

전력시장에서 수력발전기의 입찰전략 분석

신재홍 이광호
단국대학교 전기공학과

Analysis on a Bidding Strategy of the Hydro Generation in an Electricity Market

Jae-Hong Shin Kwang-Ho Lee
Dept. of Electrical Engr. Dankook University

Abstract - This paper addresses the bidding strategies of a hydro generator in an electricity market, and their effect on the electricity market in accordance with some parameters: the water volume, the demand elasticity, and the hydro unit performance. The competition of a hydro generator is formulated as a bi-level optimization problem, and the solving scheme for the equilibrium condition is proposed as a set of nonlinear simultaneous equations. The equilibrium of the oligopolistic model is evaluated by comparison with that of a perfect competition model from the viewpoint of a market power.

1. 서 론

발전기술의 향상과 정보통신기술의 발달을 계기로 전력산업의 구조개편은 해외와 국내에서 꾸준히 진행되어 왔다. 국내에서는 배전부문에 대해서는 계획의 수정이 불가피하게 되었지만 발전시장에서는 분할된 발전회사들의 민영화와 경쟁도입을 통해 효율성을 높이려는 노력이 지속되고 있다.

발전부문의 경쟁시장을 해석하기 위해 게임이론, 경제학 이론 등이 사용되어 많은 연구 성과가 있었으나 이는 주로 연료비용이 소요되는 화력발전소에 대한 것이었다 [1,2]. 수력발전의 경우에도 어떠한 특성이 입찰과정에서 어떻게 작용하며 시장지배력의 행사 가능성 분석과 적절한 시장구조 및 규칙을 정하는 것은 시장 전체의 효율성 향상에 중요한 요소이다[3]. 수력발전은 자원과 비용특성이 화력발전과 크게 다르기 때문에 다른 방식의 최적화가 필요하다. 기존의 수직독점형 구조에서 수력발전의 단기 운용 계획은 화력발전기의 비용특성과 연계되어 최적화 과정을 통해 수립된다[4]. 하지만 경쟁형 전력시장에서는 수력의 자원특성과 화력의 비용특성이 일괄 종합될 못하고 발전회사의 이득 극대화를 위한 전략적인 입찰자료가 시장에 제시되기 때문에 기존의 수화력협조(hydro-thermal coordination) 이론으로는 경쟁의 균형을 해석하기 어렵다.

본 연구에서는 공급함수모형을 근거로 수화력 발전의 입찰 및 경쟁모형을 수립하고 2단계(bi-level) 최적화 기법을 통하여 입찰전략의 내쉬균형의 조건식을 유도한다. 또한 균형조건에서 나타나는 수자원의 가격정보와 기존의 수화력협조 이론에서 유도되는 잠재가격(shadow price)의 의미를 비교 분석한다. 그리고 수력발전이 경쟁적으로 사용될 때 완전경쟁에서의 결과와는 어떠한 차이를 갖는지, 이러한 차이는 수요탄력성 등에 따라 어떠한 변화를 보이는지를 분석한다.

2. 고전적 수화력협조 문제

2.1 정식화와 최적조건..

화력발전기의 연료비용 특성과 수력발전기의 수자원 정보가 통합되어 전체 발전비용을 최소화하는 고전적 수화

력협조 문제를 수력기(G_h) 1대와 화력기(G_t)에 대하여 정식화하면 다음 식(1)과 같다.

$$\min \sum_{i=1}^I n_i \cdot F(q_{hi}) \tag{1a}$$

$$\text{s.t. } V = \sum_{i=1}^I n_i v_i \tag{1b}$$

$$D_i = q_{hi} + q_{ti} \quad i=1, \dots, I \tag{1c}$$

$$q_{tmin} \leq q_{ti} \leq q_{tmax}, \quad q_{hmin} \leq q_{hi} \leq q_{hmax} \tag{1d}$$

여기서 q_{hi} , q_{ti} , v_i , D_i , n_i 구간 i 에서 G_t 와 G_h 의 출력, G_h 의 수자원 사용량, 전력수요, 시간수이고 F 는 G_t 의 발전 비용 함수, V 는 G_h 가 사용 가능한 저수 총량이다.

라그랑지안의 미분을 통하여 최적조건식을 구하여 정리하면 다음 식(2)와 같다.

$$\frac{dF(q_{ti})/dq_{ti}}{dh(q_{hi})/dq_{hi}} = \gamma n_i \quad i=1, \dots, I \tag{2}$$

여기서 γ 는 식(1b)에 해당되는 라그랑지안 변수이다.

3. 수력발전의 경쟁적 입찰전략

3.1 최적화문제의 표현..

발전시장에서의 거래는 공급과 구매의 입찰조건을 바탕으로 시장운영자(market operator, MO)에 의해 정해지는 다음 식(4)와 같이 사회적 후생(social welfare, SW)을 극대화하는 조건으로부터 거래량과 가격이 결정된다.

화력발전기(G_t)의 한계비용함수를 $dF/dq_{ti} = b_t + m_t q_{ti}$ 라 하고 수력발전기(G_h)의 발전비용은 영이며 저수의 이용특성은 $h(q_h) = b_h q_h + 0.5 m_h q_h^2$ 로 가정한다. 따라서 G_t 는 s_t 를 파라미터로 하는 $p_t = b_t + s_t q_t$ 를 입찰함수로 사용하고 G_h 는 s_h 를 파라미터로 하여 $p_h = s_h q_h$ 를 입찰함수로 사용한다.

$$\max_q SW(q, s) = B(q) - \bar{C}(q, s) \tag{3}$$

여기서 B 는 소비자의 만족가치(Benefit)를 나타내고, \bar{C} 는 공급자의 입찰함수를 한계비용함수로 간주하여 계산한 유사 발전비용이다.

한편 공급자 입장에서 s 의 선택에 따라 MO에서의 최적화 결과가 달라지고 기업의 이득이 변하기 때문에 s 를 변수로 하는 이득극대화 문제를 계산하게 된다. 이를 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\max_s \pi(q, s) = pq - C(q, s) \tag{4}$$

여기서 p 는 거래가격으로서 pq 는 전력공급에 따른 매출액, C 는 실제의 발전비용을 나타낸다.

3.2 2단계 최적화 조건

입찰에서 제시된 자료를 대상으로 MO가 전력거래의 결정 과정에서 계산하는 식(4)는 다음과 같다.

$$SW(q, s) = \sum_{i=1}^I [B(q_h, q_t) - \bar{C}_h(q_h, s_h) - \bar{C}_t(q_t, s_t)] \quad (5)$$

이에 대한 최적조건의 유도는 다음 식(6)과 같다.

$$\partial SW/\partial q_{hi} = b_{0i} - m_{0i}(q_{hi} + q_{ti}) - s_{hi}q_{hi} = 0 \quad (6a)$$

$$\partial SW/\partial q_{ti} = b_{0i} - m_{0i}(q_{hi} + q_{ti}) - (b_t + s_{ti}q_{ti}) = 0 \quad (6b)$$

여기서 b_0 와 m_0 는 각각 수요함수에서의 절편과 기울기이다.

수력발전에서 이득과 저수량 제약조건이 결합된 라그랑지안으로부터 최적조건을 유도하면 다음과 같다.

$$\partial L_h/\partial s_{hi} = q_{hi}^2 + 2s_{hi}q_{hi} \partial q_{hi}/\partial s_{hi} - \gamma \partial q_{hi}/\partial s_{hi} \partial h/\partial q_{hi} = 0 \quad (7)$$

여기서도 최적조건은 γ 가 전체 구간에서 일정하게 유지될 때임을 알 수 있다.

화력발전에서의 이득극대화는 다음과 같은 극대화 조건으로 정리된다.

$$\pi(q_h, s_t) = \sum_{i=1}^I s_{ti}q_{ti}^2 - \sum_{i=1}^I 0.5m_{ti}q_{ti}^2 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial s_{ti}} = q_{ti}^2 + (2s_{ti} - m_{ti})q_{ti} \frac{\partial q_{ti}}{\partial s_{ti}} = 0 \quad (9)$$

시장운영자 MO는 식(6a)와 (6b)를 만족하는 q_h, q_t 를 정하고, 수력발전은 식(7)에 의해 s_h 를, 화력발전은 식(9)에 의해 s_t 를 선택하려 한다.

3.3 내쉬균형 계산

앞에서 유도한 식(7)과 (9)에서 기울기전략(s)에 대한 발전량(q)의 민감도가 포함되는데 이는 위의 식(6a)와 (6b)를 미분하여 구해지며 정리하면 다음 식(10)과 같다.

$$\partial q_{hi}/\partial s_{hi} = -(m_{0i} + s_{hi})/\Delta_i \cdot q_{hi} \quad (10a)$$

$$\Delta_i = m_{0i}s_{hi} + s_{hi}s_{hi} + s_{ti}m_{0i}$$

$$\partial q_{ti}/\partial s_{ti} = -(m_{0i} + s_{hi})/\Delta_i \cdot q_{ti} \quad (10b)$$

위의 식(10)을 식(7)과 (9)에 대입하여 정리하고 이를 식(6)과 어울려 나타내면 구간 i에서 다음 식(11)과 같은 4개의 연립방정식으로 표현된다. ($i=1, \dots, I$)

$$s_{hi}q_{hi} + m_{0i}q_{hi} + m_{0i}q_{ti} = b_{0i} \quad (11a)$$

$$s_{ti}q_{ti} + m_{0i}q_{ti} + m_{0i}q_{hi} = b_{0i} - b_t \quad (11b)$$

$$s_{hi}s_{ti}q_{hi} + m_{0i}s_{hi}q_{hi} - (\gamma m_h + m_{0i})s_{ti}q_{hi} - \gamma m_h m_{0i}q_{hi} - \gamma b_h s_{hi} = \gamma m_{0i} b_h \quad (11c)$$

$$s_{hi}s_{ti} - (m_{0i} + m_t)s_{hi} + m_{0i}s_{ti} = m_{0i}m_t \quad (11d)$$

따라서 전체 구간을 고려하면 방정식은 $4 \times I$ 개이며 식(11b)에서의 저수량 조건까지 포함하면 $4 \times I + 1$ 개이다. 한편 변수도 I개 구간에서의 (q_h, q_t, s_h, s_t)와 전 구간에서 일정한 γ 를 포함하면 개수는 방정식과 동일하다.

3.4 과점형 잠재가격

앞에서 살펴본 바와 같이 수직통합형 수화력협조는 발전에 사용되는 물의 가치가 화력발전의 한계연료비용으로 환산되어 잠재가격이 일정한 값을 가질 때이다. 이는 완전경쟁(perfect competition)일 때에도 성립한다. 하지만 과점(oligopoly) 경쟁인 경우에는 식(7)에서와 같이 물의 가치가 전력시장 판매에 대한 한계이득으로 환산되어 진다.

본 연구에서는 이를 과점형 잠재가격이라 칭하고 식(3)의 정의에 따라 계산된 것을 통합형 잠재가격이라 부

른다. 과점의 균형상태에서 과점형 잠재가격은 일정하게 분포하겠지만 통합형 잠재가격은 일정하지 않을 것이다. 전력시장의 효율성 극대화 측면에서 볼 때 통합형 잠재가격이 균일한 분포일 때를 이상적인 상태라 할 수 있다. 이것의 편차가 심할수록 이상적인 상태에서 멀어진다고 할 수 있다. 즉 시장지배력(Market Power)이 증가하는 것으로 해석된다[5].

4. 입찰전략 사례 및 분석

4.1 대상 모형

사례연구 대상은 2인(P_1, P_2) 게임으로서 P_1 은 수력발전기(G_h)를 P_2 는 화력발전기(G_t)를 운용하여 발전입찰시장에서 이득을 극대화하는 모형이다. 송전선 제약은 고려하지 않으며 발전기 G_h 의 비용은 영이고 G_t 의 한계비용 특성은 $5 + 0.45q_t$ 으로 가정한다. 수력발전에서 발전력과 이용한 물의 양의 관계는 $h(q_h) = 4q_h + 0.01q_h^2$ 로 가정한다.

수력발전에서 이용가능한 물의 양 V 는 2000이라 두고 계획기간은 8개 구간으로 분리한다. 부하의 수요함수는 $p = b_0 - m_0(q_h + q_t)$ 로 정의하며 각 구간에서의 수요함수는 다음 표1과 같다.

표 1 구간별 수요함수

Table 1 Load Pattern by Periodic Demand Functions

구간(j)	1	2	3	4	5	6	7	8
b_{0j}	170	210	190	150	110	100	140	170
m_{0j}	0.50	0.45	0.40	0.50	0.55	0.60	0.40	0.50

경쟁형 전력시장에서 사회적후생이 극대가 되는 이상적인 모형은 완전경쟁 상태이다[5]. 따라서 완전경쟁의 내쉬균형 상태를 시장의 효율성이 극대가 되는 상태라 할 수 있으며 본 연구에서는 수력발전이 포함된 과점상태의 비교 기준으로 삼는다.

4.2 균형전략 결과 분석..

완전경쟁에서의 균형상태를 계산하여 각 구간에서의 발전력, 시장가격, 사용된 수량, 그리고 잠재가격을 나타내면 다음 표2와 같다. 구간 5,6에서는 수력발전은 하지 않고 화력발전만 이루어지는데 이는 계산된 잠재가격으로 설명이 된다. 구간 5,6을 제외한 전 구간에서 잠재가격은 13.40이고 5,6 구간에서는 이보다 낮은 값을 갖는다. 즉 5,6 구간에서는 물의 가치가 낮아 발전량을 줄이고 상대적으로 다른 구간에서는 발전력을 높이는 것이 효율적이라는 경제적 신호인 것이다. 따라서 더 이상 줄일 수 없는 현재의 상태가 최적상태인 것이다. 수요가 전반적으로 낮고 가격탄력성이 낮은 구간에서는 수력발전은 경제성이 낮은 것으로 해석할 수 있다.

표 2 완전경쟁모형의 균형상태

Table 2 Equilibrium of Perfect Competition Model

구간	1	2	3	4	5	6	7	8
q_h	58.57	109.35	102.87	39.80	0	0	47.69	58.57
q_t	142.86	173.10	169.24	131.68	105.00	90.48	136.38	142.86
가격	69.29	82.90	81.16	64.26	52.25	45.71	66.37	69.29
불사용량	268.57	556.99	517.28	175.04	0	0	213.50	268.57
잠재가격	13.40	13.40	13.40	13.40	13.06	11.43	13.40	13.40

반면 발전력 입찰시장에서 입찰함수의 기울기를 전략적으로 선택하는 과점경쟁 모형에서는 수력발전의 운용 전략이 이와는 다르게 나타난다. 내쉬균형에서 입찰함수

의 기율기(s_h, s_t), 발전량, 가격 등을 정리하면 다음 표3과 같다.

표 3 과점경쟁모형의 균형상태
Table 3 Equilibrium States of Oligopoly Model

구간	1	2	3	4	5	6	7	8.
s_h	1.495	1.126	1.139	1.762	3.77	6.23	1.634	1.495
s_t	0.825	0.772	0.746	0.839	0.93	0.998	0.771	0.825
q_h	59.65	95.34	89.65	46.19	17.25	9.74	49.49	59.65
q_t	102.05	132.70	130.14	91.01	64.54	55.82	98.35	102.05
가격	89.15	107.38	102.08	81.40	65.02	60.67	80.86	89.15
물사용량	274.18	472.23	438.97	206.10	71.96	39.91	222.47	274.18
잠재가격	9.81	10.96	10.97	9.33	7.84	7.18	9.87	9.81

과점형 잠재가격은 13.59로서 전 구간에서 동일하며 통합형 잠재가격은 구간마다 차이를 보인다. 완전경쟁과 과점의 균형상태에서 구간별 발전력과 시장가격, 잠재가격을 비교하여 나타내면 다음 그림1,2와 같다.

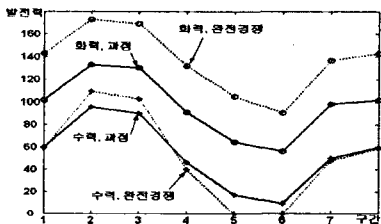


그림 1 수력과 화력의 발전력 비교
Fig. 1 Quantities of hydro and thermal generation

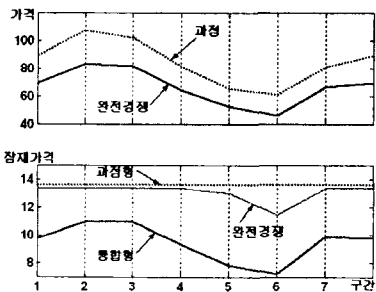


그림 2 시장가격 및 잠재가격의 비교
Fig. 2 Market Prices and Shadow Prices

시장가격은 완전경쟁보다 과점에서 높게 형성되는 반면 공급량은 과점에서 더 적다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그림1에서 화력기의 발전력과 그림2에서의 시장가격은 이러한 일반적 현상을 그대로 보여준다.

그림1의 구간 5,6에서 완전경쟁의 경우에 수력발전을 하지 않은 반면 과점인 경우에는 입찰에 참여하여 발전을 하게 된다. 또한 과점의 수력발전력 분포를 보면, 수요가 크고 가격 탄력성이 큰 구간 2,3에서 완전경쟁에 비해 공급을 줄이는 반면, 수요가 작고 가격탄력성이 작은 구간 5,6에서 공급을 늘이는 것을 알 수 있다.

수자원 이용의 효율성 검토는 잠재가격의 분석을 통해 가능하다. 그림2에 보이는 완전경쟁 잠재가격은 가장 효율적인 이용가치로 볼 수 있으며 과점형은 수력발전 회사의 이윤추구 측면에서 최적화한 것으로서 한계이득의 가치를 나타낸다. 따라서 과점형 잠재가격이 높다고 해

서 보다 효율적으로 이용되고 있는 것은 아니다. 오히려 수자원의 공익적인 가치는 화력기의 한계비용으로 환산된 통합형 잠재가격으로 계산된다. 따라서 그림2에서 수자원의 이용 효율성은 과점의 경우에 비해 줄어드는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

전력시장에서의 발전력 경쟁에 수력발전기의 입찰전략을 해석하기 위한 정식화를 수립하고 내쉬균형을 계산하기 위한 최적화와 계산기법을 제안하였다. 기존의 '수직 통합형에서 사용되던 잠재가격의 개념은 경쟁시장에서는 더 이상 사용될 수가 없고 이 대신에 수력발전을 통한 한계이득으로 환산된 새로운 잠재가격 개념이 나타남을 유도하였다.

사례연구를 통하여 수력기의 전략은 가격 탄력성이 큰 구간에서 공급을 줄이고, 가격탄력성이 작은 구간에서는 공급을 늘이는 것을 확인하였다. 이러한 현상을 시장지배력으로 해석하기 위해 사회적후생을 계산하여 비교하였다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Stoft, "Using Game Theory to Study Market Power in Simple Networks," *IEEE Tutorial on Game Theory in Electric Power Market*, IEEE Press TP-136-0, pp.33-40, 1999.
- [2] K. H. Lee and R. Baldick, "Tuning of Discretization in Bimatrix Game Approach to Power System Market Analysis," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.18, No.2, pp.830-836, May 2003.
- [3] G. Borichevsky, "Bidding Mechanism for realizing hydro efficiencies in market operations," *IEEE PES Summer Meeting*, Vol.3, p.1301, July 2002.
- [4] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, John Wiley & Sons, Inc. 1996.
- [5] D.W. Carlton, J.M. Perloff, *Modern Industrial Organization*, Addison-Wesley, 2000.
- [6] A. Oliveira, A.C.G. Melo, R.C. Souza, "Optimum Price Bidding Strategy in the Short-term Market of Hydro-Dominated System," *International Conference on Probabilistic Method to Power Systems*, pp.373-379, Sept. 2004.
- [7] C. Gonzalez, J. Juan, "Reliability analysis for systems with large hydro resources in a deregulated electric power market," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.20, No.1, pp.90-95, Feb. 2005.
- [8] A.J. Coneo, J.M. Arroyo, J. Contrares, "Self-scheduling of a hydro producer in a pool-based electricity market," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.17, No.4, pp.1265-1272, Nov. 2002.
- [9] N. Lu, J.H. Chow, A. Desrochers, "Pumped-Storage hydro-Turbine Bidding Strategies in a Competitive Electricity Market," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.19, No.2, pp.834-841, May 2004.