

발전력의 경쟁적 입찰전략과 전략적 보수계획에 대한 결합모형 연구

論 文

55A-9-6

Analysis on a Combined Model of Competitive Bidding and Strategic Maintenance Scheduling of Generating Units

李光浩[†]
(Kwang-Ho Lee)

Abstract - Maintenance scheduling of generating units (MSU) has strategic dimension in an oligopolistic market. Strategic MSU of gencos can affect a market power through capacity withdrawal which is related to bidding strategy in an generation wholesale market. This paper presents a combined framework that models the interrelation between a competitive bidding and strategic MSU. The combined game model is represented as some sub-optimization problems of a market operator (MO) and gencos, that should be solved through bi-level optimization scheme. The gradient method with dual variables is also adopted to calculate a Nash Equilibrium (NE) by an iterative update technique in this paper. Illustrative numerical example shows that NE of a supply function equilibrium is obtained properly by using proposed solution technique. The MSU made by MO is compared with that by each genco and that under perfect competition market.

Key Words : Maintenance Scheduling, Bidding Strategy, Nash Equilibrium, Market Operator, Market Power

1. 서 론

발전기 보수정지 계획(Maintenance Scheduling of Generating Unit: MSU)은 발전기의 성능유지와 안정적인 전력수급 계획에 있어 매우 중요하다. 수직독점 형태인 과거의 전력산업구조에서는 계통의 신뢰도를 유지하면서 보수비용을 최소화하는 정보집중형 MSU를 수립하였다[1,2]. 반면 개방경쟁형에서는 발전회사가 자기 소유 발전기의 MSU를 스스로 수립하기 때문에 수익의 극대화를 우선시하게 되고 이는 시장운영자의 신뢰도 유지라는 목적과 일치하지 않을 수가 있다[3,4].

전력시장 환경에서 일반적으로 보수계획을 수립하는 쪽은 발전회사이고 신뢰성을 고려하여 계획을 결정하는 주체는 시장운영자이다. 더욱이 발전사는 각자 자신의 이득 극대화를 목적으로 하기 때문에 시장참여자 전체가 서로 다른 목적으로 계획을 수립하려는 게임현상이 강하게 나타난다[5,6].

전력시장에서 이와 같은 보수계획시 신뢰성의 불확실 요인을 해결하려는 여러 연구가 시도되었으나 각각이 장단점을 갖고 있어 아직 만족할만한 수준은 아니다. 경쟁형 보수계획 문제를 해결하기 위해서는 경쟁 메커니즘이 반영되도록 게임의 문제로 모형화하는 것이 필요하다. 또한 보수계획은 발전사 수익과 직결되는 전력의 판매, 즉 경쟁적인 급전계획과 연계되어야 하며 참여자들의 이해가 균형을 이루

는 게임의 해를 구할 수가 있어야 한다. 이러한 관점에서 기존연구를 살펴보면 다음과 같다.

시장운영자와 발전사의 목적을 구분하여 보수계획문제를 주문제와 여러개의 부문제들로 분리한 후 Bender 분할기법으로 해를 구하는 방식이 있으나[2] 보수비용과 공급지장용량만을 목적함수로 정의하기 때문에 게임현상이 제대로 반영되었다고 보기 어렵다. 발전사들의 수익 지향적인 보수계획을 시장운영자가 접수하여 신뢰성을 제고하는 방향으로 조정하도록 유도하는 기법이 있으나[3,4] 그러한 유인(incentive)은 시장상황에 따라 효과가 달라지고 결과를 예상하기 어려운 점이 있다.

다단계 동적게임에서 부분게임완전균형이론을 이용하여 보수계획문제의 내쉬균형을 계산하는 시도[5]는 게임이론에는 충실하지만 해를 구하는데 많은 시간이 드는 점과 경쟁적 급전계획이 연계되지 못한 점이 지적되고 있다. 경쟁적 급전모형과 보수계획을 동시에 결정하는 혼합모형 연구결과[6]가 있는데 게임현상을 모형화하는 과정에 오류가 발견된다. 발전사의 이득극대화 문제를 시장운영자의 사회적후생 극대화의 목적함수에 포함시켜 단일한 최적화문제로 처리한 것이다. 이는 게임이 벌어지는 경쟁상황을 심판이 적당히 마무리 짓는 형태라 할 수 있다. 논문[6]에서도 이러한 목적함수 변형에 대해 타당한 근거를 제시하지 못하고 있다.

본 연구에서는 경쟁적 급전계획과 전략적 보수계획이 결합된 게임현상을 모형화하고 내쉬균형을 구하는 계산기법을 소개한다. 전략적 보수계획에 대한 불안 요소를 분석하기 위해서 보수계획 수립의 주체를 발전사에 맡기는 방식(이하 분산계획)과 시장운영자가 맡는 방식(이하 집중계획) 그리고 완전경쟁 구조에서의 보수계획에 대한 비교를 시도한다. 시장운영자가 담당하는 방식에 비해 발전사가 전략적으로 계

[†] 교신저자, 正會員 : 檀國大 電氣工學科 副教授 · 工博

E-mail : khlee@dku.edu

接受日字 : 2006年 6月 13日

最終完了 : 2006年 8月 16日

확하는 경우에 시장지배력이 얼마나 증가하는가를 살펴본다. 문제의 구조상 2단계(bilevel) 최적화 기법이 사용되는데 이에 대한 해법으로 부분문제의 독립적 최적화 계산과 경사도 및 쌍대(dual)변수법을 이용한 반복계산법을 소개한다

2. 입찰전략과 보수계획의 결합 모형

2.1 시장운영자의 목적함수

시장운영자(Market Operator: MO)는 전력도매시장에서의 입찰경쟁을 해소시켜 전력계통의 안전성을 만족하는 범위안에서 전력거래량과 전력도매가격을 결정하는 것이 주된 업무이다[7]. 이 때 MO의 목적함수는 시장거래가치를 의미하는 사회적후생(Social Welfare: SW)을 극대화하는 것이고 제약조건은 선로조류 등의 계통안전성(Security)이다. 발전사업자의 경쟁적 입찰전략을 표현하는 이득극대화 문제와 연계하여 내쉬균형 상태를 찾는 문제에 대해서는 이미 많은 연구가 발표되었다[8-10].

이와 함께 MO는 공급신뢰도(Loss of Load Probability) 등의 공급신뢰도를 최적화시키기 위한 노력을 한다. 기존의 전력산업구조에서는 MSU를 최적화함으로써 공급신뢰도를 향상시킬 수가 있었지만 새로운 전력시장구조에서는 보수계획조차 발전사가 독자적으로 결정할 수가 있다(분산계획). 현재 국내 전력시장은 이에 대한 연구가 미흡하여 MSU의 주체에 대해 결정된 바 없는 실정이다.

MSU에 대한 분산계획과 집중계획에서의 시장결과를 비교하기 위해서는 MO의 입찰시장 운영상의 목적함수를 수정할 필요가 있다. 급전문제에 비해 MSU는 장시간에 걸친 계획이지만 MSU에 따라서 급전의 결과가 영향을 받기 때문에 이의 연관성을 수식화할 수가 있다. 즉, 공급신뢰도가 충분히 만족되는 범위에서 MSU 계획도 SW를 증가시키는 방향으로 수립되도록 MO의 최적화 문제를 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\max J = \sum_{t=1}^T B_t(q_t) - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C_{it}'(q_{it}) \quad (1.a)$$

$$s.t. \quad q_{it} \leq q_{i\max} - z_i s_{it} \quad i = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (1.b)$$

$$\sum_{t=1}^T s_{it} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (1.c)$$

위에서 T는 계획 구간의 수이고 N은 입찰에 참여하는 발전사의 개수이다.

식(1a)에서 목적함수 J는 계획구간 동안의 전체 SW를 극대화하는 것으로서 B는 수요함수에서 계산되는 부하의 효용(Benefit)이고 C'는 각 발전사의 유사 발전비용이다. 유사발전비용이란 전략적으로 제출된 입찰함수에 근거하여 계산되는 발전비용으로서 실제의 발전비용과 구분하기 위한 것이다. 최적화의 변수 q_{it} 와 s_{it} 는 각각 구간 t에서 발전사 i의 발전량과 보수정지율이고 상수 z_i 는 발전사 i의 전체 보수정지량이다. 또한 $q_{i\max}$ 는 발전사 i의 최대발전용량이고, q_t 는 구간 t에서 전체 발전사의 급전발전량의 합을 나타낸다.

식(1b)는 각 구간에서의 발전량 범위를 나타내는데 최대값은 최대용량에서 보수정지량을 제외한 것이다. 발전기 i의

z_i 에 대해서 MSU는 이를 전체 구간에서 어떻게 배분하는가를 결정하고 이때의 배분 비율이 s_{it} 이다. 따라서 $z_i \cdot s_{it}$ 는 구간 t에서 발전기 i의 보수정지량을 나타낸다. 식(1c)는 전체 보수정지율의 합이 1.0임을 나타낸다. 여기서 변수 q_{it} 와 s_{it} 는 연속적인 값을 갖는데 그 이유는 다음과 같다.

일반적인 보수정지 계획문제와 본 연구의 정식화와 다른 점 중의 하나가 보수에 대한 변수의 성질이다. 일반적으로는 이진(binary)변수를 사용하여 특정발전기가 특정 구간에서 보수정지인지 아닌지를 나타낸다. 하지만 본 연구에서는 보수계획을 각 발전기 단위로 수립하는 대신 발전회사별로 수립하는 것을 대상으로 한다. 따라서 각 발전사에서의 보수정지량은 이진값이 아닌 근사적인 연속값으로 나타나게 된다. 이러한 가정을 사용하는 것은 연속변수를 사용하는 급전계획문제와의 결합이 용이하고, 결합된 게임문제로의 정식화 및 내쉬균형의 해법 제시에 적합하며, 사례계통 적용과 내쉬균형의 검증이 수월하고, MSU의 주체에 따른 시장결과와 비교분석까지 수행하기 위해서는 정수계획법의 계산과정을 줄일 필요가 있기 때문이다.

2.2 발전사의 목적함수

발전회사가 전력도매시장에서 발전력 입찰경쟁을 펼치는 메커니즘을 가장 잘 나타내는 분석모형은 공급함수(Supply Function) 모형이라고 알려져 있다[9]. 공급함수모형에서도 전략파라미터에 따라 몇 가지 형태가 있는데 본 연구에서는 공급함수의 절편(intersection)을 전략변수로 정의한다.

발전사가 입찰 전략을 결정하는 근거는 이득의 극대화이고 발전사마다 이득극대화가 대립될 수가 있어서 게임현상이 나타나는데 이는 시장원리에 의해 결정된다. 구체적으로는 MO가 발전사의 입찰의지인 공급함수를 제출받아 2.1절에서 MO의 목적에 맞는 발전기별 발전량과 시장가격을 결정한다. MSU 분산계획에서는 발전사가 입찰시의 전략변수 외에 발전기의 보수정지를 나타내는 변수도 함께 결정해야 한다. 이와 같이 전략변수와 보수정지변수를 동시에 고려해야 하는 이유는 시장가격이 낮은 시점에 발전기 보수를 수행하고 시장가격이 높은 시점에 충분한 발전력을 공급하는 것이 이득 향상에 도움이 되기 때문이다.

발전사 i가 자기 소유의 발전기에 대해 MSU를 결정하는 경우, 발전사의 최적화 문제를 나타내면 다음 식(2)와 같다.

$$\max \pi_i = \sum_{t=1}^T p_{rt} q_{it} - \sum_{t=1}^T C_{it}(q_{it}) \quad (2.a)$$

$$s.t. \quad q_{it} \leq q_{i\max} - z_i s_{it} \quad t = 1, \dots, T \quad (2.b)$$

$$\sum_{t=1}^T s_{it} = 1 \quad (2.c)$$

$$p_{rt} = b_{\alpha} - m_{\alpha} q_t \quad t = 1, \dots, T \quad (2.d)$$

여기서 π_i 는 발전사 i의 전체구간에서의 이득을, p_{rt} 는 구간 t에서의 시장가격을, C_{it} 는 실제의 발전비용을 나타낸다. 시장가격을 나타내는 식(2.d)는 수요함수를 의미하며 b_{α} 는 구간t에서의 일차함수의 절편을, m_{α} 는 기울기를 나타낸다. 이는 시장가격이 단일가격(uniform pricing) 방식으로 결정됨

을 의미한다.

발전사가 입찰시장에 제출하는 공급함수는 공급량을 수평축으로 가격을 수직축으로 하는 일차함수로 표현되며 전략 변수(k)를 포함하여 $p_{it} = k_{it} + m_i q_{it}$ 와 같이 정의된다. 발전사의 이득극대화에서 최적화 변수는 보수정지를 나타내는 s_{it} 와 공급함수에서 절편을 나타내는 k_{it} 인데, k_{it} 는 식(2)에서 직접 나타나지 않고 MO에 제출하여 MO가 결정하는 q_{it} 와 p_{it} 에 영향을 주게 된다.

2.3 게임의 균형

발전회사가 N 개인 경우 입찰시장에서의 급전계획은 MO를 포함하여 N+1개의 독립적인 주체가 서로 다른 목적함수를 최적화하려고 한다. 변수의 결정이 거래량과 시장가격을 통해 상호간에 영향을 주기 때문에 서로의 목적을 달성하려는 이와 같은 게임은 상대성이 매우 강하다. 전략변수를 변화시켜 목적함수가 증가한다면 그 방향으로 전략을 수정할 것이고 서로서로 전략을 변화시키려 하기 때문에 모두에게 최적의 목적을 만족시키는 전략을 찾기는 어렵다. 다만 최적의 전략 대신에 더 이상 전략을 변화시킬 유인이 없을 때 전략의 수정은 나타나지 않는 안정적인 상태에 이르게 된다. 다른 참여자들이 전략을 수정하지 않는 한 스스로 전략을 수정할 유인이 없는 상태를 내쉬균형(NE)이라 한다.

NE란 각각의 목적함수가 동시에 극대가 되는 상태를 의미하는데, 이를 구하기 위해서는 상관관계가 있는 여러 개의 최적화 문제를 병렬로 동시에 풀어야 한다. 전략변수들의 연관성을 고려하면 MO의 작용과 발전사들의 최적화로 양분할 수가 있어서 이를 계산하는데 2단계(bilevel) 최적화 모형이 사용되고 있다[10].

급전계획문제에 보수정지계획문제가 결합되면서 부등식 제약조건이 증가하여 목적함수가 동시에 극대가 되는 상태를 구하는 것이 어려워졌다. 미분을 이용하는 해석적 기법만으로는 계산이 불가능하고 보수행렬기법도 변수의 차원이 크게 증가하기 때문에 적용할 수가 없다.

본 연구에서는 MO의 최적화와 발전사의 최적화 문제를 2단계 모형으로 분리하고, 부분적으로는 최적화조건식과 민감도(sensitivity)를 이용하면서 부등식 제약조건은 쌍대(dual) 변수법[11]으로 처리하여 전체적으로는 경사도(gradient)에 의한 반복수렴 방식으로 내쉬균형을 계산하는 기법을 제안한다.

3. 보수계획의 주체

3.1 완전경쟁에서의 보수계획

발전사들의 경쟁적 입찰전략을 해석할 때는 전력시장의 과점(oligopoly)형태인 것으로 가정한다. 여러 개 발전사들의 경쟁은 독점의 위치에 있지 않지만 동시에 시장에 어느 정도 영향을 줄 수가 있기 때문이다.

전력산업의 구조를 개편하는 궁극적인 목적은 시장의 형태를 과점에서 점차 완전경쟁에 가깝도록 유도하여 시장의 효율성 증대와 전력가격의 인하를 실현하는 데에 있다. 따라서 두 가지 MSU 방식에 대한 시장결과를 완전경쟁과도 비교함으로써 시장에 미치는 영향을 이해할 수가 있다.

완전경쟁에서의 경쟁참여자는 가격수용자(price-taker)가

되므로 전략적인 대응 대신에 실제의 한계비용과 시장가격에 맞는 생산량으로 정해진다. 따라서 발전사의 최적화는 사라지고 MO의 기능만이 존재하여 식(1)과 같은 단일 최적화 문제로 표현된다. 이 때 (1a)에서의 발전비용식이 유사발전비용에서 실제 발전비용으로 대체되어야 한다.

3.2 시장운영자의 보수계획

집중계획의 경우, 발전회사의 전략변수는 입찰파라미터 k_{it} 이고 MO의 최적화 변수는 q_{it} 와 s_{it} 이다. 이와 함께 최적화 부분 문제들 간의 상호관계를 나타내면 다음 그림 1과 같다.

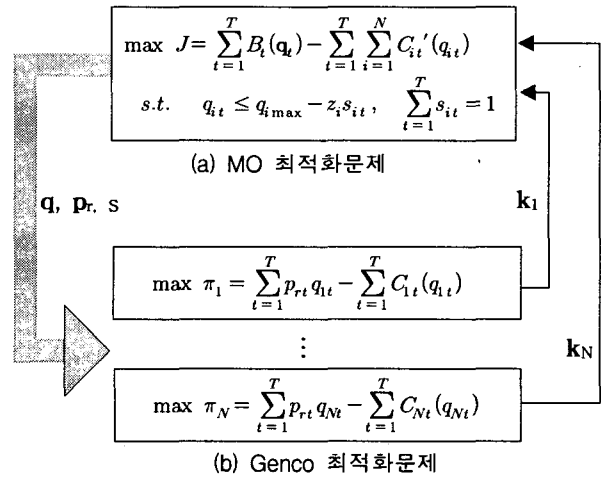


그림 1 집중계획 MSU에서 경쟁급전과의 합성문제
Fig. 1 Combined Problem of Dispatch and MSU by MO

그림1의 (a)는 식(1)과 동일하고 (b)는 각 발전사들이 식(2a)만을 고려하는 경우로서 발전사 i는 전략적 공급함수의 입찰 파라미터인 k_i 를 MO에 제출하고 MO는 최적화를 통해 발전량(q)과 시장가격(p_t)을 결정하여 공개하는 메카니즘을 나타낸다. 발전사들은 보수정지에 대해서는 MO의 계획을 따르면 되고 전략변수를 제출하였을 때 나타나는 시장결과 q_t , p_t 를 예측하여 자신의 이득에 미치는 영향을 분석함으로써 극대조건을 찾아야 한다.

MO의 최적화 문제는 주어진 입찰 파라미터(k)를 바탕으로 다음 식(3)과 같은 라그랑지안으로 정의되는 최적화 프로그램으로 계산한다.

$$\mathcal{L} = \sum_t \{ B_t(q_t) - \sum_i C_i(q_{it}) \} + \sum_i \lambda_i (1 - \sum_t s_{it}) + \sum_t \sum_i \mu_{it} (q_{it} - q_{i\max} + z_i s_{it}) \quad (3)$$

여기서 λ_i 는 보수정지 변수의 배분을 나타내는 등식조건의 라그랑지안 변수, μ 는 보수정지를 고려한 발전력의 부등식 조건에 해당되는 라그랑지안 변수이다.

한편 발전사의 최적화 문제는 전략변수 k_{it} 에 대한 이득 π_i 의 변화율, 즉 경사도 $\partial \pi_i / \partial k_{it}$ 를 유도하여 (부록 참조) 경사도법으로 k_{it} 를 수정하여 반복적으로 해결한다. 수정된 k_{it}' 는 MO의 최적화 문제에 전해지고 최적화 프로그램에 의해 새로운 결과가 계산된다. 이를 이용하여 다시 경사도법

에 의해 발전사의 전략 갱신(update)이 이루어진다. 이 때의 전략변수가 갱신되는 과정을 간단히 나타내면 식(4)와 같다.

$$k_{it}' = k_{it} + \alpha \cdot \partial \pi_i / \partial k_{it} \quad (4.a)$$

$$= k_{it} + \alpha \cdot f(q, \partial q_{jr} / \partial k_{it}) \quad (4.b)$$

여기서 α 는 경사방향으로의 수정율(rate of adjustment) 계수를 의미한다.

발전사 i 의 경사도 $\partial \pi_i / \partial k_{it}$ 식은 MO의 최적화 해에 따라 다르게 유도된다. 즉 식(3)의 해에서 μ 의 값이 영인지 양수인지에 따라 최적조건에서의 발전력 q 와 입찰변수 k 와 선형관계가 달라진다. 식(4.a)에서의 경사도를 유도하면 발전력 q 와 민감도 $\partial q_{jr} / \partial k_{it}$ 의 함수로 나타난다. 발전력 민감도란 MO의 최적조건에서 입찰변수 k 에 따른 발전력의 변화율을 의미하며 구간 t 에서 발전사 i 의 입찰변수 변화가 다른 구간 r 뿐만 아니라 다른 발전사 j 에도 영향을 준다.

3.3 발전사업자의 보수계획

분산계획의 경우, 발전사의 전략변수는 입찰파라미터 k_{it} 와 보수정지를 s_{it} 이고 MO의 최적화 변수는 전력거래량인 q_{it} 이다. 발전사는 MSU와 경쟁적 입찰을 이용하여 이득극대화를 시도하고 MO는 각 발전사가 제시한 보수계획에 맞도록 급전계획을 수립하면 된다. 따라서 MSU를 이용하여 시장지배력이 증가될 것으로 예상할 수가 있다. 정량적으로 어느 정도로 시장지배력이 늘어나는가는 사례연구를 통해 살펴본다.

발전사가 MSU를 수립하는 문제를 최적화 부분 문제들과 상호관계에 대해 나타내면 다음 그림2와 같다.

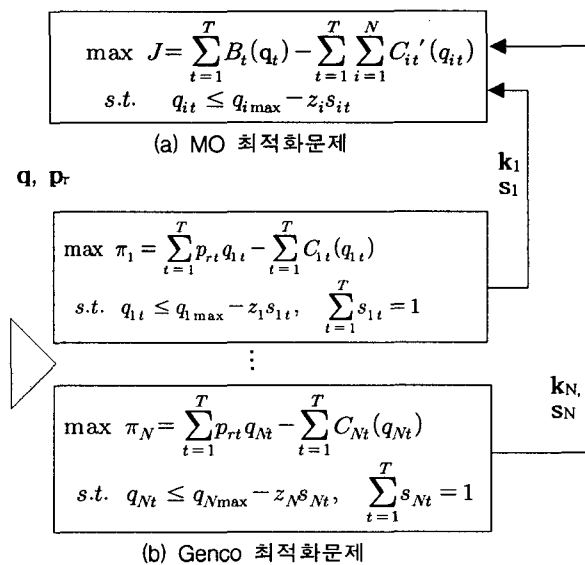


그림 2 분산계획 MSU에서 경쟁급전과의 합성문제
Fig. 2 Combined Problem of Dispatch and MSU by Genco

그림2의 (b)는 식(2)와 동일하고 (a)는 MO의 최적화 식에서 (1.a), (1.b)만을 포함한 것이다. 발전사가 MSU를 수립

함에 따라 식(2.b), (2.c)와 같은 발전력 범위의 제약조건도 발전사 자체적으로 고려해야한다. MO는 MSU를 수립하지는 않지만 그림2에서와 같이 발전사가 수립한 MSU를 바탕으로 급전계획을 세울 때 식(1.b)의 발전력 범위는 반영을 해야 한다.

MO의 최적화는 발전사가 제출한 입찰 파라미터(k)와 보수계획 파라미터(s)의 값을 사용하여 최적화 프로그램에 의해 계산된다. 이 때의 라그랑지안은 다음 식(5)와 같다.

$$\mathcal{L} = \sum_i \{ B_i(q_i) - \sum_i C_i(q_{it}) \} + \sum_i \mu_{it} (q_{it} - q_{imax} + z_i s_{it}) \quad (5)$$

만면 발전사의 최적화는 독립적인 문제로 계산할 수가 없고 MO의 최적조건을 이용하여 최적화 변수를 갱신하는 방식으로 계산한다. 따라서 갱신된 k' 와 s' 을 MO의 최적화 문제에 전달하고 MO에서 계산된 최적조건을 이용하여 다시 k 와 s 를 갱신하는 과정을 반복하여 내쉬균형을 구한다.

발전사의 최적화에 경사도법을 이용하는 면에서는 3.2절에서와 같다. 하지만 3.2절에서는 입찰 파라미터만을 계산한 반면, 집중계획의 경우에는 전략변수는 물론 다음 식(6)에서와 같은 라그랑지안 변수까지도 계산 해야 한다.

$$\mathcal{L}_i = \pi_i + \lambda_i (1 - \sum_i s_{it}) + \sum_i \eta_{it} (q_{it} - q_{imax} + z_i s_{it}) \quad (6)$$

여기서 λ_i 는 식(2.c)의 등식조건에, μ 는 식(2.b)의 부등식 조건에 해당하는 라그랑지안 변수이며 이는 발전사 i 에 해당되는 것이고 다른 발전사도 이러한 문제를 풀어야 한다.

이와 같이 최적화 변수와 라그랑지안 변수를 동시에 계산하기 위해 쌍대변수법을 이용한다. 쌍대변수법이란 최적화 변수인 원시변수와 라그랑지안 변수인 쌍대변수를 번갈아 계산하는 방식으로 원시(primal)문제가 최소화문제일 때 원시변수는 라그랑지안의 최소화를 수행하고 쌍대변수는 반대로 최대화를 수행하면서 두가지 해의 차이를 점차 줄여서 수렴시키는 것이다[11].

따라서 각 변수에 대한 라그랑지안의 경사도 $\partial \mathcal{L}_i / \partial k_{it}$, $\partial \mathcal{L}_i / \partial s_{it}$, $\partial \mathcal{L}_i / \partial \lambda_i$, $\partial \mathcal{L}_i / \partial \eta_{it}$ 이 필요하며 이를 이용한 변수의 갱신은 다음 식(7)과 같이 이루어진다.

$$k_{it}' = k_{it} + \alpha \cdot \partial \mathcal{L}_i / \partial k_{it} \quad (7.a)$$

$$s_{it}' = s_{it} + \alpha \cdot \partial \mathcal{L}_i / \partial s_{it} \quad (7.b)$$

$$\lambda_i' = \lambda_i - \alpha \cdot \partial \mathcal{L}_i / \partial \lambda_i \quad (7.c)$$

$$\eta_{it}' = \eta_{it} - \alpha \cdot \partial \mathcal{L}_i / \partial \eta_{it} \quad (7.d)$$

여기서 라그랑지안의 갱신에 음의 부호가 사용되는 것은 쌍대원리에 의한 것이다.

경사도 전개식 $\partial \mathcal{L}_i / \partial k_{it}$, $\partial \mathcal{L}_i / \partial s_{it}$ 에는 발전량에 대한 민감도 $\partial q_{jr} / \partial k_{it}$, $\partial q_{jr} / \partial s_{it}$ 이 필요한데 이는 MO의 최적조건에 따라 다르게 유도된다. 즉 식(5)에서 라그랑지안 변수 μ_{rk} 가 영일 때와 양수일 때에 따라서 민감도가 다르게 나타난다. 경사도와 쌍대변수법을 이용한 반복계산으로 수렴값을 찾기 위해서는 수정계수 α 또한 적절히 수정해야 한다.

본 연구에서는 경사도의 부호와 변화 패턴을 고려해서 매번 수평계수를 조정하는 방법을 사용하였다.

4. 사례 연구

4.1 적용 대상

적용 대상은 시장운영자와 2개의 발전회사가 참여하는 전력시장에서 8개 구간 동안의 MSU와 입찰시장에서의 급전계획을 수립하는 문제이다. 두 발전사는 많은 발전기를 보유하고 있어 MSU를 연속변수로 정의할 수 있으며 발전비용함수는 하나로 합성되어 한계비용함수가 다음 표1과 같다고 가정한다.

표 1 발전기의 한계비용특성과 최대발전력
Table 1 Generation Characteristics of Marginal Cost and Maximum Capacity

	한계비용함수	계수(b)	계수(m)	최대발전력
G1	$b_1 + m_1 q_1$	20	0.4	120
G2	$b_2 + m_2 q_2$	25	0.3	90, 75, 60

발전기 G2의 최대발전력은 3가지 경우로 변화시키면서 시뮬레이션 결과를 비교하고 보수정지량(z)은 최대발전력과 동일한 것으로 가정한다. 부하 특성은 수요함수로 나타내며 구간 t에서 $p_{rt} = b_{ot} - m_{ot}(q_{1t} + q_{2t})$ 와 같은 1차 함수로 정의한다. 전체 8개 구간에 대한 수요함수의 변동은 다음 표 2와 같다. 수요함수의 기울기와 절편을 보면 구간 3, 4에서 가격탄력성이 감소하면서 절편이 증가하여 전반적으로 수요의 피크상태임을 알 수 있고 반대로 구간 6에서 최소 부하가 나타날 것으로 예상된다.

표 2 구간별 수요함수의 변화
Table 2 Load Pattern by Periodic Demand Functions

구간(t)	1	2	3	4	5	6	7	8
b_{ot}	90	100	115	110	90	80	85	90
m_{ot}	0.4	0.45	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35	0.4

4.2 MSU의 계산 결과

완전경쟁, 집중계획, 분산계획의 경우, 3가지 상황에 대한 MSU 내쉬균형 계산결과를 비교한다. 우선 G2의 최대발전력이 75인 경우에 대한 결과를 나타내면 그림3과 같다. 그림에서 3.a와 3.b는 G1과 G2의 구간별 보수정지 결과를 나타낸 것이고, 급전시장에서의 입찰결과를 3.c와 3.d에, 시장가격의 변화를 3.e에, 전체 발전력을 3.f에, G1과 G2의 발전력을 각각 3.g와 3.h에 나타내었다.

보수정지 계획에 대한 특징을 살펴보면, s_1 은 전 구간에서 0.125(=1/8)로 균일하며 3가지 경우에 동일한 반면, s_2 는 구간별로 다르면서 3가지 경우에도 서로 다르다. 이는 G1의 가용발전력이 크기 때문에 보수정지량(s_1)이 전략적으로 사용되지 못하고, G2에서는 반대로 급전발전력에 비해 가용발전력이 작아 보수정지량 s_2 가 전략적으로 사용됨을 의미한다. 그림3.b에서 구간별 보수계획의 편차가 심한데, 그 중에서 완전경쟁일 때가 가장 크고 분산계획일 때가 가장 작다.

또한 시장운영자가 계획하는 완전경쟁일 때와 집중계획일 때의 변동 패턴이 유사하고 분산계획일 때와는 반대 현상이 나타난다. MO가 계획하는 경우에는 피크부하(구간 3,4)일 때 보수정지량을 줄이는 반면, 분산계획일 때에는 오히려 보수계획을 증가시킬 수 있다. 이러한 현상은 입찰전략과도 밀접한 관련이 있는데 G2는 자신의 입찰 파라미터(k_2)를 가장 낮게 제시하지만 k_1 이 높게 입찰하도록 유도함으로써 그림3.e에서와 같이 피크 때의 가격이 높게 형성되도록 하여 결과적으로 전력판매이익을 증가시키려 한다.

완전경쟁에서는 발전사들이 price-taker 위치에 있기 때문에 그림3.c와 3.d에서 전략적 입찰이 나타나지 않는다. 그림 3.e에서 가격의 수준은 일반적 경향대로 완전경쟁에서 가장 낮으며 과점경쟁인 집중계획과 분산계획에서는 피크 때를 제외하면 비슷하게 나타난다. 한편 그림3.f에서의 총 발전력(q_1+q_2)은 완전경쟁에서 가장 크며 과점경쟁에서는 피크 이외에서 비슷하다. 피크에서는 분산계획일 때 가격이 높으면서 발전력은 집중계획에 비해 감소한다.

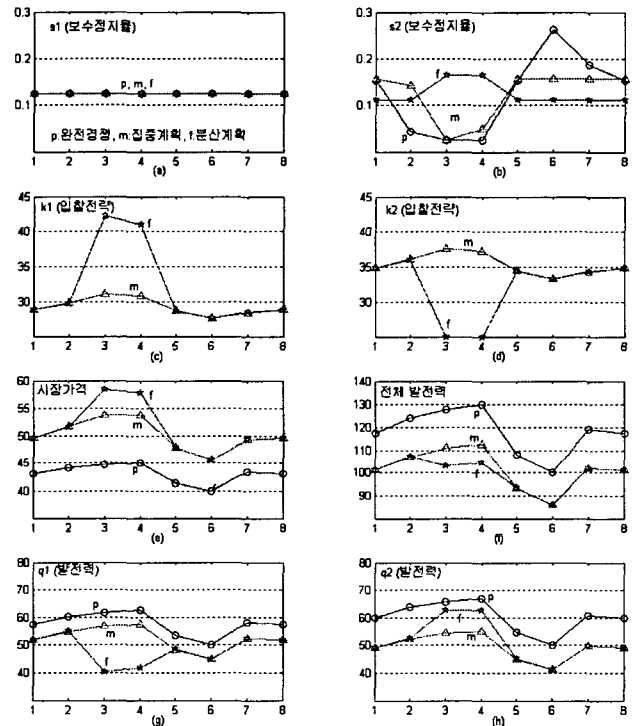


그림 3 과점경쟁에서의 급전 및 보수계획 결과 ($Q_{2max}=75$)
Fig. 3 MSU Results under an Oligopoly Market ($Q_{2max}=75$)

구간별 급전계획인 그림3.g와 3.h에서 완전경쟁일(p) 때는 q_1 과 q_2 의 수준과 패턴이 비슷하고, 과점일 때도 전반적으로 비슷하나 피크부하일 때에 q_2 가 증가하고 q_1 이 감소하는 특징이 나타난다.

4.3 MSU의 비교 분석

내쉬균형 MSU 결과에서 최대발전력(Q_{2max})이 각각 90, 75, 60일 때 발전사의 이익 및 사회적후생을 나타내면 그림 4와 같다. 최대값이 75일 때의 결과는 그림3에서와 같은 것이다. 전반적으로 가용발전력이 감소할수록 발전사(특히

G2)의 이득은 증가하며 그림4.d와 같이 사회적후생은 감소하는데 이는 시장지배력이 증가하는 것으로 볼 수 있다.

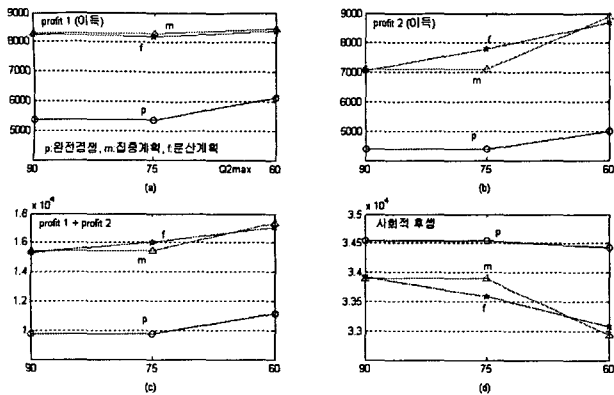


그림 4 과점경쟁 보수계획에서의 이득과 사회적 후생
Fig. 4 Generation Firms' Profits and Social Welfare in a MSU Result

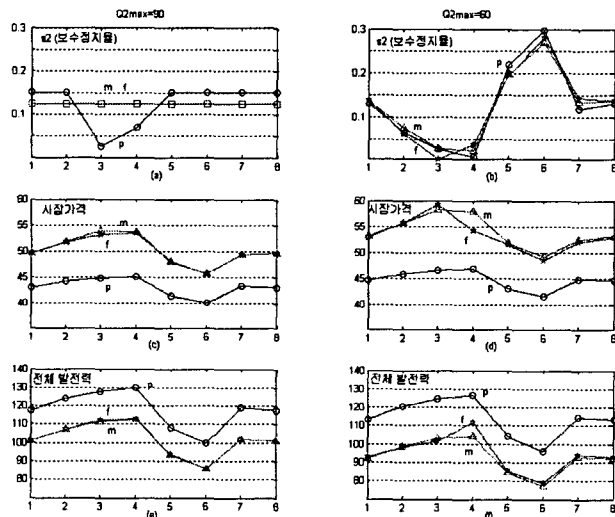


그림 5 최대발전용량에 따른 보수계획 결과(Q2max=90, 60)
Fig. 5 MSU Results under different Capacities(Q2max=90, 60)

발전용량이 크거나(Q2max=90) 작을 때는(Q2max=60) 이득이나 사회적후생에서 집중계획과 분산계획의 결과에 차이가 없으나 중간 범위에서는(Q2max=75) 두 개의 방식에 따라 이득의 배분과 경제효과 면에서 차이가 발생한다. 중간범위에서 G2는 집중계획일 때보다 분산계획에서 더 큰 이득을 얻는데 이는 그림3.b와 같이 피크에서 G2가 용량을 제한하는 전략적 보수계획을 사용하기 때문이다. 또한 중간범위에서 사회적후생은 예상대로 분산계획 때 더 작은 값을 갖지만 Q2max=60 일 때는 반대의 결과를 보인다. 따라서 분산계획 때 일방적으로 과도한 시장지배력의 출현을 우려하는 것에는 어느정도 반례가 될 수는 있다.

한편 발전용량이 클 때와 작을 때의 보수계획(s2)과 시장 결과에 대한 특징을 나타내면 다음 그림5와 같다. 보수계획 s1은 그림3.a와 동일하다. 발전용량이 큰 경우(그림5.a), 과점형태 MSU에서의 s2는 1/8로 일정한 반면 완전경쟁에서 피

크 부하일 때 보수정지를 줄이는 결과가 나타난다. 분산 MSU와 같이 전략적 게임현상 측면이 강할 때에 오히려 보수정지의 편차가 작아짐을 알 수 있다.

반면, 발전용량이 작은 경우(그림5.b), 과점과 완전경쟁 형태에서의 계획이 모두 비슷하게 나타난다. 발전용량이 상당히 작은 경우에는 보수계획에 의한 시장지배력도 크게 작용하지 못함을 알 수 있다.

시장가격 면에서는 그림5.d가 5.c에 비해 5~8% 정도 높으면서 패턴이 비슷한 반면, 발전력 측면에서는 그림5.e가 5.f에 비해 5~8% 정도 낮으면서 패턴은 비슷하다. 따라서 발전용량이 작은 경우에 전력시장은 고가소량의 결과가 나타나서 사회적 후생이 그림4.d와 같이 감소하는 원인이 된다.

4.4 내쉬균형의 검증

이상과 같이 발전용량의 변화에 따라, 완전경쟁과 분산 및 집중계획에 따라 급전과 MSU의 결과를 분석하였으나 이때의 결과가 NE일 때 비로소 의미를 갖게 되는 것이다. 따라서 이에 대한 검증이 필요한데 NE의 정의에 따르면 균형상태에서 각 발전사가 전략을 바꿀 유인이 존재하지 않아야 한다.

발전사가 다루는 전략변수를 살펴보면, 집중계획에서는 8개 구간에서의 입찰전략 8개가 있고 분산계획에서는 8개 구간에서 입찰전략과 보수정지계획이 있으므로 16개가 있는 셈이다. 따라서 한계이득의 2,3차원 입체 그래프로는 이를 나타낼 수가 없다. 본 연구에서는 각 발전사가 선택할 수 있는 전략변수를 임의로 많은 회수를 변화시켜 제시한 이득보다 큰 값이 나오는지 찾는 시행착오법(trial and error)을 사용한다.

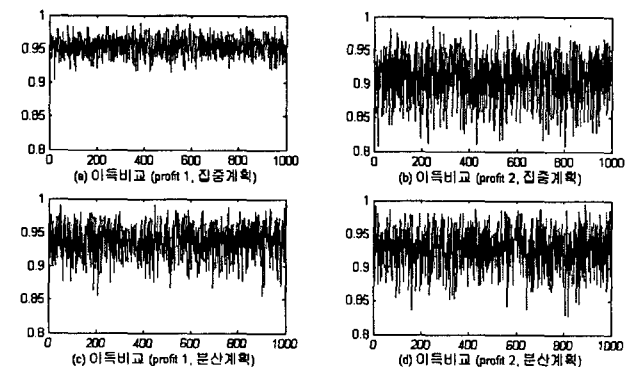


그림 6 임의 전략에서의 이득 비교 (Q2max=75)
Fig. 6 Profit Comparisons between NE strategies and random strategies

집중계획의 NE에서 G1과 G2의 한계이득을 나타내면 그림6과 같다. 그림6.a는 G2의 입찰전략(k2)은 그대로 두고 G1의 입찰전략(k1)만을 1000번 임의로 변화시킨 결과에서 G1의 이득을 NE에서의 이득으로 나눈값이고, 그림6.b는 반대로 G2의 입찰전략만을 변화시켜 얻은 결과이다. 두 그래프에서 계산값이 1.0을 초과하지 않음을 알 수 있는데 이는 입찰전략을 변화시켜도 내쉬균형에서 보다 더 큰 이득을 얻을 수 없음을 의미한다.

분산계획에 대해서도 입찰전략(k)과 보수정지계획(s)를

임의로 변화시켜 G1과 G2의 한계이득을 구하면 각각 그림 6.c, 6.d와 같다. 여기서도 1.0을 초과하지 않으므로 전략을 변화시킬 유인이 없는 것이고 따라서 NE라 볼 수 있다.

5. 검토 및 결론

본 연구는 급전계획과 동시에 발전기 보수정지계획에서 발생하는 게임현상을 하나의 게임문제로 정식화해서 내쉬균형을 구하는 해법을 제시하고 보수계획의 주체에 따른 집중계획과 분산계획 방식을 비교 분석하였다. 해법에 대해서는 2단계최적화 특성을 부분 최적화문제와 쌍대변수법에 의한 반복법으로 해결하였으며 사례연구를 통해 내쉬균형이 구해짐을 보였다.

집중계획과 분산계획의 결과 비교에서는 일반적인 우려에 비해 분산계획 방식에서 일반적으로 과도한 시장지배력이 발생하지 않음을 알 수 있다. 부분적으로는 피크부하에서 보수정지전략을 이용해서 가격을 상승시키는 현상이 있음도 확인하였다. 완전경쟁에 비해서는 과점형태에서 시장지배력이 나타나지만 최대발전용량의 범위에 따라서는 집중계획과 분산계획에서 사회적후생이 동일하게 나타남을 알 수 있다.

이러한 결론은 발전사들의 선택은 항상 이성적이고 합리적이라는 것을 전제로 하며 발전사 간의 담합이 없다는 가정이 있기 때문에 실제 전력시장에 직접 적용하기에는 아직 이른다. 또한 작은 샘플에 대한 해석결과이기 때문에 보다 많은 경쟁자가 참여하는 경우, 보다 큰 문제에 대한 2진 변수로의 변환 등의 지속적 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] X.Wang, J.R. McDonald, Modern Power System Planning, McGraw-Hill Book Company, 1994.
 [2] M.Shahidehpour, M.Marwali, Maintenance Scheduling in Restructured Power Systems, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts. 2000.
 [3] A.J. Conejo, R.G. Bertrand, M.D. Salazar, "Generation Maintenance Scheduling in Restructured Power Systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.20, No.2, pp.984-992, May, 2005.
 [4] 한석만, 김발호 등, "경쟁적 전력시장에서 계통운영자의 발전기 예방정비계획에 관한 연구," 대한전기학회 논문지, 53A권, 8호, pp.477-483, 2004. 8.
 [5] J.H. Kim J.B. Park, J.K. Park, B.H. Kim, "A New Game-Theoretic Framework for Maintenance Strategy Analysis," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.18, No.2, pp.698-706, May, 2003.
 [6] D. Chattopadhyay, "A Game Theoretic Model for Strategic Maintenance and Dispatch Decisions," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.19, No.4, pp.2014-2021, November, 2004.
 [7] M. Shahidehpour, Market Operations in Electric Power Systems, John Wiley and Sons, 2002.
 [8] K.H. LEE, Ross Baldick, "Solving Three-Player Games by the Matrix Approach with Application to

an Electric Power Market," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.18, No.4, pp.1573-1580, November, 2003.
 [9] H. Niu, R. Baldick, G. Zhu, "Supply Function Equilibrium Bidding Strategies with Fixed Forward Contracts," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.20, No.4, pp.1859-1867, November, 2005.
 [10] J.D. Weber, T.J. Overbye, "A Two-level Optimization Problem for Analysis of Market Bidding Strategies," IEEE PES Summer Meeting, Vol.2, pp.682-687, 1999.
 [11] A.J. Wood, B.F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, John Wiley and Sons, 1996.

부 록

본문의 3.2절에서 발전사의 전략변수에 대한 이득의 변화율인 $\partial \pi_i / \partial k_{it}$ 의 유도과정을 보이기 위해 2인 게임에 대한 사례를 나타낸다. 발전사1의 변화율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \partial \pi_1 / \partial k_1 &= \partial \{ (b_o - m_o(q_1 + q_2))q_1 - b_1q_1 - 0.5m_1q_1^2 \\ &= \{ b_o - b_1 - (2m_o + m_1)q_1 - m_oq_2 \} \partial q_1 / \partial k_1 \\ &\quad - m_oq_1 \partial q_2 / \partial k_1 \end{aligned} \tag{A.1}$$

여기서 $\partial q_j / \partial k_i$ 는 발전력 민감도로서 MO의 최적조건에서 입찰변수 k에 따른 발전력의 변화율을 의미하며 다음의 식에서 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} m_o + m_1 & m_o \\ m_o & m_o + m_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_o - k_1 - \mu_1 \\ b_o - k_2 - \mu_2 \end{pmatrix} \tag{A.2}$$

저 자 소 개



이 광 호 (李 光 浩)

1965년 12월 22일생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년 전력연구원 위촉 연구원. 2001년 미국 Univ. of Texas (Austin) 방문교수. 1996~현재 단국대 공대 전기공학과 부교수.
 Tel : 02-709-2868
 E-mail : khlee@dgu.edu