

최적조류계산을 이용한 한계손실계수의 전력시장 적용

고용준 신동준 김진오 이호상\*  
 한양대학교 전력시스템 연구실 \*전력거래소

Marginal Loss Factor using Optimal Power Flow in Power Market

Young-Jun Ko Dong-Joon Shin Jin-O Kim Hyo-Sang Lee\*  
 Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ \*Korea Power Exchange

**Abstract** - In the competitive electricity market, various pricing methods are developed and practiced in many countries. Among these pricing methods, marginal loss factor(MLF) can be applied to reflect the marginal cost of network losses.

For the calculation of MLF, power flow method has been used. However, it shows some shortcomings such as necessity of regional reference node, and absence of an ability to consider network constraints. The former defect might affect adversely to the equity of market participants and the latter might generate an inappropriate price signal. To overcome these defects, the utilization of optimal power flow(OPF) is suggested in this paper.

30-bus system is used for the case study to compare the MLF by the power flow and the OPF method for 24-hour dispatching and pricing.

계약, 발전기의 유효/무효전력 출력 제한, 그리고 전압제한 등이 제약조건이 존재한다. 하지만 단순히 계통의 손실변화만을 계산하는 조류계산 방식을 이용한 MLF 계산은 이러한 계통 제약조건을 고려할 수 없는 것이다.

위와 같은 기존 전력조류를 이용한 MLF 계산의 단점을 극복하기 위하여, 본 논문에서는 최적조류계산(OPF : Optimal Power Flow)을 이용한 MLF 계산 기법을 제안하였다. OPF를 이용함으로써 지역기준점을 설정할 필요가 없어 모든 시장 참여자들에게 공정하게 급전 및 정산을 수행할 수 있게 되었으며, 계통의 손실만이 아닌 제약조건 또한 고려할 수 있게 되었다.

제안한 OPF를 이용한 MLF 계산 기법의 효용을 검증하기 위해 30모선 계통을 이용한 사례연구를 통해 기존 MLF 계산 기법과 제안한 OPF를 이용한 MLF 계산 기법의 결과를 비교하였다.

2. 한계손실계수

경쟁체제의 전력시장 환경에서 한계손실계수를 도입하는 대표적인 이유는 다음과 같이 크게 네 가지로 정리할 수 있다.

1. 서 론

현재 전력산업의 규제 완화와 구조개편이 많은 나라에서 진행되었거나 진행 중이며, 이러한 구조개편의 결과로 나타나는 경쟁전력시장 환경에서 발전기의 한계 비용을 이용한 전통적인 경제급전 방식은 더 이상 적용할 수 없게 되었다. 따라서 각 전력시장은 각 시장의 환경에 적합한 급전 및 정산(Dispatch and Settlement) 방식을 개발하고, 시장에 적용하여 전력시장의 경제적 효율성을 높이기 위해 노력하고 있다.

이러한 다양한 급전 및 정산 기법 중 한계손실계수(MLF : Marginal Loss Factor)를 이용한 급전 및 정산 기법은 송전망에서 발생하는 한계손실을 생산자와 소비자에 대한 가격신호로 사용하기 위해 도입되었다. MLF를 급전 및 정산에 적용할 경우 발전사업자와 소비자가 송전망의 손실에 미치는 영향을 매 급전 단위마다 계산하여 발전소 급전 순위 결정 및 발전소, 소비자 요금 정산에 적용할 수 있다.

지금까지 MLF를 이용한 급전 및 정산 방식에서 MLF를 계산하기 위해서는 계통의 손실 변화율이 필요하며 이를 얻기 위해 조류계산을 이용하여 왔다. 하지만 조류계산의 특성상 기준 모선(Slack bus)이 필수적으로 요구되었으며, 이를 지역기준점(RRN : Regional Reference Node)으로 설정하여 급전 및 정산을 실시하여 왔다. 이렇게 지역기준점을 필수적으로 요구하는 특성은 기존 MLF 계산 방식의 단점 중 한가지라 할 수 있다. 지역기준점의 위치는 전력시장에 참여한 모든 참여자에게 영향을 미치기 때문에 형평성의 문제가 발생할 가능성이 있기 때문이다.

기존 전력조류계산을 이용한 MLF 계산 방식의 또 다른 단점은 MLF 계산 시 계통의 제약조건을 고려할 수 없다는 점이다. 전력계통에는 선로의 유효/무효전력 조류

i) 경제 급전 - 한계손실계수를 사용한 우선순위 결정으로 계통의 손실을 줄일 수 있는 경제적인 발전소를 선택할 수 있다.

ii) 소비자 선택권 부여 - 부하 입찰(Demand Bids)이 실시될 경우 일시적으로 높은 가격이 형성되는 피크부하 시간대에 높은 전력요금을 지불할 것인지, 혹은 수요를 줄여 전력요금을 감소시킬 것인지를 소비자가 선택할 수 있도록 가격신호를 제공하게 된다.

iii) 송전선로 투자 신호 제공 - 반복되는 급전 계산을 통해 산출된 한계손실계수의 데이터 베이스화를 통해 송전선로 건설계획의 투자 결정 자료로 활용할 수 있다.

iv) 신규 시장 참여자에 지역신호 제공 - 기존 참여자의 송전계통 접속위치 변경과 발전사업자 및 소비자의 신규 진입 시 전체계통의 손실을 고려한 접속위치 결정 자료로 활용 가능하다.

이 같은 네 가지 항목 중 첫째와 둘째는 운용측면의 단기 가격 신호 제공의 역할을, 셋째, 넷째는 장기적인 관점에서 투자를 위한 장기가격 신호를 제공하는 역할을 한다고 할 수 있다.

한계손실계수는 부하의 변화량( $\Delta P_L$ )에 대한 발전량의 변화( $\Delta P_G$ )로 볼 수 있으며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$MLF = 1 + \frac{\Delta_{loss}}{\Delta_{LI}} \quad (1)$$

이때  $\Delta_{loss}$  : 계통의 손실 변화  
 $\Delta_{LI}$  : 접속점에서의 부하 증가

식 1은 모선  $i$ 에서의 MLF를 구하기 위해 식 2와 같이 근사화 될 수 있다.

$$MLF_i = \frac{\Delta(\sum_{k=1}^N G_k)}{\Delta L_i} \quad (2)$$

$$= \frac{\Delta(\sum_{k=1}^M L_k)}{\Delta L_i} + \frac{\Delta_{loss}}{\Delta L_i} = 1 + \frac{\Delta_{loss}}{\Delta L_i}$$

- 이때  $N$  : 발전소의 수  
 $M$  : 모선의 수  
 $G_k$  : 발전소  $k$ 의 유효전력 출력  
 $L_k$  : 모선  $k$ 의 유효전력 수요  
 $\Delta L_i$  : 모선  $i$ 의 부하 증가

만일 MLF 계산시 기존의 조류계산 기법을 사용할 경우 지역기준점의 MLF는 계통의 상태와 관계없이 1을 갖게 된다. 이때 급전 및 정산과정에서 가격신호 역할을 정리하면 다음 표와 같다.

표 1. 한계손실계수의 가격신호 역할

	발전과 소비에 대한 가격신호	
	MLF > 1	MLF < 1
급전우선순위	상승	하락
발전소보상비용	증가	감소
소비자지불비용	증가	감소

### 3. OPF를 이용한 MLF

OPF는 전력계통의 여러 제약조건을 만족시키며 특정 목적함수의 최적화를 실행하는 기법이다. OPF의 목적함수는 발전비용, 계통 안전도등 다양한 목적함수를 선택할 수 있다.

본 논문에서는 목적함수로 계통의 총 발전비용을 선택하였으며 아래 식과 같이 정식화 시켰다.

$$\min \sum f_i(P_{gi}) \quad (3)$$

subject to

$$P_{gi} - P_{Li} - P(V, \theta) = 0$$

$$Q_{gi} - Q_{Li} - Q(V, \theta) = 0$$

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{max}$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}$$

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max}$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{max}$$

이때  $f_i$  : 발전기  $i$ 의 발전비용

- $P_{gi}$   $Q_{gi}$  : 모선  $i$ 에서 유효/무효전력 발전량  
 $P_{Li}$   $Q_{Li}$  : 모선  $i$ 에서 유효/무효전력 소비량  
 $V_i$  : 모선  $i$ 의 전압  
 $S_{ij}$  : 모선  $i$ 에서  $j$ 로 가는 선로의 복소전력

위의 식에서 볼 수 있듯이 유효/무효전력 수급 균형, 선로 조류와 모선 전압 제약 그리고 유효/무효전력 발전량 제약조건을 고려하였다.

계통에 선로혼잡, 발전기 출력 제약등 계통 제약조건 상황이 발생하지 않을 경우 기존의 조류계산을 이용한 MLF 계산과 제안한 OPF를 이용한 MLF 계산 결과는 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만, 선로 혼잡등이 발생할 경우 제안한 OPF를 적용한 MLF는 기존 MLF와 큰 차이를 보이게 된다.

### 4. 사례연구

사례연구에서는 30모선 시스템을 이용하여 기존 MLF 및 제안한 OPF MLF를 각각 적용하여 24시간의 급전 및 정산을 실시하였다. 아래 그림에 모델 계통을 나타내었으며 표 2에 발전기 데이터를 보였다.

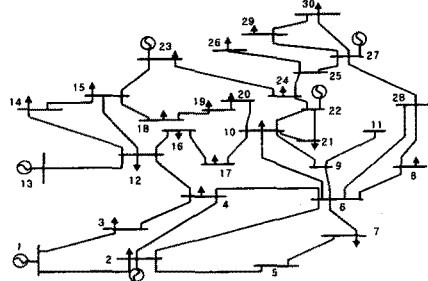


그림 1. 30 모선 모델

표 2. 발전기 데이터

모선	최대 출력	가격 함수
1	80	$2x + 0.02$
2	80	$1.75x + 0.0175$
13	50	$x + 0.0625$
22	55	$3.25x + 0.0083$
23	30	$3x + 0.025$
27	40	$3x + 0.025$

24시간에 걸친 계통의 모의 운영을 위해 모델계통의 부하 형태를 산업, 사무실, 상업, 그리고 주거의 4가지 형태로 구분한 뒤 각 부하 형태에 따른 부하량 변화 형태를 적용하였다. 그림 2와 3에 각각 부하형태별 요구량 모델과 계통의 총 부하량 변화 그래프를 나타내었다. 또한 표 3에 모선별 부하형태 및 최대 요구량을 정리하였다.

표 3. 부하 데이터

모선	최대부하	부하형태	모선	최대부하	부하형태
2	21.7	산업	17	9	사무실
3	2.4	주거	18	3.2	고정
4	7.6	사무실	19	9.5	고정
7	22.8	상업	20	2.2	사무실
8	31	산업	21	17.5	상업
10	5.8	산업	23	3.2	사무실
12	11.2	상업	24	8.7	상업
14	6.2	주거	26	3.5	상업
15	8.2	주거	29	2.4	주거
16	3.5	주거	30	10.6	산업

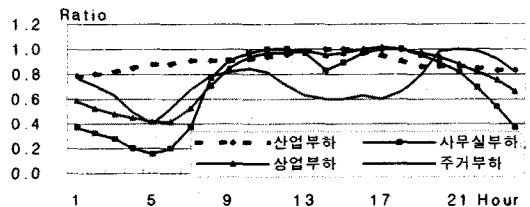


그림 2. 부하 형태별 부하 요구량 모델

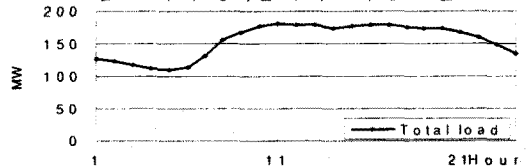


그림 3. 모델 계통 총 부하 요구량

#### 4.1 지역기준점의 영향

기존의 조류계산을 이용한 MLF 계산에서는 기준 모선이 필수적이며 이를 지역기준점이라 하였으며, 계통 상태에 무관하게 항상 1인 MLF 값을 갖게된다. 이는 기존 MLF 계산 방식의 단점으로 볼 수 있는데 지역기준점의 위치에 따라 시장참여자의 손익에 영향을 주기 때문이다. 그림 4의 (a), (b)는 각각 1번 모선 및 27번 모선을 지역기준점으로 선정하였을 때 MLF 결과를 보이고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 지역기준점 이동에 따른 MLF 변화는 선형적 변화가 아니며 따라서 시장참여자들의 손익 변화가 발생하게 된다.

지역기준점 변화에 따른 발전소 보상비용의 변화를 표 4에 정리하였다. 모선 1, 2, 13에 있는 발전소는 지역기준점 이동에 따라 손해를 보는 반면 모선 23 및 27에 위치한 발전소는 이익을 보고 있다. 이는 조류계산을 이용한 MLF 급전 및 정산 방식의 불평등 문제점을 보여준다 할 수 있다. 같은 부하 및 발전 용량에도 불구하고 지역기준점의 이동에 의해 3%가 넘는 이익(모선 27) 및 1.2%의 손해(모선 1)가 단 하루만에 나타나게 된다.

반면 제안한 OPF를 이용한 MLF 계산 방식은 지역기준점이 필요하지 않기 때문에 모든 시장참여자에게 평등한 급전 및 정산이 가능하다.

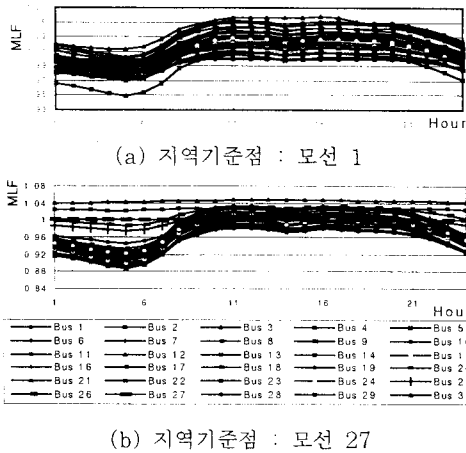


그림 4. 지역기준점 변화 및 MLF 변화

표 4. 지역기준점 변화에 따른 발전소 보상비용 변화

발전소	보상 비용(\$)		[모선27 - 모선 1]
	모선 1	모선 27	
모선 1	2804	2770	-34
모선 2	3783	3767	-16
모선 13	891	889	-2
모선 22	1622	1622	0
모선 23	907	910	3
모선 27	1997	2059	62

#### 4.2 조류계산 방식과 OPF 방식의 비교

두 번째 사례연구로 기존의 조류계산을 이용한 MLF 계산과 제안한 OPF를 이용한 MLF 계산의 결과를 비교하였다. 그림 5의 (a)와 (b)에 각각 제안한 OPF 및 기존의 조류계산을 이용한 MLF 계산 결과 중 발전기 모선에 대한 결과를 나타내었다. 기존의 조류계산을 이용한 MLF 결과는 각 모선별로 총 부하 곡선형태와 거의 같은 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 반면에 OPF를 이용한 MLF 결과는 첨두부하 시간대인 12시부터 17시까지 갑작스러운 변화를 보여준다.

위와 같은 큰 변화는 계통에 제약조건이 발생하였음을 의미한다. 표 5에 시간별 선로 제약조건을 정리하였다. OPF를 이용한 MLF 결과에 갑작스러운 변화가 나타났던 13시에 2개의 선로에 새롭게 혼잡이 발생하여 17시에 해소됨을 알 수 있다. 이때 OPF를 이용한 MLF도 12시 이전의 형태로 복귀하고 있다.

이는 제안한 OPF를 이용한 MLF 계산 기법이 계통의 제약조건을 가격신호를 통해 급전 및 정산 과정에 반영할 수 있도록 해 준다는 사실을 의미한다.

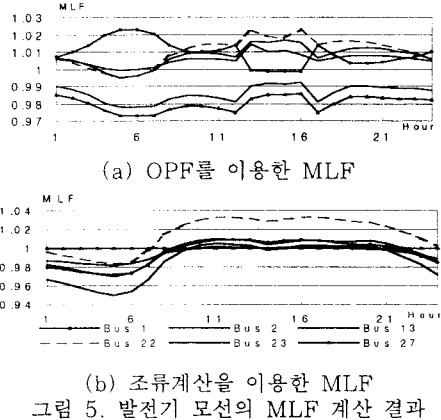


그림 5. 발전기 모선의 MLF 계산 결과

표 5. 첨두부하 시간대의 혼잡 발생 선로

시간	From	To	조류량	용량한계
12	6	8	32	32
	6	8	32	32
13	21	22	32	32
	25	27	16	16
16	6	8	32	32
	21	22	32	32
17	25	27	16	16
	6	8	32	32

#### 5. 결 론

본 논문에서는 기존의 조류계산을 이용한 MLF 계산방식의 단점이라 볼 수 있는 지역기준점 설정의 필요성이 없으며 동시에 선로의 제약조건 위반 여부를 가격신호에 반영할 수 있는 급전 및 정산 방식으로 OPF를 이용한 MLF 계산 기법을 제안하였다.

사례연구를 통하여 지역기준점 설정의 불합리성을 보였으며 제안한 OPF를 이용한 MLF 계산 기법이 선로의 제약조건 발생 여부를 충실하게 반영하고 있음을 보였다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] NEMMCO, *Treatment of Loss Factors in The National Electricity Market*, National Electricity Market Management Company Limited, Nov. 1999
- [2] Barrie Murray, *Electricity Markets*, John Wiley & Sons, 1998.
- [3] Sally Hunt, Graham Shuttlesworth, *Competition and Choice in Electricity*, John Wiley & Sons, 1996.
- [4] P. Pals, R.M. Dunnett, C.J. Aldridge, A. Prangley, "Calculation of Transmission Loss Factors in the Presence of Constraints", *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000*, pp. 326-332, Apr. 2000.
- [5] Vincent Del Toro, *Electric Power Systems*, Prentice-Hall, Inc. 1992