

송전권이 포함된 전력거래에서의 사회적 후생 분석

신재홍 · 이광호
단국대학교 전기공학과

Analysis on Social Welfare in Power Transaction with Financial Transmission Rights

Jae-Hong Shin · Kwang-Ho Lee
Dep. of Electrical Eng.,
Dankook University

Abstract - 재무적 송전권을 소유한 발전사는 송전권 시장에서 얻는 이득을 고려하여 전략적으로 발전량을 결정한다. 그러므로 경쟁의 균형에서 사회적 후생은 송전권과 밀접한 관련이 있다. 본 연구는 에너지시장과 송전권시장이 결합된 전력시장을 모형화하여 시장참여자의 최적화 문제를 소개한다. 그리고 단순한 사례모형을 활용하여 사회적으로 바람직한 송전권 소유에 대해 분석을 시도한다.

1. 서 론

전 세계적으로 전력산업은 경제체제로 변화되고 있다. 경제체제의 전력시장을 안정적으로 운영하기 위한 중요한 요소 중 하나가 송전망 운영분야이다. 특히, 송전선의 혼잡(Congestion)현상은 특정 발전기의 발전량을 제한하기 때문에 사회적으로 바람직한 전력거래를 방해한다. 그러므로 세계각국에서 송전혼잡을 최소화하기 위한 노력이 진행 중이며 대표적으로 FERC의 경우, 재무적 송전권에 기반을 둔 시장을 추천하고 있다.

재무적 송전권에 대한 연구는 국내외에서도 시도된 바 있다[1]. 이들 연구는 송전권과 시장지배력의 관계 그리고 송전권 운영방식에 관심을 두고 있다. 하지만, 경쟁의 균형상태에 대한 검증이 부족하다는 측면과 대칭적인 전력시장을 대상으로 하였다는 측면에서 일반화하기에 어려움이 있다.

송전권을 고려한 경쟁적 전력시장을 해석하기 위해서는 게임의 내쉬 균형조건과 계산기법이 중요하다. 본 연구에서는 송전권을 고려한 연구에서 활용하는 지역별한계가격(LMP)체제의 Cournot모형에 대해 균형을 분석한다[1] 또한, 단순한 사례모형을 활용하여 사회적 후생(Social Welfare ; SW) 측면에서 바람직한 송전권 소유에 대해 소개한다.

2. 재무적 송전권

재무적 송전권(Financial transmission rights)이란 시장참여자에게 지리적인 위험 회피 수단을 제공하기 위한 도구로 혼잡이 빈번하게 발생하는 송전선을 대상으로 정의된다[1]. 재무적 송전권을 보유하고 있는 시장참여자는 해당 선로에 혼잡이 발생하는 경우, 혼잡수입의 일부를 권리에 비례하여 받게 된다.

예를 들어, 시장참여자 i 가 최대송전용량 k [MW]인 송전선의 재무적 송전권을 $\gamma_i \in [0,1]$ 만큼의 비율로 보유하고 있다고 가정하면, 해당 송전선에 혼잡이 발생하는 경우 시장참여자 i 는 송전선의 송수신단 전력가격 차와 송전용량을 곱한 혼잡수입 중 γ_i 만큼을 획득한다.

송전권 소유에 대한 경쟁은 경매를 통해 이루어진다[2]. 송전권의 경매를 포함하여 경쟁을 분석하는 경우, 경매참여자가 송전권 가치평가를 어떻게 평가하느냐에 대한 고려가 필요하므로 이에 대한 분석은 매우 복잡해진다. 그러므로 본 연구에서는 송전권 경매에 대한 분석은 고려하지 않고, 한 발전사가 송전권의 일부 또는 전체를 소유한 경우를 대상으로 한다.

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 거래가치를 의미하는 사회적 후생을 최대화하는 거래량과 가격을 결정한다. 단, 시장운영자는 식 (3)과 같이 전력의 수급균형과 송전선 제약의 항시 고려해야한다.

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

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^M d_i = \sum_{j=1}^N q_j$$

$$f_{sr} \leq \bar{f}_{sr}$$

Benefit : 소비자의 만족가치, *Cost* : 발전비용
M : 부하 개수, *N* : 발전기 개수
 \bar{f}_{sr} : 모선 s 와 모선 r 에 연결된 선로의 조류량
 f_{sr} : 선로 f_{sr} 의 한계용량

사회적 후생은 위와 같이 소비자의 만족가치(Benefit)에서 발전비용을 뺀 값으로 계산된다. 여기서, 소비자의 만족가치는 식 (1)에서 소개한 수요함수를 수요량으로 적분하여 계산하며 발전비용은 식 (2)의 한계비용함수를 발전량으로 적분하여 계산한다.

전력의 시장거래가치를 극대화하려는 시장운영자와 달리 발전사는 이득을 최대화시키려한다. 송전선에 혼잡이 발생하는 경우, 송전권을 소유한 발전사는 에너지시장과 별도로 송전권시장에서 추가이득이 발생하므로 식 (4)와 같이 에너지시장의 이득과 송전권시장의 이득을 합한 전체 이득을 극대화하는 발전량을 결정한다.

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

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

π_i : 발전사 i 의 이득, p_i : 에너지 가격, $C_i^*(q_i)$: 발전비용
 $\pi_{e,i}$: 발전사 i 의 에너지시장 이득
 $\pi_{ftr,i}$: 발전사 i 의 송전권시장 이득
 γ_i : 발전사 i 가 재무적 송전권을 소유한 비율
 p_r : 혼잡이 발생한 선로의 수전단 전력가격
 p_s : 혼잡이 발생한 선로의 송전단 전력가격

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

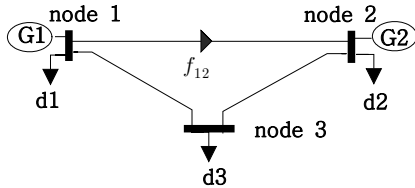
내쉬균형은 전력시장의 모든 시장참여자가 균형상태를 이탈할 유인이 없는 상태이다. 그러므로 균형을 계산하기 위해서는 시장운영자의 최적조건과 경쟁에 참여한 발전기업의 최적조건을 모두 고려해야한다.

송전 한계용량이 균형에 영향을 미쳐 복합전략(Mixed Strategy)이 계산되는 경우, 균형의 계산기법은 Lemke알고리즘을 활용하는 방법과 송전선의 선로분배계수(PTDF)를 이용하여 참여자를 구분하고 해석적으로 균형상태를 계산하는 방법이다.[2]. 본 연구에서는 두 접근 방법 중 참여자를 구분하는 해석적 기법을 활용하여 균형을 계산한다.

4. 사례 연구

4.1 시장의 조건

송전권 소유와 사회적 후생의 관계를 살펴보기 위해 그림 1의 모형을 고려한다. 공급경쟁에 참여하는 발전사는 G1과 G2이고 부하는 모선별 하나의 집중된 수요를 갖는다.



<그림 1> 계통모형

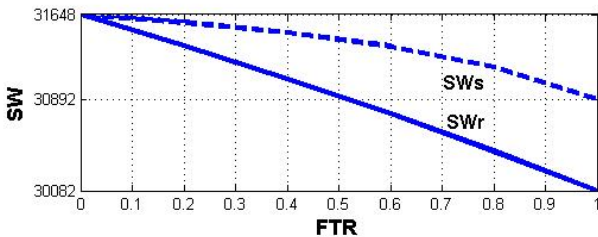
발전사의 한계비용특성은 각각 $\overline{C}_1(q_1) = 1 + 0.01q_1$, $\overline{C}_2(q_2) = 5 + 0.05q_2$ 이고 부하의 수요특성은 각각 $D_1(d_1) = 100 - 0.7d_1$, $D_2(d_2) = 150 - 0.4d_2$, $D_3(d_3) = 100 - 0.8d_3$ 이다. 그리고 송전선의 리액턴스는 $x_{12} = x_{13} = x_{23}$ 의 관계가 있다.

4.2 송전권 소유에 따른 사회적 후생 변화

시장참여자의 최적조건을 만족시키는 균형상태는 송전선의 한계용량과 송전권에 따라 영향을 받으며, 비혼잡상태의 단순전략(Pure Strategy) 균형, 복합전략 균형(Mixed Strategy), 그리고 혼잡상태의 단순전략 균형으로 구분된다. 또한, 위 모형에서 균형상태를 분석하면, 송전선의 한계용량이 송전권에 비해 큰 영향을 미치게 된다. 만약 4.1절의 사례계통에서 송전권을 고려하지 않고 균형상태를 계산하면, 송전선 f_{12} 의 한계용량 $\overline{f}_{12} = 85$ 에서 비혼잡 단순전략 균형과 복합전략 균형이 구분되고 한계용량이 25에서 복합전략 균형과 혼잡 단순전략 균형이 구분된다. 본 사례연구에서는 한계용량이 충분히 큰 $\overline{f}_{12} = 100$, 그리고 균형상태를 변화시키는 임계(Critical)용량 85, 25사이에 위치한 $\overline{f}_{12} = 60$ 그리고 혼잡 단순전략 균형이 나타나는 임계용량 25보다 작은 $\overline{f}_{12} = 20$ 에 대해 분석을 시도한다. 또한, G1, G2 중 한 발전사만이 γ 의 비율로 송전권을 소유하고 있다고 가정하고 균형을 계산한다.

송전선의 한계용량이 충분히 큰 $\overline{f}_{12} = 100$ 인 상태에서 균형상태를 구하면, $q_1 = 227$, $q_2 = 173$ 으로 계산된다. 그리고 부하는 $d_1 = 76$, $d_2 = 258$, $d_3 = 66$ 으로 총 발전량과 일치하며 선로조류 f_{12} 는 78.5이다. 이 경우, 발전사는 혼잡을 전략적으로 이용하지 못하므로 송전권이 균형상태에 영향을 미치지 않으므로 사회적 후생은 변하지 않는다.

다음 그림 2는 송전 한계용량이 $\overline{f}_{12} = 60$ 인 상태에서, 송전권 소유에 따른 사회적 후생 변화를 보여준다. 그림에서 점선으로 나타나는 SWs는 송전단에 위치한 발전사가 소유한 경우의 사회적 후생을 의미하며 실선 SWr은 수전단에 위치한 발전사가 소유한 상태의 사회적 후생을 나타낸다. 그리고 FTR은 송전권을 소유한 비율 γ 를 의미한다.

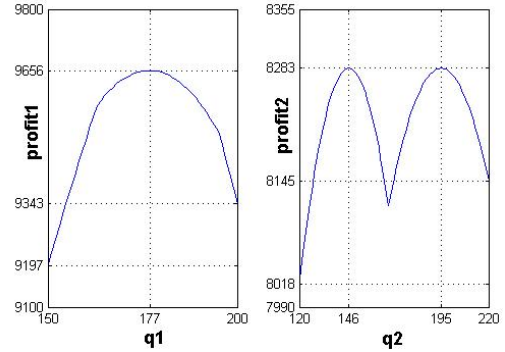


<그림 2> $\overline{f}_{12} = 60$ 에서 송전권 소유에 따른 사회적 후생 비교

사회적 후생의 변화를 보면, 송전권의 소유비율이 증가함에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 송전권을 소유한 발전사가 혼잡을 전략적으로 사용하는 유인이 작용한 것으로 해석된다. 또한, 송전권 소유자에 따른 사회적 후생의 변화를 비교해보면, 송전단에 위치한 발전사가 송전권을 소유한 것이 수전단에 비해 감소량이 적게 나타난다. 즉, 송전단에 위치한 발전사가 송전권을 소유한 것이 수전단이 소유한 것에 비해 사회적으로 바람직한 것을 알 수 있다.

한계용량이 60인 상태에서 균형상태를 계산하면, 송전권의 소유비율에 관계없이 수전단에 위치한 발전사는 두 전략을 확률적으로 사용하고 송전단에 위치한 발전사는 하나의 전략을 사용하는 균형상태가 나타난다. 예를 들어, 송전단에 위치한 발전사끼리 송전권을 모두 가지고 있는 경우

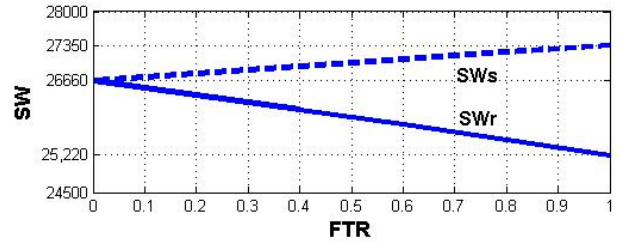
즉, $\gamma_1 = 1$ 의 균형상태를 계산하면 G1은 $q_1 = 177$ 을 선택하고 G2는 $q_2 = [146, 195]$ 를 각각 $[0.41, 0.59]$ 의 확률로 선택한다. 우선, 이와 같은 상태가 내쉬균형을 만족하는지를 살펴보기 위해, 한계이득을 계산해보면 그림 3과 같다.



<그림 3> $\overline{f}_{12} = 60$, $\gamma_1 = 1$ 에서 내쉬균형 확인

발전사의 한계이득 변화를 보면, 균형상태에서 각 발전사의 이득이 최대로 나타난다. 그리고 G2의 한계이득은 확률적으로 선택한 146과 195에서 동일하다는 것을 알 수 있다. 또한, G2가 146을 선택했을 때 송전선에 흐르는 조류량을 계산하면 혼잡이 발생하고 195를 선택하면 혼잡이 발생하지 않는다. 즉, G2가 혼잡상태의 전략과 비혼잡상태의 전략을 동시에 선택하는 복합전략에서 균형이 나타난다.

반면, 송전 한계용량이 매우 작은 상태인 $\overline{f}_{12} = 20$ 인 상태에서 내쉬균형은 혼잡상태에서 두 발전사 모두 하나의 전략을 선택하는 단순전략에서 균형이 이루어진다. 이때의 송전권 소유비율과 사회적 후생의 관계를 살펴보면 아래 그림과 같다.



<그림 4> $\overline{f}_{12} = 20$ 에서 송전권 소유에 따른 사회적 후생 비교

송전 한계용량이 20인 경우, 수전단의 발전사가 송전권을 소유하면 사회적 후생이 감소하게 되고 송전단의 발전사가 소유하면 증가하는 상태가 나타난다. 결과적으로, 송전단에 위치한 발전사가 송전권을 소유한 것이 수전단에 비해 사회적으로 바람직한 것을 알 수 있다.

5. 결론

송전 한계용량이 충분치 않은 경우, 재무적 송전권은 균형상태에 영향을 미치게 된다. 본 연구는 사회적 후생 측면에서 바람직한 송전권 소유에 대해 분석하였으며 분석결과, 송전단에 위치한 발전사가 송전권을 소유하고 있는 것이 바람직하다는 것을 확인하였다. 또한, 송전 한계용량이 매우 작은 상태에서 송전단에 위치한 발전사가 송전권을 소유하고 있다면, 사회적 후생은 증가하는 것을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] P. Joskow and J. Tirole, "Transmission Rights and Market Power on Electric Power Networks," RAND Journal of Economics, vol. 31, no. 3, pp. 450-487, 2000.
- [2] K. H. Lee, "Solving Mixed Strategy Equilibria of Multi-Player Games with a Transmission Congestion," KIEE Trans, vol. 55A, no. 11, Nov, pp. 492-497, 2006.
- [3] R. P. O'Neill, U. Helman and R. Baldick, "Contingent Transmission Rights in the Standard Market Design," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 18, no. 4, pp. 1331-1337, Nov, 2003.