

게임이론의 균형점 해석에 의한 혼잡처리 방식의 비교

최석근*, 조철희, 이광호
단국대학교 전기공학과

Comparisons of the congestion management methods
by the equilibrium strategies in game theory

Seok-keun Choi*, Cheol-Hee Cho, Kwang-Ho Lee
Dankook University

Abstract -The market participants make plans of bidding and transaction strategies to maximize their own profits in competitive electricity market. Also, It is concerned with transmission congestion in power market. Two methods are generally used for congestion management: nodal pricing and uplift. The participants will have different strategies for their profits in the two methods. This paper analyzes their equilibrium strategies by using the supply function model and congestion methods.

여기서 $B(d_j)$ 는 소비자의 효용, $C(q_j)$ 는 전략적 발전비용이고 d_j 는 수요 j 의 부하량이고 q_j 는 발전기업 j 의 부하량이다.

공급함수 입찰모형에서 전략변수로 절편과 기울기를 동시에 변경하거나 절편 또는 기울기만을 변경하는 방법이 있다[5]. 본 논문에서는 선형의 공급함수를 가정하고 입찰은 일차함수의 기울기를 고정하고 절편만을 변경하는 형태로 정의한다. 가격의 결정은 입찰 공급함수와 수요 함수에 의해 이루어지고 이득(profit)은 결정가격과 실제의 한계비용함수에 의하여 계산된다. 따라서 발전기업은 높은 가격을 유도하기 위해서 절편을 증가시키려 할 것이다. 하지만 수요곡선에 의해 수요량이 감소하게 되어 적절한 균형점으로 수렴하게 된다.

1. 서 론

전력산업의 시장구조는 일반시장과 달리 완전경쟁의 특성을 갖지 못하고 몇 개의 시장참여자들이 경쟁하는 과점형태의 불완전 경쟁의 구조를 가지고 있다[1][2][3]. 또한 전력계통의 특성상 송전선로의 공급능력한계로 인한 선로의 혼잡이 발생하게 된다. 이러한 전력시장구조에서 시장참여자들은 개별의 이익을 최대화하려는 입찰 및 거래전략을 세우게 된다.

송전선 혼잡처리 방식에는 추가비용방식(uplift)과 모선가격방식(nodal pricing)이 주로 사용된다[3]. 혼잡처리 방식에 따라 전력거래량과 거래가격이 다르게 결정되기 때문에 발전기업의 이득과 사회적 후생(welfare) 등도 다르게 나타난다. 따라서 발전기업은 혼잡의 처리 방식에 따라 다른 공급입찰 전략을 사용할 것이다. 이러한 입찰전략을 분석하고 두 방법에 의한 결과를 비교하기 위해서 본 연구에서는 게임이론에서의 내쉬균형 개념을 적용한다[4]. 전력거래의 해석은 공급함수(supply function)모형[5]을 사용하고 균형전략의 계산은 쌍행렬(bimatrix)[4]에 의한 Lemke알고리즘[6]을 사용한다. 혼잡처리 방식의 비교는 혼잡비용과 기업의 이득, 부하의 효용, 사회적 후생 측면에서 이루어진다.

2.2 균형점 해석방법

일반적인 2인 행렬게임의 표현과 균형전략에 대해 살펴보면 게임참여자 G1과 G2가 각각 m 개와 n 개의 전략을 갖는다. 위에서 언급한 공급함수 입찰모형으로 해석하는 경우 참여자들의 전략변수로 입찰공급함수에서 절편에 해당되며 이를 각각 b_1 과 b_2 라고 둔다.

각각의 참여자가 얻는 이득은 $(m \times n)$ 차원의 행렬 $u_1 = [a_{ij}]$, $u_2 = [b_{ij}]$ 로 표현된다. 여기서 a_{ij} 는 G1이 i 를 선택하고 G2가 j 를 선택할 때 G1에게 주어지는 이득을 나타낸다. 따라서 G1이 선택한 i 에 대해 x_i 의 확률을 갖는 복합전략을 열벡터 x 라 하고 G2의 복합전략을 열벡터 y 라 할 때 G1과 G2의 이득은 각각 $x^T u_1 y$, $x^T u_2 y$ 가 된다. 이러한 전략 (x^T, y^T) 가 균형을 이루기 위한 조건은 다음식과 같다.

$$x^T A y^* \geq x^T A y, \forall y \in R^n, \text{ s.t. } x^T e_m = 1, x \geq 0 \quad (1)$$

$$x^T B y^* \geq x^T B y, \forall y \in R^n, \text{ s.t. } y^T e_n = 1, y \geq 0 \quad (2)$$

여기서 e_m 과 e_n 은 모든 원소가 1의 값을 갖는 각각 m 과 n 차원의 열벡터이다. 위의 균형조건식 (1)과 (2)는 모든 x 혹은 y 에 대한 부등식이기 때문에 직접 균형점을 구할 수는 없다. 따라서 계산이 가능한 선형상보(linear complementarity)문제로 변환하여 계산은 Lemke 알고리즘에 의해 해결할 수 있다.

2.공급함수 균형점 해석기법

2.1공급함수 입찰 모형

불완전경쟁에서의 수요와 공급의 균형을 해석하기 위해 불완전경쟁 모델인 Cournot, Stackelberg, Bertrand 기법과 공급함수 균형법등이 이용되고 있다[1]. 본 연구에서는 공급함수 균형법을 이용한다. 공급함수 균형법은 한계비용과 무관하게 전략적인 공급곡선으로 입찰하는 모형으로서 가격경쟁과 발전량 경쟁의 특성을 혼합한 모형이다. 거래의 결정은 공급곡선을 한계비용곡선으로 보고 완전경쟁 개념에 의해 사회적 후생을 최대화하는 상태에서 이루어진다. 사회적 후생이란 전체 소비자의 효용(benefit)에서 발전비용(cost)을 뺀 값을 의미한다. 이에 대해 정식화하면 다음과 같다.

$$\text{Max } \sum(B(d_j) - \sum C(q_j))$$

3.모선가격방식과 추가비용방식

3.1 모선가격방식(nodal pricing)

모선가격방식은 제약조건을 반영한 최적화 결과에서 각 모선에서의 가격정보를 이용하여 거래가격을 결정하는 방식이다.

공급함수 입찰모형에서 각각의 발전기업이 입찰 파라미터인 절편을 증가시키면 가격이 증가하고 소비자의 수요량이 감소한다. 따라서 선로의 혼잡에 따라 제약조건과 수급조건을 만족하고 사회적 후생을 최대화하는 절편에서 균형을 이루게 된다. 아래와 같이 정식화 된다.

$$\text{Max } \{\sum B(d_j) - \sum C(q_j)\} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } Z \leq Z_{\text{max}} \quad (4)$$

$$\sum q_j = \sum d_j \quad (5)$$

여기서 Z 는 모든 선로의 조류, Z_{max} 는 선로조류의 용량 제약이고 식(5)는 수급조건이다.

따라서 모선가격방식은 송전선 혼잡을 방지하고 사회적 후생을 최대화하기 위한 최적의 전력거래 상태를 제공한다. 하지만 실제 전력계통에 적용하려면 최적조류계산(OPF)의 신속한 계산이 요구되므로 현실적인 면에서 어려움이 있다. 또한 공급참여자들의 전략적 입찰게임형상이 강하게 나타날 우려도 있다.

3.2 추가비용방식(uplift)

추가비용방식에서는 계통운영자(ISO)가 수요예측자료와 발전기업이 제출한 입찰자료를 바탕으로 가격결정계획(unconstrained dispatch schedule)을 수립하고 이러한 가격결정계획은 계통의 제약조건을 고려하지 않고 각 발전기의 시간대별 발전량을 결정한다. 이를 바탕으로 시간대별 계통한계가격을 산출하게 된다. 그러나 실제로 계통을 운용하기 위해서는 송전계통제약을 고려하여야 하므로 계통운영자는 계통의 제약조건들을 고려한 운용발전계획(constrained dispatch schedule)을 수립하여 운용일에 각 발전기의 실제적인 발전량을 결정한다. 추가비용방식을 정식화하면 다음과 같이 2단계로 정식화 한다.

단계1 (비계약): $\text{Max } \{\Sigma B(d_j) - \Sigma C(q_i)\}$ (6)

s.t. $\Sigma q_i = \Sigma d_j$ (7)

단계1을 통해 송전선 혼잡을 고려하지 않고 사회적 후생이 최대화되는 거래량과 시장가격이 계산된다. 모선가격방식과 비교할 때 식(4)의 제약조건을 고려하지 않는다.

단계2 (계약): $\text{Min } \Sigma C(q_i')$ (8)

s.t. $Z \leq Z_{max}$ (9)

$\Sigma q_i' = \Sigma d_j$ (10)

계통의 제약조건으로 인해 각 선로의 조류에 따른 발전량은 재조정된다. 각 부하량은 사전계획에 따라 이미 결정 되므로 선로 혼잡을 고려한 단계2에서는 발전기업의 총비용을 최소화함으로써 사회적 후생을 최대화(식8)하고 선로제약조건(식9)과 수급조건(식10)을 만족하는 새로운 발전량을 구한다.

계약금전 이후엔 발전량이 증가 또는 감소하는 경우 발전기업의 총이득과 보상액에 대해 알아본다. 재금전후 발전량이 증가할 때(그림1)와 감소할 때(그림2)를 나타내면 다음과 같다.

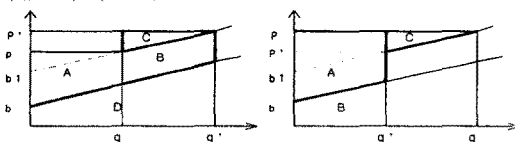


그림 1 증가할 때

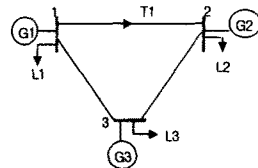
그림 2 감소할 때

그림 1,2에서 절편이 b_i 인 발전기업 입찰함수에 의해 p 와 q 는 비계약시 결정된 가격결정계획이다. 절편 b 의 입찰함수는 발전기업의 실제 한계비용함수이다.

그림 1에서는 제약으로 인하여 발전량이 q 에서 q' 로 증가한다. 증가된 발전량에 대해서는 가격은 비계약 가격 p 보다 높은 가격 p' 이 되어 기업의 수입(revenue)은 면적 $(A+B+C+D)$ 가 되고 발전비용은 면적 D 가 된다. 그림 2는 발전량이 q' 로 감소하게 된 경우로 감소에 따른 보상이 이루어진다. 공급량 q' 은 비계약시의 가격 p 로 정해지고 감소된 공급량 $(q-q')$ 은 비계약 가격 p 와 입찰함수의 차이만큼 보상받게 된다. 따라서 수입은 면적 $(A+B+C)$ 가 되고 발전비용은 면적 B 이고 보상액은 면적 C 가 된다.

4. 사례연구

4.1 계통의 모형



- G1: $f_1(q_1) = b_1 + 0.35 \cdot q_1$
- G2: $f_2(q_2) = b_2 + 0.45 \cdot q_2$
- G3: $f_3(q_3) = 40 + 0.55 \cdot q_3$
- L1: $f_4(d_1) = 100 - 0.52 \cdot d_1$
- L2: $f_5(d_2) = 110 - 0.65 \cdot d_2$
- L3: $f_6(d_3) = 120 - 0.57 \cdot d_3$
- $T1 \leq 10\text{MW}, x_{12} = x_{21} = x_{31}$

그림 3 사례연구 대상 계통 모형

G1과 G2는 전략적으로 입찰을 하는 발전기업이고 G3는 한계비용함수에 의해 결정되는 발전기업이라고 가정한다. 따라서 G1, G2는 전략적으로 b_1, b_2 를 선택하고 G3는 한계비용함수로 입찰을 한다. 모든 선로의 리액턴스는 같고 선로 T1에는 10MW의 선로용량제약을 준다. 절편 파라미터로 입찰을 하는 실제 G1과 G2의 한계비용함수는 $f_1(q_1) = 10 + 0.35q_1, f_2(q_2) = 20 + 0.45q_2$ 이다. L1, L2, L3는 수요함수이다. 함수 $f_1 \sim f_3$ 는 발전기업 G1~G3의 입찰함수이고 $f_4 \sim f_6$ 는 부하 L1~L3의 수요함수이다.

4.2 모선가격방식의 내쉬균형점

모선가격방식을 사례계통에 적용하면 식(11~13)과 같이 나타난다. 입찰 파라미터 b_1 과 b_2 가 달라질때 식(11~13)을 만족하는 거래량과 시장가격을 계산하여 각 참여자의 보수행렬이 계산된다. 계산된 보수행렬에 대한 균형전략을 구하는데 선형상보해법[4]이 사용된다.

$\text{Max}((F_4(d_1) + F_5(d_2) + F_6(d_3)) - (F_1(q_1) + F_2(q_2) + F_3(q_3)))$ (11)

s.t. $1/3(q_1 - d_1) - 1/3(q_2 - d_2) \leq 10$ (12)

$q_1 + q_2 + q_3 = d_1 + d_2 + d_3$ (13)

여기서 함수 $F_i(q_i), F_j(d_j)$ 는 입찰함수 f_i, f_j 를 적분한 이차함수로서 발전비용과 소비자 효용을 의미한다. 부등식 조건은 선로 T1에서의 선로조류를 나타낸 것이다.

균형점 해석을 위해 입찰 파라미터 b_1 과 b_2 는 20~50 사이 값을 1간격으로 이산화한다. 따라서 각 발전기의 이득행렬은 30×30 크기의 보수(payoff)행렬로 구성된다. 보수행렬을 통해 균형점 해석방법으로 내쉬균형을 계산한 결과 그림 4와 같이 복합전략으로 나타난다.

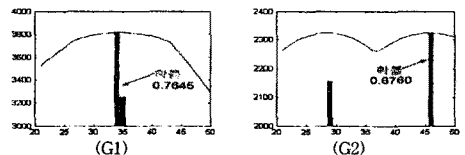


그림 4 모선가격방식에서의 균형전략과 이득

발전기업 G1과 G2의 균형전략은 $b_1=34, 35, b_2=29, 46$ 인 2개의 전략을 확률적으로 선택한다. 이에 따른 거래량과 거래 가격 등을 기대값으로 구한다.

4.3 추가비용방식의 내쉬균형점

추가비용방식에서의 최적화 문제(식6~10)를 사례계통에 적용하여 정리하면 다음과 같다.

단계1 (비계약)

$\text{Max}((F_4(d_1) + F_5(d_2) + F_6(d_3)) - (F_1(q_1) + F_2(q_2) + F_3(q_3)))$ (14)

s.t. $q_1 + q_2 + q_3 = d_1 + d_2 + d_3$ (15)

단계2 (계약)

$\text{Min } (F_1(q_1') + F_2(q_2') + F_3(q_3'))$ (16)

s.t. $1/3(q_1' - d_1) - 1/3(q_2' - d_2) \leq 10$ (17)

$q_1' + q_2' + q_3' = d_1 + d_2 + d_3$ (18)

입찰 파라미터 b_1 과 b_2 에 대해서 단계1에서는 비계약시의 가격과 부하량(d_i)이 결정되고 단계2에서는 공급량(q')이 결정된다. 이러한 결과를 이용하여 보수행렬이 계

산되는데 여기서는 b_1 과 b_2 를 각각 10~40, 121~150 사이를 1간격으로 이산화하였다.

균형전략 계산결과 다음 그림5와 같이 단순전략이 나타나며 발전기업 G1과 G2는 각각 $b_1=18$, $b_2=126$ 을 선택한다.

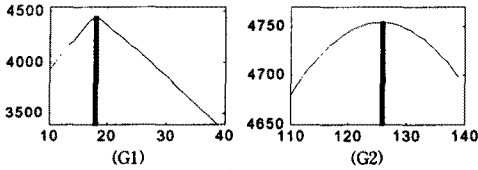


그림 5 추가비용방식에서의 균형전략과 이득

4.4 전략적 비교

두 가지의 혼잡처리방식에서 구해진 균형전략에 대해 거래량과 가격을 나타내면 다음 표1과 같다. 추가비용방식에서 부하측의 가격(70.38)은 비계약시에 계산되는 계통한계가격(SMP)이다.

표 1 시장참여자들의 거래량과 거래가격 비교

	추가비용방식		모선가격방식	
	거래량	계약금액	거래량	모선가격
G1	67.24	41.53	93.87	67.09
G2	41.24	144.56	67.08	70.68
G3	96.45	93.05	52.52	68.88
L1	56.95	70.38	63.29	67.09
L2	60.94	70.38	60.50	70.68
L3	87.04	70.38	89.68	68.88

표1에서 G1은 그림2에서와 같이 계약금전으로 인해 공급량이 감소하는 경우로서 계약시의 가격 또한 계통한계가격보다 감소한다. 반면 G2는 그림1에 해당되는 경우로서 높은 입찰($b_2=126$)에 의해 높은 가격으로 결정된다.

또한 표1에서 공급기업의 가격이 계통한계가격보다 대체로 높게 나타나기 때문에 부하의 지출액(expenditure)이 공급기업의 수입(revenue) 보다 작아지는데 이러한 차이는 혼잡현상에 의해서 나타난 것으로서 혼잡비용이라 한다. 추가비용방식에서 혼잡비용은 소비자가 부담한다.

모선가격방식에서는 같은 모선에 있는 발전기업과 부하의 가격이 같고 모선2에서의 가격이 가장 높게 나타남을 알 수 있다.

표 2 완전경쟁과의 비교

	모선가격방식			추가비용방식		
	P	IP	IP/P	P	IP	IP/P
총비용	10078	7693.7	0.76	10121	9087	0.89
이득	5448.3	6962.4	1.27	5543.7	9589	1.72
소비자효용	22375	19222	0.85	22397	18633	0.83
사회적후생	12215	11485	0.94	12275	9546	0.78

표 2는 두 가지 방식에서 각각 기업의 이득, 소비자의 효용, 사회적 후생을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 P는 완전경쟁을 나타내고 IP는 불완전경쟁, 즉 전략적인 입찰을 하는 경우이다.

추가비용방식은 선로혼잡비용이 발전기업에 지불되지만 모선가격방식은 소비자로부터 받은 혼잡비용을 반드시 발전기업에 지불되는 것이 아니다. 또한 추가비용방식은 적용의 편리성 등 나름대로의 장점이 있어 두 처리방식을 직접 비교하기는 어렵다. 따라서 각 방식에서 완전경쟁일 때를 이상적인 시장구조라 보고 공급함수모형 해석결과와 비교한다.

불완전경쟁과 완전경쟁의 비율(IP/P)을 비교하면 사회적 후생 측면에서 모선가격방식이 0.94이고 추가비용방식이 0.78로 모선가격방식이 더 크다. 이는 모선가격방식이 완전경쟁의 시장구조에 더 가까운 것으로 해석된다.

다. 반면 기업의 이득을 보면 추가비용방식이 1.72로서 더 크게 나타나는데 이는 경쟁의 불완전성이 더 큰 것으로 해석된다.

따라서 각각의 혼잡처리방식마다 장단점이 있지만 모선가격방식이 추가비용방식에 비해 완전경쟁구조에 가깝다는 의미에서 더 효율적이라고 할 수 있다.

표 3 발전기업의 이득 비교

	모선가격방식			추가비용방식		
	P	IP	IP/P	P	IP	IP/P
G1	3121.3	3817	1.22	3465.1	4458.6	1.28
G2	1981.8	2387	1.20	1740.1	4753.9	2.73

표3은 전략적 입찰(IP)에 따른 발전기업의 이득을 완전경쟁(P)과 비교한 결과이다. 여기서 두 발전기 G1과 G2는 혼잡선로(T1)의 조류방향을 기준으로 각각 공급측과 수요측에 위치하는 차이가 있다.

모선가격방식에서 공급측의 G1과 부하측의 G2는 이득비율(IP/P)이 비슷하다.

추가비용방식에서 완전경쟁일 때에는 G1의 이득이 G2보다 더 크지만 불완전경쟁일 때에는 반대로 G2의 이득이 높아짐을 알 수 있다. 따라서 G1의 상대적 이득비율이 1.28인 반면 G2는 2.73으로 크게 나타난다. 이는 추가비용방식에서 전략적 입찰게임현상이 강하게 나타나는 것으로 해석된다.

5. 결 론

송전선 혼잡처리 방식에는 모선한계가격을 계산하는 방식과 비계약금전 및 계약금전의 과정을 거치는 추가비용방식이 주로 사용된다. 이러한 방식은 각각 사회적 후생의 최대화와 전력시장 적용의 용이성 등의 장점을 갖는다.

본 논문에서는 두 방식에서의 정량적인 비교 분석을 위해 게임이론을 적용한 균형점 해석을 하였다. 송전선 제약조건에 의해서 복잡한 균형전략이 나타나기 때문에 보수행렬기법을 이용하여 균형점을 계산하였다.

사례연구 적용결과 모선가격방식이 사회적 후생 측면에서 완전경쟁에 가까우며 추가비용방식에서는 기업의 이득이 혼잡선로에 대한 상대적 위치에 따라 크게 달라짐을 알 수 있었다. 이는 전략적 입찰게임 현상이 추가비용방식에서도 나타남을 의미한다. 따라서 추가비용방식에서의 입찰게임현상에 대한 깊은 연구가 요망된다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- 이광호, "전력거래에서 제약조건이 고려된 내쉬균형점의 복잡전략연구," 전기학회논문지, 51A권 4호, pp196-201, 4. 2002.
- M. Shahidehpour, H. Yamin, Z. Li, *Market operations in electric power systems*, John Wiley & Sons, 2002.
- J. B. Cardell, C. C. Hitt, and W. W. Hogan, "Market power and strategic interaction in electricity networks," *Resource and Energy Economics*, Vol 19, pp109-137, 1997.
- 이광호, "전력시장 해석을 위한 Bi-matrix 게임의 이산화 알고리즘," 전기학회논문지, 52A 1호, pp62-67, 1. 2003.
- Ross Baldick, "Electricity market equilibrium model: The effect of parametrization," *IEEE Trans. on power systems*, Vol.13, no.4, pp1170-1176, November 2002.
- C.E. Lemke and J.T. Howson, "Equilibrium Points of Bimatrix Games," *SIAM Journal of Applied Mathematics* 12, pp413-423, 1964.