

송전용량이 전력시장 균형에 미치는 영향 해석

(Analysis of the Influence of Transmission Capacity on the Electricity Market Equilibrium)

남영우*

(Young-Woo Nam)

요 약

경쟁적 전력시장에서 발전회사의 전략적 행위를 분석하기 위해서 일반적으로 내쉬균형(Nash equilibrium) 이론이 널리 사용되고 있다. 기존 연구에 의하면 송전제약이 있는 전력시장에서는 최적반응의 불연속으로 인해 순수전략내쉬균형이 존재하지 않게 되고, 이때는 혼합전략내쉬균형이 전력시장의 균형이 된다. 본 논문에서는 송전제약이 있는 2-지역 전력시장에서 혼합전략내쉬균형을 유도하고, 송전용량이 혼합전략내쉬균형에 미치는 영향을 해석하였다.

Abstract

Nash equilibrium is usually used to investigate a generator's strategic bidding in electricity markets. Some literatures show that the transmission constraints may induce no pure strategy equilibrium and make it hard to find the equilibrium. Using an analytical approach to find a mixed strategy Nash equilibrium in electricity market with transmission constraints, we analyze the influence of transmission capacity on the mixed strategy Nash equilibrium. Finally, a simple numerical example is provided to support the claims of this paper.

Key Words : Electricity Market, Nash Equilibrium, Transmission Congestion

1. 서 론

전 세계적으로 전력산업의 효율성과 사회후생을 증진시키기 위해 경쟁시장이 도입되어 왔다. 발전 부문의 과점적 구조와 전기의 물리적 특성은 전력시장의 경쟁을 저해하고, 발전회사의 시장지배력 문제를 유발하고 있다. 특히 아주 높은 전력저장 비용으로 인해 생산과 소비가 실시간으로 이루어져야 하기

때문에 송전혼잡이 발생하고, 이는 지역 간의 자유로운 거래를 불가능하게 함으로써 지역적인 시장지배력의 문제를 야기할 수 있다.

송전제약을 고려한 발전회사의 전략적 행위 분석에는 쿠르노 모형[1-2], 공급함수모형[3-6]을 이용한 시장균형분석이 널리 이용되고 있다. 각 발전회사는 상대방의 예상전략에 대한 자신의 최적전략을 선택하며, 최종적으로는 더 이상 전략을 수정하지 않는 안정한 상태인 내쉬균형(Nash Equilibrium, NE)에 이르게 된다. 일반적으로 NE는 최적반응(best response)의 교점에서 결정되며 이를 순수전략(pure strategy)NE이라 한다[7]. 그러나 송전제약 때문에

* 주저자 : LS산전(주) 자동화연구소 선임연구원

Tel : 031-450-7650, Fax : 031-450-7599

E-mail : ywnan@lisis.biz

접수일자 : 2008년 12월 16일

1차심사 : 2008년 12월 18일

심사완료 : 2009년 1월 6일

최적반응의 불연속이 발생할 수 있고[1-6], 이로 인해 순수전략NE이 존재하지 않게 된다. 이 경우에 발전회사는 여러 전략들을 확률적으로 선택하는 혼합전략(mixed strategy)을 취하게 되고, 이때의 균형을 혼합전략NE이라 한다.

[5]는 2지역 전력시장에서 발전회사의 선도계약을 고려한 혼합전략NE을 구하고, 선도계약이 혼합전략NE에 미치는 영향을 분석하였다. 혼합전략NE에서 전력 유입지역의 발전회사는 혼잡을 발생시키는 전략과 그렇지 않은 전략을 특정 확률로 선택하는 혼합전략을 선택하고, 유출지역의 발전회사는 순수전략을 선택한다.

본 논문에서는 2-지역 전력시장에서 송전용량이 혼합전략NE에 미치는 영향을 분석하였다. 송전용량의 증가는 발전회사의 입찰전략을 낮게 해주고 혼잡 발생 확률을 감소시켜서 결과적으로 사회후생의 증진을 가져온다. 본 논문의 결과를 [5]와 비교하면, 송전용량의 증대는 유입지역 발전회사의 선도계약 증가와 동일한 결과를 나타내며, 송전용량의 감소는 유출지역 발전회사의 선도계약 증가와 유사함을 알 수 있다.

2. 전력시장 모델

2.1 기본가정

본 논문에서는 그림 1과 같이 두 지역이 용량 T [MW]인 송전선에 의해 연계된 2-지역 전력시장 모델을 대상으로 한다. 각 지역에는 유일한 발전회사 i ($i=1,2$)가 존재하고, 전력시장 및 계통은 제3의 독립적인 기관(Independent System Operator, ISO)에 의해 지역한계가격(Locational Marginal Pricing)으로 운영된다고 가정한다. 발전회사는 자신의 이윤을

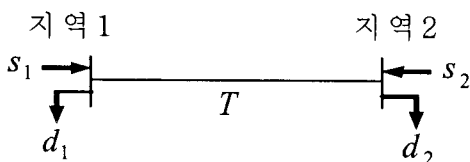


그림 1. 2-지역 전력시장 모델
Fig. 1. 2-area market model

최대화하기 위한 입찰함수를 ISO에 제출하며, ISO는 제출된 입찰에 근거하여 수요와 공급이 일치하는 시장가격 및 발전량을 산정한다.

발전회사 i 는 $C_i(s_i) = 0.5a_i s_i^2 + b_i s_i + c_i$ 의 비용함수를 가진다고 가정한다. 여기서 $a_i, b_i, c_i \in R_+$ 이다. 따라서 한계비용함수는 $MC_i(s_i) = a_i s_i + b_i$ 이고, 발전회사는 기울기가 아닌 절편 값을 전략적으로 조정한다고 가정한다. 그러면 발전회사 i 는 입찰함수로 $p_i = a_i s_i + k_i$ 를 ISO에 제출한다. 여기서 k_i 는 발전회사가 이윤을 극대화하기 위해 한계비용을 얼마만큼 높여 입찰할지를 나타내는 전략변수가 된다. 입찰함수에 상응하는 발전회사 i 의 공급함수는 식 (1)과 같다.

$$s_i(p) = (p - k_i) / a_i \quad (1)$$

$s_i(p)$ 는 발전회사 i 가 가격 p 에서 공급하고자 하는 발전량을 나타낸다. 발전회사의 최대발전용량은 시장수요를 감당할 만큼 충분히 크다고 가정한다. 그리고 각 지역의 수요함수는 다음과 같이 음의 기울기를 가진 선형함수로 가정한다.

$$d_i(p) = -\alpha_i p + \beta_i \quad \text{단, } \alpha_i, \beta_i \in R_+ \quad (2)$$

2.2 가격 결정

우선 ISO는 발전회사의 입찰함수에 근거하여 송전계약을 고려하지 않은 비계약시장가격을 산정한다. 산정된 비계약시장가격 하에서 두 지역 사이의 예상 선로조류량이 송전 용량보다 작으면, 비계약시장가격은 두 지역에 대한 최종적인 시장가격으로 결정된다. 그렇지 않으면, ISO는 예상 선로조류량이 송전 용량과 같아지도록 두 지역에 대해 각기 다른 시장가격, 즉 제약시장가격을 산정한다.

비계약시장가격(p_u)은 총공급함수와 총수요함수의 교점($s_1(p_u) + s_2(p_u) = d_1(p_u) + d_2(p_u)$)에서 결정되며 식 (3)으로 표현된다. 이때 지역1에서 지역2로 흐르는 비계약선로조류량(pf_{12}^u)은 식 (4)와 같다.

$$p_u(k_1, k_2) = \frac{(k_1/a_1 + \beta_1) + (k_2/a_2 + \beta_2)}{A_1 + A_2} \quad (3)$$

송전용량이 전력시장 균형에 미치는 영향 해석

$$\text{단, } A_1 = 1/a_1 + \alpha_1, \quad A_2 = 1/a_2 + \alpha_2$$

$$pf_{12}^u(k_1, k_2) = - \left(\frac{A_2}{A_1 + A_2} \right) \left(\frac{k_1}{a_1} + \beta_1 \right) + \left(\frac{A_1}{A_1 + A_2} \right) \left(\frac{k_2}{a_2} + \beta_2 \right) \quad (4)$$

pf_{12}^u 는 각 발전회사의 전략변수인 k_1, k_2 의 함수로 표현된다. 이는 각 발전회사가 이윤극대화를 위해 송전혼잡을 전략적으로 유발할 수 있음을 의미한다.

송전용량을 초과하지 않는 경우($-T \leq pf_{12}^u \leq T$)에는 비제약시장가격이 두 지역의 시장가격으로 결정되지만, 그렇지 않은 경우에는 두 지역의 시장가격은 다르게 결정된다. 본 논문에서는 해석의 간략화를 위해 지역1에서 지역2로의 혼잡만을 고려한다. 송전혼잡($pf_{12}^u \geq T$)이 발생하면 각 발전회사는 자신이 속한 지역에서 독점적 지위를 가지게 된다. 즉, 발전회사1은 지역1의 수요와 송전용량의 합인 $d_1 + T$ 의 수요를 독점적으로 공급하며, 지역1의 제약시장가격은 s_1 과 $d_1 + T$ 가 교차하는 수준에서 결정된다. 마찬가지로 발전회사2는 지역2의 수요와 송전용량의 차인 $d_2 - T$ 의 수요를 독점적으로 공급하며, 지역2의 제약시장가격은 s_2 과 $d_2 - T$ 가 교차하는 수준에서 결정된다. 지역1, 2의 제약시장가격은 식 (5), (6)과 같다.

$$p_1(k_1) = \frac{1}{A_1} \left(\frac{k_1}{a_1} + \beta_1 + T \right) \quad (5)$$

$$p_2(k_2) = \frac{1}{A_2} \left(\frac{k_2}{a_2} + \beta_2 - T \right) \quad (6)$$

시장가격은 혼잡발생 여부에 따라 식 (3), (5), (6)에 의해 결정되므로, 발전회사의 이윤함수는 혼잡발생 여부에 따라 다음 식과 같이 된다.

$$\pi_i^c(k_i) = p_i(k_i) s_i(p_i) - C_i(s_i) \quad (7)$$

단, $pf_{12}^u \geq T$

$$\pi_i^u(k_1, k_2) = p_u(k_1, k_2) s_i(p_u) - C_i(s_i) \quad (8)$$

단, $-T \leq pf_{12}^u \leq T$

여기서, π_i^c, π_i^u 는 각각 발전회사 i 의 제약이윤, 비제약이윤을 나타낸다.

3. 내쉬 균형

3.1 최적반응

최적반응은 상대방의 선택 가능한 전략에 대해 자신의 이윤을 최대화하는 전략으로 정의된다. 따라서 식 (7), (8)로 표현되는 발전회사 이윤을 최대화 문제의 해를 구하여 최적반응을 유도할 수 있다. 발전회사의 최적반응은 그림 2와 같다. 실선은 유입지역에 위치하는 발전회사2의 최적반응을 나타낸 것으로, $k_1 > k_1^{sw}$ 이면 비제약최적전략을 선택한다. 다시 말해서, 발전회사1의 전략이 충분히 높으면 혼잡을 유발하지 않는 것이 발전회사2의 이윤을 최대화 할 수 있다. 비제약최적전략($k_2^*(k_1)$)은 식 (9)와 같이 유도된다.

$$k_2^*(k_1) = \underset{k_2}{\operatorname{argmax}} \pi_2^u(k_1, k_2) \quad (9)$$

$$= b_2 + \frac{d_1(b_2) + d_2(b_2) - (b_2 - k_1)/a_1}{(\alpha_2 + A_1)[1 + (A_1 + A_2)a_2]}$$

발전회사1의 전략이 k_1^{sw} 보다 작아지는 시점에 발전회사2는 비제약최적전략에서 제약최적전략으로 순간적으로 전환하게 되며, 이때 발전회사2의 최적반응은 불연속하게 된다. 다시 말해서, 발전회사1이 낮은 전략을 입찰하면 지역1에서의 잉여발전량이 충분히 커지게 되고, 발전회사2는 혼잡을 유발시키는 전략으로 전환함으로써 더 많은 이익을 얻을 수 있다. 제약최적전략(k_2^c)은 식 (10)과 같이 유도된다.

$$k_2^c = \underset{k_2}{\operatorname{argmax}} \pi_2^c(k_2) = b_2 + \frac{d_2(b_2) - T}{\alpha_2(1 + A_2 a_2)} \quad (10)$$

최적반응이 불연속인 점에서 발전회사2의 이윤은 혼잡발생 여부와 상관없이 같은 이윤을 가지게 되며, k_1^{sw} 는 식 (11)에 의해 결정된다.

$$\pi_2^c(k_2^*) = \pi_2^u(k_1^{sw}, k_2^*(k_1^{sw})) \quad (11)$$

그림 2에서 점선은 발전회사1의 최적반응을 나타낸다. $k_2 < k_2^b$ 이면 발전회사1은 비제약최적전략 $(k_1^*(k_2))$ 을 선택하고, $k_2 > k_2^b$ 이면 제약최적전략 (k_1^c) 을 선택한다. 그리고 $k_2^a < k_2 < k_2^b$ 이면 직선 $pf_{12}^u(k_1, k_2) = T$ 상의 전략을 선택한다. k_1^c, k_1^* 는 각각 식 (12), (13)과 같이 유도된다.

$$k_1^c = \operatorname{argmax}_{k_1} \pi_1^c(k_1) = b_1 + \frac{d_1(b_1) + T}{\alpha_1(1 + A_1 a_1)} \quad (12)$$

$$k_1^*(k_2) = \operatorname{argmax}_{k_1} \pi_1^u(k_1, k_2) = b_1 + \frac{d_1(b_1) + d_2(b_1) - (b_1 - k_2)/a_2}{(\alpha_1 + A_2)[1 + (A_1 + A_2)a_1]} \quad (13)$$

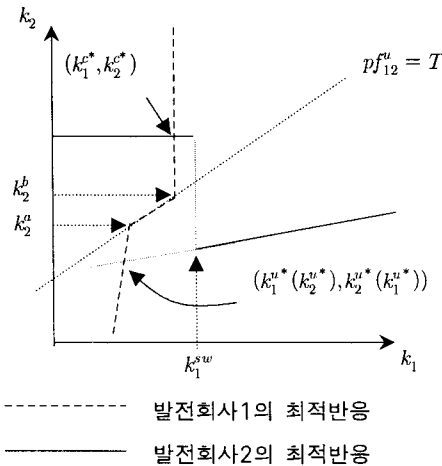


그림 2. 발전회사의 최적반응
Fig. 2. Best response of each genco

그림 2와 같이 순수전략NE는 최적반응의 교점에서 결정된다. 그러나 최적반응의 불연속으로 인해 교점이 없으면, 순수전략NE이 아닌 혼합전략NE이 존재하게 된다.

3.2 순수전략NE

순수전략NE는 최적반응의 교점에서 결정된다. 그림 2와 같이 $k_1^* \leq k_1^w$ 이면 혼잡이 발생하는 제약 순수전략NE인 (k_1^c, k_2^c) 가 시장균형이 된다. 그리고

$k_1^w \leq k_1^*(k_2^*)$ 이면 혼잡이 발생하지 않는 비제약 순수전략NE인 $(k_1^*(k_2^*), k_2^*(k_1^*))$ 가 시장균형이 된다. 하지만, $k_1^w(k_2^*) < k_1^w < k_1^c$ 이면 최적반응의 교점이 존재하지 않으므로, 순수전략NE가 아닌 혼합전략NE가 존재한다. 주목할 점은 $(k_1^*(k_2^*), k_2^*(k_1^*))$ 에서의 조류량이 송전제약 내에 있다 하더라도, 유입지역발전회사의 전략적 행위에 의해 송전혼잡이 발생할 수도 있다는 것이다. 다시 말해서, 만일 두 발전회사가 송전제약에 대한 정보를 모른다고 가정하면, 송전제약을 고려하지 않은 입찰전략을 수립하고 이때의 시장균형은 송전제약 내에 존재한다. 하지만, 송전제약에 대한 정보를 이용하는 경우에는 송전제약을 활용하여 전략을 높여서 입찰하고 혼잡이 발생할 수도 있게 된다.

3.3 혼합전략NE

최적반응이 교차하지 않으면 혼합전략NE가 존재하게 된다. 순수전략이 하나의 전략을 선택하는, 즉 확률 1로 특정 전략을 선택하는 것인데 반해, 혼합전략은 선택 가능한 여러 전략 각각에 대해 선택될 확률을 부여하고 그 확률에 의해 전략을 선택하는 것이다[7].

발전회사2는 제약최적전략 (k_2^c) 과 비제약최적전략 $(k_2^*(k_1))$ 을 각각 $\rho, 1-\rho$ 의 확률로 입찰하는 혼합전략을 선택하고, 발전회사1은 상대방의 입찰전략을 알 수 없는 상황에서 자신의 전략을 선택해야 하므로, 식 (14)과 같이 상대방의 혼합전략에 대한 기대이윤을 최대화하는 전략을 취하게 된다.

$$\max_{k_1} [\rho \pi_1^c(k_1) + (1-\rho) \pi_1^u(k_1, k_2^*(k_1))] \quad (14)$$

발전회사2는 발전회사1이 선택하는 전략이 k_1^w 가 되도록 확률 ρ 를 결정해야 한다. 그 이유는 발전회사1이 k_1^w 을 전략으로 선택할 경우에, 식 (11)에서 알 수 있듯이 발전회사2가 얻는 이윤은 혼잡발생과 상관없이 동일하기 때문이다. 식 (14)의 일계미분조건으로부터 확률 ρ 는 식 (15)로 유도할 수 있다[5].

송전용량이 전력시장 균형에 미치는 영향 해석

$$\rho = \frac{\frac{\partial \pi_1^u(k_1, k_2^*(k_1))}{\partial k_1}}{\frac{\partial \pi_1^u(k_1, k_2^*(k_1))}{\partial k_1} - \frac{\partial \pi_1^c(k_1)}{\partial k_1}} \Bigg|_{k_1 = k_1^{sw}} \quad (15)$$

요컨대, 혼합전략NE에서 각 발전회사의 전략은 다음과 같으며, 유입지역에 위치한 발전회사2의 전략에 의해 혼잡 여부가 결정되고 혼잡발생 확률은 ρ 가 된다.

- 발전회사1의 전략 : k_1^{sw} 을 1의 확률로 선택
- 발전회사2의 전략 : $k_2^c, k_2^*(k_1^{sw})$ 을 각각 $\rho, 1-\rho$ 의 확률로 선택

4. 송전용량의 영향 해석

본 논문에서는 혼합전략NE의 관점에서 송전용량의 영향을 분석하고자 한다. 송전용량이 혼합전략NE에 미치는 영향은 다음 특성과 같다.

특성) 혼합전략NE에서 송전용량의 변화에 따른 발전회사의 전략과 혼잡발생 확률의 변화율은 식 (16)과 같다.

$$\frac{\partial k_1^{sw}}{\partial T} < 0, \frac{\partial k_2^c}{\partial T} < 0, \frac{\partial k_2^*(k_1^{sw})}{\partial T} < 0, \frac{\partial \rho}{\partial T} < 0 \quad (16)$$

(증명) 부록에 수록한다.

위의 특성에 의하면, 송전용량 증가는 두 발전회사가 낮은 전략을 입찰하도록 하고 유입지역 발전회사가 혼잡을 유발시키는 확률을 감소시킨다. 입찰전략이 낮아지고 혼잡발생 확률이 감소함으로써 사회후생의 증진이 이루어지는데, 이는 다음과 같이 설명할 수 있다. 혼합전략NE에서 기대사회후생(ESW)은 다음 식으로 표현된다.

$$ESW = \rho SW^c(k_1^{sw}, k_2^c) + (1-\rho) SW^u(k_1^{sw}, k_2^*(k_1^{sw})) \quad (17)$$

여기서, SW^c 는 발전회사2가 혼잡을 유발하는 전략(k_2^c)을 선택하는 경우의 사회후생이며, SW^u 는 혼잡을 유발하지 않는 전략($k_2^*(k_1^{sw})$)을 선택하는 경우의 사회후생이다. 발전회사2가 높은 입찰을 통해 혼

잡을 발생시키기 때문에, $SW^c < SW^u$ 은 자명하다. 특성에 의하여 송전용량이 증가하면 발전회사의 선택 가능한 전략이 낮아지므로 SW^c 와 SW^u 는 증가하고, ρ 는 감소하므로 식 (17)에서 SW^c 의 비율은 작아지고 SW^u 의 비율은 커진다. 따라서 기대사회후생은 증가하게 된다.

표 1. 송전용량에 따른 혼합전략NE
Table 1. Transmission capacity vs. Mixed strategy NE

송전용량	발전회사1의 전략	발전회사2의 전략
30	18.40(1)	14.06(0.03), 21.74(0.97)
40	17.54(1)	13.91(0.13), 21.30(0.87)
50	16.67(1)	13.76(0.23), 20.87(0.77)
60	15.80(1)	13.61(0.34), 20.43(0.66)
70	14.94(1)	13.46(0.46), 20.00(0.54)
80	14.07(1)	13.31(0.59), 19.57(0.41)
90	13.20(1)	13.16(0.73), 19.13(0.27)
100	12.34(1)	13.01(0.88), 18.70(0.12)

()은 해당 전략을 선택하는 확률을 나타낸다.

5. 사례 연구

본 논문의 내용에 대한 이해를 돕기 위한 간단한 사례연구를 수행하였다. 전력시장 데이터는 아래와 같이 지역2의 발전비용이 더 비싸고 수요도 더 커서, 선로조류가 지역1에서 지역2로 흐르는 전력시장을 대상으로 한다. 송전용량은 80[MW]로 가정하였다.

- 지역1 : $a_1 = 0.03, b_1 = 8, \alpha_1 = 10, \beta_1 = 300$
- 지역2 : $a_2 = 0.03, b_2 = 10, \alpha_2 = 10, \beta_2 = 400$

발전회사의 최적반응은 그림 3과 같다. 발전회사2의 최적반응이 불연속이며, 이로 인해 최적반응의 교점이 존재하지 않는다. 혼합전략NE은 식 (9), (10), (11), (15)에 의해 계산되며, 발전회사1의 전략은 14.07을 선택하는 것이고, 발전회사2의 전략은 13.31, 19.57을 각각 0.59, 0.41의 확률로 선택하는 것이다. 발전회사2의 전략에 의해 혼잡이 결정되며 혼잡발생 확률은 0.41이 된다.

송전용량의 변화에 따른 혼합전략NE의 변화는

표 1과 같으며, 본 논문에서 증명한 특성이 성립함을 확인할 수 있다. 즉, 송전용량이 증가할수록 각 발전회사의 전략은 낮아지고 혼잡발생 확률은 감소한다.

재한다. $26.42 < T < 107.77$ 이면 혼합전략NE이 존재하게 되며, 그림 4와 같이 기대사회후생이 증가함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 2-지역 전력시장의 혼합전략NE을 유도하고, 송전용량이 혼합전략NE에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다. 혼합전략NE에서 유입지역 발전회사는 혼잡을 유발하는 전략과 유발하지 않는 전략을 특정 확률로 입찰하는 혼합전략을 선택하고, 유출지역 발전회사는 하나의 전략만을 입찰하는 순수전략을 선택한다. 혼합전략NE에서 송전용량 증가는 발전회사가 낮은 전략을 입찰하도록 하고 혼잡발생 확률을 감소시킴을 증명하였고, 이로 인해 사회후생이 증진됨을 설명하였다.

본 논문에서 제시한 송전용량이 혼합전략NE에 미치는 영향은 유입지역 발전회사의 선도계약의 영향과 동일하고, 유출지역 발전회사의 선도계약은 혼잡발생 확률의 관점에서 송전용량의 영향과 반대의 효과가 있다[5]. 다시 말해서 유입지역 발전회사의 선도계약 증가는 송전용량 증가 효과가 있고, 유출지역 발전회사의 선도계약 증가는 송전용량 감소 효과가 있음을 본 논문의 결과를 통해서 알 수 있다.

부록. 특성의 증명

A.1 $\partial k_2^* / \partial T < 0$ 의 증명

식 (10)로부터 $\partial k_2^* / \partial T = -1/\alpha_2(1 + A_2\alpha_2)$ 이다. 모든 계수가 양수이므로 $\partial k_2^* / \partial T < 0$ 임이 자명하다. Q.E.D.

A.2 $\partial k_1^{sw} / \partial T < 0$ 의 증명

식 (11)로부터 $F = \pi_2^w(k_2^*) - \pi_2^w(k_1^{sw}, k_2^*(k_1^{sw}))$ 이라하면, k_1^{sw} 는 $F=0$ 의 해이다. 식 (10)에서 k_2^* 는 T 에 대한 함수로 표현되므로 F 는 k_1^{sw} , T 에 대한 음함수(implicit function) 형태이다. 따라서 음함수 정리

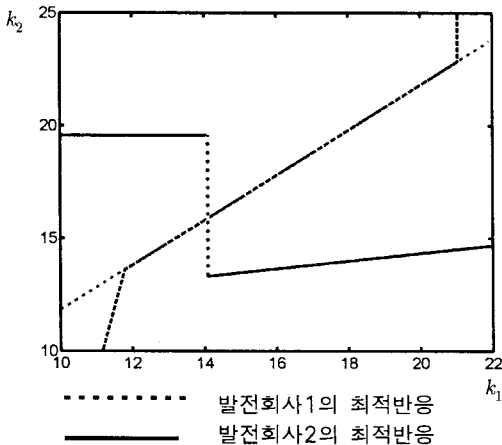


그림 3. 발전회사의 최적반응
Fig. 3. Best response of each genco

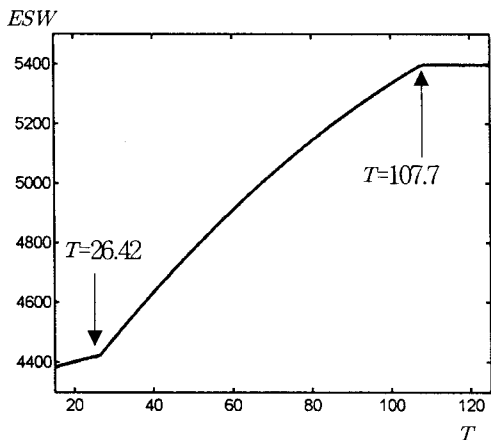


그림 4. 송전용량에 따른 기대사회후생
Fig. 4. Transmission capacity vs. Expected social welfare

그림 4는 송전용량 변화에 따른 기대사회후생을 나타낸 것이다. $T \leq 26.42$ 이면 제약 순수전략NE이 존재하고, $T \geq 107.77$ 이면 비제약 순수전략NE이 존

송전용량이 전력시장 균형에 미치는 영향 해석

(implicit function theorem)를 이용하여 식 (A1)을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial k_1^{sw}}{\partial T} = \frac{\frac{\partial F}{\partial T} - \frac{\frac{\partial \pi_2^c(k_2^*)}{\partial T} - \frac{\partial \pi_2^u(k_1^{sw}, k_2^{u*}(k_1^{sw}))}{\partial T}}{\frac{\partial F}{\partial k_1^{sw}}}}{\frac{\partial \pi_2^c(k_2^*)}{\partial k_1^{sw}} - \frac{\partial \pi_2^u(k_1^{sw}, k_2^{u*}(k_1^{sw}))}{\partial k_1^{sw}}} \quad (A1)$$

식 (A1)에서 분모, 분자의 각 항에 대한 부호를 살펴보자.

① 분자의 첫 항 : 식 (1), (6), (10)으로부터 식 (A2), (A3)을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial p_2(k_2^*, T)}{\partial T} = \frac{1}{A_2} \left(\frac{1}{a_2} \frac{\partial k_2^*}{\partial T} - 1 \right) \quad (A2)$$

$$\frac{\partial s_2(p_2, k_2^*)}{\partial T} = \frac{1}{a_2} \left(\frac{\partial p_2}{\partial T} - \frac{\partial k_2^*}{\partial T} \right) = \frac{1}{1 + A_2 a_2} \quad (A3)$$

A1 에서 $\partial k_2^*/\partial T < 0$ 임이 증명되었고, 모든 계수가 양수이므로, $\partial p_2/\partial T < 0$, $\partial s_2/\partial T < 0$ 이 된다. 그림 A1 에서 송전용량이 증가하면 발전회사2의 입찰전략 (k_2^*)은 낮아져서 역공급함수는 아래로 이동하게 되고, 가격($a \rightarrow a'$) 및 공급량($c \rightarrow c'$)은 감소한다. 발전회사2의 이윤은 면적 $abcd$ 에서 면적 $a'b'e'd$ 로 감소하게 된다. 따라서 $\partial \pi_2^c/\partial T < 0$ 이다.

② 분자의 둘째 항 : 식 (8)에서 π_2^u 은 송전용량과는 무관하게 결정되므로 $\partial \pi_2^u/\partial T = 0$ 이다.

③ 분모의 첫 항 : 식 (7)에서 π_2^c 은 k_1^{sw} 와는 무관하게 결정되므로 $\partial \pi_2^c/\partial k_1^{sw} = 0$ 이다.

④ 분모의 둘째 항 : 식 (8)로부터 정리하여 간단히 하면 식 (A4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_2^u}{\partial k_1^{sw}} &= \frac{\partial p_u}{\partial k_1^{sw}} s_2 + p_u \frac{\partial s_2}{\partial k_1^{sw}} - (a_2 s_2 + b_2) \frac{\partial s_2}{\partial k_1^{sw}} \quad (A4) \\ &= \frac{p_u - b_2}{(A_1 + A_2) a_1 a_2} \end{aligned}$$

시장가격은 한계비용보다 높은 수준에서 결정되므로, 식 (A4)의 분자 항은 양수이다. 따라서 $\partial \pi_2^u/\partial k_1^{sw} > 0$ 이다.

그러므로 위의 ①~④에 의해서 식 (A1)의 부호는

$$\frac{\partial k_1^{sw}}{\partial T} = \frac{(-) - 0}{0 - (+)} < 0 \text{ 이 된다. Q.E.D}$$

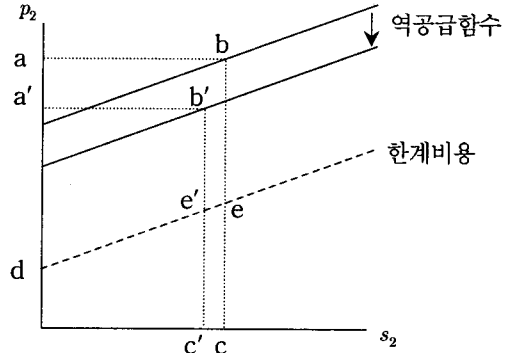


그림 A1. 발전회사2의 역공급함수
Fig. A1. Inverse supply function of genco2

A.3 $\partial k_2^{u*}(k_1^{sw})/\partial T < 0$ 의 증명

식 (9)로부터 식 (A5)를 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial k_2^{u*}(k_1^{sw})}{\partial k_1^{sw}} = \frac{1/a_1}{(\alpha_2 + A_1)[1 + (A_1 + A_2)a_2]} \quad (A5)$$

모든 계수가 양수이므로 $\partial k_2^{u*}(k_1^{sw})/\partial k_1^{sw} > 0$ 이고, A2에서 $\partial k_1^{sw}/\partial T < 0$ 임이 증명되었다. 따라서

$$\frac{\partial k_2^{u*}(k_1^{sw})}{\partial T} = \frac{\partial k_2^{u*}(k_1^{sw})}{\partial k_1^{sw}} \frac{\partial k_1^{sw}}{\partial T} < 0 \text{ 이다. Q.E.D.}$$

A.4 $\partial \rho/\partial T < 0$ 의 증명

식 (15)로부터 $\partial \rho/\partial T$ 은 식 (A6)와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{\frac{\partial M}{\partial T}(M-N) - M \frac{\partial(M-N)}{\partial T}}{(M-N)^2} \quad (A6)$$

여기서, $M = \partial \pi_1^u/\partial k_1|_{k_1=k_1^{sw}}$, $N = \partial \pi_1^c/\partial k_1|_{k_1=k_1^{sw}}$ 이다. 식 (8)에서 π_1^u 은 T 에 대한 함수가 아니므로 $\partial M/\partial T = 0$ 이다. 따라서 식 (A6)은 다음 식으로 정리

된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{M}{(M-N)^2} \frac{\partial N}{\partial T} \quad (A7)$$

π_1^u 는 k_1 에 대해서 concave 함수이고 $k_1^* < k_1^{sw}$ 이므로, M 은 음수이다.

식 (7)로부터 N 을 간단히 정리하면 식 (A8)과 같아진다.

$$N = \frac{p_1(k_1^{sw}) - b_1 - (k_1^{sw} - b_1)A_1a_1}{A_1a_1^2} \quad (A8)$$

그리고 식 (A8)을 T 에 대해 미분하여 정리하면 식 (A9)과 같이 된다.

$$\frac{\partial N}{\partial T} = - \frac{\alpha_1(1+A_1a_1)}{(A_1a_1)^2} \frac{\partial k_1^{sw}}{\partial T} \quad (A9)$$

A.2 에서 $\partial k_1^{sw}/\partial T < 0$ 임이 증명되었고 모든 계수가 양수이므로, $\partial N/\partial T > 0$ 이 된다. 식 (A7)에서 M 은 음수이고 $\partial N/\partial T > 0$ 이므로, $\partial \rho/\partial T < 0$ 이 된다. Q.E.D.

References

- [1] S. Borenstein, J. Bushnell, and S. Stoft, "The competitive effects of transmission capacity in a deregulated electricity industry", *RAND Journal of Economics*, vol. 31, no. 2, pp. 294-325, 2000.
- [2] L. B. Cunningham, R. Baldick, and M. L. Baughman, "An empirical study of applied game theory: transmission constrained cournot behavior", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 166-171, 2002.
- [3] J. D. Weber and T. J. Overbye, "A two-level optimization problem for analysis of market bidding strategies", *IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting*, Edmonton, AB, Canada, July 1999, vol. 2, pp. 682-687.
- [4] T. Peng and K. Tomovic, "Congestion influence on bidding strategies in an electricity market", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 1054-1061, 2003.
- [5] Y. W. Nam, J. K. Park, Y. T. Yoon, S. S. Kim, "Analysis of long-term contract effects on market equilibrium in the electricity market with transmission constraints", *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 153, No. 4, July 2006.
- [6] Y. Liu and F. F. Wu, "Impacts of Network Constraints on Electricity Market Equilibrium", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 126-135, 2007.
- [7] P. K. Dutta, *Strategies and games: theory and practice*, The MIT Press, Cambridge Massachusetts, 1999.

◆ 저자소개 ◆

남영우 (南瑛祐)

1975년 1월 6일생. 1996년 서울대학교 전기공학부 졸업. 1999년 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2006년 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(박사). 현재 LS산전(주) 자동화연구소 선임연구원.