므로 본 연구에서는 입찰가방식을 적용하여 경쟁을 분석한다.

예비력의 급전에 따른 추가 비용을 고려하지 않는 경우, 예비력 시장에서 일어나는 거래는 발전기업의 한계비용함수에 관계없이 이득을 준다[8]. 또한, 최대발전용량이 매우 큰 경우에는 에너지와 예비력의 거래량의 배분보다는 예비력을 최대한 거래하여 이득을 얻으려는 유인이 강하게 나타난다. 이러한 경우, 예비력 시장의 입찰전략 s_i 을 낮추는 경쟁이 발생하게 된다. 최종적으로 s_i 는 비현실적인 0의 값을 가지게 되므로 본 연구에서는 이를 방지하기 위해 예비력의 최소가격을 고려하여 식 (4)와 같이 예비력의 가격을 결정한다. 반면, 에너지의 가격은 식 (5)와 같이 결정한다.

$$\begin{cases} p_{ri} = s_i r_i, & \text{if } s_i r_i \geq p_{r \min} \\ p_{ri} = p_{r \min}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$p_{ei} = k_i + m_i q_i \quad (5)$$

여기서, p_{ri} 는 예비력의 거래가격을 의미하고 $p_{r \min}$ 는 예비력의 최소가격을 의미한다. 또한 p_{ei} 는 에너지의 거래가격을 의미한다.

예비력의 입찰가격이 최소가격보다 작은 경우, 거래가격은 식 (4)와 같이 최소가격에 의해 결정된다. 반대로 입찰가격이 최소가격보다 큰 경우에는 예비력의 입찰가격에 의해 결정된다. 반면 에너지의 거래가격은 식 (5)와 같이 입찰가격에 의해서만 결정된다.

2.2 최적화 문제 표현

시장운영자는 발전기업이 제시하는 입찰함수에 대해 사회적후생(social welfare)을 의미하는 시장거래가치를 극대화시키는 전력거래를 결정한다. 이를 최적화 문제로 표현하면 아래와 같다.

$$\text{Max}_{q_i, r_i} SW = B(\sum q_i) - \sum C_{ei}(q_i) - \sum C_{ri}(r_i) \quad (6)$$

$$\text{s.t. } \eta \sum q_i = \sum r_i \quad (7)$$

$$q_i + r_i \leq \bar{q}_i \quad (8)$$

SW : 사회적후생, B : 소비자의 만족가치(benefit)
 \bar{q}_i : 최대 발전용량, C_{ei} : 유사 에너지 발전비용
 C_{ri} : 유사 예비력 발전비용

식 (6)은 시장운영자의 목적함수인 시장거래가치를 의미하며 소비자의 만족가치에서 시장운영자가 고려하는 발전비용 즉, 유사 발전비용을 뺀 값으로 계산된다[3]. 여기서 소비자의 만족가치는 수요특성을 부하량으로 적분한 값이고 유사 발전비용은 입찰함수를 거래량으로 적분한 값이다. 식 (7)은 예비력 확보량에 대한 제약을 의미하며 식 (8)은 최대 발전용량 제약을 나타낸다. 또한, 식 (6)과 식 (7)은 에너지에 대한 수급조건 $d = \sum q_i$ 를 포함시켜 나타냈다.

반면, 발전기업은 전력거래를 통해 이득을 극대화시키는 입찰전략을 결정한다. 발전기업은 에너지 시장과 예비력 시장에서 이득을 얻을 수 있으므로 두 시장을 모두 고려하여 입찰전략을 결정해야 한다. 발전기업 G_i 의 최적화 문제는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\text{Max}_{k_i, s_i} \Pi_i(k_i, s_i, q_i, r_i) = \Pi_{ei}(k_i, s_i, q_i) + \Pi_{ri}(k_i, s_i, r_i) \quad (9)$$

여기서, Π_i 은 발전기업의 총 이득을 나타내고 Π_{ei} 와 Π_{ri} 는 각각 에너지 시장 이득과 예비력 시장 이득을 나타낸다. 발전기업은 식 (9)와 같이 에너지 시장의 이득과 예비력 시장의 이득을 모두 고려하여 k_i 와 s_i 를 결정한다.

2.3 내쉬 균형의 계산

최대 발전용량 제약이 균형 상태에 영향을 미치는 경우, 이득함수는 볼록(convex)함수 성질을 잃게 되어 해석적인 방법으로 해를 구하는 것은 어려워진다. 또한, 경쟁의 균형점은 복합전략(mixed strategy)으로 나타날 수 있다[6]. 이때, 내쉬균형은 변수간의 상보성을 이용하는 Lemke 알고리즘을 사용하여 구할 수 있다.

Lemke 알고리즘을 사용하기 위해서는 입찰전략에 보수행렬을 구해야하는데, 보수행렬은 경쟁에 참여하는 발전기업과 입찰전략의 수에 상관없이 2차원으로 구성해야한다.

본 연구에서는 G_i 의 입찰전략 (k_i, s_i) 조합을 일차원으로 배열하고 G_j 의 입찰전략 (k_j, s_j) 조합을 또 다른 일차원으로 배열하여 각 상황에서 계산된 보수를 2차원 행렬로 구성한다. 그리고 보수행렬법(payoff matrix)을 이용하여 내쉬균형 계산을 시도한다.

3. 에너지시장과 예비력시장의 한계이득

3.1 균형상태에서의 한계이득 예측

내쉬균형은 경쟁에 참여한 모든 시장참여자가 균형을 이룰할 유인이 없는 상태이다[6,8]. 즉, 발전기업이 입찰전략을 바꾸어도 이득이 증가하지 않는 상태를 의미하므로 수학적으로 표현하면 내쉬균형 상태에서 총 이득에 대한 입찰전략의 편미분 값은 영(zero)이 된다.

입찰전략에 대한 한계이득은 이득을 입찰전략으로 편미분한 값을 의미한다. 균형 상태에서 입찰전략에 대한 에너지시장의 한계이득과 예비력 시장의 한계이득을 합한 총 한계이득이 영이 된다는 것은 두 시장의 한계이득이 부호가 반대이고 절대 값이 같은 상태이다. 만약 총 한계이득이 영이 아니면 입찰전략을 바꿀 유인이 발생하기 때문에 내쉬균형 조건을 만족하지 않는다.

한계이득의 정식화는 3.3절을 통해 설명한다. 추후에 설명할 3.3절과 같이 한계이득을 계산하기 위해서는 입찰전략에 대한 전력거래량 민감도 계산이 필요하다. 그러므로 한계이득의 정식화에 앞서, 3.2절을 통해 입찰전략에 대한 전력거래량 민감도를 계산한다. 그리고 계산된 결과를 이용하여 3.3절에서 한계이득을 정식화한다.

3.2 입찰전략에 따른 전력거래량 민감도 계산

입찰전략의 변화가 전력거래량에 미치는 영향은 시장운영자의 전력거래량 결정과정을 통해 분석할 수 있다. 제약조건을 만족시키면서 사회적후생을 극대화시키는 전력거래량은 시장운영자의 최적화문제를 라그랑주함수로 만들고 전력거래량 그리고 라그랑지 승수로 편미분함으로서 계산된다.

발전용량 제약을 나타내는 식 (8)은 라그랑지 승수와 결합되어 라그랑주 함수에 포함된다. Kuhn-Tucker 조건에 의하면, 부등식 제약조건 $\mu_i \{ \bar{q}_i - (q_i + r_i) \}$ 의 값은 0이어야 한다. 또한 부등식 제약조건이 구속(binding)된 $(q_i + r_i = \bar{q}_i)$ 경우에 μ_i 는 0보다 커야하고, 구속되지 않는 $q_i + r_i < \bar{q}_i$ 인 경우에는 $\mu_i = 0$ 이어야 한다. 그러므로 μ_i 는 부등식 제약조건에 구속되는 경우에만 값을 가진다.

간단한 표현을 위해 G_1, G_2 가 경쟁에 참여하고 부등식 제약조건에 모두 구속되는 경우를 가정한다. 이때, 전력거래량은 식 (10)과 같은 행렬에 의해 계산된다.

$$\begin{pmatrix} m_0 + m_1 & m_0 & m_1 & 0 & \eta & -1 & 0 \\ m_0 & m_0 + m_2 & 0 & m_2 & \eta & 0 & -1 \\ m_1 & 0 & s_1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & s_2 & -1 & 0 & -1 \\ \eta & \eta & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ r_1 \\ r_2 \\ \lambda \\ \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_0 - k_1 \\ b_0 - k_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

만약 G_1 이 최대 발전용량을 모두 거래하고 G_2 가 발전용량의 여유가 있는 경우에는 μ_2 가 전력거래량 결정에 영향을 주지 않는다. 그러므로 이 경우에는 식 (10)에서 μ_2 에 관련된 행과 열을 제외시키면 된다.

k_i 에 대한 q_i, r_i 의 민감도 $\partial q_i / \partial k_i, \partial r_i / \partial k_i$ 와 s_i 에 대한 q_i, r_i 의 민감도 $\partial q_i / \partial s_i, \partial r_i / \partial s_i$ 를 구하기 위해 식 (10)을 변수가 포함된 형태로 나타내면 $A(s_i) \cdot x(q, r) = b(k_i)$ 와 같다. 식 (10)을 고려해 볼 때, $\partial q_i / \partial k_i$ 와 $\partial r_i / \partial k_i$ 는 $A^{-1} \cdot b$ 의 간단한 역행렬연산으로 구해진다. 하지만 s_i 는 A 행렬에 포함되어 있어, $\partial q_i / \partial s_i, \partial r_i / \partial s_i$ 는 역행렬만으로는 계산할 수 없다.

s_i 에 대한 q_i, r_i 의 영향은 미소한 차이를 나타내는 dA 와 dx 를 사용하여 $[A + dA] \cdot [x + dx] = b$ 와 같이 표현할 수 있다. 여기서 $dA \cdot dx$ 는 무시할 수 있으므로 식은 $[dA \cdot x] + [A \cdot dx] = 0$ 으로 전개된다. 이를 dx 에 관련하여 표현하면 $dx = -A^{-1} \cdot dA \cdot x$ 와 같이 정리된다.

행렬 A 의 원소를 A_{ij} 라하고 벡터 x 의 변수를 x_k 라고 할 때, dA_{ij} 에 대한 dx_k 의 변화는 $dx_k = -A_{ki}^{-1} \cdot dA_{ij} \cdot x_j$ 의 관계에 있다. 그러므로 변수 A_{ij} 에 대한 x_k 의 영향은 $dx_k / dA_{ij} = -A_{ki}^{-1} \cdot x_j$ 이므로 이를 편미분으로 바꿔 정의하면 다음 식 (11)과 같다[8].

$$\partial x_k / \partial A_{ij} = -[A^{-1}]_{ki} \cdot x_j \quad (11)$$

한계이득 분석에 필요한 식 (11)의 전력거래량 민감도 $\partial q_i / \partial s_i, \partial r_i / \partial s_i$ 는 균형 상태의 q_i, r_i, k_i, s_i 를 대입하여 계산한다. 마찬가지로 균형 입찰전략 k_i 에 대한 전력거래량 민감도 $\partial q_i / \partial k_i$ 와 $\partial r_i / \partial k_i$ 는 $A^{-1} \cdot b$ 를 통해 계산하고 구체적인 수치는 균형 상태의 값을 사용한다.

3.3 한계이득 정식화

발전기업은 에너지 시장 뿐 아니라 예비력 시장에서도 이득을 얻는다. 실제 급전이 이루어지는 예비력에 대한 발전비용은 추가 정산을 통해 발전기업에게 지급된다. 그러므로 발전기업은 에너지에 대한 발전비용은 고려하지만 예비력에 대한 발전비용은 고려하지 않고 이득을 계산한다. 각 시장의 이득을 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\Pi_{ei}(k_i, s_i, q_i) = p_{ei} \cdot q_i - (b_i q_i + 0.5 m_i q_i^2) \quad (12)$$

$$\Pi_{ri}(k_i, s_i, r_i) = p_{ri} \cdot r_i \quad (13)$$

식 (12)는 에너지 시장에서의 이득을 나타내며 식 (13)은 예비력 시장에서의 이득을 나타낸다. 그리고 에너지와 예비력의 거래가격은 식 (4)와 식 (5)에 의해 결정된다.

입찰전략에 따른 한계이득은 상대기업의 입찰전략이 고정되어 있는 상태에서 입찰전략의 미세한 변화에 대한 이득의 변화로 정의한다. 그러므로 각 시장의 이득을 k_i 와 s_i 에 대해 편미분함으로서 구할 수 있으며 식 (14)~(17)과 같다.

$$\partial \Pi_{ei} / \partial k_i = (k_i + m_i q_i - b_i) \partial q_i / \partial k_i + q_i \quad (14)$$

$$\partial \Pi_{ri} / \partial k_i = 2 s_i r_i \partial r_i / \partial k_i \quad (15)$$

$$\partial \Pi_{ei} / \partial s_i = (k_i + m_i q_i - b_i) \partial q_i / \partial s_i \quad (16)$$

$$\partial \Pi_i / \partial s_i = 2s_i r_i \partial r_i / \partial s_i + r_i^2 \quad (17)$$

식 (14)~(17)에 나타난 입찰전략에 대한 전력거래량 민감도 $\partial q_i / \partial k_i, \partial r_i / \partial k_i, \partial q_i / \partial s_i, \partial r_i / \partial s_i$ 는 3.2절에서 설명한 방법을 사용한다.

균형 상태에서 입찰전략에 대한 에너지 시장과 예비력 시장의 한계이득을 합한 총 한계이득은 0이다. 만약 균형 상태에서 복합전략이 선택된다면, 입찰전략에 대한 한계이득은 확률을 고려한 기대 값으로 계산된다. 그러므로 기대 값으로 계산된 에너지 시장과 예비력 시장의 한계이득을 합한 총 한계이득도 0이어야 한다.

4. 사례 연구

4.1 시장의 조건

계통모형은 발전기업 G_1, G_2 가 공급경쟁에 참여한 것을 대상으로 한다. G_1 과 G_2 의 한계비용함수는 각각 $\bar{C}_1(q_1) = 10 + 0.25q_1, \bar{C}_2(q_2) = 5 + 0.45q_2$ 으로 고려하고 부하의 수요특성은 $D(d) = 100 - 0.5d$ 으로 탄력성을 부여한다. 또한 예비율 η 는 총 수요량의 10%로 가정하고 예비력의 최소거래가격은 3으로 설정하며 송전용량 제약은 고려하지 않는다. 최대 발전용량이 균형에 미치는 영향을 분석하기 위해 표 1과 같이 최대 발전용량에 따라 전력시장을 구분한다.

표 1 최대 발전력에 따른 구분

Table 1 The capacity limits of a sample case

구분	최대 발전용량(\bar{q}_i)	
	조건 1	조건 2
G_1	120	120
G_2	120	63

조건 1과 조건 2에서 G_1 의 최대 발전용량은 120으로 동일하게 가정한다. 반면 G_2 의 최대 발전용량은 각각 큰 값(120)과 작은 값(63)으로 차이를 두어 설정한다.

4.2 균형점 계산

균형 전략은 2.3절에서 설명한 것과 같이 보수행렬을 이용하여 계산한다. 계산시간을 단축하기 위해 이산화 간격을 큰 값으로 시작하여 점차 줄이는 방법을 사용한다. k_i 의 이산화구간은 10~55로 고려하고 k_2 는 5~50까지 고려한다. 그리고 s_1 과 s_2 는 0.1~10까지 설정한다. 이산화 간격은 큰 이산화 간격으로 계산된 균형 상태의 유효 자리수를 고려하여 점차 줄여 나간다. 전략변수 k_i 를 0.1단위로 s_i 를 0.01단위로 이산화 하였을 때의 균형 전략은 표 2와 같다.

최대 발전용량이 큰, 조건 1의 균형상태에서는 G_1, G_2 가 단순전략(pure strategy)을 사용한다. 반면, 조건 2의 균형 상태에서는 G_1 이 확률적인 복합전략을 사용하고 G_2 는 단일 전략을 선택한다. 이와 같은 결과는 G_2 의 최대 발전용량 조건이 내쉬 균형에 영향을 미치기 때문에 발생하는 것이다. 이에 대한 정량적인 분석은 4.3절에서 소개한다.

표 2 균형 상태 입찰전략

Table 2 The bidding strategies of Gencos at NE

구분		k_i	s_i	확률[%]
조건 1	G_1	24.7	0.50	100
	G_2	14.5	0.50	100
조건 2	G_1	32.6	7.23	9.65
	G_1	24.9	0.98	90.35
	G_2	17.2	1.69	100

계산된 입찰전략이 내쉬 균형을 만족하는지 여부는 한계보수를 이용하여 판단할 수 있다. 한계보수는 상대기업의 입찰전략을 고정된 상태에서 자신의 입찰전략 변화에 대한 이득을 의미한다. 조건 1의 균형 상태에서 나타나는 G_1, G_2 의 한계보수는 그림 1과 같고 조건 2의 균형 상태에서 나타나는 한계보수는 그림 2와 같다.

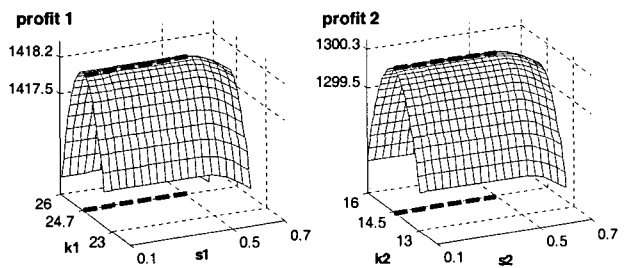


그림 1 조건 1에서 한계보수

Fig. 1 Marginal payoffs of condition 1 at NE

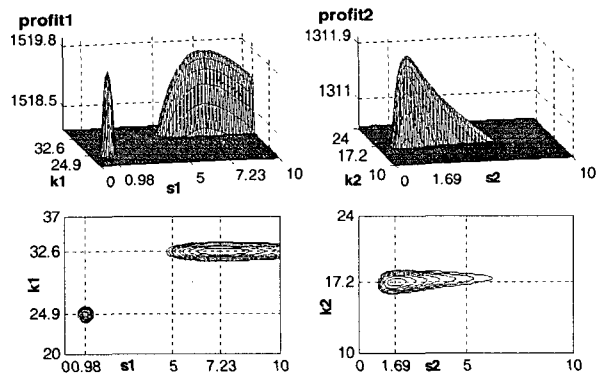


그림 2 조건 2에서 한계보수

Fig. 2 Marginal payoffs of condition 2 at NE

그림 1의 왼쪽 그림은 균형 상태에서 나타나는 G_1 의 한계보수를 표현하고 오른쪽은 G_2 의 한계보수를 표현한다. G_1 은 k_1 을 24.7로 선택하고 s_1 을 0.1~0.5로 선택할 때, 이득이 1418.2로 극대화되는 것을 알 수 있다. 반면 G_2 는 k_2 를 14.5로 선택하고 $s_2=0.1\sim 0.5$ 을 선택할 때, 이득이 1300.3으로 극대화된다. 발전기업이 그 이상의 입찰전략을 선택하면 거래량이 감소하므로 이득도 감소하게 된다. 그림 1에서 s_i 가 0.1~0.5인 구간에서는 이득의 변화가 없는데 이는 예비력의 입찰가격을 최소가격보다 낮추는 것이 이득에 영향을 미치지 않기 때문에 나타난다. 그러므로 균형 상태에서 예비력

입찰가격은 최소가격과 같은 상태로 결정된다. 가격에 대한 정량적인 분석은 4.3절에서 나타낸다. 결국, 입찰전략 $k_1 = 24.7$, $s_1 = 0.5$, $k_2 = 14.5$, $s_2 = 0.5$ 인 상태에서 이득이 극대화되므로 내쉬균형의 정의와 일치한다.

조건 2의 균형 상태에서 나타나는 한계보수 분포는 그림 2와 같다. 그림 2는 한계보수를 표현한 3차원 그림과 높이를 비교하기 위한 등고선(contour)으로 구성되어 있다. 그리고 그림 2의 왼쪽은 G_1 의 한계보수를 의미하고 오른쪽은 G_2 의 한계보수를 의미한다. 또한 조건 2의 균형 상태는 복합전략으로 나타나기 때문에 확실적인 값을 고려하여 한계보수를 나타낸다.

복합전략으로 균형점이 나타나는 경우, 각 전략에 대한 기대이득은 동일하다. 그러므로 G_1 의 기대이득은 균형 상태의 입찰전략 $k_1 = 32.6$, $s_1 = 7.23$ 과 $k_1 = 24.9$, $s_1 = 0.98$ 에서 1519.8로 동일함을 알 수 있다. 그리고 기대이득은 최대값으로 나타난다. 반면, G_2 는 하나의 전략을 선택하므로 $k_2 = 17.2$, $s_2 = 1.69$ 에서 최대이득 1311.9를 가진다. 결국, 균형상태의 입찰전략을 바꾸어 더 이상의 이득을 얻을 수 없으므로 내쉬 균형의 조건을 만족한다.

4.3 시장실적 분석

균형 상태의 입찰전략은 발전용량에 따라 표 2와 같이 달라진다. 발전용량이 큰, 조건 1에서는 단순전략을 선택하는 반면 조건 2에서는 G_1 이 복합전략을 선택하고 G_2 이 하나의 전략을 선택한다. 이렇게 발전용량에 따라 균형이 틀러지므로 이를 시장실적을 이용하여 분석할 필요가 있다. 또한, 조건 2에서는 복합전략이 나타나므로 표 3과 같이 전략에 따라 조건 2-1과 조건 2-2로 구분하여 시장실적을 분석한다.

표 3 거래량과 가격의 비교

Table 3 Quantity and price comparisons at NE of sample condition

시장실적	거래가격				거래량				
	G_1		G_2		G_1		G_2		
	p_{e1}	p_{r1}	p_{e2}	p_{r2}	q_1	r_1	q_2	r_2	
조건 1	40.29	3.00	40.29	3.00	62.20	5.97	57.22	5.97	
조건 2	조건2-1	45.33	17.3	41.85	13.81	51.06	2.39	54.81	8.19
	조건2-2	40.88	7.22	40.88	7.22	64.13	7.40	52.66	4.28
	기대값	41.31	8.19	40.97	7.85	62.87	6.91	52.87	4.66

최대 발전용량 조건이 균형에 영향을 미치지 못하는 경우에는 조건 1과 같이 단순전략으로 나타난다. 즉, 공급할 수 있는 발전용량이 충분하므로 발전기업은 예비력 시장에서 가격을 낮추어 이득을 높이고자 한다. 그러므로 예비력의 거래가격은 최소가격으로 결정되고 균형 상태의 입찰가격도 최소가격보다 낮게 할 유인이 없다. 즉, 입찰가격 $3(=s_1r_1)$ 은 최소가격과 같아진다.

발전용량 조건이 균형에 영향을 미치는 경우에는 조건 2와 같이 복합전략으로 나타난다. 조건 2-1에서 음영으로 표시한 G_2 의 에너지 거래량 54.81과 예비력 거래량 8.19를 합하면 63으로 최대 발전용량 \bar{q}_2 와 일치한다. 반면, 조건 2-2에서는 G_2 의 거래량이 52.66+4.28=56.94로 발전용량이 모두

거래되지 않는다. 즉, 조건 2의 균형 상태에서 G_1 은 G_2 가 발전용량을 모두 거래하도록 하는 유인과 그렇지 하지 않도록 하는 유인을 동시에 가지고 있다. 그리고 G_1 의 유인 정도는 복합전략의 확률 값으로 나타나며 G_2 가 발전용량을 모두 거래하지 못하도록 하는 유인이 90.35%로 모두 거래하도록 하는 유인 9.65% 보다 크게 나타난다. 이를 예비력 거래가격 측면에서 본다면, G_1 은 예비력의 거래가격을 낮추어 이득을 얻으려는 유인이 90.35%로, 예비력 거래가격을 높여 이득을 얻으려는 유인 9.65%보다 크다.

이상을 통해, 조건 2에서는 G_1 이 예비력 거래가격을 전략적으로 이용하는 것을 알 수 있다. 반면, 조건 1에서는 예비력의 거래가격이 최소가격으로 결정되므로 G_1 이 거래가격을 전략적으로 이용하지 못한다. 즉, 조건 1에서는 예비력 시장을 전략적으로 이용하지 못하지만 조건 2에서는 예비력 시장을 전략적으로 이용한다.

발전용량의 여유가 있는 조건 1과 조건 2-2에서 전력가격은 $p_{e1} = p_{e2}$ 과 $p_{r1} = p_{r2}$ 의 관계가 성립한다. 하지만, 조건 2-1에서는 G_2 의 발전용량 여유가 없기 때문에 전력가격은 G_1 이 G_2 보다 더 높게 $p_{e1} > p_{e2}$, $p_{r1} > p_{r2}$ 으로 나타난다. 또한 조건 2-1로 인해 조건 2의 기대가격도 G_1 이 G_2 보다 크게 나타난다.

4.4 발전기업의 한계이득 분석

입찰전략에 대한 한계이득을 분석하기 위해서는 입찰전략이 이득에 미치는 영향을 알아야 한다. 이득은 가격을 통해 결정되므로 가격과 입찰전략의 관계를 알아야 입찰전략에 대한 한계이득을 정의할 수 있다.

전력가격이 결정되는 2.1절을 고려해 볼 때, 예비력의 입찰가격이 최소가격보다 낮은 경우에는 예비력 시장의 이득은 입찰함수에 의해 결정되지 않는다. 그러므로 예비력 시장의 이득에 대한 입찰전략의 편미분 값을 정의하기란 어렵다. 바꾸어 표현하면, 예비력의 거래가격이 최소가격으로 결정될 만큼 발전용량이 큰 경우에는 이득에 대한 입찰전략의 편미분 값을 알 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 조건 2에서만 한계이득을 분석한다.

만약 입찰전략에 대한 에너지 시장의 한계이득이 양(positive)의 값을 가지게 된다면 발전기업은 에너지 시장에서 이득을 증가시키기 위해 입찰전략을 높일 것이다. 하지만 입찰전략의 변화로 인해 예비력 시장의 이득이 증가된 이득만큼 감소한다면 발전기업은 입찰전략을 바꾸지 않을 것이다. 그러므로 균형 상태에서 입찰전략의 변화유인은 에너지 시장과 예비력 시장의 한계이득을 통해 분석할 수 있다. 조건 2의 균형점에서 발전기업의 한계이득과 이득은 표 4와 같다. 균형 상태에서 입찰전략은 확률분포로 나타나기 때문에 한계이득과 이득은 기대 값으로 계산한다.

다음에 나오는 표 4를 살펴보면, 균형 상태에서 G_1 , G_2 는 예비력 시장에 비해 에너지 시장에서 큰 이득을 얻는 것을 알 수 있다. 하지만 한계이득은 이와 다른 특징이 있다.

표 4에서 k_1 에 대한 에너지 시장과 예비력 시장에서의 한계이득이 0.67과 -0.67로 부호는 반대이지만 절대 값은 0.67로 동일함을 알 수 있다. 즉, k_1 을 높게 하면 에너지 시장에서는 0.67의 이득이 증가하지만 예비력 시장에서는 0.67만큼

의 이득이 감소한다는 것을 의미한다. 반대로 k_1 을 낮게 했을 때는 에너지 시장에서는 이득이 감소하지만 예비력 시장에서는 이득이 증가하는 것을 의미한다. 결국, k_1 을 변화시켜 에너지 시장에서의 이득 증가(감소)분이 예비력 시장에서의 이득 감소(증가)분과 동일하기 때문에 k_1 을 바꿀 유인이 존재하지 않는 것이다. k_2, s_1, s_2 도 같은 방법에 의해 설명이 가능하므로 한계이득 측면에서 볼 때, 균형 상태의 k_1, k_2, s_1, s_2 를 변화시킬 유인이 존재하지 않는다.

표 4 조건 2의 균형 상태에서 이득과 한계이득
Table 4 Profits and marginal profits of condition 2 at NE

비고		G_1	G_2
에너지 시장 이득(Π_{ei})		1467.6	1273.1
예비력 시장 이득(Π_{ri})		52.2	38.8
총 이득(Π_i)		1519.8	1311.9
에너지 시장에서 한계이득	$\partial\Pi_{ei}/\partial k_i$	0.67	-0.03
	$\partial\Pi_{ei}/\partial s_i$	-12.30	0.39
예비력 시장에서 한계이득	$\partial\Pi_{ri}/\partial k_i$	-0.67	0.03
	$\partial\Pi_{ri}/\partial s_i$	12.30	-0.39

5. 결 론

본 연구는 경쟁을 통해 예비력과 에너지 거래가 이루어지는 전력시장을 분석하였다. 공급함수 모형을 사용하여 에너지 시장과 예비력 시장을 결합한 모형화를 시도하였으며 결합된 최적화 문제로 표현하였다. 그리고 발전기업의 전략적인 유인을 한계이득 측면에서 분석하기 위해, 전력거래량 결정과정을 분석하여 에너지 시장과 예비력 시장의 한계이득 계산을 시도하였다.

사례연구에 적용한 결과, 균형 상태에서 발전기업은 최대 발전용량에 따라 다른 전략을 사용하였다. 발전용량이 매우 큰 경우에는, 균형 전략이 단순 전략으로 계산되었고 예비력 시장을 전략적으로 이용하지 못한다. 반면 발전용량이 적어 균형 상태에 영향을 미치는 경우에는 확률적인 값을 갖는 두 개의 복합전략으로 계산되고 예비력 시장을 전략적으로 이용하는 유인이 발생하였다.

또한, 복합전략 균형 상태에서 발전기업의 전략적인 특성을 한계이득 측면에서 분석하였다. 사례연구에 적용한 결과, 균형 상태에서 입찰전략 변화에 대한 에너지 시장 이득의 증가(감소)분과 예비력 시장 이득의 감소(증가)분이 동일함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Arroyo, J.M, Galiana, F.D, "Energy and Reserve Pricing in Security and Network-Constrained Electricity Markets," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 20, no. 2, pp. 634-643, May. 2005.
[2] Jinxiang Zhu, Jordan, G, Ihara, S, "The Market for Spinning Reserve and its Impacts on Energy Prices," Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 2,

pp. 1202-1207, Jan. 2000.

[3] Jing Wang, Redondo, N.E, Galiana, F.D, "Demand-Side Reserve Offers in Joint Energy/Reserve Electricity Markets," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 18, no. 4, pp. 1300-1306, Nov. 2003.
[4] Jianxue Wang, Xifan Wang, Yang Wu, "Operating Reserve Model in the Power Market," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 20, no. 1, pp. 223-229, May. 2005.
[5] Deqiang Gan, Litvinov, E, "Energy and Reserve Market Designs with Explicit Consideration to Lost Opportunity Costs," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 18, no. 1, pp. 53-59, Nov. 2003.
[6] Kwang-Ho Lee, "Mixed Strategy of Nash Equilibrium in Power Transaction with Constrain," KIEE Trans, vol. 51A, no. 4, pp. 196-201, Feb. 2002.
[7] 한국전력거래소, 전력시장운영규칙, <http://www.kpx.or.kr>.
[8] Jae-Hong Shin, Kwang-Ho Lee, "Modeling of an Electricity Market Including Operating Reserve and Analysis of Supplier's Bidding Strategies," KIEE International Trans. on Power Engineering, vol. 5-A, no. 4, pp. 396-402, Dec. 2005

저 자 소 개



신재홍 (申載弘)

1979년 1월 2일생. 2004년 단국대 공대 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : 02-799-1092
E-mail : sjh138@dku.edu



이광호 (李光浩)

1965년 12월 22일생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년 전력연구원 위촉연구원. 2001년 미국 Univ. of Texas (Austin) 방문교수. 1996~현재 단국대 공대 전기공학과 부교수.
Tel : 02-709-2868
E-mail : khlee@dku.edu