

경쟁시장에서 유지보수계획 및 입찰전략 수립에 관한 연구

고용준 · 이호상\* · 신동준 · 김진오  
 한양대학교                      전력거래소\*

Generator Scheduling and Bidding Strategies  
 in Competitive Electricity Market

Young-Jun Ko · Hyo-Sang Lee\* · Dong-Joon Shin · Jin-O Kim  
 Dept. of EE, Hanyang University · Korea Power Exchange\*

**Abstract** - The vertically integrated power industry was divided into six generation companies and one market operator, where electricity trading was launched at power exchange. In this environment, the profits of each generation companies are guaranteed according to utilization of their own generation equipments. This paper represents on generator maintenance scheduling and efficient bidding strategies for generation equipments through the calculation of the contract and the application of each generator cost function based on the past demand forecasting error and market operating data.

서 유지보수 계획의 목적은 계획 예방 정비의 최적화를 통한 가능한 많은 가용용량의 최대한의 확보를 통해 전력생산의 수익을 향상하기 위해 노력하게 된다.

2.1 목적함수의 선정

발전기 보수계획은 부하와 예비력을 고려하여 경제성과 신뢰성을 최대로 할 수 있도록 정해진 기간의 각 발전기의 보수시기를 합리적으로 결정하는 문제이다. 본 논문에서는 발전사업자의 보수계획문제의 목적함수로서 에너지 시장에서 에너지의 판매를 위한 예방 정비 발전량을 최소화하도록 설정하였다. 목적함수는 식 (1)과 같다.

$$\text{Min}[\sum_t [\sum_{i \in I} P_{it} - \sum_{i \in I, k \in S_{it}} X_{ik} P_{ik} - L_t]^2] \quad (1)$$

부하계약조건은 식 (2)과 같다.

$$\sum_i P_{it} - \sum_k X_{ik} P_{ik} \geq L_t \quad (2)$$

1. 서 론

전력산업의 구조개편과 발전시장에의 경쟁이 도입되면서 발전소 운영측면에서의 경제성과 효율성이 강조되고 있다. 또한, 구조개편에 따른 시장경제논리를 반영한 급전방식의 도입으로 각 발전사업자는 자사의 이익 극대화라는 시장논리에 따라 효율적인 발전기 운영방안을 생각하지 않을 수 없게 되었다. 특히, 발전기 유지보수계획은 과거 중앙 집중적인 급전체제에서 계통전체의 안정성과 경제성을 동시에 고려하여 운영되어 왔지만, 발전회사 분리로 인해 개별 사업자의 이익이 우선되는 환경으로 전환되었다. 따라서, 분리된 발전사업자는 자신이 보유한 발전자원의 효율적인 배분을 위한 발전설비의 효율적인 유지보수계획[1~2]과 입찰전략이 더욱 중요한 문제로 대두되었다[3]. 즉, 발전사업자는 전력시장에 자사 보유 발전설비의 공급가능용량을 에너지와 계통운영서비스(Ancillary Service)의 형태로 계약 또는 입찰하게 되는데 이는 발전기 특성상 에너지와 계통운영서비스를 동시에 제공해야 하므로 공급가능용량의 확보를 위한 유지보수계획과 에너지 및 계통운영서비스를 동시에 최적화하기 위한 새로운 개념의 발전계획을 수립하여야 한다. 본 논문은 신설된 발전회사의 관점에서 과거 시장운영 실적을 기초로 보수계획의 최적화 기법으로서 유전알고리즘을 이용하여 년 간 발전기 보수계획을 사전에 수립하고, 생산 비용함수를 토대로 익일의 공급 가능한 용량에 대한 입찰전략을 수립함으로써 발전설비의 최적이용을 통한 기업이익의 극대화 방안을 논하고자 한다.

2. 발전기 유지보수계획

개방적인 전력시장에서의 유지보수계획은 전통적인 수직 통합적인 전력시스템과는 다르게 된다. 유지보수 계획은 더 이상 중앙급전 지시자에 의해서 이루어지지 않게 되고 발전기 소유자에 의해서 이루어지게 된다. 개방적인 전력시장에서, 발전기 소유자는 자신의 발전기의 운영상태 및 에너지 시장에서의 할당량과 다른 경제적인 요소에 의해 유지보수 계획을 세우게 된다. 경쟁시장에

여기서,

- $S_{it}$  : 개체 i 발전기의 보수기간의 시작점의 집합
- $P_{it}$  : 발전기 i의 t기간동안의 발전용량
- $L_{it}$  : t 기간동안 예측된 부하 수요
- $X_{it}$  : t기간 동안 발전기 i의 유지 보수 기간 이 시작이면 1, 그렇지 않으면 0

2.2 보수계획에 대한 유전알고리즘의 적용

보수계획 문제는 조합의 최적화 문제이며, 무한대에 가까운 조합의 개수를 갖는다. 본 연구에서는 보수계획의 문제의 최적화 기법으로서 유전알고리즘을 적용하였다. 최적화 과정에 자연 유전자와 자연선택을 모방한 유전알고리즘은 전역탐색을 통해 최적해를 구할 수 있는 기법이며, 구속조건을 갖는 최적화 문제나 조합의 최적화 문제를 다룰 수 있는 적절한 기법이다. 본 논문에서 제시된 유전알고리즘을 사용한 보수계획의 수행절차는 다음과 같다.

- 단계 1. 자료입력 : 각 발전기의 발전용량, 보수정지 기간, 보수가능기간
- 단계 2. 초기화 및 코드화 : 각 발전기의 보수기간의 시작점을 유전알고리즘의 개체로 표시
- 단계 3. 적합도 계산 : 목적함수를 통해 적합도 계산
- 단계 4. 재생산 : 확률적 기법으로 우수해를 재생산
- 단계 5. 교배 및 돌연변이 : 우수 유전자들을 더 좋은 유전 배열로 만들어 우수해의 속성을 지속
- 단계 6. 수렴조건 : 수행 반복회수가 만족할 때까지 단계 3) ~ 단계 5)까지 반복한다.
- 단계 7. 보수계획 출력 : 최종개체 중 최고의 적합도를 가진 개체를 출력한다.

### 2.2.1 개체

본 논문에서 사용된 유전알고리즘의 개체는 실수로 발생시켰다. 각각의 개체들은 각 발전기의 보수가능 기간 안에서 발생시켰고, 발전기 보수 기간의 시작점으로 나타내었다. 즉,

$$S_i = e_i \leq t \leq l_i - d_i + 1$$

여기서,  $S_i$  : 개체  $i$  발전기의 보수기간의 시작점의 집합  
 $e_i$  : 발전기  $i$ 의 보수가능기간의 시작점  
 $l_i$  : 발전기  $i$ 의 보수가능기간의 끝점  
 $d_i$  : 발전기  $i$ 의 보수기간

단, 한 번 보수가 시작된 발전기는 보수를 중단하지 않고 반드시 보수를 완료해야 한다. 또한, 그 해 시작한 보수는 그 해 52주안에 끝나야 한다.

### 3. 발전사업자의 입찰전략

경쟁적인 전력시장에서 발전사업자의 행동은 자신이 보유한 설비의 효율적인 운영을 위한 유지보수 계획과 입찰을 통해 이윤을 창출하는 것이 중요한 요소가 된다. 이와 같이 상반된 조건을 맞추면서 이윤을 극대화하기 위해서는 보유 설비를 이용해 제품을 생산하는데 소요되는 비용합수와 시장가격에 대비되는 공급용량의 산출과 계약 종류별 공급용량을 결정하여야 한다. 특히, 발전시장단계에서는 고정비를 용량요금(Capacity Payment)의 형태로 보상받지만 도매시장 단계에서는 용량요금을 적용 받지 못함으로써 별도의 고정비 보상이 어려워지게 되므로 가격 입찰 시 변동비에 고정비를 추가한 새로운 형태의 생산 비용합수가 필요하게 된다. 이를 위해 발전기 운영에 필요한 각종 비용 자료를 활용해 각 발전기의 비용합수 산출을 위한 새로운 발전비용 요소를 추가로 결정하게 된다[4]. 본 논문에서는 계통운영서비스에 대한 계약 가격은 전력거래소를 통해 사전에 공표 되고, 계약은 연간단위로 체결되며, 계통운영서비스 용량은 사전에 결정된다는 가정 하에서 자사 설비의 효율적인 운영을 통한 이윤의 극대화 방안을 논하였다.

#### 3.1 설비운영

일반적으로 발전설비는 제작사의 자체 시뮬레이션 등을 통해 설비 정격용량을 결정하고 터빈의 날개 등 일부 부품을 개조하는 수정작업을 통해 정격용량 이상의 최대 출력(MCR : Maximum Continuous Rate)까지 도달할 수 있도록 제작하고 있다. 따라서, 기존의 발전기 운영 패턴 즉, 정격용량  $\pm 5\%$  내에서 주파수조정이 이루어질 수 있도록 출력을 감발 하지 않더라도 일정 출력 수준에서는 발전기나 송전선 고장 등으로 인한 사고에 대비하여 순동 예비력(Spinning Reserve) 또는 대체 예비력(Operating Reserve)으로의 사용이 가능해진다. 따라서, 발전사업자는 계절별, 시간대별 수요패턴이 일정하므로 과거의 수요예측 오차와 시장운영 실적 데이터를 이용하여 계통운영서비스의 양을 결정하게 된다. 또한, 현재의 변동비 반영 발전 시장 운영 규칙에 따르면, 발전사업자가 신고(입찰)한 가능용량 이상을 급전지시에 의해 발전할 경우, 계통한계가격에 의해 비용을 지급 받게 되므로 자사 설비가 공급할 수 있는 총 공급용량 중 하루 전 시장에 공급할 용량, 계통운영서비스로 공급할 용량, 그리고 초과 발전할 용량 등을 결정하는 설비 운영에 대한 전략 수립이 필요하다.

#### 3.2 익일 공급가능용량에 대한 신고(입찰)

계통운영서비스에 대한 비용 지불은 현 변동비 반영 발전 시장 운영 규칙에 명시되어 있지는 않으나 '00년도

전력시장 모의운영 결과를 통해 비추어 볼 때 적절한 비용 보상은 어려울 것으로 보인다. 즉, 기존 발전비용에 대한 보상 이외에 별도의 품질 유지를 위한 서비스 비용을 지불할 경우 판매회사의 자금 압박 요인이 되고 이는 결국 소비자의 부담으로 남게 된다. 따라서, 자사 보유 설비의 익일 공급가능용량을 어떻게 어떤 용도에 맞게 신고(입찰) 하느냐에 따라 회사의 수익과 직결되게 된다. 다시 말해, 익일공급가능 용량의 신고할 최적의 발전용량을 결정함으로써 최대의 이윤을 얻게 되는 것이다. 완전경쟁시장에서 경쟁적인 발전사업자는 식 (3)과 같이 매 시간 발전 한계 비용이 원물시장가격과 동일하거나 그 이하가 되도록 공급가능용량을 신고하는 것이 이윤을 최대로 하게 되므로 가격결정발전계획에서 결정된 계통한계가격에 소유발전기 자체의 비용합수를 대응시켜 계통한계가격(SMP)과 기저한계가격(BLMP)에 맞는 공급용량으로의 변경 입찰전략을 수립하게 된다.

$$\frac{\partial F(q)}{\partial q(t, d)} = p_s(t, d) \leq SMP \quad (3)$$

### 3.3 최적 출력에 의한 추가 기대수입

최적화된 출력  $q^*(t, d)$ 으로 인한 추가 기대 수입(Revenue)은 식 (4)과 같이 표현된다.

$$Rev^*(t, d) = \sum_{k=1}^n p_c(k, t, d) \times q_c(k, t, d) + p_s(t, d) \times [q^*(t, d) - \sum_{k=1}^n q_c(k, t, d)] \quad (4)$$

여기서,

$p_c(k, t, d)$  :  $d$ 일  $t$ 시간의  $k$ 계약에 대한 가격  
 $q_c(k, t, d)$  :  $d$ 일  $t$ 시간의  $k$ 계약에 대한 공급량  
 $p_s(t, d)$  :  $d$ 일  $t$ 시간의 계통한계가격  
 $q^*(t, d)$  :  $d$ 일  $t$ 시간의 발전기의 출력

### 4. 사례 연구

발전사업자의 운영계획 수립에서 주요 관심사는 발전계획이다. 발전계획은 예측된 부하를 가장 경제적인 비용으로 공급하기 위하여 다양한 종류의 발전기를 조합하여 각 발전기별 출력 및 발전시간을 대상기간 동안 가장 적절하게 결정하여 배분하는 것을 말한다. 본 논문에서는 발전사업자가 소유한 발전설비의 최적의 이용을 위해 원자력을 제외한 모든 형태의 발전기에 유지보수 계획을 세우고 비용합수를 적용하여 계절 및 요일별로 총 6가지의 부하형태에 대한 매일의 입찰을 신고하고 공급용량을 변경함으로써 발전회사의 이윤 변동을 검토하였다.

#### 4.1 유지보수 계획 결과

유지보수 계획은 경제성과 효율성이 강조되고 있는 발전소 운영측면에서 발전설비의 효율적 운영과 공급가능용량을 결정하여 경제적인 입찰을 도모하는데 있어 매우 중요하다. 본 논문에서 보수계획 수립에 사용된 자료는 원자력을 제외한 기저 8개와 중간 4개, 첨두 4개의 발전설비를 보유한 발전회사로 최대부하가 4800MW이고 시설용량이 5560MW로 표 1에 나타나 있다. 14대의 발전기는 공급가능용량을 최대로 유지하여 매일의 입찰 전략을 수립하기 위해 유지보수 기간을 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화하였다.

보수계획에 사용된 유전알고리즘의 매개변수는 다음과 같이 설정하였다.

개체수=20                      세대수=600  
 교배확률=0.9                  돌연변이 확률=0.1

또한 제약조건을 취급하기 위해 알고리즘이 부적합한 영

역을 탐색하게 될 때 벌점을 부과하고 이 벌점을 평가함수에 반영하여 최적화하는 고정 벌점전략을 사용하였다.

표 1 발전기 데이터

Unit	Capacity (MW)	Outage (Weeks)	Unit	Capacity (MW)	Outage (Weeks)
1	560	6	8	300	8
2	560	6	9	125	5
3	560	6	10	200	5
4	560	6	11	375	4
5	500	6	12	225	4
6	500	6	13	560	4
7	200	8	14	340	4

표 2는 유전알고리즘을 이용한 유지보수계획의 결과로 발전회사가 소유한 발전설비의 유지보수 기간의 최적의 시작점을 보여주고 있다.

표 2 발전설비의 유지보수 시작점

i	1	2	3	4	5	6	7
t	9	46	14	38	21	42	11
i	8	9	10	11	12	13	14
t	40	5	36	16	28	19	46

여기서 t는 발전기 i의 유지보수 기간의 시작점을 나타낸다. 표 2에서와 같이 수립된 보수계획을 고려하여 일일공급가능용량을 결정하고 매일의 이윤변동을 검토하여 제안한 방법의 유용성을 검증하였다.

#### 4.2 익일공급가능용량에 대한 입찰결과

유지보수 계획결과를 토대로 원자력을 제외한 모든 형태의 발전기에 제안한 계통운영서비스를 포함한 비용합수를 적용하여 익일공급가능용량을 결정하고 매일의 입찰을 신고하고 공급용량을 변경함으로써 발전회사의 이윤변동을 검토하였다. 본 연구에서는 최적화된 유지보수 기간을 산정하고 대상기간 동안 가장 경제적인 비용으로 부하에 전력을 공급하도록 한계가격에 맞추도록 익일 판매량의 배분을 결정하는 것을 최적운전계획으로 정의하였다. 우선, 논문(4)에서 제안한 발전비용합수를 토대로 최적운전계획에 따른 기저발전기를 최대용량으로 고정출력 운전하는 방안과 일정 물량을 계통운영서비스로 공급하고 이윤을 극대화하는 방안에 대해 계절별 및 요일별로 총 6가지의 부하형태에 대해 기존의 가격결정 발전계획과의 비교 검토하였다. 이를 위해 위에서 제시한 기저 발전설비 6기와, 중간 발전설비 4기, 첨두 발전설비 4기를 소유한 발전회사에 입찰전략을 도출하는 과정을 사례로 검증해 보았다.

설비가 공급할 수 있는 총 공급용량 중 하루 전 시장과 계통운영서비스에 대한 발전량의 배분 및 초과 발전량의 결정과 같은 설비 운영에 대해 식 (3)에서 제시된 바와 같이, 매시간 발전 한계 비용이 현물시장가격과 동일하거나 그 이하가 되도록 소유발전기 자체의 비용합수를 대응시켜 계통한계가격과 기저한계가격에 맞추도록 공급용량을 결정하고, 식 (4)에서 최적화된 출력에 따른 기대수입을 계산하였다.

최적화된 출력에 따른 수익의 변화 추이를 고찰하기 위해 기존의 가격결정계획에 따른 경우(case1)와 일정물량을 계통운영서비스로 공급하고 한계가격에 맞추도록 최적화하는 경우(case2), 최적운전계획에 따라 기저 발전기를 고정출력하고 초과발전량을 예비력으로 계약 체결한 경우(case3)에 대해, 수익을 case 1을 기준 하였을 때 부하에 따라 비교하여 정리하였다.

표 3 입찰에 따른 수익

	춘추계		하계		동계	
	평일	주말	평일	주말	평일	주말
CASE1	1	1	1	1	1	1
CASE2	1.10	1.09	1.06	1.07	1.08	1.07
CASE3	1.15	1.14	1.09	1.10	1.11	1.11

춘계부하에서는 경우에 따른 이윤 변동이 큰 차이를 보이고 있다. 이는 낮아진 계통한계가격으로 인해 첨두 발전설비의 입찰가능용량을 줄이고 기저발전설비의 출력을 늘림으로써 이윤을 극대화하도록 입찰하게 된다. 이때, 기저발전설비의 경우 기존의 가격결정계획에 따라 운전할 경우의 비용합수에 비해 최적운전계획에 의한 고정출력으로 운전할 경우 설비 효율 증대로 인한 비용의 절감은 물론 예비력에 의한 부수익으로 인해 이익을 창출할 수 있게 된다. 따라서 최적운전계획에 따라 고정운전하고 나머지 상향운전 가능용량을 예비력 가격으로 보상받는 것이 현재의 수익구조에 비해 향상된 결과를 가져올 수 있다. 최적출력에 따른 수익은 부하가 많은 하계와 동계, 그리고 부하가 적은 춘추계의 순서로 나타나고 있다. 이는 하계의 계통한계 가격이 매우 높은 반면에 춘추계의 계통한계가격은 상대적으로 낮으므로, 하계에는 최대도 입찰하여 수익을 증대시키도록 입찰패턴이 결정되었음을 의미한다. 따라서, 기저한계가격과 계통한계가격에 따라 최대의 이윤을 위해 운전하도록 합리적인 방향으로 최적운전패턴이 변화됨을 알 수 있으며, 또한 기저발전설비의 초과발전을 통하여 이윤을 극대화함으로써 최적운전계획의 타당성을 확인하였다.

#### 5. 결 론

변동비 반영 발전경쟁시장에서의 계통운영서비스를 포함한 모든 요소별 공급가능용량에 대해 발전회사의 이익을 창출할 수 있도록 유지보수 기간을 산정하고, 비용요소에 대한 분석과 수익의 정립을 검토하여 사례연구를 통해 이를 입증하였다. 다가오는 도매시장의 경우, 고정된 변동비가 아닌 발전회사 자신의 가격과 공급가능용량 입찰을 통해 설비의 최적운영 및 이윤 확보가 가능하다. 따라서, 유지보수기간의 최적화를 통한 가용용량의 최대한 확보와 도출된 각 비용요소들을 조합하고 이를 시스템화함으로써 자사 설비의 효율적인 이용은 물론, 계통 제약으로 인해 공급여력이 충분한 지역의 자사설비를 수급균형시장이나 시간전 시장 또는 계통운영서비스나 현물시장 등에 공급할 수 있게 될 것으로 사료된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1]Yaoyu Wang, Edmund Handschin, "Unit Maintenance Scheduling in Open Systems Using Genetic Algorithm", IEEE Transmission and Distribution Conference, Vol. 1, 2000, 334-339
- [2]K.P.Dahal and J.R.McDonald, "Generator Maintenance Scheduling of Electric Power Systems Using Genetic Algorithm with Integer Representation", Genetic Algorithm in Engineering System, 1997, 456-461
- [3]Meadhbh E. Flynn and Michael P. Walsh, "Efficient Use of Generator Resources in Emerging Electricity Markets", IEEE Trans. on power system, Vol. 15, No. 1, February 2000
- [4]고용준, 이효상, 신동준, 김진오, "경쟁시장에서 입찰전략 수립에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 550-552, 2001. 7