

전기적인 거리를 고려한 한계송전손실계수 산정 방법론 개발

박종배*, 이기송*, 이찬주*, 신중린*
건국대학교 전기공학과*

Development of Evaluation Method for Transmission Marginal Loss Factors Considering the Electrical Distance

Jong-Bae Park*, Ki-Song Lee*, Chan-Joo Lee*, Joong-Rin Shin*
Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University

Abstract - This paper presents the evaluation method for transmission marginal loss factors(MLFs) considering the electrical distance. Generally, MLFs are represented as the sensitivity of transmission losses, which is computed from the change of generation by the change of the load. MLFs are classified as load-focused MLFs and generator-focused MLFs. The existing evaluation method for generator-focused MLFs has the limit not reflecting the characteristic of power systems since the method has been introduced the assumption which the output of a generator is supplied to all of the load buses on the power system. Therefore, to overcome the limit of evaluation method for generator-focused MLFs, we have applied the process, which it approximately can find the load buses that supplied a generator to the method. We have applied the proposed method to the simple 5-bus system because the proposed method is not analytic but the hybrid method incorporated the Kirschen and Bialek's algorithm to the existing analytic method to find the load buses supplied by a generator.

1. 서 론

기존의 수직통합형 환경에서의 전력시스템의 계획, 운용, 및 제어에서는 비용최소화에 기초한 다양한 최적화 기법들이 사용된 반면 경쟁적 전력시장에서는 이러한 비용최소화 접근법의 의미는 매우 감소하게 되고 시장참여자들의 수익(Revenue) 또는 이익(Profit) 극대화의 관점으로 문제를 접근할 것이다[1].

따라서, 경쟁적 전력시장에서 기본적인 가격결정 방법론은 적용이 간편한 총괄비용법에서 경제적 측면의 최적성이나 계통운용 조건을 반영할 수 있는 한계비용법으로 접근할 것이고 점진적으로 우리나라도 이러한 방향으로 발전할 것으로 판단된다. 이러한 경쟁적 전력시장에서의 가격결정 방법론의 변화의 가장 큰 목적은 시장참여자에 게 시간과 위치에 따른 시장가격 신호를 제공할 수 있다는 것이다. 이는 1980년대에 F. C. Scheweppe 등에 의해 처음으로 제안되었으며, 또한 FERC (Federal Energy Regulatory Commission)에서는 표준화된 도매시장설계를 위한 기본요소중의 하나로 제시하고 있다[2-3].

이를 위해 전력시스템의 한계비용을 정확하게 계산하여야 하며 이러한 한계비용 메카니즘을 적용하기 위해서는 우선적으로 전력방정식의 등식제약으로부터 도출되는 한계송전손실계수(MLFs)가 산출되어야 한다. 한계송전손실계수는 특정 조류상태에서 계통손실함수의 민감도를 의미하며 부하의 변화량에 대한 발전량의 변화량으로부터 계산된다.

현재 전력시장을 도입하고 있는 국가 중 한계송전손실계수를 도입하고 있는 국가에서는 한계송전손실계수를 여러 방법론을 통하여 경쟁적 전력시장에 반영하고 있다. 특히, 호주 NEMMCO에서는 임의의 모선-i의 부하증가량에 대한 기준모선의 발전량의 변화량을 도출하여 부하측 기준의 한계송전손실계수를 반영하고 있다[4]. 반면에 스웨덴에서는 전력계통 전체 부하량 증가시뮬,

모선별 각 모선을 슬랙모선으로 지정하면서 조류계산을 전체 모선수만큼 수행하여 발전기 기준의 한계송전손실계수를 도출하고 있으며[5] 향후 우리나라 양방향 전력 시장에서는 호주 NEMMCO에서 적용하고 있는 한계송전손실계수 산정 방법론을 도입할 것으로 판단되고 있으며 위의 한계송전손실계수를 기준으로 하여 간략화된 모선별 한계비용 개념이 도입될 것이다. 따라서, 이 분야에 대한 이론적인 연구는 시급하며 한계송전손실계수 산정 메카니즘 구축은 전력시장을 효율적으로 운영할 수 있는 기본이 될 것이다.

현재 여러 문헌에서 제시되고 있는 한계송전손실계수 산정 방법론은 세계 여러 전력시장에서 적용하고 있는 한계송전손실계수 산정 방법론(즉, 발전기와 부하를 기준으로한 한계송전손실계수)에 대해 보다 효율적이고 정확하게 도출할 수 있는 방법론들을 제시하고 있다. 참고 문헌 [6]에서는 스웨덴에서 적용하고 있는 발전기중심 한계송전손실계수의 산정 방법론 보다 효율적으로 도출할 수 있는 해석적인 방법론을 제시하고 있으며 참고 문헌 [7]에서는 호주 NEMMCO와 우리나라 양방향 전력 시장에서 적용하게 될 부하중심 한계송전손실계수를 유효전력 뿐만 아니라 무효전력까지 고려하여 한계송전손실계수를 도출할 수 있는 방법론을 제시하고 있다.

하지만, 위의 참고문헌 [6]에서 제시된 한계송전손실계수 산정 방법론은 스웨덴에서 도출하고 있는 방법론에 비해 매우 효율적으로 발전기중심 한계송전손실계수를 산정할 수 있지만 임의의 발전기의 출력력이 모든 부하모선에 공급한다는 실제 전력시스템의 물리적인 특성을 반영하지 못하는 한계점을 가지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 한계점을 보완하기 위하여 기존의 송전선 이용률 산정을 위해 연구된 여러 알고리즘들을 이용하여 실제 물리적인 특성을 근사적으로 반영할 수 있는 전기적인 거리를 고려한 한계송전손실계수 산정 방법론을 제시하고자 한다. 또한, 본 논문에서는 제안한 방법론은 기존의 연구와 달리 해석적인 방법론이 아닌 알고리즘적으로 한계송전손실계수가 도출되기 때문에 사례연구로 단순 5모선 계통을 이용하여 제안한 방법에 대해 상세하게 언급하였다.

2. 본 론

2.1 전기적인 거리를 고려한 한계송전손실계수 산정 방법론

2.1.1 기존 방법론의 한계점

기존의 발전기중심 한계송전손실계수의 도출을 위한 해석적인 방법론[6]에서 전력시스템의 전체 부하증가량은 모든 모선의 부하증가량의 합으로 도출되며, 모든 모선의 부하증가량은 임의의 모선의 부하 증가전의 전체 부하량에 대한 해당 모선의 부하량의 비율로 증가한다는 가정을 이용하기 때문에 각 발전기의 출력의 변화량은 다음과 같이 전체 부하증가량과 부하증가로 인한 손실을

담당하게 된다.

$$\Delta P_{G,i} = \sum_{l \in \Omega_i} \left(\frac{P_{L,i}}{P_{L,total}} \Delta P_{L,total} \right) + \Delta P_{loss} \quad (1)$$

$$= \Delta P_{L,total} \sum_{l \in \Omega_i} (l_i) + \Delta P_{loss}$$

여기서, $\Delta P_{G,i}$ 는 모선- i 에서의 발전기의 발전량, Ω_i 는 전기적인 거리를 고려할 때의 모선- i 의 발전기가 공급하고 있는 모선의 집합, $P_{L,total}$ 는 전력계통의 전체 부하량, $P_{L,i}$ 는 모선- i 의 부하량, ΔP_{loss} 는 모선- i 의 발전기 출력에 대한 전력계통의 전체 손실 변화량, l_i 는 전체 부하량에 대한 모선- i 의 부하량의 비율이다.

이는 전력계통에서 임의의 발전기의 출력이 모든 부하 모선에 공급함의 의미하게 되며 이는 한계송전손실계수를 도출할 때 실제 전력계통의 물리적인 특성을 반영하지 못함을 의미한다.

2.1.2 전기적인 거리를 고려한 한계송전손실계수 산정 방법론

본 논문에서 제안한 전기적인 거리를 고려한 한계송전손실계수 산정 방법론은 기존 문헌에서 제시된 발전기중심 한계송전손실계수 해석적인 방법론[6]의 가정을 다음과 같이 수정하여 적용하였다.

$$\Delta P_{L,i} = \frac{P_{L,i}^j}{\sum_{l \in \Omega_j} P_{L,i}^j} \Delta P_{L,total}^j = l_i^j \Delta P_{L,total}^j \quad (2)$$

여기서, $P_{L,i}^j$ 는 발전기- j 가 공급하고 있는 모선- i 의 부하량, $\Delta P_{L,total}^j$ 는 발전기- j 가 공급하고 있는 특정 모선들의 부하량의 변화량, l_i^j 는 발전기- j 가 공급하고 있는 모선들의 집합, Ω_j 는 발전기- j 가 공급하고 있는 특정 모선들의 전체 부하량에 대한 모선- i 의 부하량의 비율이다.

하지만, 위의 식 (2)에서 실제로 l_i^j , 즉, 발전기- j 가 공급하고 있는 특정 모선들을 찾는 것은 매우 어려운 일이다. 본 논문에서는 전력계통의 전기적인 거리, 즉, 물리적인 특성을 좀더 근접하게 고려하기 위하여 기존의 송전선 이용도 산정을 위해 연구된 Kirschen[8]과 Bialek[9]이 제안한 알고리즘을 이용하여 임의의 발전기의 출력이 공급하는 모선을 찾은 후에 한계송전손실계수를 도출하는 방법론을 제시하고자 한다. 이때, 이용되는 알고리즘은 다음과 같다.

- 단계 1) Kirschen과 Bialek이 제안한 알고리즘을 이용하여 임의의 모선- j 가 공급하는 특정 모선 집합(Ω_j) 도출
- 단계 2) 도출된 모선 집합(Ω_j)에 대한 각 모선의 부하분포계수(l_i^j) 계산
- 단계 3) 임의의 모선- j 에 대한 한계송전손실계수를 참고문헌 [6]의 해석적인 방법론에 따라 도출

3. 사례 연구

본 논문에서 제안한 전기적인 거리를 고려한 한계송전손실계수를 도출하기 위하여 기존의 Kirschen과 Bialek이 제안한 임의의 발전기가 특정 모선 혹은 선로 조류에 대한 기여도를 도출하는 알고리즘을 이용하였다.

본 사례연구에서는 5모선 계통을 이용하여 위의 알고리즘을 이용하여 전기적인 거리를 고려한 한계송전손실계수가 어떻게 도출되는지 살펴보고 IEEE 14모선 계통을 이용하여 기존의 방법론의 결과와 비교해 볼 것이다.

3.1 단순 5모선 계통에 대한 사례연구

단순 5모선 계통은 다음 그림과 같이 구성되었으며 전력조류계산을 수행한 후의 선로조류의 결과는 표 1과 같다.

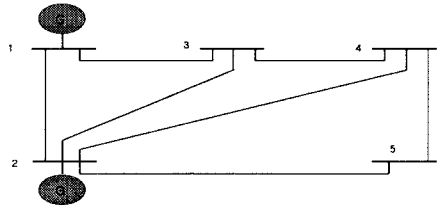


그림 1 단순 5모선 계통도

Fig. 1 Simple power systems with 5 buses

표 1 5모선 계통에서의 유효선로조류량
Table 1 Power flow of lines on simple power system

From	To	선로조류량 [MW]	From	To	선로조류량 [MW]
1	2	89.5072	2	1	-87.0172
1	3	41.7585	3	1	-40.1555
2	3	24.5089	3	2	-24.1426
2	4	27.7511	4	2	-27.2790
2	5	54.7572	5	2	-53.5044
3	4	19.2980	4	3	-19.2569
4	5	6.5359	5	4	-6.4956

3.1.1 Kirschen이 제안한 방법론[8]을 이용한 한계송전손실계수

Kirschen이 제안한 방법론을 이용하여 위의 5모선 계통에 대하여 임의의 발전기가 공급하는 특정 부하모선의 집합을 다음과 같이 도출한다. 이때, Kirschen이 제안한 알고리즘에서는 이를 발전기 혹은 모선의 도메인이라고 명명한다.

표 2 Kirschen 알고리즘에 의해 도출된 모선별 도메인
Table 2 Domains of each node evaluated by Kirschen's algorithm

모선번호	공급모선
1	1, 2, 3, 4, 5
2	2, 3, 4, 5
3	3, 4, 5
4	4, 5
5	5

위의 결과를 이용하여 각 모선이 공급하는 공급모선에 대한 부하분포계수를 모선별로 각각에 대해 도출하고 도출된 부하분포계수를 이용하여 참고문헌 [6]에서 제안한 방법론에 따라 다음과 같이 한계송전손실계수를 도출한다.

$$MLF_i = \frac{k}{a_i} \quad (3)$$

여기서, $k = \alpha \cdot l$ 이고, l 은 모선별 할당된 부하분포계수,

$\alpha = \left[-1, H \cdot \frac{[\partial P]}{[\partial \theta]} \right]$ 이다. 이때, $k = -1.0686$ 이고 $\alpha = [-1 \ -1.0244 \ -1.0543 \ -1.0582 \ -1.0686]$ 으로 도출되기 때문에 다음과 같이 Kirschen의 알고리즘을 이용한 한계송전손실계수 결과를 도출할 수 있다.

표 3 전기적거리를 고려한 한계송전손실계수 결과

Table 3 The result of MLFs considering electrical distance

모선번호	결과
1	1.0613
2	1.0360
3	1.0066
4	1.0059
5	1.0000

3.1.2 Bialek이 제안한 방법론[9]을 이용한 한계송전손실계수

Bialek이 제안한 방법론을 이용하여 한계송전손실계수를 도출하기 위해서는 Bialek이 제안한 개별발전기의 선로조류에 대한 기여도(TGDF)를 표 4와 같이 도출한 후 도출된 TGDF를 이용하여 임의의 발전기가 공급하는 특정 모선의 집합(Ω_i)을 다음과 같이 도출한다. 이때, TGDF를 이용하여 임의의 발전기가 공급하는 모선 집합을 도출하기 위해서는 위의 Kirschen이 제안한 모선별 도메인을 찾는 알고리즘을 이용한다.

표 4 Bialek 알고리즘을 이용한 TGDF

Table 4 TGDF evaluated by using Bialek's algorithm

From	To	모선				
		모선-1	모선-2	모선-3	모선-4	모선-5
1	2	0.682	0	0	0	0
1	3	0.318	0	0	0	0
2	3	0.153	0.224	0	0	0
2	4	0.173	0.253	0	0	0
2	5	0.341	0.500	0	0	0
3	4	0.137	0.066	0.289	0	0
4	5	0.043	0.044	0.040	0.135	0

표 5 TGDF를 이용하여 도출된 모선별 도메인

Table 5 Domains of each node evaluated by TGDF

모선번호	공급모선
1	1, 2, 3, 4, 5
2	2, 3, 4, 5
3	3, 4, 5
4	4, 5
5	5

이때, TGDF를 이용하여 도출된 임의의 발전기가 공급하는 모선 집합 즉, 모선별 도메인 결과를 이용하여 모선별 부하분포계수 행렬 l 을 도출하고 식 (3)을 이용하여 전기적거리를 고려한 한계송전손실계수를 도출할 수 있다.

표 6과 표 3의 결과로부터 Kirschen과 Bialek이 제안한 방법론에 의해 도출된 한계송전손실계수 결과가 동일하게 도출된다. 하지만, Kirschen이 제안한 방법론은 조류계산에 의해 도출된 선로조류의 정보를 이용하여 모선별 도메인, 개별발전기가 공급하는 모선 집합을 찾는 방법이고 Bialek 방법론은 TGDF를 이용하여 모선별 도메인을 찾기 때문에 위의 결과가 항상 동일하다고 판

단할 수는 없다.

표 6 전기적거리를 고려한 한계송전손실계수 결과

Table 6 The result of MLFs considering electrical distance

모선번호	결과
1	1.0613
2	1.0360
3	1.0066
4	1.0059
5	1.0000

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 발전기중심 한계송전손실계수의 해석적인 방법론의 지니고 있는 한계점을 보완하기 위하여 기존의 송전선 이용료 산정할 때 이용된 알고리즘을 이용하여 전기적인 거리를 고려한 한계송전손실계수 산정 방법론을 제안하였다. 따라서, 본 방법론에 의해 도출된 한계송전손실계수는 전력시스템의 물리적인 특성을 좀더 고려할 수 있게 된다. 향후 우리나라 양방향 전력 시장에서는 한계송전손실계수를 도입하여 시장참여자들의 입찰가격 및 정산금에 반영하려고 하고 있다. 따라서, 위의 결과는 한계송전손실계수에 대한 여러 산정 방법론을 제시함으로써 우리나라 시장 실정에 맞는 한계송전손실계수 산정 방법론을 결정하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축 지원사업으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 박종배, 조기선, 이기승, 신중린, "예측된 시장가격 정보를 이용한 발전기의 최적 입찰전략", 2001년도 대한전기학회 전력 기술분회 추계학술대회 논문집, 2001, 11.
- [2] F. C. Scheweppe, M. C. Caramanis, R. D. Tabors, and R. E. Bohn, Spot pricing electricity, Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [3] FERC, Remedying Undue Discrimination through Open Access Transmission Service and Standard Electricity Market Design, Docket No. RM-01-12-000, 2002.
- [4] NEMMCO, Treatment Loss Factors in the National Electricity Market, Nov. 1999.
- [5] Svenska Kraftnat, The Swedish Electricity Market Reform and Its Application for Svenska Kraftnat, Second Edition, Mar. 1993.
- [6] Jong-Bae Park, Joong-Rin Shin, Ki-Song Lee, Jin-Ho Kim, "A New Analytical Approach for Calculation of Generator Marginal Loss Factors", KIEE International Transactions on PE, 12A-2, pp. 66-72, 2002.
- [7] 박종배, 이기승, 신중린, 김성수, "무효전력을 고려한 한계송전손실계수 산정 방법론 개발 및 현물시장에의 적용", 대한전기학회 전기학회는문집, 52A권, 7호, 2003년, 7월.
- [8] D. Kirschen, R. Allen, and G. Strbac, "Contribution of Individual generations to loads and flows", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 1, Feb. 1997.
- [9] J. Bialek, "Topological Generation and Load Distribution Factors for Supplement Charge Allocation in Transmission Open Access", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 3, Aug. 1997.