

손실을 고려한 전력시장 균형점과 손실계수 적용에 대한 연구

김상훈 · 이광호
단국대학교 전기공학과

A Study on Electricity Market Equilibrium with Transmission Loss and Application of The Loss Factor

Sang-Hoon Kim · Kwang-Ho Lee
Dep. of Electrical Eng, Dankook University

Abstract - 전력산업의 시장구조는 과점형태의 불완전 경쟁의 구조로 해석하는 것이 일반적이다. 또한 전기의 물리적 특성상 송전선로에서는 전력손실이 발생하게 되는데, 본 논문은 과점시장 모델로서 쿠르노(Cournot)모델을 사용하여 손실을 포함한 내쉬 균형점을 해석한다. 지역별 한계가격(Local Marginal Price ; LMP)와는 달리 계통한계가격(System Marginal Price ; SMP)는 손실에 대한 가격신호를 시장에 반영하기 어렵기 때문에 손실과 함께 한계송전손실계수(Marginal Loss Factor ; MLF)를 적용하여 균형상태의 시장거래가치를 비교분석한다.

여기서, $MLF_{L,i}$ 는 임의의 모선 i 의 한계송전손실계수, $\Delta P_{G,R}$ 는 기준 모선 발전량의 증가량, $\Delta P_{L,i}$ 는 모선 i 의 부하의 단위증가량, ΔP_{loss}^i 는 모선 i 의 단위부하증가에 의한 손실증가량을 의미한다.

3. 손실을 고려한 전력시장 균형점

내쉬균형은 경쟁에 참여한 모든 발전기업이 균형 입찰전략을 바꿀 유인이 존재하지 않는 상태를 의미한다. 손실을 고려한 내쉬균형전략을 구하기 위한 계통모형으로 두 개의 발전기업 G_1, G_2 가 전력시장에 참여한 것으로 하며 그때의 공급함수와 수요특성은 다음과 같다.

1. 서 론

향후 우리나라에 양방향입찰시장(Two-Way Bidding Pool; TWBP)이 운영되면 전력공급자와 전력구매자들의 입찰을 통하여 전력거래가격이 형성된다. 그리고 전력거래는 전력이라는 재화의 물리적 특성으로 인해 송전 네트워크를 통해 거래된다. 때문에 송전선로, 변압기, 기타 무효전력 보상기 등을 거치면서 손실을 발생시키게 되므로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 송전 손실을 고려하는 경우, 복잡한 비선형문제를 해결해야하는 어려움으로 인해 경쟁의 균형에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 논문에서는 손실을 포함한 전력시장에서 경쟁의 균형상태를 분석한다. 그리고 발전력 경쟁에 많이 활용되는 Cournot모형을 사용하여 발전시장을 모형화한다. 또한, 현재 우리나라에 적용하고 있는 SMP가격 모델은 지역적 가격신호를 제공하지 못하기 때문에 한계송전손실계수(Marginal Loss Factor ; MLF)를 기반으로 지역별 한계가격(Local Marginal Price ; LMP)를 근사화하여 균형상태를 계산한다. 그리고 MLF의 계산은 기준 모선(Reference Node)이 선로의 송전단으로 고려하는 경우와 수신단으로 고려하는 경우와 달라진다. 그러므로 본 연구에서는 기준 모선을 송전단 또는 수신단으로 구분하여 균형을 계산하고 각 균형상태를 비교한다.

$$\text{한계비용함수} : C'_i(q_i) = b_i + m_i q_i \quad (2)$$

$$\text{수요특성} : D_j(d_j) = b_{0j} - m_{0j} d_j \quad (3)$$

$$\text{송전망손실} : P_{loss} = k(q_1 - d_1)^2 \quad (4)$$

손실에 대한 식은 다음과 같이 유도된다.

$$P_{loss} = I^2 R = \left(\frac{P+Q}{V}\right)^2 R \approx \frac{R}{V^2} P^2 = kP^2 \quad (5)$$

I 는 선로에 흐르는 전류이며 R 은 선로저항, 그리고 V 와 Q 는 계통에서의 전압값과 무효전력이다. 계통 전압이 일정하고 무효전력을 무시한다면 손실에 대한 식 (5)를 (4)와 같이 근사화하여 나타낼 수 있음을 보여주고 있다. P 는 선로에 흐르는 조류이므로 $P = q_1 - d_1$ 와 같이 나타낼 수 있게 된다.

2. 가격체제와 한계송전손실계수

2.1 SMP와 LMP

SMP는 계통의 모든 모선가격이 거래시간별 모선의 최고가격으로 결정되는 가격결정방식이며, 이는 곧 모든 모선가격이 동일함(uniform)을 의미한다.

LMP(Local Marginal Price)는 시간과 공간에 따른 모선 각각의 독립적인 전력가격을 의미한다. 전력계통에서의 혼잡과, 송전손실 등의 요인들은 균형상태의 각 모선가격을 변화시켜 LMP를 발생시킨다. 본 논문에서는 손실이 전력시장 균형에 주는 영향에 중점을 두어 혼잡은 무시하도록 한다.

쿠르노모델의 전력시장에서 각 모선가격은 MO(Market Operator)에 의해 결정된다. MO는 발전사로부터 제공받은 입찰함수를 이용, 시장거래가치를 최대화하는 최적화를 통하여 수요량을 결정하게 되고 수요량이 결정됨에 따라 모선가격이 결정된다. 이 과정에서 가격체제를 SMP로 결정하느냐, LMP로 결정하느냐에 따라 시장균형점이 달라지게 된다.

2.2 한계송전손실계수(Marginal Loss Factor)

각 모선에서의 손실에 대한 유발정도를 나타내는 지수로서 한계송전손실계수를 사용한다. 한계송전손실계수는 임의의 모선 i 의 단위부하 증가에 대한 기준모선의 발전량의 증가로서 정의되며 다음 식과 같이 주어진다.

$$MLF_{L,i} = \frac{\Delta P_{G,R}}{\Delta P_{L,i}} = 1 + \frac{\Delta P_{loss}^i}{\Delta P_{L,i}} \quad (1)$$

3.1 LMP 전력시장에서의 균형점

균형상태의 전력가격과 거래량은 MO(Market Operator)의 시장거래가치 극대화목적과 발전기업의 이득 극대화 목적을 동시에 만족시켜야 한다. 이런 문제를 해결하는 방법을 2단계(Bi-level)최적화[1]라고 하며 MO의 목적함수와 발전기업의 목적함수를 동시에 극대화시키는 과정을 통해 시장균형상태를 도출할 수 있다. MO와 발전기업의 목적함수를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\max SW(d_i) = \sum B_j(d_j) \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum q_i = \sum d_j + P_{loss} \quad (7)$$

$$P_{loss} = k(q_1 - d_1)^2 \quad (8)$$

$$\max \Pi_i(q_i) = p_i q_i - C'_i(q_i) \quad (9)$$

$$p_i = b_{0i} - m_{0i} d_i \quad (10)$$

MO는 식 (6)와 같이 전력의 시장거래가치를 의미하는 사회적후생을 극대화시키는 전력거래를 결정한다. 식 (6)에서 B 는 소비자 만족정도(Benefit)를 의미하며 수요특성 D_j 를 수요량으로 적분하여 계산된다. 또한 C'_i 는 MO가 고려하는 발전비용을 의미하는 것으로 한계비용함수 C'_i 를 발전량으로 적분함으로써 구해진다.

반면, 발전기업은 식 (9)과 같이 이득 Π_i 를 극대화시키는 입찰전략 q_i 를 선택한다. 이득은 전력가격 p 와 거래량 q 로 계산되는 수익(Revenue)에서 비용 C'_i 를 뺀 값으로 계산되며 C'_i 는 한계비용함수 C'_i 를 전력거래량으로 적분하여 계산할 수 있다.

이와같이 LMP가격체제의 전력시장에서의 균형은 위의 식을 만족하는 q_1 과 q_2 를 찾아냄으로서 구할 수 있다. 균형일 때의 모선가격은 손실에

의해서, 전력손실을 유발하는 쪽의 모선가격이 더 낮다는 것을 예상할 수 있다[2].

3.2 SMP 전력시장에서의 균형점

SMP가격체계에서도 위의 MO와 발전기업의 2단계(Bi-level)최적화[8]로서 구해낼 수 있다. 하지만, SMP는 Uniform Price 이므로 MO의 최적화는 제약조건인 (7)과 다음의 식 (11)의 연립으로서 d_1, d_2 가 결정된다.

$$b_{01} - m_{01}d_1 = b_{02} - m_{02}d_2 \quad (11)$$

MO에서 d_1, d_2 배분이 결정되면 발전기업은 최적화를 통하여 q_1 과 q_2 의 균형점을 구할 수 있다.

3.3 SMP에의 MLF적용

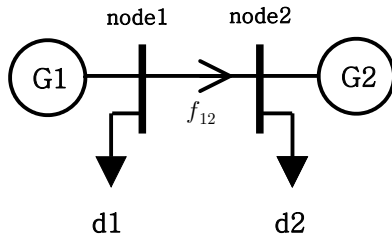
SMP가격체계에서의 균형점은 송전손실에 의한 가격신호는 무시된 채 모선가격이 동일하게 결정되기 때문에 시장참여자들에게 경제적이고 효율적인 사업운영을 할 수 없게 만들고 있다. 이에 각 발전기의 SMP 입찰가격에 송전손실을 고려하여 제조정함으로서 지역적 가격을 만들어내는 방법이 SMP에 MLF를 적용하는 것이다. 이에 대한 균형점을 도출하는 최적화는 위 (6)~(11)까지의 2단계 최적화에서 (8)의 식만 다음과 같이 바뀌면 된다.

$$\max \Pi_i(q_i) = (MLF_i p_i)q_i - C_i(q_i) \quad (12)$$

위 (12)수식은 수요에 의해 결정된 모선가격에 MLF를 곱하여 발전기업 최적화를 진행하는 내용으로, 균형점에서의 각 모선가격은 전력량이 유입되는 쪽이 더 높을 것이라는 예상을 할 수 있다.[2]

4. 사례연구

계통모형은 아래 그림 1과 같은 발전기와 부하가 각각 1개씩 있는 2 모선 계통을 사용한다. 한계비용함수와 수요함수 그리고 손실은 표1과 같다. 손실이 전력시장 균형점에 미치는 영향에 중점을 두었기 때문에 선로제약과 발전력 제약은 고려하지 않았다.



<그림 1> 사용한 계통 모델

<표 1> 한계비용함수와 수요함수 그리고 손실

구분	함수형태
G 1	$C'_1(q_1) = 0.5q_1 + 20$
G 2	$C'_2(q_2) = 0.5q_2 + 20$
Load 1	$D_1(d_1) = 90 - 0.5d_1$
Load 2	$D_2(d_2) = 100 - 0.5d_2$
Loss	$P_{loss} = 0.003(q_1 - d_1)^2$

표1의 함수들에 대해 (5)~(12)의 식을 적용하여 시장 균형점을 계산한 결과가 표3과 같다. 손실에 대한 내용으로 인해 비선형 문제가 나타나 Excel solver를 이용하여 균형점을 도출하였으며 가격체계에 따라 LMP전력시장에서의 균형점, SMP전력시장에서의 균형점을 구하였다. SMP에 MLF를 적용한 균형점은, 기준모선에 따라 MLF가 달라지게 된다. 따라서 1모선이 기준으로 하였을 때를 근사적 LMP라 하여 LMP'이라 하고, 2모선이 기준으로 하였을 때를 LMP"이라 하겠다. 표2는 기준모선이 송전단일 때와 수전단일 때의 MLF를 비교하고 있다.

<표 2> 기준모선 변화에 따른 한계송전손실계수

기준모선	MLF_1	MLF_2
1(송전단)	1.0	1.06966
2(수전단)	0.941083	1.0

표2에서의 결과값을 보면, LMP와 더불어 SMP에 손실계수를 적용하여 줌으로서 균형상태의 모선가격에 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 이에 따라 높은 가격 쪽의 발전사들의 이득은 커지는데 반해 낮은 가격 쪽의 발전사들의 이득은 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 발전사업자가 수요가 많은 곳에 발전소를 신설하면 더욱 많은 이득을 볼 수 있으나 멀리 떨어진 곳에서 수요가 많은 도심지 쪽에 전력을 공급하는 경우에는 많은 이득을 보지는 못한다는 의미로 해석된다. 수요자의 경우에는 수요가 많은(도심지 등의) 모선이 아닌 수요량이 적은 모선에서 전력을 사용하면 좀더 저렴한 가격으로 전력을 사용할 수 있다는 의미가기도 하다.

시장거래가치 측면에서 분석을 하면, 1모선을 기준으로 한 LMP'이 2 모선을 기준으로 한 LMP"보다 높은 결과가 나왔다. 이것은 손실계수를 고려하여 제조정된 가격으로서 균형점을 찾을 때 손실을 유발시키는 모선, 즉 1모선을 기준으로 한 MLF를 적용시키는 것이 시장거래가치가 더 크다는 것을 의미한다.

<표 3> 균형상태에서의 입찰전략과 손실, 그리고 시장거래가치

구분	LMP	SMP	LMP'	LMP"
q_1 [MW]	55.86	60.75	59.67	57.20
q_2 [MW]	57.96	59.40	63.09	60.36
Loss [MW]	0.13	0.35	0.21	0.22
$f_{12}=(q_1-d_1)$	6.51	10.85	8.40	8.53
Π_1	1751.85	1814.17	1757.08	1572.77
Π_2	1932.25	1793.94	2086.69	1845.54
p_1	65.33	65.05	64.36	61.80
p_2	67.83	65.05	68.85	65.67
SW	5335.56	5429.06	5474.32	5396.27

5. 결 론

본 논문에서는 손실을 포함한 전력시장에서 경쟁의 균형상태를 분석하였고, 가격체계에 따라 시장 균형점이 달리 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히, Uniform Price인 SMP에 MLF를 적용함으로써 손실에 대한 가격신호를 반영하였으며 그 결과 손실감소효과가 나타나는 것을 확인하였다. 그리고 MLF를 송전단 모선을 기준으로 하였을 때와 수전단 모선을 기준으로 하였을 때의 균형점에서 시장거래가치를 비교분석한 결과 송전단 모선을 기준모선으로 정하는 것이 바람직한 것으로 확인되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. D. Webber and T.J.Overbye, "A Two-Level Optimization Problem for Analysis of Market Bidding Strategies," IEEE PES Summer Meeting, vol.12, pp. 682-687, 1999.
- [2] 전력연구원, "현물시장에의 적용을 위한 한계송전손실계수 산정 알고리즘 개발에 관한 연구," 2003.
- [3] K. D. Sadi, Fundamentals of power system economics, John Wiley & Sons, 2004.
- [4] N. S. Rau, Optimization Principles, John Wiley & Sons, 2003.
- [5] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, 1996.
- [6] M. Shahidehpour, H. Yamin and Z. Li, Market Operations in Electric Power Systems, John Wiley & Sons, 2002.