2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

연료제약 발전기의 강제인수 조건이 반영된 전력거래 해석

이광호 조철희 신재홍
단국대학교 전기공학과

Analysis on a Generation Competition with Take-Or-Pay Contract in an Electricy Market

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

Abstract - This paper presents a formulation and a solution method for the optimization problem with a fuel constraint in a competitive electricity market. Take-or-Pay (TOP) contract for an energy resource is the typical constraint as a limiting factor. Two approaches are proposed in this paper for modeling the dispatch calculation in a market mechanism. The approaches differ in the subject who considers and inserts the fuel-constraint into its optimization problem. Market operator and each power producer having a TOP contract are assumed as such subjects.

1. 서 론

전력산업에서 규모의 경제를 근거로 하는 독점/통합체제가 송전망 개방과 경쟁을 통한 효율성 제고라는 명분하에 크게 변화되고 있다. 이러한 흐름에 따라 전력계통과 경제학, 산업조직론, 게임이론 등이 결합된 전력시장 해석에 관한 연구가 이루어져 왔다[1,2,3]. 지금까지의 연구에서는 전력공급자의 입찰전략을 다루는데 있어 최대발전력 조건 정도를 고려하였다. 하지만 액화천연가스(LNG) 연료를 사용하는 경우, 강제인수(take-or-pay, TOP) 조건의 계약이 존재하기 때문에 연료량에 대한 제약을 고려할 필요가 있다[4,5].

강제인수조건이란 상품구매자가 일정기간 동안에 정해진 가격으로 계약된 일정량의 상품에 대해 인수 여부에 관계없이 반드시 상품대금을 지불해야 하는 계약방식이다. 따라서 TOP 조건으로 체결된 에너지원에 대해서는 이미 비용이 지불된 것이기 때문에 발전운용계획 단계에서는 계약된 전량을 사용하는 것이 경제적이며 최적발전계획을 위해서는 별도의 최적화 기법이 요구된다.

본 논문에서는 이에 대해 전력계통 이론과 산업조직론 및 게임이론을 사용하여 문제의 정식화에서부터 최적화 조건 그리고 전력공급전략에 대한 내쉬균형의 해법에 이르기까지를 분석하여 소개한다.

연료제약을 시장운영자가 처리하는 방식은 연료제약에 대한 전력공급자의 정확한 자료제출과 시장운영자의 합리적 결정이 전제 되어야 한다. 반면에 연료제약 문제를 전력공급자 자신이 입찰전략에서 처리하도록 하는 방식에서는 연료제약에 대한 자료제출과 시장운영자의 계산부담의 문제가 감소하게 된다. 이와 같이 연료제약을 처리하는 두 가지 방식을 분석하고 사례연구를 통해 결과를 비교한다.

2. 본 론

2.1 연료제약 문제 정식화..

수직통합형 체제에서 연료제약 발전기(G_T)를 포함한 발전비용 최소화 문제는 다음과 같이 정식화된다.

[문제1]

$$\min \sum_{j=1}^{J} n_j \sum_{i=1}^{N} F_i(q_{ij}) \tag{1a}$$

$$\text{s.t.} \;\; S_T = \sum_{j=1}^{J} n_j s_j \tag{1b}$$

$$D_j = t_j + \sum_{i=1}^{N} q_{ij} \qquad \text{j=1, ... , J} \tag{1c}$$

$$q_{i\min} \leqq q_{ij} \leqq q_{imax}, \quad t_{\min} \leqq t_j \leqq t_{\max} \tag{1d}$$

여기서 q_{ij} s_j t_j D_j n_j는 구간 j에서 발전기 i의 출력, 발전기 G_T의 연료투입량, G_T의 출력, 전력수요, 시간수이고 F_i는 발전기 Gi의 발전비용 함수, S_T는 발전기 G_T의 계약연료 총량이다.

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

$$\frac{dF_i(q_{ij})}{dq_{ij}} = \gamma \frac{dg(t_j)}{dt_j} \quad \text{i=1,...,N, j=1,...,J} \tag{2}$$

여기서 γ는 식(1b)에 해당되는 라그랑지안 변수이다.

2.2 경쟁적 전력거래의 2단계 최적화..

시장운영자 MO는 식 (3)과 같이 사회적후생(Social Welfare, SW), 즉 시장거래가치를 극대화하는 조건으로부터 거래량과 가격을 결정한다.

$$max_q \;\; SW(q,k) = B(q) - \overline{C}(q,k) \tag{3}$$

여기서 B는 소비자의 만족가치(Benefit)를 나타내는데 이는 수요함수와 총공급량으로 계산되며, $\overline{C}$는 공급자의 입찰함수를 한계비용함수로 간주하여 계산한 유사 발전비용이다.

따라서 MO는 공급자가 제시한 입찰 파라미터 k에 대해 식(4)의 최적화를 통해서 최적의 발전력(q)을 결정한다. 이 때 송전용량 등의 제약 혹은 연료의 강제인수(TOP) 조건 등이 최적화의 제약조건으로 고려된다.

한편 공급자 입장에서는 k의 선택에 따라 MO에서의 최적화 결과가 달라지고 기업의 이득이 변하기 때문에 k를 변수로 하는 이득극대화 문제를 계산하게 된다. 이를 나타내면 식 (4)와 같다.

$$max_k \;\; \pi(q,k) = pq - C(q,k) \tag{4}$$

여기서 p는 거래가격으로서 pq는 전력공급에 따른 매출액, C는 실제의 발전비용을 나타낸다.

공급기업이 이득을 극대화하기 위해서는 $\partial\pi/\partial k$ 식을 구해야 하는데 이 때 경쟁상대의 입찰 파라미터에 영향을 받게 되어 상호간의 입찰전략에 따라 이득이 변하는 게임 현상이 나타난다[1]. 따라서 발전기업은 최종적으로 내쉬균형(Nash Equilibrium, NE) 전략에 해당되는 입찰 파라미터를 선택하게 된다.

또한 식(4)의 최적화를 수행하는 과정에서 거래량(q)이 식(3)을 통해 결정되므로 해를 구하기 위해서는 두 단계의 최적화 문제가 연계되어야 한다. 이러한 문제를 2단계(Bi-level) 최적화라고[2] 하며 전력시장에서 경쟁적 전력거래를 해석하기 위해 내쉬균형 전략을 구하는 과정에서 일반적으로 나타나는 문제이다.

2.3 시장운영자의 연료제약 처리

연료제약 발전기의 의무인수(TOP) 조건이 반영되는 급전계획을 수립하기 위해서는 TOP 조건을 고려하는 주체가 정의되어야 한다. 공급자가 TOP 조건을 MO에게 제출하도록 시장규칙을 정의한다면 MO는 식(4)의 계산과정에서 TOP 조건을 제약조건에 포함시켜야 한다. 따라서 MO의 계산부담이 증가하고 시장참여자들의 급전계획 결과에 대한 이해가 다소 난해해진다.

공급자는 P1과 P2, 2인이고 P1은 일반 발전기 G1과 연료제약발전기 GT를, P2는 일반 발전기 G2를 소유한다. 발전기 G1과 G2의 발전비용특성은 각각 $b_1 + m_1 q_1$, $b_2 + m_2 q_2$의 한계비용으로 정의하고, GT의 연료특성은 $s = g(t) = b_t t + 0.5 m_t t^2$와 같이 발전력에 대한 2차함수로 정의한다. 한편 부하패턴은 구간 j에서 수요함수 $b_{0j} - m_{0j} d_j$ 로 정의하는데 이 때 d_j는 부하전력으로서 공급전력인 $q_{1j} + t_j + q_{2j}$와 동일하다.

라그랑지안을 정의하여 편미분을 계산하면 다음과 같다. (j=1, ..., J)

$$\partial L/\partial q_{1j} = b_{0j} - m_{0j}(q_{1j} + q_{2j} + t_j) - (k_{1j} + m_1 q_{1j}) = 0 \quad (5a)$$

$$\partial L/\partial q_{2j} = b_{0j} - m_{0j}(q_{1j} + q_{2j} + t_j) - (k_{2j} + m_2 q_{2j}) = 0 \quad (5b)$$

$$\partial L/\partial t_j = b_{0j} - m_{0j}(q_{1j} + q_{2j} + t_j) - \gamma\ \partial g(t_j)/\partial t_j = 0 \quad (5c)$$

따라서 모든 구간에서 한계연료소비와 시장가격의 비가 일정한 값 $\gamma = p_j/(\partial g/\partial t_j)$일 때 최적이 됨을 알 수 있다. 식(5)는 변수 q_{1j}, q_{2j}, t_j 에 대한 선형식으로 나타나지만 추가변수인 잠재가격 γ 를 구하기 위해서는 t_j의 2차식으로 나타나는 식(1b)를 동시에 계산해야 한다.

2.3 시장운영자의 연료제약 처리

연료제약에 대한 조건을 전적으로 발전사업자 자신이 처리하도록 한다면 MO는 연료제약을 고려할 필요 없이 식(4)의 시장거래가치 극대화만을 계산하면 된다. 반면 TOP 조건의 발전기로 공급입찰에 참여하는 사업자는 실질적인 이득 극대화를 위해 식(4)의 목적함수 뿐 아니라 자신의 TOP 조건을 제약조건으로 포함시켜 최적화를 수행해야 한다.

MO가 전력거래의 결정 과정에서 사용되는 사회적후생에 대한 최적조건은 다음과 같다.

$$\partial SW/\partial q_{tj} = b_{0j} - m_{0j}(q_{tj} + q_{2j}) - (k_{1j} + m_1 q_{tj}) = 0 \quad (5a)$$

$$\partial SW/\partial q_{2j} = b_{0j} - m_{0j}(q_{tj} + q_{2j}) - (k_{2j} + m_2 q_{2j}) = 0 \quad (5b)$$

참여자 P1의 이득극대화 계산을 위해 TOP 조건이 포함된 최적조건을 유도하면 다음과 같다

$$\begin{aligned}\partial L_1/\partial t_j &= p_j\, \partial q_{tj}/\partial t_j - \partial C_1/\partial q_{1j} \cdot \partial q_{1j}/\partial t_j - \gamma\, \partial g(t_j)/\partial t_j \\ &= 0 + \partial C_1/\partial q_{1j} - \gamma\, \partial g(t_j)/\partial t_j = 0\end{aligned} \quad (6)$$

여기서 q_{tj}는 입찰 파라미터 k에 따라 식(9)에 의해 결정되기 때문에 $\partial q_{tj}/\partial t_j = 0$이고 따라서 $\partial q_{1j}/\partial t_j = -1$ 이다. 식(6)을 정리하면 $\gamma = (\partial C_1/\partial q_{1j})/(\partial g/\partial t_j)$ 로서 모든 구간에서 한계연료소비와 한계발전비용의 비가 일정한 값(γ)일 때 최적이 됨을 알 수 있다.

2.4 내쉬균형전략의 해법

경쟁적 전력거래에서 내쉬균형전략을 구하기 위해서는 상대방의 전략에 대한 최적대응함수를 구해야 한다. 최적대응이란 이득함수를 전략 파라미터 k로 미분하여 영이 되는 k의 값을 말한다.

시장운영자가 연료제약을 처리하는 경우의 최적대응함수는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}\partial \pi_1/\partial k_{1j} &= \partial[p_j(q_{1j} + t_j) - C_1(q_{1j})]/\partial k_{1j} \\ &= q_{1j} + t_j + [k_{1j} - b_1 + m_1(q_{1j} + t_j)]\partial q_{1j}/\partial k_{1j} + \\ &\qquad (k_{1j} + m_1 q_{1j})\partial t_j/\partial k_{1j} \\ &= q_{1j} + t_j + [k_{1j} - b_1 + m_1(q_{1j} + t_j)]\partial q_{1j}/\partial k_{1j} = 0\end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned}\partial \pi_2/\partial k_{2j} &= \partial[p_j q_{2j} - C_2(q_{2j})]/\partial k_{2j} \\ &= q_{2j} + [k_{2j} - b_2 + m_2 q_{2j}]\partial q_{2j}/\partial k_{2j} = 0\end{aligned} \quad (7b)$$

한편 시장참여자가 연료제약을 처리하는 경우, P1과 P2의 최적대응함수는 다음 식(8)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}\partial L_1/\partial k_{1j} &= \partial[p_j(q_{1j} + t_j) - C_1(q_{1j}) - \gamma g(t_j)]/\partial k_{1j} \\ &= q_{1j} + t_j + [k_{1j} + 2m_1(q_{1j} + t_j)]\partial(q_{1j} + t_j)/\partial k_{1j} - \\ &\qquad (b_1 + m_1 q_{1j})\partial q_{1j}/\partial k_{1j} - \gamma(b_t + m_t t_j)\partial t_j/\partial k_{1j} = 0\end{aligned} \quad (8a)$$

$$\begin{aligned}\partial \pi_2/\partial k_{2j} &= \partial[p_j q_{2j} - C_2(q_{2j})]/\partial k_{2j} \\ &= q_{2j} + [k_{2j} - b_2 + m_2 q_{2j}]\partial q_{2j}/\partial k_{2j} = 0\end{aligned} \quad (8b)$$

여기서 $\partial t_j/\partial k_{1j} \neq 0$ 임에 주의할 필요가 있다. 식(12a)에서는 연료제약조건을 MO에서 만족시키므로 k_{1j}의 변화에 대해서도 연료사용량 합은 변화가 없지만 시장참여자가 처리하는 경우에는 그렇지 않다.

2.5 2단계 최적화의 해법

전력시장에서의 전력거래는 MO와 거래 참여자 모두의 전략이 균형을 이루는 상태에서 이루어진다. 따라서 MO가 처리하는 경우의 최적조건식은 다음 식(9)와 같이 정리된다.

$$\begin{pmatrix} m_{0j}+m_1 & m_{0j} & m_{0j} & 1 & 0 \\ m_{0j} & m_{0j} & m_{0j}+m_2 & 0 & 1 \\ m_{0j} & m_{0j}+\gamma m_t & m_{0j} & 0 & 0 \\ 1+m_1 d_{1j} & 1+m_1 d_{1j} & 0 & d_{1j} & 0 \\ 0 & 0 & 1+m_2 d_{2j} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{1j} \\ t_j \\ q_{2j} \\ k_{1j} \\ k_{2j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{0j} \\ b_{0j} \\ b_{0j} - \gamma b_t \\ b_1 d_{1j} \\ b_2 d_{2j} \end{pmatrix}$$

j=1, ..., J (9a)

$$S_T = \sum_{j=1}^{J} g(t_j) \quad (9b)$$

여기서 $d_{1j} = \partial q_{1j}/\partial k_{1j} = -(m_{0j} + m_2)/\triangle$, $d_{2j} = \partial q_{2j}/\partial k_{2j} = -(m_{0j} + m_1)/\triangle$, $\triangle = m_{0j} m_1 + m_1 m_2 + m_2 m_{0j}$ 이다.

한편 시장참여자가 제약조건을 처리하는 경우의 최적조건은 식(9), (11), (13)을 연립함으로서 다음 식(15)와 같이 정리된다.

$$\begin{pmatrix} m_{0j}+m_1 & m_{0j}+m_1 & m_{0j} & 1 & 0 \\ m_{0j} & m_{0j} & m_{0j}+m_2 & 0 & 1 \\ m_1 & -\gamma m_t & 0 & 0 & 0 \\ M_1 & M_2 & 0 & d_{1j}+d_{tj} & 0 \\ 0 & 0 & 1+m_2 d_{2j} & 0 & d_{2j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{1j} \\ t_j \\ q_{2j} \\ k_{1j} \\ k_{2j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{0j} \\ b_{0j} \\ -b_1 + \gamma b_t \\ b_1 d_{1j} + \gamma b_t d_{tj} \\ b_2 d_{2j} \end{pmatrix}$$

j=1, ..., J (10a)

$$S_T = \sum_{j=1}^{J} g(t_j) \quad (10b)$$

여기서 $M_1 = 1 + m_1 d_{1j} + 2m_1 d_{tj}$, $M_2 = 1 + 2m_1 d_{1j} + 2m_1 d_{tj} - \gamma m_t d_{tj}$ 이고 $d_{tj} = \partial t_j/\partial k_{1j} = -m_{0j}(m_{0j} + 2m_2)/(\gamma m_t \triangle)$, $d_{2j} = \partial q_{2j}/\partial k_{2j} = -(m_{0j} + m_1)/\triangle$, $d_{1j} = -(m_{0j} + m_2)/\triangle - d_{tj}$, $\triangle = m_{0j} m_1 + m_1 m_2 + m_2 m_{0j}$ 이다.

앞에서와 같이 잠재가격 γ가 포함되어 계산과정은 동일하다. 하지만 식(10)에서의 잠재가격과 식(9에서의 잠재가격의 의미는 서로 다르기 때문에 γ 는 다른 값을 갖는다.

2.6 사례 연구

참여자는 2인(P1,P2), P1은 일반 발전기 G1과 연료제약발전기 GT를, P2는 일반 발전기 G2를 갖는 전력시장을 가정한다. 발전비용 특성과 연료 특성은 다음 표1과 같은 2차함수로 정의한다. GT의 계약된 연료 총량 ST는 1500으로 설정한다.

한편 부하패턴은 다음 표2와 같이 구간별 변동 수요함수로 설정한다. 구간 j에서의 수요함수는 부하전력 d_j와 시장가격 p_j에 대해 $p_j = b_{0j} - m_{0j} d_j$로 정의하며 구간은 전체 8개이고 편의상 한 구간은 한 시간으로 정의한다.

표 1 사례적용 발전기의 발전비용과 연료량 특성

구분	특성	함수형태	b	m
발전기#1 (G_1)	발전비용	$b_1 q_1 + 0.5 m_1 q_1^2$	$b_1 = 10$	$m_1 = 0$
발전기#2 (G_2)	발전비용	$b_2 q_2 + 0.5 m_2 q_2^2$	$b_2 = 5$	$m_2 = 0$
연료제약 (G_T)	연료사용량	$b_t t + 0.5 m_t t^2$	$b_t = 4$	$m_t = 0$

표 2 구간별 수요함수

구간(j)	1	2	3	4	5	6	7	8
b_{0j}	170	220	190	150	90	70	120	170
m_{0j}	0.5	0.4	0.3	0.5	0.6	0.7	0.4	0.5

연료제약을 시장운영자가 고려하는 경우(이하 방식1)의 내쉬균형상태는 다음 표3과 같다.

표 3 시장운영자 처리의 계산 결과

구간	1	2	3	4	5	6	7	8
q_{1j}	89.47	104.83	120.47	88.39	47.21	30.23	91.37	89.473
t_j	34.80	112.07	110.11	14.88	0	0	0	34.808
q_{2j}	92.11	127.75	130.67	83.60	46.20	32.85	78.15	92.113
k_{1j}	39.43	55.932	51.505	34.46	22.14	18.28	29.34	39.435
k_{2j}	20.35	24.653	22.819	18.93	13.15	11.05	17.02	20.352
p_j	61.80	82.14	81.623	56.55	33.94	25.83	52.19	61.803
π_{1j}	5785.	15394	15802	3980.	852	364.5	2811.	5785.5
π_{2j}	3323.	6182.6	6170.6	2737.	857.1	441.7	2313.	3323.2

음영으로 표시된 $k_{1j}\,k_{2j}$항은 참여자 P1과 P2의 전략변수로서 내쉬균형 전략에 해당된다.

발전기 GT의 발전력 t_j를 보면 구간 5-6-7에서 영으로 계산되는데 그 이유는 구간별 잠재가격을 조사하면 알 수 있다. 구간 8개에서의 잠재가격 $\gamma = p_j/(\partial g/\partial t_j)$은 13.16 13.16 13.16 13.16 8.49 6.46 13.05 13.16로 계산된다. 다른 구간에서 잠재가격은 13.16으로 동일하지만 구간 5-6-7에서는 이보다 작은 값을 보인다. 잠재가격의 경제학적 의미에서 볼 때 5-6-7 구간에서 GT 연료의 가치가 다른 구간에 비해 낮다. 따라서 이 구간에서의 연료소비를 줄이고 다른 구간에서 소비량을 증가시키는 것이 유리하며 이런 이유로 발전력 $t_5 t_6 t_7$의 값은 영이 되어 더 이상 낮출 수 없는 상태가 되는 것이다.

다음은 연료제약 조건을 시장참여자 중 P1이 자체적으로 반영하는 경우(이하 방식2)이다.

표 4 시장참여자 처리의 계산 결과

구간	1	2	3	4	5	6	7	8
q_{1j}	87.79	117.48	123.91	81.35	42.10	21.46	78.47	87.79
t_j	37.31	92.438	104.39	25.35	0	0	20.01	37.31
q_{2j}	91.74	130.53	131.44	82.07	48.70	37.45	75.31	91.746
k_{1j}	30.30	31.343	24.997	28.93	24.98	23.39	25.85	30.302
k_{2j}	20.29	25.082	22.924	18.67	13.59	11.9	16.58	20.291
p_j	61.57	83.821	82.074	55.61	35.51	28.75	50.47	61.577
π_{1j}	5862	14695	15580	4293.	852.6	344.9	3417.	5862
π_{2j}	3296.	6455	6243.5	2638.	952.3	574.1	2148.	3296.8

구간 8개에서의 잠재가격 $\gamma = (\partial C_1/\partial q_{1j})/(\partial g/\partial t_j)$은 6.73 6.73 6.73 6.73 5.13 3.84 6.73 6.73 로 계산된다. 이때에도 구간 5-6에서의 잠재가격이 다른 구간의 값보다 작게 나타나므로 그 때의 발전력 $t_5 t_6$의 값은 낮추고 다른 구간의 출력을 증가시켜야 한다. 따라서 $t_5 t_6$의 값을 최대로 낮춘 영인 상태가 최적이 된다.

2.7 결과 분석

방식1에서 P1은 q_{1j}만을 고려하고 t_j 는 시장운영자가 결정한다. 하지만 방식2에서는 P1이 q_{1j} t_j 모두를 고려하는 전략을 세워야 하기 때문에 둘 사이의 전력배분이 중요한 사항이 된다. 다음 그림1은 이러한 P1의 전력배분 결과를 비교한 것이다. 전력이 배분된 비율은 $t_j/(q_{1j}+t_j)$로 계산하였다. 발전사업자가 직접 연료제약 발전기의 발전계획을 수립한 것(방식2)과 MO에서 계획한(방식1) 결과가 구간별로 차이가 있음을 알 수 있다.

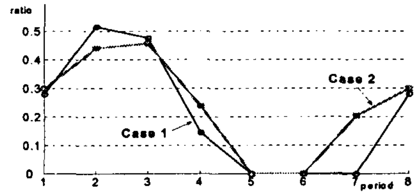

그림 1 연료제약 발전기 출력의 담당 비율

3. 결 론

전력시장해석과 입찰전략의 분석에서 LNG 등의 연료제약 조건이 포함되는 경우 이에 대한 수리적 모형과 해법, 그리고 사례연구의 분석을 제시하였다.

수직통합형 발전비용 최소화 문제에서 강제인수(Take-of-Pay) 조건은 전 구간에서 잠재가격이 일정한 상태가 최적상태임을 의미한다. 하지만 경쟁적 발전입찰 시장에서는 시장운영자와 발전사업자가 추구하는 최적화 대상이 다르기 때문에 새로운 수리모형이 필요하다. 본 연구에서는 입찰시장을 공급함수 모형으로 등가화하여 시장운영자의 시장거래가치 극대화, 각 공급자의 이득극대화가 동시에 만족되는 내쉬균형 상태의 계산 기법을 소개하였다.

본 연구에서는 강제인수 조건을 입찰참여자 각자가 해소하는 모형을 수립하여 내쉬균형을 계산하고 결과를 시장운영자가 처리할 때와 비교하였다. 발전기업의 이득이 증가하고 소비자의 잉여가 감소하지만 시장거래가치 면에서는 큰 차이가 없음을 확인하였다. 이는 시장운영자가 연료제약조건 처리의 방식을 검토할 때 유용한 자료로 활용될 것이다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

[1] 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.

[2] J.D. Weber and T.J. Overbye, "A Two-Level Optimization Problem for Analysis of Market Bidding Strategies," *IEEE PES Summer Meeting*, Vol.12, pp.682-687, 1999.

[3] Y.He and Y.H. Song, "The Study of the Impacts of Potential Coalitions on Bidding Strategies of GENCOs," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.18, No.3, pp.1086-1093, August 2003.

[4] A.J. Wood, B.F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, John Wiley & Sons, Inc. 1996.

[5] K.P. Wong, "Combined Genetic Algorithm/Simulated Annealing/Fuzzy Set Approach to Short-Term Generation Scheduling with Take-Or-Pay Fuel Contract," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.11, No.1, pp.128-133, February 1996.