

발전 예비력을 포함한 전력시장에서의 공급자 입찰전략 연구

論 文

54A-4-7

A Study on the Supplier's Bidding Strategy Including Operating Reserve in an Electricity Market

申 載 弘[†] · 李 光 浩^{*}
(Jae-Hong Shin · Kwang-Ho Lee)

Abstract - In an electricity market with an imperfect competition, participants make plans of bidding and transaction strategies to maximize their own profits. The market price and the quantity are concerned with the operation reserve as well as the bidding system and demand curves in an electricity market. This paper presents a market model combined by an energy market and an operating reserve market. The competition of the generation producers in the combined market is formulated as a gaming of selecting bid parameters such as intersections and slopes in bid functions. The Nash Equilibrium(NE) is analyzed by using a bi-level optimization; maximization of Social Welfare(SW) and maximization of the producers' profits.

Key Words : Electricity Market, Nash Equilibrium, Strategies, Operating Reserve, Game Theory, Bi-Leve Optimization

1. 서 론

전력산업은 전력의 안정적인 공급에 역점을 두고 과거 공기업 체제하에서의 수직적 전력시장에서 경쟁적 전력시장으로 구조개편이 추진되고 있다. 경쟁적 전력시장은 시장원리에 의한 발전기업과 전력구매자, 시장운영자 사이의 전력거래가 이루어지는 시장이다. 전력거래를 통해 발전기업은 이득을 극대화하려고 하고 전력소비자는 소비자잉여(surplus)를 극대화하려고 한다[1]. 한편 시장운영자는 시장참여자가 제출한 전략적인 공급/수요곡선을 고려하여 사회적후생(social welfare ; SW)의 의미를 지닌 시장거래가치를 극대화시키는 거래량과 거래가격을 결정하게 된다[2-6].

전기에너지는 저장성이 없기 때문에 부하의 불규칙적인 변화에 대한 실시간 대처는 실제로 불가능하다. 그러므로 순간적인 전력의 수요와 공급 편차를 보상하기 위해 예비력의 확보는 전력시장 운영에 중요한 요소가 된다[7,8].

계통운영자(independent system operator)와 시장운영자(market operator)가 분리된 시장구조에서 예비력은 에너지 시장과 분리된 예비력시장을 통해 확보하는 것이 바람직하다고 알려져 있다[7]. 분리된 시장구조에서 예비력은 에너지 시장과 마찬가지로 발전기업이 공급입찰서를 시장운영자에게 제출한다. 따라서 발전기업이 예비력 공급을 희망하는 경우 에너지시장의 입찰서와는 별도로 예비력 공급입찰서를 제출하고 이를 바탕으로 시장운영자는 에너지시장과 예비력시장을 동시에 고려한 전력시장(이하 예비력포함 전력시장)

에서 에너지와 예비력의 거래량 및 가격을 결정한다.

경쟁적 전력시장에서 발전기업의 입찰전략을 해석하는 모형에는 발전량으로 경쟁하는 Cournot모형, 가격경쟁을 통해 공급량이 결정되는 Bertrand모형, 그리고 공급함수를 직접 입찰함으로써 경쟁에 참여하는 공급함수모형 등이 있다[3]. 이러한 여러 전력시장 모형 중 본 연구에서는 공급함수모형을 사용한다.

본 연구에서는 예비력포함 전력시장에서 발전기업의 이득 최적화 문제와 시장운영자의 시장거래가치 극대화 문제를 정식화하여 표현한다. 발전기업의 이득극대화에서는 에너지공급과 예비력공급에 대한 입찰 파라미터를 변수로 표현하고 시장거래가치 극대화에서는 예비율 개념의 예비력이 추가되도록 가격과 공급량을 결정한다. 그리고 2단계 최적화 기법[9]을 이용하여 전체 시장에서의 내쉬균형전략을 구한다[10]. 사례연구를 통하여 균형전략에서 나타나는 발전기업의 에너지공급과 예비력공급의 입찰전략을 비교하고 거래가격을 분석한다.

2. 예비력비포함 전력시장

전력시장에서 참여자의 전략을 분석하는 지금까지의 연구에서는 주로 에너지시장만을 대상으로 하고 예비력시장은 고려하지 않았다[3]. 이와 같이 에너지시장만을 고려한 전력시장을 예비력비포함 전력시장이라 칭한다. 예비력비포함 전력시장은 단일 에너지시장을 나타내므로 예비력포함 전력시장에 비하여 간단한 구조를 가진다.

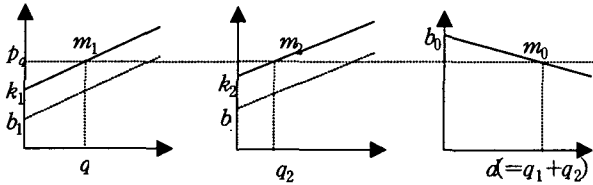
예비력비포함 전력시장에서 발전기업은 에너지시장에서의 전력공급에 대한 이득을 극대화시키는 전략적 에너지 공급함수를 결정한다. 시장운영자는 발전기업이 제시한 전략적 에너지 공급곡선을 한계비용으로 간주(이하 유사발전비용)하고 시장거래가치를 극대화시키는 에너지의 거래량과 가격

[†] 교신저자, 學生會員 : 檀國大 電氣工學科 碩士課程
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 : 2004年 11月 23日
最終完了 : 2005年 2月 18日

을 결정한다.

그림 1은 예비력비포함 전력시장에서의 균형가격을 나타낸다. 발전력계약, 송전선로계약 등의 제약조건이 없고 발전기업의 한계비용과 수요곡선을 1차함수로 고려하며 발전기업의 입찰은 한계비용함수의 기울기를 고정하고 절편을 선택하는 것으로 가정한다.



- p_e : 에너지 가격, d : 에너지 수요량
- b_0 : 수요함수 절편, m_0 : 수요함수 기울기
- b_i : 발전기업 i 의 한계비용함수 절편
- m_i : 발전기업 i 의 한계비용함수 기울기
- k_i : 발전기업 i 의 에너지시장 입찰전략
- q_i : 발전기업 i 의 에너지 발전량

그림 1 예비력비포함 전력시장에서의 균형점

Fig. 1 Equilibrium in an energy market

발전기업은 예비력비포함 전력시장에서 높은 이득을 얻기 위하여 k_i 를 높이려한다. 하지만 가격이 상승되므로 수요곡선에 의해 수요량이 감소하게 된다. 따라서 공급량이 감소하게 되고 이득극대화는 그림 1과 같이 어떠한 균형점으로 수렴하게 된다. 그리고 발전기업들은 공급함수에 대해 동일한 가격에서 발전량이 결정된다[1-6]. 이는 사회적후생의 이득극대점을 유도함으로써 확인할 수 있다[3].

3. 예비력포함 전력시장

3.1 시장운영자와 기업의 작용

전력시장은 에너지의 안정적인 공급과 전기의 품질향상에 역점을 두고 운영되어야한다. 전기에너지의 수요는 단기적으로 여러 요인에 의해 불규칙적인 패턴을 가진다. 그러나 전기에너지는 저장성이 없기 때문에 불규칙적인 패턴에 대해 공급의 실시간 대처는 실제로 불가능하다. 그러므로 예비력 확보는 안정적인 전력시장 운영에 필수적 요소가 된다[7,8]. 본 연구에서는 전체 에너지 용량의 10%를 예비율로 설정하여 시장운영자가 해결해야하는 제약조건으로 모형화한다.

경쟁적 전력구조에서 예비력은 에너지시장과는 다른 별도의 시장을 통해 확보되는 것이 바람직하다고 알려져 있다 [7]. 이러한 에너지와 예비력시장의 분리로 인해 발전기업은 에너지와 예비력시장의 입찰에 각각 참여할 수 있다. 따라서 발전기업은 에너지시장에서의 이득과 예비력시장에서의 이득을 합한 전체 전력시장에서의 이득을 최대화시키는 입찰전략을 선택하려한다. 반면 시장운영자는 에너지시장과

예비력시장에서의 시장거래가치를 극대화시키는 에너지와 예비력의 거래량 및 가격을 결정하려한다. 그림 2는 예비력포함 전력시장에서의 시장운영자와 기업간의 상관관계를 표현한다.

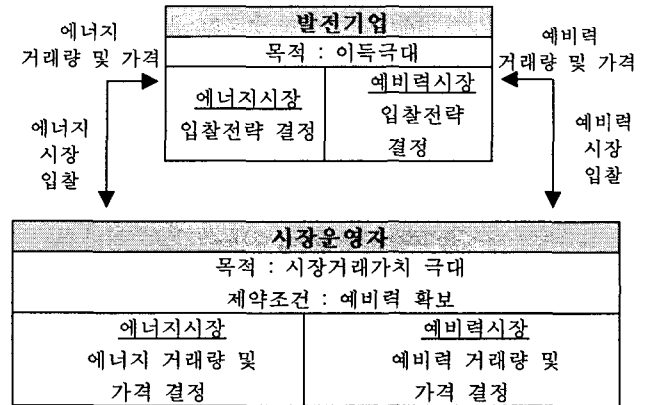


그림 2 예비력포함 전력시장참가자 상관관계

Fig. 2 Participants in a combined market model

시장운영자는 전체 전력시장에 대해 발전기업이 제출한 입찰자료를 통하여 시장거래가치를 최대화시키는 에너지와 예비력의 거래량과 가격을 결정한다. 시장운영자에 의해 결정된 거래량과 가격은 발전기업의 이득에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 발전기업은 입찰자료가 에너지와 예비력의 거래량 및 거래가격에 어떠한 영향을 미치는지 분석해야할 필요가 있다. 이러한 분석을 통해 발전기업은 이득을 극대화시킬 수 있는 입찰전략을 선택할 수 있고 시장운영자에게 입찰전략을 제출함으로써 원하는 에너지시장에서의 이득과 예비력시장에서의 이득을 얻을 수 있다. 이러한 상호대응 전략은 균형상태에 이를 때까지 계속된다.

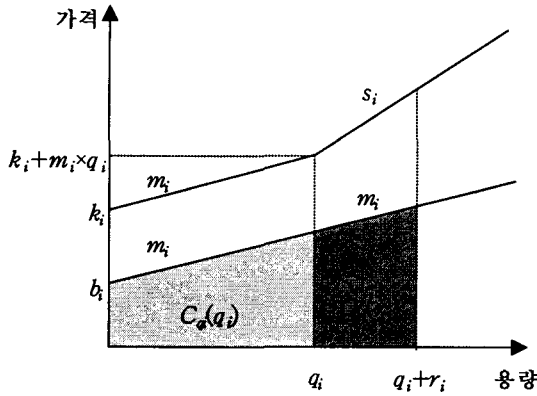
3.2 입찰함수의 모형화

발전기업이 입찰하는 에너지와 예비력의 공급함수 그리고 구매자의 수요특성인 수요함수는 모두 일차함수로 가정한다. 본 연구에서 에너지시장의 전략적 공급함수는 한계비용함수 절편을 입찰전략 파라미터로 사용하는 $k_i+m_iq_i$ 이다. 반면 예비력시장에서는 에너지시장에서 결정된 거래가격 $k_i+m_iq_i$ 를 절편으로 고정시키고 공급함수의 기울기를 입찰 전략 파라미터로 사용하는 $k_i+m_iq_i+s_i r_i$ 와 같다[9]. 예비력포함 전력시장에 참여하는 발전기업 i 의 전략적인 공급함수를 나타내면 그림 3과 같으며 식으로는 (1)과 같다.

$$C'_i(q_i, r) = k_i + m_i q_i + s_i r_i \tag{1}$$

예비력포함 전력시장에서 발전기업은 에너지시장과 예비력시장으로부터 두 종류의 수입(revenue)을 얻게 된다. 아래 그림 3에서 알 수 있듯이 에너지거래가격은 $k_i+m_iq_i$ 이고 예비력거래가격은 $k_i+m_iq_i+s_i r_i$ 와 같다. 따라서 에너지시장에서의 수입은 $q_i \cdot (k_i+m_iq_i)$ 와 같고 예비력시장에서의 수입은

$r_i \cdot (k_i + m_i q_i + s_i r_i)$ 으로 계산되어진다. 반면 발전비용은 에너지시장에서의 비용(C_a)과 예비력시장에서의 비용(C_n)으로 나타난다.



s_i : 예비력시장 입찰전략, r_i : 예비력 거래량
 $C_a(q_i)$: 에너지 발전비용, $C_n(r_i)$: 예비력 발전비용
 $C_i'(q_i, r_i)$: 입찰(가격)함수

그림 3 발전기업 입찰함수
 Fig. 3 Bid function of energy and reserve

그림 3으로부터 k_i 가 에너지거래량 q_i 에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한 에너지 전체수요량 $\sum q_i$ 는 예비율 10%로 인해 예비력 전체수요량 $\sum r_i$ 와 일정한 비율을 가지므로 k_i 는 예비력의 전체수요량에도 영향을 미치게 된다. 마찬가지로 s_i 도 예비력의 거래량은 물론 에너지의 전체수요량에도 영향을 미치게 된다. 따라서 발전기업은 이득극대화 전략을 수립하기 위해 k_i , s_i 와 에너지/예비력 거래량에 대한 상관관계를 분석해야한다.

한편 예비력계약에 따른 이득을 계산하는데 있어 예비력의 비용(C_n)을 고려한 경우[11]도 있고 고려하지 않은 경우[12]도 있다. C_n 를 고려하지 않을 경우 예비력시장에서 일어나는 거래는 발전기업의 한계비용에 관계없이 이득을 가져다준다. 따라서 발전기업은 에너지시장보다는 예비력시장에서의 공급을 선호하게 될 것이다. 또한 예비력은 실시간으로 발전이 필요한 경우가 발생하기 때문에 비용을 무시할 수 만은 없다. 따라서 본 연구에서는 C_n 를 고려하는 것으로 정의한다.

우리나라에서 전력거래소는 전력계통운영자와 전력시장운영자의 역할을 동시에 수행한다. 그리고 전력시장운영규칙의 예비력 규정은 발전기업이나 전력소비자의 예비력 구매에 대해 미흡하다[8]. 반면 전력거래소에서 확보해야 하는 예비력에 대해서는 확실히 규정하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 구매자의 수요곡선은 에너지에 대한 지불의사를 표현한 것으로 고려한다. 이에 따라 수요에 따른 가격은 수요곡선과 에너지수요량만으로 결정되고 그림 1을 통해 $b_0 - m_0 \sum q_i$ 로 계산된다. 그리고 예비율에 해당하는 예비력의 확보를 전력시장운영자의 제약조건으로 고려한다.

4. 최적화 문제 표현과 내쉬균형

4.1 최적화 문제 표현

예비력포함 전력시장에서 시장운영자의 문제는 사회적후생의 의미를 갖는 시장거래가치를 극대화하는 것이며 다음 식 (2)~(5)와 같은 최적화 문제로 표현된다.

$$\text{Max } SW = B(d) - \sum C_a(q_i) - \sum C_n(r_i) \quad (2)$$

$$\text{s.t. } d = \sum q_i \quad (3)$$

$$\eta \sum q_i = \sum r_i \quad (4)$$

$$q_i + r_i \leq P_i^{\text{max}} \quad (5)$$

SW : 시장거래가치, $B_i(d_i)$: 소비자만족(benefit)

η : 예비율, P_i^{max} : 최대발전력

$C_a(q_i)$: 유사 에너지 발전비용

$C_n(r_i)$: 유사 예비력 발전비용

식 (2)는 시장운영자의 목적함수인 시장거래가치를 나타내는 것으로 소비자만족에서 에너지 발전비용인 C_a 와 예비력 발전비용인 C_n 를 뺀 값으로 계산된다. 식 (3)은 에너지공급량과 수요량을 일치시키는 수급조건식을 표현한 것이다. 식 (4)는 예비력 확보수준을 나타내는 식으로 η 는 예비율로서 에너지공급량의 일정부분을 예비전력으로 확보하도록 하는 비율을 의미한다. 본 연구에서는 $\eta=0.1$ 로 설정한다. 식 (5)는 최대발전량의 범위를 나타내는 부등식 제약조건식으로 예비력을 포함한 발전력이 최대발전력 범위내에 있어야함을 의미한다. 따라서 시장운영자는 식 (3)~(5)의 제약조건을 만족하며 시장거래가치를 표현한 식 (2)을 극대화하는 q_i 와 r_i 를 결정한다.

반면 발전기업은 이득을 극대화시키는 각 시장에서의 입찰전략 k_i 와 s_i 를 결정한다. 발전기업의 이득은 에너지시장에서 얻는 이득(Π_a)과 예비력시장에서 얻는 이득(Π_n)의 합으로 표현된다. 발전기업 i 의 이득을 Π_i 라고 할 때, 발전기업의 이득은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\text{Max } \Pi_i(k_i, s_i, q_i, r_i) = \Pi_a(k_i, s_i, q_i, r_i) + \Pi_n(k_i, s_i, q_i, r_i) \quad (6)$$

여기서 k_i , s_i 는 에너지와 예비력의 거래량에 영향을 미치게 된다. 또한 에너지와 예비력의 거래량은 기업의 이득과 직접적인 관계를 가지고 있다. 그러므로 발전기업의 이득은 식 (6)와 같이 k_i , s_i , q_i , r_i 를 통해 결정된다.

4.2 2단계 최적화 기법을 이용한 내쉬균형 계산

시장운영자는 발전기업이 제시한 입찰함수의 파라미터 k_i , s_i 에 대하여 시장거래가치를 극대화시키는 거래량 q_i , r_i 를 결정한다. 반대로 발전기업은 시장운영자에 의해 결정되는 거래량과 가격에 대해 이득을 극대화시키는 k_i 와 s_i 를 결정한다. 이와 같이 시장운영자의 결정변수와 발전기업의 결정변수는 직접적인 상호 연관성을 갖고 있다. 서로 다른 목적

함수의 최적화 과정이 상호 영향을 주는 문제를 계산하기 위해 본 연구에서는 2단계 최적화 기법을 사용하여 내쉬균형을 계산한다[9].

시장운영자의 최적화문제는 예비율 제약조건을 만족하며 시장거래가치를 극대화하는 것이다. 식 (2)~(5)는 다음의 식 (7)과 같은 라그랑주함수(Lagrange's function)로 표현된다.

정식화의 샘플 계통은 발전력 제약이 없는 발전기업 G1, G2가 전력시장에 참여하고 부하는 하나의 집중된 수요함수로서 일차함수로 가정한다.

$$LAPLACE = SW + \lambda(r_1 + r_2 - \eta(q_1 + q_2)) \quad (7)$$

여기서,

$$SW = b_0(q_1 + q_2) - 0.5m_0(q_1 + q_2)^2 - k_1q_1 + 0.5m_1q_1^2 + k_2q_2 + 0.5m_2q_2^2 + (k_1 + m_1q_1)r_1 + 0.5s_1r_1^2 + (k_2 + m_2q_2)r_2 + 0.5s_2r_2^2$$

식 (7)에서 λ 는 예비율에 대한 제약조건식을 라그랑주함수에 추가시키기 위한 승수(multiplier)로써 제약조건을 만족도와 관련이 깊다.

시장운영자 측면에서 제약조건을 만족하며 사회적후생을 극대화시키는 조건은 다음 식 (8)과 같으며 이를 통해 q_0, r_0, r_2, λ 를 구한다.

$$\frac{\partial LAPLACE}{\partial q_1} = 0, \quad \frac{\partial LAPLACE}{\partial q_2} = 0, \quad \frac{\partial LAPLACE}{\partial r_1} = 0, \quad \frac{\partial LAPLACE}{\partial r_2} = 0, \quad \frac{\partial LAPLACE}{\partial \lambda} = 0 \quad (8)$$

시장운영자는 에너지거래량과 예비력거래량을 동시에 결정한다. 그러므로 식 (8)에서 $\partial q/\partial r_i = 0, \partial r_j/\partial q_i = 0$ 이고 $\partial q_j/\partial r_i = 0, \partial r_j/\partial q_i = 0$ 임에 유의해야 한다.

식 (8)의 계산을 통해 수식을 정리하면 식 (9)와 같은 행렬식으로 표현된다.

$$\begin{pmatrix} m_0 + m_1 & m_0 & m_1 & 0 & \eta \\ m_0 & m_0 + m_2 & 0 & m_2 & \eta \\ m_1 & 0 & s_1 & 0 & -1 \\ 0 & m_2 & 0 & s_2 & -1 \\ \eta & \eta & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ r_1 \\ r_2 \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_0 - k_1 \\ b_0 - k_2 \\ -k_1 \\ -k_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

예비력시장에서 발전기업은 공급함수의 기울기를 입찰전략으로 제출하는데 식 (9)의 행렬 속에 포함된 s_i 가 그것이다. 식의 형태로 보아 s_i 변화에 따른 q_0, r_i 의 값은 비선형적으로 나타남을 알 수 있다. 반면 에너지시장에서의 입찰 파라미터인 k_i 에 대한 q_0, r_i 의 변화는 선형적으로 나타남이 쉽게 확인된다.

식 (10)은 예비력포함 전력시장에서 공급기업 i 의 이득 Π_i 를 나타낸다.

$$\Pi_i = (k_i + m_i q_i) q_i + \{(k_i + m_i q_i) + s_i r_i\} r_i$$

$$- (b_i(q_i + r_i) + 0.5m_i(q_i + r_i)^2) \quad (10)$$

발전기업의 이득을 극대화시키는 k_i, s_i 는 $\partial \Pi_i / \partial k_i = 0, \partial \Pi_i / \partial s_i = 0$ 을 통해 구할 수 있으며 이를 정리하면 다음 식 (11)과 같다.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial q_i}{\partial k_i} + \frac{\partial r_i}{\partial k_i} & 2r_i \frac{\partial r_i}{\partial k_i} \\ \frac{\partial q_i}{\partial s_i} + \frac{\partial r_i}{\partial s_i} & 2r_i \frac{\partial r_i}{\partial s_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_i \\ s_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial q_i}{\partial k_i} & \frac{\partial r_i}{\partial k_i} \\ \frac{\partial q_i}{\partial s_i} & \frac{\partial r_i}{\partial s_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_i - m_i q_i \\ b_i + m_i r_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} q_i + r_i \\ r_i^2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

발전기업은 식 (11)의 계산을 통하여 이득을 극대화시키는 전략 k_i, s_i 를 선택하므로 행렬에 나타난 $\partial q/\partial k_i, \partial r/\partial k_i, \partial q/\partial s_i, \partial r/\partial s_i$ 의 값을 계산해야한다. 각각의 값은 다음과 같은 과정을 통해 계산된다.

식 (9)를 변수가 포함된 형태로 나타내면 다음 식 (12)와 같다.

$$A(s_i) \cdot x(q_i, r_i) = b(k_i) \quad (12)$$

s_i 는 행렬 A 에 포함되어 있고 q_0, r_i 는 벡터 x 에 포함되어 있다. 그리고 벡터 b 는 k_i 로 구성되어 있다. 따라서 $\partial q/\partial k_i, \partial r/\partial k_i$ 는 $A^{-1} \cdot b$ 의 계산으로 구해진다.

반면 $\partial q/\partial s_i, \partial r/\partial s_i$ 는 이와 다르게 계산된다. 우변 k_i 는 독립적 파라미터이므로 벡터 b 는 s_i 에 관계없이 일정한 값으로 유지된다. 그러므로 s_i 의 변화에 대한 q_0, r_i 의 영향은 미소한 차이를 나타내는 dA 와 dx 를 사용하여 식 (12)를 $[A + dA] \cdot [x + dx] = b$ 와 같이 표현할 수 있다. 여기서 $dA \cdot dx$ 는 무시 가능하므로 식은 $dA \cdot x + A \cdot dx = 0$ 으로 표현되고 식 (13)으로 재정리된다.

$$-A^{-1} \cdot dA \cdot x = dx \quad (13)$$

행렬 A 의 변수가 A_j 라 할때 식 (13)은 식 (14)와 같은 행렬로 구성된다.

$$\begin{pmatrix} 0 \cdot 0 & -A_{1j}^{-1} \cdot dA_{jj} & 0 \cdot 0 \\ 0 \cdot 0 & -A_{2j}^{-1} \cdot dA_{jj} & 0 \cdot 0 \\ 0 \cdot 0 & -A_{3j}^{-1} \cdot dA_{jj} & 0 \cdot 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 \cdot 0 & -A_{mj}^{-1} \cdot dA_{jj} & 0 \cdot 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ dx_3 \\ \vdots \\ dx_m \end{pmatrix} \quad (14)$$

행렬식에서 A_j 변화에 따른 x_k 의 변화는 $\frac{dx_k}{dA_j} = -A_{kj}^{-1} \cdot x_j$ 와 같이 나타나고 이를 편미분으로 바꿔 정의하면 다음 식 (15)와 같다.

$$\frac{dx_k}{dA_j} = -[A^{-1}]_{kj} \cdot x_j \quad (15)$$

식 (15)의 형태를 보아 행렬 A 와 벡터 x 의 초기값이 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 발전기업의 초기 k_0 와 s_i 값을 설정하고 식 (9)를 통해 q_0, r_i 를 결정한다. 결정된 q_0, r_i 의 값을 식 (15)에 대입하여 $\partial q/\partial s_i, \partial r/\partial s_i$ 값을 계산하고 이를

표 1 대상계통에서의 전력시장 균형점 결과

Table 1 Equilibrium in a combined market

구분		k	s	q [MW]	r [MW]	P_o [\$/MW]	P_r [\$/MW]	이득	B	SW
예비력 비포함 전력시장	G1	24.7	x	62.2	x	40.29	x	1400.3	x	4786.2
	G2	14.5	x	57.2	x	40.29	x	1282.4	x	
	D	x	x	119.4	x	40.29	x	x	8377.1	
예비력 포함 전력시장	G1	23.9	5.97	56.31	6.07	37.98	74.20	1479.1	x	4153.5
	G2	15.0	8.08	49.84	4.55	37.46	74.20	1266.7	x	
	D	x	x	106.15	10.62	46.92	x	x	7798.3	

식 (11)에 대입함으로써 k_b, s_b 를 다시 계산한다. 계산된 k_b, s_b 의 값을 시장운영자의 최적화문제를 표현한 식 (9)에 대입하여 q_b, r_b 의 값을 구하는 과정을 반복한다. 이와 같은 과정을 통해 각 단계마다 계산된 k_b, s_b 의 값이 일정하게 수렴하였을 경우를 균형전략으로 한다.

5. 사례연구

대상계통은 발전력 제약이 없는 발전기업 G1, G2가 예비력포함 전력시장에 참여하고 부하는 하나의 집중된 수요함수로 가정한다. 공급함수에서 G1은 $m_1=0.25, b_1=10$ 의 한계비용곡선을 가지고 G2는 $m_2=0.45, b_2=5$ 의 한계비용곡선을 갖는다. 수요곡선에서는 $m_0=0.5, b_0=100$ 의 탄력성을 갖는 일차함수로 가정한다.

에너지용량대비 예비력용량수준을 나타내는 예비율 γ 의 값은 0.1로 설정하고 그 외의 선로제약 등은 고려하지 않는다.

예비력시장을 고려함에 따라 발전기업은 예비력 계약을 통해 이득을 증가시키려할 것이다. 따라서 전력공급의 게임현상[13]은 보다 복잡하게 나타나게 된다. 본 연구에서 제안한 모형과 정식화 및 해법을 이용하여 내쉬균형을 계산한 결과, 상단의 표 1과 같이 예비력의 포함 여부에 따라 상이하게 나타난다.

표 1에서 예비력시장이 포함됨에 따라 에너지 구매가격은 40.29[\$/MW]에서 46.92[\$/MW]로 상승하지만 전체 에너지 거래량은 수요곡선에 의해 119.4[MW]에서 106.15[MW]로 감소하게 된다. 이로 인하여 소비자만족(B)은 에너지시장만을 고려한 전력시장에 비하여 적은 값을 갖는다. 또한 예비력에 대한 제약조건이 포함됨으로서 사회적후생(SW)은 다소 감소함을 알 수 있다.

표 1에서의 결과가 내쉬균형인가를 확인하기 위해서 내쉬 균형조건 만족 여부를 분석하면 그림 4, 5와 같다.

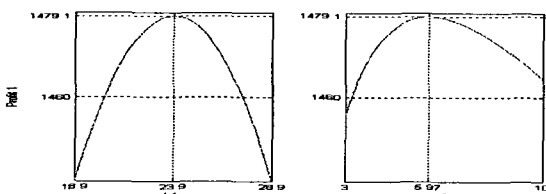


그림 4 기업 1의 이득과 k_1, s_1 과의 관계
Fig. 4 Marginal profit of G1 at NE

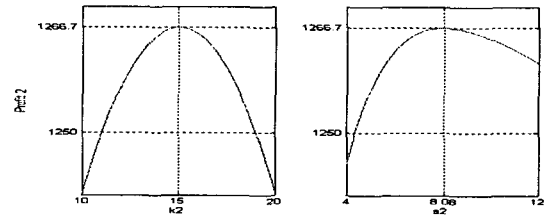


그림 5 기업 2의 이득과 k_2, s_2 과의 관계
Fig. 5 Marginal profit of G2 at NE

그림 4와 그림 5를 통해 $k_1=23.9, s_1=5.97, k_2=15.0, s_2=8.08$ 일 때 각 기업에서의 이득이 최대로 나타남을 확인할 수 있다. 이는 선택된 기업의 전략을 바꾸어 더 이상 이득을 높이기 하는 유인이 없음을 의미하므로 내쉬균형의 조건과 일치하는 것이다.

발전기업은 한계비용에 따라 이득을 극대화시키는 입찰전략을 결정하게 된다. 그리고 발전기업의 입찰전략은 에너지와 예비력거래량 결정과정에 영향을 미치게 된다. 표 2는 발전기업 G1, G2의 한계비용의 변화($b_i=5, 10, m_i=0.25, 0.45$)에 대하여 각각의 균형전략에서 G1의 에너지와 예비력의 거래비율(r_1/q_1)을 계산한 것이다.

표 2 발전기업의 한계비용변화에 따른 G1의 예비력거래비율

Table 2 Quantity ratio of G1 in energy and reserve market

(r_1/q_1)		$m_1=0.25$		$m_1=0.45$	
		$b_1=5$	$b_1=10$	$b_1=5$	$b_1=10$
$m_2=0.25$	$b_2=5$	0.1	0.1128	0.0991	0.1078
	$b_2=10$	0.0896	0.1	0.0912	0.1012
$m_2=0.45$	$b_2=5$	0.0991	0.1078	0.1	0.1096
	$b_2=10$	0.0914	0.0991	0.0918	0.1

G1의 예비력거래비율(r_1/q_1)은 예비력포함 전력시장에서 예비력시장 참여에 대한 유인(incentive)정도를 나타낸다. 표 2를 통해 두 번째, 네 번째 열의 값이 각각 첫 번째, 세 번째 열의 값보다 큼을 알 수 있다. 이는 G1의 한계비용 절편 b_1 이 클수록 예비력시장 참여에 대한 유인이 크게 나타나는 것을 의미한다.

6. 결 론

예비력은 전력시장의 안정적 운영에 있어서 필수적인 요소이다. 전력시장이 경쟁체제로 바뀔에 따라 전력시장은 예비력 거래까지 포함하는 형태가 되어야 한다. 본 연구는 예비력이 포함된 전력시장에 대한 해석기법을 제안하고 분석 결과를 제시한다.

예비력포함 전력시장에서 공급기업은 에너지시장과 예비력시장에 대한 입찰전략 파라미터를 갖는데 이를 각각 입찰함수의 절편과 기울기로 모형화하였다. 시장운영자는 거래가치의 극대화를, 공급기업은 이득의 극대화를 목적으로 하는 최적화의 정식화를 제안하였으며 내쉬균형의 계산은 2단계 최적화 기법을 사용하였다.

사례연구에서 예비력시장 포함 여부에 따른 발전기업의 전략변화를 분석하였으며 예비력이 포함된 시장에서 에너지공급가격, 수요가격을 분석하였다. 그리고 발전기업의 한계비용 절편에 따른 예비력시장 참여에 대한 유인정도를 분석하였다.

예비력시장에 대한 연구가 부족한 우리나라에서 본 연구의 전력시장 모델은 예비력시장을 통한 예비력 확보의 연구에 활용될 수 있다. 한편 전력시장의 균형점은 제약조건에 따라 달라질 수 있다. 따라서 송전선로 제약과 발전력 제약 등을 고려한 전력시장에서의 해석기법과 예비력 확보방안에 관한 연구가 필요하다.

감사의 글

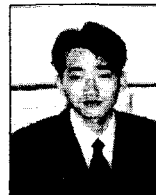
본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2003-B-350) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] Gerald B. Sheble, *Computational Auction Mechanisms for Restructured Power Industry Operation*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [2] M. Shahidepour, H. Yamin, Z. Li, *Market operations in electric power system*, John Wiley & Sons, 2002.
- [3] 이광호, "전력거래에서 제약조건이 고려된 내쉬균형점의 복합전략연구," 전기학회논문지, 51A권 4호, pp. 196-201, 2002. 2.
- [4] C. A. Berry, B. f. Hobbs, W. A. Meroney, "Analyzing Strategic Behavior in Transmission Network," IEEE Press TP-130-0, pp. 7-32, 1999.
- [5] M. Shahidepour, M. Marwall, *Maintenance Scheduling in Restructured Power Systems*, Kluwer Academic Publishers, pp. 110-111, 2000.
- [6] Steven Stoft, *Power System Economics*, IEEE Press, 2002.
- [7] Harry Singh, Alex Papalexopoulos, "Competitive Procurement of Ancillary Services by in Independent system Operator," IEEE Trans. on Power systems, vol. 14, no. 2, May 1999.
- [8] 한국전력거래소, 전력시장운영규칙, <http://www.kpx.or.kr>.

- [9] J. D. Webber and T. J. Overbye, "A Two-level Optimization Problem for Analysis of Market Bidding Strategies," IEEE PES Summer Meeting, Vol. 2. pp. 682-687, 1999.
- [10] Jin-Ho Kim, Jong-Bae Park, Jong-Keun Park, Balho H. Kim, "A new game-theoretic framework for maintenance strategy analysis," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, no. 2, pp. 698-706, May 2003.
- [11] Eric H. Allen, Marija D. Ilic, "Reserve Markets for Power Systems Reliability," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 15, no. 1, pp. 228-233, Feb 2000.
- [12] Jose Manuel Arroyo, Antonio J. Conejo, "Optimal Response of a Power Generator to Energy, AGC, and Reserve Pool-Based Markets," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 17, no. 2, pp. 404-410, May 2002.
- [13] D. Fudenberg, J. Tirole, *Game Theory*, The MIT Press, 1991.
- [14] K.H. Lee and R. Baldick, "Tuning of Discretization in Bimatrix Game Approach to Power System Market Analysis," IEEE Trans. on Power System, Vol.18, No.2, pp.830-836, May 2003.

저 자 소 개



신재홍 (申載弘)

1979년 1월 2일생. 2004년 단국대 전기공학과 졸업. 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
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