

송전권을 보유한 발전회사의 이득 분석

정래혁* · 신재홍** · 이광호**
 *한국전력거래소, **단국대학교

Analysis on Genco's Profit with Financial Transmission Rights

Lae-Hyuk Jeong* · Jae-Hong Shin** · Kwang-Ho Lee**
 *Korea Power Exchange, **Dankook Univ.

Abstract - 재무적 송전권을 고려한 경쟁적 전력시장에서, 송전권을 소유한 발전회사는 송전권 시장에서 얻는 이득과 에너지 시장에서 얻는 이득을 고려하여 전략적으로 발전량을 결정한다. 그러므로 경쟁의 균형 상태에는 발전량에 대한 송전권 시장의 한계이득과 에너지 시장의 한계이득이 밀접하게 관련 되어 있다. 본 연구는 Cournot 모형을 사용하여, 송전권 시장과 에너지 시장을 결합한 모형을 시도하며 최적화 문제로 표현한다. 또한, 사례연구를 활용하여 균형상태에서 송전권 시장과 에너지 시장의 한계이득을 정량적으로 분석한다.

량으로 적분하여 계산한다.

전력의 시장거래가치를 극대화하려는 시장운영자와 달리 발전사는 이득을 최대화시키려한다. 송전선에 혼잡이 발생하는 경우, 송전권을 소유한 발전사는 에너지 시장과 별도로 송전권 시장에서 추가이득이 발생하므로 에너지 시장의 이득과 송전권 시장의 이득을 합한 전체이득을 극대화하는 발전량을 결정한다.

시장운영자의 거래량 결정과정을 최적화 문제로 표현한 식은 아래 식 (3)과 같으며 발전기업의 최적화 문제는 식 (4)와 같다.

1. 서론

전력산업이 경쟁체제로 개편되면서, 전력계통 운영자들은 송전계약으로 인해 발생하는 송전혼잡(Congestion)이 사회에 미치는 악영향을 최소화하기 위한 노력을 하고 있다. 이러한 노력으로 여러 제도적 장치가 개발되었으며, 대표적으로 재무적 송전권 시장을 운영하는 방법이 있다[1]. 우리나라도 서울을 비롯한 수도권에 소비자 집중도가 높은 반면 발전소는 서해안과 남해안에 대부분 위치하여 수도권으로 연결되는 송전선로에 혼잡이 빈번히 발생하므로, 재무적 송전권에 대해 관심을 가지고 연구할 필요가 있다.

최근 재무적 송전권에 관련된 연구는 시장참여자의 시장지배력을 줄이는 측면의 제도적 규제방법에 대한 연구가 진행되고 있다[2]. 하지만, 경쟁의 균형에 대한 분석과 전력소비자의 가격의존도에 대한 고려가 부족하다는 측면이 지적된다.

본 연구는 재무적 송전권을 포함한 전력시장에서 시장참여자들의 최적화 문제를 소개하며, 기존 연구에서 제안한 내쉬균형 계산기법을 활용하여 균형을 유도한다. 그리고 Cournot 모형을 사용한 균형상태에서 발전량에 대한 에너지 시장과 송전권 시장의 한계이득을 분석하고자 한다.

2. 재무적 송전권

재무적 송전권은 송전선의 혼잡에 따른 재정적 위험을 회피하기 위한 도구이며, 재무적 송전권을 소유한 시장참여자는 송전권이 설정된 선로 양단의 가격 차이와 선로의 최대송전용량의 곱에 해당하는 금액을 수입으로 얻게 된다. 재무적 송전권은 혼잡의 발생이 빈번한 선로에 계통운영자가 설정하게 되며 송전권 시장을 통한 거래로 시장참여자가 권리를 소유하게 된다.

3. 최적화 문제의 표현

발전사의 경쟁을 분석하기 위해, 수요함수와 한계비용함수를 아래와 같은 일차함수로 고려한다.

$$D_i(d_i) = b_{0i} - m_{0i}d_i \quad (1)$$

$$C_j^*(q_j) = b_j + m_jq_j \quad (2)$$

D_i : 모선 i 의 수요함수, C_j^* : 발전기 j 의 한계비용함수
 b_{0i} : 수요함수 절편, m_{0i} : 수요함수 기울기, b_j : 수요량
 b_j : 한계비용함수 절편, m_j : 한계비용함수 기울기, q_j : 발전량

전력 구매자의 가격 의존도를 나타내는 수요함수는 식 (1)에 소개되어 있으며 발전단가를 나타내는 한계비용함수는 식 (2)에 나타나 있다.

전력시장을 운영하는 시장운영자는 전력의 수급균형과 송전계약을 고려하여 사회적 후생(Social Welfare)을 최대화하는 거래량과 가격을 결정한다. 사회적 후생은 위와 같이 소비자의 만족가치(Benefit)에서 발전비용을 뺀 값으로 계산된다. 여기서, 소비자의 만족가치는 소개한 수요함수를 수요량으로 적분하여 계산하며 발전비용은 한계비용함수를 발전

$$\max_{d_i} SW = Benefit - Cost \quad (3)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^M d_i = \sum_{j=1}^N q_j, \quad f_{sr} \leq \bar{f}_{sr}$$

$$\max_{q_i} \quad \pi_i = \pi_{e,i} + \pi_{ftr,i} \quad (4)$$

$Benefit$: 소비자의 만족가치, $Cost$: 발전비용
 M : 부하의 개수 N : 발전사의 개수
 \bar{f}_{sr} : 모선 s와 모선 r에 연결된 선로의 조류량
 f_{sr} : 선로 f_{sr} 의 한계용량
 π_i : 발전사 i 의 이득, p_i : 에너지 가격, $C_i(q_i)$: 발전비용
 $\pi_{e,i}$: 발전사 i 의 에너지 시장 이득
 $\pi_{ftr,i}$: 발전사 i 의 송전권 시장 이득
 γ_i : 발전사 i 가 재무적 송전권을 소유한 비율
 p_r : 혼잡이 발생한 선로의 수전단 전력가격
 p_s : 혼잡이 발생한 선로의 송전단 전력가격

여기서, $\pi_{e,i} = p_i \cdot q_i - C_i(q_i)$, $\pi_{ftr,i} = \gamma_i \cdot \bar{f}_{sr} \cdot |p_r - p_s|$ 이다.

발전사의 이득을 나타내는 식 (4)에서 p_i , p_r , p_s 는 모두 수요함수에 의해 결정되는 LMP를 의미하지만, 구체적으로 정의하면 p_i 는 발전사가 위치한 모선의 LMP를 의미하고 p_r 와 p_s 는 혼잡이 발생한 송전선의 수전단과 송전단의 LMP를 의미한다.

내쉬 균형은 전력시장의 모든 시장참여자가 균형 상태를 이탈할 유인이 없는 상태이다. 그러므로 균형을 계산하기 위해서는 시장운영자의 최적조건과 경쟁에 참여한 발전기업의 최적조건을 모두 고려해야 한다.

4. 한계이득 정식화

발전량에 대한 한계이득을 계산하기 위해서는 균형 상태에서 발전기업의 이득이 어떻게 계산되는지에 대한 분석이 먼저 이루어져야 한다.

송전선의 혼잡이 균형 상태에 영향을 미쳐 복합전략(Mixed Strategy)으로 계산되는 경우, 송전선의 조류에 가장 큰 영향을 미치는 주참여자는 두 개의 전략 q_k^* , q_k^* 을 확률적으로 선택하고 주참여자를 제외한 참여자, 즉 일반참여자는 한 개의 전략 q_j^* 을 선택한 상태에서 균형이 이루어진다는 것은 잘 알려져 있다. 또한, 주참여자의 두 전략에 대해 각각 송전용량을 계산하면 하나의 전략 q_k^* 은 혼잡이 발생하지 않고 다른 하나의 전략 q_k^* 은 혼잡이 발생하는 상태로 나타난다. 그리고 주참여자가 복합전략을 선택하는 경우, 일반참여자의 이득은 주참여자의 전략과 확률에 따른 기대이득으로 계산되며 다음 식 (5)와 같다. 주참여자의 이득은 두 복합전략에서 같게 나타나며 식 (6)과 같다.

$$\pi_g(q_g^*) = \alpha \cdot \pi_g(q_g^*, q_k^*) + \beta \cdot \pi_g(q_g^*, q_k^*) \quad (5)$$

$$\pi_k(q_k^*) = \pi_k(q_g^*, q_k^*) = \pi_k(q_g^*, q_k^*) \quad (6)$$

α : 주참여자가 q_k^* 를 선택할 확률

β : 주참여자가 q_g^* 를 선택할 확률

일반적으로 송전선 한계용량이 작을수록, 주참여자가 혼잡상태를 유도하려는 유인(Incentive)인 α 가 커지고 반대로 비혼잡상태에 대한 β 는 감소한다.

발전량에 대한 에너지 시장의 한계이득은 에너지 시장의 이득을 발전량으로 편미분 $\partial \Pi_{e,i} / \partial q_i$ 하여 계산할 수 있으며 송전권 시장의 한계이득은 송전권 시장의 이득을 편미분 $\partial \Pi_{tr,i} / \partial q_i$ 하여 계산할 수 있다. 일례로 일반참여자의 한계이득을 살펴보면, 아래 식 (7)과 식 (8)과 같다.

$$\frac{\partial \Pi_{e,g}}{\partial q_g} = b_{0g} - m_{0g} \left\{ \alpha \left(d_g^* + \frac{\partial d_g^*}{\partial q_g} q_g \right) + \beta \left(d_g^* + \frac{\partial d_g^*}{\partial q_g} q_g \right) \right\} - (b_g + m_g q_g) \quad (7)$$

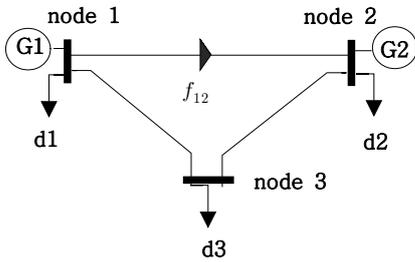
$$\frac{\partial \Pi_{tr,g}}{\partial q_g} = \alpha \cdot \left(m_{0g} \frac{\partial d_g^*}{\partial q_g} q_g - m_{0g} \frac{\partial d_g^*}{\partial q_g} q_g \right) \cdot k \cdot \gamma_g \quad (8)$$

여기서, m_{0g} , b_{0g} 는 각각 일반참여자가 g 가 위치한 모선의 수요함수 기울기와 절편이다. 그리고 d_{0g}^* , d_{0g}^* 는 각각 주참여자가 q_k^* 를 선택했을 때의 부하량과 q_g^* 를 선택했을 때의 부하량을 의미한다.

5. 사례 연구

4.1 시장의 조건

송전권을 고려한 전력시장에서 발전량에 대한 한계이득은 아래 그림 1의 모형을 활용하여 분석한다. 공급경쟁에 참여하는 발전기업은 G1과 G2이고 부하는 모선별 하나의 집중된 수요를 갖는다. 그리고 송전선의 리액턴스는 $x_{12} = x_{13} = x_{23}$ 의 관계가 있다.



<그림 1> 계통모형

발전기업의 한계비용특성을 $\bar{C}_1(q_1) = 5 + 0.25q_1$, $\bar{C}_2(q_2) = 10 + 0.45q_2$ 으로 고려하고 부하의 수요특성은 $D_1(d_1) = 90 - 0.5d_1$, $D_2(d_2) = 100 - 0.5d_2$, 그리고 $D_3(d_3) = 150 - 0.5d_3$ 이다.

4.2 한계이득 비교

송전선의 한계용량 제약을 고려하지 않고 균형상태를 구하면, $q_1 = 158$, $q_2 = 98$ 으로 계산된다. 그리고 부하는 $d_1 = 39$, $d_2 = 58$, $d_3 = 159$ 으로 총발전량과 일치하며 송수전단에 발전기업이 위치한 송전선로의 선로조류 f_{12} 는 26.4이다. 또한 지역별 한계가격은 모든 모선에서 동일하게 71이다. 이러한 상태에서 각 발전기업은 $\pi_1 = 7243$, $\pi_2 = 3791$ 의 이득을 얻는다.

송수전단에 발전기업이 위치한 송전선로에 송전 한계용량을 $k = 20$ 으로 고려하고 송전권을 어느 발전사도 소유하지 않은 경우 ($\gamma_1 = 0$, $\gamma_2 = 0$)와 송전권을 G1이 모두 소유한 경우 ($\gamma_1 = 1$, $\gamma_2 = 0$)를 구분하여 균형상태에서 G1의 이득과 한계이득을 구하였다. 표 1과 같이 균형상태에서 G2는 두 개의 전략을 확률적으로 선택하는 주참여자가 되고 G1은 하나의 전략을 선택하는 일반참여자가 되는 상태에서 균형이 이루어지는 것을 확인하였다.

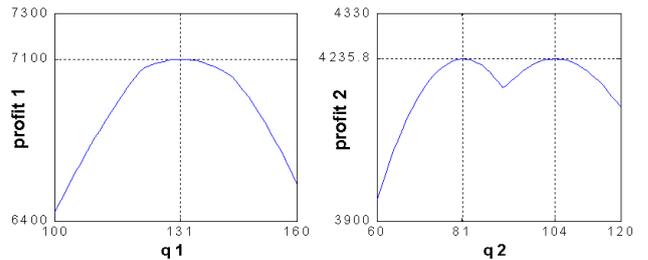
<표 1> 송전제약이 있는 경우 발전회사 G1의 이득 분석

구분	$\gamma_1 = 0, \gamma_2 = 0$		$\gamma_1 = 1, \gamma_2 = 0$			
	G1 발전량	131		131		
균형전략	G2	발전량	104	81.2	104	81.2
		확률	0.54	0.46	0.33	0.67
G1의 이득	에너지시장	6,997		7,033		
	송전권	0		67		
	총이득	6,997		7,100		
G1의 한계이득	에너지	0		-6.72		
	송전권	0		6.72		

송전권이 없는 상태($\gamma_1 = 0, \gamma_2 = 0$)에서 균형상태의 이득을 비교해보면, G1의 이득은 감소하고 G2이득은 3791에서 4236으로 증가한다. 또한 송전선제약이 자유로운 전력거래를 방해하기 때문에 사회적 후생도 감소하게 된다.

반면, 표 1에 소개된 $\gamma_1 = 0$ 인 상태와 $\gamma_1 = 1$ 인 상태의 균형을 비교하면, 균형상태의 발전량은 동일하지만 주참여자인 G2의 확률은 변화된다. 또한, G1이 송전권을 소유하고 있기 때문에 송전권 시장에서 추가적인 이득이 발생한다. 즉, G1은 송전권을 최대한 활용하여 이득을 증가시킨다. 반면, G2는 γ_1 에 관계없이 동일한 전략을 사용하게 되므로 G2의 이득은 변화가 없게 된다.

균형 상태에서 송전권을 소유한 G1의 한계이득을 계산해보면, 위와 같이 부호는 반대로 크기는 같은 상태로 계산된다. 즉, G1이 균형 상태에서 발전량을 조금 증가시키면 에너지시장에서의 이득은 감소하게 되지만, 동일한 크기로 송전권 시장에서의 이득은 증가하게 된다. 그러므로 균형 상태에서 발전량을 변화시킬 유인이 없는 것이다. 이를 보다 분명히 하기 위해 발전량의 변화에 따른 발전기업의 이득 변화를 살펴보면 아래 그림과 같다.



<그림 2> 내쉬균형 확인

그림 2의 왼쪽 그래프는 q_2 를 균형발전량으로 고정시킨 상태에서 q_1 을 변화시키며 이득을 계산한, G1의 한계보수(Marginal Profit)를 나타내고 오른쪽 그래프는 균형상태의 q_1 에 대해 q_2 를 변화시키며 한계보수를 계산한 결과이다. 한계보수에서 알 수 있듯이, 균형상태의 발전량을 증가시키면 이득이 감소하게 되어 현 상태를 유지하게 된다. 즉, 균형상태의 전략에서 발전기업의 이득이 최대가 되므로 내쉬균형 조건을 만족한다. 또한 G2의 이득은 두 전략에서 최대이며 동일하기 때문에 두 전략을 확률적으로 선택한다는 것을 미루어 짐작할 수 있다.

6. 결 론

재무적 송전권을 고려한 전력시장에서, 선로에 혼잡이 발생하는 경우 재무적 송전권은 균형상태에 영향을 미친다. 본 연구는 한계이득 측면에서 균형상태를 분석하였으며 사례연구를 통해 계통에 적용한 결과, 송전권을 소유한 발전기업의 에너지시장과 송전권시장의 한계이득은 부호가 반대이며 동일한 값을 가지는 것을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] J. H. Kim, J. B. Park and J. R. Shin, "Analysis of the Competitive Effects of Financial Transmission Rights on Electricity Markets," KIEE Trans, vol. 53, no. 6. pp. 350-357, June, 2004.
- [2] J. S. Park, K. Y. Chung and B. H. Kim, "A Study on the Mitigation of Market Power using Contingent Transmission Rights in Competitive Electricity Markets," KIEE Trans, vol. 56, no. 2. pp. 268-276, Feb, 2007.
- [3] K. H. Lee, "Solving Mixed Strategy Equilibria of Multi-Player Games with a Transmission Congestion," KIEE Trans, vol. 55A, no. 11, pp. 492-497, Nov, 2006.