

## A Study on the Strategic Competition Model of Pumped Storage Plant

李 光 浩<sup>†</sup>  
(Kwang-Ho Lee)

**Abstract** - This paper addresses the bidding strategies of a pumped-storage hydro plant in an electricity market. Competitive bidding of pumping and generating of a pumped-storage plant is formulated in a game theoretic problem in accordance with the three different ownership of scheduling; Market Operator(MO), generating company(Genco), and combined type of MO and Genco. Optimal conditions for Nash Equilibrium are derived in the form of market prices during the scheduling periods. Simulation results show the different ownership models produce different schedules of pumping and generating, which correspond to the objective of the scheduling owner of a pumped-storage hydro plant.

**Key Words** : Pumped-Storage hydro plant, offering/bidding strategies, Nash Equilibrium, scheduling, game

### 1. 서 론

양수발전(Pumped-Storage Hydraulic Generation)이란 전력수요가 낮을 때 동력부하를 이용하여 상부저수지로 물을 끌어올렸다가 전력수요가 높을 때 수력발전으로 활용하는 방식으로 첨두부하를 삭감(Peak Shaving)하는 기능을 한다[1]. 부하와 발전의 순환 효율이 대략 67%~75% 정도이므로 펌프로 사용할 때와 발전기로 사용할 때의 가격차이가 이보다 클 때 양수발전기는 장점을 갖는다. 또한 양수발전기는 속응성이 뛰어나 계통안정도나 예비력 확보 면에서도 유리하다[2].

전력산업이 전력시장 체제로 전환된 뒤에 가격의 변동성에 대해 우려가 높아지면서 양수발전기의 효과에 대해 더 많은 관심이 모아지고 있다. 양수발전기가 전력시장 안정화에 도움이 되는 것은 분명하나 양수발전의 운영계획을 누가 수립하는가에 따라 그 효과는 달라질 수 있다.

전략적 담합에 의한 양수발전기의 시장지배력 행사 가능성에 대한 연구[3]가 이미 수행된 바 있으며, 현재 국내시장에서 양수입찰이 특정 시간대에 집중되어 부하의 증가에 따라 비싼 발전기가 투입되는 불합리한 현상, 그리고 발전입찰의 정산방식에 대한 논의 등 양수발전의 운영에 대해 여러 측면에서 깊이 있는 연구의 필요성이 제기되고 있다.

전력시장에서 양수발전기의 입찰전략에 대한 연구[4,5]가 시도되었지만 주로 시장가격이 예측된 상태에서 발전사의 이득 극대화를 위한 전략을 다루고 있다. 시장가격의 예측이 정확하다면 그러한 접근이 의미가 있지만, 양수발전의 운영이 시장가격에 미치는 영향이나, 수요탄력성을 갖는 부하가 양수발전의 운영에 어떠한 작용을 하는지 등의 미시

적 관점에서는 분석되고 있지 못하다.

본 연구에서는 변동비반영 전력시장(Cost-Based Pool, CBP)에서 양수발전기 운영을 고려하여 시장운영자(MO)가 가격과 거래량을 결정하는 원리와, 발전입찰에 참여하는 발전사들의 목적함수 극대화 과정을 모형화하고 분석함으로써 게임의 균형상태를 계산한다. 아울러 양수발전 운영의 주체를 시장운영자가 갖는 방식과 발전사가 갖는 방식 또는 부분적으로 나누어 갖는 방식을 게임 모형에 반영하여 균형식의 유도와 계산결과를 비교 분석한다. 단, 양수발전이 발전 예비력과 계통안정성 등에 기여하는 효과는 고려하지 않고, 양수발전에 대한 특례적 가격정책은 반영되지 않는다.

### 2. 양수발전의 고전적 모형

#### 2.1 양수발전계획의 정식화

수직통합형 전력산업에서는 급전계획의 목적이 발전 연료비용의 최소화이며, 양수와 수력발전으로 사용하는 구간을 적절히 선택하여 화력발전기의 발전력 배분과 조화를 이뤄야 한다. 따라서 계획기간 동안에 양수발전기의 동작 상태를 결정하는 것이 가장 핵심 부분이다.

이러한 문제를 정식화하여 나타내면 다음 식(1)과 같다. 계획하는 구간은 T 구간, 화력발전기의 개수는 N 개 이고 화력발전기 j의 t구간에서의 발전력을  $q_{jt}$ , 연료비 함수는 F로 나타낸다.

$$\text{(목적함수)} \quad \min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N F_j(q_{jt}) \quad (1a)$$

$$\text{(제약조건)} \quad q_{dt} - \sum_{j=1}^N q_{jt} - \alpha_t q_{ht} + \beta_t q_{pt} = 0, \quad t=1 \dots T \quad (1b)$$

$$v_t - v_{t-1} - r_t + \alpha_t w_{ht} - \beta_t w_{pt} = 0, \quad t=1 \dots T \quad (1c)$$

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 檀國大 電氣工學科 副教授

E-mail : khlee@dku.edu

接受日字 : 2007年 6月 19日

最終完了 : 2007年 7月 30日

$$V_{\min} \leq v_t \leq V_{\max}, \quad t=1 \dots T \quad (1d)$$

$$v_s = V_0 \quad (1e)$$

$$v_e = V_T \quad (1f)$$

$$\alpha_t \in \{0, 1\}, \quad t=1 \dots T \quad (1g)$$

$$\beta_t \in \{0, 1\}, \quad t=1 \dots T \quad (1h)$$

$$\alpha_t + \beta_t \in \{0, 1\}, \quad t=1 \dots T \quad (1i)$$

제약조건식 (1b)에서  $q_{dt}$ 는 구간  $t$ 에서의 부하전력이고, 양수발전력과 양수부하 전력을 각각  $q_{ht}$ ,  $q_{pt}$ 라 나타낸다. 송전손실은 없는 것으로 가정하며, 식(1b)는 전력 수급조건을 의미한다. 계수  $\alpha$ 는 발전기로 사용 중일 때 1, 아닐 때 0이고 계수  $\beta$ 는 양수펌프로 사용할 때 1, 아닐 때 0이다. 따라서 식(1i)에서와 같이  $\alpha + \beta$ 는 0 혹은 1의 값을 갖는다.

제약조건식 (1c)는 저수량과 물의 유입 및 유출량의 관계이다.  $v_t$ 는 구간  $t$  직후의 저수량이고  $r_t$ 는  $t$  구간 동안에 유입된 수량이고  $w_{ht}$ 와  $w_{pt}$ 는 각각 수력발전으로 사용된 수량과 양수펌프에 의해 유입된 수량이다. 식(1d)는 저수량의 최소 및 최대 범위의 제약조건이고 식(1e)와 (1f)는 초기와 말기에서의 저수량 조건을 나타낸다.

## 2.2 발전 및 양수구간

양수발전기의 동작상태에 따른 화력발전기 연료비용의 최소화 문제는 식(1)에 나타낸 바와 같이 이진변수  $\{\alpha, \beta\}$ 를 결정하는 정수계획법의 문제이다[6,7]. 하지만 정수계획법을 직접 적용하는 것보다는 단계적 탐색법이 주로 사용된다[8].

양수발전기를 기준으로 보면 발전계획은 {발전, 부하, 대기}의 3가지 상태로 구분된다. 발전구간, 부하구간, 대기구간을 각각  $\{k, i, n\}$  기호로 표시하여 각 상태에서의 라그랑지 함수( $E$ )를 나타내면 다음과 같다. 식의 간결표현을 위해 식(1d)의 최소 최대 조건에 대한 라그랑지 부분은 생략한다.

$$E_k = \sum_{j=1}^N F_j(q_{jk}) + \lambda_k (q_{dk} - \sum_{j=1}^N q_{jk} - q_{hk}) + \gamma_k (v_k - v_{k-1} - r_k + w_{hk}) \quad (2a)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^N F_j(q_{ji}) + \lambda_i (q_{di} - \sum_{j=1}^N q_{ji} + q_n) + \gamma_i (v_i - v_{i-1} - r_i - w_{pi}) \quad (2b)$$

$$E_n = \sum_{j=1}^N F_j(q_{jn}) + \lambda_n (q_{dn} - \sum_{j=1}^N q_{jn}) + \gamma_n (v_n - v_{n-1} - r_n) \quad (2c)$$

따라서 전구간의 라그랑지 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$E = \sum_k E_k + \sum_i E_i + \sum_n E_n + \gamma_s (v_s - V_0) + \gamma_e (v_e - V_T) \quad (3)$$

최적조건식을 유도하여 정리하면 다음과 같다.

$$\text{(발전구간)} \quad \partial E / \partial q_{jk} = dF_j / dq_{jk} - \lambda_k = 0 \quad (4a)$$

$$\partial E / \partial q_{hk} = \gamma_k dw_{hk} / dq_{hk} - \lambda_k = 0 \quad (4b)$$

$$\text{(부하구간)} \quad \partial E / \partial q_{ji} = dF_j / dq_{ji} - \lambda_i = 0 \quad (5a)$$

$$\partial E / \partial q_{pi} = -\gamma_i dw_{pi} / dq_{pi} + \lambda_i = 0 \quad (5b)$$

$$\text{(대기구간)} \quad \partial E / \partial q_{jn} = dF_j / dq_{jn} - \lambda_n = 0 \quad (6)$$

$$\partial E / \partial v_s = \gamma_s - \gamma_1 = 0 \quad (7a)$$

$$\partial E / \partial v_e = \gamma_e + \gamma_T = 0 \quad (7b)$$

$$\partial E / \partial v_t = \gamma_t - \gamma_{t+1} = 0, \quad t=1, \dots, T \quad (7c)$$

위의 식(7)은 전 구간에서 저수량에 대한 라그랑지안 승수가 동일할 때 최적임을 나타낸다. 따라서  $\gamma$ 를 가정한 후 각 구간에서 (4)~(6)의 식을 계산하고 저수량 조건을 점검하여  $\gamma$  값을 조정하는  $\lambda$ - $\gamma$  반복법에 의해 계산된다. 하지만 저수량 등의 제약조건에 따라 구간별  $\gamma$ 값은 다르게 나타날 수 있으며 양수구간과 발전구간을 가정한 후  $\lambda$  값을 비교하면서 양수와 발전구간을 조정하는 단계적 경사탐색법이 주로 사용된다.[8]

## 3. 완전경쟁 모형

### 3.1 스케줄링의 주제

전력시장에서의 운영 발전계획은 발전사의 경쟁적 입찰전략과 MO의 거래가치 극대화 원칙이 조화를 이루면서 수립된다.

본 연구에서는 양수발전 스케줄링의 주제에 따라 게임문제의 정식화에서부터 내쉬균형의 결과해석까지를 비교 분석한다. 전력시장은 CBP 시장에 탄력적 부하를 가정하며 선로제약조건은 고려하지 않는다. 발전사는 가격수용자 역할을 하게 되므로 양수 이외의 발전력은 MO가 결정하는 모형이다.

양수발전 스케줄링은 크게 3가지 형태로 구분하여 살펴본다. MO가 결정하는 경우, 발전과 양수 모두를 시장 운영자가 결정하므로 게임현상은 나타나지 않고 완전경쟁 모형으로 해석이 되며 일반적인 최적화 문제로 계산이 된다. 둘째, 발전사가 양수와 발전 모두를 입찰을 통해 결정하는 경우로 이득을 극대화하기 위한 게임현상이 나타나며 MO의 목적함수와 발전사의 목적함수로 구성되는 2단계 최적화 문제로 표현된다. 셋째, 양수펌프는 발전사가 입찰하고 양수발전은 MO가 결정하는 경우로 발전사의 선택폭이 좁아져서 부분적인 2단계 최적화 문제로 표현된다.

### 3.2 시장운영자의 양수발전계획

시장운영자가 주체인 경우에는 시장거래가치라는 공익성을 우선하여 양수계획을 수립한다. 정식화를 간결하게 나타내기 위해 대상계통은 그림 1과 같이 화력기 2대와 양수발전기(Gph) 1대가 부하에 직접 연결되어 있고 상부 저수지의 유입과 하부로 유출수는 없으며, 화력기 G1 소유 발전사가 양수발전기도 함께 소유한다고 가정한다.

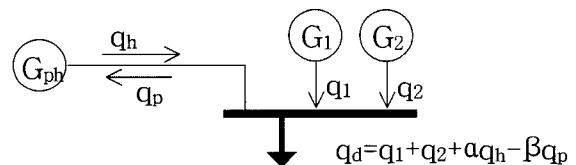


그림 1 전력시장의 구성  
Fig. 1 Diagram of Electricity Market

시구간 t에서 부하의 수요함수는  $p_{dt} = b_{0t} - m_{0t}q_{dt}$ 로 나타내고 화력발전기  $G_j$ 의 비용함수는  $b_j + m_j q_{jt}$ 로 나타낸다.

MO의 목적함수는 다음 식(8)과 같다.

$$\text{(목적함수)} \quad \max \sum_{t=1}^T J_t(q_{dt}, q_{jt}) \quad (8a)$$

$$J_t = \int (b_{0t} - m_{0t}q_{dt})dq - \sum_{j=1}^2 C_j(q_{jt}) \quad (8b)$$

$$q_{dt} = q_{1t} + q_{2t} + \alpha_t q_{ht} - \beta_t q_{pt} \quad (8c)$$

문제에서 MO가 결정해야 하는 변수는 각 시구간에서  $\{q_{1t}, q_{2t}, q_{ht}, q_{pt}\}$ 이다. 최적조건을 구하기 위해 수급조건과 저수량조건을 포함하여 라그랑지안을 나타내면 식(9)와 같다.

$$L = \sum_{t=1}^T L_t \quad (9a)$$

$$L_t = J_t + \lambda_t (q_{1t} + q_{2t} + \alpha_t q_{ht} - \beta_t q_{pt} - q_{dt}) \quad (9b)$$

$$+ \gamma_t (-v_t + v_{t-1} - \alpha_t w_{ht} + \beta_t w_{pt})$$

양수발전을 하는 t=k 구간에서의 최적조건은 다음과 같다.

$$\partial L_k / \partial q_{dk} = b_{0k} - m_{0k}(q_{1k} + q_{2k} + q_{hk}) - \lambda_k = 0 \quad (10a)$$

$$\partial L_k / \partial q_{1k} = -b_1 - m_1 q_{1k} + \lambda_k = 0 \quad (10b)$$

$$\partial L_k / \partial q_{2k} = -b_2 - m_2 q_{2k} + \lambda_k = 0 \quad (10c)$$

$$\partial L_k / \partial q_{hk} = \lambda_k - \gamma_k \partial w_{hk} / \partial q_{hk} = 0 \quad (10d)$$

한편 양수펌프를 하는 t=i 구간에 대해서도 같은 방식으로 유도되며 식(10a)에서  $q_{hk}$  대신  $-q_{pi}$ , 식(10d)에서  $w_{hk}$  대신  $-w_{pi}$ 으로 표현된다. 그리고 저수량으로 미분하여 식(7)에서와 같은 일정  $\gamma$  조건도 최적조건에 포함된다.

### 3.3 최적조건 확인

정수계획 형태의 문제이기 때문에 단계적 탐색법이 사용되는데 반복과정의 각 단계에서 양수발전과 펌프 구간을 조정하는 판단은  $\lambda$  값에 의해 이루어진다. 따라서 최적 상태에서 구간별  $\lambda$  값의 관계에 대해 살펴본다.

만약 현재 계획이 최적이라면 양수계획을 변경하여 구간 i에서 펌프해서 구간 k에서 발전할 때 목적함수가 증가할 수가 없다. 증가한다면 현재가 최적이지 않는 것이다. 모든 경우에 대해 목적함수의 변화가 음수가 되는 조건을 유도하면 다음과 같다.

우선, 임의 구간 i에서 펌프된 물이 구간 k에서 사용되므로 저수량 변화는 없다. 이를 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta v_{hk} + \Delta v_{pi} = 0 \quad (11a)$$

$$\frac{dw_{hk}}{dq_{hk}} \Delta q_{hk} + \frac{dw_{pi}}{dq_{pi}} \Delta q_{pi} = 0 \quad (11b)$$

발전구간에서 목적함수의 변화는 다음과 같이 유도된다.

$$\Delta J_k = \frac{\partial J_k}{\partial q_{jk}} \Delta q_{jk} = -\frac{dC_j}{dq_{jk}} (-\Delta q_{hk}) = \lambda_k \Delta q_{hk} \quad (12)$$

여기서  $dC_j/dq_{jk} = \lambda_k$ 는 최적조건인 식(10)을 이용한 것이다. 부하구간에서 목적함수 변화는 다음과 같다.

$$\Delta J_i = \frac{\partial J_i}{\partial q_{ji}} \Delta q_{ji} = \lambda_i \Delta q_{pi} = \lambda_i \left\{ \frac{-\partial w_{hk} / \partial q_{hk}}{\partial w_{pi} / \partial q_{pi}} \right\} \Delta q_{hk} \quad (13)$$

여기서  $\Delta q_{hk}$ 와  $\Delta q_{pi}$ 의 관계는 식(11b)에서와 같다. 따라서 최적 상태에서의 조건은 다음과 같다.

$$\Delta J_k + \Delta J_i = \Delta q_{hk} (\lambda_k - \lambda_i \frac{\partial w_{hk} / \partial q_{hk}}{\partial w_{pi} / \partial q_{pi}}) < 0 \quad (14a)$$

$$\lambda_k < \lambda_i \frac{\partial w_{hk} / \partial q_{hk}}{\partial w_{pi} / \partial q_{pi}} \quad (14b)$$

$$\lambda_k < \frac{\lambda_i}{\eta}, \quad \eta = \frac{\partial w_{pi} / \partial q_{pi}}{\partial w_{hk} / \partial q_{hk}} \quad (14c)$$

여기서  $\eta$ 는 양수발전기의 순환효율로 1MW를 사용하여 펌핑할 수 있는 물의 양과 1MW를 생산하기 위한 물의 양으로 정의된다. 따라서  $\eta < 1.0$ 의 관계가 성립하며 일반적으로 0.67~0.75 범위이다.

식(14c)는 전력의 시장가격이 낮을 때와 높을 때의 비율이 순환효율보다 작으면 ( $\lambda_i/\lambda_k < \eta$ ) 양수발전의 효과가 없음을 의미한다. 반대로  $\lambda_i/\lambda_k > \eta$ 이 성립하면 구간 i에서 펌프로 가동시켜 구간 k에서 발전하는 하는 것이 효과적이다. 따라서 전 구간에서 시장가격 편차가 순환효율보다 작으면 최적의 상태에 이르렀다고 할 수 있다.

## 4. 과점형태의 양수발전

### 4.1 발전사의 양수계획

MO의 목적은 양수발전사가 제시한 양수계획을 기반으로 사회적 후생이 최대가 되는 화력발전기의 출력을 결정하는 것이다. 따라서 MO의 목적함수는 식(8)과 동일하다. 하지만 식(1c), (1d)의 저수량에 대한 제약조건은 고려할 필요가 없다. 결정 변수는  $\{q_{1t}, q_{2t}\}$ 이며  $\{q_{ht}, q_{pt}\}$ 는 양수발전사가 전략적으로 선택하는 변수이다. 최적조건은 식(10a)~(10c)와 같다.

양수발전사의 목적함수는 다음 식(15a)와 같이 이득의 극대화이고 제약조건을 포함한 라그랑지안은 (15b)와 같다.

$$\text{(목적함수)} \quad \max \pi = \sum_{t=1}^T (p_t q_{1t} - C_1(q_{1t})) + \sum_k p_k q_{hk} - \sum_i p_i q_{pi} \quad (15a)$$

$$L = \pi + \gamma (\sum_k v_{hk} - \sum_i v_{pi}) + \sum_k \mu_{uk} (v_{hk} - V_{uk}) + \sum_k \mu_{lk} (V_{lk} - v_{hk}) + \sum_i \mu_{ui} (v_{pi} - V_{ui}) + \sum_i \mu_{li} (V_{li} - v_{pi}) \quad (15b)$$

여기서 목적함수는 화력발전기에서의 이득, 양수발전의 의

한 수익, 양수부하에 의한 비용으로 구성되며 제약조건에서  $\gamma$ 로 표현되는 항은 양수발전과 펌프에 의한 저수량 변화 조건이다. 이는 식(7)에서의 저수량 조건에 대한 또 다른 표현이다. 또한  $\mu_u, \mu_l$ 로 표현되는 항은 발전과 양수시에 사용 가능한 물의 최대( $V_u$ ) 및 최소량( $V_l$ ) 조건을 나타낸다.

양수발전사 문제의 최적조건은 (15b)를 결정변수  $\{q_{ht}, q_{pt}\}$ 로 미분하여 구해진다. 발전구간인  $t=k$  경우에 대해 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial q_{hk}} = \frac{\partial p_k}{\partial q_{hk}} q_{1k} + p_k \frac{\partial q_{1k}}{\partial q_{hk}} - \frac{\partial C_1}{\partial q_{1t}} \frac{\partial q_{1k}}{\partial q_{hk}} + \frac{\partial p_k}{\partial q_{hk}} q_{hk} + p_k + (\gamma + \mu_{uk} - \mu_{lk}) \frac{\partial w_{hk}}{\partial q_{hk}} = 0 \quad (16)$$

여기서  $\partial p_k / \partial q_{hk}, \partial q_{1k} / \partial q_{hk}$ 는 시장운영자 문제의 최적조건인 (10a)~(10c) 식에서 유도된다.

한편 양수펌프 구간인  $t=i$  경우에 대해서도 같은 방식으로 최적조건을 구할 수 있으며 결정변수  $\{q_{ht}, q_{pt}\}$ 에 대한 식으로 정리된다. 최적상태의 판별은 (11)~(14)에서와 같이 양수발전 구간과 양수부하 구간에서의 목적함수 변화를 구하여 식이 유도된다. 목적함수가 완전경쟁에서와 달리 발전사의 이익이기 때문에 이를 반영하여 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta \pi_k = \frac{\partial \pi_k}{\partial q_{hk}} \Delta q_{hk} = \left( \frac{\partial p_k}{\partial q_{hk}} q_{1k} + \frac{\partial p_k}{\partial q_{hk}} q_{hk} + p_k \right) \Delta q_{hk} \quad (17a)$$

$$\Delta \pi_i = \frac{\partial \pi_i}{\partial q_{pi}} \Delta q_{pi} = \left( \frac{\partial p_i}{\partial q_{pi}} q_{1i} - \frac{\partial p_i}{\partial q_{pi}} q_{pi} - p_i \right) (-\Delta q_{hk} / \eta) \quad (17b)$$

양수발전기를 구간 k에서 발전하고 구간 i에서 펌핑할 때의 목적함수 변화는  $\Delta \pi_k$ 와  $\Delta \pi_i$ 의 크기 차이에 의해 결정된다. 따라서 민감도  $\Delta \pi_k / \Delta q_{hk}$ 는 구간 k에서 양수발전으로 1MW를 추가 발전할 때의 이득으로서 양수발전의 가치가 된다. 양수부하 구간에서 순환효율  $\eta$ 를 포함한  $\Delta \pi_i / (\eta \Delta q_{pi})$ 는 1MW를 양수발전할 수 있는 물을 펌핑할 때의 비용을 나타내며 환산된 양수발전의 비용을 의미한다. 양수발전 구간과 양수부하 구간에서의 환산가치( $\lambda_k'$ )와 환산비용( $\lambda_i'$ )을 정리하면 다음과 같다.

$$\lambda_k' = \frac{\partial \pi_k}{\partial q_{hk}} = p_k + \frac{\partial p_k}{\partial q_{hk}} (q_{hk} + q_{1k}) \quad (18a)$$

$$\lambda_i' = \frac{\partial \pi_i}{\eta \partial q_{pi}} = \left\{ p_i + \frac{\partial p_i}{\partial q_{pi}} (q_{pi} - q_{1i}) \right\} / \eta \quad (18b)$$

#### 4.2 양수발전 분리 입찰

양수펌프는 발전사가 결정하고 양수발전은 MO에게 맡기는 방식을 살펴본다.

MO의 목적함수와 제약조건은 3.2절의 MO가 전담하는 형태와 동일하다. 하지만 결정해야 하는 변수는 각 시구간에서  $\{q_{1t}, q_{2t}, q_{ht}\}$ 로서 양수펌프에 대한 변수  $q_{pt}$ 가 제외된다. 따라서 최적조건은  $t=k$  일 때는 식(10)과 동일하고  $t=i$  일 때는 (10d)에 해당되는  $\partial L / \partial q_{pi}$  항이 제외된다.

양수발전사는 양수펌프만을 선택하지만 목적함수의 표현은 발전사가 전담하는 식(15a)와 동일하다. 제약조건은 양수펌프시의 수량 제한폭( $V_{up}, V_p$ ) 조건만이 포함되며 최적조건은 다음과 같이 결정 변수인  $q_{pi}$ 에 의한 미분식이 성립한다.

$$\frac{\partial L}{\partial q_{pi}} = \frac{\partial p_i}{\partial q_{pi}} q_{1i} + p_i \frac{\partial q_{1i}}{\partial q_{pi}} - \frac{\partial C_1}{\partial q_{1i}} \frac{\partial q_{1i}}{\partial q_{pi}} + \frac{\partial p_i}{\partial q_{pi}} q_{pi} + p_i + (\mu_{ui} - \mu_{li}) \frac{\partial w_{pi}}{\partial q_{pi}} = 0 \quad (19)$$

이러한 과점형태의 양수발전계획은 MO와 발전사의 목적이 동시에 만족되는 내쉬균형에서 수립된다.

발전구간과 부하구간의 계획 주체가 다르기 때문에 최적상태의 판별 또한 서로 다른 형태로 나타난다. MO는 양수발전의 분포를 조정하므로  $\Delta J_k / \Delta q_{hk}$ 가 양수구간에서 일정할 때 최적의 선택이 되는 것이고, 발전사는 양수부하의 분포를 조정하므로  $\Delta \pi_k / \Delta q_{pi}$ 가 부하구간에서 일정할 때 최적적이다.

### 5. 사례연구

#### 5.1 전력시장과 발전기 특성

연구대상 계통에서 화력발전기 2대( $G_1, G_2$ )의 발전(한계)비용 함수는 각각  $\partial C_1 / \partial q_1 = 30 + 0.8q_1, \partial C_2 / \partial q_2 = 5 + 0.45q_2$ 로 설정한다. 비용함수의 계수에 의하면  $G_1$ 의 발전력 보다  $G_2$ 의 발전력이 월등히 크게 나타나므로 양수발전기를 소유하지 않는 발전사( $G_2$ )가 시장에서 더 큰 비중을 차지한다.

양수발전기의 발전 및 펌프 특성은 다음 표 1과 같다.

표 1 양수발전기의 특성

Table 1 Data of Pumped-Storage Hydro Plant

	물의 이용특성	최소사용량	최대사용량
양수 펌프	$\partial w_{pi} / \partial q_{pi}$	2	40
양수 발전	$\partial w_{hk} / \partial q_{hk}$	3	30
			60

표에서 양수발전기 순환효율( $\eta$ )은  $\{\partial w_{pi} / \partial q_{pi}\} / \{\partial w_{hk} / \partial q_{hk}\} = 1/3$ , 약 67% 정도임을 알 수 있다. 한편 부하의 시구간별 특성은 일차함수의 절편과 기울기로 구분하여 다음 표 2와 같이 설정한다.

표 2 구간별 수요함수

Table 2 Load Pattern of Demand Functions

구간(t)	1	2	3	4	5	6	7	8
$b_{0t}$	170	210	200	195	150	130	110	140
$m_{0t}$	0.5	0.43	0.4	0.4	0.5	0.55	0.6	0.4

#### 5.2 완전경쟁의 결과

양수발전기의 초기 저수량을 200으로 두고 완전경쟁에 의한 양수발전기 포함 발전계획 결과를 보면 다음 표 3과 같다.

구간 2,3에서 저수된 물을 이용하여 발전을 하고 구간 6,7에서 펌프로 물을 채운다. 시장가격의 분포를 보면, 가장 값싼 구간7에서 가격이 50.97이고 가장 비싼 구간4에서 가격이 89.77이라서 최적상태 판별식인  $\lambda_4 < \lambda_7'$ 를 만족하지 않는다. 하지만 구간7에서의 펌프량 최대조건 때문에 더 이상 양수부하로 사용할 수 없는 상태이다.

표 3 완전경쟁의 발전계획 결과

Table 3 Scheduling Results by Perfect Competition

	1	2	3	4	5	6	7	8
발전/양수부하	.	20	18.74	.	.	-28.11	-30	.
물 사용량	.	60	56.23	.	.	-56.23	-60	.
저수량(v)	200	140	83.77	83.77	83.77	140	200	200
발전력( $q_1$ )	51.27	73.96	73.40	74.70	42.13	36.46	26.22	45.93
발전력( $q_2$ )	146.70	187.04	186.02	188.38	130.46	120.43	102.16	137.21
시장가격( $\lambda$ )	71.01	89.17	88.74	89.77	63.71	59.17	50.97	66.74
이득( $G_1$ )	.	1783.5	1663.1	.	.	-1663.5	-1529.2	.
이득( $G_{ps}$ )	1051.4	2188.4	2156.2	2232.9	710.0	531.9	274.9	843.8
$\lambda'$		89.17	88.75			88.75	76.45	

두 번째로 값싼 구간6에서의 가격 또한  $\lambda_4 < \lambda_6'$ 를 만족하지 않는데 이는 양수발전의 최소 사용량이 30이기 때문에 구간4에서 양수발전을 하게 되면 다른 구간에서 양수발전력 감소로 가격상승이 유발되어 효율성이 감소하게 된다. 구간3과 구간6에서의 가격을 비교하면  $\lambda_3 = \lambda_6'$ 이 되어 양수발전과 양수부하의 가치가 일치하는 임계구간이다.

5.3 발전사 양수계획 결과

양수발전기의 발전과 펌프 운용계획을 발전사가 수립할 때의 결과는 다음 표 4와 같다. 양수발전기의 운전 구간이 완전 경쟁에서의 결과와 다르게 나타난다. 구간4에서의 양수발전이 추가되는데 이는 표 3에서 구간4의 시장가격이 높게 나타남과 관련이 있다. 또한 물의 사용량은 표 3에서 116.23에 비해 여기서는 93.18로 줄었다. 이는 발전사가 양수에 사용되는 물의 양을 전략적으로 이용한 것으로 해석된다.

표 4 발전사에 의한 양수발전계획 결과

Table 4 Dispatch by Generation Company's Scheduling

	1	2	3	4	5	6	7	8
발전/양수부하	.	10.73	10.33	10	.	-20.0	-26.59	.
물 사용량	.	32.19	30.99	30	.	-40.0	-53.18	.
저수량(v)	200	167.81	136.82	106.82	106.82	146.82	200	200
발전력( $q_1$ )	51.27	75.96	75.16	72.62	42.13	34.56	25.39	45.93
발전력( $q_2$ )	146.70	190.60	189.18	184.7	130.46	116.99	100.69	137.21
시장가격( $\lambda$ )	71.01	90.77	90.13	88.09	63.71	57.65	50.31	66.74
이득( $G_1$ )	.	973.94	931.07	880.93	.	-1152.9	-1337.8	.
이득( $G_{ps}$ )	1051.4	2307.9	2259.8	2109.3	710.0	477.72	257.80	843.8
$\lambda'$		75.82	75.82	74.26		82.34	75.82	

환산가치를 분석하면, 구간2에서 시장가격은 90.77이지만 1MW 추가로 양수발전을 하면 시장가격의 변동이 확러기

발전력( $q_1$ )에 의한 수입에도 영향을 주어 실질적으로 75.82만큼의 이득이 증가함을 나타낸다. 전 구간에서 환산 가치보다 환산비용이 같거나 크게 나타나므로 발전과 부하의 구간은 최적으로 선택됨을 알 수 있다. 구간4에서의 환산 가치가 구간2,3에 비해 낮지만 최소 사용량 조건에 의해 줄일 수 없고 발전을 안하면 구간2,3에서의 가치가 감소하게 된다.

5.4 양수발전 분리입찰 결과

양수발전기의 발전과 펌프 운용계획 주체를 분리할 때의 결과는 다음 표 5와 같다. 양수발전기의 운전 구간은 완전 경쟁에서의 결과와 같게 나타나고 물의 사용량은 100으로 표 3과 표 4의 중간 정도 값이다.

표 5 혼합된 양수발전계획 결과

Table 5 Dispatch Results by Combined Scheduling

	1	2	3	4	5	6	7	8
발전/양수부하	.	18.65	14.68	.	.	-20.0	-30.0	.
물 사용량	.	55.95	44.05	.	.	-40.0	-60.0	.
저수량(v)	200	144.05	100.0	100.0	100.0	140.0	200	200
발전력( $q_1$ )	51.26	74.25	74.25	74.69	42.14	34.56	26.16	45.93
발전력( $q_2$ )	146.72	187.56	187.56	188.38	130.43	116.99	102.16	137.21
시장가격( $\lambda$ )	71.00	89.40	89.40	89.77	63.72	57.65	50.97	66.75
이득( $G_1$ )	.	1667.3	1312.8	.	.	-1152.9	-1529.2	.
이득( $G_{ps}$ )	1051.4	2205.4	2205.4	2232.9	710.0	477.72	274.92	843.8
$\lambda'$		89.40	89.40			54.90	51.71	

발전구간에서 양수발전의 운용은 침두부하를 삭감하는 방향으로 이루어지는데 발전구간이 아닌 구간4에서 높게 나타나는 것은 최소 물사용량 조건 때문이다. 최소량 30을 사용하게 되면 구간2, 3에서의 가격이 상승하게 된다. 구간2와 3에서 양수발전의 가치가 동일하게 나온 것은 가치의 평활화(Levelizing)가 이루어졌기 때문이다. 부하구간 7의 환산비용이 구간 6보다 작게 나오지만 구간7에서 이미 최대로 펌핑을 하기 때문에 더 이상 평활화를 시킬 수가 없다.

평활화 작용을 확인하기 위해 각 구간별 시장가격의 분포를 나타내면 다음 그림 2와 같다. 분포의 차이를 분명히 나타내기 위해 2~4 구간과 6,7 구간만을 확대해서 나타낸다.

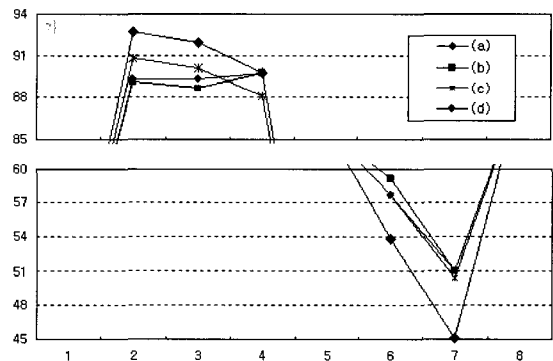


그림 2 양수발전계획 방식별 시장가격의 분포  
Fig. 2 Market Price Pattern in Each Scheduling Method

양수발전을 하지 않는 (a)의 경우에 시장가격의 편차가 가장 크고, MO가 계획하는 (b)의 경우에 편차가 가장 작게 나타난다. 발전사가 계획하는 (c)의 경우는 양수발전을 하지 않는 (a)에 가까운 패턴을 나타내는데 이는 발전사의 이득을 목적으로 양수계획을 할 때 첨두사감의 효과가 낮음을 의미한다. 계획 주체가 혼합형인 (d)의 경우는 발전계획은 (b) 패턴에 가깝고 양수계획은 (c)에 가깝게 나타난다. 이는 발전은 MO가 계획하고 양수는 발전사가 계획하는 특징이 그대로 나타난 것이다.

사회적 후생과 양수발전사의 이득 관점에서 각 방식을 비교하면 표 6과 같다. 사회적 후생은 양수발전을 하지 않을 때 (a)가 가장 적고 MO가 계획할 때(b)가 가장 크게 나타난다. 양수발전과 화력발전(G1)의 이득을 합한 발전사 이득은 발전사가 계획할 때(c)가 가장 크고 (a)의 경우가 가장 적게 나타난다. 양수발전의 이득만을 보면 (c) 보다 혼합형의 (d)에서 더 크게 나타나는데 발전사 목적함수는 화력발전기에서의 이득을 합한 것이므로 발전사는 (c)를 선호하게 된다. 이러한 결과는 양수발전의 효과나 발전계획의 주체에 따른 특성에 잘 부합함을 알 수 있다.

표 6 사회적 후생과 이득 측면에서의 비교

Table 6 Comparisons of Social Welfare and Profits

	사회적 후생	양수발전 이득	발전사 이득
(a)	129636	0	10179
(b)	130116	253.8	10243
(c)	129996	295.3	10313
(d)	130108	297.9	10299

## 6. 결 론

본 논문은 전력시장에서 양수발전기의 경쟁적인 운영전략을 연구하였다. 양수발전기 운용계획의 주체가 시장운영자인 경우, 양수발전기 소유 발전사인 경우, 그리고 발전은 시장운영자, 양수는 발전사가 담당하는 혼합형태의 경우에 대해서 정식화와 균형조건을 유도하였다. 사례연구에서는 양수발전기를 운용하지 않는 경우를 포함해서 네 가지에 대해 경쟁적 양수발전계획의 효과를 비교분석하였다. 양수발전기를 시장운영자가 계획할수록 시장가격의 첨두가 삭감되는 평활화 현상이 강하게 나타나고, 발전사가 계획할수록 물의 사용을 전략적으로 이용하는 현상이 나타나는데, 양수발전의 주체에 따른 보편적 특성에 부합하는 결과가 정량적으로 산출됨을 확인하였다. 하지만 이러한 비교는 첨두부하의 삭감 효과에 대한 차이이고 양수발전에 대한 가격정책 및 예비력 등의 특성은 고려하지 않았기 때문에 양수발전기의 경쟁적 운영에 대한 전반적인 결론이라 하기는 어렵다.

## 참 고 문 헌

- [1] K.W. Li, and A.P. Priddy, Power Plant System Design, John Wiley & Sons, 1985.
- [2] 전력거래소 홈페이지, <http://www.kpx.or.kr>
- [3] 김남일, "전력도매시장의 시장참여자 행태분석: 게임이론적 접근," 에너지경제연구원, 연구보고서, 2003.11.
- [4] N. Lu, J.H. Chow, and A. Desrochers, "Pumped - Storage hydro-Turbine Bidding Strategies in a Competition Electricity Market," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.19, No.2, pp.834-841, May, 2004.
- [5] E. Ni, P.B. Luh, and S. Rourke, "Optimal Integrated Generation Bidding and Scheduling with Risk Management under a Deregulated Power Market," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.19, No.1, pp.600-609, February, 2004.
- [6] S. Al-Agtash, "Hydrothermal Scheduling by Augmented Lagrangian: Consideration of Transmission Constraints and Pumped-Storage Units," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.16, No.4, pp.750-756, November, 2001.
- [7] X. Guan, P. Luh, H. Yan, and P. Rogan, "Optimization-Based Scheduling of Hydrothermal Power Systems with Pumped-Storage Units," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.9, No.2, pp.1923-1031, May, 1994.
- [8] A.J. Wood, and B.F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, 1996.

## 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(공학). 1995년 전력연구원 위촉연구원. 2001년 미국 Univ. of Texas (Austin) 방문교수. 1996~현재 단국대 공대 전기공학과 부교수.

Tel : 031-8005-3604

E-mail : khlee@dku.edu