

발전 예비력을 포함한 전력시장에서의 공급자 입찰전략 연구

신재홍*, 최석근, 이광호
단국대학교 전기공학과

A Study on Supplier's Bidding Strategies
including Operating Reserve in an Electricity Market

Jae-Hong Shin*, Seok-Keun Choi, Kwang-Ho Lee
Dankook University

Abstract - In an electricity market with an imperfect competition, participants make plans of biddings 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 model of the combined market ; energy market and operating tserve market. The Nash equilibrium is analyzed by using a bi-level optimization ; maximization of Social welfare (SW) and maximization of the producers' profits.

1. 서 론

전력산업의 시장구조가 독점적 전력산업에서 경쟁적 전력시장으로 변화하고 있다. 그리고 전력산업의 시장은 몇 개의 시장참여자들이 경쟁하는 과점형태의 불완전경쟁의 구조를 가지고 있다[1-2].

예비력은 전력시스템측면에서 주파수를 제어하고 시스템을 안정적으로 운영하기 위한 기본적인 요소이다 [3-5]. 또한, 전력계통운영측면에서 전기의 품질과 공급신뢰도를 향상시킬 수 있다. 시장운영자는 예비력 확보에 대한 의무를 가진다. 시장운영자는 주어진 기업의 전략을 사용하여 시장거래가치(Social welfare)를 극대화를 목적으로 전력시스템의 적정 예비력용량과 에너지 용량을 결정해야 한다. 기업은 한계비용에 따라 이득극대화를 목적으로 전략을 세우고 전력시장 입찰에 참여하게 된다. 그러나 기존 공급곡선 모형에 관한 연구[6-8]에서는 예비력을 고려하지 않은 전력시장을 대상으로 대하여 연구되었다. 본 연구에서는 공급 함수법을 사용하여 예비력이 포함된 전력시장의 모형을 수립한다. 또한 2단계 최적화 기법을 사용하여 기업의 내쉬균형(NE)전략을 분석하였다.

2. 전략적 입찰과 균형전략

2.1 예비력포함 전력시장

전력시장운영자는 전력계통의 물리적인 특성이 만족 되도록 적정량의 예비력을 확보해야하는 의무를 지닌다. 예비력의 확보는 에너지 시장과 분리된 예비력 시장에서 발전기업간의 입찰을 통해 이루어진다. 그러므로 발전기업은 에너지시장에서의 이득과 예비력시장에서의 이득을 합한 전체 이득을 극대화시키는 전략을 선택한다. 에너지 용량대비 예비력 확보 용량은 전력시장의 통계적인 자료를 근거로 정해진다. 본 연구에서는 에너지 용량의 10%를 예비력 용량으로 설정한다.

따라서 예비력 용량이 에너지 용량에 의해 결정되기 때문에 시장운영자가 계산할 때는 소비자 효용(Benefit) 에너지 수요량만을 다루게 된다.

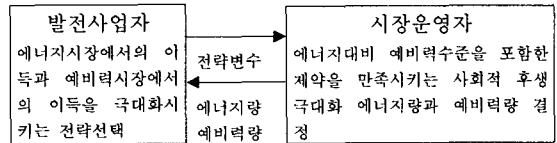


그림 1 예비력포함 전력시장의 상관관계

그림 1은 예비력포함 전력시장에서 발전사업자와 시장운영자간의 관계를 나타낸다. 발전사업자는 시장운영자에게 전략적인 입찰변수를 제출하고 시장거래가치 최대화를 목적으로 에너지와 예비력을 결정한다. 발전사업자는 이득극대화를 위해 자신의 전략이 에너지와 예비력의 결정과정에 어떠한 영향을 미치는지를 분석해야한다. 그러한 분석을 통해 발전기업의 이득을 극대화시킬 수 있는 전략변수를 선택할 수 있는 것이다.

예비력포함 전력시장에서의 전력거래는 공급함수 모형을 주로 사용한다. 에너지 시장에서는 공급함수의 절편 k_i 를 전략 파라미터로 사용하고 예비력 시장에서는 공급함수의 기울기 s_i 를 전략 파라미터로 사용한다[8]. 이를 그림으로 나타내면 그림 2와 같다.

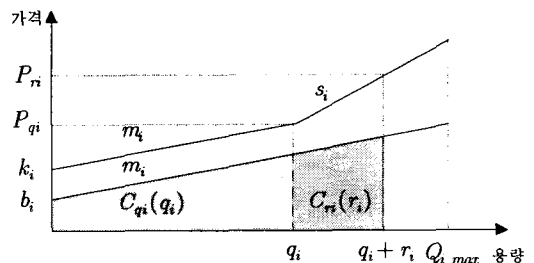


그림 2 발전기업 입찰방식과 비용

b_i 는 발전기 i 의 한계비용곡선의 절편을 나타내며 m_i 는 기울기를 나타낸다. P_{qi}, P_{ri} 는 에너지가격과 예비력가격을 표현하며, 사다리꼴의 면적을 나타내는 C_{qi}, C_{ri} 는 각각 에너지와 예비력발전비용을 의미한다. q_i 는 발전기 i 의 에너지발전량을 나타내며, r_i 는 예비력 용량을 나타낸다. $Q_{i, max}$ 는 발전기 i 의 최대발전량을 나타낸다. 그림 2에서 공급자의 이득은 에너지 시장에서 $q_i \times P_{qi} - C_{qi}$ 만큼을 얻게되고 예비력 시장으로부터 $r_i \times P_{ri} - C_{ri}$ 의 이득을 얻는다. 공급자 i 는 $q_i + r_i \leq Q_{i, max}$ 범위내에서 전체 이득이 극대가 되는 전략 파라미터 k_i 와 s_i 를 결정해야 한다.

2.2 최적화문제 표현

에비력포함 전력시장에서 시장운영자의 에너지와 에비력 결정은 식 (3)과 같은 최적화문제로 표현된다.

$$\text{Max} \{ \sum B_i(d_i) - \sum C'_{qi}(q_i) - \sum C'_n(r_i) \} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \sum d_i = \sum e_i \quad (4)$$

$$\eta \sum q_i = \sum r_i \quad (5)$$

$$q_i + r_i \leq Q_{i,max} \quad (6)$$

여기서 d_i 는 수요자 i 의 에너지 수요량이고 η 는 에너지 용량대비 에비력의 확보수준을 나타내며 본 연구에서는 $\eta=0.1$ 로 둔다. $C'_{qi}(q_i)$ 는 i 기업의 에너지 입찰 전략을 에너지 한계비용으로 생각한 유사 에너지 발전비용이다. 마찬가지로 $C'_n(r_i)$ 는 i 기업의 유사 에비력 발전비용을 의미한다.

식(3)은 시장거래가치를 나타내는 식으로 에너지와 에비력에 대한 유사 발전비용이 포함된다. 식(4)는 에너지공급량과 수요량을 일치시키는 수급조건식을 표현한 것이며, 식(5)은 에비력확보수준을 나타내는 식이다. 식(6)은 최대발전량의 범위를 나타내는 부등식 제약조건식으로서 에비력을 포함한 발전력이 최대발전력 범위 내에 있어야함을 의미한다. 시장운영자는 식(4)~(6)의 제약조건을 만족하며 시장거래가치를 극대화 하는 q_i 와 r_i 를 결정한다. 반면 발전기업은 시장운영자의 목적과 다른 이득 극대화가 목적이다. 기업의 이득은 에너지 시장과 에비력 시장에서 얻게 되는데 이를 구분하여 최적화 문제로 나타내면 다음 식(7)과 같다.

$$\text{Max} \quad \Pi_i(q_i, r_i) = \Pi_{qi}(q_i) + \Pi_n(r_i) \quad (7)$$

여기서 Π_{qi} 는 에너지시장의 이득으로서 $q_i \times P_{qi} - C_{qi}$ 이고 Π_n 는 에비력 시장의 이득으로서 $r_i \times P_n - C_n$ 이다.

3. 균형전략의 계산

3.1 내쉬균형의 조건

전력공급경쟁에서 발전기업전략을 해석하기 위해서는 경쟁적 전략의 수렴상태인 내쉬균형을 구하는 것이 필수적이다. 내쉬균형은 모든 발전기업들이 전략을 수정하지 않는 한 현재의 전략을 수정해서 현재보다 더 많은 이득을 가질 수 없는 상태이다. 발전사업자는 이득이 극대화되는 전략을 시장운영자에게 제출하고 시장운영자는 계약을 만족시키며 사회적 후생을 극대화하는 에너지 용량과 에비력 용량을 결정한다.

2개의 기업이 에너지 및 에비력 입찰시장에 참여하는 간단한 사례를 통해 내쉬균형의 조건을 살펴본다. 각 기업의 발전력계약은 고려하지 않는다. 각 기업의 한계비용과 한계수요곡선은 다음 식(8)와 같다.

$$\begin{aligned} G1: f_1(q_1) &= b_1 + m_1 \times (q_1 + r_1) \\ G2: f_2(q_2) &= b_2 + m_2 \times (q_2 + r_2) \\ D: D_0(e_0) &= b_0 - m_0 \times q_0 \end{aligned} \quad (8)$$

시장운영자의 최적화문제는 목적함수와 multiplier를 이용해 제약조건이 포함된 다음 식(9)과 같이 라그랑주 함수(Lagrange's function)로 표현할 수 있다.

$$\mathcal{L} = \{ B_0(q_1 + q_2) - C'_1(q_1) - C'_2(q_2) - C'_1(r_1) - C'_2(r_2) \} + \lambda \{ \eta \times (q_1 + q_2) - (r_1 + r_2) \} \quad (9)$$

식(9)에서 λ 는 에너지 용량대비 에비력 용량에 대한 제약식을 사회적 후생에 추가시키기 위한 multiplier이다. λ 의 값은 제약조건의 만족정도를 나타내는 것이다.

라그랑주 함수를 각각 q_1, q_2, r_1, r_2 로 편미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \partial \mathcal{L} / \partial q_1 &= b_0 - m_0(q_1 + q_2) - \lambda \eta \\ &\quad - (k_1 + m_1 q_1 + m_1 r_1) = 0 \\ \partial \mathcal{L} / \partial q_2 &= b_0 - m_0(q_1 + q_2) - \lambda \eta \\ &\quad - (k_2 + m_2 q_2 + m_2 r_2) = 0 \\ \partial \mathcal{L} / \partial r_1 &= - (k_1 + m_1 q_1 + s_1 r_1) + \lambda = 0 \\ \partial \mathcal{L} / \partial r_2 &= - (k_2 + m_2 q_2 + s_2 r_2) + \lambda = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 $\partial \mathcal{L} / \partial q_1, \partial \mathcal{L} / \partial q_2, \partial \mathcal{L} / \partial r_1, \partial \mathcal{L} / \partial r_2$ 의 값이 0이면 이는 제약조건을 만족시키며 사회적 후생을 극대화하는 에너지 용량과 에비력 용량이 된다. 기업에서 이득을 극대화하는 전략은 이득을 각 전략에 대해 편미분하여 식 (11)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \partial \Pi_1 / \partial k_1 &= (\partial q_1 / \partial k_1 + \partial r_1 / \partial k_1) k_1 + 2s_1 r_1 (\partial r_1 / \partial k_1) \\ &\quad + (m_1 q_1 - b_1) (\partial q_1 / k_1) - (b_1 + m_1 r_1) (\partial r_1 / \partial k_1) \\ &\quad + q_1 + r_1 = 0 \\ \partial \Pi_2 / \partial k_2 &= (\partial q_2 / \partial k_2 + \partial r_2 / \partial k_2) k_2 + 2s_2 r_2 (\partial r_2 / \partial k_2) \\ &\quad + (m_2 q_2 - b_2) (\partial q_2 / k_2) - (b_2 + m_2 r_2) (\partial r_2 / \partial k_2) \\ &\quad + q_2 + r_2 = 0 \\ \partial \Pi_1 / \partial s_1 &= (\partial q_1 / \partial s_1 + \partial r_1 / \partial s_1) k_1 + 2s_1 r_1 (\partial r_1 / \partial s_1) \\ &\quad - (b_1 + m_1 r_1) (\partial r_1 / \partial k_1) + r_1^2 = 0 \\ \partial \Pi_2 / \partial s_2 &= (\partial q_2 / \partial s_2 + \partial r_2 / \partial s_2) k_2 + 2s_2 r_2 (\partial r_2 / \partial s_2) \\ &\quad - (b_2 + m_2 r_2) (\partial r_2 / \partial k_2) + r_2^2 = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에서 각의 편미분값이 0으로 되었을때 기업은 이득을 극대화시키는 전략 k_1, s_1, k_2, s_2 를 구할 수 있다. 에너지 시장에서의 전략 k_1, k_2 가 에너지 용량 결정뿐만 아니라 에비력 시장에서의 에비력 결정에도 영향을 미친다. 또한 에비력 시장에서의 전략 k_1, k_2 가 에너지 시장에서의 에너지 용량결정에도 영향을 미치기 때문에 $\partial q_1 / \partial k_1 \neq 0, \partial q_2 / \partial k_2 \neq 0, \partial q_1 / \partial s_1 \neq 0, \partial q_2 / \partial s_2 \neq 0$ 이다.

3.2 2단계 최적화기법을 이용한 내쉬균형 계산

발전기업의 입찰 전략인 k_1, s_1, k_2, s_2 가 주어져 있을때, 시장운영자는 제약조건을 만족시키며 사회적 후생을 극대화시키는 q_1, q_2, r_1, r_2 를 결정해야한다. 따라서 시장참여자의 목적을 만족시키며 발전사업의 이득을 극대화하는 내쉬균형전략은 2단계 최적화 기법을 사용하여 계산될 수 있다[7]. 식 (10)와 (11)를 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{pmatrix} m_0 + m_1 & m_0 & m_1 & 0 & \eta \\ m_0 & m_0 + m_2 & 0 & m_2 & \eta \\ m_1 & 0 & s_1 & 0 & -1 \\ 0 & m_2 & 0 & s_2 & -1 \\ \eta & \eta & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ r_1 \\ r_2 \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_0 - k_1 \\ b_0 - k_2 \\ -k_1 \\ -k_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

식 (12)를 a 의 원소를 matrix A와 x 의 원소를 가진 matrix X, b 의 원소를 가진 matrix B의 형태로 나타낼

수 있다. 이는 $A \times X = B$ 의 형태로 표현되며 $\partial x_k / \partial a_{ij} = -[A^{-1}]_{ki} x_j$ 의 값을 구할 수 있다. 이를 사용하여 $\partial q_1 / \partial s_1, \partial r_1 / \partial s_1, \partial q_2 / \partial s_2, \partial r_2 / \partial s_2$ 값을 계산할 수 있다. 각 기업에서의 이득을 극대화시키기 위한 전략을 구하는 식 (13)은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \partial q_1 / \partial k_1 + \partial r_1 / \partial k_1 & 2r_1 (\partial r_1 / \partial k_1) \\ \partial q_1 / \partial s_1 + \partial r_1 / \partial s_1 & 2r_1 (\partial r_1 / \partial s_1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ s_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial q_1 / \partial k_1 & \partial r_1 / \partial k_1 \\ \partial q_1 / \partial s_1 & \partial r_1 / \partial s_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 - m_1 q_1 \\ b_1 + m_1 r_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} q_1 + r_1 \\ r_1^2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

식(13)에서 $\partial q_1 / \partial s_1, \partial r_1 / \partial s_1, \partial q_2 / \partial s_2, \partial r_2 / \partial s_2$ 의 값은 식 (12)에서 구할 수 있다. 그리고 식(13)을 계산하여 얻은 $k_1, s_1, k_2, s_2, q_1, q_2, r_1, r_2$ 가 시장운영자와 발전기업의 목적을 만족하는 내쉬균형이다.

4. 사례연구

발전기업 G1, G2가 예비력포함 전력시장에 참여하였다. G1은 $m_1=0.25, b_1=10$ 의 한계비용곡선을 가지고 G2는 $m_2=0.45, b_2=5$ 의 한계비용곡선을 가진다. 수요곡선은 $m_0=0.5, b_0=100$ 의 탄력성을 가지고 있다. 에너지대비 예비력수준을 나타내는 $\eta=0.1$ 이다.

2단계 최적화기법을 사용하여 내쉬균형점을 계산하면 그림4와 같다.

기업	k	s	q	r	P_e	P_r	Profit
G1	23.91	5.97	56.31	49.84	37.98	74.20	1479.1
G2	15.02	8.08	49.84	4.55	37.46	74.20	1266.7

표 1 내쉬균형전략 계산결과

표 1에서 두 기업의 가격은 74.2로 동일함을 알 수 있다. 이는 예비력의 가격이 시장의 청산가격(Clearing Price)이기 때문이다. 하지만 두 기업의 에너지의 가격은 차이가 있을 수 있다. 이는 시장운영자가 사회적 후생 극대화를 목적으로 하면서 나타나는 현상이다. 위 사례계통에서 기업의 기술기 입찰전략(s_1, s_2)이 한계비용의 기술기(m_1, m_2)보다 큰 값을 가진다. 이는 예비력은 에너지에 따라 의무적으로 확보되는 것이므로 기업에서는 기술기를 높게 입찰려는 유인(incentive)이 있음을 의미한다.

표 2는 위 사례계통에서 기업의 한계비용의 변화에 따른 기업 1의 에너지 용량과 예비력 용량의 변화를 나타낸다.

비교(r_1/e_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	0.0916
	$b_2 = 10$	0.0914	0.0991	0.0918	0.1

표 2 기업의 한계비용변화에 따른 예비력계약비율

표 2에서 비교대상인 r_1/e_1 은 에너지 용량과 예비력 용량에 관한 상대적인 비율로서 0.1일 경우를 기준으로 0.1보다 큰 경우 상대방보다 예비 용량을 더 많이 계약한 것을 나타내고 작은 경우는 상대방보다 에너지 용량

이 많이 계약된 것을 나타낸다. 기업 2는 반대로 해석하면 된다. 한계비용의 기술기와 예비력계약비율은 선형관계로 나타나지 않음을 확인 할 수 있다. 마찬가지로 한계비용의 절편과 예비력계약비율의 관계도 비선형 관계를 가지고 있다. 이는 예비력 시장에서의 발전기업전략 변수인 s 가 기업이득과 비선형 관계라는 것을 나타낸다.

5. 결 론

전력 시장이 경쟁적 시장으로 바뀔에 따라 예비력은 예비력 시장에서 기업들의 전략들에 의해 결정된다. 따라서 예비력이 포함된 전력시장에 대한 분석이 필요하고 기업들의 전략에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 예비력이 포함된 전력시장의 모형을 설립했다. 사회적 후생을 극대화 하며 예비력을 확보하는 시장운영자의 문제를 최적화문제로 정식화하였다. 그리고 에너지 시장에서의 이득과 예비력 시장에서의 이득을 합한 전체 이득을 극대화하는 기업의 문제를 최적화 문제 정식화 하였다. 이러한 최적화 문제를 2단계 최적화 기법을 사용하여 내쉬균형의 전략과 에너지 용량, 예비력 용량을 계산하였고 이를 간단한 사례를 통하여 계산하였다. 사례연구를 통하여 예비력의 가격은 청산가격으로 두 기업에서 동일하였으며 에너지의 가격은 다름을 확인할 수 있었다. 예비력 용량은 에너지의 용량에 따라 의무적 확보해야 하는 것으로 기업에서 에너지 시장 입찰전략 파라미터를 높게 하려는 유인이 있음을 확인하였다. 향후 전력시장에서 기업의 예비력 시장 전략 파라미터를 낮추기 위한 전력시장 운영상의 제약을 마련해야 할 것이다. 그리고 발전력계약 및 송전선로 제약을 고려하여 균형점을 해석해야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이광호, "전력거래에서 제약조건이 고려된 내쉬균형점의 복합전략연구", *전기학회논문지*, 51A 권 4호, pp196-201, 2002.2
- [2] M. Shahidehpour, H. Yamin, Z. Li, "Market operations in electric power systems", John Wiley & Sons, 2002
- [3] 송길영, "신편 전력계통공학", 동일출판사, pp.490-491, 1998.9.
- [4] 이강완, "계통주파수특성분석에 관한 연구 보고서", 한국 전력공사, pp.49-52, 1987. 12
- [5] Serven Stoft, "Power System Economics", IEEE Press, 2002
- [6] C. A. Berry, B. f. Hobbs, W.A. Meroney, "Analyzing Strategic Behavior in Transmission Network", IEEE Press TP-130-0, pp.7-32, 1999.
- [7] 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.
- [8] M. Shahidehpour, M. Marwall, "Maintenance Scheduling in Restructured Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 110-111, 2000.