

## 경쟁시장의 발전기 보수전략 분석

김진호  
기초전력공학공동연구소박종배  
건국대학교박종근  
서울대학교김발호  
홍익대학교

## Generator Maintenance Strategy Analysis in Competitive Electricity Markets

Jin-Ho Kim  
EESRIJong-Bae Park  
Konkuk UniversityJong-Keun Park  
Seoul National UniversityBalho H. Kim  
Hongik University

**Abstract** - 현재, 전세계의 전력산업은 수직통합적 독점산업에서 부분간 경쟁산업으로 변화하고 민영화를 통한 시장경쟁원리가 도입되고 있다. 이러한 전세기적 전력산업 구조개편에 발맞추고, 전력산업에서의 효율을 제고하기 위하여 우리나라도 전력산업에 시장경쟁 체제를 도입하고 발전산업에 민영화를 추진하고 있다. 2001년 4월, 전력을 거래하기 위한 한국전력거래소가 발족되었으며 6개의 발전자회사의 설립을 통하여 발전부문의 경쟁체제가 도입되었으며, 2003년부터 본격적인 도매경쟁 시장이 도입될 전망이다. 이러한 새로운 시장 환경아래에서 전력거래가 원활하게 이루어지고, 시장이 안정화되기 위해서는 정부, 전력거래소, 발전사업자 등과 같은 시장참여자들이 전력시장을 분석할 수 있는 방법론 및 모델을 확보하고 있어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 전력시장을 분석하기 위한 방법론으로 게임이론을 적용하여 각 발전사업자의 보수전략(Maintenance strategy)을 분석하고자 한다. 이를 통해 각 발전사업자는 보수전략을 수립하는데 이용할 수 있고, 시장규제자의 측면에서는 전력시장이 효율적으로 가동되고 있는 지 여부를 판단할 수 있는 유효한 도구로도 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

## 1. 서 론

과거의 전력계통 운용 및 계획분야는 규제완화와 경쟁도입과 같은 전력산업구조의 변화와 발전기술 발달과 같은 기술적 발전에 힘입어 많은 변화를 겪고 있다. 경쟁시장 환경의 민간발전회사들은 이에 따라 자신이 소유하고 있는 발전기들을 최적으로 계획하여 시장으로부터 최대한의 수입을 얻기 위해 노력하고 있다. 현재까지, 경쟁시장에서 시장참여자의 전략적 행위에 대한 많은 연구가 수행되어왔다. 그렇지만, 대부분의 연구는 현물시장과 같은 단기전력시장의 입찰전략이나 기동정지에 초점이 맞추어져 왔다. 최근에 발전기 보수전략과 같은 중기적 관점의 전력계통 운용 및 계획에 관한 연구가 진행되고 있다 [1-4]. 발전기 보수계획은 전통적으로 주어진 보수기간 내에 몇 가지 제약조건을 고려하면서 각 발전기의 보수시기를 결정하는 문제이며, 대부분의 보수계획의 기간은 1년이다 [5]. 과거 독점시장에서는 각 발전기의 보수시기가 보수와 관련된 비용을 최소화하거나 LOLP나 EENS 지수로 표현되는 시스템의 신뢰도를 최대화하기 위한 목적으로 중앙에 의해, 즉 우리나라의 경우, 한국전력공사에 의해 결정되었다.

발전기 보수계획에 대한 연구는 과거 오랫동안 다양하게 이루어 졌다. 1990년대 초까지, 보수계획에 관련된 계통위험도 평가방법과 비용최소화 보수계획 알고리즘에 관한 연구가 주로 수행되었다 [6-8]. 그 이후, 선형계획법이나 분할기법 등과 같은 수학적 기법을 이용하여 최적의 보수계획 수립 방법론에 관한 연구가 이루어졌으며, 퍼지기법, 유전알고리즘, 타부검색, 시뮬레이션 어닐링 기법 등과 같은 확률적 기법을 이용하여 보수계획을 수립하는 방법론에 대한 연구 결과가 발표되었

다. 최근의 경우, 송전계약, 연료계약 등을 고려한 보수계획 알고리즘이 제안되었다. 그렇지만, 지금까지 수행된 대부분의 보수계획 연구는 각 발전기가 스스로 보수계획을 수립하는 방법론이 아니라 계통 전체의 비용이나 신뢰도 측면에서 발전기들의 보수계획을 수립하는 방법에 관해 수행된 것이 사실이다. 따라서, 전력시장에서 이익을 추구하는 민간발전회사 입장에서 각 발전기의 보수시기를 결정하는 방법에 관한 연구가 부족한 것이 사실이다. 본 논문에서는 전력시장의 규제완화와 이에 따른 경쟁도입으로 발전기 보수계획도 새로운 방법론의 필요성이 대두되었다는 점을 지적하고자 한다. 즉, 시장으로부터 이익을 극대화하기 위해서 모든 민간발전회사들은 단기·중기·장기 시장전략을 가지고서 다른 발전회사들과 경쟁하고 있다. 따라서, 발전회사 입장에서 보면 발전기 보수계획은 시장의 변동적인 가격에 대하여 발전회사의 수익을 최대화할 수 있는 강력한 전략 가운데 하나로 변화하게 되었다.

따라서, 본 논문에서는 경쟁시장에 적용할 수 있는 새로운 보수계획 분석방법론을 제안하고자 한다. 본 논문에서는 동적 게임이론을 이용하여 보수계획 문제를 각 발전회사가 자신의 이익을 최대화하는 보수게임으로 정식화하였으며, 이러한 보수게임을 분석하였다.

## 2. 발전기 보수게임 정식화

## 2.1 발전기 보수게임

발전기 보수게임(UMS Game, Unit Maintenance Scheduling Game)이란 경쟁시장에서 주어진 기간 내에 다른 발전회사의 보수전략 및 자신의 제약조건을 고려하여 각 발전회사가 이익을 최대화 할 수 있는 발전기의 최적 보수시기를 결정하는 문제이다. 발전기의 보수를 결정하게 되면, 해당 기간에는 현물시장에 입찰이 불가능하기 때문에 현물시장으로부터 이익을 얻을 수 없게 되며, 이로 인해 발전회사의 수익은 큰 영향을 받게 된다. 따라서, 발전기 보수게임은 현물에너지시장의 시간대별 (또는 다른 시간 간격의 현물시장) 입찰시장과 매우 깊게 관련되어 있으며, 보수게임과 현물시장은 동적으로 상호 관련되어 있다. 본 논문에서는 발전기 보수게임을 새롭게 제안하고자 하며, 제안된 보수게임에는 현물시장의 에너지입찰게임 (HEA, Hourly Energy Auctions)이 보조게임으로 구현되어 있다. 따라서, 본 논문에서 제안된 발전기 보수게임은 동적게임이며, 보수게임의 전략, 즉 발전기 보수전략은 에너지입찰게임의 수익에 영향을 미치고, 동시에 에너지입찰게임의 입찰전략은 발전기 보수게임의 전략에 영향을 준다. 발전기 보수게임과 에너지입찰게임의 이러한 상호 동적인 연관성에 대한 분석을 통해, 개별 발전회사는 각 발전기의 최적 보수전략, 즉 발전회사의 이익을 최대화하는 보수시기를 결정할 수 있다. 그림 1은 본 논문에서 제안된 발전기 보수게임의 개요를 보여준다.

Main-game

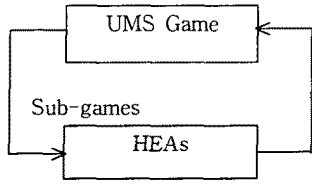


그림 1. UMS 게임의 구조

이러한 발전기 보수게임은 부분적인 동적 게임, 즉 부분적으로 순차적인 게임이라는 것을 알 수 있다. 즉, 본문에서 제안된 동적 발전기 보수게임의 의미는 경기자 사이에 순차적으로 이루어지는 동적게임이 아니라 발전기 보수전략게임과 입찰전략게임이 순차적으로 일어나는 동적게임이라는 것이다. 모든 경기자는 보수게임이나 에너지입찰게임과 같은 특정 게임에서 동시에 보수전략 혹은 입찰전략을 결정하게 되는 반면, 보수게임의 전략이 에너지입찰시장의 전략과 서로 순차적으로 영향을 미치면서 최적점에서 균형을 이루게 된다는 것이다. 본 논문에서 제안한 발전기 보수게임은 비협조 게임 그리고 완비정보게임으로 정식화하였다. 각 경기자는 상대 발전회사의 보수전략 후보에 대해 서로 알고 있지만, 어떤 경우에도 협조나 공모가 허용되지 않는다. 각 발전회사는 자신의 결정이 다른 회사에도 영향을 미친다는 것을 알고 있으며, 이를 반영하여 보수전략을 수립한다는 것 역시 서로 계산에 넣은 채 보수전략을 수립하게 된다.

본 논문에서는 에너지시장을 단순화하기 위해, 에너지시장이 충분히 경쟁적이며 이에 따라 모든 발전회사가 한계비용에 기초하여 입찰한다고 가정하였으며, 이러한 사실은 모든 경기자가 알고 있다고 가정하였다. 그 다음으로, 시간대별 피크부하 데이터가 보수기간에 대하여 주어져 있다고 가정하였으며, 시간대별 시장가격은 주어진 피크부하를 만족하는 한계발전기의 입찰가격, 즉 한계가격으로 결정된다고 하였다.

## 2.2 경기자 (Player)

본 논문에서는 경쟁시장의 민간발전회사를 보수게임의 경기자로 정의하였다. 전력시장에는 N개의 발전회사가 있으며, 각 발전회사는  $N_i$ 개의 발전기를 소유하고 있다고 가정하였다. 기호  $i$ 는 발전회사를  $j$ 는 발전기를 나타내며,  $g_i^j$ 는  $i$ 발전회사의  $j$ 발전기를 의미한다. 내용을 입력하세요. 보수게임의 기간은 T로 정의하였으며, 실제 문제의 경우, 1년(365일)이나 한달(31일)에 해당한다.

## 2.3 전략(Strategy) 및 보수(Payoff)

보수게임의 전략은 두 개의 전략쌍으로 구성되어 있으며, 이 중 하나는 발전기의 보수시작시기를 나타내는 보수전략이고, 다른 하나는 현물에너지시장의 입찰전략이다. 현물시장의 경우, 이미 앞에서 언급한 바와 같이 단순화하였기 때문에, 본 논문의 주된 관심은 발전기의 보수전략에 초점이 맞추어져 있다. 발전기  $g_i^j$ 의 보수전략  $m_i^j$ 는 해당 발전기의 보수시작시기를 나타내며, 이 보수전략은 각 발전기의 연속보수기간과 같은 기술적 특성 및 보수인력과 같은 운용상의 제약조건을 반영하여 발전회사가 결정하게 된다. 다음으로 현물에너지시장의 입찰에 대해서 논의하고자 한다. 발전기의 입찰가격  $p_i^j$ 는 해당 발전기의 한계비용으로 하였으며, 입찰물량은 최소출력에서 최대출력까지로 하였다.

본 논문에서 제안된 보수게임의 보수(Payoff)는 크게 두 가지로 구성되어 있는데, 하나는 현물시장으로부터의 발전이익이며, 다른 하나는 보수와 관련하여 발생되는 비용이다. 현물시장의 발전이익을 계산하기 위해서

는 현물시장의 전력가격 및 각 발전기에 할당되는 발전량을 계산해야 한다. t 시간대의 시장가격  $mcp^t$ 와 각 발전기에 할당된 발전량  $q_{i,j}^t$  및 각 발전기의 보수,  $\Pi_i$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$mcp^t = \max[p_i^j : q_{i,j}^t > 0] \text{ for } i \in N, j \in N_i \quad (1)$$

$$R_i = \sum_{j \in N_i} \sum_{t \in T} [mcp^t \cdot q_{i,j}^t] \quad (2)$$

$$C1_i = \sum_{j \in N_i} \sum_{t \in T} [a_{i,j} \cdot q_{i,j}^{t,2} + b_{i,j} \cdot q_{i,j}^t + c_{i,j}] \quad (3)$$

$$C2_i = \sum_{j \in N_i} [f_{i,j}(m_i^j)] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Pi_i &= R_i - (C1_i + C2_i) \\ &= \sum_{j \in N_i} \sum_{t \in T} [mcp^t \cdot q_{i,j}^t] \\ &\quad - \sum_{j \in N_i} \sum_{t \in T} [a_{i,j} \cdot q_{i,j}^{t,2} + b_{i,j} \cdot q_{i,j}^t + c_{i,j}] \\ &\quad - \sum_{j \in N_i} [f_{i,j}(m_i^j)] \end{aligned} \quad (5)$$

단,  $R_i, C1_i, C2_i$ 는  $i$  발전회사의 현물시장수입, 발전비용, 보수비용을 나타내며,  $a_{i,j}, b_{i,j}, c_{i,j}$ 는 발전기의 발전비용함수 계수이며,  $f(\cdot)$ 은 각 발전기의 보수전략에 관련된 보수비용을 나타낸다.

## 2.4 게임의 해 (Solution)

본 논문에서는 내쉬 균형을 보수게임의 해로 정의하였다. 내쉬 균형 개념은 게임이론 분야에 매우 널리 인정되는 해 개념으로 대부분의 게임이론 적용분야에 이용되고 있다. 대부분의 실제 게임의 경우, 어느 한 경기자에 우월한 전략 및 균형이 존재하지 않기 때문에, 이러한 내쉬 균형은 대부분의 게임이론 분야에 적용되고 있다. [9]. 따라서, 본 논문에서는 이러한 내쉬의 아이디어를 이용하여 보수게임의 각 발전회사의 행위를 분석하였다. 본 논문에서 제안한 보수게임은 부분적으로 동적 게임이므로 백워드 추론방법을 이용하여 균형점을 찾을 수 있다 [10]. 따라서, 현물에너지시장의 시장균형을 우선 찾은 후, 보수게임의 균형점을 찾는 방식을 이용하였다.

## 3. 사례 연구

본 논문에서는 두 개의 발전회사를 대상으로 사례연구를 수행하였다. 표 1에 발전회사 데이터가 수록되어 있으며, 발전회사1은 두 개의 발전기를 발전회사2는 한 개의 발전기를 소유하고 있다. 보수게임의 기간은 4일, 즉 96시간으로 하였으며, 따라서 보수게임 내에는 96개의 현물시장이 운영된다. 본 사례연구에서 가정한 시간대별 부하패턴은 그림 2에 나타나 있다. 백워드 인덕션 기법을 이용하여 [10], 보수게임의 내쉬 균형을 구하였으며, 이를 본 게임의 해라고 정의하였다. 또한, 본 논문에서는 시장운영자에 의해 인정될 수 없는 보수결과를 해집합에서 제외하였다. 즉, 시장참여자는 시장의 신뢰도 및 안정도를 위하여 각 발전기의 보수계획을 세부적으로 조정하기 원하기 때문에, 시장 및 계통의 안정도

표 1. 발전회사 데이터

Genco	Unit	$d_i^j$ [Day]	Max [MW]	Min [MW]	$a_i^j$	$b_i^j$	$c_i^j$
Genco 1	$g_1^1$	1	120	30	0.005	0.1	7.5
Genco 1	$g_1^2$	2	80	20	0.0025	0.5	4.3
Genco 2	$g_2^1$	1	100	20	0.002	0.6	5.2

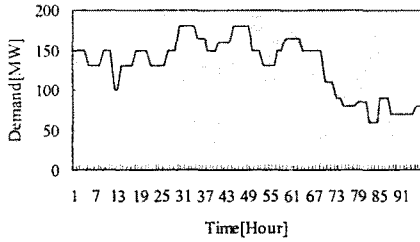


그림 2. 시간대별 부하패턴

관점(논문에서는 예비력 차원에서 고려함)에서 수용하기 어려운 결과는 해에서 제외하였다. 표 1에서,  $d_i$ 는 각 발전기의 보수시작시간을 의미하며, 보수를 시작한 발전기가 반드시 정지하여야 하는 지속시간을 나타낸다. Max와 Min은 각 발전기의 최대출력과 최소출력을 나타내며,  $a_i^1, b_i^1, c_i^1$ 는 각 발전기 생산비용함수의 2차, 1차, 상수계수를 나타낸다.

본 사례연구의 내쉬 균형은 앞에서 언급한 방법에 기초하여 구하였으며, 그 결과 해, 즉 각 발전기의 최적보수시작시기는, 이를  $\{(m^*_1, m^*_2), m^*_3\}$ 으로 정의할 때,  $\{(4, 2), 1\}$ 로 결정되었으며, 그 때의 각 발전회사의 보수(payoff)는 (1816.8, 321.6)로 계산되었다. 즉, 내쉬 균형에서, 발전회사1의 발전기1과 발전기2는 각각 4일과 2일에 보수를 시작하며, 발전회사2의 발전기1은 1일에 보수를 시작한다. 각 발전회사가 선택가능한 해 집합 및 그 때의 각 발전회사의 보수는 표 2에 나타나 있다. 내쉬 해  $\{(4, 2), 1\}$ 가 본 게임의 균형이라는 것은 가령 예를 들어 발전회사들이 보수전략으로  $\{(4, 1), 3\}$ 이나  $\{(1, 2), 4\}$ 를 선택하지는 않는다는 것이다. 왜냐하면  $\{(4, 1), 3\}$ 을 선택하게 되면 그 때의 보수(payoff)는 (1936.8, 232.8)이고  $\{(1, 2), 4\}$ 를 선택하게 되면 발전회사는 (1514.4, 463.2)의 보수를 받게 된다. 따라서, 내쉬 균형에서의 보수와 비교해 보면 발전회사는 더 낮은 보수를 가져다주는  $\{(1, 2), 4\}$ 를 선택할 이유가 없으며, 마찬가지로 발전회사2도  $\{(4, 1), 3\}$ 을 선택할 이유가 없다. 반면,  $\{(4, 2), 1\}$ 에서는 내쉬의 균형 아이디어에 의해, 두 발전회사는 더 이상 다른 해로 움직일 필요를 느끼지 못하게 되고, 이로 인해  $\{(4, 2), 1\}$ 은 본 게임의 해가 된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 경쟁적 전력시장에 적용가능한 발전기 보수게임 및 보수전략 분석방법론을 새롭게 제안하였다. 발전기 보수게임은 완비정보 및 불완전정보게임으로 모델링하였으며 비협조게임으로 정식화하여 분석하였다.

표 2. 가능 해 및 보수(Payoffs)

State (Genco1, Genco2)	Payoffs (\$) (Genco1, Genco2)	State (Genco1, Genco2)	Payoffs (\$) (Genco1, Genco2)
$\{(1,2),4\}$	(1514.4, 463.2)	$\{(4,1),3\}$	(1936.8, 232.8)
$\{(1,3),4\}$	(1670.4, 170.4)	$\{(4,1),4\}$	(1740.0, 259.2)
$\{(1,3),2\}$	(2076.0, 60.0)	$\{(4,3),1\}$	(1603.2, 225.6)
$\{(2,3),1\}$	(1668.0, 259.2)	<b><math>\{(4,2),1\}</math></b>	<b>(1816.8, 321.6)</b>
$\{(2,3),4\}$	(1629.6, 285.6)	$\{(4,2),4\}$	(1749.6, 319.2)
$\{(3,1),4\}$	(1488.0, 446.4)	$\{(4,3),2\}$	(1968.0, 141.6)

이러한 방법을 통해, 각 발전회사의 보수전략의 상호 영향에 의한 균형점을 도출하였으며, 이를 통해 각 발전회사의 최적보수전략을 분석하였다. 본 논문에서 제안된 보수게임의 해는 내쉬 균형으로 정의하였으며, 서브게임 완전 균형점 이론에 기초한 백워드 추론기법에 의해 해를 도출하였다. 2인 게임모델을 사례연구 하였으며, 제안된 방법의 적용가능성을 보였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] R. C. Leou, A Flexible Unit Maintenance Scheduling Considering Uncertainties, IEEE Transactions, On Power Systems, Vol. 16, No. 3, pp 552- 559, August 2001
- [2] M.K.C. Marwali and S.M. Shahidehpour, Long-Term Transmission And Generation Maintenance Scheduling With Network, Fuel And Emission Constraints, IEEE Transactions, On Power Systems, Vol. 14, No. 3, pp 1160- 1165, August 1999
- [3] E.K. Burke and A.J. Smith, Hybrid Evolutionary Techniques For The Maintenance Scheduling Problem, IEEE Transactions, On Power Systems, Vol. 15, No. 1, pp 122- 128, February 2000
- [4] E.L. da Silva, M. Th. Schiling, and M.C. Rafael, Generation Maintenance Scheduling Considering Transmission Constraints, IEEE Transactions, On Power Systems, Vol. 15, No. 2, pp 838- 843, May 2000
- [5] R.L. Sullivan, Power System Planning, McGraw-Hill Book Company, 1997
- [6] G.C. Contais, S.D. Kavatzas, and C.D. Vournas, An Interactive Package For Risk Evaluation And Maintenance Scheduling, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 4, No. 2, pp 389- 395, May 1989
- [7] R. Mukerji and J.H. Parker, Power Plant Maintenance Scheduling: Optimizing Economics and Reliability, IEEE Transactions, On Power Systems, Vol. 6, No. 2, pp 476- 483, May 1991
- [8] L.N. Chen and J. Toyoda, Maintenance Scheduling Based On Two Level Hierarchical Structure To Equalize Incremental Risk, IEEE Transactions, On Power Systems, Vol. 5, No. 4, pp 1510- 1516, November 1990
- [9] H.S. Bierman and L. Fernandez, Game Theory With Economic Applications, Addison-Wesley, 1998
- [10] P.K. Dutta, Strategies And Games: Theory And Practice, The MIT Press, 1999