

## 우리나라 전력시장에서 복합화력 발전의 입찰전략 수립 모형 연구

김상훈\*, 이광호\*, 정래혁\*\*  
 단국대학교 전기공학과\*, 한국전력거래소\*\*

### A Study on Bidding Strategy Model of Combined Cycle Plants in Korean Electricity Market

Sang-Hoon Kim\*, Kwang-Ho Lee\*, Lae-Hyuk Jeong\*\*  
 Dankook University\*, Korea Power Exchange\*\*

**Abstract** - 복합화력발전은 여러 가지 장점으로 오늘날 많이 사용되는 발전방식이며, 가스터빈과 스팀터빈의 결합으로 여러 운전 Mode를 갖는다. 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 복합화력발전사와 시장운영자와의 관계를 분석하고, 복합화력발전사가 운전 Mode 선택을 전략변수로 사용하는 입찰전략 수립 모형을 제시한다.

GT와 ST의 구조는 높은 그 조합에 따라 운전 Mode를 선택할 수 있다는 특징 또한 갖게 해준다. 다음 표 1은  $n$ 개의 GT와 한 개의 ST로 구성되어 있는 복합화력발전이 갖는 운전 Mode의 종류를 나타내고 있다.

#### 1. 서 론

**<표 1>  $n$ 개의 GT, 한 개의 ST를 가진 복합화력발전의 운전 Mode  $k$**

운전모드 $k$	1	2	...	$n$	$n+1$	$n+2$	...	$2n$
GT와 ST 조합	1GT	2GT	...	$nGT$	1GT + 1ST	2GT + 1ST	...	$nGT + 1ST$

복합화력발전이란 열효율 향상을 위해 두 종류의 열 사이클을 조합하여 발전하는 방식이다. 다른 발전방식과 비교하여 속응성, 높은 열효율, 친환경성, 연료 선택에 대한 유연성 등 여러 가지 특성을 가지고 있으며 이러한 장점들로 오늘날 전력시스템에서 많이 사용되고 있다[1].

GT는 연료의 연소가스로 기동되기 때문에 단독으로 운전 가능하다. 하지만 ST는 GT의 배기열로 기동되므로 단독으로 운전하는 경우는 없으며, GT가 한 대 이상 운전 시 기동한다. 우리나라 복합화력발전의 경우, 설비의 대부분은  $n=2$ 의 GT로 이루어진 설비가 차지하고 있으며 최소  $n=1$ 의 서인전복합화력발전에서부터 최대  $n=5$ 의 조합을 갖는 분당복합화력발전까지 있다[2].

우리나라 전력시장에서의 복합화력발전은 최근 설비비중 증가세와 함께 그 중요성이 커지고 있다. 현재 우리나라 전력시장은 변동비만영시장(Cost Based Pool; CBP)이 운영중이며 발전사의 전략적 행동으로 인한 시장의 불안정 요인을 방지하기 위해 여러 규제를 가하고 있다. 하지만, 복합화력발전의 운전 Mode 선택에 대한 주체는 시장운영자가 아닌 발전사에게 부여하고 있다[2].

표 1에서와 같이  $k(1 \leq k \leq 2n, \text{ 자연수})$ 의 운전 Mode를 갖는 복합화력발전은 각 운전 Mode에 따라 발전 비용이 달라지기 때문에  $k$ 의 비용특성을 갖는다. 다음은 복합화력발전의 비용특성을 표현한 식이다.

최근 복합화력발전과 관련하여 여러 연구가 진행되었으나, 전략변수를 운전 Mode로 고려하는 연구는 진행된 바 없다[1,3]. 본 연구에서는 우리나라 전력시장에서 복합화력발전이 전략적으로 운전 Mode를 선택하여 입찰하는 과정을 모형화한다. 운전 Mode 선택이 갖는 의미는 발전사가 비용특성을 선택할 수 있다는 것이다. 따라서 운전 Mode 선택을 복합화력발전사의 전략변수로 고려하는 입찰전략을 제시하고, 사례연구에서 간단한 계통모형에 대해 적용한다.

$$\text{복합화력발전} : C_{cc,k}(q_{cc,k}) = a_{cc,k} + b_{cc,k} q_{cc,k} + c_{cc,k} q_{cc,k}^2 \quad (1)$$

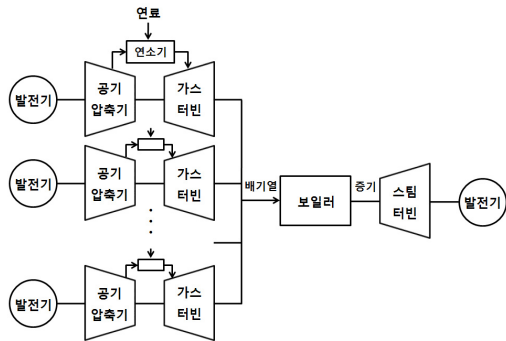
#### 2. 복합화력발전의 운전 Mode와 비용특성

여기서  $C_{cc,k}(q_{cc,k})$ 는 복합화력발전기가  $k$  Mode로 운전할 때 발전량  $q_{cc,k}$ 에 대한 비용을 의미하며  $a_{cc,k}, b_{cc,k}, c_{cc,k}$ 는 그때의 상수와 1차계수, 그리고 2차계수를 의미한다.

복합화력발전은 연소과정에서 발생하는 가스를 이용하여 가스터빈(Gas Turbine; GT)으로 1차 발전과정을 거친 뒤, 가스터빈에서 배출되는 배기열을 이용하여 보일러를 가열하고, 여기에서 발생하는 증기를 이용하여 다시 스팀터빈(Steam Turbine; ST)으로 2차 발전한다. 석탄을 연료로 사용하는 일반 화력발전소는 1차 발전과정을 거치지 않는다는 점에서 복합화력발전과 구별된다. 다음 그림 1은 복합화력발전의 구조를 보여주고 있다.

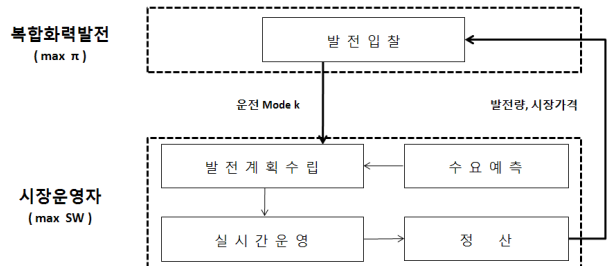
#### 3. 복합화력발전의 입찰전략 수립 모형

우리나라의 전력시장은 모든 발전사업자가 시장운영자에게 비용정보를 제출하기 때문에 발전사의 전략적 행동 가능성이 낮다. 그러나 발전사가 발전용량을 전략적으로 선택하여 발전량과 가격에 영향을 줄 수가 있다[4]. 본 논문에서는 복합화력발전이 전략적으로 운전 Mode  $k$ 를 선택하는데 주목하기 위해, 이러한 용량철회현상은 없다고 가정한다.



**<그림 1> 복합화력발전기의 구조**

GT와 ST의 열 사이클 결합은 복합화력발전이 높은 열효율을 갖게 해준다. 2007년 우리나라의 발전 열효율 데이터를 보면, 유연탄 화력발전의 경우 송전단에서 37%의 열효율을 갖는 것과 비교하여 복합화력발전은 45%의 열효율로서 약 8% 정도 높다는 것을 알 수 있다[2].



**<그림 2> 시장운영자와 복합화력발전과의 관계**

그림 2에서 시장운영자는 복합화력발전사가 선택한 운전 Mode  $k$ 의 비용함수와 일반화력발전사들의 비용함수, 그리고 수요를 고려하여 발전계획을 수립한다. 이때, 수요는 탄력성을 가진다고 가정한다. 발전계획수립은 사회적 후생(Social Welfare:  $SW$ )을 극대화 시키는 과정이며 모든 발전력과 수요량은 시장운영자가 결정하게 된다. 복합화력발전사는 시장운영자의 최적화 결과를 이용, 이득 극대화를 수행하여 또 다시  $k$ 를 선택한다. 이와 같이, 복합화력발전사와 시장운영자는 서로 최적화 결과에 영향을 받는 유기적인 관계이기 때문에, 우리나라의 전력시장은 시장운영자와 복합화력발전사간의 Game으로 고려할 수 있다. 다음은 이를 식으로 표현한 것이다.

$$\text{일반화력 비용함수} : C_i(q_i) = a_i + b_i q_i + c_i q_i^2 \quad (2)$$

$$\text{복합화력 비용함수} : C_{cc,k}(q_{cc,k}) = a_{cc,k} + b_{cc,k} q_{cc,k} + c_{cc,k} q_{cc,k}^2 \quad (3)$$

$$\text{수요 특성} : D(d) = b_0 - c_0 d \quad (4)$$

$$\text{시장운영자의 최적화} : \text{Max } SW = B(d) - C_{cc,k}(q_{cc,k}) - \sum C_i(q_i) \quad (5)$$

$$\text{s.t. } d = q_{cc,k} + \sum q_i$$

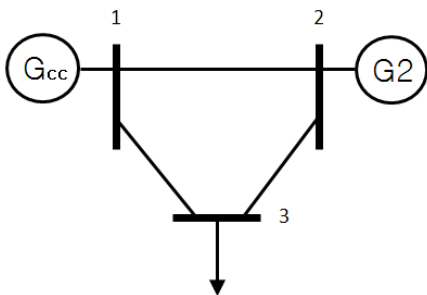
$$\text{복합화력발전 최적화} : \text{Max } \pi_{cc,k} = D(d)q_{cc,k} - C_{cc,k}(q_{cc,k}) \quad (6)$$

여기서  $D(d)$ 는 수요량  $d$ 에 대한 수요특성이며  $b_0$ 와  $c_0$ 는 수요특성의 계수이다. 전력시장의 가격은 수요특성에 의해서 결정된다.  $B(d)$ 는 소비자의 만족가치(Benefit)를 의미하며 수요특성  $D(d)$ 의 적분값과 같다. 식 (2)~(6)은 2단계 최적화 문제로 풀 수 있으며, 기존 연구의 2단계 최적화 문제보다 비교적 쉽게 해결된다. 복합화력발전사의 최적화는 연속변수 중 최적해를 찾아내는 것이 아닌, 운전 Mode  $k$  값 중 최적해를 찾아내는 것이기 때문이다.  $k$ 값은 표 1에서와 같이 최소값 1부터 2n까지의 자연수이므로 GT의 개수  $n$ 이 최대 5개인 복합화력발전이라 하더라도 최대 10이하의 자연수로 결정된다. 따라서 시장운영자와 복합화력발전간의 2단계 최적화는 복합화력발전의 전략변수  $k(k=1,2,3,\dots,2n)$ 경우에 대해서만 고려하면 된다.

그림 2에서와 같이 복합화력발전이  $k$ 값을 선택하게 되면, 시장운영자는 식 (5)의 최적화를 통해 발전량  $q_i$ ,  $q_{cc,k}$ 와 수요량  $d$ 를 결정하게 된다. 복합화력발전사는 식 (5)의 최적화를 각  $k$ 에 대하여 수행함으로써 발전사의 이득을 극대화 시키는  $k$ 값을 선택할 수 있는 것이다. 최종적으로 복합화력발전사가  $k$ 값을 선택하게 되면, 시장운영자의 최적화를 수행하여 나온 결과에 대하여 시장참여자들은 목적함수를 위해 변수를 바꿀 유인이 존재하지 않는다. 따라서 이 결과는 내쉬균형(Nash Equilibrium : NE)이 된다.

#### 4. 사례연구

대상계통은 그림 3과 같이 1모선에 복합화력발전, 2모선에 일반화력발전, 3모선은 부하모선인 계통을 사용한다. 복합화력발전은 2개의 GT를 갖는 설비로 가정하였으며, 그에 따른 비용특성과 수요특성은 표2와 같다. 2개의 GT를 갖는 복합화력발전은 총 4가지의 운전 Mode가 가능하므로 각 운전 Mode에 대한 4가지 비용함수를 갖는 것을 알 수 있다.



<그림 3> 사용한 계통 모델

<표 2> 비용특성과 수요특성

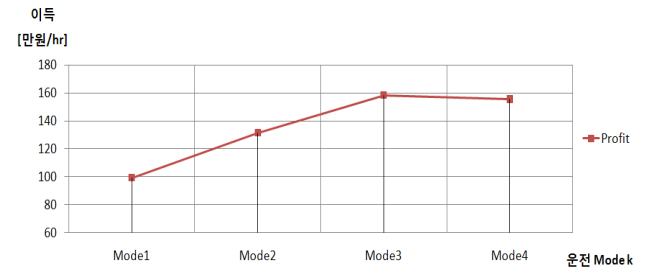
		$a$	$b$	$c$
G1	$k=1$	400	24	0.04
	$k=2$	300	23	0.03
	$k=3$	200	22	0.02
	$k=4$	100	21	0.01
G2		100	5	0.04
수요			5	0.1

복합화력발전은 표 2의 비용특성과 수요특성을 사용하여 각 운전 Mode를 사용하였을 경우의 완전경쟁균형을 구할 수 있다.  $k=1,2,3,4$ 이므로 총 4가지 경우의 완전경쟁 균형을 구한다. 다음 표 3은 운전 Mode  $k$ 에 따른 완전경쟁균형 결과를 보여주고 있다.

<표 3> 복합화력발전 운전모드별 완전경쟁균형

$k$	$q_{cc,k}$	$q_2$	$d$	$\pi_{cc,k}$	$\pi_2$	$SW$
1	186.6	424.1	610.7	992.9	7094.7	26736.2
2	231.9	398.9	630.9	1313.5	6266.0	27478.2
3	298.7	361.8	660.5	1584.3	5137.2	28536.2
4	406.9	301.7	708.6	1555.7	3541.5	30204.3

표 3의 결과에서,  $k=3$ 인 경우와  $k=4$ 인 경우를 비교해 볼 필요가 있다.  $k=4$ 일 경우, 시장운영자가 목적함수로 사용하는  $SW$ 가 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있으며, 복합화력발전사 발전량과 수요량 또한 가장 크다는 것을 알 수 있다. 반면  $k=3$ 인 경우, 복합화력발전사가 목적함수로 사용하는 이득  $\pi_{cc,k}$ 가 가장 크게 나타나며,  $SW$ 나 발전량  $q_{cc,k}$ 은 오히려 줄어들었음을 알 수 있다. 이것은 복합화력발전  $k=3$ 의 비용함수가 더 높은 비용을 나타내지만, 그에 따라 복합화력발전량 뿐만 아니라 일반화력발전량과 수요량에도 영향을 주어 가격상승으로 인해 이득이 늘어날 수 있다는 것을 보여주고 있다. 다음은 표 3결과에서 복합화력발전사의 이득을 그래프로 나타낸 것이다.



<그림 4> 복합화력발전의 운전 Mode별 기대이득

복합화력발전의 운전 Mode 선택권이 시장운영자에게 있다면  $SW$ 가 가장 높은  $k=4$ 로 결정될 것이다. 하지만 모든 비용정보는 제출하되 운전 Mode에 대한 행사권은 복합화력발전이 가지고 있다. 그렇기 때문에 그림 5에서와 같이, 복합화력발전은 가장 큰 이득을 발생시키는  $k=3$ 을 선택하여 입찰할 것이며, 이 때의 균형점이 NE이 된다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 우리나라 전력시장에서 복합화력발전의 입찰전략 수립 모형에 대하여 연구하였다. 일반화력발전과는 달리 운전 Mode에 따라 비용함수가 변하는 복합화력발전의 특성을 고려하여 복합화력발전의 전략변수를 운전 Mode  $k$ 로 사용하였으며, 시장운영자와 복합화력발전과의 관계를 2단계 최적화 문제로 모형화 하였다. 사례연구에서는 시장상황에 따라 최대 출력을 내는 운전 Mode가 아닌 경우에도 발전사의 이득을 극대화시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

#### [참고 문헌]

- [1] Bo Lu and M. Shahidehpour, "Short-Term Scheduling of Combined Cycle Units," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.19, No.3, pp.1616-1625, August 2004.
- [2] 전력거래소 홈페이지, <http://www.kpx.or.kr/>
- [3] 김남일, "전력 도매시장의 시장참여자 행태 분석 : 게임이론적 접근," 에너지경제연구원 연구보고서, 2003. 11.
- [4] D. Fudenberg and J. Tirole, Game theory, MIT Press, 1991.
- [5] Cohen and Gregory Ostrowski, "Scheduling Units with Multiple Operating Modes in Unit Commitment," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 1, pp.497-503, February 1996
- [6] R. Kehlhofer, Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants. Lilburn, GA: Fairmont, 1991.