

단일 요금제도에서 혼잡비용의 다단계 분배 방법 연구

권태진*, 정해성**, 허돈***, 한태경*, 허재행*, 박종근*
 서울대학교* 한국전기연구원** 서울대학교 공학연구소***

A multi stage allocation method of congestion cost in a uniform pricing

Tae-Jin Kwon*, Hae-Sung Jung**, Don Hur***, Tae Kyung Han*, Jae Hang Hur*, Jong-keun Park*
 Seoul National University* KERI** Engineering Research Institute***

Abstract - The congestion cost caused by transmission capacities is an important issue in a competitive electricity market. To allocate the congestion cost equitably, the active constraints in a constrained dispatch and the sequence of these constraints should be considered. A multi-stage method which was proposed by H.S. Jung reflects the effects of both the active constraints and the sequence. In a multi-stage method, the types of congestion are analyzed in order to consider the sequence, and the relationship between congestion and the active constraints is derived in a mathematical way. But in some cases, the inactive constraints can affect the congestion sequence and it is reasonable to allocate the congestion cost to them.

되었다.[1] 이 방법은 제약 급전시에 활성화된 제약들을 구별하여 제약조건이 활성화되는 순서에 따라 그룹을 나눈다. 따라서, 비제약시에 비활성화되었으나 제약 급전시에 활성화되는 제약들에 대해서 효과적으로 공평하게 평가할 수 있게 되었다. 혼잡과 제약들의 관계를 선적분을 이용해 나타내었고 샤플리 벨류를 이용해 혼잡비용을 분배하였다.

그러나 한 단계에서 제약에 걸렸던 선로가 다음 단계에서 제약에 걸리지 않는 경우가 발생할 수 있다. 이 논문에서는 이러한 경우 혼잡비용의 분배를 어떻게 해야 하는지 설명하고자 한다.

2. 본 론

2.1 활성화되었던 선로가 비활성화되는 경우

1. 서 론

일반적인 풀 모델에서는 전력을 팔려고 하는 사업자는 독립계통운영자(ISO)에게 입찰을 한다. ISO는 입찰에 근거해서 비제약 급전시의 가격으로 시장가격을 결정한다. 비제약시 급전이 송전 제약을 넘어서면, ISO는 혼잡을 해소하는 발전 계획을 세워서 조정해야 한다. 이러한 급전시의 변화가 발전가격을 상승시키게 되고 이 가격의 증가분이 혼잡비용으로 되며 이것은 시장 참여자로부터 회수되어야 할 부분이다.

혼잡 비용의 배분에 있어서 많은 방법들이 제안되었었고 다양한 시장에서 실행되어 왔다. 많은 전력 시장에서 혼잡 문제를 해결하는데 모션별 가격을 널리 사용하였다. 그 모션 가격의 개념이 Schweppe et al.에 의해 제안되었고 Hogan에 의해 더욱 발전되었다. 모션 가격은 효과적인 방법이나 merchandising surplus를 초래하는 문제를 가지고 있다.

부가 정산법은 단순하며 merchandising surplus 문제에 적합하나 소비자들에게 효과적인 가격신호를 주지는 못한다. 그리고 이후에 게임 이론적인 접근이 제안되었다.[3] 이 방법은 적분을 이용해서 혼잡비용의 정확한 양을 회수하는 것이다. 그러나 이 경우 일반적인 풀 모델에서의 적용이 어렵고 복잡한 계산을 필요로 한다.

Singh et al.은 혼잡비용의 분배에서 송전선 제약과 관련한 라그랑지 승수를 이용하는 방법을 제시하였다.[4] 이 방법은 제약 조건의 라그랑지 승수에 따라 혼잡비용을 제약 선로에 분배하고, 그리고 그 선로를 사용하는 시장 참여자들에게 혼잡비용을 지불하게 하는 것이다. 그러나 한 혼잡이 다른 혼잡을 유발시키는 경우 이 방법을 사용하면 왜곡이 생긴다. 즉, 비제약 급전시에 제약의 범위내에 있었다가 제약 급전시에 활성화 되는 경우가 그러한데 그것은 제약에 걸리는 순서를 고려하지 않았기 때문이다.

그리고 이 왜곡을 해소하기 위해 다단계 방법이 제안

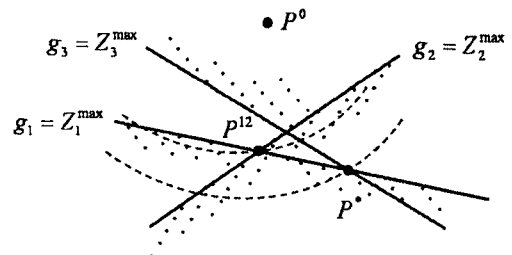


그림1. 제약조건과 최적해

그림1에서 P^0 는 비제약급전시의 해를 나타내고 $g_1 \leq Z_1^{\max}$, $g_2 \leq Z_2^{\max}$, $g_3 \leq Z_3^{\max}$ 는 각각 선로 1, 2, 3의 부등식제약조건으로 선로용량 등을 나타낸다. 해 P^0 가 $g_1 \leq Z_1^{\max}$, $g_2 \leq Z_2^{\max}$ 를 만족하지 못하므로 이 2개의 제약식이 더해져서 단계1의 해 P^{12} 가 된다. 이때 발생하는 비용 $C(P^{12}) - C(P^0)$ 은 이 두 선로에 분배한다. 그러나 해 P^{12} 는 $g_3 \leq Z_3^{\max}$ 을 만족하지 못하므로 단계2에서 제약식 $g_3 \leq Z_3^{\max}$ 이 더해져 제약급전시의 해 P^* , 즉 최적해가 구해진다. 그리고 단계 1에서 단계2로 넘어갈 때 드는 비용 $C(P^*) - C(P^{12})$ 은 $g_3 \leq Z_3^{\max}$ 에 분배해야 한다.

여기서 P^0 는 $g_3 \leq Z_3^{\max}$ 식을 만족하나 $g_1 \leq Z_1^{\max}$ 과 $g_2 \leq Z_2^{\max}$ 모두 만족하지 못한다. 따라서 최적해 P^* 에서 선로1, 3의 두 개의 선로에 같은 방법으로 비용을 부과하면 안 된다. 다시 말해 선로 1과 2의 혼잡 때문에 선로3에 혼잡이 발생한 것이므로 영향을 준 부분만큼 재분배해야 하는 것이다. 이와 같이 비제약 급전에서

만족되지 않는 제약들의 집합과 제약 급전에서 활성화된 제약조건들의 집합이 다르면 재분배 절차가 불가피하다는 것이 다단계 방법[1]의 내용이다.

최적해 P^* 에서 $g_2 \leq Z_2^{\max}$ 을 만족하지 못하는 것에 주목할 필요가 있다. 즉, 선로 2는 단계1에서 활성화 되었다가 단계 2, 즉 최적해에서 비활성화 되는 제약조건이 된다. 최적해를 구하는 과정에서 이 제약식을 제외하고 문제를 풀어도 같은 P^* 를 구할 수 있다. 그러므로 $g_2 \leq Z_2^{\max}$ 에 비용을 분배하지 않아야 할 것처럼 보인다. 그러나 P^0 에서 $g_2 \leq Z_2^{\max}$ 은 만족하지 못하고 있고 풀 모델에서 시장가격이 비제약 급전에서의 가격으로 결정되는 것을 생각하면 비록 제약에 걸리지 않았지만 $g_2 \leq Z_2^{\max}$ 에 비용을 분배해야 타당할 것이다.

선로 2에 대한 비용의 분배는 제약에 걸린 선로에 대해 했던 것과 똑같은 방법으로 할 수 있다. 결과적으로 선로 2와 같은 경우는 재분배 과정에서 항상 음의 비용을 받게 되어 재분배 이전에 비해 가격이 낮아짐을 볼 수 있다. 사례연구에서 이것을 보여준다.

2.2 각 단계에서 제약에 대한 혼잡비용의 분배

혼잡비용을 분배하는데 있어서 활성화된 부동식 제약 조건의 순서를 고려해야 하며 그것을 위해 단계를 정의한다. 간단히 앞의 그림 1을 가지고 설명하면 단계 0은 비제약 급전으로 선로 1, 2가 선로용량을 넘어가는 것을 볼 수 있다. 그 다음 단계인 단계 1에서 이 두 개의 선로가 제약조건으로 포함된다. 단계 1에서는 마찬가지로 제약값을 넘어가는 선로 3의 제약조건이 제약집합에 포함되어 단계 2의 해, 즉 최적해가 구해진다.

그림 1의 선로 1, 2처럼 한 단계에서 두 개의 혼잡선로 x, y 가 있다고 가정하자. 선로 x, y 에 흐르는 조류의 양을 각각 $g_x(P^{k-1})$ 에서 Z_x^{\max} 로 $g_y(P^{k-1})$ 에서 Z_y^{\max} 으로 줄이게 될 때 선로 x 에 분배된 비용 AC_x 와 선로 y 에 분배되는 비용 AC_y 은 다단계 방법[1]에서 다음과 같다.

$$AC_x = \frac{1}{2} \left(\int_{g_x(P^{k-1})}^{Z_x^{\max}} \frac{\partial CC_k(Z_x, Z_y^{\max})}{\partial Z_x} dZ_x \right) + \int_{g_x(P^{k-1})}^{Z_x^{\max}} \frac{\partial CC_k(Z_x, g_y(P^{k-1}))}{\partial Z_y} dZ_x \quad (1)$$

$$AC_y = \frac{1}{2} \left(\int_{g_y(P^{k-1})}^{Z_y^{\max}} \frac{\partial CC_k(Z_x^{\max}, Z_y)}{\partial Z_y} dZ_y \right) + \int_{g_y(P^{k-1})}^{Z_y^{\max}} \frac{\partial CC_k(g_x(P^{k-1}), Z_y)}{\partial Z_y} dZ_y \quad (2)$$

제약조건의 비선형성으로 혼잡비용에 미치는 각 제약 조건의 영향을 정확하게 측정하기가 어렵다. 이러한 비선형성을 극복하고 각 제약조건의 영향력을 측정하기 위해 사플리 벨류[6]를 이용해 한 단계에서 제약에 걸린 2개의 선로 x, y 에 혼잡비용을 분배하면 위의 식 (1)과 (2)처럼 구할 수 있다.

2.3 재분배

재분배 절차는 정확한 혼잡 비용 분배를 위해서 필요한 절차이다. 그림 2에서 제약조건 i 와 j 는 각각 앞의 그림 1의 선로 2, 1에 해당한다고 볼 수 있다. 그리고 선로 k 는 선로 3에 해당한다. 제약조건 i 와 j 가 P^0 에서 만족하지 못하나 제약조건 k 는 만족한다. $g_i(P^0)$ 는 제약 범위를 A 만큼 초과하고 $g_j(P^0)$ 는 B 만큼 초과한다.

제약조건 i 와 j 를 만족하기 위해서 발전기들은 P^1 으로 출력을 바꿔야 하며 $g_j(P^1)$ 값은 Z_j^{\max} 가 되나 $g_i(P^1)$ 은 Z_i^{\max} 값보다 작아진다. 그리고 그림2 에서처럼 제약조건 i 때문에 $g_k(P^1)$ 이 C 만큼 감소하고 제약조건 j 때문에 D 만큼 증가해 결과적으로 선로 k 는 $g_k(P^0) - C + D$ 로 증가하게 된다. (단, $C \geq 0, D \geq 0$) 그 결과 P^1 에서 제약조건 k 는 만족하지 않게 된다.

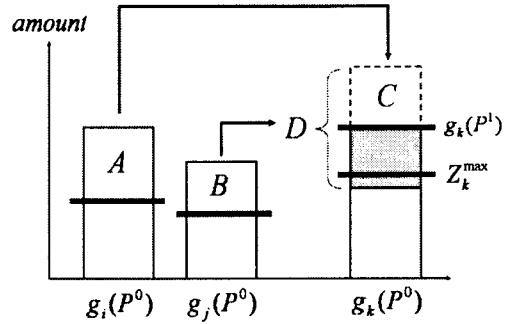


그림2. 혼잡선로의 조류

제약조건 k 가 만족하지 않게 되는 것은 제약조건 i 와 j 를 만족하기 위해서였다. 따라서 제약조건 k 에 분배된 혼잡비용의 일부분이 제약조건 i 와 j 에 이전되어야 한다. 그래서 영향을 준 부분만큼 계산을 해보면 선로 i 와 j 에 분배되는 비용은 각각 다음과 같다.

$$AC_i^{re} = AC_i + AC_k \times \frac{-C}{g_k(P^0) - C + D} \quad (3)$$

$$AC_j^{re} = AC_j + AC_k \times \frac{D}{g_k(P^0) - C + D} \quad (4)$$

여기서 AC_j, AC_j^{re} 는 각각 재분배 전, 후의 선로 j 에 분배된 비용이다.

2.4 혼잡비용과 시장참여자

혼잡비용은 송전선을 사용하는 시장 참여자에 의해 지불된다. 시장참여자가 선로를 이용하는 비용을 알기 위해 조류추적법이 이용되며 그래프 이론[5]을 사용해 혼잡선로를 이용하는 비율과 요금을 계산하였다.

2.5 사례연구

사례 연구로 IEEE 39노선 계통을 대상으로 하였다. 이 계통은 총 10개 발전기와 46개의 선로가 있으며 발전기와 부하에 대한 데이터는 [2]에 나와 있다.

단계 0에서 선로 3(모선2-3)과 30(모선 25-26)에 많은 조류가 흘러서 선로용량을 넘는다. 그래서 단계 1에서는 이 제약들이 더해져서 이 값들을 제약값 이내에 있게 하도록 발전기 출력을 재조정하면 선로 21(모선 16-17)의 선로용량 제약값을 넘어서게 된다. 그래서 단계 2에서 이 제약값을 맞추므로써 최적해가 얻어진다. 전체 혼잡비용은 3개의 선로에 분배되며 최종 단계에서 이것들 중 선로 3과 21은 활성화 제약조건이며 선로 30은 비활성화 제약 조건이 된다. 여기서 비활성화 제약 조건임에도 불구하고 혼잡비용이 분배되는 것은 앞에서 설명한 것처럼 풀 모델에서의 시장 가격이 비제약 급전에서의 가격으로 결정되기 때문이다. 즉 비제약 급전시 선로용량을 넘어섰던 선로 30에는 혼잡비용을 부과하는 것이 불가피하다.

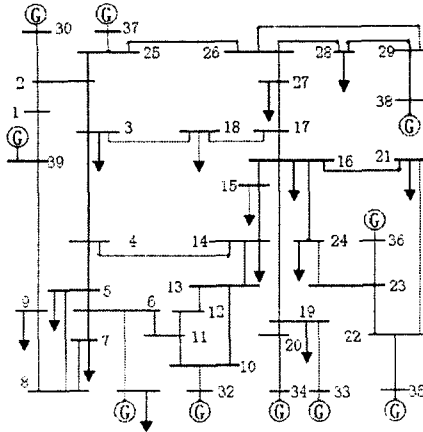


그림 3.10기39모선시스템

표 1. 각 단계의 결과

Line	30[Mw]	3[Mw]	21[Mw]	전체비용[\$]
선로용량	120	550	150	
Uncon	187.76	648.01	58.68	198195.7
A1	120	617.41	68.07	198392.1
A2	137.03	550	212.14	198638.3
1stage	120	550	198.07	198654.7
2stage	69.76	550	150	198936.3

표 2. 각 선로에 분배된 혼잡비용의 결과

Line	30	3	21
각단계별계산[\$]	106.4	352.6	281.6
ΔL_{21} [MW]	-2.34	141.73	
재분배후[\$]	103.07	554.13	83.43
Singh's[\$]	0	1187.22	-446.58

표 3. 각 선로의 사용율과 부하의 혼잡비용

Bus-Line	30	3	21	혼잡비용[\$]
3	0	54.66%	0	302.89
5	0	19.03%	0	105.45
7	0	3.50%	0	19.39
14	0	9.52%	0	52.75
18	28.29%	13.29%	100%	186.23
27	71.71%	0	0	73.91
Total(%)	100	100	100	740.62

표 1에서 각 단계에서의 결과가 요약되어 있다. 단계 1에서 혼잡비용 CC_1 값은 \$459.03이고 이 비용은 (1)과 (2)에 의해서 선로 3, 30에 나누어진다. 계산 하면, 선로 3에 분배되는 비용은 표 1에서 다음과 같다.

$$AC_3 = \frac{1}{2} [CC_1(A_2) - CC_1(P^0)] + \frac{1}{2} [CC_1(P^1) - CC_1(A_1)] = 352.6$$

같은 과정으로 선로 30에 \$106.4 이 분배된다. 표 1에서 단계 2의 혼잡비용 CC_2 는 \$281.6 이며, 이 비용이 선로 21에 분배된다. 마지막으로 이전 단계에서 제약들에 분배되었던 비용의 일부분을 재분배해야 한다. 이것을 위해서 다른 제약에 대한 영향을 (3) 과 (4)를 가지고

계산한다. 표 2는 그 결과들을 보여준다.

선로 3에 부과되었던 비용은 재분배 과정 이후에 증가하게 되며 선로 30에 부과되는 비용은 약간 줄어들게 된다. 이것은 단계2에서 선로 21의 선로용량 제약 때문에 선로 30이 제약값보다 아래로 줄어들기 때문이다. 부하와 제약조건들의 관계는 표 3의 선로 이용율을 보면 알 수 있다. 부하는 멀리 떨어진 선로보다는 인접한 선로를 더 많이 사용하는 것을 볼 수 있으며 34번 모선의 부하처럼 혼잡 선로로부터 멀리 떨어져 있는 경우는 사용율이 모두 0이다. 결과적으로 선로 30은 제약에 걸리지 않았지만 혼잡비용이 분배되어 혼잡을 유발한 소비자들은 높은 혼잡요금을 내게 된다.

3. 결 론

이 논문은 단일 요금제도에서 혼잡비용을 분배하는 방법에 관한 내용이다. 기존의 제안된 방법인 다단계 방법 중 한 단계에서 제약에 걸렸던 선로가 다음 단계에서 제약에 걸리지 않는 상황이 발생할 수 있으며 이 경우 혼잡비용은 어떻게 분배 하는지에 관해서 설명하였다. 결과적으로 제약에 걸리지 않은 선로에도 혼잡비용이 분배되며 이것은 Harry Singh이 썼던 방법이나 부가정산법 등 기존의 제안된 방법에서 제약에 걸린 선로에만 혼잡비용이 분배되는 것과는 차이가 있다.

감사의 글

이 논문의 연구는 산업자원부 지정 '전력신뢰도/품질 연구센터'에서의 재정적인 지원을 받아 진행되었습니다. 본 센터에는 경상대, 서울대, 숭실대, 전북대, 한양대의 교수님들과 대학원생들이 연구원으로 참여하고 있습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] H.S. Jung, D. Hur and J.K. Park : "Congestion cost allocation method in a pool model" IEE Proceedings-Volume 150, Issue 5, 15 Sept. 2003 Page(s):604 - 610
- [2] Hae-Sung Jung, Jong-Keun Park. "New Suggestion for Congestion Cost Management in TWBP of Korea", ICEE2002. 2002.
- [3] Bakirtzis, A.G: "Aumann-Shapley transmission congestion pricing", IEEE Power Eng. Rev., pp. 67.69, 2001, 21
- [4] Singh, H., Hao, S., and Papalexopoulos, A.: "Transmission Congestion Management in Competitive Electricity Markets", IEEE Trans. Power Syst. (2), pp. 672.680, 1998, 13.
- [5] Wu, F.F., Ni, Y., and Wei, P.: "Power Transfer Allocation for Open Access Using Graph Theory-Fundamentals and Applications in System without Loopflow", IEEE Trans. Power Syst. (3), pp. 923.929, 2000, 15.
- [6] Morris, P.: "Introduction to Game Theory" (Springer-Verlag, New York, 1994)