

다단계 방법을 이용한 혼잡 비용의 처리

정해성* 박종근* 이병윤**
*서울대학교 **전기연구소

Congestion cost allocation using multistage method

Hae-Sung Jung* Jong-Keun Park* Byung-Yoon Lee**
*Seoul National Univ. **KERI

Abstract - 본 연구에서는 쌍방향 시장에서 혼잡 비용의 처리 방법을 제시한다. 이 방법은 쌍방향 시장에서 시장의 참여자들은 혼잡을 고려하지 않고 서로 계약을 하며 만일 혼잡이 발생한다면 Independent System Operator(ISO)가 혼잡을 해결한다는 가정을 전제로 한다. ISO는 혼잡이 발생 시 조정 입찰(adjustment bidding)을 통해 전력을 매매하여 혼잡을 해소한다. 이때 ISO는 전력의 매매 비용을 최소화하도록 하는데 이 매매 비용을 혼잡 비용이라고 부른다. 그러므로 쌍방향 시장에서는 이 혼잡 비용을 시장의 참여자에게 공평하게 배분하는 방식이 중요한 문제이다. 이 문제를 해결하기 위해 여러 가지 방법이 제시되었으며 송전 제약에 대한 라그랑지 승수를 이용하는 방식도 그 중의 하나이다. 그러나 이 방식은 연속 혼잡이 발생하면 참여자에게 혼잡 비용을 정확히 배분할 수 없다. 여기서 연속 혼잡이란 혼잡 선로에 의해 다른 선로에 혼잡이 발생하는 경우를 말한다. 본 연구에서는 직류 조류를 이용한 다단계 방법을 제시하며 이 방법은 연속 혼잡을 단계별로 처리하여 기존의 방법의 문제점을 해결하였고 혼잡 비용이 참여자에게 공평히 배분되도록 하였다.

Key word: 연속 혼잡, 다단계 방법

1. 서 론

현재 전 세계적으로 구조 개편이 진행되고 있다. 쌍방향 시장은 다른 모델에 비해 더욱 효과적인 모델로 평가받고 있으며 많은 국가에서 구조 개편을 통하여 시행하고 있다. 쌍방향 시장은 자유로운 시장 경쟁이 전력 시장에서의 경쟁을 효과적으로 달성할 수 있다는 생각에 의거한다.

본 연구에서는 쌍 방향 시장의 참여자들은 혼잡을 고려하지 않고 서로 계약을 하며 혼잡이 발생하면 ISO가 해결한다고 가정을 한다. 혼잡은 유한한 송전 용량으로 인해 필요한 전력을 원하는 곳에 전달할 수 없는 계통의 특성의 결과로 발생한다. 만일 혼잡이 발생하면 더욱 비싼 발전기가 계통에 투입되거나 기동된 발전기의 출력이 변해야 만이 해결될 수 있고 이로 인해 추가적으로 비용이 발생한다. 이 비용을 혼잡 비용이라고 한다.

쌍방향 모델에서는 혼잡을 해결하기 위해 ISO는 조정 입찰을 통하여 전력을 매매하게 되며 이로 인해 발전기의 투입과 출력이 변하게 된다. 즉 혼잡 비용이 발생한다. 그러므로 쌍 방향 시장에서는 혼잡 비용을 시장 참여자에게 배분하는 방식이 큰 문제이며 이를 해결하기 위해 많은 방법이 제안되어 왔다. Harry Singh에 제시된 송전 혼잡에 대한 라그랑지 승수를 이용하는 방식도 그 중의 하나이다. 그러나 이 방식은 연속 혼잡이 발생했을 때 참여자에게 공평하게 비용을 배분할 수 없다는 단점이 있다. 연속 혼잡이란 혼잡 선로에 의해 다른 선로에 혼잡이 발생하는 경우를 말한다.

본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위해 직류 조류를 기반으로 하는 다단계 방식을 제안한다. 이 방법은 연속 혼잡을 단계적으로 처리하여 참여자에게 혼잡 비용을 공

평하게 배분할 수 있음이 보여질 것이다.

2. 본 론

2.1 연속 혼잡의 문제점

혼잡이 발생하면 ISO는 최소의 비용으로 혼잡을 해소해야 하므로 ISO의 목적 함수는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\text{Min} \sum_{i \in \text{gen}} C_i(P_i) \cdot (P_i - P_i^0) \quad (1)$$

$$\text{subject to } Flow_{ij} \leq Z_{ij}^{\max}, \sum_j Flow_{ij} = P_i$$

P_i^0 : 모선 i에서 계약에 의한 발전기 출력

P_i : 모선 i에서 발전기 출력이나 부하

$Flow_{ij}$: 선로 ij에서의 조류

Z_{ij}^{\max} : 선로 ij의 최대 용량

위의 문제를 해결하기 위해 다음과 같이 라그랑지 함수를 구성한다.

$$L = \sum_i C_i(P_i) \cdot (P_i - P_i^0) - \sum_i \lambda_i (\sum_j Flow_{ij} - P_i) - \sum_{ij} \mu_{ij} (Flow_{ij} - Z_{ij}^{\max}) \quad (2)$$

식 (2)에서 민감도 μ_{ij} 는 송전선ij의 용량에 대한 웨도우 프라이스로 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_{ij} = \frac{\partial \sum_k C_k(P_k) \cdot (P_k - P_k^0)}{\partial Z_{ij}^{\max}} \quad (3)$$

μ_{ij} 는 선로 ij의 최대 용량으로 혼잡 비용을 편미분한 값이다. 우리는 계산의 편의를 위해서 새로운 변수 h_{ij} (revised Lagrange multiplier:RLM)을 다음과 같이 정의한다.

$$h_{ij} = \mu_{ij} - \sum_k C_k''(P_k) \cdot (P_k - P_k^0) \cdot \frac{\partial P_k}{\partial Z_{ij}^{\max}} \quad (4)$$

$$= \sum_k C_k'(P_k) \cdot \frac{\partial P_k}{\partial Z_{ij}^{\max}}$$

h_{ij} 는 몇몇 가정 하에서 μ_{ij} 의 1/2에 해당하는 값이다. 이제 식 (4)로부터 식 (5)를 유도할 수 있다.

$$h_{ij} \cdot (Z_{ij}^{\max} - Z_{ij}^0) = \sum_k C_k'(P_k) \cdot \frac{\Delta P_k}{\Delta Z_{ij}^{\max}} \cdot (Z_{ij}^{\max} - Z_{ij}^0) \quad (5)$$

$$= \sum_k C_k'(P_k) \cdot (P_{kij} - P_k^0)$$

Z_{ij}^0 : 계약에 의해 선로 ij에 흐르는 조류

$P_{k/ij}$: 선로 ij의 혼잡으로 인한 발전기 k의 출력의 변화량

$$\sum_{ij} P_{k/ij} = P_k \quad (6)$$

식 (5)는 h_{ij} 와 선로 제약에 의해 선로 ij에 흐르지 못하는 조류의 곱 ($Z_{ij}^{\max} - Z_{ij}^0$)이 선로 ij의 혼잡 비용이 됨을 보여준다. 식 (6)을 이용하여 각 혼잡 선로에 배분된 비용의 합이 전체 혼잡 비용과 같음을 식 (7)에서와 같이 쉽게 보일 수 있다. 이와 같이 h_{ij} 를 사용하여 전체 혼잡 비용을 혼잡 선로에 배분할 수 있다. 그러나 만일 선로에 연속 혼잡이 발생한다면 앞의 방식은 문제를 야기한다. 그 이유를 설명하기 위해 그림 1과 같은 6모선 계통을 생각한다. 계통의 데이터는 다음과 같다.

●발전 비용(1000won)

$$C_1(P_1) = 0.1P_1^2 + P_1 \quad C_3(P_3) = 0.12P_3^2 + P_3$$

$$C_5(P_5) = 0.14P_5^2 + P_5$$

P_i : 모선 i에서의 발전 출력

●선로 리액턴스

$X_{34} = 3, X_{16} = 2$, 기타 1

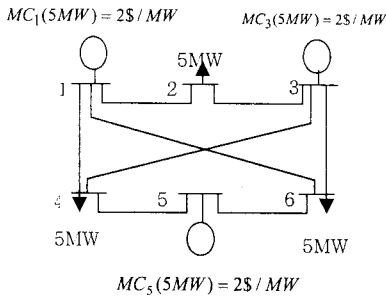


그림 1 예제 계통

표 1 계약 조건

계약	계약량 (MW)
1-2	5
3-6	5
4-5	5

이 계약에 의해 각 발전자는 5MW를 발전하며 이 때의 한계 비용은 2000won/MW가 된다.

표 2 선로 용량

선로	용량(MW)
1-2	1
4-5	3
others	∞

먼저 선로 용량을 고려하지 않고 계약에 의한 선로 조류를 구하기 위해 다음의 식을 이용한다.

$$\theta = [B_{ij}]^{-1}P \quad (7)$$

$$B_{ij} = 1/X_{ij} \quad (X_{ij}: \text{선로 리액턴스})$$

여기서 P는 부하와 발전기 출력의 벡터이며 θ 는 위상각이다. 식 (7)로부터 위상각이 구해지며 식 (8)를 이용하여 선로 조류를 구할 수 있다.

$$Z_{ij} = \frac{1}{X_{ij}} (\theta_i - \theta_j) \quad (8)$$

표 3 선로 용량을 고려 하지 않은 조류

선로	선로 조류(MW)	선로	선로 조류(MW)
1-2	2.4194	3-4	0.6452
1-4	1.7742	3-6	1.7742
1-6	0.8062	4-5	-2.5807
2-3	-2.5806	4-6	2.4174

선로 1-4의 최대 용량은 1MW이므로 선로 1-4에는 계약에 의해 혼잡이 발생한다. 그러므로 이 혼잡을 제거하기 위해서는 발전기 출력이 변하여 선로의 조류를 변화시켜 주어야 한다. 이 문제를 해결했을 때 발전기의 출력과 선로 조류는 다음과 같다.

표 4 선로 용량을 발전기 출력

발전기	case A	case B
1	3.3250	2.7
3	5.3529	6.9
5	6.3211	5.4

표 5 선로 용량을 고려한 조류

선로	case A	case B
1-2	1.9934	1.5
1-4	1	1
1-6	0.3316	0.2
2-3	-3.0066	-3.5
3-4	0.6710	1
3-6	1.6763	2.4
4-5	-3.329	-3
5-6	2.9921	2.4

case A: 선로 1-4의 용량만 고려한 경우

case B: 선로 1-4와 4-5의 용량을 동시에 고려한 경우

선로 4-5의 용량은 3MW이므로 계약에 의해 선로 4-5에는 혼잡이 발생하지 않는다. 그러나 선로 1-4에 혼잡이 발생하여 이를 해결하기 위해 발전기 출력을 조정하면 case A가 보여주는 것처럼 선로 4-5에 혼잡이 발생한다. 이와 같이 어떤 혼잡 선로에 의해 다른 선로에 혼잡이 발생하는 경우를 연속 혼잡이라고 정의한다. 선로 1-4와 4-5의 용량을 동시에 고려하면 발전기 출력과 선로 조류는 표 4와 5의 case B와 같이 계산된다.

이제 RLM을 이용하여 혼잡 선로에 혼잡 비용을 배분해보면 다음과 같다.

●혼잡 비용

$$\sum_i C_i(P_i) \cdot (P_i - P^0) = 1.54 \times (2.7 - 5) + 2.456 \times (6.9 - 5) + 2.112 \times (5.4 - 5) = 1.969$$

●RLM

$$h_{14} = -4.0080 \quad h_{45} = -2.7036$$

●혼잡 선로에 배분된 비용

$C_{14} = h_{14}(1 - 1.7742) = 3.102$ (C_{14} 는 혼잡 선로 1-4에 배분된 비용)

$C_{45} = h_{45}(3 - 2.5807) = -1.133$ (C_{45} 는 혼잡 선로 4-5에 배분된 비용)

위의 결과에 의하면 혼잡 선로 1-4에 할당된 비용은 양의 값을 가지나 혼잡 선로 4-5에 할당된 값은 음의 비용을 갖는다. 즉 선로 1-4는 혼잡 비용을 지불해야 하지만 선로 4-5는 혼잡이 발생하면 이익을 보게 된다. 이 결과는 혼잡 비용을 혼잡이 발생한 선로가 적절하게 나누어 지불해야 한다는 일반적인 관념에 어긋나게 된다.

이렇게 음의 비용이 발생하는 이유를 살펴보기 위해 C_{14} 와 C_{45} 를 비교해 보자. 먼저 h_{ij} 는 송전 용량으로 혼잡 비용을 편분하여 구한 형태인데 송전 용량이 늘어나면 혼잡이 줄게 되므로 혼잡 비용은 감소한다. 그러므로 h_{ij} 는 음의 부호를 갖는다. 그리고 $Z_{ij}^{\max} - Z_{ij}$ 는 선로의 최대 용량에서 선로의 조류를 뺀 값으로 혼잡이 발생하려면 $Z_{ij}^{\max} \leq Z_{ij}$ 이어야 하므로 일반적으로 음의 부호를 가져야 함을 알 수 있다. 그러나 C_{45} 를 분석해 보면 h_{45} 는 음이나 $Z_{45}^{\max} - Z_{45}$ 는 양의 값을 갖는다. 이로 인해 혼잡 선로 4-5는 비용을 지불하는 것이 아니고 받게 되는 일이 발생한다.

2.2 다단계 방법

앞 절에서 연속 혼잡이 발생하는 경우의 문제점을 설명하였고 이제 이 문제를 해결하기 위한 다단계 방법을 제시하고자 한다.

먼저 시장 참여자의 계약만을 고려하여 급전하며 선로의 용량을 고려하지 않는 단계를 0단계라 부른다. 이 0단계에서 선로에 혼잡이 발생하면 이 선로의 용량이 계약 조건에 더해지며 이 계약 조건을 고려하여 재급전하는 단계를 1단계라 부른다. 1단계에서 생긴 혼잡 비용을 혼잡 선로에 대한 RLM을 이용하여 혼잡선로에 배분한다. 1단계에서 다시 새로운 혼잡 선로가 발생하면 이 새로운 혼잡 선로를 새로이 계약 조건에 추가하여 재급전하며 이를 2단계라 부른다. 2단계에서 새롭게 추가적으로 발생한 혼잡 비용을 새로운 혼잡 선로에 배분한다. 이렇게 단계를 높여가며 더 이상 새로운 혼잡 선로가 생기지 않을 때까지 반복한다. 이제 앞의 예제에 이 다단계 방법을 적용하면 다음과 같다.

0단계에서 선로 1-4에 혼잡이 발생하므로 선로 1-4의 용량을 제약 조건으로 고려하는 1단계로 넘어간다. 1단계에서 선로 1-4의 RLM과 혼잡 비용은 다음과 같다.

●1단계에서의 선로 1-4의 RLM

$$h_{14}^1 = -1.3948$$

●1단계에서 선로 1-4에 배분된 혼잡 비용

$$h_{14}^1 \cdot (Z_{14}^{\max} - Z_{14}^0) = -1.3948 \cdot (1 - 1.7742) = 1.0798$$

2단계에서 새로이 혼잡이 발생한 선로 4-5의 RLM과 선로 4-5에 배분된 혼잡 비용은 다음과 같다.

●2단계에서의 선로 4-5의 RLM

$$h_{45}^2 = -2.7036$$

●2단계에서 선로 4-5에 배분된 혼잡 비용

$$h_{45}^2 \cdot (Z_{45}^{\max} - Z_{45}^1) = -2.7036 \cdot (3 - 3.329) = 0.889$$

여기서 Z_{45}^1 은 1단계에서 재급전 후 선로 4-5에 흐르는 조류이다.

위의 예에서 혼잡 선로에 배분된 모든 혼잡 비용은 양이며 $h_{14}^1 \cdot (Z_{14}^{\max} - Z_{14}^0)$ 와 $h_{45}^2 \cdot (Z_{45}^{\max} - Z_{45}^1)$ 의 합은 전체 혼잡 비용이 됨을 알 수 있다.

2.3 혼잡 비용의 재분배

앞절에서 다단계 방법을 이용하여 혼잡 비용을 혼잡 선로에 배분하는 방식에 대해 설명하였다. 그러나 혼잡 비용을 공정하게 분배하기 위해서는 혼잡 비용을 재분배하는 과정이 필요하다.

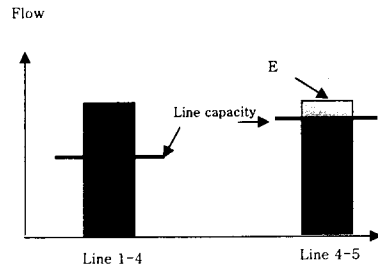


그림 2 선로 용량과 조류

그림 2은 선로 1-4와 선로 4-5에서의 조류를 보여준다. 계약에 의해 선로 1-4에 흐르는 조류는 A+B이며 선로 4-5에 흐르는 조류는 C이다. 이때 선로 4-5에서는 선로 용량을 넘는 A에 의해 선로에 혼잡이 유발된다. 이제 혼잡을 해소하기 위해 발전기의 출력을 적절히 조정하여 선로 1-4의 조류를 B까지 줄이면 이에 의해 선로 4-5의 조류는 C에서 C+D+E로 증가하게 된다. 이에 의해 선로 4-5에는 E만큼의 과조류(overflow)가 생기며 이로 인해 선로 4-5에도 혼잡이 야기된다. 선로 4-5에서는 계약에 의해 흘렸던 조류는 C뿐이며 D+E는 선로 1-4의 혼잡에 의해 발생한 조류이므로 실제 선로 4-5에 분배되어야 하는 혼잡 비용은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C_{45}^R = C_{45} \times \frac{C}{C+D+E} = 0.889 \times \frac{2.5807}{3.329} = 0.689$$

여기서 C_{45}^R 은 선로 4-5에 재분배된 혼잡 비용이다.

재분배된 혼잡 비용은 다음과 같이 표 6에 나타난다.

표 6 혼잡 비용의 재분배

혼잡 비용	선로 1-4	선로 4-5
재분배 전	1.0798	0.889
재분배 후	1.2798	0.669

2.4 혼잡 비용의 선로 이용자에게의 배분

앞에서는 혼잡 비용을 혼잡 선로에 부담하는 방식을 설명하였다. 그러나 실제로 혼잡 비용은 선로의 이용자가 부담해야 하므로 선로에 분배된 혼잡 비용을 선로의 이용자에게 부담하는 방식이 필요하다.

직류 조류를 이용하면 각 계약에 의해 선로에 흐르는 조류가 쉽게 구해지며 이를 이용하여 선로의 이용자에게 비용을 배분할 수 있다. 이때 혼잡 비용을 전력의 판매자와 구매자가 어떻게 배분하여 분담하는 가 본 연구의 관심이 아니며 정책적인 사항이라 생각된다. 본 연구에서는 혼잡 비용을 전력의 구매자가 부담한다고 가정하여 앞의 예에 적용시켜 보겠다. 직류 조류를 이용하여 계약에 의해 혼잡 선로에 흐르는 조류를 구해보면 다음과 같다.

표 7 계약에 의한 선로 조류

계약	선로 1-4	선로 4-5
1-2	0.1075	0.7527
3-6	0.9140	-3.6022
4-5	0.7527	0.2688
합	1.7742	-2.5807

표 6의 혼잡 선로에 재분배한 혼잡 비용을 이용하여 모선 2의 전력의 구매자가 지불하는 혼잡 비용을 계산하면 다음과 같다.

$$1.2708 \times \frac{0.1075}{1.7742} + 0.689 \times \frac{-0.7527}{-2.5807} = -0.1234$$

이와 유사한 방식으로 모든 전력의 구매자에게 배분된 비용을 구하면 다음과 같다.

표 8 수용가에게 배분된 비용

수용가	2	4	6	합
비용	-0.1234	1.6210	0.4712	1.9688

모선 2의 수용가는 전력의 계약에 의해 선로 4-5의 혼잡을 해소시켜 주는 역할을 하므로 음의 혼잡 비용을 지불하게 된다. 그리고 모선 4의 수용가는 혼잡 선로 1-4와 4-5에 가장 큰 영향을 주므로 가장 많은 혼잡 비용이 배분되었음을 알 수 있다.

2.5 정식화

이제 본 연구에서 제안하는 방식을 다음과 같이 정식화할 수 있다.

<용어의 정의>

0 단계: 계약에 따라 제약 조건 없이 최적화 하는 단계

k 단계: 계약 조건 $\Phi(k)$ 를 고려하여 최적화 하는 단계

n: 더 이상 새로운 혼잡이 발생하지 않는 단계

$\phi(k)$: k 단계에서 새롭게 혼잡이 발생한 선로

$\Phi(k)$: 0 단계에서 k 단계까지의 모든 혼잡 선로,
 $\Phi(k) = \Phi(k-1) + \phi(k)$

Z_i^k : k 단계에서 선로 i에 흐르는 조류

T_i^{\max} : 선로 i의 최대 용량

h_i^j : j 단계에서 (단 $i \in \phi(j)$) 선로 i의 RLM

β_i^j : (단 $i \in \phi(k)$ 라면 $j \in \phi(k+1)$) k+1 단계에서 선로 i에 흐르는 조류 중 k 단계의 선로 i의 혼잡에 의한 조류의 비율 =

$$\frac{\partial Z_i / \partial T_i^{\max} \cdot (\partial T_i^{\max} - Z_i^k)}{Z_i^{k+1}}$$

β_i^j ($j \in \phi(k)$): k 단계에서 선로 j에 흐르는 조류 중 계약에 의한 조류의 비율 = Z_i^0 / Z_i^k

D_i^k : 계약의 의해 선로 i에 흐르는 조류 중 모선 k의 부하에 의한 조류의 비율

$Con(i)$: 혼잡 선로 i에 배분된 비용

$LoadCon(k)$: 부하 k에 배분된 비용

혼잡선로 $i(i \in \phi(k))$ 에 배분되는 비용은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} con(i) = & \beta_i^i h_i^k (T_i^{\max} - Z_i^k) \\ & + \sum_{a(k+1) \in \phi(k+1)} \beta_i^i \cdot \beta_i^{a(k+1)} \cdot h_{a(k+1)}^{k+1} (T_{a(k+1)}^{\max} - Z_{a(k+1)}^{k+1}) \\ & + \dots + \sum_{a(n-1) \in \phi(n-1)} \dots \sum_{a(k+1) \in \phi(k+1)} \beta_i^i \cdot \beta_i^{a(k+1)} \cdot \beta_{a(k+1)}^{a(k+2)} \\ & \cdot h_{a(n-1)}^{n-1} (T_{a(n-1)}^{\max} - Z_{a(n-1)}^{n-1}) \end{aligned}$$

부하 k에 배분되는 비용은 다음과 같다.

$$LoadCon(k) = \sum_{i \in \phi(n)} con(i) \cdot D_i^k$$

3. 결 론

본 연구에서는 다단계 방법을 이용하여 혼잡 비용을 혼잡 선로에 배분하는 방식을 제안하였다. 이 방법은 수정된 라그랑지 승수(RLM)을 이용하였고 혼잡을 단계별로 처리하였다. 이 방법은 계통에 연속 혼잡이 발생하더라도 참여자에게 비용을 공평하게 배분할 수 있음을 보였다.

(참 고 문 헌)

- [1] W.W. Hogan, Contract Networks for Electricity Power Transmission, Journal of Regulatory Economics, Vol. 4, pp. 211-242, 1992.
- [2] A.J. Wood and B.F. Wollenberg, Power Generation, Operation and Control, John Wiley and Sons, New York 1984.
- [3] H. Singh, S. Hao and A. Papalexopoulos, Transmission Congestion Management in Competitive Electricity Markets, IEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 2, May 1998.
- [4] T.W. Gedra, On transmission Congestion and Pricing, IEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 1, February 1999.