

부하중심의 한계송전손실계수 계산 방법론 개발

이기송*, 박종배*, 신종린*, 김진호**, 전영환***
 *건국대학교 · **기초전력공학공동연구소 · ***홍익대학교

Development of Evaluation Method
 for the Load-Focused Transmission Marginal Loss Factor

KI-Song, Lee*, Jong-Bae, Park*, Joong-Rin, Shin*, Jin-Ho, Kim**, Young-Hwan, Jun***
 *Univ. of KonKuk · **EESRI · ***Univ. of HongIk

Abstract - This paper provides a new approach for the load-focused transmission marginal loss factors(MLF). It can be widely applied to power system operations and pricing mechanism in a competitive electricity market. The load-focused MLF is the ratio of required additional generation at a reference bus to the demand increments at a arbitrary bus. The new approach to determine the load-focused MLF was developed under some practically endurable assumptions. Although the suggested method is very similar to the conventional penalty factors in its concept, the method is more efficient than the existing heuristic method for the load-focused MLF. To show its effectiveness and efficiency, numerical test have been performed in IEEE 14-bus system.

1. 서 론

우리나라를 포함한 대부분의 국가에서 전력산업의 구조개편이 시행됨에 따라 수직통합체제를 이루고 있던 전력시스템은 급격한 속도로 발전·송전·배전·판매 등의 기능별로 분리되고 있으며, 전력거래를 위한 도소매시장을 형성하고 있다[1]. 하지만, 대부분의 국가에서는 이러한 현물 전력에너지시장의 체제를 송전손실, 기타 송전망계약 등을 시장 외부에서 취급하는 비제약시장을 근간으로 하고 있다. 따라서, 현실에 가까운 현물에너지시장을 구축하기 위해서는 위의 제약조건들을 고려한 모션별 한계가격(Nodal pricing)에 대한 이론적인 연구가 시급하다.

Nodal pricing 메카니즘을 적용하기 위해서 우선적으로 해결되어야 할 것이 전력방정식의 등식계약으로부터 도출되는 한계송전손실계수이다. 소수의 전력시장에서는 nodal pricing을 적용하기 위하여 한계송전손실계수 대신에 기존의 경제급전에서 손실을 고려하기 위해 사용된 페널티계수(Penalty Factor)를 이용하였고[2], 그 외 다른 국가에서는 계통전체의 단위 부하 증가에 의한 모션별 발전량의 비를 나타내는 발전기 중심의 한계송전손실계수를 이용하고 있다[3-4]. 또한, 호주에서는 한계송전손실계수를 임의의 모션의 부하증가에 의한 기준모션에서의 발전량의 변화를 나타내는 부하중심의 한계송전손실계수로 이용하고 있다[5].

한계송전손실계수는 특정 조류 아래에서 계통손실 함수의 민감도를 의미하며, 이는 부하의 변화에 대한 발전량의 변화량으로부터 계산된다. 이를 계산하기 위해서 현재 일반적으로 사용되고 있는 방법론은 조류계산을 반복 수행하는 휴리스틱 기법을 이용하고 있다. 하지만, 이러한 접근법은 계산시간이 상당히 소요되므로 실시간 전력시장에 적용하는데에는 어려움이 있다. 따라서, 실제 전력시장에 적용하기 위해서는 상기 문제를 해결할 수 있는 해석적인 방법론을 개발할 필요가 있다.

본 연구에서는 계통의 부하중심의 한계송전손실계수를 해석적인 기법으로 유도하여 좀더 효율적으로 부하중심의 한계송전손실계수를 도출할 수 있는 방법론을 개발함과 동시에, 이를 활용하여 Nodal pricing을 전력시장에서 실시간으로 적용하는데 유용한 정보를 제공하는 것을 목적으로 하고 있다. 본 연구에서 제안한 방법론의 효율성과 성능을 검증하기 위하여 IEEE 14모션을 표본계통으로 선정하여 사례연구를 수행하였다.

다음 2절에서는 부하중심의 한계송전손실계수를 계산하기 위한 제안한 방법을 전개하였고, 3절에서 표본계통에 대해 사례연구를 수행하여 본 논문에서 제안한 방법의 성능을 검증하였고, 4절에서는 결론을 도출하였다.

2. 본 론

2.1 기본 가정

본 논문에서 부하중심의 한계송전손실계수(MLF)의 계산을 위한 제안한 방법론을 전개하기 위해서는 두 가지의 가정이 필요하다. 첫 번째 가정은 부하중심 MLF를 계산하기 위한 계통의 전력조류계산이 먼저 수행되어야 하며, 두 번째의 가정은 전력계통에서 부하량의 증가로 인한 모션의 전압크기의 변화는 없다고 가정한다. 다시 말하면,

$$\Delta V_i = 0 \text{ for } i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

여기서, ΔV_i 는 임의의 i 모션에서의 전압크기의 변화량을, n 은 전력계통의 모션수를 나타낸다. 식 (1)은 MLF를 계산하기 위한 휴리스틱 방법론에서 계통의 단위 부하량 증가와 관련된 가정일 뿐만 아니라 페널티계수를 도출하는 방법론을 제시한 기존의 문헌에서 사용된 가정이다[5-8].

2.2 부하중심의 한계송전손실계수 계산 방법론

임의의 i 모션에서 부하중심의 한계송전손실계수는 식 (2)와 같이 정의된다[5].

$$MLF_{L,i} = \frac{\Delta P_{G,R}}{\Delta P_{L,i}} = \frac{\Delta P_{L,i} + \Delta P_{loss}^i}{\Delta P_{L,i}} = 1 + \frac{P_{loss}^i}{\Delta P_{L,i}} \quad (2)$$

여기서, $MLF_{L,i}$ 는 i 모션의 부하중심의 MLF, $\Delta P_{L,i}$ 는 i 모션에서 부하량의 변화, $\Delta P_{G,R}$ 은 기준모션에서 발전량의 변화, ΔP_{loss}^i 는 i 모션에서 부하 증가로 인한 계통에서 발생한 손실을 나타낸다.

뉴턴-라슨법을 이용한 전력조류계산에서 식 (1)의 가정을 이용하면 자코비안 행렬은 식 (3)과 같이 나타난다.

$$[\Delta P] = [J_{PB}] [\Delta \theta] \quad (3)$$

또한, 식 (3)을 변형하면 식 (4)의 형태로 전개된다.

$$[\Delta \theta] = [J_{pd}]^{-1} [\Delta P] \quad (4)$$

여기서, 기준모션을 슬랙모션(본 논문에서는 n 모션)으로 지정하면 모션의 유입전력 증분벡터인 $[\Delta P]$ 와 전압의 위상각 증분벡터인 $[\Delta \theta]$ 의 크기는 $(n-1) \times 1$ 이고

모선의 위상각 변화에 대한 순 유입전력 변화를 나타내는 $[J_{P\theta}]$ 의 크기는 $(n-1) \times (n-1)$ 이다. 또한, 슬랙모선에서 위상각의 변화에 대한 유입전력의 변화량과의 관계식은 식 (5)와 같이 유도된다.

$$\Delta P_n = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P}{\partial \theta_{n-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_{n-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$= J_{n,\theta} [\overline{\Delta \theta}]$$

식 (5)에서 식 (4)를 대입하면 식 (6)과 같이 유도된다.

$$\Delta P_n = J_{n,\theta} [\overline{\Delta \theta}] = J_{n,\theta} [J_{P\theta}]^{-1} [\overline{\Delta P}] \quad (6)$$

식 (6)을 변형한 식은 식 (7)에서 보여진다.

$$\begin{bmatrix} J_{n,\theta} [J_{P\theta}]^{-1} & \dots & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\Delta P} \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

여기서, $\Delta P_i = \Delta P_{G,i} - \Delta P_{L,i}$ 이므로 식 (7)은 식 (8)과 같이 전개된다.

$$\begin{bmatrix} J_{n,\theta} [J_{P\theta}]^{-1} & \dots & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{G,1} - \Delta P_{L,1} \\ \vdots \\ \Delta P_{G,n} - \Delta P_{L,n} \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

식 (8)에서 열벡터 $[J_{n,\theta} [J_{P\theta}]^{-1} \dots -1]$ 를 $[k_1 \ k_2 \ \dots \ k_n]$ 로 나타내면 식 (9)와 같이 전개된다.

$$\begin{bmatrix} k_1 & \dots & k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{G,1} \\ \vdots \\ \Delta P_{G,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & \dots & k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{L,1} \\ \vdots \\ \Delta P_{L,n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

부하중심의 MLF 는 식 (2)의 정의에 의하면 임의의 i 모선의 부하량 증가에 대한 발전량을 기준모선인 n 모선에서 담당하기 때문에 n 모선의 발전기를 제외한 나머지 발전기의 발전량의 변화량은 영(0)이다. 따라서, 식 (9)에서 임의의 i 모선의 부하중심의 MLF 는 식 (10)과 같이 전개된다.

$$MLF_{L,i} = \frac{\Delta P_{G,R}}{\Delta P_{L,i}} = \frac{\Delta P_{G,n}}{\Delta P_{L,i}} = \frac{k_i}{k_n} \quad (10)$$

따라서, 본 논문의 제안한 방법론에서는 전력조류계산에서 자코비안 부분행렬의 역행렬, 기준모선의 유입전력의 증분벡터의 정보만 있다면 계통의 모든 모선의 부하중심 MLF 를 기존의 방법론보다 보다 효율적으로 계산할 수 있다.

2.3 부하중심 한계송전손실계수 해석

부하중심 MLF 는 임의의 i 모선에서 단위 부하 증가에 대한 기준모선에서 발전량의 변화를 나타낸다. 따라서, 식 (2)의 정의에 의해 부하중심 MLF 는 3가지 경우로 나눌 수 있다.

- i. $MLF < 1$ 인 경우 : i 모선에서 부하가 증가하였을 때 계통 전체의 손실이 감소할 경우이며 이는 발전중심 지역에서 모선이 가까운 곳에 위치하고 있음을 의미한다.
- ii. $MLF = 1$ 인 경우 : i 모선에서 부하가 증가하였을 때 계통 전체의 손실의 변화가 없는 경우이며 이는 계통의 전기적 거리의 중심을 나타낸다.
- iii. $MLF > 1$ 인 경우 : i 모선에서 부하가 증가하였을 때 계통 전체의 손실이 증가할 경우이며 이는 발전중심 지역에서 모선이 먼 곳에 위치하고 있음을 의미한다.

3. 사례연구

본 논문에서 제안한 방법론의 성능 및 타당성을 평가하기 위한 표본계통을 그림 1에서 제시된 IEEE 14모선계통[9-10]에 대하여 사례연구를 수행하였다. 표본계통에 대한 사례연구는 기존의 휴리스틱 기법에 의한 부하중심 MLF ($HMLF$)와 본 논문에서 제안한 방법론에 의한 부하중심 MLF ($PMLF$) 계산하여 결과를 비교·분석하였다.

3.1 IEEE 14모선 계통도

그림 1은 모선-1을 슬랙모선으로 선정하여 전력조류계산을 계산한 후의 전력조류방향을 나타낸 것이다.

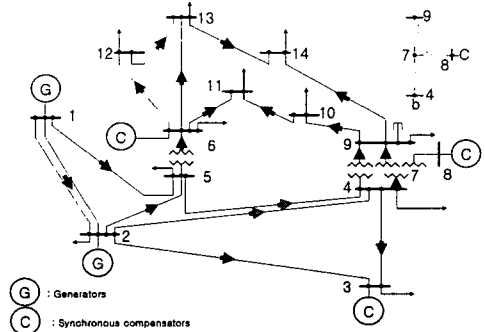


그림 1 IEEE 14모선 계통도

Fig. 1 System Configuration of IEEE 14-bus system

그림 1의 전력조류의 방향을 나타내는 화살표의 방향을 살펴보면, 전력조류는 모선-1에서 송전선로를 통하여 모선-14로 전력조류의 방향이 향하고 있다. 그림 1에서 기준모선이 슬랙모선인 모선-1로 지정되면 모선-14에서 부하가 증가하면 계통전체의 손실이 가장 크게 나타날 것이라고 예측할 수 있다. 따라서, 다른 모선에 비하여 모선-14에서 부하중심 MLF 가 가장 큰 값을 도출할 것임을 예측할 수 있다.

3.2 표본계통의 부하중심 MLF 결과 비교

표본계통에 대한 본 논문에서 제안한 방법론에 의한 부하중심 MLF 결과 ($PMLF$)와 휴리스틱 기법에 의한 결과 ($HMLF$)는 다음과 같다.

표 1 IEEE 14모선 계통의 부하중심 $HMLF$ 와 $PMLF$ 결과

Table 1 The result of load-focused $HMLF$ and load-focused $PMLF$ in IEEE 14 bus system

Bus No.	$HMLF$	$PMLF$
1	0.999999994	1.000000000
2	1.046576870	1.055037572
3	1.117353632	1.136750843
4	1.094978619	1.110532205
5	1.079143219	1.091773615
6	1.078507439	1.093197407
7	1.095573121	1.109738785
8	1.095555957	1.109738785
9	1.095944180	1.109327673
10	1.099095392	1.111143271
11	1.092468982	1.104894722
12	1.095862601	1.108700658
13	1.101855474	1.111788575
14	1.121165139	1.129090743

표 1에서 휴리스틱 방법론과 제안한 방법론에 의한 부하중심 MLF 결과를 보여준다. 여기서, 휴리스틱 방법론은 다음과 같은 순서로 수행하여 결과를 도출하였다. 여기서, 휴리스틱 기법을 이용한 계산 순서는 다음과 같다.

- 1) 지정한 기준모선(슬랙모선)에 대하여 조류계산을 수행한 후 기준모선의 발전량 저장
- 2) 임의의 i 모선에 단위 부하량을 증가시킨 후 조류계산 수행하고 기준모선의 발전량 저장
- 3) 식 (2)의 정의에 따라 i 모선의 부하중심 MLF 를 계산
- 4) 계통의 모든 모선 수만큼 1), 2), 3)의 과정을 반복 수행

표 1의 결과에서 그림 1에서 전력조류의 방향이 왼쪽에서 오른쪽으로 향하고 있기 때문에 언급한 것처럼 부하집중지역(모선-13, 모선-14 등)에서 MLF 값이 다른 모선에 비하여 크게 나타나고 있다. 이 결과로부터 부하중심 MLF 정보가 발전기와 부하사이의 전기적인 거리를 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 2에서는 휴리스틱 방법론과 제안한 방법론에 의한 부하중심 MLF 결과의 오차를 보여준다.

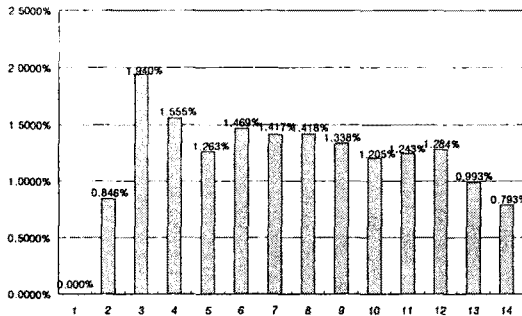


그림 2 IEEE 14모선 계통의 HMLF와 PMLF의 결과비교

Fig. 2 The deviation of load-focused HMLF and load-focused PMLF in IEEE 14 bus system

그림 2에서 휴리스틱 방법론과 제안한 방법론에 의한 결과의 오차가 크지 않기 때문에 본 논문에서 제안한 방법이 효율성을 입증할 수 있다. 오차가 가장 큰 모선은 모선-3(1.94%)이며 가장 작은 오차가 나타나는 모선은 모선-1(0%)이다. 하지만, 기준모선을 모선-1로 지정하여 결과를 도출하였기 때문에 모선-1에서의 오차가 0%로 도출되어진다. 만약, 슬랙모선을 변경하여 부하중심 MLF 의 결과를 살펴보면 표 1의 결과와는 상이한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 표 2에서 모선-1과 모선-2를 슬랙모선으로 지정하여 제안한 방법론에 의한 부하중심 MLF 를 구한 결과를 보여준다.

표 2 기준모선을 변경하였을 때의 부하중심 PMLF 결과

Table 2 The result load-focused PMLF when reference bus is changed

Bus No.	기준모선(모선-1)	기준모선(모선-2)
1	1.000000000	0.947833543
2	1.055037572	1.000000000
3	1.136750843	1.077450579
4	1.110532205	1.052599674
5	1.091773615	1.034819653
6	1.093197407	1.036169171
7	1.109738785	1.051847644
8	1.109738785	1.051847644
9	1.109327673	1.051457978
10	1.111143271	1.053178863
11	1.104894722	1.047256279
12	1.108700658	1.050863673
13	1.111788575	1.053790504
14	1.129090743	1.070190079

표 2의 결과에서 기준모선을 모선-1로 지정하였을 경우 보다 모선-2로 하였을 경우의 결과가 작게 도출되는 것을 알 수 있다. 이는 모선-2가 모선-1보다 부하중심지역에서 가까운 곳에 위치하고 있음을 알 수 있다.

또한, 기존의 경제급전 문제에서 손실을 고려하기 위해

사용된 페널티계수[10]와 같이 기준모선에 따라 부하중심 MLF 결과가 다르다는 것을 알 수 있고 기준모선을 중심으로 하여 각 모선의 부하중심 MLF 결과는 상대적인 값을 도출하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 부하중심 MLF 결과를 Nodal Pricing 메카니즘을 적용하기 위해서는 기준모선의 위치에 독립적인 부하중심 MLF 를 효율적으로 계산할 수 있는 방법론에 대한 연구가 필요할 것이다.

3. 결 론

본 연구에서는 몇 가지의 가정 하에서 부하중심의 한계 송전손실계수(MLF)를 해석적인 방법론을 이용하여 직접 도출할 수 있는 기법을 제시하였고 그 의미를 해석해 보았다. 기존의 휴리스틱 기법에 의한 결과와 비교하여 오차가 크지 않다는 결과로부터 연구에서 제안한 방법론이 기존의 방법론에 비하여 효율적임을 검증할 수 있었다.

본 연구에서 제안한 방법론을 통하여 송전손실을 고려한 발전기의 출력우선순위 결정과 송전손실을 고려한 모선별 한계가격(nodal pricing)과 같은 경쟁적 전력시장의 여러 분야를 실시간으로 적용할 수 있는 기본적인 방법론을 제공할 것이다.

하지만, 부하중심 MLF 가 경제급전 문제에서 손실을 고려하기 위해 사용된 페널티계수와 같이 기준모선의 위치에 따라 그 결과가 상이하게 나타난다. 따라서, 향후에 기준모선의 위치에 독립적인 새로운 방법론에 대한 연구와 오차를 줄일 수 있는 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.B.Park, B.H.Kim, J.H.Kim, M.H.Jung and J.K.Park, "A Continuous Strategy Game for Power Transactions Analysis in Competitive Electricity Markets", IEEE Trans. on Power System, Vol. 16, No. 4, pp. 847-855, Nov. 2001.
- [2] IMO, "Market Rules for the Ontario Electricity Market, Feb. 2000.
- [3] S.Hunt and G.Shuttleworth, "Electricity Transmission Pricing: The New Approach, Utility Policy, Vol. 3, No. 2, pp.98-111, Apr. 1993.
- [4] Svenska Kraftnat, "The Swedish Electricity Market Reform and Its Implications for Svenska Kraftnat, Second Edition, Mar. 1997.
- [5] NEMMCO, "Treatment of Loss Factors In the National Electricity Market", Nov. 1999.
- [6] Victorian Power Exchange, "VPX Approved Statement of Charges: Transmission Use of Charges for Victoria", Apr. 1998.
- [7] Y. M. Park, J. B. Park, J. U. Lim and J. R. Won, "An Analytical Approach for Transaction Costs Allocation in Transmission System", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 4, pp. 1407-1412, Nov. 1998.
- [8] A.J.Wood and B.F.Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [9] M.A.Pai, "Computer Techniques in Power System Analysis", Tata McGraw-Hill Publishing Company, 1979
- [10] L.L.Feris, M.Sc.(Eng.), D.I.C., C.Eng., M.I.E.E. and A.M.Sasson, M.Sc., "Investigation of the load-flow problem", PROC. IEE, Vol. 115, No. 10, October, 1968