

경쟁적 전력시장에서 한계손실계수 적용시 기준모선 선정에 대한 연구

論 文

58-2-8

A Study on the Selection of Slack Bus at Application of Marginal Loss-Factor in a Competitive Electricity Market

金 尙 勳[†] · 李 光 浩^{*}
(Sang-Hoon Kim · Kwang-Ho Lee)

Abstract - Marginal Loss Factor(MLF) is represented as the sensitivity of transmission loss, which is computed from the change of the generation at slack bus by the change of the load at the arbitrary bus. The MLF dependent on the selection of slack bus is one of the key factors affecting nodal pricing, Genco's profits, social welfare(SW) and Nash Equilibrium in a competitive electricity market. This paper addresses the methodology of slack bus selection by using Cournot model of Cost Based Pool market. Numerical results from sample cases show that the slack bus of MLF of the highest average is beneficial from the view points of SW.

Key Words : Electricity Market, Marginal Loss Factor, Cournot Model, Nash Equilibrium, Slack Bus

1. 서 론

전력시스템에서는 전기라는 상품의 물리적인 특성 상 송전선로에서의 손실이 필연적으로 발생한다. 송전손실은 발전사업자의 공급비용을 상승시키기 때문에 전력시장 전체의 사회적후생(Social Welfare) 측면에서도 중요하게 고려되어야 한다. 따라서 송전손실에 대한 가격신호를 경쟁적 전력시장에 반영하기 위하여 송전손실계수를 사용하는데, 송전손실계수에 따라 시장참여자의 입찰전략과 시장균형점이 달라지므로 시장운영자는 합리적이고 신뢰성 있는 송전손실계수를 산정해 내는 것이 중요하다.

송전손실 및 송전손실계수와 관련하여 국내외에서 많은 연구가 진행된 바 있다. 전력연구원에서 수행한 연구에서는 전력시장에 경쟁을 도입한 일부 선진국들의 송전손실계수 산정법과 우리나라에 맞는 송전손실계수 산정법을 소개한 바 있으며[1], 최근 해외에서는 경쟁적 전력시장에서 송전손실비용을 시장참여자에게 재분배(Loss Allocation)함에 있어 송전손실계수를 이용하는 연구가 진행된 바 있다[2].

기존의 송전손실계수관련 연구들에서는 다양한 송전손실계수들의 산정법과 신뢰도 제고, 국내 시장에 적합한 계수의 선정 등에 초점을 두어 많은 연구가 진행되어 왔지만[1-3], 손실계수 산정 시 기준모선(slack bus) 선정에 관심을 둔 연구는 진행된 바 없다.

현재 국내에서 사용하는 송전손실계수는 한계손실계수(transmission Marginal Loss Factor : MLF)로서 기준모선

에 따라 그 값이 변하게 되는데, 전력거래소에서는 기준모선을 보령화력으로 정하고 있다[4]. 하지만, 보령화력을 기준모선을 정하는 데에 있어서 뚜렷한 선정법이나 유인을 두고 있지 않으며 국내 전력시스템에서 전기적으로 중립적 위치인 충청도 지방에 기준모선을 두고 있다.

본 연구에서는 송전손실계수로서 MLF를 산출하여 사용한다. 그리고 우리나라의 변동비반영시장(Cost Based Pool: CBP)을 불완전 경쟁의 과점시장 모형인 쿠르노모형(Cournot Model)로 모형화하여 MLF를 반영하고, 쿠르노 내쉬 균형(Cournot Nash Equilibrium)을 구한다. 전력시장에서의 내쉬 균형을 구하는 데 MLF를 반영한다는 것은 송전손실을 전력시장에 반영한다는 의미를 가지고 있다. MLF는 기준모선에 따라 변동하는 수치이기 때문에 기준모선을 달리함에 따라서 내쉬 균형점 또한 달라진다. 따라서 본 연구에서는 기준모선을 변화시켜가며 MLF를 적용시켜 시장거래가치로 볼 수 있는 사회적후생 측면에서 비교분석함으로써 적절한 기준모선 선정방법을 제안한다.

2. 쿠르노 내쉬균형과 한계손실계수

2.1 손실을 반영하지 않은 쿠르노 내쉬균형

전력시장은 특성상 완전경쟁을 유도하기가 쉽지 않기 때문에 과점형태의 전력시장을 가정하고 해석하게 되며, 과점시장 분석모형에는 쿠르노 모형과 Bertrand 모형, 그리고 공급함수 모형 등이 있다. 그 중 쿠르노 모형은 생산량 공급 경쟁을 공급자가 생산량을 선택하는 것으로 해석하는 모형이기 때문에 우리나라의 CBP시장에 가장 근접한 전력시장 모형이라고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 불완전 과점형태의 국내 전력시장을 쿠르노 모형으로서 모형화한다.

쿠르노 내쉬균형(Cournot Nash Equilibrium : CNE)은

[†] 교신저자, 準會員 : 檀國大 電氣工學科 碩士課程

E-mail : hoonsmile@dankook.ac.kr

^{*} 正 會 員 : 檀國大 電子電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2008年 10月 16日

最終完了 : 2008年 12月 15日

쿠르노 모형의 전력시장에서 시장운영자(Market Operator : MO)의 시장거래가치 극대화와 발전기업(GenCo)의 이득 극대화를 동시에 만족시키는 균형점을 의미하며 이러한 문제는 2단계 최적화를 통하여 도출해 낼 수 있다[5]. 다음은 과점구조의 전력시장에서 MO와 GenCo의 목적함수를 표현하고 있다.

$$\text{발전비용} : C_i(q_i) = b_i q_i + \frac{1}{2} m_i q_i^2 \quad (1)$$

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

$$\text{수요특성} : D_i(d_i) = b_{0i} - m_{0i} d_i \quad (3)$$

$$\text{MO 최적화} : \max SW(d_i) = \sum B_i(d_i) - \sum C_i(q_i) \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum q_i = \sum d_i \quad (5)$$

$$\text{GenCo 최적화} : \max \Pi_i(q_i) = p_i q_i - C_i(q_i) \quad (6)$$

$$p_i = b_{0i} - m_{0i} d_i \quad (7)$$

여기서 q_i 는 i 모선 발전기의 발전력이고 d_i 는 수요량이며 b 와 m 은 함수의 상수항과 1차항의 계수이다. 그리고 p_i 는 모선가격을 의미하고, $D_i(d_i)$ 를 수요량으로 적분하여 계산되는 $B_i(d_i)$ 는 구매자의 만족정도(Benefit)을 의미한다. MO가 수행하는 식(4)의 목적함수는 SW 를 극대화시키는 전력거래를 결정하게 되는데, 결과물로서 수요량 d_i 와 함께 모선가격 p_i 를 결정짓는다. 식(6)의 목적함수는 GenCo의 이득(Profit : Π_i)을 극대화시키는 발전량 q_i 를 결정하게 되며, CNE 는 이렇게 2단계에 걸친 목적함수의 최적화(Optimization)를 통해 q_i 값을 찾아냄으로 구할 수 있다. 본 연구에서는 송전손실계수와 기준모선 선정에 대하여 중점을 두었기 때문에 전력시스템에서의 발전력 제약과 송전선로의 용량제약 등은 무시하였다.

2.2 손실을 반영하는 쿠르노 내쉬 균형

전력시스템에서의 손실을 경쟁적 전력시장에 반영하기 위해서는 손실에 대한 표현식이 필요하다. 정확한 전력손실은 조류계산을 통하여 구할 수 있는데, 다음은 전력시스템에서 유효전력으로서 근사적으로 송전손실을 산출하는 함수이다[6].

$$P_{Loss} = I_{ij}^2 R_{ij} = \left(\frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_{ij}} \right)^2 R_{ij} = \frac{R_{ij}}{V_{ij}^2} P_{ij}^2 = k_{ij} P_{ij}^2 \quad (8)$$

i 모선과 j 모선사이 송전선로에서 I_{ij} 는 송전전류이며 R_{ij} 는 송전선로저항, P_{ij} 와 Q_{ij} 는 각각 송전선로의 유효전력과 무효전력, V_{ij} 는 선간전압, 그리고 k_{ij} 는 송전선로의 저항과 전압에 대한 계수이다. 전압이 정격이고, Q_{ij} 가 0이라는 가정 하에 위 식에서와 같이 손실을 $P_{Loss} = k_{ij} P_{ij}^2$ 와 같이 근사화하여 표현할 수 있다. 이러한 전력손실에 대한 함수를 반영하여 CNE 를 구하기 위해서는 MO의 최적화에서 제약조건인 전체 전력시장의 수급조건식의 변화가 필요하다. 식(5)는 전력손실이 없는 경우 발전량과 구매량이 동일하다는 조건이므로 식(5)를 다음의 식(9)과 같이 P_{Loss} 를 포함하여 균형점 계산을 하게 되면 손실에 대한 가격신호를 반영하는 CNE 를 구할 수 있다.

$$\text{MO 최적화} : \max SW(d_i) = \sum B_i(d_i) - \sum C_i(q_i) \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum q_i = \sum d_i + P_{Loss}$$

$$\text{GenCo 최적화} : \max \Pi_i(q_i) = p_i q_i - C_i(q_i)$$

$$p_i = b_{0i} - m_{0i} d_i$$

식(9)를 포함한 2단계 최적화 문제는 손실에 대한 내용이 보다 사실적으로 반영되지만, 유효전력에 대한 2차식이 나타나는 등 복잡한 비선형문제를 해결해야하는 어려움으로 인해 경쟁의 균형을 구하기가 어렵다. 그렇기 때문에 이러한 송전손실에 대한 가격신호를 보다 편리하게 반영하는 대체 방안으로서 송전손실계수를 사용한다.

송전손실계수는 그 물리적 의미와 산정방법에 따라 여러 종류의 계수들이 존재한다. 본 연구에서는 가장 대표적이면서 국내에서 사용하고 있는[4] 손실계수로서 한계손실계수(transmission Marginal Loss Factor : MLF)를 사용하였다. MLF 는 전력조류계산을 통해 산정되는 값이며 모선의 손실 유발정도를 나타내는 지표이다. MLF 의 산정방법 및 물리적인 특성은 다음 2.3 절에서 소개하기로 한다. MLF 를 송전손실에 대한 가격신호로서 CNE 를 구하는 과정에 반영하기 위해서는 GenCo의 목적함수인 (6)식을 다음 (10)식으로 대체하면 된다.

$$\text{MO 최적화} : \max SW(d_i) = \sum B_i(d_i) - \sum C_i(q_i)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum q_i = \sum d_i$$

$$\text{GenCo 최적화} : \max \Pi_i(q_i) = (MLF_i p_i) q_i - C_i(q_i) \quad (10)$$

$$p_i = b_{0i} - m_{0i} d_i$$

식 (10)은 손실유발정도를 나타내는 MLF 와 모선가격 p_i 와의 곱으로써 손실에 대한 가격신호를 CNE 에 반영하는 것이며, 공급 집중지역의 모선가격을 낮게, 수요 집중지역의 모선가격을 높게 보정한다는 의미를 지니고 있다. 모선가격 p_i 는 GenCo의 전략결정 및 이득에 주요한 영향을 미친다. 따라서 손실유발정도에 따라 모선가격 보정을 해 줌으로써 발전량과 수요량 변화를 유도하는 것이다.

2.3 한계손실계수의 산정

송전손실계수는 송전손실을 많이 유발하는 모선에 대하여 페널티를 부여하기 위해 고려된 것이다. 페널티계수(Penalty Factor : PF)는 송전손실계수 중 가장 널리 이용되어오던 계수로서 임의의 i 모선에서의 다음과 같이 표현된다[8].

$$PF_i = \frac{1}{1 - \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_{G,i}}} \quad (11)$$

여기서 P_{Loss} 는 시스템의 손실을 의미하며 $P_{G,i}$ 는 i 모선에서의 발전량을 의미한다. PF_i 의 계산은 조류계산의 자코비안 관계식을 기반으로 한 기준모선 방식에 의해 유도되는데, PF_i 와 한계손실계수의 관계는 다음과 같다[1].

$$MLF_i = \frac{\partial P_{G,r}}{\partial P_{Load,i}} = \frac{\partial P_{Load,i} + \partial P_{Loss}}{\partial P_{Load,i}} \quad (12)$$

$$= 1 + \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_{Load,i}} = 1 - \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_{G,i}} = \frac{1}{PF_i}$$

MLF_i 는 임의 모선의 단위부하 증가량($\partial P_{Load,i}$)에 대한 기준모선의 발전량 증가($\partial P_{G,r}$)로서 위 식과 같이 유도 된다. 발전량 증가는 부하의 증가량($\partial P_{Load,i}$)과 손실의 증가량(∂P_{Loss})의 합과 같고, 부하 증가량은 발전 감소량($-\partial P_{G,i}$)과 동일하다고 볼 수 있기 때문에 위 식과 같이 MLF_i 는 PF_i 의 역수 의미를 갖는다.

MLF 의 물리적 의미를 보면, 단위부하가 증가할 때 얼마의 손실이 증가하는가를 보는 것이기 때문에 손실을 보다 많이 유발하는 모선의 경우에 1보다 큰 값이 측정될 것이다. 모선가격과의 곱으로 반영되는 MLF 는 손실을 보다 많이 발생시키는 모선의 가격은 높여주어 해당모선에서의 발전이 늘도록 유도시키게 된다. 반면에 손실을 적게 발생시키는 모선의 가격은 낮춰주어 해당모선에서의 발전이 줄도록 유도시켜 발전량 결정에 영향을 미치게 하는 것이다.

3. 기준모선에 따른 한계손실계수와 내쉬균형

3.1 해석적으로 손실을 반영하는 쿠르노 내쉬균형

해석적으로 손실을 반영하는 쿠르노 내쉬균형은 식(4),(9),(6),(7)의 최적화를 통해 구해낼 수 있다. 식(9)는 2단계 최적화 중 MO의 사회적후생(SW)을 극대화하는 목적함수의 제약조건이다. 해석적으로 손실을 반영하는 MO의 최적화에서는 식(5)와 같이 손실을 반영하지 않았을 경우와는 다른 수요량과 모선가격이 계산된다. 송전손실을 전력시장에 반영한다는 것은 결과적으로 시장 전체의 시장거래가치 변화와 함께 새로운 쿠르노 내쉬 균형(CNE)을 초래하기 때문에 중요한 의미를 갖는다.

표 1 발전기 비용특성과 수요함수

Table 1 Generators' Data and Demand Function

구분	한계비용 함수형태	수요함수 형태	b_i	m_i	b_{0i}	m_{0i}
1 모선	$b_1 + m_1q_1$	$b_{01} - m_{01}d_1$	10	0.5	80	0.5
2 모선	$b_2 + m_2q_2$	$b_{02} - m_{02}d_2$	20	0.5	80	0.5
3 모선	$b_3 + m_3q_3$	$b_{03} - m_{03}d_3$	20	0.5	100	0.5

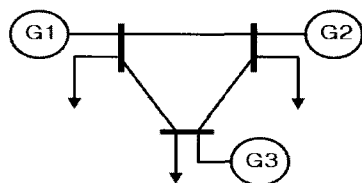


그림 1 3모선 계통 전력시장

Fig. 1 3-BUS Power System Electricity Market

위의 표 1과 그림 1은 송전손실을 고려하여 CNE 를 분석하기 위한 간단한 3모선계통의 데이터이다. 3모선 계통의 해석적인 손실반영 CNE 를 구하기 위해 1모선과

2모선은 전력이 주입되는 모선($q_i - d_i > 0, i = 1, 2$)이며, 3모선은 부하모선($q_3 - d_3 < 0$)이라 가정한다. 그리고 제약조건인 (9)식을 라그랑지안 함수에 포함시키면 목적함수를 다음 식과 같이 바꿀 수 있다.

$$L = \{\sum B_i(d_i) - \sum C_i(q_i)\} + \lambda(\sum q_i - \sum d_i - P_{Loss}) \quad (13)$$

$$P_{Loss} = k_{ij}P_{ij}^2 = k_{12}\{\alpha_{12}(q_1 - d_1) - \beta_{12}(q_2 - d_2)\}^2 + k_{13}\{\alpha_{13}(q_1 - d_1) + \beta_{13}(q_2 - d_2)\}^2 + k_{23}\{\alpha_{23}(q_1 - d_1) + \beta_{23}(q_2 - d_2)\}^2 \quad (14)$$

여기서, α 와 β 는 1모선과 2모선의 PTDF이며 $X_{ij} = 0.2, k_{ij} = 0.001$ 로 가정하였다. 이 전력시스템은 세 GenCo와 MO의 4자 경쟁 게임이라고도 표현할 수 있는데, 각 GenCo는 자사의 이득을 극대화 시킬 것이며($\partial \pi_i / \partial q_i = 0$) MO는 SW 를 극대화시킬 것이다($\partial L / \partial \lambda = 0$). 해석적으로 손실을 반영하는 CNE 는 식(13)을 이용하여 GenCo1의 이득 극대화, GenCo2의 이득 극대화, GenCo3의 이득 극대화를 반복 수행함으로써 균형점을 찾아낼 수 있다. 본 연구에서는 Excel Solver 프로그램을 이용하여 CNE 를 구하였으며, 다음 표 2는 그에 대한 결과이다.

표 2 해석적으로 손실을 반영한 CNE 결과

Table 2 CNE Results of exponent loss method

모선	q_i	d_i	P_{Loss}	모선가격	이득	발전비용	Benefit	SW
1	65.1	49.2	0.21	55.4	1897.4	1709.9	3328.2	7433.4
2	51.4	48.0		56.0	1191.5	1690.1	3261.3	
3	59.3	78.5		60.8	1538.2	2062.6	6306.6	

해석적으로 손실을 고려하여 CNE 를 구하는 것은 손실에 대한 함수가 q_i 와 d_i 의 2차식으로 나타나게 되고, SW 극대화 문제를 풀아가는 과정이 매우 복잡하기 때문에 프로그램을 이용하여 구해내야 한다. 하지만, 프로그램을 통하여 손실을 고려한 CNE 를 구하는 것 또한 계통이 복잡해질수록 게임의 균형문제를 풀기 어렵기 때문에 위와 같이 해석적 방법으로 CNE 를 구해내는 것은 어려운 일이다.

3.2 한계손실계수로 손실을 반영하는 쿠르노 내쉬균형

해석적 기법으로 손실을 반영하여 CNE 를 구해내는 것은 앞 3.1에서처럼 비선형 문제에 대한 해석 및 수렴성 보장등의 이유로 인하여 어려운 문제임을 설명하였다. 따라서 본 절에서는 식(10)을 이용, MLF 를 이용하여 손실에 대한 가격신호를 보다 쉽게 반영한다.

MLF 로 손실을 반영하기 위해서는 우선, 계통에서의 MLF 값을 구하여야 한다. MLF 는 조류계산 수행 이후의 결과로부터 도출되는 자코비안 관계식으로부터 다음의 표 3과 같이 구해낼 수 있다[1]. 그림 2는 구한 MLF 를 그래프로 나타낸 것이다.

표 3 기준모선을 달리한 MLF 결과

Table 3 MLF Results of Slack-BUS selection

기준모선	MLF_1	MLF_2	MLF_3	MLF 평균
1	1.0000	1.0106	1.0387	1.02
2	0.9902	1.0000	1.0282	1.01
3	0.9635	0.9733	1.0000	0.98

$$\begin{matrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \lambda \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{matrix} = \begin{matrix} m_{01} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & m_{02} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & m_{03} & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ m_{01}MLF_1 & 0 & 0 & 0 & m_{01}MLF_1(\partial d_1/\partial q_1) + m_1 \\ 0 & m_{02}MLF_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{03}MLF_3 & 0 & 0 \end{matrix} \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ m_{02}MLF_2(\partial d_2/\partial q_2) + m_2 \\ 0 & 0 & m_{03}MLF_3(\partial d_3/\partial q_3) + m_3 \end{matrix}^{-1} \begin{matrix} b_{01} \\ b_{02} \\ b_{03} \\ 0 \\ b_{01}MLF_1 - b_1 \\ b_{02}MLF_2 - b_2 \\ b_{03}MLF_3 \end{matrix} \quad (15)$$

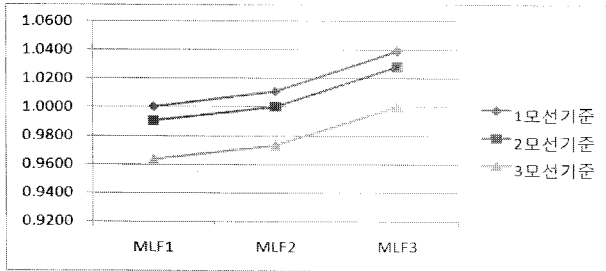


그림 2 기준모선 변화에 따른 MLF
Fig. 2 MLF graph of Slack-BUS selection

표 3에서의 MLF값들을 식(10)에 대입하여 2단계 최적화 과정을 수행함으로써 MLF로 손실을 반영하는 새로운 CNE를 구할 수 있다. 식(10)을 이용한 CNE를 구하는 방법은 해석적으로 손실을 반영하는 방법과는 달리 최적화 과정에서의 식이 선형으로 나타나게 된다. 그렇기 때문에 식 (4),(5),(10),(7)의 2단계 최적화에서 최적조건식을 정리하면 위의 식(15)와 같은 행렬식으로 표현할 수 있다.

행렬식(15)를 이용하여 기준모선을 바꾸어가며 CNE를 계산한 결과는 다음 표 4와 같다. 그림 3은 그에 대한 모선별 가격을 보여주고 있다. 한계손실계수로서 손실을 반영한 CNE결과는 해석적으로 손실을 반영한 CNE결과와 다른 균형점을 보이고 있으며, 모선별 가격 또한 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

표 4 기준모선 변화에 따른 CNE 결과

Table 4 CNE Result of Slack-BUS selection

구분	1모선기준	2모선기준	3모선기준
q1	69.50	69.15	68.13
q2	55.26	54.81	53.71
q3	57.22	56.80	55.63
d1	47.33	46.92	45.82
d2	47.33	46.92	45.82
d3	87.33	86.92	85.82
Price1	56.34	55.99	55.00
Price2	56.94	56.54	55.57
Price3	58.52	58.13	57.09
가격평균	57.26	56.89	55.89

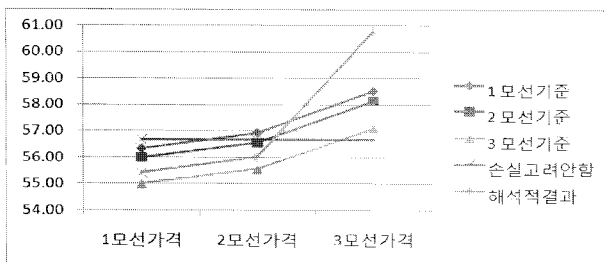


그림 3 기준모선 변화에 따른 CNE에서의 모선가격
Fig. 3 CNE Price of Slack-BUS selection

그림에서 손실을 고려하지 않은, 즉 MLF를 적용하지 않았을 경우에는 '손실고려안함'으로 명시하였다. 이는 손실에 대한 가격신호를 반영하지 않았음을 나타내고 있으며, 이때 각 모선가격은 모두 같게 나타난다. MLF를 적용한 결과를 살펴보면 MLF 크기 순서와 동일하게 각 모선별로 가격이 변화되어 지역별 모선가격(Locational Marginal Price : LMP)이 나타난다는 것과, 기준모선을 다르게 할 때마다의 모선가격이 가시적으로 구분되는 것을 알 수 있다. 표 4와 그림 3을 보면, 부하집중지역 일수록 MLF와 모선가격 높다는 것을 알 수 있다.

3.3 합리적인 기준모선 제시

경쟁적 전력시장에서 그 시장거래가치로 고려할 수 있는 것이 사회적후생(Social Welfare : SW)이다. 본 연구에서는 시스템의 합리적인 기준모선 선택을 가장 높은 SW를 갖게 하는 모선으로 고려하였다.

MLF는 기준모선을 달리함에 따라 값이 변하기 때문에 MLF의 평균 또한 기준모선에 따라 변한다. 본 연구에서는 기준모선을 달리 하면서 MLF를 적용시킨 결과, MLF값들의 평균을 가장 높게 만드는 기준모선의 경우에 가장 높은 SW가 나타나는 것을 확인하였다. 이는 대상계통을 통해 확인 할 수 있으며, 다음 그림 4에서 나타난다.

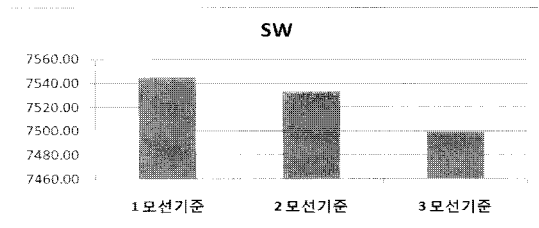


그림 4 기준모선 변화에 따른 CNE에서의 SW

Fig. 4 SW of Slack-BUS selection

CNE결과를 분석하여 볼 때 계통에서의 MLF가 적용되면 그 기준모선을 어디에 두느냐에 따라 MLF평균이 달라진다. 따라서 기준모선을 변화하며 MLF를 반영한 결과에서 SW를 가장 높게 만드는 기준모선을 선정하면 되는데, 이는 결국 가장 높은 MLF평균값의 기준모선을 선정하는 것이 시장거래가치를 극대화시키는 기준모선 선정이 되는 것이다.

4. 사례연구

4.1 적용대상 계통

적용대상 시스템은 그림 5와 같은 IEEE 14모선계통을 사용하였으며, 모든 모선에 독립된 발전사와 구매자가

있다고 가정하여 쿠르노 모형에 적합하게 일부 수정하였다. 각 발전기의 한계비용특성과 수요특성 데이터는 표 5와 같다. 본 논문은 송전손실계수 적용시 기준모선의 선정법에 관한 연구로서, 주제에 맞도록 발전력 제약과 송전선로의 용량제약 등은 고려하지 않았다.

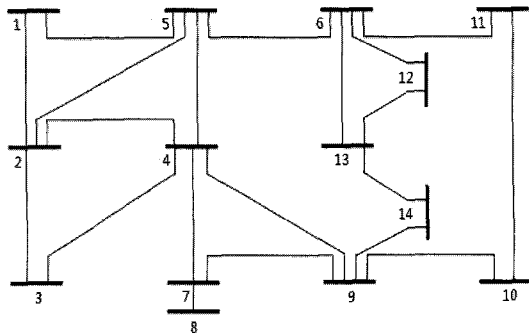


그림 5 IEEE 14모선 계통 전력시장
Fig. 5 IEEE 14-BUS Power System Electricity Market

표 5 발전기 비용특성과 수요함수
Table 5 Demand Function and Generators' Data

BUS	b_i	m_i	b_{0i}	m_{0i}
1	11	0.7	70	-0.4
2	9	0.4	100	-0.625
3	10	0.6	80	-0.425
4	8	0.7	115	-0.65
5	12	0.5	105	-0.725
6	9	0.4	95	-0.5
7	10	0.6	100	-0.675
8	8	0.7	75	-0.525
9	9	0.4	100	-0.7
10	9	0.4	80	-0.575
11	10	0.6	110	-0.45
12	9	0.7	85	-0.6
13	12	0.5	90	-0.475
14	12	0.5	120	-0.55

송전손실을 고려하지 않고 CNE를 구하면 각 발전력은 $q = [56.70, 100.02, 67.15, 60.76, 75.90, 100.02, 67.15, 60.76, 100.02, 100.02, 67.15, 60.76, 75.89, 48.06]$, 각 부하는 $d = [42.76, 75.37, 63.78, 95.55, 71.87, 84.21, 69.78, 42.10, 67.29, 47.14, 126.90, 53.51, 78.11, 122.01]$ 이 되어 총 1040.37 MW의

표 6 IEEE 14모선 시스템에서 기준모선을 달리한 MLF결과
Table 6 MLF Result of Slack-BUS selection in IEEE 14-bus system

기준모선	MLF1	MLF2	MLF3	MLF4	MLF5	MLF6	MLF7	MLF8	MLF9	MLF10	MLF11	MLF12	MLF13	MLF14	평균
1	1.0000	1.0019	1.0026	1.0033	1.0022	1.0037	1.0040	1.0036	1.0051	1.0043	1.0046	1.0040	1.0044	1.0055	1.0035
2	1.0005	1.0000	1.0009	1.0018	1.0012	1.0026	1.0026	1.0022	1.0037	1.0030	1.0034	1.0028	1.0032	1.0042	1.0023
3	1.0017	1.0015	1.0000	1.0024	1.0023	1.0035	1.0032	1.0029	1.0044	1.0038	1.0042	1.0037	1.0041	1.0050	1.0030
4	1.0000	0.9999	0.9999	1.0000	1.0003	1.0014	1.0009	1.0005	1.0021	1.0015	1.0021	1.0016	1.0019	1.0027	1.0011
5	1.0001	1.0006	1.0010	1.0015	1.0000	1.0017	1.0022	1.0018	1.0032	1.0024	1.0026	1.0020	1.0024	1.0036	1.0018
6	1.0011	1.0013	1.0017	1.0020	1.0011	1.0000	1.0024	1.0020	1.0030	1.0017	1.0015	1.0005	1.0011	1.0028	1.0016
7	1.0014	1.0014	1.0014	1.0015	1.0017	1.0024	1.0000	0.9996	1.0026	1.0022	1.0029	1.0025	1.0028	1.0034	1.0018
8	1.0056	1.0056	1.0056	1.0058	1.0059	1.0066	1.0042	1.0000	1.0068	1.0064	1.0071	1.0067	1.0070	1.0076	1.0058
9	0.9997	0.9997	0.9998	1.0000	0.9999	1.0003	0.9998	0.9995	1.0000	0.9998	1.0006	1.0004	1.0006	1.0010	1.0001
10	1.0023	1.0024	1.0026	1.0028	1.0024	1.0023	1.0028	1.0024	1.0031	1.0000	1.0018	1.0025	1.0029	1.0037	1.0024
11	1.0020	1.0022	1.0024	1.0027	1.0021	1.0015	1.0029	1.0025	1.0034	1.0012	1.0000	1.0018	1.0023	1.0036	1.0022
12	1.0028	1.0031	1.0034	1.0037	1.0029	1.0020	1.0040	1.0036	1.0046	1.0034	1.0033	1.0000	1.0020	1.0040	1.0030
13	1.0017	1.0019	1.0021	1.0025	1.0017	1.0010	1.0027	1.0023	1.0032	1.0022	1.0022	1.0004	1.0000	1.0023	1.0019
14	1.0009	1.0010	1.0012	1.0015	1.0010	1.0009	1.0015	1.0011	1.0018	1.0012	1.0016	1.0006	1.0005	1.0000	1.0011

전력이 생산되어 공급된다. 이때의 모선가격은 52.896으로 전 모선에서 동일하며, 시장거래가치인 사회적후생은 SW=48389.3이다. IEEE 14모선계통은 3모선계통과 비교하여 변수가 많아지기 때문에, 3.1절에서와 같이 해석적으로 손실을 고려하는 CNE를 계산하는데 수렴성의 문제로 어려움이 있다. 따라서 다음 절에서는, MLF를 이용하여 전력손실을 고려하는 CNE를 계산한다.

4.2 한계손실계수를 포함하는 쿠르노 내쉬균형

MLF로 손실을 반영하는 CNE를 구하기 위해서는 우선, 계통에서의 MLF값을 구하여야 한다. MLF는 조류계산 수행 이후 자코비안의 부분행렬인 H행렬과, 기준모선에 대한 위상각 변화에 대한 유입유효전력 변화분의 열행렬로부터 구해낼 수 있다[1]. 다음의 표 6은 1모선 ~ 14 모선까지 기준모선을 달리 해가며 구한 MLF를 나타낸 것이며 MLF 평균값을 가장 크게 만드는 기준모선은 8모선임을 알 수 있다.

표 7 8모선 기준의 CNE결과
Table 7 CNE Result of 8 bus selection

모선	q	d	모선 가격	이득	발전 비용	Benefit	SW
1	56.90	43.11	53.05	1259.47	1758.84	2646.06	48403.7
2	100.3	75.59	53.05	2406.29	2915.96	5773.48	
3	67.37	64.10	53.05	1538.83	2035.18	4255.12	
4	60.97	95.76	53.06	1446.17	1788.66	8032.19	
5	76.17	72.06	53.06	1677.42	2364.74	5684.04	
6	100.4	84.49	53.10	2412.10	2921.50	6241.85	
7	67.25	69.99	52.98	1533.45	2029.51	5345.82	
8	60.57	42.37	52.76	1426.80	1768.83	2706.53	
9	100.5	67.49	53.11	2413.26	2922.61	5154.89	
10	100.4	47.38	53.09	2411.11	2920.56	3145.09	
11	67.48	127.2	53.13	1544.36	2040.99	10352.1	
12	61.03	53.74	53.11	1449.42	1791.98	3701.54	
13	76.28	78.41	53.12	1682.34	2370.04	5596.69	
14	48.31	122.3	53.16	1404.82	1163.02	10560.8	

MLF를 고려하는 CNE는 식(15)를 14모선에 맞게 확장하여 구할 수 있다. 따라서, 기준모선 변화에 따른 MLF를 적용하면, 총 14가지의 CNE를 구할 수 있다. MLF를 고려하는 CNE 결과는 MLF를 고려하지 않은 경우와 비교하여 발전량 q와 수요량 d가 변하게 되며, 모선가격 또한 전 모선

동일가격이 아닌, 지역별 가격(Locational Marginal Price)이 나타나게 된다. 표 7은 *MLF* 평균값이 가장 높은, 8모선을 기준모선으로 선정하였을 경우의 *CNE* 결과를 보여주고 있다.

4.3 합리적인 기준모선 선정

기준모선의 선정이 중요시되는 이유는, 기준모선의 선정에 따라 발전량과 수요량이 변하게 되며, 결과적으로 발전사의 이득과 시장의 균형상태를 변하게 만들기 때문이다. 본 연구에서는 3.3절 에서처럼 시장거래가치로 볼 수 있는 *SW*를 기준모선 선정의 척도로 고려하였으며, 그 결과 *MLF* 평균을 가장 높게 만드는 기준모선을 선정하여 *CNE*를 구한 경우의 *SW*가 가장 높다는 것을 찾아내었다. 다음의 그림 6은 기준모선을 달리 하여 *CNE*를 구하고, 각각의 *SW*를 계산하여 나타낸 것이다. 그림 6에서 나타난 결과는, *MLF* 평균을 가장 높게 만드는 모선인 8모선을 기준모선으로 선정하였을 경우 *SW*가 가장 높다는 것을 보여주고 있다.

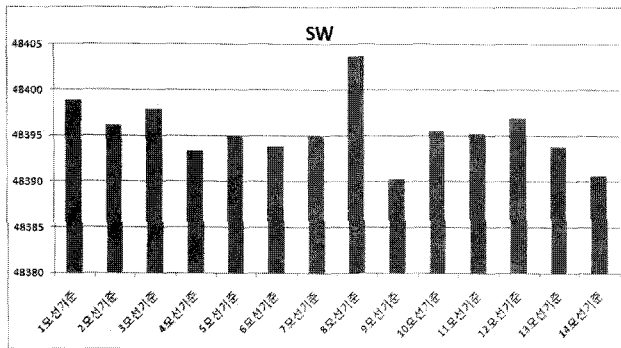


그림 6 기준모선을 달리한 *SW* 결과
Fig. 6 *SW* Result of Slack-BUS selection

5. 결 론

본 연구는 경쟁적 전력시장에서 한계손실계수 적용 시 기준모선 선정과 시장거래가치인 사회적후생과의 관계를 분석하였다. 우리나라의 변동비반영시장을 쿠르노 모델로서 모형화하여 적용시켰으며, 기준모선을 변화시켜 가며 한계손실계수를 반영한 쿠르노 내쉬균형의 사회적후생을 비교분석한 결과, 가장 높은 한계손실계수 평균값을 갖는 기준모선을 선정할 때 시장거래가치가 극대화 된다는 것을 확인하였다.

전력시스템에서 기준모선이 갖는 의미는 여러 가지가 있을 수 있겠으나 본 연구에서는 기준모선 선정을 한계손실계수와 관련지어 사회적 후생을 극대화 하는 기준모선 선정방법론을 고안하였다. 이에 따라 한계손실계수를 사용하는 경쟁적 전력시장에서 기준모선을 선정하는 기준을 가장 높은 한계손실계수 평균값을 갖는 모선으로 제안하는 바이다. 본 연구의 결과는 우리나라의 경쟁적 전력시장에서 합리적인 기준모선 선정에 도움이 될 것이다.

감사의 글

이 연구는 2008학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] 전력연구원, *현물시장에의 적용을 위한 한계손실계수 산정 알고리즘 개발에 관한 연구*, 2003. 6.
- [2] Armando M. Leite da Silva and João Guilherme de Carvalho Costa, "Transmission Loss Allocation: Part I - Single Energy Market," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.18, No.4, pp.1389-1394, November 2003.
- [3] 김강원, 한석만, 김발호, "송전손실지수 산정의 신뢰도 제고에 관한 연구," *전기학회논문지*, 56A권, 1호, pp.41-47. 2007. 1.
- [4] 한국전력거래소, *전력시장운영규칙*, <http://www.kpx.or.kr/>
- [5] 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. 12
- [6] K. D. Sadi, *Fundamentals of power system economics*, John Wiley & Sons, 2004.
- [7] N. S. Rau, *Optimization Principles*, John Wiley & Sons, 2003.
- [8] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, John Wiley & Sons, 1996.
- [9] M. Shahidehpour, H. Yamin and Z. Li, *Market Operations in Electric Power Systems*, John Wiley & Sons, 2002.

저 자 소 개



김 상 훈 (金尙勳)

1982년 9월 3일생. 2007년 단국대 공대 전기전자컴퓨터공학과 졸업. 2007~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 031-8005-3621

E-mail : hoonsmile@dankook.ac.kr



이 광 호 (李光浩)

1965년 12월 22일생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 전력연구원 위촉연구원. 2001년 미국 Univ. of Texas (Austin) 방문교수. 1996~현재 단국대 공대 전자전기공학부 교수.

Tel : 031-8005-3604

E-mail : khlee@dku.edu