

동적게임이론을 이용한 최적입찰전략수립

An Optimal Bidding Strategy Solution using Dynamic Game Theory

姜東周*·文英煥**·金發鎬***

(Kang, Dong-Joo · Moon, Young-Hwan · Kim, Balho)

Abstract - In a dynamic game where the players move in a periodical sequence, each player observes the strategy of the others. So the players who move later in a game get to know the moves of others having made before them. Those who move earlier must take this into account in devising their optimal strategy. In the Poolco model, the bidding game is executed periodically. The player participating in the bidding game accumulates the information of its own and others' strategies, and payoffs through the repeated bidding process. Thereby, the players in this game would be able to map out how to get the maximum profit, and get closer to the optimal strategy. This paper presents a mathematical modeling for a player to determine his or her optimal strategy at period T, based on the information acquired from the previous rounds for the periods, T-1, T-2, and so on. The proposed modeling is demonstrated with a dynamic game theory.

Key Words : bidding game, dynamic game, optimal strategy, payoff, repeated bidding process

1. 서론

전력 산업의 규제가 완화됨에 따라, 계통의 운영 방식이 크게 바뀌고 있다. 기존의 수직통합체제에서 하나의 주체에 의해 계통의 발전과 공급이 이루어지던 구조에서 시장에 참여하여 서로 경쟁하게 되는 다수의 의사 결정주체들에 의해 운영되는 구조로 개편되고 있는 것이다[1,2,3]. 경제학적인 관점에서 이들 주체들은 자신의 비용과 이득을 고려하여 이득을 극대화하기 위해 행동하게 되며, 결과적으로 광범위한 범위에 산재해 있는 자원을 효율적으로 할당하는 효과를 가져 오게 된다[4]. 이러한 이득극대화를 위한 의사결정과정은 경쟁 상태에 있는 다른 주체의 전략을 예측하고, 그에 대응하는 전략을 수립하는 개념이다[5]. 본 논문에서는 발전경쟁체제의 풀(pool)시장에서 $t-2, t-1$ 기의 정보를 바탕으로 t 기의 최적입찰전략을 수립할 수 있는 동적 게임(dynamic game)을 이용한 입찰전략수립 알고리즘을 제안한다.

으로써 끝나는 게임이 되는 죄수의 딜레마게임이나 정의 결과 같은 게임이 아니라, 한 선수 또는 여러 선수가 취한 전략을 보고 다시 전략을 선택하는 게임으로서 다단계게임 형태를 의미한다. 이러한 형태의 게임 예로서는 파점이론의 스타펠버그 모형, 산업조직론의 진입저지모형, 물건을 사고 팔기 위해서 가격을 흥정하는 모형 등을 들 수 있다[6]. 이러한 동적인 게임을 분석하기 위해서는 정적인 게임의 분석과는 다른 방법이 필요한데, 이미 실시한 전략과 그에 따른 보상을 알 수 있기 때문에 중간에 전략을 선택하는 과정에서 이러한 과거의 전략에 대한 정보를 얻게 되며, 이를 활용할 필요가 있기 때문이다. 따라서 동적인 게임의 분석에는 이러한 중간 과정의 정보 및 전략을 이용할 수 있는 개념을 포함하는 새로운 균형개념이 필요하고 또한 점차 발전해가고 있는 시점에 있다. 본 논문에서는 이러한 동적 게임의 균형을 입찰과정에 적용시켜 최적전략을 수립하는 과정을 수학적으로 분석하고 모델링 하였다.

2. 본론

2.1 동적 게임(dynamic game)

동적 게임이라 함은 선수들이 동시에 한번 전략을 결정함

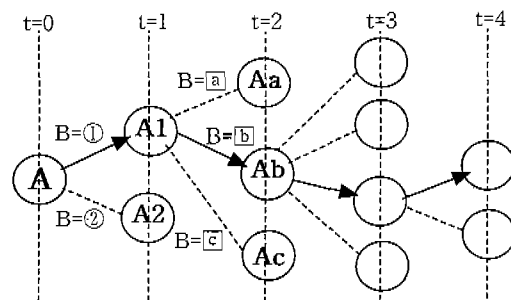


그림 1 동적게임의 개념도
Fig. 1 The dynamic game flow

* 準會員 : 韓國電氣研究院 委嘱研究員
** 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員 · 工博
*** 正會員 : 弘益大學 電子電氣學科 助教授 · 工博
接受H字 : 2002年 1月 23日
最終完了 : 2002年 2月 27日

그림 1은 두명의 게임참여자(A,B)가 존재할 경우의 행동 패턴을 트리 형태의 state diagram으로 개념화한 것으로 A의 관점에서 도식화하였다. t=0의 시점에서 A는 두 가지 선택안을 가지게 된다. 경쟁자인 B가 ①안을 선택할 경우 A는 A1의 전략을 선택함으로써 t=1 시점에서 가장 큰 이득을 얻을 수 있으며, 만약 B가 ②안을 선택하게 되면 A는 A2안을 선택함으로써 자신의 이득(payoff or profit)을 극대화할 수 있음을 나타내고 있다. t=2 시점에서도 마찬가지로 B=①, ②, ③의 세가지 선택을 할 수 있으며, A는 그에 따라 자신의 이득을 극대화할 수 있는 전략 Aa, Ab, Ac를 각각 선택하게 된다. B의 입장에서조차 마찬가지로 선택 가능한 ①, ②의 안 중 A가 A1을 선택할 경우 ①안을 선택함으로써 자신의 최대이득을 얻을 수 있으며, A가 A2를 선택할 경우 B는 ②를 선택하여 자신의 이득극대화를 달성할 수 있는 것이다. 이 때 t=1 시점에서의 균형점은 두 가지가 존재하게 되며 이 때 두 균형점(A1, ①), (A2, ②)을 t=1 시점에 한정된 Local Optima(or equilibria)라고 할 수 있다. 그리고 이 2가지의 균형점 중 보다 큰 이득(payoff or profit)을 제공하는 쪽이 t=1에서의 Global optimum이 된다. 이러한 개념을 표 형태의 전략형 게임으로 표현해 보면 다음과 같다.

t=1 Local Optima

| | | |
|-------|---------|---------|
| A \ B | ① | ② |
| A1 | (A1, ①) | (A1, ②) |
| A2 | (A2, ①) | (A2, ②) |

if $Pf(A1, ①) > Pf(A2, ②)$ 이면

| | | |
|-------|---------|---------|
| A \ B | ① | ② |
| A1 | (A1, ①) | (A1, ②) |
| A2 | (A2, ①) | (A2, ②) |

Global Optimum (or Equilibrium)

※ 여기서 Pf는 이득(profit) 함수

그림 2 전략형게임의 균형점(when t=1)

Fig. 2 The equilibrium point at t=1 in strategic-form game

t=2인 경우도 $Pf(Ab, ②) > Pf(Aa, ①) \& Pf(Ac, ③)$ 의 결과를 가정함으로써 (Ab, ②)가 t=2에서의 균형점으로 결정된다[그림1, 그림3].

t=2 Local Optima

| | | | |
|-------|---------|---------|---------|
| A \ B | a | b | c |
| Aa | (Aa, a) | (Aa, b) | (Aa, c) |
| Ab | (Ab, a) | (Ab, b) | (Ab, c) |
| Ac | (Ac, a) | (Ac, c) | (Ac, ③) |

Global Optimum (or Equilibrium)

그림 3 전략형게임의 균형점(when t=2)

Fig. 3 The equilibrium point at t=2 in strategic-form game

이와 같은 과정으로 매시간대별 균형점이 도출될 수 있다. 각 시간대별의 최적균형점은 시간축을 고려했을 때 다시 Local Optima가 되고 시간의 흐름에 따른 반복적인 게임 과정을 통해 전체 게임에서의 최종적인 Global Optimum (equilibrium: 균형점)으로 수렴해가게 된다. 이러한 개념을 도식화해보면 그림 3과 같다. 그림 1을 지면에 수직으로 내려다본 그림이라고 할 때 그림 3은 그림 1의 종단면을 나타낸 것으로 이해할 수 있다.

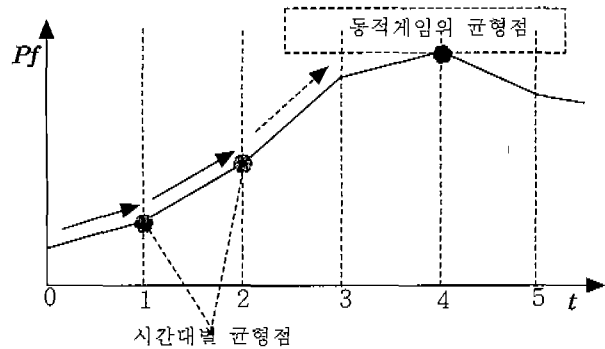


그림 4 동적게임에서의 최적해 탐색 과정

Fig. 4 The search process for optimal solution

2.2 입찰 게임(bidding game)

입찰과정은 주기적으로 행해지게 되며 반복적인 경험을 통해 발전기들은 이득 극대화를 위한 안정적인 최적 전략을 수립할 수 있게 된다[7]. 이는 게임이론에서 동적 게임을 적용 시키기에 매우 적합한 상황이라 할 수 있다. 동적 게임이라는 선수들이 동시에 한 번 전략을 설정함으로써 끝나게 되는 죄수의 딜레마 같은 게임이 아니라, 한 선수 또는 여러 선수가 취한 전략을 보고 다시 전략을 선택하는 게임으로서 다단계게임 형태를 의미한다. 이러한 동적인 게임을 분석하기 위해서는 정적인 게임의 분석과는 다른 방법이 필요하다. 왜냐하면, 이미 실시한 전략을 알 수 있기 때문에 중간에 전략을 선택하는 과정에서 이러한 과거의 전략에 관한 정보를 얻게 되며, 이를 활용할 필요가 있기 때문이다. 두 발전기는 t-2, t-1기의 경험을 통해 자신의 전략에 대한 보상을 알게 되며, 그 정보를 바탕으로 t기의 전략을 수립할 수 있다. 두 발전기가 제출한 입찰가격 중 높은 가격이 시장 가격 ρ_{MCP} 로 결정되며 그 값은 이득 함수에 대입되어 의사결정과정의 근거로 활용된다. 본 논문에서는 이러한 입찰게임의 문제를 정식화하고 해석의 간소화를 위해 다음과 같은 가정을 적용하도록 한다.

- 1) 입찰에 참여하는 발전기를 2대로 가정하고, 시장결정가격 (ρ_{MCP})은 계통에 투입되는 두 발전기 A,B의 입찰제출가격(한계입찰가격) ρ_A, ρ_B 중 높은 값으로 결정된다.
- 2) 낮은 입찰제출가격(ρ_i)을 제출한 발전기가 계통 투입의 우선권을 가진다.

- 3) 두 사업자는 서로 상대방의 선택 가능한 전략들에 대한 정보를 가진다(완전정보게임). 하지만, 구체적으로 어떤 특정 전략을 선택할 지에 대해서는 알지 못한다. 즉, A사업자는 B사업자가 $S_B^1, S_B^2, \dots, S_B^n$ 의 선택 가능한 전략들을 가지고 있음을 알 수 있지만, 그 n 개의 전략 중 어느 전략을 선택할 지에 대해서는 알 수 없다(여기서, S_i^j 의 S는 전략을 의미하는 strategy의 intial).
- 4) 게임이론에서의 내쉬균형공리에 의하면 두 사업자는 입찰 게임에 있어서 i) 자신의 이득 극대화를 위해 최선의 전략(best response strategy)을 택하고 ii) 자기예상실현의 특성(self-fulfilling property)에 의해 상대방의 전략을 추정하여 자신의 전략을 결정하게 된다[8]
- 5) 문제 해석의 단순화를 위해 최소계통투입단위이자 최소입찰용량단위인 Q_1, Q_2, Q_3 의 단위용량증분 ΔQ 는 동일한 값을 가진다고 설정(즉, $Q_1^A = Q_1^B, Q_2^A = Q_2^B, \dots, Q_n^A = Q_n^B$ 이고 $Q_3^A - Q_2^A = Q_3^B - Q_2^B = Q_2^A - Q_1^A = Q_2^B - Q_1^B = \Delta Q$)
- 6) 본 논문에서는 발전공급량과 시장가격에 대한 탄력성을 고려하지 않는다. 따라서 계통수요 D는 임의의 고정된 값으로 설정한다(사례연구).
- 7) 두 명의 발전기만을 게임의 주체로 고려하기 위해 (가정 1) 공급부족($Q_i^A + Q_m^B < D_R$)인 경우에는 제 3의 사업자가 시장결제가격 ρ_{MCP} 의 수준으로 나머지 부하를 공급하고, 공급과잉($Q_i^A + Q_m^B > D_R$)인 경우에는 마지막(두 사업자를 고려할 경우는 두 번째) 사업자의 공급 희망량 중 과잉부분만큼 공급을 제한.

2.3 동적게임을 적용한 입찰게임분석

본 논문에서 각 발전기는 t-2, t-1기의 입찰게임으로 획득한 이득에 대한 정보를 바탕으로 t기의 입찰 전략을 수립하게 된다. 2단계 앞인 t-2 단계의 정보까지 필요한 이유는 1단계 앞인 t-1 단계에서의 발전사업자 i의 한계증분이득 ΔPF_i^{t-1} 을 구하기 위해서이고, $\Delta PF_i^{t-1} = PF_i^{t-1} - PF_i^{t-2}$ 로 정의된다. 임의의 발전기 i가 t기에 획득한 이득을 다음과 같이 입찰가격 ρ_i^t [\$/MW]와 입찰전력 Q_i^t [MW]의 함수로 정의한다.

$$PF_i^t = \rho_{MCP}^t Q_i^t - C_i^t(Q_i^t) \quad (1)$$

여기서 Q_i^t 는 발전기 i가 t시점에 입찰에 응하는 입찰량(발전량)을 나타내는 것이며, $C_i^t(Q_i^t)$ 는 Q_i^t 만큼의 전력을 발전하는데 들어가는 비용, 즉 발전비용(generation cost)을 의미한다. 시장결제가격(Market Clearing Price) ρ_{MCP}^t 는 t기에 제출받은 각 발전기의 입찰가격 중 가장 높은 값으로 결정된다. 그러므로

$$\rho_{MCP}^t = \text{MAX}[\rho_1^t, \rho_2^t, \dots, \rho_n^t] \quad (2)$$

해석의 간략화를 위해 발전기의 수를 둘로 한정하면

$$\rho_{MCP}^t = \text{MAX}[\rho_A^t, \rho_B^t] \quad (3)$$

로서 A,B 두 발전기의 입찰 가격 중 높은 값으로 시장 가격이 결정된다. (3)식을 (1)식에 대입하고 A발전기의 입장에서 수익을 계산하면,

$$PF_A^t = \text{MAX}[\rho_A^t, \rho_B^t] Q_A^t - C_A^t(Q_A^t) \quad (4)$$

로 표현될 수 있고, (4)식에서 $\rho_A^t, \rho_B^t, Q_A^t$ 는 t-1기 $\rho_A^{t-1}, \rho_B^{t-1}, Q_A^{t-1}$ 기의 함수가 된다.

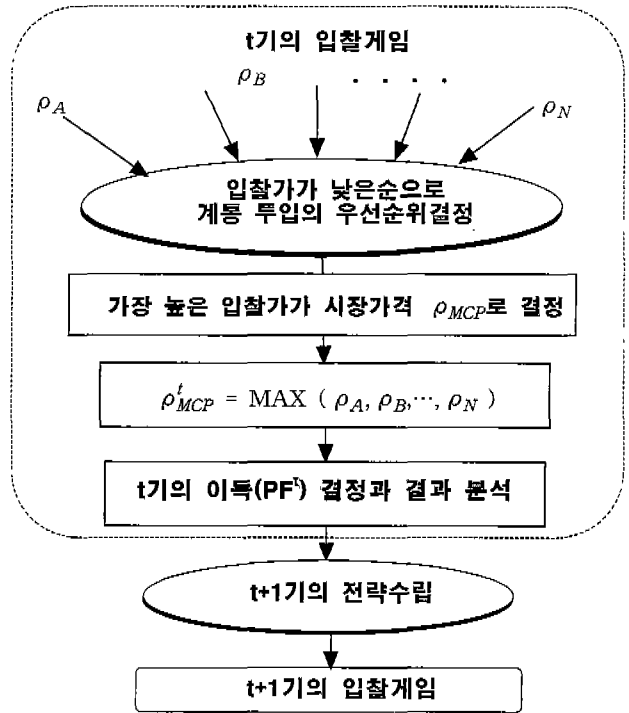


그림 5 동적입찰게임과정
Fig. 5 Dynamic bidding game process

임의의 t기에서 A의 전략을 수립하는데 영향을 미치는 의사결정변수는 $\rho_A^{t-1}, \rho_A^{t-2}, Q_A^{t-1}, Q_A^{t-2}, PF_A^{t-1}, PF_A^{t-2}$ 의 여섯 가지이고, 이들 변수의 조합에 따라 다음과 같은 총 8가지 경우의 수를 생각할 수 있다.

표 1 t-1기 입찰게임결과의 경우의 수
Table 1 Possible cases of t-1 period bidding game

| $\Delta PF_A^{t-1} > 0$ | $\Delta PF_A^{t-1} < 0$ |
|--|--|
| $\rho_A^{t-1} > \rho_A^{t-2}, Q_A^{t-1} > Q_A^{t-2}$ | $\rho_A^{t-1} > \rho_A^{t-2}, Q_A^{t-1} < Q_A^{t-2}$ |
| $\rho_A^{t-1} > \rho_A^{t-2}, Q_A^{t-1} < Q_A^{t-2}$ | $\rho_A^{t-1} < \rho_A^{t-2}, Q_A^{t-1} < Q_A^{t-2}$ |
| $\rho_A^{t-1} < \rho_A^{t-2}, Q_A^{t-1} > Q_A^{t-2}$ | $\rho_A^{t-1} < \rho_A^{t-2}, Q_A^{t-1} > Q_A^{t-2}$ |
| $\rho_A^{t-1} < \rho_A^{t-2}, Q_A^{t-1} < Q_A^{t-2}$ | $\rho_A^{t-1} < \rho_A^{t-2}, Q_A^{t-1} < Q_A^{t-2}$ |

만약 여기서 발전기의 비용함수와 가격함수를 2차 함수 형태로 정의한다면 입찰가 $\rho_A^{t-1}, \rho_A^{t-2}$ 는 Q_A^{t-1}, Q_A^{t-2} 의 함수로 표현될 수 있다. A, B 두 발전기의 t-2, t-1기 비용함수는

$$C_A^{t-2}(Q_A^{t-2}) = a_A^{t-2} + b_A^{t-2} Q_A^{t-2} + c_A^{t-2} Q_A^{t-2^2} \text{ [\$]} \quad (8)$$

$$C_B^{t-2}(Q_B^{t-2}) = a_B^{t-2} + b_B^{t-2} Q_B^{t-2} + c_B^{t-2} Q_B^{t-2^2} \text{ [\$]} \quad (9)$$

$$C_A^{t-1}(Q_A^{t-1}) = a_A^{t-1} + b_A^{t-1} Q_A^{t-1} + c_A^{t-1} Q_A^{t-1^2} \text{ [\$]} \quad (10)$$

$$C_B^{t-1}(Q_B^{t-1}) = a_B^{t-1} + b_B^{t-1} Q_B^{t-1} + c_B^{t-1} Q_B^{t-1^2} \text{ [\$]} \quad (11)$$

가격함수는

$$P_A^{t-2}(Q_A^{t-2}) = \alpha_A^{t-2} + \beta_A^{t-2} Q_A^{t-2} + \gamma_A^{t-2} Q_A^{t-2^2} \text{ [\$]} \quad (12)$$

$$P_B^{t-2}(Q_B^{t-2}) = \alpha_B^{t-2} + \beta_B^{t-2} Q_B^{t-2} + \gamma_B^{t-2} Q_B^{t-2^2} \text{ [\$]} \quad (13)$$

$$P_A^{t-1}(Q_A^{t-1}) = \alpha_A^{t-1} + \beta_A^{t-1} Q_A^{t-1} + \gamma_A^{t-1} Q_A^{t-1^2} \text{ [\$]} \quad (14)$$

$$P_B^{t-1}(Q_B^{t-1}) = \alpha_B^{t-1} + \beta_B^{t-1} Q_B^{t-1} + \gamma_B^{t-1} Q_B^{t-1^2} \text{ [\$]} \quad (15)$$

로 표현될 수 있고, 그에 따라 입찰가는 다음과 같다.

$$\rho_A^{t-2} = \frac{dP_A^{t-2}}{dQ_A^{t-2}} = \beta_A^{t-2} + 2\gamma_A^{t-2} Q_A^{t-2} \text{ [\$/MW]} \quad (16)$$

$$\rho_B^{t-2} = \frac{dP_B^{t-2}}{dQ_B^{t-2}} = \beta_B^{t-2} + 2\gamma_B^{t-2} Q_B^{t-2} \text{ [\$/MW]} \quad (17)$$

$$\rho_A^{t-1} = \frac{dP_A^{t-1}}{dQ_A^{t-1}} = \beta_A^{t-1} + 2\gamma_A^{t-1} Q_A^{t-1} \text{ [\$/MW]} \quad (18)$$

$$\rho_B^{t-1} = \frac{dP_B^{t-1}}{dQ_B^{t-1}} = \beta_B^{t-1} + 2\gamma_B^{t-1} Q_B^{t-1} \text{ [\$/MW]} \quad (19)$$

본 논문에서는 전략결정을 위한 독립변수를 하나로 두기 위해 모든 게임에서의 가격함수를 동일하게 정의한다. 이는 가격함수를 동일하게 두면 전략벡터 $(\rho_{(t)}^0, Q_{(t)}^0)$ 에 $\rho_{(t)}^0 = P_{(t)}^0/Q_{(t)}^0$ 를 적용하여 제어변수를 하나로 만들 수 있기 때문이다. 그러므로,

$$\dots = P_A^{t-2}(Q_A) = P_A^{t-1}(Q_A) = P_A^t(Q_A) = P_A^{t+1}(Q_A) = \dots \quad (20)$$

$$\dots = P_B^{t-2}(Q_B) = P_B^{t-1}(Q_B) = P_B^t(Q_B) = P_B^{t+1}(Q_B) = \dots \quad (21)$$

가 되며, (20)와 (21)에 의해 (12)~(19)식에서의 비용함수와 가격함수의 시간대별 계수는 동일한 계수값을 가지게 되며, (12)~(19)의 계수들은 A 발전기의 경우 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dots = a_A^{t-2} = a_A^{t-1} = a_A^t = a_A^{t+1} = \dots \quad (22)$$

$$\dots = b_A^{t-2} = b_A^{t-1} = b_A^t = b_A^{t+1} = \dots \quad (23)$$

$$\dots = c_A^{t-2} = c_A^{t-1} = c_A^t = c_A^{t+1} = \dots \quad (24)$$

$$\dots = \alpha_A^{t-2} = \alpha_A^{t-1} = \alpha_A^t = \alpha_A^{t+1} = \dots \quad (25)$$

$$\dots = \beta_A^{t-2} = \beta_A^{t-1} = \beta_A^t = \beta_A^{t+1} = \dots \quad (26)$$

$$\dots = \gamma_A^{t-2} = \gamma_A^{t-1} = \gamma_A^t = \gamma_A^{t+1} = \dots \quad (27)$$

따라서 (8)~(15)식은 시간 t에 영향받지 않는 A, B 두 발전기의 고유한 비용·가격 함수로 일원화하여 설정할 수 있다.

$$C_A^{(t)}(Q_A^{(t)}) = a_A + b_A Q_A^{(t)} + c_A Q_A^{(t)^2} \quad (28)$$

$$C_B^{(t)}(Q_B^{(t)}) = a_B + b_B Q_B^{(t)} + c_B Q_B^{(t)^2} \quad (29)$$

$$P_A^{(t)}(Q_A^{(t)}) = \alpha_A + \beta_A Q_A^{(t)} + \gamma_A Q_A^{(t)^2} \quad (30)$$

$$P_B^{(t)}(Q_B^{(t)}) = \alpha_B + \beta_B Q_B^{(t)} + \gamma_B Q_B^{(t)^2} \quad (31)$$

여기서 (t)는 임의의 시간대 t를 나타내는 것이며, (28)~(31)식은 비용·가격함수의 계수들이 이러한 시간 t에 무관함을 나타내고 있다. 이러한 일련의 개념들을 그림 2에서 도식화하였다. 본 논문에서

서는 두 발전기의 발전용량한계를 각각 Q_A, Q_B 로 한정하고 발전량의 최소변동한계단위(ΔQ)를 $0.05 Q_A, 0.05 Q_B$ 로 정의한다. 여기서 0.05라는 수는 특정한 정량적 의미를 가지는 것은 아니며, 입찰량의 최소 단위를 전체 발전용량의 1/20정도로 임의 설정한 값을 밝혀둔다. 경우에 따라, 보다 정밀한 단위의 결과를 얻고자 하는 경우는 0.05보다 작은 값으로 설정할 수도 있을 것이고, 대강의 값만을 알아보고자 할 경우 0.05보다 큰 수를 설정하여, 계산을 단순화할 수도 있을 것이다. 계수를 작게하여 단위 변동량을 작게 할 수록 그림 5,6,7에서의 수렴폭이 감소하여 거의 일정값(균형점)에 수렴하게 될 것이며, 반대로 크게할수록 수렴폭 역시 넓어지게 되어 대강의 수렴범위 혹은 균형범위만을 알 수 있을 뿐이다.

Money

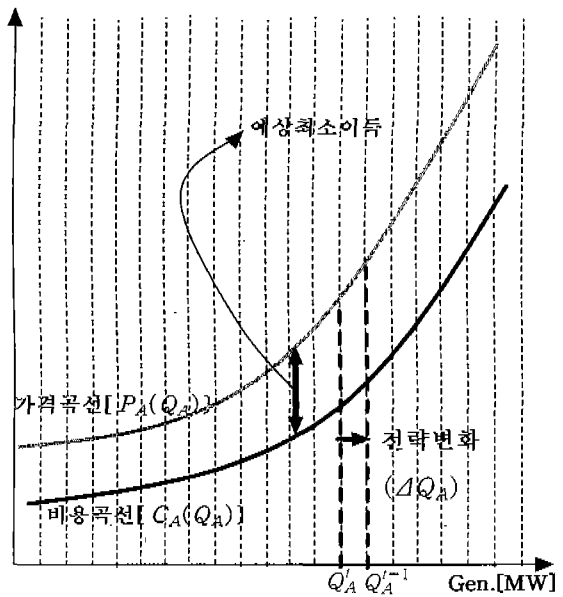


그림 6 A 발전기의 비용·가격함수와 전략변화
Fig. 6 The cost·price functions & strategy change

(16)~(19)식에 의해 $\rho_{(t)}^0$ 는 $Q_{(t)}^0$ 의 함수로 표현될 수 있으므로 표 1은 다음의 표 2로 축소될 수 있다.

표 2 간소화된 입찰결과 경우의 수(I)

Table 2 The reduced cases of bidding game(I)

| | |
|---------------------------|---------------------------|
| $PF_A^{t-1} > PF_A^{t-2}$ | $PF_A^{t-1} < PF_A^{t-2}$ |
| $Q_A^{t-1} > Q_A^{t-2}$ | $Q_A^{t-1} > Q_A^{t-2}$ |
| $Q_A^{t-1} < Q_A^{t-2}$ | $Q_A^{t-1} < Q_A^{t-2}$ |

$\Delta PF_A^{t-1} = PF_A^{t-1} - PF_A^{t-2}, \Delta Q^{t-1} = Q_A^{t-1} - Q_A^{t-2}$ 로 정의하면

표 2는 다시 표 3의 형태로 다시 정리될 수 있다.

표 3 간소화된 입찰결과 경우의 수(II)

Table 3 The reduced cases of bidding game(II)

| | | | |
|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| $\Delta PF_A^{t-1} > 0$ | | $\Delta PF_A^{t-1} < 0$ | |
| ① | ② | ③ | ④ |
| $\Delta Q_A^{t-1} > 0$ | $\Delta Q_A^{t-1} < 0$ | $\Delta Q_A^{t-1} > 0$ | $\Delta Q_A^{t-1} < 0$ |

표 4에서 ①의 경우는 t-2 대비 t-1기에서 발전량을 증가시켰을 때 이득도 증가하였으므로 t기에서는 발전량을 증가(+ΔQ)시킨다. ②의 경우, t-1기에서 발전량을 줄였는데 이득은 증가하였으므로 t기에서는 발전량을 줄이는 전략(-ΔQ)을 택한다. ③의 경우 발전량을 증가할수록 이득이 감소하므로 t기에서는 발전량을 줄인다. ④의 경우 발전량을 줄일수록 이득이 감소하므로 t기에서 발전량을 증가시킨다. 정리하면 t-1기에서의 시점에서 ①,④일 경우는 t기에서 발전량을 증가시키고, ②,③의 경우는 t기에서 발전량을 감소시킨다. 본 논문에서는 문제의 간소화를 위해 발전량의 피드백 승수(feedback gain or multiplier)를 1로 통일한다. 이러한 과정을 도식화하면 그림 3과 같다.

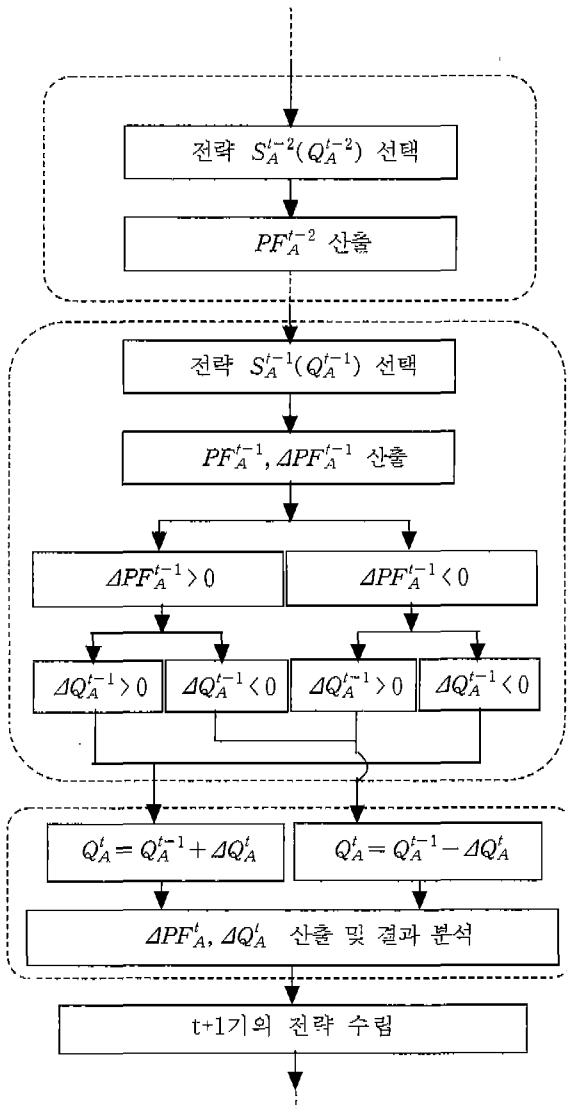


그림 7 A 발전기의 입찰전략수립과정
Fig. 7 The building process of bidding strategy

즉 이러한 과정은 임의의 시점 t에서의 전략에 따른 이득 PF_A^t 를 분석하고 그것을 신호로 ΔQ_A^t 의 보정성분이 더해져 다시 t+1기의 전략 Q_A^{t+1} 이 산출되는 피드백 제어시스템의 구조로도 생각할 수 있다. 본 논문에서는 발전입찰가 ρ_A^t 를 Q_A^t 의 함수로 정의하였으므로 독립제어변수는 Q_A^t 하나가 된다.

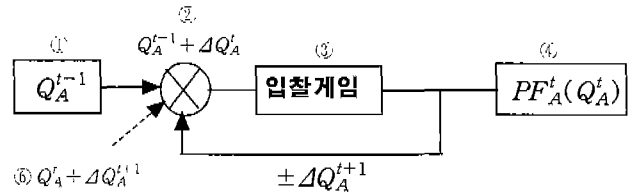


그림 8 A 발전기의 전략수립 피드백 시스템
Fig. 8 The feedback process for building strategy

3. 사례 연구

입찰에 참여한 A, B 두 발전기를 가정하고, 두 발전기의 사양을 아래의 표 4와 같이 설정한다. 계통수요는 시간에 상관없이 $D_t=600$ 으로 일정하다고 가정한다. 단, 공급량이 부족할 경우는 제 3의 발전기가 시장가격으로 공급한다고 가정한다.

표 4 A, B 두 발전기의 파라미터
Table 4 The parameters for generator A, B

| | A 발전기 | B 발전기 |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 발전비용[\$] | $225+8.4 Q_A+0.0025 Q_A^2$ | $400+7.5 Q_B+0.0022 Q_B^2$ |
| 공급가격[\$] | $350+8.9 Q_A+0.0032 Q_A^2$ | $455+8.1 Q_B+0.0025 Q_B^2$ |
| 입찰가[\$/MW] | $8.9+0.0064 Q_A$ | $8.1+0.0050 Q_B$ |
| 발전용량[MW] | $50 \leq Q_A \leq 350$ [MW] | $50 \leq Q_B \leq 450$ [MW] |
| 발전단위[MW] | 15[MW] | 20[MW] |
| 초기치[MW] | $Q_A^0 = 200, Q_A^1 = 215$ | $Q_B^0 = 250, Q_B^1 = 270$ |

이러한 조건 하에 입찰게임의 시간별 결과는 표 5에서 보여지고 있다.

표 5 A, B 두 발전기의 동적게임
Table 5 The dynamic game results

| t | A 발전기 | | | | | B 발전기 | | | | |
|----|---------|------------|----------|-----------------|----------------|---------|------------|----------|-----------------|----------------|
| | Q_A^t | ρ_A^t | PF_A^t | ΔPF_A^t | ΔQ_A^t | Q_B^t | ρ_B^t | PF_B^t | ΔPF_B^t | ΔQ_B^t |
| 0 | 200 | 10.17 | 31.0 | - | - | 250 | 9.35 | 132.5 | - | - |
| 1 | 215 | 10.27 | 61.5 | +30.5 | +15 | 270 | 9.45 | 187.5 | +55.0 | +20 |
| 2 | 230 | 10.37 | 95.9 | +34.4 | +15 | 290 | 9.55 | 247.3 | +59.8 | +20 |
| 3 | 245 | 10.47 | 132.1 | +36.2 | +15 | 310 | 9.65 | 309.3 | +62.0 | +20 |
| 4 | 260 | 10.57 | 170.2 | +38.1 | +15 | 330 | 9.75 | 373.5 | +64.2 | +20 |
| 5 | 275 | 10.67 | 216.3 | +46.1 | +15 | 350 | 9.85 | 440.0 | +66.5 | +20 |
| 6 | 290 | 10.77 | 270.9 | +54.6 | +15 | 370 | 9.95 | 508.7 | +68.7 | +20 |
| 7 | 305 | 10.87 | 333.5 | +62.6 | +15 | 390 | 10.05 | 579.7 | +71.0 | +20 |
| 8 | 290 | 10.77 | 305.1 | -28.4 | -15 | 410 | 10.15 | 570.9 | -8.8 | +20 |
| 9 | 275 | 10.67 | 270.9 | -34.2 | -15 | 390 | 10.05 | 501.7 | -69.2 | -20 |
| 10 | 290 | 10.77 | 305.1 | +34.2 | +15 | 370 | 9.95 | 508.7 | +7.0 | -20 |
| 11 | 305 | 10.87 | 333.5 | +28.4 | +15 | 390 | 10.05 | 579.7 | +71.0 | +20 |
| 12 | 290 | 10.77 | 305.1 | -28.4 | -15 | 410 | 10.15 | 570.9 | -8.8 | +20 |
| 13 | 275 | 10.67 | 270.9 | -34.2 | -15 | 390 | 10.05 | 501.7 | -69.2 | -20 |
| 14 | 290 | 10.77 | 305.1 | +34.2 | +15 | 370 | 9.95 | 508.7 | +7.0 | -20 |
| 15 | 305 | 10.87 | 333.5 | +28.4 | +15 | 390 | 10.05 | 579.7 | +71.0 | +20 |
| 16 | 290 | 10.77 | 305.1 | -28.4 | -15 | 410 | 10.15 | 570.9 | -8.8 | +20 |
| . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |

A 발전기와 B 발전기는 임의의 초기값(입찰희망발전량)에서 시작해서 그 발전량이 가져다 주는 이득을 관찰하고 다음 기에 증가와 감소에 의한 이득 증분의 변화를 관찰, 차기 전략(입찰희망발전량)의 증감 방향을 선택하게 된다. 경험이 축적되면 두 발전기는 획득 가능한 이득의 상한치와 하한치를 추정할 수 있게 되며 그로 인해 A, B 두 발전기가 공히 자신의 이득을 최대로 할 수 있는 입찰 게임의 균형 범위(균형점) 내로 수렴해 가게 된다.

그림 5, 6, 7은 A, B 두 발전기의 동적게임에 대한 시간대별 Q^t, ρ^t, PF^t 에 대한 결과를 각각 도식화한 것이다.

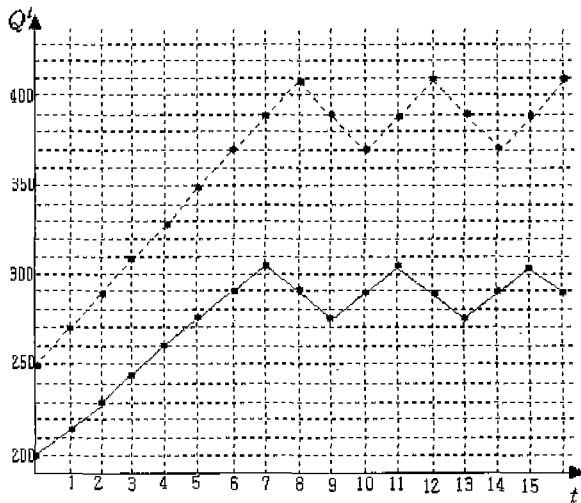
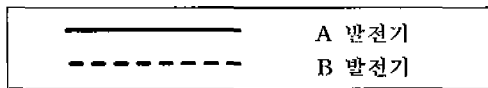


그림 9 시간대별 Q^t 의 변화
Fig. 9 The variation of Q^t on time domain

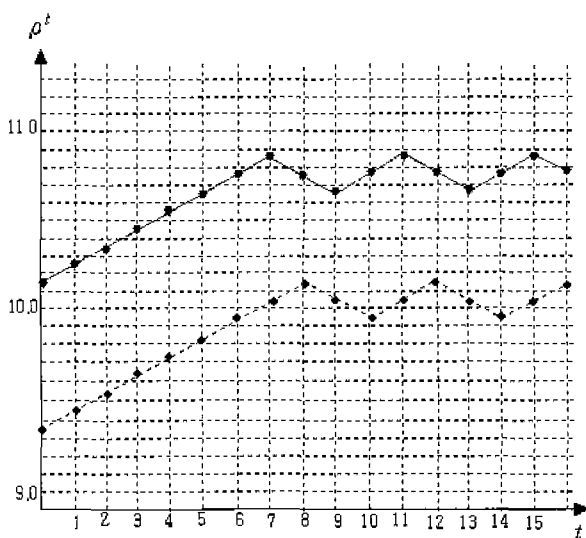


그림 10 시간대별 ρ^t 의 변화
Fig. 10 The variation of ρ^t on time domain

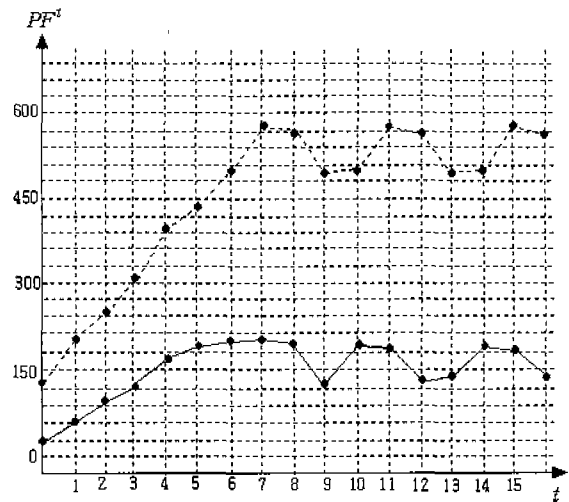


그림 11 시간대별 PF^t 의 변화
Fig. 11 The variation of PF^t on time domain

그림 5, 6, 7에서 볼 수 있듯이 두 발전기의 전략 Q^t, ρ^t 와 그에 따른 결과 PF^t 는 시간이 흐를수록 점차 안정적인 범위 내로 수렴함을 알 수 있다. 상대방의 전략에 대한 정보를 처음에는 알 수 없었지만 반복되는 경험에 의해 상대방과 자신의 이득을 공히 최적화할 수 있는 균형전략의 범위를 발견하게 되는 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 일정시간마다 주기적으로 되풀이되는 입찰과정을 동적 게임(dynamic game)의 측면에서 해석하였다. 제어 시스템의 피드백 원리와 마찬가지로 입찰에 참여하는 발전기는 t-1기의 전략에 대한 보상을 분석하고, t기의 전략을 세우게 되며, 또한 t기의 이득을 산출하게 된다. 이런 과정을 반복하여 t+1, t+2, ...의 게임을 주기적으로 반복하다 보면 일정 범위내로 수렴하게 되는 과정을 관찰할 수 있으며, 그로 인해 적절한 입찰전략을 수립할 수 있다. 본 논문에서는 해석의 간소화를 위해 공급가격함수 $P(Q^t)$ 를 시간에 독립적인 함수로 설정하였고, 이를 위해 입찰가격 ρ^t 와 이득 PF^t 를 단일 변수 Q^t 의 일원변수로 함수화 하였다. 향후로는 가격함수의 시간에 따른 변동 요인도 변수의 하나로 고려하여 함수 구현에 반영할 것이며, 수요의 탄력성을 감안하여, 보다 현실이 반영되고, 복잡해진 게임 상황을 설정하여 연구를 심화시켜 나갈 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] P.F. Penner, Electric Utility restructuring : A Guide to the Competitive Era, Public Utilities Reports, Inc, Vienna, Virginia, 1997
- [2] 김발호, 박종배, "전력산업 구조개편 기본" 기초전력공학공동연구소, August 1999
- [3] Sally Hunt and Graham Shuttleworth, Competition and Choice in Electricity, John Wiley & Sons, 1996.

- [4] R.W. Ferrero, S.M. Shahidehpour, and V.C. Ramesh, Transaction Anaysis in Deregulated Power Systems Using Game Theory, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 3, pp. 1340-1347, August 1997
- [5] R.W. Ferrero, J.F. Rivera, and S.M. Shahidehpour, Application of Games with Incomplete Information for Pricing Electricity in Deregulated Power Pools, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 1, pp.184-189, Feb. 1998
- [6] Avinash Dixit, Susan Skeath, "GAMES OF STRATEGY", pp.337~41, NORTON
- [7] Singh, H., "Introduction to game theory and its application in electric power markets", *IEEE Computer Applications in Power*, Vol. 12 Issue 4, Oct. 1999, pp 18-20, 22
- [8] 박주현, "게임이론의 이해", 도서출판 해남, pp. 50-58, 1998

저 자 소 개



강 동 주 (姜 東 周)

1975년 9월 9일생. 1999년 홍익대 공대 전자전기제어공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 위촉연구원. 관심분야 : 게임이론을 적용한 전력시장거래해석 및 발전사업자의 입찰전략수립기법, 송전선이용료 산정기법, OR, SCM, ERP

Tel : 055-280-1319, Fax : 055-280-1390
E-mail : djkung@keri.re.kr



김 발 호 (金 發 鎬)

1962년 7월 11일 생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 미국 University of Texas at Austin 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 미국 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~ 현재 홍익대 전자전기공학부 조교수

Tel : 02-320-1462, Fax : 02-320-1110
E-mail : bhkim@wow.hongik.ac.kr



문 영 환 (文 英 煥)

1956년 5월 13일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 Univ. of Texas (Arlington) 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구원 전력연구단 시스템제어연구그룹장, 책임연구원. 관심분야 : 시장설계 및 운영, 발전기/제

어제 모델링, HDVC 운용제어, 전력시스템 해석 및 제어

Tel : 055-280-1311, Fax : 055-280-1390
E-mail : yhmoon@keri.re.kr