

발전기 우선투입법 및 조류계산에 의한 개략모선가격 산정법 개발

이 범* · 김용하** · 최남섭*

*여수대학교 · ** 인천대학교

Development of Approximate Calculation Methodology for Nodal Price by Unit Priority-order and Loadflow

Buhm Lee* · Yong-ha Kim** · Nam-sup Choi*

* Yosu National University · ** University of Incheon

E-mail : buhmlee@yosu.ac.kr

요 약

본 연구는 전력시장에서 중요한 모선가격을 최적이지 아닌 현재상태에서 계산할 수 있는 새로운 방법을 개발하였다. 모선가격을 계산하기 위하여, 한계가격, 전력조류계산을 사용하였으며, 선로손실, 발전용량, 선로용량 등을 고려할 수 있도록 하였다. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여, 제안한 방법의 우수성을 입증하였다.

ABSTRACT

This paper propose a new method to calculate nodal price which is very useful data in electric market under non-optimal operation. To calculate nodal price, we employ marginal cost and power flow, and consider network loss, generator capability, and line capability. The proposed method is applied to the test system and the usefulness is verified.

키워드

Nodal Price, Non-optimal operation, Marginal Cost, Power flow

1. 서 론

우리나라에서도 전력시장이 구성되고 전력이 거래됨에 따라, 현 상황에 적합한 전력시장운영규칙 및 전력거래방식의 필요하게 되었으며, 특히 전력을 거래하는 모선에서의 가격이 매우 중요해지게 되었다. 이와 관련하여 수송가의 위치와 전력계통의 특성을 고려한 차등화 된 전력 요금을 산정할 수 있는 방법들이 연구되어 왔으며, 이중 한계가격을 이용한 방법[1]이 개발되어 왔다. 이 방법은 고려기간에 따라서 단기비용과 장기비용으로 나누고, 또한 모선별로 지역별로 나눌 수 있다. 이중 각 모선별로 단가를 계산할 수 있는 모선가격(Nodal Price)을 계산하면, 차등화 된 전력요금 책정이 가능하다.

그러나, 현재까지 모선가격은 최적의 상태에서 만 계산이 가능하며, 이는 계통이 항상 최적으로

운전되고 있다는 가정하에서 계산하였던 것이다. 이러한 방법에 의하면, 최적의 운전상태가 아닐 경우 오차가 발생할 수 밖에 없다.

그러므로, 본 연구에서는 최적상태만이 아닌, 비최적으로 운전되고 있는 현재상태에서의 모선가격을 계산할 수 있도록 하였다. 이의 방법으로 한계가격과 조류계산을 사용하였으며, 또한 선로손실, 발전용량, 선로용량 등을 고려할 수 있도록 하였다. 이로써, 종래 모선가격계산방법의 단점을 보완하고, 현재 계통의 특성을 반영하여 공정한 전력요금산정을 할 수 있도록 하였다. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여, 제안한 방법의 우수성을 입증하였다.

II. 최적운전상태에서의 모선가격

모선가격은 계통의 각 부하 1단위 증가했을 때 추가적으로 발전력을 공급하는데 발생하는 추가 비용이라 할 수 있으며, 이때 모선가격은 선로손실, 선로혼잡, 발전기 입찰함수, 계통의 전기적인 특성에 따라서 영향을 받는다. 또한 모선가격은 계통이 운전되고 있을 때 각 모선의 경제적인 자료를 제공하기 위한 것으로, 공정한 전력요금산정, 발전 비용 보상, 선로혼잡비용 산정 등에 활용되고 있다.[2] 또한 모선가격의 산정은 최적화문제를 기본으로 라그랑지안 승수를 사용하는 방법을 가장 널리 사용하고 있다.[3]

최적상태에서 구해지는 모선가격을 살펴보면, 임의의 모선(발전기모선, 부하모선)에서 부하가 1단위 변화할 때 전체 계통에서 그 부하에 대한 수급을 맞추기 위해서 발전력을 증가되어야 하는데, 발전비용을 최소로 하기 위한 발전력이 배분되었을 때 증가되는 발전비용을 그 임의의 모선에서의 살펴보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \pi &= \Delta F(P_G) = \sum^{ngen} \Delta f_i(p_{gi}) \\ &= \sum^{ngen} \{f_i(p_{gi}) - f_i(p_{gi}')\} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,
 $f_i(p_{gi})$: i 발전기 발전비용함수
 p_{gi} : i 발전기 기준발전력
 p_{gi}' : 재배분된 i 발전기 출력

식(1)은 1단위부하의 증가에 대한 발전력의 경제 배분시 분배된 발전력에 대한 각 발전기 한계비용의 가중평균으로 식(2)와 같이 표현가능하다.

$$\pi = \frac{\partial(\sum F(P_G))}{\partial P_i} = \sum \frac{\partial(\sum F(P_G))}{\partial P_G} \frac{\partial P_G}{\partial P_i} \quad (2)$$

여기서,
 ∂P_i : 부하 유효전력의 변화
 ∂P_G : 발전기 유효출력의 변화

모선가격을 산정하기 위한 방법으로 라그랑지안 승수를 이용한 방법이 많이 사용하고 있는데, 이는 최적조류계산을 푸는 과정 중 선형계획법의 풀이 과정에서 계산되는 잠재가격(Shadow price)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\pi_{pgi} = \frac{\partial f_i(p_{gi})}{\partial p_{gi}} \pm \mu_{pgi} \quad (3)$$

$$\pi_{pdj} = \lambda_{pdj} \quad (4)$$

여기서,

μ_{pgi} : 발전기 상·하한제약에 관련된 잠재가격

III. 현재운전상태에서의 모선가격

본 연구에서는 선로손실과 발전기의 상·하한출력제약, 선로제약을 고려할 수 있는 모선가격을 계산할 수 있는 방법을 개발하였으며, 이 방법은 최적조류계산을 사용하지 않기 때문에 최적조류계산이 가지고 있는 수렴도보장 등의 문제점이 발생하지 않는 장점이 있다.

현재운전상태의 개념을 쉽게 이해하기 위하여 무손실, 무제약의 상태를 가정한 경우를 살펴보면, 이들 발전기를 중 증분연료비가 가장 싼 발전기의 증분연료비를 현재상태에서의 모선가격으로 정의하고, 가장 싼 증분연료비를 갖는 발전기가 다수대가 존재한다면 증가된 부하를 다수 대의 발전기가 분배한 후에도 동일한 증분연료비를 가지도록 분배하고 이때 추가적으로 발생하는 발전비용을 모선가격으로 정의한다.

$$\pi_i = \text{Min} [\lambda_{pg1}, \lambda_{pg2}, \dots, \lambda_{pgi}, \dots, \lambda_{pgn}] \quad (6)$$

또한, 선로손실, 발전기제약, 선로제약 등 실제 계통의 특성인 반영할 수 있는 경우를 살펴보면, 모선가격을 산정할 때 선로의 특성을 반영하여야 하기 때문에 현재운전중인 계통의 슬랙모선의 발전기를 포함한 발전력을 모두 고정시키고, 모선가격을 산정하고자하는 모선에 부하를 1단위 증가시킨다. 그리고 증가된 부하와 그에 따른 손실증가분을 발전기의 증분연료비가 작은 순서에 따라서 순차적으로 담당시키면서 조류계산(PF)을 수행하여 손실을 포함한 발전비용 증가를 계산하고 이들 중 가장 싼 발전기의 증분 비용에 손실에 해당되는 비용을 추가한 값이 임의모선의 모선가격으로 산정하게 된다. 이 과정에서 발전기출력이 상·하한제약에 Binding되어 있는 경우에는 해당발전기는 실제적으로 발전기 출력을 증가시킬 수 없으므로 모선가격 산정과정에서 제외시키므로 발전기 출력제약을 고려할 수 있다. 그리고 부하의 증가에 따라서 순차적으로 발전기 출력을 증가시키는 과정에서 선로제약이 새로 발생하는 경우나 현재운전상태에서 선로제약이 Binding되어 있던 상태에서 위반을 하는 경우에는 해당 발전기는 모선가격 산정과정에서 제외시키므로 선로제약도 고려할 수 있다. 이를 그림 1,2에 나타내었다.

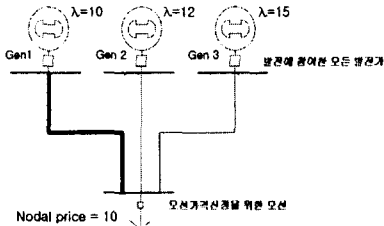


그림 1. 각 발전기의 증분비용이 모두 다른 경우

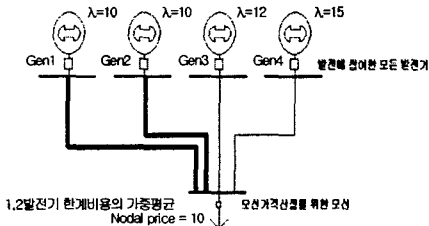


그림 2. 다수의 발전기의 증분비용이 같은 경우

또한, 본 연구에서 제안한 현재 계통상태에서의 모션가격산정 과정을 그림 3에 나타내었다.

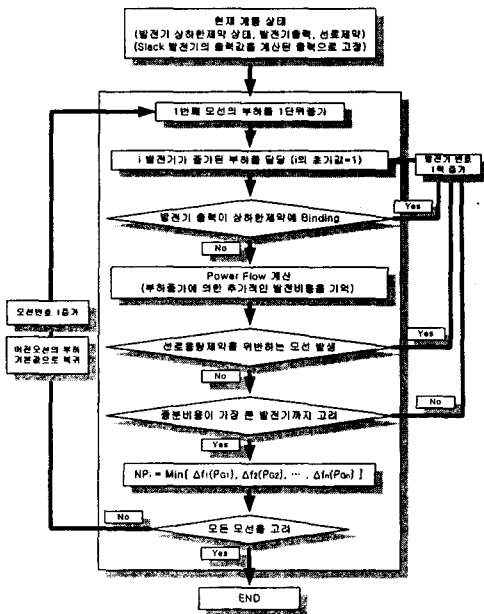


그림 3. 모션가격산정 흐름도

① 발전비용함수

$$f_1(p_{e1}) = 0.0053 \times p_{e1}^2 + 11.669 \times p_{e1} + 213.10$$

$$f_2(p_{e2}) = 0.0088 \times p_{e2}^2 + 10.333 \times p_{e2} + 200.00$$

$$f_3(p_{e3}) = 0.0074 \times p_{e3}^2 + 10.833 \times p_{e3} + 240.00$$

② 발전기출력제약

$$50.00 \leq p_{e1} \leq 200.0$$

$$37.50 \leq p_{e2} \leq 150.0$$

$$45.00 \leq p_{e3} \leq 180.0$$

4.2 계산결과

본 연구에서는 최적상태에서의 모션가격과의 비교를 위해서 손실을 고려하지 않고 발전기 출력제약만을 고려한 최적조류계산을 통하여 계산되는 잠재가격을 이용한 모션가격과 그 때의 계통상태를 이용하여 계산한 현재계통상태에서의 모션가격을 비교하였다.

4.2.1 무손실, 무제약상태의 계산결과

무손실, 무제약의 상태에 대해 최적조류계산시 총 발전비용은 3045.5905[$\$$]로 계산되고, 결과는 다음과 같다.

표 1. OPF 결과와 모션가격

모션 번호	발전기출력 [MW]	증분비용 [\$/MW]	발전기제약 잠재가격	모션가격 [\$/MW]
1	50.0000	12.1990	0.3081	11.8909
2	88.5185	11.8909	0.0000	11.8909
3	71.4815	11.8909	0.0000	11.8909
4	-	-	-	11.8909
5	-	-	-	11.8909
6	-	-	-	11.8909

위의 결과인 발전기 출력을 이용하여 현재운전 상태에서의 모션가격을 산정한 결과는 다음과 같다. 모든 발전기의 증분연료비가 동일하므로 현재비용의 가중평균으로 모션가격을 산정한다.

표 2. 1[MW] 증가시 발전비용변화

발전기 번호	발전기출력 [MW]	발전비용	발전비용 증가량
1	50.000	3057.4828	11.8923
2	88.9773		
3	72.0273		

IV. 사례연구

4.1 시험계통

본 연구에서는 시험계통으로 Wood 6-Bus System[1]을 사용하였으며, 발전비용함수 및 발전기 출력제약은 다음과 같다.

표 3. 모선별 모선가격

모선번호	모선가격 [\$/MW]
1	11.8923
2	11.8923
3	11.8923
4	11.8923
5	11.8923
6	11.8923

위의 결과 두 결과가 동일하게 계산되므로 무손실과 발전기 상하한 제약만 고려했을 때의 최적상태에서의 모선가격 산정방법과 현재계통 운전상태에서의 모선가격 산정방법이 개념적으로 동일하다는 것을 알 수 있다.

4.2.2 선로손실 등 제약을 반영한 계산결과

선로손실, 발전기계약, 선로계약 등 실제 계통의 특성인 반영할 수 있는 경우에 대하여, 위의 실험과 동일한 조건에서 선로저항을 다음의 표4과 같이 고려함으로써 선로손실을 고려하고 OPF를 이용하여 최적상태의 모선가격을 계산하면 발전비용 3131.7771[\$]으로 계산되고 결과는 표 5와 같다.

표 4. 선로손실을 고려하기 위한 선로계수

선로번호	r [pu]	x [pu]	y [pu]	선로번호	r [pu]	x [pu]	y [pu]
1	0.10	0.20	0.020	7	0.07	0.20	0.025
2	0.05	0.20	0.020	8	0.12	0.26	0.025
3	0.08	0.30	0.030	9	0.02	0.10	0.010
4	0.05	0.25	0.030	10	0.20	0.40	0.040
5	0.05	0.10	0.010	11	0.10	0.30	0.030
6	0.10	0.30	0.020				

표 5. OPF 결과와 모선가격

모선번호	발전기출력 [MW]	증분비용 [\$/MW]	모선가격 [\$/MW]
1	50.0000	12.1990	12.1372
2	90.3327	11.9228	11.9229
3	76.8924	11.8909	11.9710
4	-	-	12.4110
5	-	-	12.5354
6	-	-	12.2789

동일한 조건에서 제안된 방법으로 모선 가격을 산정하여본 결과, 표6, 표7과 같은 결과를 얻었다.

표 6. PF 결과와 모선가격

모선번호	발전기	발전기출력[MW]	총 발전비용[\$]	발전비용 변화[\$]
1	1	51.0027	3143.9802	12.2031
	2	91.3409	3143.7727	11.9956
	3	77.8963	3143.7682	11.9911
2	1	50.9987	3143.9320	12.1549
	2	91.3361	3143.7153	11.9382
	3	77.8916	3143.7120	11.9349
3	1	51.0414	3143.9861	12.209
	2	91.3793	3143.7698	11.9927
	3	77.8956	3143.7595	11.9824
4	1	51.0414	3144.4526	12.6755
	2	91.3793	3144.2314	12.4543
	3	77.9346	3144.2274	12.4503
5	1	51.0472	3144.5237	12.7466
	2	91.3851	3144.3004	12.5233
	3	77.9402	3144.2941	12.517
6	1	51.0291	3144.3027	12.5256
	2	91.3667	3144.0807	12.3036
	3	77.9216	3144.0720	12.2949

표 7. Power Flow에 의한 모선가격

모선번호	발전기출력 [MW]	증분비용 [\$/MW]	모선가격 [\$/MW]
1	50.0000	12.1990	11.9911
2	90.3327	11.9228	11.9349
3	76.8924	11.8909	11.9824
4	-	-	12.4503
5	-	-	12.5170
6	-	-	12.2949

위의 결과로부터, 최적화에 의한 최적상태에서의 모선가격과 현재운전상태에서 조류계산을 이용한 모선가격의 산정결과는 선로손실을 고려하지 않은 경우에는 동일하게 계산되었다. 그러나 선로손실을 고려하는 경우는 그 값은 다르게 계산되었으나 최적상태에서의 값과 그 비율이 일정한관계를 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 최적상태에서의 모선가격만을 계산하는 종래의 방법에서 진일보하여, 한계가격과 조류계산을 사용함으로써 비최적상태로 운전되고 있는 계통의 상태에 맞는 모선가격을 계산할 수 있도록 하였다. 또한, 선로손실, 발전용량, 선로용량 등을 고려할 수 있도록 하였다. 제안한 방법을 무손실, 무제약상태와 선로손실, 발전기계약, 선로제약 등을 반영한 상태 각각에 대하여 시험계통에 적용하여 모선가격을 계산할 수 있음을 보였으며, 그 결과를 비교분석 함으로써 제안한 방법의 타당성을 입증하였다.

참고 문헌

- [1] Steven Stoft, "Power System Economics", John Wiley & Sons, 2003
- [2] Frame, J, "Locational marginal pricing", Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE, 28 Jan.-1 Feb. 2001,Page(s): 377 vol.1
- [3] Luonan Chen, "Components of Nodal Prices for Electric Power Systems", IEEE Trans Power Syst., VOL. 17, p41-49, Feb 2002
- [4] Allen J. Wood, "Power Generation, Operation, and Control", John Wiley & Sons, 1996