

비협조 동적게임이론을 이용한 경쟁적 전력시장의 발전기 보수계획 전략 분석

論 文

52A-9-9

An Improved Generation Maintenance Strategy Analysis in Competitive Electricity Markets Using Non-Cooperative Dynamic Game Theory

金 眞 鎬* · 朴 宗 培** · 金 發 鎬***

(Jin-Ho Kim · Jong-Bae Park · Balho H. Kim)

Abstract - In this paper, a novel approach to generator maintenance scheduling strategy in competitive electricity markets based on non-cooperative dynamic game theory is presented. The main contribution of this study can be considered to develop a game-theoretic framework for analyzing strategic behaviors of generating companies (Gencos) from the standpoints of the generator maintenance-scheduling problem (GMP) game. To obtain the equilibrium solution for the GMP game, the GMP problem is formulated as a dynamic non-cooperative game with complete information. In the proposed game, the players correspond to the profit-maximizing individual Gencos, and the payoff of each player is defined as the profits from the energy market. The optimal maintenance schedule is defined by subgame perfect equilibrium of the game. Numerical results for two-Genco system by both proposed method and conventional one are used to demonstrate that 1) the proposed framework can be successfully applied in analyzing the strategic behaviors of each Genco in changed markets and 2) both methods show considerably different results in terms of market stability or system reliability. The result indicates that generator maintenance scheduling strategy is one of the crucial strategic decision-makings whereby Gencos can maximize their profits in a competitive market environment.

Key Words : Competitive markets, Generator maintenance scheduling, Subgame perfect equilibrium, Non-cooperative dynamic game.

1. 서 론

전력산업의 구조개편에 따라, 전력계통의 운용 (operation) 및 계획(planning) 분야에도 시장원리에 입각한 다양한 경영상의 의사결정이 이루어지고 있다. 시장 참여자들은 과거 수직독점체제의 비용최소화 (least cost) 개념에서 탈피하여 경쟁적 시장에서 이익을 최대화 (profit maximization)하기 위한 장단기 경영전략을 수립하게 되었다. 특히, 발전회사의 경우, 현물시장 및 계약시장으로부터의 이익을 최대화하기 위해, 중장기 발전계획은 물론이고, 최적의 발전기 기동정지계획 및 단기 발전계획 수립을 도모하고 있다. 국제적인 연구동향을 살펴보면, 전력산업의 구조개편이 단행된 지난 몇 년 동안, 현물시장 입찰전략과 같은 현물전력시장 분석을 위한 연구가 많은 연구자에 의해 집중적으로 수행되었다 [1-4]. 이러한 연구의 대부분은 단기적 관점에서 현물시장의 의사결정을 분석하고 이를 통해 현물시장의 균형을 해석하는 방향으로 진행되었다 [3-4]. 그러나, 최근 들어 발전기 보수계획과 같은 중기 (mid-term) 전력계통 운용 및 계획 문제에 대한 관심이 증가하게 되었으며, 이에 따라 중기적 관점에서

(mid-term perspective) 전력시장을 분석하는 연구가 수행되고 있다 [5,6,7]. 고전적 개념의 발전기 보수계획 문제는 주어진 기간동안 (maintenance horizon) 여러 제약조건을 만족하면서 각 발전기의 보수정지 시간(maintenance time)을 결정하는 최적화 문제로 볼 수 있다. 이러한 발전기 보수계획 문제의 해를 구하기 위해, 지난 수십년 동안 많은 연구가 수행되었고 다양한 해법이 제안되었다. 1990년대 이전까지는 발전기 보수계획에 대한 신뢰도 평가방안 및 비용최소화 개념의 최적 보수계획수립 알고리즘에 대한 연구가 주로 수행되었다. 그 이후에는 수학적 모델에 기초한 최적의 발전기 보수계획수립 알고리즘이 제시되고 있으며 [8], 최근에는 기존의 연구에서 고려하지 못했던 송전계약이나 연료계약 또는 환경계약 등을 고려한 통합적인 발전기 보수계획 기법이 제안되었다 [6, 9]. 전력산업 구조개편이 이루어지기 전 수직 통합적인 전력산업 구조 하에서 발전기 보수계획에 관한 지금까지의 많은 연구는, 각 발전기의 보수시기가 전력계통의 적절한 신뢰도 유지 또는 전력계통의 비용최소화를 목적함수로 하여 결정되었을 뿐, 발전회사의 수익성 (profitability)을 고려하지 못한 것이 사실이다. 그러나, 발전회사의 분할 및 경쟁으로 과거의 계통비용최소화 개념의 보수계획은 변화하고 있으며, 최근 들어, 경쟁시장 체제에서 이익을 최대화하는 발전회사 입장에서 보수계획을 전략적으로 수립하는 방안에 관한 연구가 시작되고 있으며[7], 이전 논문에서 본 저자도 이러한 경쟁적 시장의 보수계획 게임의 기본 프레임워크를 제안한 바 있다 [12]. 경쟁시장에서의 발전기 보수계획은 각 발

* 正 會 員 : 基礎電力工學共同研究所 先任研究員 · 工博

** 正 會 員 : 建國大學校 電氣工學科 助教授 · 工博

*** 正 會 員 : 弘益大學校 電氣工學科 助教授 · 工博

接受日字 : 2003年 4月 8日

最終完了 : 2003年 8月 12日

전회사가 수익을 극대화하기 위한 중요한 전략적 의사결정 가운데 하나로 간주되기 시작하였는데, 이것은 발전기 보수계획이 과거와 같이 한전 또는 규제기관의 단독 주도하에 적정신뢰도나 비용최소화 관점에서만 전적으로 결정되는 것이 아니라, 발전회사의 의사결정과 규제기관의 조정권한 사이의 상호작용에 의해 결정되게 되는 새로운 상황에 기인한다. 즉, 발전기 보수계획은 전력계통의 신뢰도에는 물론이거니와 미래 전력시장의 시장가격에 커다란 영향을 미치게 되고, 이에 따라 각 발전회사의 증장기 수익에 막대한 영향을 주기 때문에, 각 발전기의 보수시기는 과거와 같이 중앙 규제기관의 단독적인 의사결정에 의해 정해지지 않고, 수익을 최대화하는 발전회사와 계통 및 시장의 안정을 도모하는 규제기관 사이의 적절한 상호작용에 의해 결정되게 된다. 따라서, 경쟁적 전력시장의 보수계획 게임 문제의 기본적인 프레임워크를 제안한 바 있는 본 저자는, 본 논문에서 이러한 연구를 지속 발전시켜 경쟁적 전력시장에 적용 가능한 발전기 보수계획 전략에 대한 고찰을 집중적으로 수행하였다. 이를 통해, 보수계획 게임 정식화와 보수 전략의 정의 및 이에 대한 표현의 엄밀성을 개선하였고, 이에 대한 분석방법론을 발전시켜 제안하였으며, 또한 기존의 독점 시장체제하에서 비용최소화 (least cost) 또는 신뢰도 (reliability) 우선기법에 기초한 보수계획 문제의 해와 비교 및 분석을 수행하였다. 본 논문에서는 경쟁적 시장의 발전기 보수계획 문제(GMP, Generator Maintenance-scheduling Problem)를 비협조 동적게임이론에 근거한 게임의 문제로 모델링 하였는데 제안된 발전기 보수계획 게임은 발전기를 보유한 발전회사를 경기자로 (player) 하였으며, 게임에 필요한 정보는 모든 경기자사 공유하고 있다고 가정하였고 (complete information), 경기자 사이의 공모나 협조가 없는 비협조 게임으로 (non-cooperative) 정의하였으며, 보수기간 (maintenance horizon)내에 발전기의 보수시기를 순차적으로 결정하는 동적게임으로 (dynamic game) 모델링 하였다. 또한, 후행추론 (backward induction)에 의한 보조게임완전균형 (SPE, subgame perfect equilibrium)을 게임의 해로 정의함으로써, 내쉬균형의 균형 밖 경로(out-of-equilibrium path)를 체크하여 비합리적인 내쉬균형을 제거하였다. 마지막으로 2인 경기자 모델 (two-player game model)을 사용하여, 제안된 방법론의 이론적 아이디어 및 적용성을 보이기 위한 사례연구를 (numerical example) 수행하고, 기존 연구결과와의 비교 분석을 수행하였다.

경쟁적 전력시장의 발전회사들은 자사의 수익을 최대화하기 위한 현물시장 입찰전략을 필요로 하며, 이는 발전회사가 민영화되기 이전 상황에도 일반적으로 나타나고 있고, 민영화된 이후에는 발전회사에게 매우 절실한 문제이다 [1, 3]. 현재까지 경쟁적 전력시장에서 이러한 최적입찰전략수립을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 [2, 3, 7]. 예를 들어, 민영화된 발전회사의 수익을 최대화하기 위한 최적 입찰전략수립을 위해 게임이론에 기초한 방법들이 제안되고 있으며 [3, 4], 이러한 입찰전략은 타발전회사의 입찰전략을 고려함은 물론, 자사 및 타사의 입찰전략이 상호 작용하여 영향을 미치는 부분까지 고려하여 현물시장을 분석하고 있다 [5, 6].

그러나, 발전회사의 물량계약이 현물시장의 해 (또는 균형)에 미치는 영향을 분석하여 발전회사의 입찰전략을 해석한 연구는 매우 미미하며, 현재까지 발표된 연구결과도 거의 없

다. 그러나, 발전회사의 물량계약은 전력시장에 엄연하게 존재하는 문제이며, 이러한 물량계약이 현물시장의 균형에 미치는 영향을 분석하여 각 발전회사의 입찰전략을 분석하는 연구는 매우 필요하다고 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 발전회사의 물량계약 측면에서 전력현물시장의 균형을 분석하기 위해 게임이론을 적용한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 각 발전회사가 봉인 입찰 (sealed bid)의 형태로 입찰서를 현물시장에 제출하고 현물시장은 단일가격경매 (uniform price auction)로 운영된다고 가정하였다. 전력현물시장의 경기자 (player)로서 두 발전회사를 고려하였고, 이 가운데 한 발전회사의 최대 발전용량 계약을 고려하였으며, 각 발전회사는 유일한 발전기를 소유한 것으로 가정하였다. 또한, 전력현물시장의 수요는 현물시장가격 (market clearing price)과 선형관계를 가지고 있으며 음의 기울기로 표현된다고 가정하였고, 입찰물량과 해당물량에 대해 시장에 판매하고자 하는 입찰가격의 관계를 나타내는 발전회사의 입찰곡선 역시 선형함수 입찰로 가정하였으며, 그 기울기는 양수로 두었다.

본 논문에서는 개별 발전회사의 최적반응함수 (best response)를 해석적으로 유도하였으며, 또한, 이러한 개별 발전회사의 최적반응함수에 기초하여 현물시장의 내쉬 균형 (Nash equilibrium)도 해석적인 식으로 구하였다. 이를 바탕으로 발전회사의 물량계약 즉, 최대발전용량이 현물시장의 내쉬 균형에 미치는 영향을 해석적인 방법으로 분석하였으며, 마지막으로, 본 논문에서 제안한 분석방법론의 기본적인 개념을 이해하기 위해 단순화된 현물시장에 대한 적용사례를 연구하였다.

2. 발전기 보수계획 게임 (GMP game) 정식화

2.1. 보수계획 게임의 경기자 (Players)

본 논문에서 제안된 발전기 보수계획 게임의 경기자 (player)는 각 발전회사(Genco, Generation company)로 하였다. 본 연구에서는 G개의 발전회사가 시장에 존재하고, 발전회사- i 는 N_i 개의 발전기를 소유하고 있다고 가정하였다. 본 논문에서 사용된 기호 i 와 j 는 각각 발전회사와 발전기를 나타내며, 따라서 기호 $u_{i,j}$ 는 발전회사- i 소속의 발전기- j 를 의미한다. 또한, 본 연구에서 제안된 보수계획 게임의 게임기간 (maintenance scheduling horizon)은 H 라고 가정하였으며, 경기자 즉, 각 발전회사는 주어진 게임기간 동안 전력현물시장으로부터의 수익을 최대화하기 위해 자신이 소유하고 있는 모든 발전기의 보수시기를 결정하게 된다. 단, 경기자들이 최대화하고자 하는 전력현물시장의 수익은 자사의 발전기 및 타사의 발전기의 보수시기에 따른 현물시장가격 및 판매물량에 의해 영향을 받게 될 뿐 아니라, 다음 절에서 다루게 될 현물시장 모델에 의해서도 영향을 받게 된다. 본 논문에서 사용될 기호들을 정리하면 다음과 같다.

G : 발전회사의 수

N_i : 발전회사- i 소유의 발전기

$u_{i,j}$: 발전회사- i 소유의 발전기- j

H : 발전기 보수계획 게임의 게임기간(총 보수기간)

$i(j)$: 발전회사 기호(발전기 기호)

2.2. 보수계획게임의 구조

발전기 보수계획 게임에서 각 경기자 (발전회사)의 수익은 게임기간 동안 지속적으로 개설되는 전력현물 시장 수익의 누적 합(cumulative sum)으로 계산되기 때문에, 앞 절에서 언급한 바와 같이, 발전기 보수계획 게임은 현물시장의 전력 거래 방식인 경매(auction)와 직접적으로 관련되어 있다. 이를 구체적으로 살펴보면, 각 발전회사가 최대화하려는 수익은 전력현물시장의 경매에서 결정되는 시장가격 및 판매물량에 의해 결정되며, 주어진 게임기간 동안 개설된 모든 현물시장 경매에서 발생하는 수익의 합으로 계산된다. 본 논문에서는 현물시장이 경매가 매 시간마다 한 번씩 이루어지는 시간대별 경매(HA, hourly auction)로 운영된다고 가정하였으며, 이에 따라 전력현물시장은 연속적인 시간대별 경매(series of hourly auctions)로 이루어져 있다고 가정하였다.

다음으로 발전기 보수의 시간 단위가 주(week)이고, 어느 한 발전기의 보수시간이 일주 이상 필요한 경우, 특정 시기에 발전기가 보수 중인지 아닌지를 나타내는 발전기 상태는 해당 발전기의 직전 시기의 상태에 의해 영향을 받게 되는데, 이것은 주어진 보수시간 동안 해당 발전기는 연속적으로 보수 상태를 유지하고 있어야 하기 때문이다. 본 논문에서는, 게임 기간 즉, 총 보수시간을 몇 개의 단계(stage)로 나누었으며, 각 단계에서는 전력시장 및 전력계통 상황이 변하지 않는 것으로 보았다. 본 논문에서 사용된 보수계획 문제의 단계는 발전기 의 보수시간 단위 (가령, 일 또는 주)를 나타내며, 본 연구에서는 주(week)를 단계로 정의하였다. 예를 들어, 발전기 보수계획 문제의 총 보수시간 (게임기간)이 10주이고, 발전기의 최소 보수지속시간(minimum maintenance duration) 이 1주라면, 이 보수계획 문제에는 10개의 단계(stage)가 존재하게 된다. 또한, 현물시장을 시간대별 경매시장으로 가정하였기 때문에, 각 단계에는 168개 (즉, 24시간*7일)의 경매가 존재하게 된다. 앞에서 언급한 바와 같이, 본 논문에서는 현물시장이 시간대별 경매(HA)가 연속적으로 개설되어 운영된다고 가정하였으며, 이러한 경매는 단일가격으로 정산되고, 봉인 입찰의 형태(uniform price, sealed-bid)로 운영된다고 가정하였다

그림 1은 본 논문에서 제안한 발전기 보수계획 게임 (GMP game)의 구조를 나타내고 있다. 모든 발전기의 보수 시기가 잠정적으로 결정되면, 각 단계에서 모든 발전기 보수 상태는 결정 나게 되고, 이러한 조건 하에서 개설되는 현물시장의 경매 결과 (즉, 가격과 판매량)에 따라, 각 발전회사의 수익이 결정된다. 따라서, 전체 보수기간 동안 개설되는 모든 경매를 통해 얻게 되는 수익을 더하게 되면, 각 발전회사가 보수계획 게임을 통해 거둬들이는 수익이 결정된다. 이러한 경매는 보수계획 게임기간 동안 매 단계에서 순차적으로 (sequentially) 개설되게 되고, 특정 발전기의 보수상태는 현재와 과거 그리고 미래 단계(stage)에서의 보수상태와 모두 종속적인 관계를 가지고 있으므로, 각 경기자는 이러한 보수 계획 게임의 다단계적 (multi-stage) 동적 특성 (dynamic property)을 고려하여 자신의 수익을 최대화하는 최적의 보수 계획 전략을 수립하게 된다. 그런데, 수익을 최대화 하려는 이러한 경기자들의 노력은 경기자간 상호 영향을 받으며 진행되게 되는데, 이는 경매의 결과가 자신의 보수전략뿐 아니라 다른 경기자의 보수전략에 의해 결정되고 영향을 받기 때문이다. 그림 1에서 보면, 발전기 보수계획 게임이 시간대별 경매를 포함하는 것을 알 수 있으며, 이러한 시간대별 경매가 보수계획 게임의 부속게임 (annexed-game)으로 모델링 되어 있는 것을 알 수 있다.

2.3. 전략 (Strategies)

발전기 보수계획 게임(GMP game)에서 각 발전회사가 결정해야 하는 전략은 크게 두 개의 전략으로 나누어 생각할 수 있는데, 하나는 발전기의 보수시기를 결정하는 보수전략 (maintenance strategy)이고 다른 하나는 현물시장 경매(HA)에 필요한 판매량 및 가격에 관한 입찰전략(bidding strategy)이다. 먼저, 보수전략과 관련하여 발전회사는 각 단계에서 자신의 발전기를 보수할 것인지 아닐 것인지를 결정해야 한다. 여기에서, 기호 T와 F을 각각 특정 발전기가 어떤 단계에서 보수정지 된 상태와 그렇지 않은 상태로 정의하면, 단계-k에서발전기 $u_{i,j}$ 의 보수전략 $m_{i,j}^k$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$m_{i,j}^k \in M = \{T, F\} \tag{1}$$

GMP game

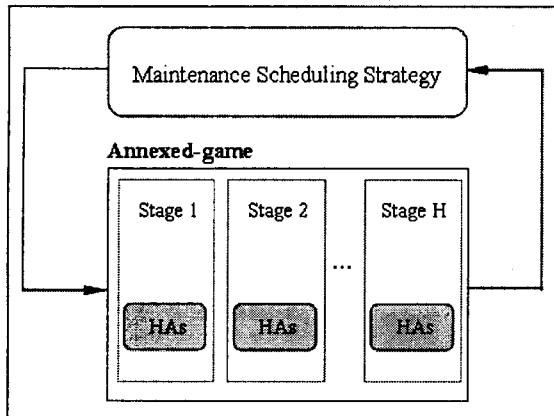


그림 1. GMP 게임 및 부속게임 (Annexed game) HA
Fig 1. GMP game and its annexed HA game

한편으로, 단계-k에서 발전회사-i의 보수전략을 n_i^k 라고 정의하면, \underline{n}_i^k 는 $m_{i,j}^k$ 들의 합으로 구성된 열벡터 (row vector)로 정의할 수 있다. 즉, $\underline{n}_i^k = [m_{i,1}^k, m_{i,2}^k, \dots, m_{i,N}^k]$. 뿐만 아니라 발전회사들은 각 단계에서 개설되는 경매에 참여하여 입찰을 통해 수익을 창출해야 하는데, 단계-k에서 발전기 $u_{i,j}$ 의 입찰 전략을 $o_{i,j}^k$ 라고 하면, 단계-k에서 발전회사-i의 입찰전략 \underline{o}_i^k 는 $\underline{o}_i^k = [o_{i,1}^k, \dots, o_{i,N}^k]$ 로 표현된다. 그러나, 현물시장의 입찰전략이란 해당 시장의 경매 메커니즘에 의해 입찰형식과 입찰방법 등 입찰전략을 이루는 모든 요소가 결정되기 때문에, 학문적 관점에서 일반적인 입찰전략을 고려하는 것은 거의 불가능하다고 할 수 있다. 또한, 본 연구는 현물시장보다는 발전기 보수전략분석에 그 초점을 두고 있기 때문에 현물시장 입찰전략에 대한 상세한 설계 및 분석은 수행하지 않으며, 그 대신 현물시장 단순화를 통해 최대한 일반화된 현물시장 상황을

상정하여 연구를 수행하였다. 단순화된 현물시장의 경매 모델링에 관해서는 다음 절에서 자세히 다루고자 한다. 위의 두 전략들, 즉 보수전략과 입찰전략을 이용하면, 단계-k에서 발전회사-i의 총 전략 s_i^k 는 (m_i^k, a_i^k) 로 정의할 수 있다.

2.4. 보수 (Payoffs)

보수 (payoff)란 게임의 결과로 각 경기자가 얻게 되는 경제적 이득을 말하며, 각 경기자가 어떠한 전략을 선택했느냐에 따라 결정되는 값이다. 본 논문에서는 경기자 (즉, 발전회사)의 보수(payoff)를 전체 게임기간 동안 개설되는 시간대별 경매 (HA)에서 발전회사가 벌어들이는 수익(profit)의 합으로 정의한바 있는데, 이러한 수익은 경매에서 거둬들인 수입(revenue)에서 발전비용(generation cost)과 보수비용(maintenance cost)을 감한 것임을 알 수 있다. 즉, 시각-t에서 개설된 경매의 시장가격을 p' 라고 하고, 이 때, 발전기 $u_{i,j}$ 이 낙찰된 발전량을 $q'_{i,j}$ 라고 하면, 단계-k에서 발전회사-i의 수익 Π_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Pi_i^k(s_i^k) = \sum_{j=1}^M \left\{ \sum_{i=1}^N [p' \cdot q'_{i,j} - f_{i,j}(q'_{i,j})] \right\} - \sum_{j=1}^{N_i} h_{i,j}(m_i^k) \quad (2)$$

단, $f_{i,j}(\cdot)$ 와 $h_{i,j}(\cdot)$ 는 각각 발전기 $u_{i,j}$ 의 발전비용 및 보수비용을 의미한다. 따라서, 발전회사-i의 전 게임기간 동안의 수익 Π_i 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Pi_i = \sum_{k \in K} \Pi_i^k(s_i^k) \quad (3)$$

단, K는 모든 단계를 나타내는 집합을 의미하며, 따라서, $K = \{1, 2, \dots, H\}$ 이다

2.5. 게임의 해 (Solution)

지금까지의 게임이론 분야에서 보조게임완전균형 (SPE, subgame perfect equilibrium)은 비협조 동적게임의 해로 폭넓게 인정되고 있으며, 따라서, 본 논문에서도 발전기 보수계획 게임(GMP game)의 해로서 이러한 보조게임완전균형을 정의하였으며, 이를 통해 보수계획 게임에서 발전회사들의 전략적 의사결정을 분석하였다. 이러한 SPE에 기초한 게임의 해를 s_i^{SPE} 라고 표시하면, $s_i^{SPE} \in [s_1^{SPE}, s_2^{SPE}, \dots, s_G^{SPE}]$ 로 표현할 수 있고, 아래 식에 의해 보조게임 완전균형을 구할 수 있다.

$$\Pi_i(s_i^{SPE}, s_{-i}^{SPE}) \geq \Pi_i(s_i, s_{-i}^{SPE}), \text{ for } i=1, 2, \dots, G, \forall s_i \in S_i \quad (4)$$

단, $s_{-i}^{SPE} = [s_1^{SPE}, s_2^{SPE}, \dots, s_{i-1}^{SPE}, s_{i+1}^{SPE}, \dots, s_G^{SPE}]$ 이고 S_i 는 발전회사-i가 선택 가능한 모든 전략의 집합을 의미한다.

본 논문에서 제안된 보수계획 게임의 동적 특성으로 인해, SP3 개념을 적용할 수 있으며 [10,11], 후행 추론 (backward induction) 방식을 이용하여 이러한 SPE를 찾을 수 있다. 후행 추론 방식을 적용하기 위해서는 보수계획 게임에 대한 광범한 형태 (extensive form)의 표현이 수반되어야 하며, 이것은 본 게임의 게임트리 (game tree)를 구성하여 가능하였다. 보수계획 게임의 해를 찾기 위해서, 각 단계 (stage)에서 발전기들의 보수상태가 결정되면, 이에 기초해 개설된 경매시장

(HA)의 균형점을 일반적인 정적게임이론(static game theory)을 적용하여 찾아내어 경기자별 시장수입을 계산하게 되는데, 이러한 작업을 전 단계에 걸쳐서 수행하게 되면, 게임트리의 최하단에 존재하는 마지막 단계의 노드(terminal node)에서 경기자별 총 보수(payoff)가 얻어지게 된다. 따라서, 각 경기자의 발전기 보수전략(maintenance strategy)에 따라 계산된 이러한 경기자별 보수(payoff)에 기초하여 후행 추론 방식을 적용하면 본 논문에서 제안한 보수계획 게임의 균형을 구할 수 있다.

3. 사례 연구

3.1. 사례연구 테스트시스템 개요

본 논문에서 사용한 테스트 시스템은 두 발전회사 (Two-Genco system)로 이루어진 전력시장이며, 이를 대상으로 제안된 발전기 보수계획 게임의 기본적 아이디어 및 경쟁적 전력시장의 적용 가능성을 검토하였으며, 또한, 수직독점체제하에서 사용되었던 기존의 비용최소화 (least cost) 방법에 기초한 발전기 보수계획 사례연구도 수행하여, 그 결과를 상호 비교 검토하였다. 사례연구에서 수행한 발전기 보수계획 게임의 기간 (H)은 4주, 즉 28일로 하였으며, 따라서, 보수계획 게임 내에는 총 672개 (=28일*24시간)의 시간대별 경매가 개설되었다. 사례연구에서 사용된 두 발전회사를 각각 발전회사-1와 발전회사-2로 정의하였으며, 발전회사-1은 두 개의 발전기를 소유하고 있고 (즉, $N_1=2$), 발전회사-2는 한 개의 발전기를 소유하고 있다고 가정하였다 ($N_2=1$). 또한, 각 발전기의 발전비용함수 $f_{i,j}(\cdot)$ 는 (5)와 같이 이차함수라고 가정하였다

$$f_{i,j}(q'_{i,j}) = a_{i,j} + b_{i,j} \cdot q'_{i,j} + c_{i,j} \cdot (q'_{i,j})^2 \quad (5)$$

단, $a_{i,j}, b_{i,j}, c_{i,j}$ 는 각각 발전기 $u_{i,j}$ 의 이차 발전비용함수 계수.

표 1 사례연구시스템 발전기 개요

Table 1 System parameter

발전회사	발전기	$w_{i,j}$ [days]	최대용량 [MW]	최소용량 [MW]	$a_{i,j}$	$b_{i,j}$	$c_{i,j}$
발전회사-1	$u_{1,1}$	7	120	30	0.005	0.1	7.5
	$u_{1,2}$	14	95	10	0.0025	0.5	0.1
발전회사-2	$u_{2,1}$	7	100	5	0.002	0.6	0.05

표 1은 사례연구에 사용된 테스트 시스템의 발전기 데이터를 보여주고 있으며, $w_{i,j}$ 는 발전기의 보수지속시간 (maintenance duration period)을 나타낸다. 본 사례연구에서는 계산상의 편의를 위해 발전기의 보수비용 (maintenance cost) $h_{i,j}(\cdot)$ 는 고려하지 않았으나, 이 비용의 계산이 반드시 필요한 문제의 경우, 이 비용을 포함하는 것은 그리 어렵지 않을 것으로 본다. 전력시장의 부하데이터는 시간대별로 주

어진다고 가정하였으며, 주별 피크부하 데이터 및 시간대별 부하형태 (profile)는 각각 표 2와 그림 2에 주어져 있다.

표 2. 주별 피크부하 데이터

Table 2. Weekly peak load

Stage [week, 주]	1	2	3	4
피크부하 [MW]	150	180	165	90

본 사례연구에서는, 현물시장의 경매를 단순화하기 위해, 현물시장이 완전한 경쟁시장의 형태로 운영된다고 가정하였으며, 이에 따라, 발전기 $u_{i,j}$ 의 한계발전비용곡선을 $p_{i,j}()$ 라고 할 때, 각 발전회사들은 이 한계비용곡선으로 경매에 참여한다고 가정하였다. 이러한 한계비용은 발전기의 연료형태 등에 의해 결정되는 것으로 일반적으로 시장의 모든 발전회사가 이러한 한계비용에 대해서는 공유하고 있다고 볼 수 있다. 따라서, 이러한 가정에 의해, 현물시장 경매에서 발전회사가 전략적으로 의사 결정할 게이밍적 요소는 없으며, 발전기 보수계획에 의해 결정되는 발전기의 보수상태 (maintenance state)만이 게임의 요소로 남게 된다. 이러한 가정의 배경에는 본 논문의 주된 관심이 현물시장 모델링 보다는 발전기의 보수계획 전략에 있기 때문이며, 현물시장에 대한 상세한 모델링 및 보수계획 게임과의 통합은 후속 연구나 다른 연구자에 의해서 향후 수행될 수 있을 것으로 본다.

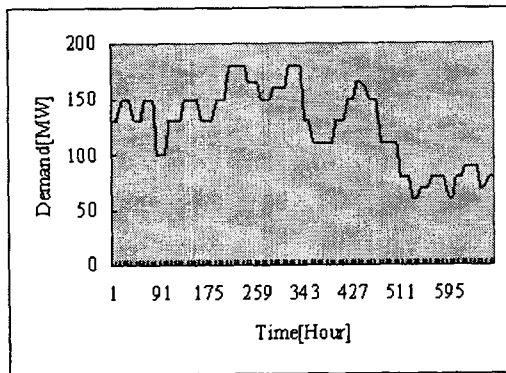


그림 2. 피크부하의 시간대별 프로파일

Fig 2. Hourly profile of peak load

다음으로, 현물시장의 전력가격은 주어진 시간의 피크부하를 만족하는 한계발전기의 입찰비용 즉, 한계발전비용으로 결정된다는 일반적인 단일가격경매(uniform pricing)를 가정하였으며, 이는 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p^t = \max_{i \in G, j \in N_i} \{p_{i,j}(q_{i,j}^t) : q_{i,j}^t > 0\} \quad (6)$$

$$\text{단, } p_{i,j}(q_{i,j}^t) = b_{i,j} + 2\alpha_{i,j}q_{i,j}^t$$

3.2. 사례연구 결과

제안된 발전기 보수계획 게임 (GMP game)에 대한 광범한 형태의 표현 (extensive form)을 통해, 제안된 게임의 게임트리 구성할 수 있으며, 그림 3은 특정 전략에 대해서 발전기 보수계획 게임의 게임트리 (game tree)를 보여주고 있다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 각 의사결정 노드에서 발전회사-1은 네 개의 전략대안 가운데 하나를 선택할 수 있는 반면, 발전회사-2는 두 개의 전략대안 가운데 하나를 선택할 수 있다. 즉, 발전회사-1은 (T, T), (F, T), (T, F), (F, F) 가운데 하나를 선택할 수 있고 (괄호의 첫 번째 항목은 발전기 u1,1의 대안이고, 두 번째 항목은 발전기 u1,2의 선택대안을 의미한다.), 발전회사-2는 T와 F 가운데 하나를 선택할 수 있다. 단, 각 발전기의 보수지속시간 (maintenance duration) 제약으로 인해, 어떤 발전기도 주어진 보수지속시간 이상 보수상태를 유지할 수 없기 때문에, 실제적으로 각 단계에서 발전회사의 의사결정은 동적인 종속성을 갖는다. 예를 들어, 발전회사-1이 각 단계에서 (T,F), (T,T), (F,T), (F,T)이라는 보수전략을 선택하고, 발전회사-2가 F, F, F, T라는 전략을 선택하여, 전체 보수전략이 $m = [[T,F,F],[T,T,F],[F,T,F],[F,T,T]]$ 로 표현된 경우 (첫 번째 박스는 첫 번째 단계의 두 발전회사의 전략을 나타내며, 다음 박스는 다음 단계에서 두 발전회사의 의사결정을 나타내도록 표현하였으며, 어느 한 박스에서 첫 번째와 두 번째 값은 각각 발전기 u1,1과 u1,2의 전략을, 세 번째 값은 발전기 u2,1의 전략을 나타낸다.), 이러한 전략은 실제로 실현 가능하지 않음 (infeasible)을 알 수 있다. 그 이유는, 발전기 u1,1의 보수지속시간은 7일(1주)이고 이 발전기는 첫 번째 단계에서 이미 보수상태에 있기 때문에, 두 번째 단계에서는 보수상태를 유지할 수 없다. 즉, 발전회사-1(발전회사-2)의 전략대안은 항상 4가지(2가지)는 아니며, 이는 각 단계에서 동적으로 결정되게 된다. 이 예에서, 같은 이유로

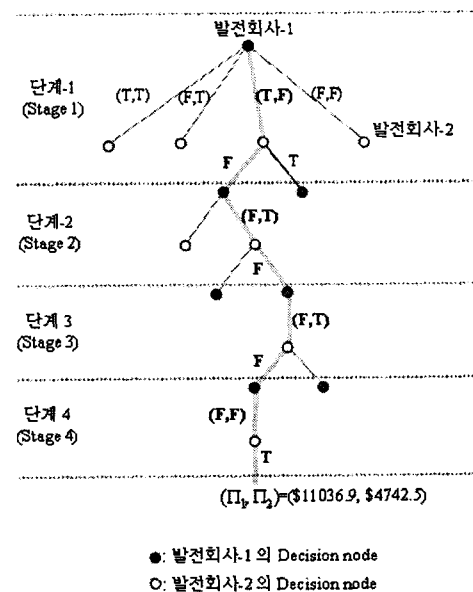


그림 3 발전회사의 단계별 의사결정

Fig 3 Genco's strategy decision made at each stage

표 3. 후행추론 마지막 단계에서 SPE 평가대상 후보

Table 3. SPE evaluation candidates at final stage

발전회사1 \ 발전회사2	$(m_{1,1}^1, m_{1,2}^1)^1$	$(m_{1,1}^1, m_{1,2}^1)^2$	$(m_{1,1}^1, m_{1,2}^1)^3$
$(m_{2,1}^1)^1$	[[T,F,F],[F,F,F],[F,T,F],[F,T,T]]	[[F,T,F],[F,T,F],[F,F,T],[T,F,F]]	[[F,F,F],[F,T,F],[F,T,F],[T,F,T]] [[F,F,F],[F,F,T]] [[F,F,F],[F,F,T],[F,T,F],[T,T,F]]
$(m_{2,1}^1)^2$	Infeasible	Infeasible	[[F,F,T],[F,T,F],[F,T,F],[T,F,F]]

발전기 u1,2의 전략도 실현가능하지 않음을 알 수 있다. 따라서, 이러한 실현 불가능한 전략의 제거 (elimination)는 보수 계획 게임의 보조게임완전균형 해를 구하는 과정에서 동적으로 이루어져야 한다

본 사례연구 결과, 실현 가능한 전략 (feasible strategy profile)은 모두 12개가 존재하는데, 표 3은 이러한 12개의 실현가능 전략 가운데, 후행추론의 마지막 단계(실제 게임의 게임트리에서는 첫 번째 단계)에서 SPE의 평가대상인 5개의 전략후보를 보여주고 있으며, 표 4에는 각 전략후보에 대한 목적함수 평가(payoff evaluation) 값이 계산되어 있고, 표 5는 후행추론 마지막 단계에서 각 발전회사가 선택한 의사결정(action)을 보여 주고 있다. 표 3과 4에서, $(m_{1,1}^1, m_{1,2}^1)^1$ 과 $(m_{2,1}^1)^1$ 는 각각 발전회사-1와 2의 단계-1에서 r-번째 실현 가능한 보수전략후보를 의미한다.

표 4 후행추론 마지막 단계 SPE 평가후보의 보수(Payoff)

Table 4 Payoffs of SPE evaluation candidates at final stage

발전회사1 \ 발전회사2	$(m_{1,1}^1, m_{1,2}^1)^1$	$(m_{1,1}^1, m_{1,2}^1)^2$	$(m_{1,1}^1, m_{1,2}^1)^3$
$(m_{2,1}^1)^1$	(\$12739.3, \$3125.5)	(\$12851.3, \$3818.5)	(\$13073.2, \$3661.7) (\$13077.4, \$3410.4)
$(m_{2,1}^1)^2$	Infeasible	Infeasible	(\$13251.0, \$3691.8)

표 5 후행추론 마지막 단계에서 발전회사의 의사결정

Table 5 Genco's action at final stage

발전회사1 \ 발전회사2	$(m_{1,1}^1, m_{1,2}^1)^1$	$(m_{1,1}^1, m_{1,2}^1)^2$	$(m_{1,1}^1, m_{1,2}^1)^3$
$(m_{2,1}^1)^1$	[T,F,F]	[F,T,F]	[F,F,F]
$(m_{2,1}^1)^2$	Infeasible	Infeasible	[F,F,T]

후행추론 및 SPE 이론을 사용하여 [10,11], 본 사례연구의 SPE는 $m_{1,1}^1$ [[F,F,T],[F,T,F],[F,T,F],[T,F,F]]으로 구하여졌으며, 이때 발전회사-1과 발전회사-2의 보수(payoff)는 각각 \$13251.0과 \$3691.8로 계산되었다. 이러한 결과는, 발전회사-1이 자신의 발전기 u1,1와 u1,2의 보수정지 (maintenance)를 각각 단

계-4와 단계-2에서 시작하기로 결정하고, 동시에 발전회사-2가 발전기 u2,1의 보수를 단계-1에서 시작하기로 결정하게 되면, 이러한 두 발전회사의 전략적 의사결정은 시장에서 균형을 이루게 되고, 각 발전회사는 자신의 이익을 최대화하는 발전기 보수전략을 수립하게 된다는 것을 의미한다.

그림 4는 전력시장의 부하 및 발전기 보수전략 게임 결과 나타난 전력시장의 등가부하를 나타내고 있는데, 이 그림에서 등가부하 (effective demand)는 전력시장 내 모든 발전기의 보수물량을 포함한 등가적 개념의 시스템 부하를 의미한다. 경쟁적 전력시장 환경에서의 발전기 보수계획 문제는 기존의 수직독점체제하의 방법처럼 비용최소화나 적정신뢰도유지만을 목적함수로 할 수는 없기 때문에, 등가부하의 형태가 시스템의 신뢰도 측면에서 기존의 방법과는 다른 모습을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

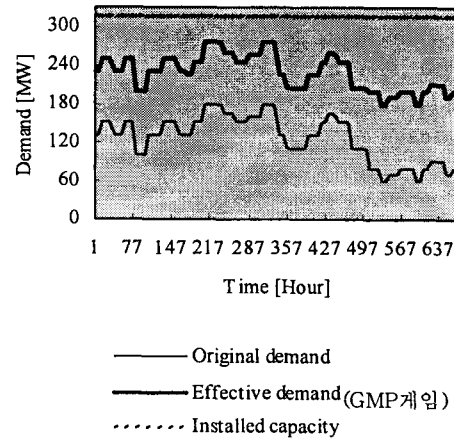


그림 4 발전기 보수계획게임에 의한 등가부하
Fig. 4 Effective demand from GMP game

예를 들어, 계통신뢰도 지수 가운데 하나인 예비력 또는 예비율의 경우를 상정해 보면, 해당 시각의 가용 설비용량과 피크부하의 차이를 나타내는 예비력 (reserve margin)과 피크부하대비 예비력 수준을 의미하는 예비율 (reserve rate)을 시간대별로 관찰해 보면, 시각=325[hour]에서는 피크부하가 180MW이고 발전기 u1,2가 보수 상태이므로 가용 설비용량은 220MW이다. 따라서 이 시각의 예비력은 40MW (220-180)이고 예비율은 약 22% (=40/180)이다. 반면, 시각=637[hour]에서는 피크부하가 90MW이고 발전기 u1,1가 보수 상태이므로 가용 설비용량은 195MW가 된다. 이에 따라, 이 시각의 예비력은 105MW (195-90)이고 예비율은 116% (=105/90)에 달하게 되어, 앞서 살펴본 시각=325[hour]에서의 값과 비교할 때, 예비력은 2.6배 이상 예비율은 5.2배 이상 큰 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 반면, 그림 5에 나타난 기존의 예비율 평활화 (reserve levelization) 기법에 의한 보수계획 결과는 각 시간대의 예비율이 가장 고르게 평활화 되어있음을 알 수 있다. 이러한 결과는, 본 논문에서 여러 차례 제안한 바와 같이, 계통의 신뢰도를 우선적으로 고려하지 않는 경쟁적 시장의 보수계획 결과는 과거의 그것과는 다른 형태를 나타낼 수 있음을 의미한다.

물론, 이러한 결과는 어디까지나 발전회사의 입장만을 반영한 것이며, 반대로 시장운영자나 규제기관에서는 경쟁적 시장 환경이라 하더라도 어느 정도의 신뢰도는 유지하려 할 것이기 때문에, 발전회사와 규제기관 사이의 협상이나 조율 등을 통해 보수계획 게임 결과는 어느 정도 수정되고 조정될 수도 있다. 그러나, 이러한 조정도 각 전력시장이 처한 환경에 따라 다르며, 구체적으로는 전력시장의 장단기 운영규칙 등에 따라 다르게 되므로, 모든 전력시장에 적용 가능한 일반적인 보수계획 전략 및 이에 대한 조정방안은 존재하지 않는다고 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 방법을 실제 전력시장에 적용하기 위해서는 해당시장의 운영규칙에 따라 조정하는 과정이 필요하다. 그러나, 본 논문에서 가정한 내용들은 많은 전력시장들이 어느 정도 공통적으로 나타내는 특징이라고 볼 수 있기 때문에, 경쟁시장의 발전기 보수계획 문제를 일반적으로 분석하는 데 유용하게 이용할 수 있을 것으로 본다. 또한, 실제적인 전력시장에서 구현 가능한 구체적인 보수계획 전략에 관한 연구는 각 시장의 특징들을 고려한 후, 이에 맞는 조정 과정을 거치는 등 향후 지속적으로 연구되어야 할 내용이라고 생각된다.

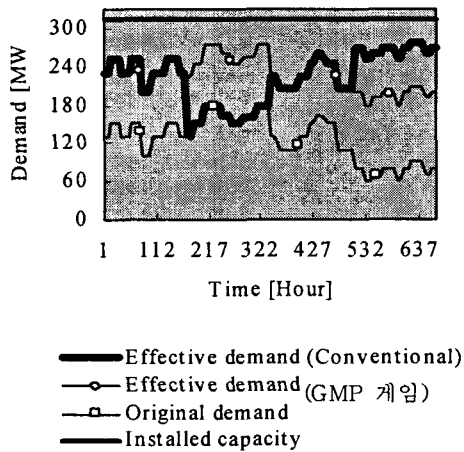


그림 5 발전기 보수계획 결과 비교
Fig. 5 Maintenance results comparison

4. 결 론

본 논문에서는 경쟁적 전력시장에서 발전기의 보수시기를 결정하는 발전기 보수전략 게임 모형의 정식화, 보수전략의 벡터표현화, 현물시장 경매와의 통합을 통한 보수계획 게임의 현실화, 그리고 후행추론 및 보조게임완전균형 이론에 의한 게임의 해를 찾는 개선된 방법을 제안하였다. 제안된 방법에서는 경쟁시장의 핵심 요소 가운데 하나인 발전회사 사이의 상호작용에 의한 의사결정 과정을 명시적으로 표현하였다. 본 논문에서는 발전기 보수계획 게임을 동적 게임이론을 이용하여 비협조 완전정보게임으로 모델링 하였으며, 게임의 해는 후행추론방법에 기초한 보조게임 완전균형으로 정의하였고, 이러한 시장 균형을 통해 각 발전회사는 최적 보수전략을 수립할 수 있다.

사례연구 결과, 제안된 방법에 의한 보수계획이 경쟁시장 환경에서는 매우 합리적인 결과를 도출하나 기존의 신뢰도 위주의 계통운영 측면에서는 바람직하지 못한 결과가 나올 수도 있음을 알 수 있었다. 이러한 문제점은 전력시장에 존재하는 일반적인 현상으로 볼 수 있지만, 시장운영자나 규제기관의 적절한 조정과정과 같은 다양한 메커니즘을 통해 해소될 수 있다. 그러나, 발전기 보수계획 게임의 프레임워크 및 결과에 대한 조정은 각 전력시장이 처한 환경이나 특성에 의존하는 것으로 일반적으로 그 해결책을 논의하기란 매우 어려운 주제이며, 향후 지속적인 연구가 필요한 분야라 할 수 있다. 이러한 이유와 함께, 본 논문의 가정 부분에서 이론적 단순화를 위해 제외된 부분이 현실적으로는 중요한 역할을 할 수도 있기 때문에, 본 논문에서 제안한 방법이 모든 시장에 일반적으로 적용될 수는 없다는 한계점은 존재한다. 그러나, 본 논문의 연구 결과는 일반적으로 많은 전력시장이 공유하는 부분을 전제로 하여 얻어졌기 때문에, 새로운 전력시장 환경에서 발전기 보수계획 문제를 분석하는 유용한 기본 틀을 제공하기에는 충분하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(01-중-05) 주관으로 수행된 과제입니다.

참 고 문 헌

- [1] A. K. David, Competitive bidding in electricity supply, IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, Vol.140, No.5, 1993, pp. 421-42
- [2] J. B. Park, B. H. Kim, J. H. Kim, M. H. Jung. and J. K. Park, A Continuous Strategy Game for Power Transactions Analysis in Competitive Electricity Markets, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 16, No. 4, November 2001, pp. 847-85
- [3] H. Song, C. C. Liu, J. Lawarree, and R. W. Dahlgren, Optimal electricity supply bidding by markov decision process, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 2, May 2000, pp. 618-6.
- [4] R. W. Ferrero, S. M. Shahidepour, and V. C. Ramesh, Transaction analysis in deregulated power systems using game theory, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 3, August 1997, pp. 1340-1347.
- [5] R. C. Leou, A flexible unit maintenance scheduling considering uncertainties, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 16, No. 3, August 2001, pp. 552- 559.
- [6] M.K.C. Marwali and S.M. Shahidepour, Long-term transmission and generation maintenance scheduling with network, fuel and emission constraints, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 3, August 1999, pp. 1160- 1165.

- [7] M. Shahidepour and M. Marwali, Maintenance Scheduling in Restructured Power Systems, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [8] D. Chattopadhyay, A practical maintenance scheduling program: mathematical model and case study, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 4, November 1998, pp. 1475- 148.
- [9] M.K.C. Marwali and S.M. Shahidepour, Integrated generation and transmission maintenance scheduling with network constraints, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998, pp. 1063-1068.
- [10] H.S. Bierman and L. Fernandez, Game theory with economic applications, Addison-Wesley, 1998.
- [11] P.K. Dutta, Strategies and games: theory and practice, The MIT Press, 1999.
- [12] Jin-Ho Kim, Jong-Bae Park, Jong-Keun Park, and Balho H. Kim, "A new approach to maintenance scheduling problems based on game theory," KIEE International Transactions on PE, 12A-2, 73-79(2002)

저 자 소 개



김진호 (金眞鎬)

1995년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 현재 기초전력공학공동연구소 전력경제연구센터 선임연구원.



박종배 (朴宗培)

1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 현재 건국대학교 공대 전기공학과 조교수
전화 : 02-450-3483, 팩스 : 02-3437-9186
Email : jbaepark@konkuk.ac.kr



김발호 (金發鎬)

1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 Univ. of Texas(Austin) 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 홍익대학교 공대 전기공학과 교수
전화 : 02-320-1462
Email : bhkim@hongik.ac.kr