

## Analysis on Unit-Commitment Game in Oligopoly Structure of the Electricity Market

李 光 浩\*  
(Kwang-Ho Lee)

**Abstract**-The electric marketplace is in the midst of major changes designed to promote competition. No longer vertically integrated with guaranteed customers and suppliers, electric generators and distributors will have to compete to sell and buy electricity. Unit commitment (UC) in such a competitive environment is not the same as the traditional one anymore. The objective of UC is not to minimize production cost as before but to find the solution that produces a maximum profit for a generation firm. This paper presents a bi-level formulation that decomposes the UC game into a generation-decision game (first level game) and a state(on/off)-decision game (second level game). Derivation that the first-level game has a pure Cournot Nash equilibrium(NE) helps to solve the second-level game. In case of having a mixed NE in the second-level game, this paper chooses a pure strategy having maximum probability in the mixed strategy in order to obviate the probabilistic on/off state which may be infeasible. Simulation results shows that proposed method gives the adequate UC solutions corresponding to a NE.

**Key Words** : Unit Commitment, Dynamic Programming, Game Theory, Nash Equilibrium, Mixed Strategy

### 1. 서 론

국내외의 전력산업은 현재 송전망이 개방되고 전력거래에 경쟁이 도입되는 구조적인 변화가 진행되고 있다. 따라서 발전량과 전력거래가격이 전력시장에서 결정되며 발전기업은 이득을 극대화하기 위한 경쟁적인 전략을 사용하게 된다 [1]. 전력거래 참여자들의 경쟁적인 전략을 분석하기 위해서 기존의 중앙집중형 최적화기법 대신에 게임이론에 근거한 균형점 해석 기법이 다양하게 연구되고 있다[2-5].

전력시장 구조 변화에 따라 해결해야 할 여러 가지 문제가 있지만 본 연구에서는 경쟁적 전력시장에서의 발전기 기동정지(unit-commitment: UC) 문제에 대한 모형화와 해법에 대해 게임이론적 해석을 제시한다. 기존의 UC 문제는 주어진 발전자원에 대해 배분을 최적화하는 것으로서 모든 데이터가 집중된 중앙에서 계통의 제약조건이 만족되고 발전비용이 최소가 되는 기동상태와 발전력을 결정하는 것이다 [2]. 하지만 경쟁적 전력시장에서의 UC는 각 발전기업 스스로의 전략에 의해 결정되기 때문에 기존의 모형화와 해법에 수정이 가해져야 한다[5].

경쟁적인 UC 문제를 해결하기 위해서 게임이론이 도입된 연구결과[2,5]가 이미 발표된 바 있으나 이는 시장가격의 해석에 있어 약점을 갖는다. 시간대별 시장가격을 예측한 후에 이를 바탕으로 참여자들이 이득 극대화를 위한 기동상태와 발전력을 결정하는 구조로서 가격기반-UC (price-based UC: PBUC)라고 일컬어진다. 하지만 과점(oligopoly)구조의

전력시장에서 시장가격이란 전력수요 특성과 공급발전량에 따라 결정되기 때문에 시장가격을 UC 문제에 앞서서 독립적으로 예측하거나 결정하는 것은 무리이다[6]. 본 연구는 이러한 점을 보완하기 위해 공급량에 따라서 시장가격이 변동하는 Cournot 모형을 사용하여 UC문제를 해석한다.

과점구조의 UC문제에서는 전력거래에 참여하는 발전기업이 자신이 보유한 발전기에 대해서만 UC를 계획하게 되고 이것이 다른 기업의 계획과 경쟁이 되어 게임의 문제로 나타난다. 이러한 게임은 크게 두 단계로 구분된다. 각 시점에서 기동상태에 따른 발전력을 결정하는 문제가 첫 번째이고 이전시점에서의 기동상태를 결정하는 문제가 두 번째이다. 본 연구에서는 이를 각각 1차게임과 2차게임 혹은 발전력결정 게임과 기동상태결정 게임으로 정의한다.

송전선 제약은 제외하고 발전기의 발전력 최소/최대 조건만을 고려할 때 발전력결정 게임의 균형전략이 항상 단순(pure)전략으로 나타남을 유도함으로써 전체 문제의 해석이 용이해진다. 이와는 달리 기동비용이 포함되는 기동상태결정 게임에서는 내쉬균형이 복합(mixed)전략으로 나타날 수가 있는데 그러면 기동상태가 확률적으로 선택되어 기동/정지의 최소시간 조건을 적용하기가 어려워진다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 복합전략 중에서 최대 확률값의 전략만을 선택하는 방법을 제안하고 사례계통에 적용하여 계산된 결과가 UC문제의 내쉬균형 전략임을 확인한다.

### 2. 수직 통합형 발전기 기동정지

#### 2.1 문제의 표현

전력산업이 수직통합 형태일 때에는 공급경쟁이 없기 때

\* 正 會 員 : 檀國大 電氣電子컴퓨터工學部 副教授·工博  
接受日字 : 2003年 4月 29日  
最終完了 : 2003年 10月 5日

문에 발전량과 운전/정지 상태가 전력가격에 직접 영향을 주지 않고 발전비용에만 영향을 준다. 따라서 발전기업에게는 발전비용을 줄이는 발전기 운전/정지 상태와 발전량을 결정하는 것이 중요한 과제이다[7]. 이러한 문제가 전통적 개념의 UC 문제이며 다음과 같이 표현된다.

$$\min F = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [f_i(q_{it}) + S_i(1 - x_{i(t-1)})]x_{it} \quad (1)$$

여기서 첨자  $i$ 는 발전기  $i$ 를 첨자  $t$ 는 시간대를 의미하며,  $q$ 는 발전력,  $f$ 는 연료비 함수,  $S$ 는 기동비용,  $x$ 는 운전/정지 상태(운전시  $x=1$ , 정지시  $x=0$ )이다. 제약조건으로는 수급조건, 발전력 범위, 운전/정지 최소시간 등이 포함된다.

### 2.2 기동정지 문제의 해법

전력거래 문제는 보편적으로 수요와 비용특성에 대해 공급자의 전략을 구하는 일회(one-shot) 게임으로 해석되고 있다. 하지만 UC와 같은 단기 발전력계획 문제에서는 각 시점에서의 발전력 결정이 과거의 결정에 영향을 받고 또한 미래의 결정에 영향을 주게 된다. 이는 발전기의 기동과 정지에 따른 비용과 운전시의 제약조건이 반영되기 때문이다. 따라서 상태 변화의 특성이 고려되는 동적계획법(Dynamic Programming)이 주로 사용되고 있으며[8] 최근에는 대규모 시스템 해석을 위해 Lagrange 미정계수법[3], 유전알고리즘, 진화프로그래밍 등이 사용되고 있다.

본 연구에서는 UC 문제를 게임의 형태로 해석하고 균형점을 구하는 것이 주요 내용이므로 계산법은 가장 보편적인 동적계획법의 전방향 해법을 근간으로 한다. 동적계획법은 다음과 같은 회귀함수(recursive function)의 해를 계산하는 것이다[7,8].

$$F_c(t, k) = \min_{L} [P_c(t, k) + T_c(t-1, L; t, k) + F_c(t-1, L)] \quad (2)$$

여기서  $k$ 는  $N$ 개 발전기의 운전/정지 조합인  $2N$ 개 중에서  $k$ 번째 조합을 의미하고,  $F_c(t, k)$ 는  $t=0$ 부터  $t$ 시간대에  $k$ 번째 조합의 발전을 할 때까지의 최소비용이다. 집합  $\{L\}$ 은 발전이 가능한 발전조합들을 의미하고  $P_c(t, k)$ 는  $k$  조합으로 발전할 때의 경제급전 결과인 최적발전비용이다.  $T_c(t-1, L; t, k)$ 는  $t-1$ 의 조합  $L$ 의 운전상태에서  $t$ 시간의  $k$  조합으로 운전할 때의 기동비용이다.

고전적 UC 문제는 운전가능 범위에서 발전비용과 기동비용이 최소가 되는 기동/정지 및 발전력 배분을 전체 발전기에 대해 종합적으로 결정하는 것이다. 하지만 개방형 전력시장의 불완전 경쟁 형태에서는 경쟁을 하는 각 발전회사가 이윤극대화를 목적으로 독자적 결정을 하기 때문에 식(2)와 같은 문제는 각 발전회사의 개별적 전략문제가 된다. 따라서  $P_c(t, k)$ 가 결정되는 원리와 식(2)의 회귀함수식이 계산되는 원리가 발전기업간의 게임의 형태를 띠게 된다. 본 연구에서는 이를 2단계 게임으로 구분하여 균형점을 해석한다.

## 3. 과점구조에서의 기동정지 게임

### 3.1 가격기반 기동정지(PBUC) 문제

개방형 전력시장에서는 발전회사가 시장수요와 상호 연관

성을 고려하여 균형점에 해당하는 발전력을 경쟁적으로 결정하게 된다. 구체적으로 발전기업은 이득을 극대화하는 다음과 같은 발전계획 전략을 선택할 것이다[2,5].

$$\max \pi = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [p_i \cdot q_{it} - f_i(q_{it}) - S_i(1 - x_{i(t-1)})]x_{it} \quad (3)$$

여기서  $p_i$ 는 전력의 시장가격으로서 첫 번째 항은 발전기업의 수입(revenue)이고 나머지 항은 비용이므로 식(3)은 총수입에서 총비용을 뺀 기업의 이득 극대화 문제가 된다. 제약조건은 식(1)에서와 같다.

PBUC에서의 전력거래 시장가격은 예측기법을 사용하여 공급량과 무관하게 결정된다. 따라서 발전전략의 선택이 가격에 미치는 영향은 반영되지 못하므로 발전회사는 가격수용자(price-taker)가[6] 되며 이러한 면에서 보면 완전경쟁의 특징과 유사하다.

하지만 전력시장은 몇 개의 회사가 경쟁하는 과점 구조로 해석하는 것이 일반적이다[9]. 시장가격을 예측하는데 여러 기법이 사용되지만 거래량에 해당하는 거래전략과 가격간의 상관관계를 반영하지 않으면 실질적인 시장해석이라 하기 어렵다. 과점형태에서는 기업의 전략에 따른 시장가격의 변동을 고려함으로써 전력시장에서의 경쟁적 전력거래를 보다 정확하게 해석할 수가 있다.

어떤 형태의 산업구조이든 가격이 형성되는 메커니즘을 정확하게 모형화하는 것이 가장 중요하고 힘든 일이며[4] 거래량의 결정은 가격이 결정되면 보다 간단하게 계산된다. 따라서 경쟁형 전력시장에서의 UC 문제의 모형으로 연구되고 있는[2,5] PBUC 문제는 가격이 경쟁에 의해 결정되는 경쟁형 UC 문제로 대체되어야 할 것이다.

### 3.2 과점구조에서의 균형점 해석

과점구조의 중요한 특징은 공급회사의 전략에 의해 시장가격이 변동하는 특성이 반영된다는 것이다. 식(3)에서와 같이 각 발전회사가 극대화 하려는 판매의 이득이 시장가격으로 표현되고 시장가격은 다시 각 회사의 판매전략의 함수로 나타난다. 과점구조에서의 이러한 거래 메커니즘을 분석하는 대표적 모형 중에서 본 연구에서는 완비정보(complete information)의 Cournot 모형으로 균형점을 해석한다.

Cournot 모형에서 기업  $i$ 의 전략은 이득( $\pi_i$ )을 극대화하는 거래량  $q_i$ 를 결정하는 것이며 내쉬균형 조건은 다음 식(4)를 만족한다[10].

$$\partial \pi_i(q_i, q_{N-i}) / \partial q_i = 0, \quad i = 1 \dots N \quad (4)$$

식(4)를 계산하기 위해서는 이득함수가 미분가능이어야 하는데 실제로 거래량  $q_i$ 는 발전력 제약과 송전선 제약에 영향을 받기 때문에 제약조건에 구속(binding)되는 경우 미분불가능 점이 나타나게 된다. 따라서 미분을 통한 해석적 기법으로는 구하기가 어려우므로 본 연구에서는 쌍행렬법[11]을 사용하여 균형점을 계산한다.

### 3.3 2단계 게임으로 분리

기존의 통합형 UC 문제를 계산하는 식(2)에서  $P_c(t, k)$ 는  $k$  조합으로 발전할 때의 최적발전력 배분에 따른 발전비

용이다. 경쟁형 전력시장에서는 이러한 발전력 배분이 경쟁을 통해 정해지므로 게임의 문제로 해석이 되며 본 논문에서는 이를 1차게임 혹은 발전력결정 게임이라 정의한다.

반면 회귀함수인 식(2)를 계산할 때는 t-1과 t시점에서의 1차게임 결과와 기동비용을 근거로 두 시점의 연속성을 결정하는 또 다른 게임의 문제가 발생한다. 이를 2차게임 혹은 기동상태결정 게임이라 정의한다.

UC 게임에 참여한 2개(F<sub>a</sub>, F<sub>b</sub>)의 발전회사가 각각 K<sub>a</sub>, K<sub>b</sub> 개의 운전/정지 조합을 갖는다고 가정하면 t시점에서 1차게임은 K<sub>a</sub> × K<sub>b</sub>회 나타나며 이때의 균형점 계산 결과를 본 논문에서는 1차 보수행렬 P<sub>a</sub><sup>t</sup>, P<sub>b</sub><sup>t</sup> ∈ R<sup>K<sub>a</sub> × K<sub>b</sub></sup>로 나타낸다.

반면 2차게임에서는 각각의 기동상태 조합에 대해 t-1시점 보수행렬과 기동비용을 고려하여 균형점을 계산하고 이를 2차 보수행렬 U<sub>a</sub><sup>t</sup>, U<sub>b</sub><sup>t</sup> ∈ R<sup>K<sub>a</sub> × K<sub>b</sub></sup>로 나타낸다. 이때 원소 U<sub>a</sub><sup>t</sup>(k<sub>a</sub>, k<sub>b</sub>), U<sub>b</sub><sup>t</sup>(k<sub>a</sub>, k<sub>b</sub>)는 F<sub>a</sub>와 F<sub>b</sub>의 보수행렬인 {U<sub>a</sub><sup>t-1</sup> + P<sub>a</sub><sup>t</sup>(k<sub>a</sub>, k<sub>b</sub>) - C<sub>a</sub><sup>t</sup>(k<sub>a</sub>), U<sub>b</sub><sup>t-1</sup> + P<sub>b</sub><sup>t</sup>(k<sub>a</sub>, k<sub>b</sub>) - C<sub>b</sub><sup>t</sup>(k<sub>b</sub>)}에 대한 Cournot 균형점 계산의 결과이다. 여기서 C<sub>a</sub><sup>t</sup>(k<sub>a</sub>)와 C<sub>b</sub><sup>t</sup>(k<sub>b</sub>)는 각각 t-1시점의 운전/정지 상태에서 t시점의 (k<sub>a</sub>, k<sub>b</sub>) 상태로 바뀔 때 F<sub>a</sub>와 F<sub>b</sub>의 기동비용이다.

이러한 2단계 게임의 특성을 기존의 통합형 UC와 비교하여 설명하면 다음 표1과 같다.

표 1 경쟁형 UC와 통합형 UC의 비교  
Table 1 Comparisons between conventional and competitive UC

t시점	비교항목	통합형 UC	경쟁형 UC
발전력 결정 (1차 게임)	상태 표현	2 <sup>(n<sup>m</sup>)</sup> 의 벡터	2 <sup>n</sup> × 2 <sup>m</sup> (=K <sub>a</sub> × K <sub>b</sub> )의 행렬
	계산 내용	기동상태에서의 발전력 결정	좌동
	계산 원리	경제급전	경쟁적 게임의 균형점
	결과 표현	비용 벡터 (1개)	각 참여자의 보수행렬 (단순전략일 때) *
기동상태결정 (2차 게임)	계산 내용	기동비용 고려 전단계 상태 선택	좌동
	선택 기준	누적된 단일 비용	이득 극대화를 위한 경쟁
	선택 원리	누적 비용 최소화	균형점 계산
	선택 결과	최소비용인 상태 한 개	단순전략 혹은 복합전략
다음 단계	누적된 비용벡터로 사용됨	단순전략시 -> 누적된 보수행렬로 사용됨 (복합전략시 정의 곤란 **)	

표1의 경쟁형 UC에서 1차게임의 결과가 만약 복합전략으로 나타난다면(\*) 동일한 기동상태에서의 발전력이 여러개 존재하므로 2차게임에서의 기동상태를 선택할 때 고려해야 하는 경우가 폭발적으로 증가하게 된다. 또한 2차게임의 결과가 복합전략으로 나타나면(\*\*) 시간대별 기동상태의 변화가 불명확해지는 문제가 발생한다. 이와 같은 문제를 해결하는 방안이 각각 4장과 5장에서 소개된다.

### 4. 발전력 결정 게임

#### 4.1 1차게임의 정식화

두 발전회사(F<sub>a</sub>, F<sub>b</sub>)가 2개씩의 발전기(G<sub>a1</sub>, G<sub>a2</sub>, G<sub>b1</sub>, G<sub>b2</sub>)를

갖는다고 하면 F<sub>a</sub>는 G<sub>a1</sub>과 G<sub>a2</sub>의 UC 계획을, F<sub>b</sub>는 G<sub>b1</sub>과 G<sub>b2</sub>의 계획을 수립하는 문제가 된다. 두 기업의 운전/정지 조합 개수를 각각 K<sub>a</sub>, K<sub>b</sub>라고 하면 K<sub>a</sub>=K<sub>b</sub>=4 (=2<sup>2</sup>)이다. 이 중에서 운전상태가 '11', '11', 즉 4대 모두 운전될 때 식(4)에서의 내쉬균형점 조건을 정리하면 다음과 같다.

$$\partial \pi_a / \partial q_{a1} = 0, \partial \pi_a / \partial q_{a2} = 0, \partial \pi_b / \partial q_{b1} = 0, \partial \pi_b / \partial q_{b2} = 0 \quad (5)$$

여기서 가격은  $p = p_o - m(q_{a1} + q_{a2} + q_{b1} + q_{b2})$ 로 정해지고 발전기의 비용함수를 2차함수라 하고 제약조건을 무시하면 식(5)는 4개의 일차 연립방정식으로 표현된다.

하지만 송전선제약을 제외하더라도 발전력 제약조건이 포함되면 이득함수가 q에 대한 미분불가능점이 발생하여 식(5)가 간단히 계산되지 않는다. 이를 해석하기 위해 발전력 변수를 Q<sub>a</sub> = q<sub>a1</sub> + q<sub>a2</sub>, Q<sub>b</sub> = q<sub>b1</sub> + q<sub>b2</sub>와 같이 변환한다. 여기서 Q<sub>a</sub>와 Q<sub>b</sub>는 각각 F<sub>a</sub>와 F<sub>b</sub>의 발전력이다. 변수변환에 의해 발전력결정 게임은 다음과 같은 2인 게임으로 표현된다.

$$\max_{Q_a} \pi_a(Q_a, Q_b) = p \cdot Q_a - f_a(Q_a) \quad (6a)$$

$$\max_{Q_b} \pi_b(Q_a, Q_b) = p \cdot Q_b - f_b(Q_b) \quad (6b)$$

여기서 f<sub>a</sub>(Q<sub>a</sub>)는 다음 식(7)과 같이 F<sub>a</sub>가 Q<sub>a</sub>를 생산할 때의 최소비용으로 정의되며 F<sub>a</sub> 자체의 최적발전력배분 시의 발전비용이다. f<sub>b</sub>(Q<sub>b</sub>)는 F<sub>b</sub>에 대한 같은 의미이다.

$$f_a(Q_a) = \operatorname{argmin}_{Q_a} \{f_{a1}(q_{a1}) + f_{a2}(q_{a2})\} \quad (7)$$

식(6)의 2인 게임 문제에 Cournot 내쉬균형점 조건을 적용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\partial \pi_a / \partial Q_a = -mQ_a + p_o - m(Q_a + Q_b) - \partial f_a / \partial Q_a = 0 \quad (8a)$$

$$\partial \pi_b / \partial Q_b = -mQ_b + p_o - m(Q_a + Q_b) - \partial f_b / \partial Q_b = 0 \quad (8b)$$

여기서 ∂f<sub>a</sub>/∂Q<sub>a</sub>는 한계비용으로 식(7)의 F<sub>a</sub> 내부 최적화문제에서 시스템 람다와 같은 값을 갖는다. 따라서 ∂f<sub>a</sub>/∂Q<sub>a</sub>를 λ<sub>a</sub>(Q<sub>a</sub>)로 ∂f<sub>b</sub>/∂Q<sub>b</sub>를 λ<sub>b</sub>(Q<sub>b</sub>)로 나타낸다.

발전기업 내부 람다 함수의 의미는 그림1의 한계비용함수와 이의 합성함수를 분석하면 보다 분명해 진다.

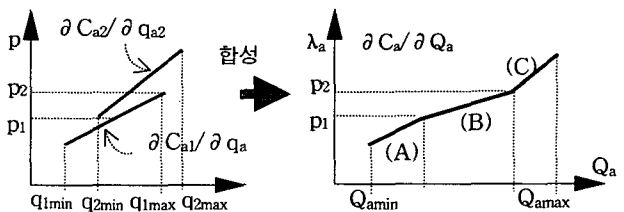


그림 1 한계비용 합성과 시스템 람다  
Fig. 1 Additive Marginal Cost Function and System λ

그림1에서 함수의 합성은 가격 p에 해당되는 F<sub>a</sub>의 발전력 q<sub>a1</sub>과 q<sub>a2</sub>를 합하여 새로운 변수 Q<sub>a</sub>(= q<sub>a1</sub> + q<sub>a2</sub>)로 나타낸 것이다. 이는 부하전력이 Q<sub>a</sub>일 때 비용함수가 C<sub>a1</sub>, C<sub>a2</sub>인 두 대의 발전기에 대한 경제급전 결과에서의 시스템 람다를 나타낸 것과 같다[8]. 여기서 Q<sub>a</sub>의 범위는 Q<sub>amin</sub>(= q<sub>a1max</sub> + q<sub>a2max</sub>)부터 Q<sub>amax</sub>(= q<sub>a1max</sub> + q<sub>a2max</sub>)까지 이다. 구간 (A)는 q<sub>a1</sub> ≥ q<sub>a1min</sub>, q<sub>a2</sub> = q<sub>a2min</sub>, 구간 (B)는 q<sub>a1</sub> > q<sub>a1min</sub>, q<sub>a2</sub> > q<sub>a2min</sub>, 구간 (C)는 q<sub>a1</sub> = q<sub>a1max</sub>, q<sub>a2</sub> ≤ q<sub>a2max</sub> 이다.

발전기  $G_{a1}$ 과  $G_{a2}$ 의 비용함수가 모두 2차이면 그림1에서와 같이  $F_a$ 의 램다함수는 구간별 선형이고 단조 증가한다.  $F_b$ 에 대해서도 적용하면 역시 유사한 형태의 램다 함수가 유도된다. 이렇게 램다 함수가 단조 증가하는 특성은 균형점을 구하는 데에 중요한 단서를 제공한다.

4.2 최적대응함수와 균형점

두 발전회사  $F_a$ 와  $F_b$ 가 각각 두 대의 발전기를 기동하는 경우에 두 참여자는 각각 두개씩의 전략변수를 갖게 된다. 이를 직접 해석하는 것은 전체 4개의 전략변수를 갖는 4인 참여게임 형태가 되어 매우 복잡해진다. 본 연구에서는 각 기업의 총 발전량( $Q_a, Q_b$ )만을 변수로 두어 전략변수를 두개로 줄이고 각 발전기의 발전량 대신 내부의 경제급전 시에 나타나는 시스템 램다를 새로운 파라미터로 도입한 것이다. 따라서 1차 게임은  $Q_a, Q_b$ 의 전략변수만으로 표현된다.

각 기업에서의 시스템 램다를 식(8)의 내쉬균형 조건에 대입하여 정리하면  $F_a$ 에 대한 조건과  $F_b$ 에 대한 조건이 각각 다음과 같이 나타난다.

$$Q_b = -2Q_a + p_o/m - \lambda_a(Q_a)/m \tag{9a}$$

$$Q_a = -2Q_b + p_o/m - \lambda_b(Q_b)/m \tag{9b}$$

내쉬균형의 개념은 각 참여자들의 전략이 수렴상태에 이르는 것으로서 각 참여자의 최적대응(best response)함수의 교점에 해당된다[10].  $F_a$ 와  $F_b$ 의 최적대응함수를 각각  $Q_a = g_a(Q_b)$ ,  $Q_b = g_b(Q_a)$ 라 두면 식(9a)는  $g_a$ 의 역함수에 해당되고 식(9b)는  $g_b$ 의 역함수에 해당된다. 따라서 식(9a)를  $Q_b$ 에 대한 함수로 표현하면  $F_a$ 의 최적대응함수  $g_a$ 가 되고 식(9b)의 역함수는  $F_b$ 의 최적대응함수  $g_b$ 가 된다.

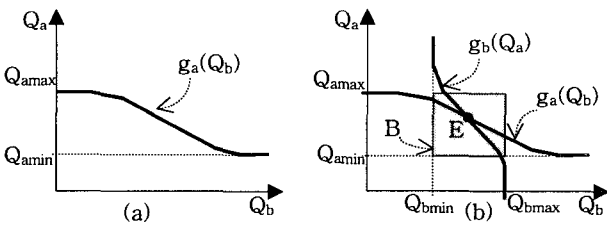


그림 2 최적대응함수와 교점  
Fig. 2 Best Response Functions and Intersection

이러한 내용이 성립하려면 역함수가 존재해야만 한다. 식(9a)에서 세 개의 항을 살펴보면 첫 번째는 단조감소, 두 번째는 상수, 세 번째는 단조감소함임을 알 수 있다. 같은 과정으로 식(9b)도 단조감소함을 알 수 있다. 연속(continuous)이면서 단조증가나 단조감소 함수의 경우 정의된 구간내에서 반드시 역함수가 존재하기 때문에[12] 식(9a)와 (9b)는 역함수가 존재하게 된다. 그림1에서 램다함수의 역함수인  $F_a$ 의 최적대응함수는 다음 그림2(a)와 같이 나타나고 이를  $F_b$ 의 최적대응함수와 같은 좌표에 나타내면 그림2(b)와 같다.

$F_a$ 의 최적대응함수에서  $Q_a$ 의 최소/최대 범위를 고려하면 그림2(a)와 같이  $Q_b > 0$ 의 범위에 대한 함수가 유도된다. 그림2(b)에서는  $F_b$ 의 최적대응함수( $g_b$ )를 동시에 나타내어  $Q_a$ 와

$Q_b$ 의 가능영역(B)에서 교점(E)이 발생함을 보이고 있다.

최적대응함수의 교점이 균형점이기 위해서는 교점에서 두 함수의 기울기가 고정점(fixed point)조건을 만족해야 한다 [12]. 즉 교점에서  $|\partial g_a/\partial Q_b| \cdot |\partial g_b/\partial Q_a| < 1$ 의 조건을 만족해야 교점에서 이탈하지 않는 내쉬 균형점이 된다. 이러한 조건을 확인하기 위해 그림1에서의 구간 (B)에 해당하는  $\partial Q_a/\partial Q_b$ 와  $\partial Q_b/\partial Q_a$ 의 기울기를 식(9a)와 식(9b)로부터 유도하면 각각 다음과 같다.

$$\partial g_a/\partial Q_b = -(m_{a1} + m_{a2}) / (2m_{a1} + 2m_{a2} + m_{a1}m_{a2}) \tag{10a}$$

$$\partial g_b/\partial Q_a = -(m_{b1} + m_{b2}) / (2m_{b1} + 2m_{b2} + m_{b1}m_{b2}) \tag{10b}$$

여기서  $m_{a1}, m_{a2}$ 는  $G_{a1}$ 과  $G_{a2}$  한계비용곡선의 기울기이고  $m_{b1}, m_{b2}$ 는  $G_{b1}$ 과  $G_{b2}$  한계비용곡선의 기울기이다. 식(10a)와 식(10b)는 모두 -1/2보다 크고 0보다 작음을 알 수 있다. 또한  $F_a$ 의 한계비용곡선에서 구간 (A)와 (C)에서의 기울기는 모두 구간 (B)에서의 기울기보다 절대값으로 작기 때문에  $g_a(Q_b)$ 의 기울기는 전 구간에서 절대값으로 1/2보다 작게 된다.  $F_b$ 에서도 동일하게 적용하면 역시  $|g_a(Q_b)| < 1/2$  임을 알 수 있다. 따라서 고정점 조건은 항상 만족이 되며 교점도 반드시 한개가 발생하기 때문에 1차게임에서의 내쉬균형은 항상 단순전략으로 나타난다. 또한 기동비용이나 이전 시점과는 무관하기 때문에 각각의 기동상태 ( $k_a, k_b$ )에 대한 1차 게임 균형점으로 기동상태 ( $k_a, k_b$ )를 대표할 수가 있다. 이러한 특성은 2차게임의 해석과 해법에 매우 유용하다.

4.3 1차게임의 균형점

만약 고려중인 4대의 발전기를 기존의 UC 문제로 해석하면 전체 운전/정지 상태는  $16(=2^4)$ 개가 존재하며 t시점에서는 16개 상태에 대한 경제급전 결과를 갖고 있어야 한다. 하지만 경쟁형 UC 문제에서는 각각  $4(=2^2)$ 개의 독립적 기동전략을 가지므로  $4 \times 4$  크기의 전략공간이 존재하고 각 상태는 하나의 1차게임에 해당된다.

예를 들어  $F_a$ 가 '10'을 선택하고  $F_b$ 가 '11'을 선택하는 경우에 최적대응함수  $g_b(Q_b)$ 는 그림2에서와 같이 4개의 꺾인 점(kink point)을 갖지만  $g_a(Q_a)$ 는 발전기  $G_{a1}$ 만을 기동하므로  $G_{a1}$ 의 한계비용함수에서 유도되는 2개의 꺾인점을 갖는 모양이 된다. 균형점은 이때의  $g_a$ 와  $g_b$ 의 교점으로 계산된다. 따라서 1차게임의 결과는 각 상태의 균형전략을 원소로 하는  $4 \times 4$ 의 행렬( $P_a^t, P_b^t$ )로 표현된다.

2차게임에서는 이같은 행렬을 대상으로 3.3절에서 정의한 보수행렬 ( $U_a^t, U_b^t$ )의 균형점을 구해야 하는데 그때의 결과가 전체 전략공간을 이산화해서 구하는 균형점과 일치하는지를 확인할 필요가 있다. 만약 그렇지 않다고, 즉 전체공간에 대한 균형점이  $U_a^t, U_b^t$  행렬의 한 원소가 아니라고 가정을 하자. 전체 공간에 대한 균형점은 U 행렬의 16개 영역 중 어느 한군데에 반드시 포함될 것이다. 포함된 그 영역에서는 이미 최적대응함수의 교점이 반드시 한개 존재하고 그 점이 이미 그 때의 기동상태를 대표하는 전략으로 구해져 있기 때문에 전체 행렬에 대한 균형점이 이와 다를 수는 없다. 따라서 1차게임의 결과만을 이용해도 전체 문제에 대한 균형점을 구할 수가 있는 것이다.

### 5. 기동상태 결정 게임

#### 5.1 2차게임과 균형점

앞의 3.3절에서 정의한 t시점에서의 2차 보수행렬  $U_a^t, U_b^t$ 의  $(k_a, k_b)$  원소는 초기시점부터 t시점의 기동상태  $(k_a, k_b)$ 에 이르기까지의  $F_a$ 와  $F_b$ 의 경쟁적 균형전략과 누적된 이득을 의미한다. 따라서  $U_a^t(k_a, k_b), U_b^t(k_a, k_b)$ 를 구하는 문제는 두 기업  $F_a$ 와  $F_b$ 가 각각 자신의 이득이 극대화 상태를 선택하는 게임이 된다. 이때의 보수행렬 A, B의 크기는 각각  $K_a \times K_b$ 이고 다음 식(11)과 같이 t시점의 이득( $P_a^t, P_b^t$ )과 t-1시점의 누적 균형점 이득( $U_a^{t-1}, U_b^{t-1}$ ), 그리고 t-1시점에서 t시점으로 전환되는 기동비용을 가감하여 구해진다.

$$\begin{aligned} [A, B] = & (U_a^{t-1} + P_a^t(k_a, k_b) - C_a^t(k_a), \\ & U_b^{t-1} + P_b^t(k_a, k_b) - C_b^t(k_b)) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 이득  $P_a^t, P_b^t$ 는  $(k_a, k_b)$ 에서의 일정한 값이고 기동비용  $C_a^t, C_b^t$ 는  $K_a \times K_b$ 개의 상태에서 각각  $k_a, k_b$  상태로 전환되는  $K_a \times K_b$  행렬의 기동비용이다.

만약 기동시간 제약으로 인해 t-1시점에서 t시점의  $(k_a, k_b)$  상태로 전환이 허용되지 않는 경우 기동비용의 값을 임의의 큰 값으로 설정하면 열등(dominated)전략이 되어 균형전략에서 배제된다. 이와 같이 2차게임은 기동상태  $(k_a, k_b)$ 에 대해서 이루어지므로 t시점에서  $K_a \times K_b$ 회 발생한다.

기동상태  $(k_a, k_b)$ 에 대한 1차게임의 균형점 발전력은 단순 전략으로 나타남을 살펴보았다. 하지만 식(11)과 같이 누적된 이득행렬의 균형점을 찾는 2차게임에서는 최적대응함수가 단조증가나 단조감소의 특성을 갖지 않는다. 따라서 균형점이 항상 단순전략임을 보장할 수가 없다.

#### 5.2 복합전략의 발생과 처리

2차게임의 균형점이 복합전략으로 나타더라도 확률적으로 선택되는 전략은 역시 1차게임의 결과인 U 행렬의 원소 중에 존재한다. 그 이유도 앞서 4.3절에서 설명한 바와 같다. 그러나 t시점에서의 2차게임 결과는 t+1시점으로 파급되기 때문에 복합전략이 나타나는 경우 운전/정지 최소시간 제약을 적용하기가 곤란해진다.

복합전략이 되면 t시점에서 하나의 기동상태가 선택되는 것이 아니고 여러 개의 상태가 확률적으로 선택되므로 이러한 특성이 여러 단계 지속되면 각 기동상태가 선택되는 확률도 누적되어 나타난다. 예를 들어  $F_a$ 의 기동상태가 k1, k2 두개만 있고 T=3에 대한 1, 2차게임을 계산한 결과가 그림3과 같다.

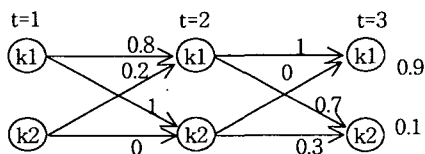


그림 3 복합전략이 발생한 사례  
Fig. 3 Sample of Mixed Strategy Equilibrium

사례에서 t=2일 때 2차게임의 결과는 k1일때 (0.8, 0.2)의 복합전략, k2일때 (1, 0)의 단순전략이 나타난 것이다. 따라서  $F_a$ 가 t=2에서 k1을 선택할 때 t=1에서의 k1은 0.8의 확률로, k2는 0.2의 확률로 선택하고 t=2에서 k2를 선택할 때는 반드시 t=1에서의 k1을 선택하는 것이다.

최종시점 T에 대해 균형점을 구함으로서 UC 계획이 완료되는데 이때의 균형전략은 그림에서 (0.9, 0.1)이다. 따라서 UC의 최종결과를 보면, t=1에서  $F_a$ 가 k1을 선택할 확률은 t=2, 3일 때를 고려하여  $0.8 \times 0.9 + 0.8 \times 0.7 \times 0.1 + 1 \times 0.3 \times 0.1 = 0.806$ 이 되고 k2를 선택할 확률은  $0.2 \times 0.9 + 0.2 \times 0.7 \times 0.1 = 0.194$ 이다.

UC 계획은 기동/정지에 관련된 제약조건이 만족되어야 하는데 이와 같이 기동상태를 확률적으로 나타내면 게임의 균형이라는 개념에는 부합하지만 제약조건이 만족여부는 의미를 잃게 된다. 즉, 그림3의 UC 결과에서  $F_a$ 가 k1과 k2를 선택할 확률이 t=1,2,3에서 (0.806, 0.194), (0.97, 0.03), (0.9, 0.1)이 되어 확률적으로는 k1-k2-k1의 선택이 가능하지만 제약조건으로 인해 t=2일때 k2, t=3일때 k1의 선택은 불가능할 수가 있는 것이다.

따라서 본 연구에서는 복합전략이 발생하는 경우에 가장 높은 확률의 상태만을 선택하는 근사적 균형전략을 계산한다. 높은 확률만을 선택하면 그림3의 경우에 t=3에서  $F_a$ 는 k1을 선택하고 t=2에서도 k1만을 선택하게 된다. 따라서 전 구간에서 k1-k1-k1이 선택되는 근사적 균형점이 계산된다. 사례연구에서는 계산된 근사적 균형전략이 Cournot 내쉬균형인가를 검증한다.

### 6. 사례연구

#### 6.1 대상계통과 데이터

사례연구의 대상계통은 문헌[8]의 자료를 기초로 하여 부하 데이터를 경쟁형 시장에 맞도록 정하였다. 다음 표1은 두 기업  $F_a$ 와  $F_b$ 의 발전기에 대한 데이터이고 표2는 T=8 동안의 부하변동을 역(inverse) 수요곡선으로 나타낸 것이다. 표1에서 한계비용함수는  $p = a + bq$  이고 표2에서 역수요곡선은  $p = d - mQ$  이다. 송전선로의 제약은 없는 것으로 가정한다.

표 1 대상계통 발전기 데이터  
Table 1 Generation Data of Sample System

발전기 구분	발전계 약(MW)	한계비용 함수		최소시간(h)		초기상태(h)		기동비용				
		a	b	기동	정지	기동	정지	Hot	Cold	Cold(h)		
$F_a$	Ga1	25	80	20.88	0.15	4	2	-	5	150	350	4
	Ga2	60	250	18	0.2	5	3	8	-	170	400	5
$F_b$	Gb1	20	60	32.8	0.15	1	1	-	6	0	0.02	0
	Gb2	75	300	17.46	0.25	5	4	8	-	500	1100	5

표 2 대상계통의 부하변동 데이터  
Table 2 Load Pattern of Sample System

구간 (t)	1	2	3	4	5	6	7	8
d	170	190	170	150	120	170	150	160
m	0.5	0.4	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.4

6.2 각 단계에서의 상태별 균형점

두 기업  $F_a$ 와  $F_b$ 가 각각 두 대씩의 발전기를 운용하므로 각각  $4(=2^2)$ 가지의 운전상태를 갖는다. 따라서  $4 \times 4$  크기의 기동상태 행렬이 나타나며 모두 정지하는 경우를 제외한 15개 원소에 해당되는 1차게임이 정의된다. 전체 8개의 구간 중  $t=1,2$ 에서 1차게임의 Cournot 내쉬균형 결과를 나타내면 표3과 같다.

표 3 1차게임 결과의 균형점 발전력

Table 3 Equilibrium Strategies of the 1st level games

기동상태				균형(t=1) (발전력, 이득)			균형(t=2) (발전력, 이득)		
$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$	$Q_{a1}$	$Q_{a2}$	$\pi_a$	$Q_{b1}$	$Q_{b2}$	$\pi_b$
0 0	1 0	0 0	0	60	0	5910	0	0	0
0 0	0 1	0 0	0	0	122	8623	0	0	0
0 0	0 0	0 0	0	43	87	8699	0	0	0
1 0	0 0	80	0	8037	0	0	0	80	0
1 0	1 0	80	0	5637	60	0	3510	80	0
1 0	0 1	80	0	4435	0	90	4381	80	0
1 0	1 1	80	0	4237	20	75	4202	80	0
0 1	0 0	0	127	9041	0	0	0	0	172
0 1	1 0	0	102	5616	60	0	2860	0	148
0 1	0 1	0	91	4381	0	86	3899	0	125
0 1	1 1	0	87	3964	20	75	3866	0	120
1 1	0 0	71	68	9624	0	0	0	80	108
1 1	1 0	51	60	5881	60	0	2568	80	84
1 1	0 1	42	60	4752	0	81	3431	73	69
1 1	1 1	36	60	4065	20	75	3433	71	67

표3에서 한가지 경우에 대해 살펴보면,  $t=1$ 에서 운전상태가 '1111'일 때의 결과는 수요특성이  $p=170-0.5Q$  이고 표1에서의 발전기 4대가 경쟁적으로 모두 운전될 때의 Cournot 내쉬균형 전략을 나타낸 것이다. 초기의 운전상태가 '0101'이므로  $t=1$ 에서는  $F_a$ ,  $F_b$  모두 전단계의 유일한 상태인 '0101'을 선택한다. 따라서  $t=1$ 에서의 2차게임은 성립되지 않으며  $U_a^1$ 과  $U_b^1$  행렬은 1차게임의 결과에 기동비용만이 포함되어 다음 표 4와 같이 정해진다. 표4에서 운전상태 '1111'은 초기상태에서  $G_{a1}$ 과  $G_{b1}$ 이 추가로 기동(cold start)되는 것이므로 이때의 기동비용인 각각 350/0.02를 표3에서의 이득에서 뺀 결과를 나타낸다.

표 4 t=1일 때의 누적 이득행렬

Table 4 Cumulative Payoffs at t=1

$U_a^1 \setminus U_b^1$	00	10	01	11
00	0 / 0	0 / 5910	0 / 8622	0 / 8699
10	7686 / 0	5286 / 3510	4085 / 4381	3886 / 4202
01	9041 / 0	5616 / 2860	4381 / 3899	3964 / 3865
11	9274 / 0	5531 / 2567	4402 / 3430	3715 / 3433

6.3 경쟁형 기동정지 계획 결과

이전상태를 선택하는 2차게임은  $t=2$ 에서부터 나타난다. 일례로 표3의  $t=2$ 에서 운전상태 '1011'에 대해 2차게임의 보수행렬을 살펴보면 다음 표5와 같다. 식(11)에서와 같이 표4의  $U_a^1$ 과  $U_b^1$  행렬에 '1011'상태에서의 이득 (5588/8951)을 더하고 여기에  $t=1$  각 상태에서  $t=2$ 의 '1011'상태로 전환되는 기동비용을 빼서 계산된다.

표 5 t=2일 때의 2차게임 보수행렬

Table 5 Payoffs of the 2nd games at t=2

B \ A	00	10	01	11
00	5238/-9999	5238/-9999	5238/17574	5238/17650
10	13275/-9999	10875/-9999	9673/13332	9475/13153
01	14279/-9999	10854/-9999	9619/12850	9202/12817
11	14862/-9999	11119/-9999	9990/12381	9303/12384

전단계인  $t=1$ 에서의 '1101'을 선택하는 경우를 보면  $F_a$ 는  $G_{a2}$ 만을 정지시키므로 기동비용은 없고 누적이득은  $4402+5588=9990$ 이고  $F_b$ 는  $G_{b1}$ 을 기동시키므로 이득은  $3430+8951-0.02=12381$ 이 된다. 한편  $F_b$ 가 '00'을 선택하는 경우는 초기상태 '01',  $t=1$ 에서 '00',  $t=2$ 에서 '11'를 선택하는 것이므로  $G_{b2}$ 의 최소기동시간 제약에 위배된다. 따라서 임의의 기동비용은 큰값이 되고 이득은 음수가 된다.  $F_b$ 가 '10'을 선택할 때도 같은 이유로 이득은 음수가 된다.

$t=2$ 의 운전상태 '1011'에서의 2차게임은 표5와 같은 보수행렬을 대상으로 이루어지며 이때의 내쉬균형은 복합전략으로 계산된다.  $F_a$ 가 '10'과 '11'을 선택할 확률이 각각 0.013, 0.987이고  $F_b$ 가 '01'과 '11'을 선택할 확률은 각각 0.352, 0.648이다. 본 연구에서는 5.2절에서 설명한 바와 같은 이유로 확률값이 가장 큰  $F_a$ 의 '11'과  $F_b$ 의 '11'을 선택하였다.

이러한 과정을  $t=8$ 까지 수행한 결과는 다음 표6과 같다.

표 6 기동정지 계획의 최종 결과

Table 6 Solutions of competitive UC problem

	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8
기동상태	1111	1111	1111	1001	1001	1011	1001	1101
발전력	$Q_{a1}$	36.2	70.6	61.6	79.7	40.1	80.0	79.7
	$Q_{a2}$	60.0	67.3	60.6	0	0	0	60.0
	$Q_{b1}$	20.0	37.0	27.4	0	0	39.2	0
	$Q_{b2}$	75.0	83.6	77.8	75.0	75.0	84.9	75.0
누적이득	$\pi_a$	3715	11344	17173	20610	21482	26186	29623
	$\pi_b$	3433	9293	13600	16352	17476	23720	26473
거래가격	74.40	86.61	79.01	72.67	50.95	88.34	72.67	76.57
공급전력	191.19	258.49	227.47	154.67	115.09	204.14	154.67	208.57

6.4 균형점의 검증

주어진 UC 문제의 최종결과를  $F_a$ 와  $F_b$ 의 구간별 발전력과 누적이득, 그리고 구간별 거래가격과 공급되는 전력으로 구분하여 표6에 나타내었다. 전체 구간 중 표5에서와 같이 2차게임의 해가 복합전략으로 나타나는 경우가 있었지만 확률이 가장 높은 전략만을 선택한 결과이다. 따라서 전체이득이 34769와 30130으로 계산된 결과가 정확한 내쉬균형인가에 대한 검증이 필요하다.

내쉬균형의 정의에 따라  $F_a$ 와  $F_b$ 가 표6에 제시된 전략을 수정할 유인(incentive)이 없음을 확인하면 되는 것이다.  $F_a$ 가 제시된 전략을 선택할 때  $F_b$ 가 선택할 수 있는 모든 경우에 대한 누적이득을 계산하면 그림4a와 같다. 각 구간에서  $F_b$ 가 선택하는 운전상태는 '10', '01', '11' 세 가지가 있으므로 전체 6591(=3<sup>8</sup>) 개의 경우가 존재한다. 부하 특성상 전 구간에서 발전에 참여하는 것이 유리하므로 운전상태 '00'은 제외하였다. 전체 6591개의 경우 중에서 기동/정지 최소시간 제약을 위배하는 것은 제외되어 최종이득을 0으로 두었다.

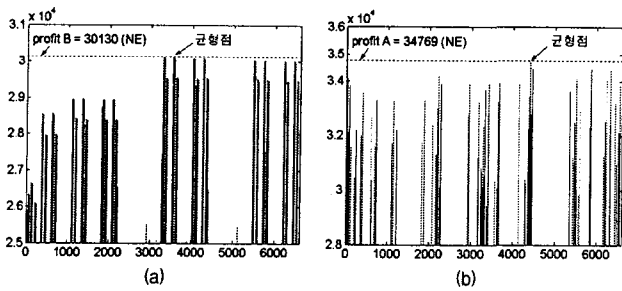


그림 4 균형점에서의  $F_b$  기대이익(a)과  $F_a$  기대이익(b)  
 Fig. 4 Expected profits of  $F_b$  and  $F_a$  at Equilibrium

그림4a에서 알 수 있듯이 한 경우에서만 누적이익이 30130의 값을 갖고 나머지는 모두 그보다 작은 값을 갖는다. 반대의 경우로  $F_b$ 가 표6의 전략을 선택할 때  $F_a$ 가 선택할 수 있는 모든 경우에 대해 누적이익을 계산하여 나타내면 그림 4b와 같다. 여기서도 한 경우에서만 누적이익이 34769이고 나머지는 모두 그보다 작은 값을 갖는다. 그림4와 5에서 최대값을 갖는 경우는 표6에서 제시된 결과와 같음을 알 수 있다. 이는  $F_a$ 와  $F_b$ 가 제시된 UC 전략을 수정할 유인이 없다는 의미이므로 내쉬균형에 해당된다.

결 론

본 연구에서는 경쟁적 전력시장에 나타나는 UC문제를 과점구조의 해석법과 게임이론을 사용하여 모형화하고 내쉬균형에 의한 해법을 제시하였다. PBUC 문제의 약점인 가격결정 원리를 Cournot 모형으로 수정하여 보다 현실적인 거래모형이 되었으며, 게임이 나타나는 구조를 두 단계로 발전력 결정 게임과 기동상태 결정게임으로 분리함으로써 게임의 모형화와 균형점의 계산이 효율적으로 이루어지게 되었다.

발전력을 결정하는 1차게임의 균형점이 단순전략으로 나타남을 최적대용함수 개념을 사용하여 유도하였다. 이에 따라 기동상태를 결정하는 2차게임에서의 전략공간이 대폭 축소되는 장점을 갖게 되었다. 하지만 2차게임의 균형전략이 복합전략으로 나타나면 기동상태가 확률값으로 표현되어 기동시간 제약조건의 적용이 어려워진다. 비현실적인 UC 계획을 피하기 위해 복합전략 중에서 확률이 가장 높은 전략만을 선택하는 방법을 제안하였다. 이론적으로는 내쉬균형을 보장할 수 없으나 사례연구를 통해 경험적으로는 이러한 방법이 내쉬균형을 구하는데 효과적임을 확인하였다.

송전선 제약이 고려되면 1차게임에 대한 단순전략 결과를 보장할 수가 없으며 참여자 수가 많아질수록 2차게임에서 복합전략이 발생할 확률이 높기 때문에 다자 참여 게임의 해법이 도입되어야 하는 문제는 앞으로 해결해야 할 과제이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소(02-전-01) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] Gerald B. Sheble, Computational Auction Mechanisms for Restructured Power Industry Operation, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [2] M. Shahidehpour, H. Yamin, Z. Li, Market Operations in Electric Power Systems, IEEE, John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2002.
- [3] M. Shahidehpour, M. Alomoush, Restructured Electrical Power Systems, Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [4] Steven Stoft, Power System Economics: Design Markets for Electricity, IEEE/Wiley, February 2002.
- [5] P. Attaviriyapap, H. Kitta, E.Tanaka, and J. Hasegawa, "A New Profit-Based Unit Commitment Considering Power and Reserve Generating," IEEE PES Winter Meeting, Vol.2, pp. 1311-1316, 2002.
- [6] D.W. Carlton, J.M. Perloff, Modern Industrial Organization, Addison-Wesley, 2000.
- [7] James A. Momoh, Electric Power System Applications of Optimization, Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [8] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, 2nd Edition, New York, 1996.
- [9] S. Borenstein, J. Bushnell, E. Kahn and S. Soft, "Market Power in California Electricity Market," Utility Policy, Vol.5, No.3, pp219-236, 1995.
- [10] D. Fudenberg and J. Tirole, Game Theory, The MIT Press, 1991.
- [11] K. H. Lee and R. Baldick, "Tuning of Discretization in Bimatrix Game Approach to Power System Market Analysis," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.18, No.2, May 2003.
- [12] T. M. Apostol, Mathematical Analysis, Addison-Wesley Publishing Company, 2nd Edition, 1974.

저 자 소 개



이 광 호(李 光 浩)

1965년 12월 22일 생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 전력연구원 위촉연구원. 2001년 미국 Univ. of Texas (Austin) 방문교수. 1996~현재 단국대 공대 전기공학과 부교수.

Tel : 02-709-2868

E-Mail : khlee@dku.edu