2000년도 대한전기학회 추계부문학술대회 논문집 (2000.11.25)

송전요금을 고려한 게임이론적 전력거래분석

강동주*　　　　　김발호
홍익대학교 전기정보제어공학과

A Cooperative Game Embedding Transmission Pricing in the Competitive Electricity Market

Kang, Dong-Joo*　　　　Kim, Balho
Hongik University

Abstract - It has been the paradigm of game theory that more than two utilities compete and determine the price and amount of dispatch. In order for this theory to be available on real power system, it is necessary to consider the transmission costs as well as the generation costs. In addition, Independent System Operator(ISO) should be able to mitigate the congestion, recover the transmission costs and provide information for long-term capacity investment by devising reasonable pricing schemes for the transmission services. Generators also have to take the transmission costs into account when building the bidding strategies. This paper proposes an approach to analyzing the profit maximizing game considering the transmission cost in a competitive electricity market.

1. 서　론

경쟁적 전력시장을 해석하는 데 있어 최근 가장 괄목할 만한 연구성과를 보이는 분야 가운데 하나가 게임이론의 도입이다. 현재까지의 게임이론[1]에서는 경쟁관계에 있는 둘 이상의 발전사업자가 자신과 상대방의 발전비용을 고려하여 가격과 급전량을 결정하는 방식이었다. 그러나 이러한 전략수립과정이 실제 계통에서 유효하기 위해서는 단순히 발전비용 만이 아닌 급전시 수반되는 계통의 송전제약과 송전선이용료도 함께 고려되어야 한다. 발전사업자는 이러한 상황을 고려하여 송전선이용료가 자신의 수입을 감소시키지 않도록 입찰전략을 수립하여야 할 것이다. 이는 곧 전력이라는 최종적인 생산물을 생산하여 판매하는 발전업자들과 송전업자의 협력게임이라 할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 Nash Bargaining Solution(NBS) 기법[2,3,4,5]을 도입하여 게임이론적 측면에서 발전업자들과 송전업자의 이익극대화 전략을 결정하는 문제로 정식화 함과 동시에 송전측면에서 설비 투자비를 적정수준으로 회수하고 계통의 신뢰도를 유지할 수 있는 거래 메카니즘을 구현하고자 하였다.

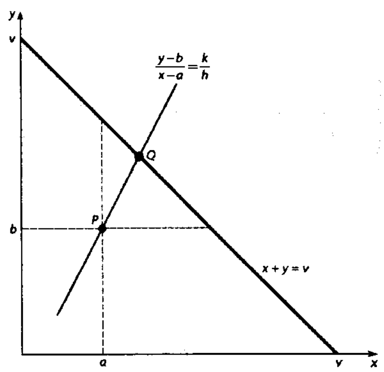
2. 경쟁적 전력시장에서의 전력거래

2.1 전력거래 게임

전력산업의 경쟁체제는 다수의 발전사업자들과 다수의 수요자가 서로 경쟁하면서 전력을 거래하도록 하는 것을 목적으로 한다. 여기서 전력수요자란 직접 전력을 소비하는 수용가일 수도 있고 최종수용가에게 전력을 판매하는 도매업자일 수도 있다. 개별 발전기 혹은 발전업자들은 분산적이고 독자적인 의사결정과정에 의해 이루어진다. 그러나 전력의 공급은 계통 안전성(system security)을 유지하기 위해 계통관리자의 중앙통제를 받아야 한다. 그러므로 이러한 측면에서 경쟁적 거래시장이라도 다른 상품과는 달리 별도의 관리 및 운영 메카니즘을 필요로 한다. 일반적인 상품시장에서의 다수의 기업간 경쟁활동은 가격과 상품의 질 등 다양한 전략선택조합을 가지고 무한 경쟁하는 비협조적 게임이다. 그러나 전력거래게임은 앞서 기술하였듯이 거래의 장이 되는 전력계통의 특수성 때문에 시장참여자간의 협력체계가 불가피하다. 전력거래는 크게 Pool System과 Bilateral Contract system을 통하여 이루어지는데 어떠한 시장 형태이든 계약을 체결하고 이행하기에 앞서 그 계약이 과연 전력계통에서 수용될 수 있는가에 대한 고려와 조율이 필요하다는 점에서 시장참여자들 즉 발전업자와 송전업자의 협력판매게임(cooperative bargaining game)으로 볼 수 있다.

2.2 내쉬협상게임(Nash Bargaining Game)

A, B 두 회사가 제휴하여 물건을 생산・판매한다고 했을 때 최종적으로 생산한 재화를 통해 얻을 수 있는 매출(가치)이 v(value)라고 하면, 두 회사는 협상의 과정을 거쳐 v에 대한 분배비율을 결정하게 된다. 만약 협상에 실패한다면 두 회사는 각자의 노선을 가게 되고 그로 인해 두 회사가 얻게 되는 가치는 a, b가 된다. 이를 backstop payoff이라 하며, 보통 영(0)의 값을 가지지만 일반적 관점에서 $a+b<v$로 정의한다. 그러므로 두 회사는 제휴를 통해 $(v-a-b)$의 잉여를 얻게 된다.



〈그림 1〉　Linear NBS

두 사업자가 잉여를 $h:k$의 비율로 분배하면 이 문제는 다음의 형태로 정식화 될 수 있다.

$$x = a + h(v - a - b) \tag{1}$$

$$y = b + k(v - a - b) \qquad (2)$$

이 식은 다음과 같이 변형되고,

$$\frac{y-b}{x-a} = \frac{k}{h} \qquad (3)$$

또한 잉여 $(v - a - b)$는 A, B가 남김 없이 분배하여야 하므로

$$x + y = v \qquad (4)$$

를 만족해야 한다. (3), (4)를 연립하여 풀게 되면 내쉬협력게임의 해(Nash cooperative solution)를 구할 수 있고 이를 도식화하면 <그림 1>과 같다.

한편, 게임참여자의 수가 n인 내쉬협력게임은 다음과 같이 정식화된다[6].

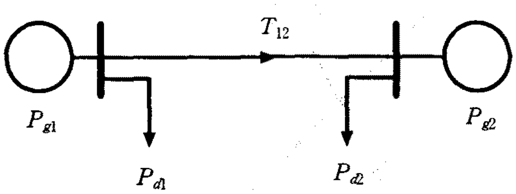
$$Max \sum_{t} \prod_{n} R_n^t \qquad (5)$$

단, $R_n = (x_n - b_n)$

t : 거래(transaction)
n : 게임참여자
R_n^t : 계약 t에 대한 n번째 사업자의 이윤 함수
x_n : n번째 게임참여자의 할당매출량
b_n : n번째 게임참여자의 backstop

2.3 전력거래에서의 내쉬협상게임

경쟁적 전력시장에서의 게임참여자는 크게 발전사업자, 판매사업자, 그리고 송전사업자로 나눌 수 있다. 대개, 송전사업자는 피규제 사업자의 성격을 띠고 있지만, 이를 이윤제한을 받는 게임자로 간주하면 넓은 의미에서 게임참여자에 해당한다. 본 논문에서는 편의상 두 개의 발전사업자와 한 개의 송전사업자가 참여하는 내쉬협력게임을 살펴보기로 한다.



<그림 2> 2-모선 2-발전기 계통

이 계통에서 T_{12}의 전력거래가 이루어지기 위해선 두 발전사업자 1,2와 송전업자의 3자 협상이 필요하다. 즉, n=3인 협력게임상황이 발생한다. 위의 (5)식에 따라 목적함수를 정식화하면,

$$\begin{aligned} L &= Max \ \ R_1^h \cdot R_2^k \cdot R_3^l \\ &= Max_{x_1, x_2, x_3}(x_1 - b_1)^h (x_2 - b_2)^k (x_3 - b_3)^l \end{aligned} \qquad (6)$$

여기서,

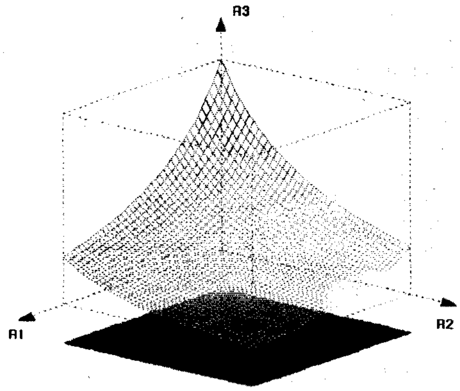
$$h + k + l = 1$$

$$R_1 = p_T T_{12} + C_1(P_{g1}) - C_1(P_{g1} + T_{12}) - C_{tr}(T_{12})$$

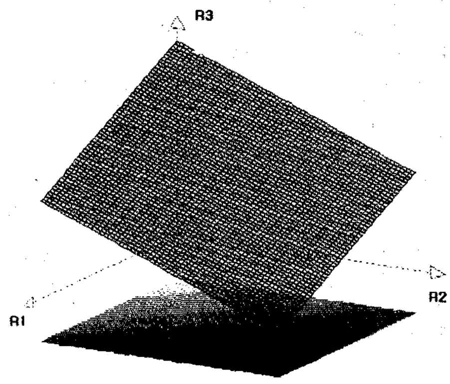
$$R_2 = -p_T T_{12} - C_2(P_{d2} - T_{12}) + C_2(P_{d2}) \qquad (7)$$

$R_3 = C_{tr}(T_{12})$ (T_{12}에 대한 송전요금함수)

단, 여기서 송전비용 C_{tr}은 area 1에서 area 2로 보내는 발전사업자 G_1이 부담하는 것으로 가정하였고, 결과적으로 L을 최대화 시키는 p_T, T_{12}를 결정하는 문제이다. 계산의 편의상 $h = k = l = 1/3$로 두면 식(6)은 $L = Max\, R_1 R_2 R_3$로 간주할 수 있다. h, k, l의 지수를 산정하는 문제 역시 많은 고찰이 필요하겠지만 본 논문의 주제를 벗어나므로 차기 연구에서 다루기로 하겠다. $L = Max\, R_1 R_2 R_3$는 원점을 향해 볼록하므로(그림 2) Pareto Optimal 조건 $R_1 + R_2 + R_3 = C$(상수)를 만족하면서 R_1, R_2, R_3에 대해서 미분한 값이 0이 되는 조건을 만족하는 점이 해가 된다.



<그림 3> $R_1 R_2 R_3 = C_2$ 의 그래프



<그림 4> $R_1 + R_2 + R_3 = C_2$ 의 그래프

$$\begin{aligned} & R_2 R_3 + R_1 \frac{\partial R_2}{\partial R_1} R_3 + R_1 R_2 \frac{\partial R_3}{\partial R_1} \\ &= \frac{\partial R_1}{\partial R_2} R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2 \frac{\partial R_3}{\partial R_2} \\ &= \frac{\partial R_1}{\partial R_3} R_2 R_3 + R_1 \frac{\partial R_2}{\partial R_3} R_3 + R_1 R_2 \\ &= 0 \end{aligned} \qquad (8)$$

(8)식을 p_T, T_{12}의 함수로 변환하기 위해서 R_1, R_2, R_3의 공통변수 T_{12}를 매개변수로 chain rule을 적용

하면,

$$R_2R_3+R_1\frac{\partial R_2}{\partial T_{12}}(\frac{\partial R_1}{\partial T_{12}})^{-1}R_3+R_1R_2\frac{\partial R_3}{\partial T_{12}}(\frac{\partial R_1}{\partial T_{12}})^{-1}=0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial R_1}{\partial T_{12}}(\frac{\partial R_2}{\partial T_{12}})^{-1}R_2R_3+R_1R_3+R_1R_2\frac{\partial R_3}{\partial T_{12}}(\frac{\partial R_2}{\partial T_{12}})^{-1}=0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial R_1}{\partial T_{12}}(\frac{\partial R_3}{\partial T_{12}})^{-1}R_2R_3+R_1\frac{\partial R_2}{\partial T_{12}}(\frac{\partial R_3}{\partial T_{12}})^{-1}R_3+R_1R_2=0 \quad (12)$$

이므로, (7)식을 (10),(11),(12)식에 각각 대입하여 정리하면, p_T, T_{12}, P_{g1}, P_{g2}를 변수들로 하는 3개의 방정식이 도출된다.

$$(-p_T T_{12}-C_2(P_{g2}-T_{12})+C_2(P_{g2}))C_{tr}(T_{12})+$$
$$\frac{(p_T T_{12}+C_1(P_{g1})-C_1(P_{g1}+T_{12})-C_{tr}(T_{12}))(-p_T+C_2'(p_{g2}-T_{12}))C_{tr}(T_{12})}{p_T+C_2'(P_{g1}+T_{12})-C_{tr}'(T_{12})}$$
$$+\frac{(p_T T_{12}+C_1(P_{g1})-C_1(P_{g1}+T_{12})-C_{tr}(T_{12}))(-p_T T_{12}-C_2(P_{g1}-T_{12})}{p_T+C_1'(P_{g1}+T_{12})-C_{tr}'(T_{12})}$$
$$\frac{+C_2(P_{g2}))C_{tr}'(T_{12})}{}=0 \qquad (10')$$

$$\frac{(p_T-C_1'(P_{g1}+T_{12})-C_{tr}'(T_{12}))(-p_T T_{12}-C_2(P_{g2}-T_{12})+C_2(P_{g2}))C_{tr}(T_{12})}{-p_T+C_2'(P_{g2}-T_{12})}$$
$$+(p_T T_{12}+C_1(P_{g1})-C_1(P_{g1}+T_{12})-C_{tr}(T_{12}))C_{tr}(T_{12})$$
$$+\frac{(p_T T_{12}+C_1(P_{g1})-C_1(P_{g1}+T_{12})-C_{tr}(T_{12}))(-p_T T_{12}-C_2(P_{g2}-T_{12})}{-p_T-C_2'(P_{g2}-T_{12})}$$
$$\frac{+C_2(P_{g2}))C_{tr}'(T_{12})}{}=0 \qquad (11')$$

$$\frac{(p_T-C_1'(P_{g1}+T_{12})-C_{tr}'(T_{12}))(-p_T T_{12}-C_2(P_{g1}-T_{12})+C_2(P_{g2}))C_{tr}(T_{12})}{C_{tr}'(T_{12})}$$
$$+\frac{(p_T T_{12}+C_1(P_{g1})-C_1(P_{g1}+T_{12})-C_{tr}(T_{12}))(-p_T-C_2'(P_{g2}-T_{12}))}{C_{tr}'(T_{12})}$$
$$\frac{C_{tr}(T_{12})}{}+(p_T T_{12}+C_1(P_{g1})-C_1(P_{g1}+T_{12})-C_{tr}(T_{12}))(-P_T T_{12}$$
$$-C_2(P_{g2}-T_{12})+C_2(P_{g2}))=0 \qquad (12')$$

여기서, $C'(T_{12})=\frac{\partial C(T_{12})}{\partial T_{12}}$

계통 수요(system demand) D는 사전에 알고 있다고 가정하였으므로,

$$P_{d1}+P_{d2}=D \qquad (13)$$

식 (10'),(11'),(12'),(13)을 연립하여 풀면 L이 최대가 되는 p_T, T_{12}, P_{g1}, P_{g2}를 구할 수 있다.

3. 결 론

경쟁적 체제에서 입찰(Pool)과 양자거래(Bilateral)에 의해 이루어지는 전력거래는 사전에 SCOPF를 통해 계통의 물리적 조건을 만족시키는지의 여부를 시험받게 된다. 또한 계통 운영에 필요한 비용을 확보하기 위해 발전업자는 그에 합당한 비용을 송전을 담당하는 주체(ISO or 탁송업자)에게 지불해야 한다. 이에 본 논문에서는 사전에 송전업자를 게임의 한 주체로 고려하여 발전업자들과의 협력게임(cooperative game) 상황을 설정하였다. 전력이란 상품은 발전되어 소비자에게 전달되었을 때만 온전한 하나의 상품이 될 수 있다는 측면에서 발전업자와 송전업자는 하나의 재화를 공동으로 생산하는 동업자로 인식될 수 있다. 이는 내쉬협력게임(Nash Bargaining Problem)으로 정식화 할 수 있다. 본 논문에서는 송전업자를 게임의 한 참여자로 간주했지만, h:k:l의 비율을 설정해야 한다는 점에서 계통운영자 관점에서 접근할 수도 있다. 또한 계산의 편의를 위해 이 비율을 동률로 가정하였지만 사실 이 문제 또한 상당한 고찰이 필요한 문제이므로, 그에 대한 논의는 향후 연구로 미룬다. 향후 실용성을 제고하기 위해 Pool, Bilateral에 대한 각론적인 접근이 필요하다고 보며 후자의 경우, 다수의 송전업자와 가격탄력성을 가지는 수용가를 전력게임에 포함시키는 방안에 대해서 연구를 진행할 생각이다.

[참 고 문 헌]

[1] John von Nuemann and Oskar Morgenstein, "Thery of games and econmic behavior", Princeton University Press, 1944
[2] Avinash Dixit and Susan Skeath, "Games of Strategy", Norton, 1999
[3] Drew Fudenberg and Jean Tirole, "Game Theory" Messachussetts Institute of Technology, 1991
[4] Ken Binmore, "Fun and Games", HEATH, 1992
[5] 전영서 著, "최신경제수학", 전영사
[6] Xiaomin Bai, S.M. Shahidehpour, V.C.Ramesh, Erkeng Yu, "Transmission analysis by nash game method", Power Systems, IEEE Transactions on, Volume: 12 Issue: 3, Aug. 1997
[7] Varian, "Microeconomic Analysis", Thired Edition, Norton
[8] Kunihiro Nakamoto, Yasuo Konish, Katsuya Konda and Hiroyuki Ishigaki, "Simulataneous optimization of a structure and control for mechanical system using the nash bargining game", Information, Decision and Control, 1999. IDC 99. Proceedings, 1999, Page(s): 283 -288
[9] 노응원, "수리경제학", 진영사