

지역별 혼잡처리 방식에서의 공급자 거래전략 연구

이 광 호
단국대학교 전기공학과

A Study on Strategic Behaviors in Zonal Congestion Management

Kwang-Ho Lee
Dept. of Electrical Engineering, Dankook University

Abstract - The congestion management is a key task for enhancing the effectiveness of transmission pricing mechanism in a competitive electricity market. In this paper, the zonal method of congestion management is analyzed quantitatively using equilibrium concept, and compared with the nodal pricing method. It is shown that the generation firm uses different strategies in the two methods, and the overall performance of zonal congestion management depends on the determination of zones.

1. 서 론

전력산업의 구조가 수직통합형에서 수평적 경쟁체제로 변화함에 따라 전력 공급기업의 전략적 행태에 대한 관심과 분석기법의 필요성이 증대된다. 특히 송전망의 물리적인 제약에 따른 공급기업의 전략은 전력시장의 효율성과 경쟁의 정도에 많은 영향을 주기 때문에 깊이 있는 연구가 요구된다[1].

송전선에서의 용량제약에 의해 전력거래가 제한을 받게 되는 현상을 송전선 혼잡(Congestion) 현상이라 한다. 혼잡현상에 의해 전력거래의 효율성이 감소하게 되므로 혼잡을 처리하는 방식에 따라 전력시장의 전반적 효율성이 크게 달라진다. 주로 사용되고 있는 방식은 송전선 제약조건을 고려하는 최적화 문제의 해를 구함으로써 모선별 한계가격을 계산하는 방식이다[2].

하지만 실제의 대규모 계통에서 송전선 제약의 최적화 문제를 계산하는 데에는 계산량과 시간적 면에서 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해서 미국의 일부 전력시장에서는 지역적인 구분을 통해 지역간(inter-zonal) 혼잡처리와 지역내부(intra-zonal)의 혼잡처리 문제로 분리함으로써 계산 부담을 줄이는 방법이 사용되고 있다[1][3].

최적화 개념에서 본다면 지역별로 구분하여 단순 최적화를 수행하면 최적해와는 다른 결과가 나타나지만 신속한 계산을 위한 불가피한 선택이라 볼 수 있다.

본 연구에서는 이와 같이 지역별 구분에 의해 혼잡처리를 하는 경우에 발전기업의 입찰전략을 분석하여 지역 구분 없이 계산하는 방식(nodal pricing)과 비교한다. 또한 지역의 구분 형태에 따라서 발전기업의 이득과 입찰전략이 다르게 나타남을 보인다.

2. 전략적 입찰과 균형전략

2.1 공급함수 모형

전력공급 경쟁은 공급함수 모형을 사용한다. 공급함수 모형이란 전력공급기업이 전력시장에 공급량과 공급가격의 조합으로 이루어지는 공급함수를 제시하고 시장운영자는 제약조건을 만족하고 사회적 후생(social welfare)을 극대화하는 상태를 결정하는 모형이다.[4] 이 때의 공급함수는 일반적으로 1차 함수가 사용된다.

공급기업은 이득을 극대화하기 위한 공급함수를 전략적으로 선택하게 되는데 이를 모형화하는 방법으로는 전

략변수를 함수의 절편으로 정의, 기울기로 정의, 또는 둘 모두로 정의하는 방법 등이 있다[5]. 본 연구에서는 첫 번째 방법을 사용한다.

2.2 균형전략의 계산

전력공급 경쟁에서 공급기업의 전략을 해석하기 위해서는 경쟁적 전략의 수렴상태인 내쉬균형을 구하는 것이 필수적이다. 내쉬균형을 구하는 방법으로는 여러 가지가 있지만 제약조건이 반영되어 복합전략이 나타나는 문제의 해석에는 쌍행렬(bimatrix) 기법이 사용된다[6]. 쌍행렬 기법에서 균형점은 선형상보(linear complementarity) 문제로 표현되며 이를 계산하는 데에는 Lemke 알고리즘이 사용된다.

본 연구에서는 주로 2인 참여게임으로 모형화하며 공급기업이 선택하는 공급함수의 절편 값을 이산화(discretize)한다. 각각의 조합에 대한 사회적 후생 최적화를 수행하여 기업의 이득을 나타내는 보수(payoff)행렬을 계산한 후 이를 대상으로 균형전략을 찾는다.

2.3 송전선 제약에 따른 균형전략

공급함수 모형에서의 전략변수인 1차함수의 절편이 변함에 따라 기업의 이득은 연속적으로 변한다. 따라서 제약조건이 없는 한 보수함수는 오목(concave) 특성을 갖게 되어 균형점은 단순전략으로 나타난다. 하지만 송전선 등의 제약조건이 반영되면 보수함수는 구간에 따라 다른 형태가 되어 오목함수 특성이 상실된다. 이때의 균형전략은 다수의 전략에 대해 확률분포를 갖는 복합(mixed) 전략으로 나타날 수가 있다[6].

지역별 혼잡처리 방식에서는 2단계로 나누어서 최적화를 수행하기 때문에 보수함수의 모양은 좀 더 복잡하게 나타난다. 복합전략으로 나타나는 경우의 거래량, 사회적 후생 등의 정량적 지표는 기대값으로 계산된다.

3. 지역별 혼잡처리 방식

3.1 지역간 혼잡처리

혼잡현상이 예상될 때 이를 해소하면서 최적의 전력거래 상태를 구하기 위해서는 전 계통에 대한 사회적 후생 최대화를 계산해야 한다. 사회적 후생이란 소비자의 효용(benefit)에서 공급자의 생산비용을 뺀 값으로 정의 된다[4]. 이를 모션한계가격방식(nodal pricing)이라 하며 정식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \max \quad & \left(\sum_i B_i - \sum_j C_j \right), \quad i \in N \\ \text{s.t.} \quad & T_j \leq T_{jmax}, \quad j \in L \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 B는 소비자의 효용(benefit), C는 공급자의 생산비용이고 N은 전체 모션, L은 전체 선로를 나타낸다.

하지만 이러한 방식은 전체 모션에 대한 한계가격의 정보를 구해야 하기 때문에 누적된 수요와 공급함수만으로는 계산할 수가 없고 모션별 수요과 공급 특성이 모두 동시에 반영되어야 한다. 따라서 계산량의 부담으로 인해 실제의 전력시장에 사용하기에는 어려움이 따른다.

이를 완화하기 위한 방법으로 지역별 혼잡처리 방식이 사용되고 있다. 이는 혼잡현상이 자주 발생하는 선로를 경계로 지역적 구분을 하여 지역과 지역 사이의 송전선만을 대상으로 1차 혼잡을 처리한 후 각 지역 내부에 나타나는 혼잡현상을 2차 처리하는 방식이다. 이 때의 1차 계산을 지역간(inter-zonal) 혼잡처리라 하고 2차 계산을 지역내부(intra-zonal) 혼잡처리라고 한다[3].

지역간 혼잡처리 문제를 정식화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \max \quad & \left(\sum_i B_i - \sum_i C_i \right), \quad i \in N \\ \text{s.t.} \quad & T_j \leq T_{jmax}, \quad j \in L_{ext} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 L_{ext} 는 지역과 지역 사이의 연결 선로이다.

따라서 지역간 혼잡해소 문제는 제약조건으로 고려되는 송전선의 개수가 대폭 줄어드는 장점을 갖는다. 하지만 공급함수와 수요함수는 모든 모선에 대해 고려한다. 즉 전체적인 사회적 후생을 최대화하는 전력거래를 구하는 것이다.

3.2 지역내부의 혼잡처리

만약 각 지역의 내부에서 혼잡현상이 발생하면 예상되는 지역에 대한 2차의 혼잡처리가 수행된다. 이 때의 최적화는 국부적(local) 문제로서 목적함수는 지역에 해당되는 후생이 되고 송전선 제약 또한 지역 내부에 위치하는 선로에 국한된다. 혼잡이 발생되지 않는 지역에서는 1차의 결과가 그대로 유지된다. 이는 다음과 같은 부분제(subproblem)들로 정식화된다.

$$\begin{aligned} P_k : \quad & \max \quad \sum_i B_i - \sum_i C_i, \quad i \in S_k \\ \text{s.t.} \quad & T_j \leq T_{jmax}, \quad j \in L_k, \quad k \in N_{gr} \\ & T_{jext} = T_{jext}^0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 P_k 는 k 지역에서의 내부 혼잡처리 문제를 의미하고 N_{gr} 는 분할된 지역, L_k 는 k 지역 내부의 선로이다. 식(3)의 부분제들은 각 지역에서 독립적으로 계산한다.

2차 혼잡처리에 따라 지역간 송전선에서의 선로조류가 달라지면 1차 혼잡처리 문제가 다시 발생되기 때문에 지역간 송전선의 선로조류는 변화되지 않는 조건을 적용하여 2차 혼잡처리가 계산되어야 한다. 따라서 이러한 제약조건이 2차 혼잡처리 문제에 포함되며 식(3)에서 두 번째 제약조건이 이에 해당된다.

3.3 입찰전략에 미치는 영향

지역적으로 구분하여 혼잡처리를 하는 것은 전체 후생을 최대화된다고 볼 수는 없다. 혼잡을 처리하면서 사회적 후생을 최대화하는 방식은 모션한계가 가격방식이다. 따라서 지역별 혼잡처리방식에서의 후생은 한계가 가격방식에 비해 작게 나타난다. 본 연구에서는 이러한 특성을 정량적으로 비교한다. 공급기업의 이득 또한 두가지 방식에서 다르게 나타난다. 동일한 공급함수에 대해서 기업의 이득이 달라지기 때문에 각 방식에서의 공급전략도 역시 달라진다.

이와 같이 모션한계가 가격방식에 비하여 지역별 방식에서의 전략이 달라지는 이유는 혼잡이 발생하는 선로와의 위치관계에서 찾을 수 있다. 일반적으로 지역의 구분은 지리적인 관계나 혼잡현상의 빈도수에 의해 정해지지만 절대적인 것은 아니다. 즉 지역의 구분은 혼잡처리의 효율성에 따라서 가변적으로 이루어져야 한다. 이러한 효율성에는 기존의 지리적 혹은 혼잡 빈도수 외에도 공급기업의 이득극대화 전략이 큰 영향을 준다. 따라서 효율적인 지역 구분을 검토하기 위해서는 공급경쟁의 문제를 심도 있게 분석해야 한다.

4. 사례 연구

4.1 대상 계통

사례연구는 문헌 [1]에서의 5모선 5선로 계통을 근간으로 일부 데이터를 조정하여 수행하였다. 그림1과 같이

발전기업은 4개이고 부하수요는 5개 모선에 모두 위치하며 구체적인 한계비용함수와 수요함수는 다음 표1과 같다. 송전선은 무저항(lossless)을 가정하며 리액턴스는 순서대로 0.1, 0.2, 0.2, 0.1, 0.1이다. 송전선의 한계용량(T_{max})은 순서대로 150, 120, 100, 100, 250MW이다.

공급기업을 G1~G4로 나타내고 각각의 공급량을 $q_1 \sim q_4$, 입찰변수를 $b_1 \sim b_4$, 각 모선에서의 거래가격을 $p_1 \sim p_5$, 각 모선에서의 부하수요를 $d_1 \sim d_5$ 로 나타낸다.

지역의 구분은 우선 3개로 정의하는데 Z1은 모선1을 포함하고 Z2는 모선2와 모선3을, Z3는 모선4와 모선5를 포함한다. 따라서 지역간 선로는 T1~T3이고 Z2의 지역 내부 선로는 T4이고 Z3의 내부선로는 T5이다.

표 1 한계비용함수와 수요함수

모선	1	2	3	4	5
한계비용	$20 + 0.1q_1$	-	$20 + 0.2q_2$	$20 + 0.2q_3$	$15 + 0.2q_4$
수요함수	$100 - 5d_1$	$100 - 5d_2$	$100 - 5d_3$	$100 - 2d_4$	$500 - d_5$

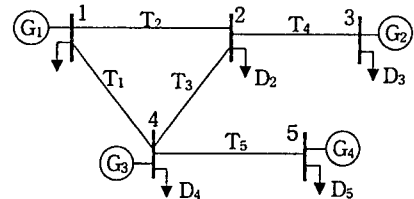


그림 1 사례연구 대상 계통

4.2 지역별 혼잡처리의 결과

전력공급 기업 중에서 G1은 한계비용에 의해 입찰하는 경쟁적(competitive) 참여자, G2~G4는 공급함수의 절편을 전략적으로 선택하는 전략적(strategic) 참여자로 가정한다. 따라서 G2, G3, G4의 3차 게임에 해당되며 전략변수는 공급함수의 절편인 $b_2 \sim b_4$ 가 된다.

전술한 바와 같이 지역별 구분을 하지 않는 모션한계 가격방식의 결과는 지역별 혼잡처리방식의 타당성과 효율성 및 제반 특성의 비교기준이 된다. 모션한계가 가격 방식으로 계산한 결과, G4는 $b_4=122$ 단순전략을 선택하고 G2와 G3는 각각 $b_2=[32, 33]$, $b_3=[25, 39]$ 와 같이 2개의 전략을 확률적으로 선택하게 된다. 그림2는 G2와 G3의 복합전략과 기대 이득을 나타내며 내쉬균형을 보인다.

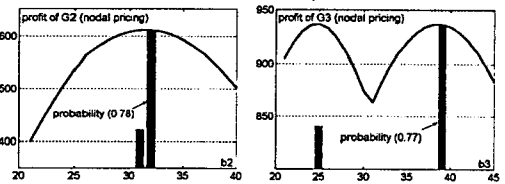


그림 2 모션한계가 가격 방식에서의 내쉬균형

이 때의 거래량과 기업이득 등 정량적 결과는 다음 표 2와 같다.

표 2 모션한계가 가격방식의 결과

모선	1	2	3	4	5
한계가격	42.55	39.59	39.59	45.51	143.17
공급량(q)	225.5	-	39.01	48.42	106.83
기업이득	2551	-	611.7	937.1	1141.3

전체 거래량은 419.7, 기업이득의 합은 5241.5, 발전비용의 합은 11930, 소비자 효용은 250177이고 사회적 후생은 238247이다.

지역을 3개(Z1~Z3)로 구분할 때의 혼잡처리 과정을

살펴보면, 해당 입찰변수(b2~b4)에 대해 지역간 혼잡처리를 수행한 후 Z2와 Z3에서 혼잡이 발생하면 지역내부의 선로(각각 T4, T5)에 대한 제약조건을 고려하여 지역 내부에서의 후생 최적화를 수행한다. 이러한 과정을 통해 보수행렬을 구성하고 균형전략을 계산한 결과 G4는 b4=122, G2와 G3는 b2=58, b3=58의 단순전략을 선택하게 된다. 그림3을 통해 내쉬균형임을 검증할 수 있다.

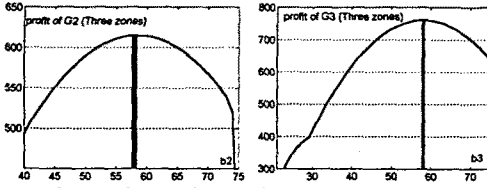


그림 3 지역별 혼잡처리 방식의 결과 (3개 지역)

이 때의 거래량과 기업이익 등 정량적 결과는 다음 표 3과 같다.

표 3 지역별 혼잡처리 방식의 결과 (3개 지역)

모선	1	2	3	4	5
한계가격	46.08	61.57	61.57	61.91	143.17
공급량(q)	260.8	-	15.37	19.05	106.83
기업이익	3400	-	615.4	761.9	1141.3

전체 거래량은 402.03, 기업이익의 합은 5919, 발전비용의 합은 12108, 소비자 효용은 247551이고 사회적 후생은 235443이다. 모션한계가격방식에 비해 거래량은 감소, 기업이익은 증가, 소비자 효용은 감소, 사회적 후생은 감소함을 알 수 있다.

발전기업 G4의 입찰전략과 발전량, 기업이익, 거래가격이 모션한계가격방식과 일치하는데 이는 두 방식에서 모두 선로 T5를 통해 모션5에 250MW가 전송되기 때문이다. 따라서 G4는 전략적 입찰을 하지만 균형전략은 b2=122로 결정되어 실질적으로는 G2와 G3의 2자 게임의 형태가 된다.

한편 G1의 이익은 크게 증가, G2의 이익은 약간 증가, G3의 이익은 감소하여 전체적으로 기업이익은 증가한다. 소비자 효용이 감소한 이유는 공급량의 감소도 있지만 전반적으로 거래가격이 크게 상승한데 있다.

4.3 지역 구分的 변화에 따른 결과

지역별 혼잡처리 방식은 이론적으로 모션한계가격방식에 비해 목적함수인 사회적 효용이 작을 수밖에 없다. 하지만 지역의 구분을 달리함에 따라 균형점에서의 사회적 효용의 값도 달라지므로 지역의 구분을 결정할 때 이에 대한 면밀한 검토가 있어야 한다.

앞의 사례에서는 계통을 3개의 지역으로 구분하였다. 여기서는 2개의 지역으로 구분하여 모션1,4,5를 Z1에, 모션2,3을 Z2에 포함시켜 지역별 혼잡처리방식을 적용한다. 따라서 지역간 혼잡처리시에는 T2, T3를 고려하고 지역내부의 처리시에는 Z1에서 T1과 T5, Z2에서 T4를 고려하게 된다. 계산 결과 G4는 역시 b4=122, G2와 G3는 b2=34, b3=70의 단순전략을 선택하게 된다.

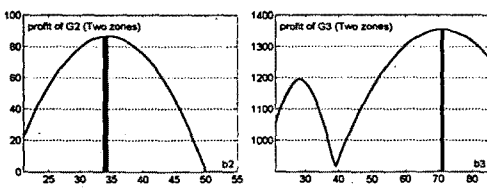


그림 4 지역별 혼잡처리 방식의 결과 (2개 지역)

이 때의 정량적 결과는 다음 표4와 같다.

표 4 지역별 혼잡처리 방식의 결과 (2개 지역)

모선	1	2	3	4	5
한계가격	46.73	35.19	35.19	75.15	143.17
공급량(q)	267.3	-	5.93	25.76	106.83
기업이익	3573	-	86.48	1354	1141.3

전체 거래량은 405.84, 기업이익의 합은 6155, 발전비용의 합은 12367, 소비자 효용은 248261이고 사회적 후생은 235894이다. 3개 지역으로 구분할 때에 비해 거래량은 약간 증가, 기업이익은 증가, 소비자 효용도 증가, 사회적 후생도 증가함을 알 수 있다.

따라서 앞에서의 지역구분(3개지역) 보다 효율적이라고 할 수 있다. 하지만 개별 기업의 이익을 살펴보면, G1과 G3의 이익이 3개지역 방식에 비해 증가한 반면 G2의 이익은 크게 감소한다. 즉 공급기업들의 이익 배분에 심한 편차가 발생한다. 또한 소비자 효용의 변화는 기업의 상황과는 반대로 Z2에서의 소비자 효용은 3개지역 방식에 비해 크게 증가하는 반면 Z3의 소비자 효용은 감소하게 된다. 이와 같이 지역의 구분에 따라 이익과 효용의 배분이 크게 달라지기 때문에 지역별 혼잡처리 방식에서 지역구분을 결정할 때 균형점 해석을 통한 정량적 분석이 요구된다.

5. 결 론

본 연구에서는 지역별 혼잡처리방식의 분석에 게임이론적 접근을 시도하였다. 지역적 구분을 통해 지역간 선로의 계약을 1차 고려한 후에 국지적인 지역계통 내부의 선로계약을 해결하는 지역별 혼잡처리방식과 전체 계통을 동시에 대상으로 하는 모션한계가격방식을 비교하였다. 게임이론의 내쉬균형 개념으로 입찰시장의 균형상태를 정의하고 균형점 계산기법을 사용하여 단순전략과 복합전략을 구하였다.

분석결과, 공급기업은 모션한계가격 방식과는 다른 전략을 사용하고, 그 때 기업의 이익은 증가, 소비자 효용은 감소, 사회적 후생은 감소함을 확인하였다. 또한 지역 구분의 형태에 따라 사회적 후생이 달라질 뿐 아니라 지역에 따른 기업의 이익과 소비자 효용도 크게 달라진다는 점도 눈여겨 볼만한 결과이다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Shahidepour, M. Alomoush, *Restructured Electrical Power Systems*, Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [2] L. Chen, H. Suzuki, T. Wachi, "Components of Nodal Prices for Electric Power Systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.17, No.1, pp.41-49, Feb. 2002.
- [3] A. Papalexopoulos, H. Singh, G. Angelidis, "Congestion Management by an Independent System Operator," available at <http://www.ucei.berkeley.edu/ucei/conf98>.
- [4] C.A. Berry, B.F. Hobbs, W.A. Meroney, "Analyzing Strategic Behavior in Transmission Networks," *IEEE Tutorial on Game Theory in Electric Power Market*, IEEE Press pp.7-32, 1999.
- [5] R. Baldick, "Electricity Market Equilibrium Models: The Effect of Parametrization," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.17, No.4, pp.1170-1176, Nov. 2002.
- [6] K. H. Lee and R. Baldick, "Tuning of Discretization in Bimatrix Game Approach to Power System Market Analysis," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.18, No.2, pp.830-836, May 2003.