경쟁적 전력시장에서 용량요금에 의한 전략적 용량철회 억제

論 文
56-7-4

Suppression of Strategic Capacity Withholding by Capacity Payment in a Competitive Generation Market

李 光 浩†
(Kwang-Ho Lee)

Abstract - In a cost based pool market, the generation capacity can be used as strategic bids by generation companies (Gencos) with the cost functions open to the market. Competition using strategic capacities is modeled by Cournot and Perfect Competition (PC) model, and transformed into two by two payoff matrix game with Gencos' decision variables of Cournot and PC model. The payoff matrices vary when capacity payments are given to Gencos in accordance with their capacity bids. Nash Equilibrium (NE) in the matrices also moves with capacity price changes. In order to maximize social welfare of the market, NE should locate in a certain position of the payoff matrices, which corresponds to a PC NE. A concept of a critical capacity price is proposed and calculated in this paper that is defined as a minimum capacity price leading to PC NE. The critical capacity price is verified to work as a tool for suppressing a strategic capacity withholding in simulations of a test system.

Key Words : Capacity Withholding, Capacity Payment, Cost Based Pool, Cournot Model, Nash Equilibrium

1. 서 론

우리나라의 전력산업 구조개편은 여러 방면에서 진행되고 있으며 전력시장의 기본형태 측면에서 보면 현재 변동비반영시장(Cost Based Pool: CBP) 단계이다. CBP 시장은 발전입찰에 참여한 발전기에 대해 사전에 평가된 최대용량, 발전비용특성 및 비용의 변동특성을 기초로 경제적 급전계획을 세우는 방식이다.

CBP 시장에서는 발전사의 전략적 행동의 개입 가능성이 낮기 때문에 입찰가격반영시장(Bid Based Pool: BBP) 단계에 비해 발전용량의 확보와 가격의 안정성 면에서 우수하다고 알려져 있다[1] 하지만 실제로는 발전용량을 전략적으로 선택하여 발전량과 가격에 영향을 줄 수가 있다. 이러한 사례는 2001년 미국 캘리포니아 전력 사태, 2003년 미국 뉴욕 정전 사태, 그리고 영국의 초기 전력 풀에서 대형 발전사의 시장지배력 행사 등에서 찾을 수 있다[2,3].

발전용량의 부족과 불안정한 용량확보 문제를 극복하기 위해 발전비용과는 별도로 발전용량에 대해 요금을 지불하는 용량요금(Capacity Payment) 제도가 사용되고 있다[2,4,5]. 본 연구에서는 CBP 시장에서 발전가능용량의 선택이 전략적으로 이루어지는 경쟁의 원리를 게임이론으로 모형화하고 용량요금의 가격에 따라 전략적 용량철회(Capacity Withholding)가 억제되는 현상을 분석한다.

발전용량이 전력시장에 미치는 영향에 대한 연구[5,6,7]는 해외에서도 연구되고 있다. [5]는 용량의무방식에서의 의무용량을 용량시장에서 입찰을 통해 확보하는 모형을 다루며, [6]은 중장기적 관점에서 발전용량 계획을 수립하는 문제를 다루며, [7]은 발전기의 최소출력 지정과 기동정지계획의 조화를 최적화하는 문제를 다룬다. 국내에서도 발전용량의 전략적 철회에 따른 가격상승을 시뮬레이션한 연구[8]와 BBP 시장에서 전략적 발전용량과 전략적 입찰함수와의 관계를 분석한 연구[9]도 소개된 바 있다.

본 연구에서는 CBP 시장을 대상으로 하기 때문에 전략적 용량철회가 없는 경우에는 합리적 급전결과는 완전경쟁(Perfect Competition)의 결과이므로[10] 완전경쟁 모형으로 정의하고 전략적 용량철회가 존재할 때의 경쟁을 해석하는 데에는 Cournot 모형을 사용한다. 따라서 발전용량의 선택에 따라 해석 모형이 달라지는 혼합모형이 나타나는데 이를 2×2의 보수(Payoff) 행렬의 문제로 나타내어 균형 상태를 구한다.

이러한 보수행렬에는 용량요금이 포함되기 때문에 용량가격에 따라 보수가 달라지고 내쉬균형(NE)도 달라질 수 있다. 전력시장의 효율과 합리성을 위해서는 균형전략이 완전경쟁 모형의 균형상태로 나타나야 한다. 용량요금의 증가에 따라 이러한 균형상태에 도달되는 관계를 이용하여 완전경쟁 내쉬균형을 유도하는 임계용량요금을 도출한다. 사례연구를 통해 보수행렬 문제로 변형하여 NE를 구하는 방식의 타당성을 검증하고 임계용량가격의 계산결과와 최대발전용량 변화에 따른 임계용량가격의 변화 특성을 소개한다.

† 교신저자, 正會員 : 檀國大 電氣工學科 副敎授・工博
E-mail : khlee@dku.edu
接受日字 : 2007年 2月 28日
最終完了 : 2007年 5月 25日

2. 변동비반영시장(CBP)에서의 용량철회

2.1 CBP 시장에서의 발전용량

변동비반영시장을 사용하는 장점은 각 발전기의 최대용량과 비용특성 등의 실제 데이터를 사용한다는데 있다. 용량과 비용에 대한 발전기 특성이 공개됨으로써 최적의 운용계획은 발전비용의 최소화에 달려 있으며 이러한 결과는 발전경쟁이 가장 치열한 완전경쟁의 상태에 이르게 된다. 발전사 G1과 G2가 참여하는 복점(Duopoly) 구조의 전력시장에서 완전경쟁의 균형상태를 나타내면 다음과 같다[11].

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_0+m_1 & m_0 \\ m_0 & m_0+m_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_0-b_1 \\ b_0-b_2 \end{pmatrix} \tag{1}$$

여기서 q_1과 q_2는 각각 발전기 G_1과 G_2의 발전력이고 각 발전기의 한계비용특성은 $b_i + m_i q$이고 수요함수는 $b_0 + m_0(q_1+q_2)$이며 b와 m은 함수의 상수항과 1차항의 계수이다.

이론적으로 CBP 시장은 PBP 시장에 비해 낮은 가격으로 많은 전력을 공급하고 발전사는 충분한 발전용량을 확보하려고 노력하는 이상적인 형태이다. 하지만 발전기의 비용특성이 쉽게 변하지 않음에 비하여 발전기의 용량은 보수 및 운전계획이나 발전소 사정에 따라 변하기 쉽다. 따라서 입찰하는 발전용량에 대해서는 시장운영자 입장에서 검토하고 확인하여 적정여부를 판단하기는 매우 어렵다. 또한 발전용량을 줄임으로서 가격이 상승하고 발전사의 이득이 증가할 수 있기 때문에 발전사가 전략적으로 발전용량을 줄이는 용량철회(Capacity Withholding)의 가능성이 존재한다.

발전용량이란 각 발전기의 가능한 최대발전력으로서 시장에서 정해지는 발전력과 일치하지는 않는다. 일반적으로 발전력이 발전용량 보다 작다. 하지만 입찰 발전용량이 완전경쟁 균형전략(1)에서의 발전력보다 작아지면 최적화 특성상 발전력이 발전용량과 같아진다. 이는 발전사의 발전용량 입찰로 발전력을 선택하게 되는 결과가 되므로 발전력을 전략변수로 선택하는 Cournot 모형으로 해석할 수 있게 된다.

2.2 Cournot 모형

생산량 공급 경쟁을 공급자가 생산량을 선택하는 것으로 해석하는 모형이 Cournot 해석법이다. 식(1)에서의 시장 모형에 대해 수요함수의 가격탄력성을 감안하고 최적대응함수(Best Response Function)의 교점을 구하면 다음과 같이 Cournot 내쉬균형이 유도된다[11].

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2m_0+m_1 & m_0 \\ m_0 & 2m_0+m_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_0-b_1 \\ b_0-b_2 \end{pmatrix} \tag{2}$$

완전경쟁에서의 균형상태와 비교하면 Cournot 균형상태는 공급이 감소하고 가격이 상승하여 전력거래가치로 해석되는 사회후생(Social Welfare)이 감소한다. 이러한 현상은 시장지배력(Market Power)이 존재하는 대표적인 경우로서 비협조적 과점(Oligopoly)시장의 여러 가지 해석 모형 중에서 가장 독점(Monopoly)에 가깝다.

CBP 시장에서 이러한 시장지배력을 완화시키기 위해서는 발전사의 용량철회의 유인을 제거하는 것이다. 이를 위해서 발전사가 입찰한 용량에 비례해서 용량요금(Capacity Payment)을 지불하는 것이다.

3. 용량요금제

3.1 용량요금제 효과

전력 에너지의 수요와 공급의 특성상 예비전력은 항상 필요하다. 이러한 예비전력의 확보와 관련되어 여러 가지 개념이 사용되고 있는데 크게 가격 스파이크(Price Spike) 방식과 용량의무(Capacity Obligation) 방식, 그리고 용량요금 방식이 있다[2].

전력시장이 경쟁적으로 작동하기만 하면 실시간 가격에 의해 수요와 공급이 균형을 이루어 용량과 관련된 고정비용을 효율적으로 회수할 수 있으므로 별도의 용량확보제도가 불필요하다고 보는 방식이 가격 스파이크 방식이다. 용량의무 방식은 발전사가 미리 결정된 수준의 예비용량을 의무적으로 용량시장에서 확보를 해야 한다. 하지만 가격 스파이크 방식은 시장메커니즘에 지나치게 의존함으로써 안정성이 결여되어 캘리포니아 등지에서 실패한 바 있고, 용량의무 방식은 용량이 에너지 거래와 연관성이 미약하고 용량시장을 개설해야 하는 어려운 점이 있다. 따라서 우리나라에서는 용량요금방식을 사용하고 있으며[4] 본 연구에서도 용량요금방식에 초점을 맞춰 용량요금가격이 내쉬균형에 미치는 영향에 대해 분석한다.

용량요금을 지불하는 목적은 예비력을 확보하여 계통운영의 신뢰성을 높이고 발전소 건설의 투자비용을 회수하여 신규투자를 유도하는 것이다. 여기에 본 연구에서는 적절한 용량가격의 설정으로 전력시장의 거래가치를 향상시키는 것도 또 하나의 목적이라 제안한다.

시장운영자 입장에서는 발전용량에 대해 금전적 보상을 함으로써 발전사가 최대발전용량을 정확하게 입찰하도록 유도하려고 한다. 하지만 발전사 입장에서는 용량의 가격에 따라 최대용량을 정확한 값을 선택할 것인지 전략적인 용량철회를 선택할 것인지 이득 측면에서 비교를 할 것이다.

3.2 용량가격의 결정

우리나라에서 용량가격은 공급지장확률, 공급지장비용, 계통한계가격에 의해 결정되며 2007년 2월의 전력거래소 월간주요통계 기준으로 7.46 원/kWh, 국내탄은 27.0 원/kWh 이다[4]. CBP 시장의 용량요금제는 기저와 일반발전기로 구분하여 적용하던 방식에서 단일체제로 변경되어 운영되고 있다.

이러한 용량요금의 결정은 계통 신뢰성의 경제적 효과를 고려하여 계산되는 것으로 공급지장확률 및 공급지장비용 계산의 정확성 문제 등으로 그것이 적정하고 효율적이라고 단정 짓기는 어렵다. 본 연구에서는 신뢰성 측면이 아닌 용량철회 전략과 사회후생 측면에서 용량요금의 적정수준을 계산하며 용량가격은 단일모형을 대상으로 한다.

CBP 시장에서 발전사의 전략적 입찰용량과 균형상태와의 관계를 다음 그림 1을 통해 살펴본다. 그림 (a)에서 q'은 전략변수로서 발전기의 전략적 입찰용량, q는 급전계획에서 결정된 발전력, q_{il}은 실제의 최대발전용량, q_{pc}는 완전경쟁 균형상태에서의 발전력, q_{co}는 Cournot 모형의 균형상태 발전력이다. 그림 (b)는 발전력(q) 공급에 대한 발전이득과 입찰용량(q')에 대한 용량정산금을 나타낸다.

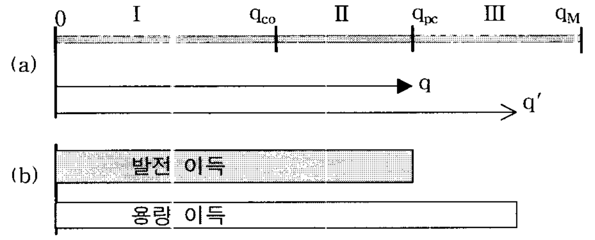


그림 1 전략적 용량입찰과 급전발전력

Fig. 1 Strategic Capacity Bids and Dispatched Power

입찰 발전력의 범위를 세구간(I, II, III)으로 구분하였을 때, III은 입찰용량이 충분히 큰 구간으로서 급전계획의 결과는 완전경쟁 균형이 되고, 입찰용량이 완전경쟁 발전력보다 작은 구간 II에서 급전계획은 입찰용량과 같아지며(q=q'), 구간 I은 용량철회가 지나쳐서 Cournot 균형상태보다 이득이 낮아져서 선택할 이유가 없는 영역이다.

용량요금을 고려하지 않을 때에 발전사는 전략적 용량철회를 하여 Cournot 균형상태인 q_{co}로 입찰을 하게 된다[11]. 하지만 용량요금을 도입하면 발전에 따른 이득과 함께 그림 1의 (b)에서와 같이 입찰용량에 대한 용량요금이 지불되어 전체 이득은 증가하게 된다. 따라서 입찰용량을 증가시킬 유인이 발생하여 발전사의 전략은 q_{co}로 반드시 유지되는 것은 아니다. 또한 용량이득은 입찰용량 뿐 아니라 용량가격에도 영향을 받는다.

3.3 용량가격의 영향

어떠한 용량가격에 대해서도 그림 1의 구간 III에서는 $q=q_{CO}$ 이므로 발전이득은 고정되고 용량이득을 증가시키기 위해서는 발전사는 용량입찰을 최대한($q'=q_M$)으로 증가시켜야 한다. 반면 구간 II에서는 q=q' 이므로 입찰용량에 따라 발전이득과 용량이득이 모두 달라진다. 따라서 발전사는 입찰용량을 최대한으로 정하거나 아니면 구간 II에서의 적정한 용량철회를 선택하게 된다. 본 연구에서 이를 각각 최대전략(M)과 철회전략(W)이라 명명한다.

최대전략과는 달리 철회전략에서는 어느 정도의 용량(q')을 선택할지가 전략변수로 남게 된다. 최대전략에서의 이득을 π_M, 철회전략에서의 이득을 π_w이라 하면 계산식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\pi_m &= \pi_{mg} + \pi_{mc} \\ &= \{p_m \cdot q_m - C(q_m)\} + \{\gamma \cdot q_M\}\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}\pi_w &= \pi_{wg} + \pi_{wc} \\ &= \{p_w \cdot q_w - C(q_w)\} + \{\gamma \cdot q_w\}\end{aligned} \tag{4}$$

여기서 π_{mg}, π_{wg}는 발전이득을 의미하고 π_{mc}, π_{wc}는 용량이득을 나타내고 q_m, p_m은 최대전략 선택시의 급전발전력과 시장가격, q_w, p_w는 철회전략 선택시의 발전력과 가격이고 q_M은 발전기의 최대용량이다. 또한 C는 비용함수이고 γ는 용량가격을 나타낸다.

용량철회로 인해 발전력은 $q_w < q_m$의 관계에 있고 수요특성에 의해 시장가격은 $p_w > p_m$의 관계에 있다. 따라서 최대전략은 대량의 발전력과 최대의 용량으로 이득을 얻고 철회전략은 적은 발전력에 높은 가격으로 이득을 얻게 된다. 발전사는 최대전략에서의 이득(3)과 철회전략에서의 이득(4)을 비교하여 큰 쪽을 선택할 것이다.

두 전략에서 용량이득을 비교하면 입찰용량이 최대전략에서 더 크므로 ($q_M > q_w$) 용량이득도 최대전략에서 더 크다. 또한 용량가격이 증가할수록 최대전략에서의 용량이득이 더 크게 증가하여 발전사는 최대전략을 선택하게 된다. 최대전략에서의 균형은 완전경쟁의 결과로서 사회후생이 가장 큰 상태가 되지만 용량가격이 증가하면 결국 전력요금이 상승하기 때문에 지나친 용량가격은 바람직하지 않다. 본 연구에서는 발전참여자가 모두 최대전략을 선택하기 위한 최소의 용량가격을 임계(critical)용량가격이라 정의하고 이를 분석한다.

4. 발전용량의 전략적 선택 게임

4.1 행렬게임 모형화

CBP 시장에 용량요금이 도입된 경우에 발전사는 최대전략(M)와 철회전략(W) 둘 중에 하나를 선택하게 되는데 이를 복점구조 전력시장에 적용하여 2개의 전략변수에 대한 경우의 수를 보수(Payoff)로 나타내면 다음 그림 2와 같이 2×2의 행렬로 표현된다.

G1 \ G2	W	M
W	Cournot'	혼합형태1
M	혼합형태2	완전경쟁

그림 2 용량입찰 전략의 보수행렬

Fig. 2 Payoff Matrix of Capacity Bid Strategy

그림에서 두 참여자가 (M,M)을 선택하면 식(1)에서와 같은 완전경쟁의 균형상태에 이르고 (W,W)를 선택하면 용량철회의 결과로서 Cournot 균형상태에 도달한다. 이 때에는 용량요금이 포함되기 때문에 내쉬균형 조건식이 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2m_0 + m_1 & m_0 \\ m_0 & 2m_0 + m_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_0 - b_1 + \gamma \\ b_0 - b_2 + \gamma \end{pmatrix} \tag{5}$$

Cournot 균형조건이 식(2)와 다른 것은 이득에 식(4)와 같이 용량요금 항이 포함되었기 때문이고 식(5)에서 γ가 추가됨으로써 균형상태의 발전력이 증가함을 알 수 있다. 또한

식의 형태로 보아 발전력은 용량가격에 비례함을 알 수 있다.

보수행렬의 비대각 원소인 (W,M)과 (M,W)에서는 한쪽은 최대용량을 입찰하고 다른 쪽은 용량철회를 선택하는 경우이며 균형조건은 Cournot와 완전경쟁의 혼합형태를 띤다. 혼합형태1에서 G1은 최대용량을 입찰하므로 전략적 선택은 없고 G2는 전략적 용량입찰을 선택하게 된다. 따라서 시장운영자와 G2의 최적화 조건은 각각 식 (6), (7)과 같이 나타난다.

$$\frac{\partial B - C(q_2)}{\partial q_2} = b_0 - m_0(q_1+q_2) - (b_2 + m_2 q_2) = 0 \qquad (6)$$

$$\frac{\partial \{pq_1 - C_1(q_1) + \gamma q_1\}}{\partial q_1} = \frac{\partial p}{\partial q_1} q_1 + p - (b_1 + m_1 q_1) + \gamma = 0 \qquad (7)$$

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_0 + m_1 + m_0//m_2 & m_0 \\ m_0 & m_0 + m_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_0 - b_1 + \gamma \\ b_0 - b_2 \end{pmatrix} \qquad (8)$$

식(6)에서 B는 사용자의 효용(Benefit)으로서 수요함수를 적분하여 계산된다. 또한 식(8)은 식(6)과 (7)을 연립하여 정리한 것으로서 혼합형태1에서의 내쉬균형을 나타낸다. 여기서 $m_0//m_2 = m_0 m_2/(m_0+m_2)$이고 혼합형태2에서의 균형상태도 같은 방식으로 유도된다.

4.2 행렬게임의 내쉬균형

전력시장에서 거래가치를 극대화하기 위해서는 내쉬균형이 완전경쟁의 결과인 (M,M) 상태가 되어야 한다. 보수행렬로 표현되는 게임의 내쉬균형은 최적대응(Best Response) 전략의 교점으로 구해진다[12]. 따라서 (M,M)이 균형상태가 되기 위해서는 G2가 M을 선택할 때 G1은 W 보다는 M을 선택하는 것이 유리하고 G1이 M을 선택할 때 G2는 W 보다는 M을 선택하는 것이 유리해야 한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\{\pi_1(W,M) \leqq \pi_1(M,M)\} \text{ AND } \pi_2(M,W) \leqq \pi_2(M,M)\} \qquad (9)$$

위의 식을 만족해도 보수행렬의 특성상 (M,M)과 (W,W)이 모두 내쉬균형이 될 수가 있는데 (W,W)는 사회후생 측면에서 (M,M) 보다 못하므로 (W,W)의 균형은 피해야 한다. 이를 위해서는 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

$$\{\pi_1(W,W) \leqq \pi_1(M,W)\} \text{ OR } \{\pi_2(W,W) \leqq \pi_2(W,M)\} \qquad (10)$$

용량이득과 발전이득으로 구성되는 2× 2 행렬이 식(9)와 식(10)을 모두 만족할 때 (M,M)에서 유일한 내쉬균형이 존재한다.

4.3 임계 용량가격과 최대발전용량

그림 2에서의 보수행렬은 용량가격 및 발전기의 최대발전용량에 따라 달라진다. 따라서 식(9)와 (10)의 만족 여부도 용량가격 및 최대용량에 따라 달라진다. 용량가격이 낮을 때는 내쉬균형이 (W,W)이지만 가격이 높을 때는 용량요금이 증가하여 내쉬균형은 (M,M)로 이동한다. 또한 동일한 용량가격에 대해서 최대발전용량이 증가할수록 내쉬균형은 (W,W)에서 (M.M)로 이동한다.

임의의 최대발전용량에 대해서 내쉬균형이 (M,M)로 이동되는 최소의 용량가격을 본 연구에서 임계(Critical) 용량가격이라 부른다. 식(9)의 첫 번째 부등식 조건에서 $\pi_1(W,M)$와 $\pi_1(M,M)$은 용량가격에 따라 크기의 대소가 달라지는데 두 값이 같아지는 용량가격을 γ_{1m}이라 두고 두 번째 부등식 조건에 대해 등식을 만족할 때의 용량가격을 γ_{2m}이라 둔다. 식(10)에서의 첫 번째 부등식에서도 같은 방식으로 γ_{1w}을 정의하고 두 번째 부등식에서도 γ_{2w}를 정의한다.

이러한 용량가격의 정의를 이용하면 임계용량가격 γ_c는 다음과 같이 계산된다.

$$\gamma_c = max(\gamma_{1m}, \gamma_{2m}, min(\gamma_{1w}, \gamma_{2w})) \qquad (11)$$

발전기의 최대발전용량이 커지면 용량이득이 증가하기 때문에 임계용량가격은 낮아지게 된다. 반대로 발전용량이 작을수록 높은 용량가격이 필요하다. 사례연구에서 최대발전용량의 크기와 임계용량가격의 관계를 분석한다.

임계용량가격은 기존에 공급지장비용을 근거로 계산되던 용량요금과는 다른 각도에서 발전용량의 적정 가격을 계산한 것이다. 전력거래가치를 극대화하기 위해서는 용량요금을 지불하여 용량철회의 유인을 제거시켜야 하는데 이러한 효과를 얻으면서 용량요금을 최소로 하는 가격을 계산하였다.

5. 사례연구

5.1 시장모형과 용량선택 게임

전력시장 형태는 변동비반영(CBP)이고 발전사 G_1, G_2의 복점 경쟁구조이며 한계비용함수는 다음 표 1과 같다. 부하는 단일 수요함수로 표현되고, 송전선로의 제약은 고려하지 않으며 편의상 발전기의 최대발전용량은 다음 표 1과 같이 둔다.

표 1 발전기 비용특성과 수요함수
Table 1 Demand Function and Generators' Data

	함수 형태	b_i	m_i	최대발전용량
G1의 한계비용함수	$b_1 + m_1 q_1$	10	0.25	120
G2의 한계비용함수	$b_2 + m_2 q_2$	5	0.45	120
전력수요	$b_0 - m_0(q_1+q_2)$	100	0.5	-

용량요금이 포함되지 않은 상태에서의 완전경쟁과 Cournot 모형에서의 내쉬균형 결과를 식(1)과 (2)를 이용하여 계산하면 다음 표 2와 같다.

표 2 용량요금 없을 때의 내쉬균형 결과
Table 2 Nash Equilibrium Result without Capacity Payment

	q_1	q_2	가격	π_1	π_2
완전경쟁	82.16	56.76	30.54	843.87	724.83
Cournot	53.12	47.2	49.84	1763.6	1615.2

5.2 용량요금 포함 시의 내쉬균형

용량요금을 시장가격의 10% 수준인 γ=4 로 두었을 때의 완전경쟁과 Cournot 및 혼합형태의 균형을 계산하여 그림 3에 보수행렬로 나타낸다. 행렬의 값은 π_1/π_2로 표시한 것이며 값을 비교하면 (W,W)상태가 내쉬균형임을 알 수 있다. 이때의 급전 발전력은 q_1=55.55, q_2=49.12, 가격 47.66로서 완전경쟁의 결과(표 2 참조)보다 시장거래가치가 낮다. 따라서 (M,M) 상태로 내쉬균형을 이동시킬 필요가 있다. 용량가격을 γ=8.0 로 증가시켰을 때의 보수행렬은 그림 4와 같다.

G_1 \ G_2	W	M
W	1928/1749	1337/1520
M	1442/970	1323/1204

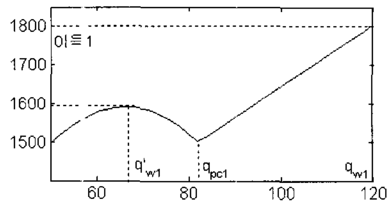
그림 3 용량가격이 4.0일 때의 보수행렬
Fig. 3 Payoff Matrix with Capacity Price γ=4.0

G_1 \ G_2	W	M
W	2101/1889	1592/1913
M	1829/1180	1803/1684

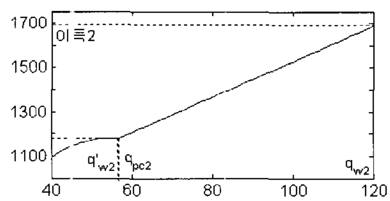
그림 4 용량가격이 8.0일 때의 보수행렬
Fig. 4 Payoff Matrix with Capacity Price γ=8.0

그림 4에서의 값을 비교하면 (M,M) 상태가 내쉬균형 임을 알 수 있다. 균형상태 발전력과 가격은 표 2에서와 같으나 용량요금(=$\gamma \cdot q_M$) 8× 120=960이 더해져서 이득은 증가하게 된다.

본 연구에서는 발전용량이라는 연속인 전략변수를 최대용량과 Cournot 균형, 2개의 상태만으로 대표하여 2×2 보수행렬로 변환한 후에 내쉬균형을 구했다. 이러한 방법이 타당한 것인가를 검증하기 위해 전략변수를 연속변수로 두고 내쉬균형에서의 이득분포를 다음 그림 5와 같이 나타낸다.

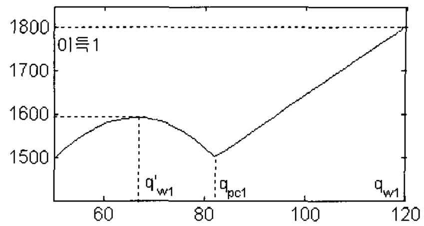


(a) π_1

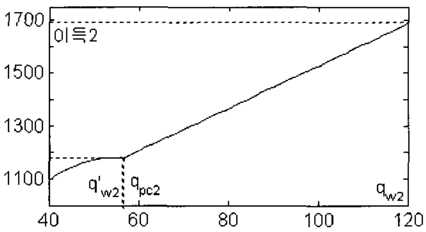


(b) π_2

그림 5 내쉬균형에서의 한계 이득분포
Fig 5 Profit Distribution at Nash Equilibrium



(a) π_1



(b) π_2

그림 5 내쉬균형에서의 한계 이득분포
Fig. 5 Profit Distribution at Nash Equilibrium

두 발전사 모두 (M,M)을 선택했을 때의 이득분포를 보면 최대용량인 120을 입찰했을 때 가장 유리함을 알 수 있으며 2×2의 보수행렬 문제로 변환하여 계산하는 제안한 기법이 타당함을 보여준다.

그래프에서 q_{pc1}, q_{pc2}는 완전경쟁에서의 발전력에 해당되며 이보다 큰 값으로 용량입찰을 하면 용량가격에 비례해서 이득이 선형적으로 증가한다. 또한 q'_{w1}, q'_{w2}는 각각 그림 2에서 혼합형태1에서의 균형상태 q_1, 혼합형태2에서의 균형상태 q_2에 해당된다.

5.3 임계용량 가격 분석

앞에서 γ=4와 γ=8일 때의 보수행렬을 계산하였다. 여기서는 용량가격이 증가하면서 균형상태가 (M,M)상태로 바뀔 때의 γ, 즉 임계용량가격(γ_c)에 대해 살펴본다.

보수행렬의 각 원소에 해당되는 임계조건을 4.3절에서 γ_{1m}, γ_{2m}, γ_{1w}, γ_{2w}로 정의하였다. 우선 G_1 행렬의 M 열(Column)에서 용량가격이 4.23일 때 $\pi_1(W,M)=\pi_1(M,M)$=1351.5이므로 γ_{1m}=4.23이고, W 열에서 용량가격이 12.73일 때 $\pi_1(W,W)=\pi_1(M,W)$=2315.1 이므로 γ_{1w}=12.73이다. G2의 행렬에서 M 행(Row)에서는 γ=4.0일 때 이미 $\pi_2(M,W) \le \pi_2(M,M)$의 조건을 만족하고 있으므로 γ_{2m}<4.0이고, W 행에서는 γ_{2w}=7.65일 때 $\pi_2(W,W)=\pi_2(W,M)$=1874.9 이 된다. 이를 (11)식에 대입하면 임계용량은 $\gamma_c = max(4.23,\ 4.0, min(12.73,\ 7.65))$=7.65 이다.

이러한 임계가격은 발전기 최대용량에 따라 달라진다. 다음 그림은 발전기 최대용량에 따른 임계용량가격을 나타낸 것이다.

그림은 임계용량가격은 최대발전용량에 반비례함을 나타낸다. 시뮬레이션 결과, 최대발전용량이 크게 증가하면 임계용량 가격은 영 보다 큰 약 3.0 근방의 값으로 수렴하였다. 이는 NE를 완전경쟁의 결과로 유도하기 위해서는 절대적으로 용량요금 제도가 필요함을 나타낸다.

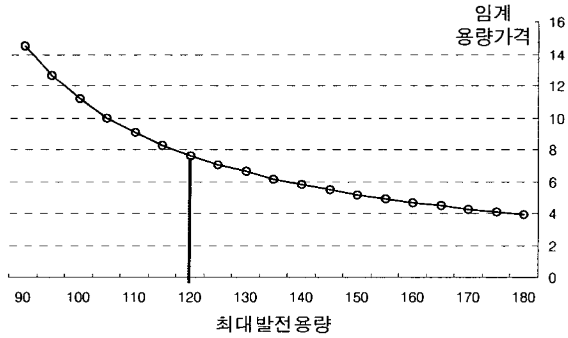


그림 6 최대발전용량 변화에 따른 임계용량가격

Fig. 6 Critical Capacity Price According to Maximum Generating Capacity

이러한 분석결과는 전력거래가치를 극대화하는 용량요금정책에 활용될 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 연구는 변동비반영 시장에서 발전사의 전략적 입찰과 용량요금과의 관계를 분석하였다. 발전사는 발전용량을 전략적으로 입찰함으로서 용량철회를 통한 이득 극대화를 시도하는데 이를 분석하기 위한 모형을 개발하였다. 시장의 구조는 완전경쟁 모형과 Cournot 모형이 혼합되는 형태를 갖기 때문에 이를 2×2 크기의 보수행렬 게임으로 변형하였다.

용량요금이 반영됨으로써 보수행렬과 달라지는 현상을 분석하여 내쉬균형을 구하고 행렬에서의 값을 비교하여 내쉬균형이 용량가격의 변화에 따라 완전경쟁의 결과에 도달하는 용량가격, 즉 임계용량가격을 계산하였다. 임계용량가격은 최소의 용량가격으로 전력거래가치를 극대화시키는 용량요금방식이며 발전기의 최대발전용량에 반비례하는 특성도 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이러한 연구결과는 우리나라 용량요금제도를 개선하는 데에 이론적 기반으로 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 한국전력거래소, *전력시장운영규칙*, http://www.kpx.or.kr.

[2] J. H. Shin and K. H. Lee, "Analysis on Incomplete Information in an Electricity Market using Game Theory," *KIEE Trans.* vol. 55A, no. 5, pp. 214-219, May. 2006.

[3] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game theory*, MIT Press, 1991.

[4] Y. Zhang, J. Fand, F. Hu, S. Chen and Y. Ni, "Analysis of the Network Constraints' Effects on Strategic Behavior in an Incomplete Information Environment," *International Conference on, Power System Technology*, vol. 1, pp. 428-432, Oct. 2002.

[5] R. Rerrero, J. Rivera and M. Shahidehpour, "Applications of Games with Incomplete Information for Pricing Electricity in Deregulated Power Pools," *IEEE trans. on Power System*, vol. 13, no. 1, pp. 184-189, Feb. 1998.

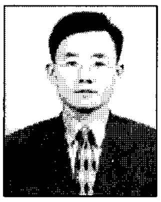
[6] P. D. Klemperer and M. A. Meyer, "Supply Function Equilibria in Oligopoly Under Uncertainty," *Econometrica*, vol. 57, no. 6, pp. 1243-1277, Nov. 1989.

[7] S. Stoft, "Using Game Theory to Study Market Power in Simple Networks," *IEEE Tutorial on Game Theory in Electric Power Market*, IEEE Press TP=136-0, pp. 33-40, 1990.

[8] D. J. Kang, J. Hur, T. H. Kim, Y. H. Moon, K. D. Lee, K. H. Chung and B. H. Kim, "The Method for Inverse Demand Curve of Cournot Model in Electricity Market," *KIEE Trans*. vol. 54A, no. 2, pp. 70-87, Feb. 2005.

[9] H. Niu and Ross Baldick, "Supply Function Equilibrium Bidding Strategies with Fixed Forward Contracts," *IEEE trans. on Power System*, vol. 20, no. 5, pp. 1859-1867, Nov. 2005.

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(공박). 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