

발전예비력을 포함한 전력시장에서 한계이득을 고려한 전력거래연구

신재홍 이광호
단국대학교 전기공학과

A Study on the Power Transaction of Operating Reserve with Consideration of Marginal Profit

Jae-Hong Shin Kwang-Ho Lee
Dep. of Electrical Eng, Dankook University

Abstract - 전력시장이 경쟁체제로 바뀐에 따라 전력거래소는 적정예비력을 에너지 시장과 분리된 예비력 시장을 통해 확보해야 한다. 발전사업자는 두 시장에서 이득을 얻을 수 있으므로 이득을 고려하여 전략적인 입찰함수를 결정한다. 본 연구에서는 에너지 시장과 예비력 시장을 모형화하고 lemke 알고리즘을 사용하여 경쟁으로 나타나는 균형점을 해석한다. 또한 균형상태의 시장실적을 분석하여 발전사업자의 전략적인 행태를 분석한다. 마지막으로 예비력 시장과 에너지 시장의 참여유인을 한계이득과 관련지어 분석한다.

1. 서 론

경쟁적 전력시장을 성공적으로 운영하기 위해서는 전력의 안정적 공급이 최우선적으로 고려되어야 한다. 대규모 정전사태가 발생한 캘리포니아의 경우, 예비력 확보수단의 제도적 미비가 정전사태의 요인으로 작용했다[1]. 그러므로 우리나라 전력시장을 안정적으로 운영하기 위해서는 경쟁으로 나타나는 예비력거래 예상하는 것이 필요하다. 그리고 이를 통해 예비력 시장에 대한 제도를 수정 및 보완해 나가야 한다.

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

발전기업이 두 개 이상의 입찰파라미터를 결정하는 경우, 내쉬균형 계산은 복잡한 비선형 형태로 나타나기 때문에 해석적 계산이 어렵다. 또한 발전용량의 제약으로 인해 균형전략은 단순전략(pure strategy)이 아닌 복합전략(mixed strategy)으로 나타날 가능성이 있다[4]. 본 연구에서는 이와 같은 상황을 해결하기 위해 보수행렬법(payoff matrix)을 사용하여 내쉬균형을 계산한다[4]. 그리고 간단한 계통모형에 적용하여 내쉬균형을 계산하고 균형 상태에서 나타나는 전략적 유인(incentive)을 한계이득 측면에서 분석한다.

2. 최적화 문제 표현

발전기업은 에너지 시장과 예비력 시장의 입찰에 각각 참여하여 이득을 얻을 수 있다[3]. 본 연구에서 에너지 시장의 입찰함수는 한계비용함수의 기울기를 고정시키고 절편을 전략적으로 선택하는 모형을 사용한다. 그리고 예비력 시장의 입찰함수는 절편을 0으로 하고 기울기를 전략적으로 선택하는 것으로 모형화한다. 또한 전력 거래가격은 입찰함수에 나타난 입찰가격에 따라 결정되는 입찰가방식(pay-as-bid)을 적용한다. 발전기업 G_i 의 한계비용함수와 입찰함수 그리고 수요곡선은 일차함수로 가정한다. 이를 식으로 나타내면 식 (1)~식 (4)와 같다.

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

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

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

$$D(d) = b_0 - m_0 d \quad (4)$$

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 입찰전락
 s_i : 예비력 시장 입찰전락, b_i : 한계비용함수 절편
 m_i : 한계비용함수 기울기, D : 수요곡선
 b_0 : 수요함수의 절편, m_0 : 수요함수의 기울기

시장운영자는 발전기업이 제시하는 입찰함수에 대해 사회적후생(social welfare)을 의미하는 시장거래가치를 극대화하는 전력거래를 결정한다. 이를 최적화 문제로 표현하면 식 (5)~식 (7)과 같다.

$$Max_{q_i, r_i} SW = B(\sum q_i) - \sum C_{ei}(q_i) - \sum C_{ri}(r_i) \quad (5)$$

$$s.t. \quad \eta \sum q_i = \sum r_i \quad (6)$$

$$q_i + r_i \leq \bar{q}_i \quad (7)$$

SW : 시장거래가치, $B_i(d_i)$: 소비자 효용, \bar{q}_i : 최대 발전용량
 $C_{ei}(q_i)$: 유사 에너지 발전비용, $C_{ri}(r_i)$: 유사 예비력 발전비용

식 (5)는 시장운영자의 목적함수인 시장거래가치를 의미하며 소비자 효용(benefit)에서 시장운영자가 고려하는 유사 발전비용을 뺀 값으로 계산된다[1]. 여기서 소비자 효용은 수요곡선을 수요량에 대한 적분으로, 유사 발전비용은 입찰함수를 거래량에 대한 적분으로 정의한다.

식 (6)과 식 (7)은 각각 예비력 확보 조건 그리고 최대 발전용량 제약을 의미한다.

반면, 발전기업은 전력거래를 통해 이득을 극대화시키는 입찰전략을 결정하고자 한다. 발전기업은 에너지 시장과 예비력 시장에서 이득을 얻을 수 있으므로 두 시장을 모두 고려하여 입찰전략을 결정해야 한다. 발전기업 G_i 의 최적화 문제는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$Max_{k_i, s_i} \Pi_i(k_i, s_i, q_i, r_i) = \Pi_{ei}(k_i, s_i, q_i) + \Pi_{ri}(k_i, s_i, r_i) \quad (8)$$

Π_i : 총 이득, Π_{ei} : 에너지 시장 이득, Π_{ri} : 예비력 시장 이득

발전기업은 식 (8)과 같이 에너지 시장에서의 이득과 예비력 시장에서의 이득을 극대화시키는 k_i 와 s_i 를 결정한다.

3. 에너지 시장과 예비력 시장의 한계이득

3.1 균형상태에서의 한계이득

내쉬균형은 경쟁에 참여한 모든 발전기업이 균형 입찰전략을 바꿀 유인이 존재하지 않는 상태를 의미한다. 즉, 입찰전략을 바꾸어 이득을 증가하지 않는 상태를 의미하므로 균형 입찰전략에서 에너지 시장의 한계이득과 예비력 시장의 한계이득이 합한 총 한계이득은 영(zero)의 값을 가질 것이다. 그리고 균형상태에서 두 시장의 한계이득의 관계는 부호가 반대이고 절대 값이 같은 상태가 될 것임을 예상할 수 있다.

3.2 한계이득 정식화

발전기업의 이득은 에너지 시장에서의 이득과 예비력 시장에서의 이득으로 구분된다.

에너지 시장에서의 이득은 가격과 거래량으로 결정되는 총 수익에서 비용을 뺀 값으로 정의되며 비용은 한계비용함수를 거래량으로 적분함으로써 구해진다. 반면, 예비력 시장에서는 비용을 고려하지 않는다. G_i 에 대한 각 시장의 이득과 가격을 식으로 나타내면 식 (9)~식 (11)과 같다.

$$\Pi_{ei}(k_i, s_i, q_i) = p_{ei} \cdot q_i - (b_i q_i + 0.5 m_i q_i^2) \quad (9)$$

$$\Pi_{ri}(k_i, s_i, r_i) = p_{ri} \cdot r_i \quad (10)$$

$$p_{ei} = k_i + m_i q_i, \quad p_{ri} = s_i r_i \quad (11)$$

여기서, p_{ei} 와 p_{ri} 는 각각 에너지와 예비력의 가격을 의미한다. 식 (9)는 에너지 시장에서의 이득을 나타내며 식 (10)은 예비력 시장에서의 이득을 나타낸다. 그리고 식 (11)은 에너지 시장의 가격과 예비력 시장의 가격을 의미하는 것으로 입찰가방식에 의해 결정되는 것을 가정한다.

입찰전략에 따른 한계이득은 경쟁기업의 입찰전략이 고정되어 있는 상태에서 입찰전략의 미세한 변화에 대해 이득의 변화를 의미한다. 그러므로 각 시장에서 얻는 이득을 k_i 와 s_i 에 대한 편미분으로

구할 수 있으며 식으로는 식 (12)-식 (15)와 같다.

$$\partial \Pi_{ei} / \partial k_i = (k_i + m_i q_i - b_i) \partial q_i / \partial k_i + q_i \quad (12)$$

$$\partial \Pi_{ri} / \partial k_i = 2s_i r_i \partial r_i / \partial k_i \quad (13)$$

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

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

한계이득을 계산하기 위해서는 $\partial q_i / \partial k_i$ 와 $\partial r_i / \partial k_i$ 그리고 $\partial q_i / \partial s_i$ 와 $\partial r_i / \partial s_i$ 의 값을 알아야 한다.

제약조건을 만족시키는 동시에 사회적후생을 극대화 시키는 전력거래량은 시장운영자의 최적화 문제를 라그랑주함수로 만들고 난 후에 라그랑주함수를 전력거래량 그리고 라그랑지 승수로 편미분함으로써 계산할 수 있다. 편미분의 간단한 표현을 위해 G_1 , G_2 가 경쟁에 참여하는 것으로 하고 G_2 가 발전력 제약에 걸려있는 상황을 고려하여 정리하면 식 (16)과 같다.

$$\begin{pmatrix} m_0 + m_1 & m_0 & m_1 & 0 & \eta & 0 \\ m_0 & m_0 + m_2 & 0 & m_2 & \eta & -1 \\ m_1 & 0 & s_1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & s_2 & -1 & -1 \\ \eta & \eta & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ r_1 \\ r_2 \\ \lambda \\ \mu_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_0 - k_1 \\ b_0 - k_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_2 \end{pmatrix} \quad (16)$$

식 (16)을 변수가 포함된 형태로 나타내면 식 (17)과 같다.

$$A(s_i) \cdot x(q_i, r_i) = b(k_i) \quad (17)$$

식 (17)을 고려해 볼 때, $\partial q_i / \partial k_i$ 와 $\partial r_i / \partial k_i$ 는 $A^{-1} \cdot b$ 의 계산으로 구해진다. 하지만 s_i 는 A행렬에 포함되어 있어 $\partial q_i / \partial s_i$, $\partial r_i / \partial s_i$ 는 역행렬만으로는 구할 수 없다.

s_i 에 대한 q_i , r_i 의 영향은 미소한 차이를 나타내는 dA와 dx를 사용하여 $[A + dA] \cdot [x + dx] = b$ 와 같이 표현할 수 있다. 식은 $dA \cdot x + A \cdot dx = 0$ 으로 표현할 수 있다. 그러므로 행렬 A의 변수가 A_{ij} 라 할 때, 편미분 값은 식 (18)과 같이 정의된다.

$$\partial x_k / \partial A_{ij} = -[A^{-1}]_{ki} \times x_j \quad (18)$$

본 연구는 균형상태에서 나타나는 한계이득에 관심을 둔다. 그러므로 균형상태의 q_i , r_i 의 값을 식 (18)에 입하여 균형 입찰전략 s_i 에 대한 $\partial q_i / \partial s_i$, $\partial r_i / \partial s_i$ 를 계산한다. 마찬가지로 $\partial q_i / \partial k_i$ 와 $\partial r_i / \partial k_i$ 의 구체적인 수치는 균형상태의 값을 사용한다.

4. 사례연구

계통모형은 발전기업 G_1 , G_2 가 공급경쟁에 참여한 것을 대상으로 한다. G_1 의 한계비용함수와 최대 발전용량 그리고 전력 구매자의 수요곡선은 표 1과 같다. 또한 예비을 η 는 총 수요량의 10%로 고려한다. 단, 송전용량의 제약조건은 고려하지 않는다.

<표 1> 한계비용함수와 수요함수 그리고 최대 발전력

구분	함수형태	최대 발전력(q_i)[MW]
G_1	$C_1(q_1) = 10 + 0.25q_1$	90
G_2	$C_2(q_2) = 5 + 0.45q_2$	63
Load	$D(q_1 + q_2) = 100 - 0.5(q_1 + q_2)$	

표 2는 k_i 를 0.1단위로 s_i 를 0.01단위로 이산화하여 보수행렬을 구한 후 Lemke 알고리즘을 사용하여 균형점을 구한 결과이다.

<표 2> 균형상태 복합전략

비교	k_i	s_i	확률[%]
G_1	32.6	7.23	9.65
	24.9	0.98	90.35
G_2	17.2	1.69	100

균형상태에서 G_1 은 복합전략으로 선택한다. 구체적으로 $k_1 = 32.6$, $s_1 = 7.23$ 을 9.65%의 확률로 선택하고 $k_1 = 24.85$, $s_1 = 0.98$ 을 90.35%

의 확률로 선택한다. 반면, G_2 는 단일전략 $k_2 = 17.2$, $s_2 = 1.69$ 를 선택한다.

입찰전략에 대한 에너지 시장의 한계이득이 양(positive)의 값을 가지게 된다면 발전기업은 에너지 시장에서 이득을 증가시키기 위해 전략을 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.

표 3은 균형점에서 발전기업의 기대이득과 한계이득을 나타낸다. 한계이득과 이득을 차이를 보이기 위해 표 3에 이득을 표시하였다. 균형 상태에서 균형전략은 확률분포로 나타나기 때문에 이득과 한계이득은 기대값으로 계산한다.

<표 3> 균형 상태에서 이득과 한계이득

비교		G1	G2
	Π_i	1519.8	1311.9
	Π_{ei}	1467.6	1273.1
	Π_{ri}	52.24	38.86
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

균형 상태에서 G_1 , G_2 는 예비력 시장에 비해 에너지 시장에서 큰 이득을 얻는다. 하지만 한계이득은 이와 다른 특징을 갖는다. 표 3에서 k_i 에 대한 에너지 시장과 예비력 시장에서의 한계이득이 0.67과 -0.67로 부호는 반대이지만 절대값은 0.67로 동일함을 알 수 있다. 즉, k_i 을 높게 하면 에너지 시장에서는 0.67의 이득이 증가하지만 예비력 시장에서는 0.67만큼의 이득이 감소한다는 것을 의미한다. 반대로 k_i 을 낮게 했을 때는 에너지 시장에서는 이득이 감소하지만 예비력 시장에서는 이득이 증가하는 것을 의미한다. 결국, k_i 을 변화시켜 에너지 시장에서의 이득 증가(감소)분이 예비력 시장에서의 이득 감소(증가)분과 동일하기 때문에 k_i 을 바꿀 유인이 존재하지 않는 것이다. k_2 , s_1 , s_2 도 k_1 과 같은 방법으로 설명가능하므로 한계이득 측면에서 볼 때, k_1 , k_2 , s_1 , s_2 를 변화시킬 유인이 존재하지 않는다.

5. 결 론

본 연구는 경쟁을 통해 예비력과 에너지 거래가 이루어지는 시장에 초점을 맞추어 진행하였다. 공급함수 모형을 사용하여 에너지 시장과 예비력 시장을 모형화하였으며 시장운영자의 최적화 문제와 발전기업의 최적화 문제를 정식화하였다. 그리고 발전기업의 전략적인 유인을 한계이득 측면에서 분석하기 위해 에너지 시장과 예비력 시장의 한계이득을 정식화하였다.

이를 통해, 균형 상태에서 발전기업의 전략적인 특성을 한계이득 측면에서 분석하였다. 입찰전략에 대한 한계이득이 양의 값을 가진다면 발전기업은 입찰전략을 변화시키려 할 것이다. 하지만 사례연구에 적용한 결과, 입찰전략에 대한 에너지 시장에서의 한계이득과 예비력 시장에서의 한계이득이 절대적인 크기는 같고 부호가 반대이므로 입찰전략의 변화는 이득을 증가시키지 않는다. 즉, 한계이득을 고려해 볼 때, 균형 상태에서 입찰전략을 변화시킬 유인이 없음을 보였다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

[참고 문헌]

- [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] Kwang-Ho Lee, "Mixed Strategy of Nash Equilibrium in Power Transaction with Constraint," KIEE Trans, vol. 51A, no. 4, pp. 196-201, Feb. 2002.