

최적조류계산을 이용한 최적입찰 전략

김문영* 백영식* 송경빈**
*경북대학교 **승실대학교

An Optimal bidding strategy using optimal power flow

Moon-Young Kim* Young-Sik Baek* Kyung-Bin Song**
*Kyungpook National University **Soongsil University

Abstract - In a competitive electricity market, the transactions of the electric power can be accomplished through the bidding which is submitted by suppliers and consumers. It is essential that the optimal decision for the bidding is required to take a dominant position in the competition. Therefore, in this paper we presents bidding variables from bidding curves of suppliers and consumers and proposes the algorithm of an optimal bidding strategy using optimal power flow. Furthermore, the variation of the optimal bidding is investigated through numerical studies.

경쟁 대상이 된다. 따라서, 입찰곡선의 기울기를 결정하는 입찰변수 k_G 를 설정함과 동시에 경쟁에서 우위를 가질 수 있는 최적입찰 전략에 대한 입찰변수의 해를 구하는 문제가 중요하다. 그림 1의 공급 입찰곡선으로부터 입찰변수 k_G 를 설정하면, 전력공급에 대한 증분비용은 식(1)과 같이 표현된다.

$$P_{Ci} = k_{Gi} m_{Gi} P_{Gi} + P_{Ci}^{\min} \quad (1)$$

식(1)을 전력공급량에 대한 적분으로 입찰을 고려한 발전 비용함수를 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_i(P_{Gi}, k_{Gi}) &= \int_0^{P_{Gi}} P_{Ci} dP_{Gi} \\ &= k_{Gi} \frac{m_{Gi}}{2} P_{Gi}^2 + P_{Ci}^{\min} P_{Gi} \\ &= k_{Gi} a_{Gi} P_{Gi}^2 + b_{Gi} P_{Gi} \quad (2) \end{aligned}$$

1. 서 론

경쟁적 전력시장 구조에서는 전력공급자와 전력수요자들의 공급발전력과 전력소비량에 대한 입찰을 통하여 전력거래가 성사된다. 전력거래소는 시장참여자들의 입찰과 전력계통의 모든 제약등을 고려하여 최적조류계산을 수행함으로써 전력발전과 전력소비의 급전에 대한 전력수급과 시장정산가격을 산정한다. 이러한 상황으로 나타나는 전력가격과 전력수급 정보는 자신의 이익을 최대화하려는 시장 참여자들의 장기적인 면에서 입찰전략 수립에 토대가 된다.[1] 따라서, 경쟁에서 우위를 가질 수 있는 입찰의 최적화 설계에 대한 연구가 필수적으로 요구된다. 그러므로, 이 논문에서는 시장 참여자들이 제출하는 공급·수요 입찰곡선으로부터 입찰변수를 설정하고, 계통의 제약조건들을 포함하는 최적입찰 전략의 정식화 문제를 제안한다. 최적조류계산을 이용하여 정식화 문제를 풀이하는 알고리즘을 제시하고, 사례연구를 통해 적용하여 최적입찰의 변화를 검토한다.

전력수요자의 입찰곡선은 그림 2와 같이 전력소비량과 증분비용의 함수로 단조감소 형태가 되고 선형화가 가능하다. 전력공급자와 마찬가지로, 전력수요자가 제출하는 입찰곡선에서 기울기에 해당되는 부분을 결정하는 것이 경쟁 대상이 되며, 입찰곡선의 기울기를 결정하는 입찰변수 k_D 설정이 경쟁에서 우위를 가질 수 있는 최적입찰 전략의 해가 된다.

2. 본 론

2.1 경쟁적 전력시장의 입찰 곡선

경쟁적 전력시장에서 시장의 운영과 시장정산가격은 시장 참여자들이 제출한 입찰곡선에 의해 결정된다. 전력공급자의 입찰곡선은 다음의 그림 1과 같이 전력공급량과 증분비용의 함수로 단조증가 형태가 되고, 이는 그림과 같이 선형화가 가능하다.

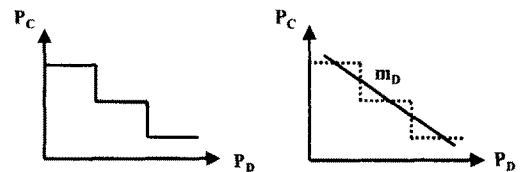


그림 2. 수요 입찰 곡선

그림 2의 수요 입찰곡선으로부터 입찰변수 k_D 를 설정하면, 전력수요에 대한 증분비용은 식(3)과 같이 표현된다.

$$P_{Cj} = k_{Dj} m_{Dj} P_{Dj} + P_{Cj}^{\max} \quad (3)$$

식(3)으로부터 입찰을 고려한 소비자 편익함수를 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} B_j(P_{Dj}, k_{Dj}) &= \int_0^{P_{Dj}} P_{Cj} dP_{Dj} \\ &= k_{Dj} \frac{m_{Dj}}{2} P_{Dj}^2 + P_{Cj}^{\max} P_{Dj} \\ &= k_{Dj} a_{Dj} P_{Dj}^2 + b_{Dj} P_{Dj} \quad (4) \end{aligned}$$

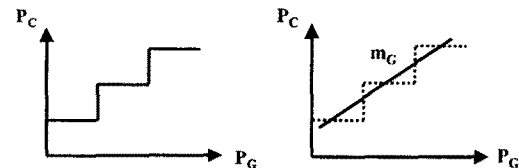


그림 1. 공급 입찰 곡선

전력공급자가 제출하기 위한 입찰곡선에서 기울기에 해당되는 부분을 결정하는 것이 경쟁 시장에서 공급자의

2.2 최적입찰 전략의 정식화

전력시장 참여자는 경쟁에서 우위를 가지기 위해 입찰 전략을 설정하게 된다. 전력공급자인 경우는 생산비용에 이윤을 더하여 입찰을 제출하게 되는데, 이 때 낮은비용의 입찰을 제출할수록 경쟁에서 유리한 위치를 가지게 된다. 전력수요자인 경우는 갖는 편익보다 낮은비용으로 소비를 하기를 희망하지만, 경쟁에서 우위를 가지기 위해서는 높은비용의 입찰을 제출해야 한다. 따라서, 전력수요자의 입찰은 편익과 더불어 최대가 되어야 하며, 전력공급자의 입찰과 생산비용은 최소로 설정되는 최적입찰 전략이 식(5)와 같이 정식화 될 수 있다.

$$MAX: \sum_{j=1}^{ND} B_j(P_{Dj}, k_{Dj}) - \sum_{i=1}^{NG} C_i(P_{Gi}, k_{Gi}) \quad (5)$$

s. t.

$$h(P_{Dj}, P_{Gi}, k_{Dj}, k_{Gi}, x) = 0$$

$$g(P_{Dj}, P_{Gi}, k_{Dj}, k_{Gi}, x) \leq 0$$

목적함수와 계통의 모든 제약조건들을 포함하는 최적화 문제는 사회후생 최대화 최적조류계산에서 [1,2] 입찰변수가 추가된 형태가 된다.

2.3 정식화된 문제의 선형화와 알고리즘

최적입찰 전략의 정식화 문제는 목적함수와 제약조건들을 모두 선형화하여 연속적인 선형계획법을 기반으로 풀이한다.

2.3.1 목적함수

목적함수는 최적입찰 전략을 위한 방향으로 식(5)의 최대화 문제를 최소화 문제로 변형하고 식(6)과 같이 선형화 한다.

$$MIN: \sum_{i=1}^{NG} \left(\frac{\partial C_i}{\partial P_{Gi}} \Delta P_{Gi} + \frac{\partial C_i}{\partial k_{Gi}} \Delta k_{Gi} \right) - \sum_{j=1}^{ND} \left(\frac{\partial B_j}{\partial P_{Dj}} \Delta P_{Dj} + \frac{\partial B_j}{\partial k_{Dj}} \Delta k_{Dj} \right) \quad (6)$$

2.3.2 제약조건

전력계통의 운영에 대한 물리적, 기술적 제약조건들은 다음과 같이 선형화한다.

전력조류 방정식

유효전력과 무효전력 부분으로 분할하여 문제를 처리하며, 경제적인 부문에서 관심이 높고 입찰에 대한 직접적인 영향을 주는 유효전력에 관심을 집중한다.

$$\left[\frac{\partial P_{Gi}}{\partial \delta_i} \right] [\Delta \delta_i] = [\Delta P_{Gi}], \quad \sum_{i=1}^{NG} \Delta P_{Gi} = 0 \quad (7)$$

발전기 용량 제약

가용발전기의 발전 용량 상·하한 제약에 해당된다.

$$\Delta P_{Gi}^{\min} \leq \Delta P_{Gi} \leq \Delta P_{Gi}^{\max} \quad (8)$$

전력소비자 함수

전력소비자는 수요함수로부터 전력비용에 대부분 민감하므로 전력비용에 대한 등식제약조건을 설정한다. [2]

$$\left[\frac{\partial P_{Dj}}{\partial P_{Cj}} \right] [\Delta P_{Cj}] = [\Delta P_{Dj}], \quad \sum_{j=1}^{ND} \Delta P_{Dj} = 0 \quad (9)$$

전력수요의 제약

전력수요의 소비 용량 상·하한 제약에 해당된다.

$$\Delta P_{Dj}^{\min} \leq \Delta P_{Dj} \leq \Delta P_{Dj}^{\max} \quad (10)$$

송전용량 제약

유효발전력에 대한 유효전력 선로조류는 선로민감도 행렬에 의해 제약된다. [2,3]

$$[S^{(i,j)}]^T [\Delta P_{Gi}] \leq [\Delta PF^{(i,j)}] \quad (11)$$

공급 입찰 함수

전력공급자의 입찰은 유효전력에 대한 발전 비용함수 변화에 관하여 제출되므로, 식(12)와 같이 등식제약으로 성립된다.

$$\left[\frac{\partial C_i}{\partial P_{Gi}} \right] [\Delta P_{Gi}] = [\Delta k_{Gi}] \quad (12)$$

수요 입찰 함수

전력수요자의 입찰은 전력소비에 대한 소비자 편익함수 변화에 의하여 제출되므로, 식(13)와 같이 등식제약으로 성립된다.

$$\left[\frac{\partial B_j}{\partial P_{Dj}} \right] [\Delta P_{Dj}] = [\Delta k_{Dj}] \quad (13)$$

입찰 제약

전력공급자와 전력수요자의 입찰 상·하한 제약에 해당된다.

$$\Delta k_{Gi}^{\min} \leq \Delta k_{Gi} \leq \Delta k_{Gi}^{\max}$$

$$\Delta k_{Dj}^{\min} \leq \Delta k_{Dj} \leq \Delta k_{Dj}^{\max} \quad (14)$$

그림 3은 최적입찰 전략의 정식화 문제 풀이를 위한 알고리즘을 나타낸다.

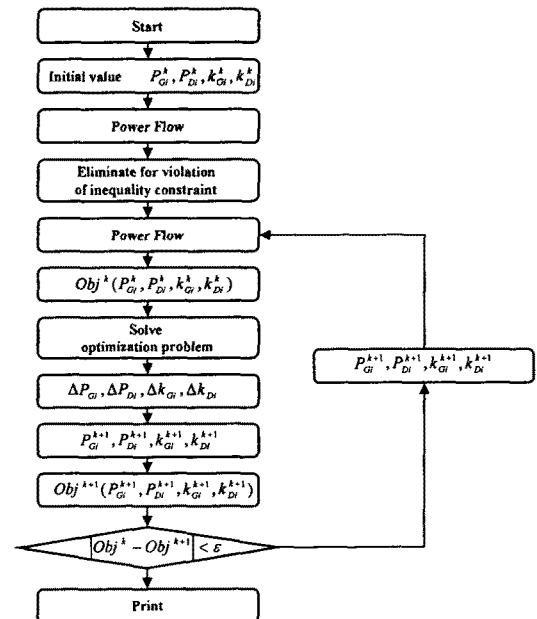


그림 3. 최적입찰 전략 알고리즘

2.4 사례 연구

사례연구에서는 제시한 최적입찰 전략 알고리즘을 이용하여 3모선 예제 계통에 적용한다. 표 1은 사례연구에 사용된 입력 데이터를 나타낸다.

표 1. 사례연구에 사용된 데이터

| 공급자 | 발전 비용 함수 | | |
|-------|----------|-------|---------|
| | a_G | b_G | c_G |
| G_1 | 0.01 | 8.0 | 0 |
| G_3 | 0.01 | 10.0 | 0 |
| 소비자 | 수요 함수 | | |
| | D | E | P_G^0 |
| D_2 | 30 | -0.2 | 10 |

전력시장 참여자들의 입찰의 초기값은 비용과 편익에 대해 1.5로 설정하며, 경쟁과 관련된 다른 외생변수들은 모두 일정하다고 가정하고 전력공급자의 입찰 경쟁만을 고려한다.

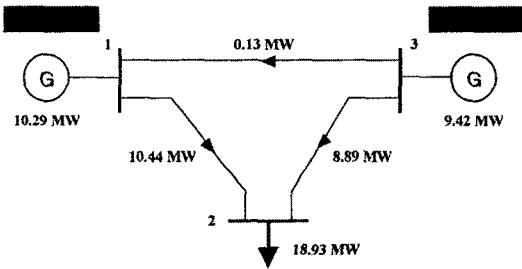


그림 4. 선로제약에 도달하지 않은 경우

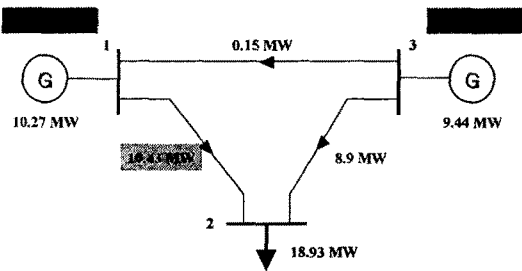


그림 5. 선로제약에 도달한 경우

그림 4는 모든 송전선로에 대해 선로제약에 도달하지 않은 경우 제안한 최적입찰 전략을 수행한 결과를 나타낸다. 표 1의 발전비용 함수로부터 공급자 G_1 이 공급자 G_3 에 비해 낮은비용의 발전기를 소유하므로 입찰에서 유리한 조건을 가진다. 따라서, 공급자 G_1 은 이미 경쟁에서 우위를 확보하였기에 입찰을 높게 설정하고, 공급자 G_3 는 경쟁의 우위를 확보하기 위해 입찰을 낮게 설정된 결과를 볼 수 있다.

그림 5는 모선 1번과 모선 2번 사이의 선로용량 상한을 10.43MW로 제안하여 선로제약에 도달한 경우에 대한 수행 결과를 나타낸다. 공급자 G_1 은 선로제약에 의해 가용 발전력이 감소되었으므로 선로제약에 도달하지 않은 경우에 비해 입찰이 낮게 설정되고, 공급자 G_3 는 상대적으로 선로제약에 의해 발전력 증가에 따라 선로제약에 도달하지 않은 경우에 비해 높은 입찰을 설정하게

된다.

표 2와 3은 선로제약에 도달하지 않은 경우와 선로제약에 도달한 경우 최적입찰 전략 알고리즘 수행 결과를 나타낸다.

표 2. 선로제약에 도달하지 않은 경우 사례연구 결과

| 공급자 | 발전력 (P_G) | 입찰 (k_c) |
|--------------------|-----------------------|--------------|
| G_1 | 10.29 MW | 1.9 |
| G_3 | 9.42 MW | 1.0 |
| 선로 (between buses) | 최대선로용량 (PF^{max}) | 선로조류 (PF) |
| 1 ~ 2 | 20.0 MW | 10.44 MW |
| 1 ~ 3 | 10.0 MW | 0.13 MW |
| 2 ~ 3 | 15.0 MW | 8.89 MW |

표 3. 선로제약에 도달한 경우 사례연구 결과

| 공급자 | 발전력 (P_G) | 입찰 (k_c) |
|--------------------|-----------------------|--------------|
| G_1 | 10.27 MW | 1.7 |
| G_3 | 9.44 MW | 1.3 |
| 선로 (between buses) | 최대선로용량 (PF^{max}) | 선로조류 (PF) |
| 1 ~ 2 | 10.43 MW | 10.43 MW |
| 1 ~ 3 | 10.0 MW | 0.15 MW |
| 2 ~ 3 | 15.0 MW | 8.9 MW |

3. 결 론

이 논문에서는, 입찰변수를 공급·수요 입찰곡선으로부터 설정하여 입찰변수가 고려된 비용함수와 편익함수를 도출하였다. 최적입찰 전략의 정식화 문제를 제정의 제약조건들의 포함하여 표현하고, 최적조류계산을 이용하여 정식화 문제를 풀이하는 알고리즘을 제안하였다. 사례적용을 통한 최적화 결과는 낮은비용의 발전기 소유자는 입찰을 높게 설정하고, 그 반대의 경우는 경쟁 우위 확보를 위해 입찰을 낮게 설정된 결과를 얻을 수 있었다. 그리고, 선로용량제약 도달에 따른 발전력과 입찰의 변화를 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. D. Weber, T. J. Overbye, "A two level optimization problem for analysis of market bidding strategies", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 2, pp. 682-687, 1999
- [2] 김문영, 백영식, 송경민, "부하모델과 송전선로 혼잡을 고려한 최적조류계산의 모선가격 분석", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp. 425-427, 2002
- [3] 김문영, 백영식, 송경민, "선형계획법을 이용한 최적조류 계산에서의 송전선로 혼잡처리", 대한전기학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 147-149, 2002