

송전혼잡하에서 한계비용 민감도를 이용한 새로운 계통 분할 기법

장 시 진      정 해 성      박 중 근  
 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부

A New Network Partition Technique using Marginal Cost Sensitivity Under Transmission Congestion

Si-Jin Jang      Hae-Seong Jeong      Jong-Keun Park  
 School of Electrical and Computer engineering, Seoul National University

**Abstract** - Network congestion is important problem that must be managed for active power contracts in deregulated power industry. Existing network partition technique is based on statistical method don't suggest clear network partition criterion. So in this paper we proposed a new network partition technique using the marginal cost sensitivity to fairly allocate congestion cost to network user.

1. 서    론

전력수송은 송전망을 통하여 이루어지며 송전망은 선로의 열용량 또는 안정도 등의 다른 요인에 의해서 수송의 한계에 봉착할 수 있다. 즉 어떤 전력 거래로 인하여 특정 송전선로를 통하여 전달되는 전력이 송전선로의 공급 능력 한계를 벗어나게 될 때 혼잡이 발생하며, 이러한 경우에는 원활한 전력거래 자체가 어렵게 된다. 또한 혼잡으로 인하여 각 부하모선에서의 한계비용은 급격히 증가하게 되며, 이렇게 증가한 한계비용은 전력사용자에게 미치는 영향이 크게 된다. 따라서 경쟁적인 환경에서는 전력사용자들의 불만을 최소화 하며 혼잡비용을 할당하여 혼잡을 처리하는 것이 매우 중요한 쟁점이 되고 있다.

혼잡처리에는 실제 시스템 제어에 관한 물리적인 측면과 혼잡비용의 최적 할당으로 인한 경제적인 측면의 두 가지가 병행이 된다. 여기서는 경쟁적인 전력산업에서 거래에 의해 혼잡이 발생한 경우를 상정하였으므로 후자인 경제적인 측면에 관하여 논하고자 한다. 기존에 제시되어 많은 연구가 되고 있으며, 현재 실제 사용되고 있는 혼잡비용 할당에 관한 방법으로는 혼잡비용을 모든사용자에게 똑같이 배분하는 방법과 혼잡의 원인을 제공한 사용자에게 더욱 많은 혼잡비용을 부과하는 *Nodal Pricing*와 *Zonal Pricing*이 있다. *Nodal Pricing*은 계통 운영에 있어서 효과적인 *price signal*을 제공하여 주지만 전력계통 자체가 대규모 시스템이기 때문에 많은 정보와 계산량에 따르는 시간과 복잡성이 요구된다. 이에 여러개의 모선들을 설정된 *criterion*에 의해 *zone*으로 형성하고, 설정된 *zone*을 하나의 모선처럼 축약하여 계산의 효율성과 신속성을 보장하는 *Zonal Pricing*이 더욱 설득력있게 받아들여지며 행해지고 있다. 그러나 기존의 방법에서 전체 계통을 *subnetwork*인 *zone*으로 분할 시에 그 기준은 계통 운영자가 설정한 한계내의 한계비용을 갖는 모선들을 *zone*으로 형성하는 통계적인 방법이었다. 이는 각 모선간의 전기적인 상관관계에 의한 시스템 특성이 결여되어 있어서 *zone*의 분할 경제치 값을 갖는 모선들에게는 잘못된 *zone*으로 설정되어 손해를 보게 되는 경우가 발생하였다. 따라서 본 논문에서는 모선간의 전기적 상관관계를 알 수 있는 한계비용 민감도라는 개념을 도입하여 새로운 계통분할 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 통하여 계통을 몇 개의 *zone*으로 나눌것인지는 임의적인 것이 아니라 계통의 토폴로지

에 의해 명확히 정해지는 것임을 보였다.

2. 본    론

2.1 한계비용

본 논문에서는 한계비용을 각 부하의 함수로 나타내었으며, 이를 각 부하에 대해서 편미분한 한계비용 민감도를 도입하여 각 부하간의 전기적 상관관계에 의한 토폴로지를 분석하였다.

2.1.1 한계비용의 정의와 구성

모선  $l$ 에서의 한계비용은 모선  $l$ 에서 부하의 변화에 대한 각 발전기의 출력의 변화량으로 정의되며 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_l = \frac{\partial(\sum C_g(P_g))}{\partial P_l} = \sum C_g(P_g) \left( \frac{\partial P_g}{\partial P_l} \right) \quad (1)$$

손실이 없는 *DC Load Flow*를 가정하면 다음식이 성립한다.

$$\sum P_g = \sum P_l \quad (2)$$

식(2)로부터 다음식이 유도된다.

$$\sum \frac{\Delta P_g}{\Delta P_l} = \sum \frac{\partial P_g}{\partial P_l} = 1 \quad (3)$$

식(3)에서 임의의 부하가 변화할 때, 각 발전기의 출력의 변화량의 합은 부하의 변화량의 합과 같으며, 이로부터 모선의 한계비용이 각 발전기의 한계비용의 가중 평균이라는 것을 알 수 있다.

2.2 송전망 혼잡해석

혼잡으로 인해 전체 시스템에 유기되는 영향은 심각하면서도 많은 문제들이 있다. 본 논문에서는 혼잡발생 원인 제공자에게 *price signal*을 통해 더욱 많은 혼잡요금을 부과하므로써 공평한 요금할당을 하며, 아울러 사용자 스스로의 부하 조절을 유도하여 혼잡을 해결하는 효과를 극대화 하고자 한다. 따라서 계통의 모선간의 전기전적 상관관계를 이용한 새로운 계통분할 알고리즘을 제안한다. 알고리즘을 명확하고 간단하게 전달하기 위하여 다음의 몇가지 가정을 한다.

- (1) *DC Load Flow*를 이용한다.
- (2) 발전기의 운전제약을 고려하지 않는다.
- (3) 발전비용의 최소화를 목적함수로 한다.
- (4) 기준모선은 1번 모선으로 한다.

2.2.1 혼잡문제의 정식화

계통에서 혼잡이 발생할 경우 가정에서와 같이 발전비용의 최소화를 목적함수로 하며 각 부하모선에서의 필요 전력량과 각선로의 제약을 각각 등식제약과 부등식 제약

으로 두어 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum C(P) \\ \text{s.t.} \quad & h(P) = d \\ & g(P) \leq c \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$C(P) = \alpha P^2 + \beta P + \gamma$ : 발전기의 비용함수는 일반적으로 발전량의 2차함수로 나타낼 수 있으며  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 발전기 비례 상수 값이다.

$h(P) = d$ : 각 모선에서의 필요로 하는 부하량의 관계를 나타내며 따라서  $d$ 는 벡터값이다.

$g(P) \leq c$ : 선로제약을 나타내며  $c$ 는 선로에서의 제약값이며 벡터값이다.

정형화한 최적화 문제를 풀기위해서 식(4)를 Lagrange Equation으로 나타내면 다음과 같다.

$$L = \sum_g C_g(P_g) - \sum_l \lambda_l (h_l(P_l) - d_l) - \sum_c \mu_c (g_c(P_c) - c_c) \quad (5)$$

$\lambda_l$ : 부하모선  $l$ 에서 등식제약조건에 관련된 Lagrange Multiplier

$\mu_c$ : 선로  $c$ 에서의 제약과 관련된 Lagrange Multiplier  
 식(4)를 DC Flow를 이용하여 나타내면 각 모선의 위상각의 함수로 바꾸어 나타낼 수 있으므로 식(5)도 각 모선의 위상각의 함수로 나타내어진다. 따라서 Lagrange Equation의 최적화 값을 구하기 위해서 각 변수,  $\theta, \lambda, \mu$ 에 대한 편미분을 하면 다음의 형태가 된다.

$$\begin{aligned} \partial L / \partial \theta &= 0 \\ \partial L / \partial \lambda &\Rightarrow AX = B \Rightarrow \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \lambda \\ \mu \end{bmatrix} = B \\ \partial L / \partial \mu &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$A_{11}$ : 발전기 비용과 reactance의 곱으로 구성

$A_{12} = -A_{21}^T$ : 제약조건으로 구성

$A_{22} = 0$

### 2.3 부하의 변화에 대한 영향분석 및 계통 분할

부하의 변화가 발전기 모선 및 부하모선에 어떤 영향을 미치는지 분석하기 위하여 먼저 식(6)에서 B column vector 중 부하부분을 미소 증가시켜 각 변수의 변화량을 구한다. 먼저 임의의 부하 모선에서 부하량이 미소 증가할 경우 전체 변수의 변화량은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \lambda \\ \Delta \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta P_L \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \Delta \theta / \Delta P_L \\ \Delta \lambda / \Delta P_L \\ \Delta \mu / \Delta P_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Lambda \\ \Lambda \end{bmatrix} \quad (7)$$

식(7)과 같은 방법으로 전체 부하모선 각각의 부하량의 미소 증가시 변화량은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_l / \Delta P_L & \Lambda & \Delta \theta_l / \Delta P_L \\ M & O & M \\ \Delta \theta_l / \Delta P_L & \Lambda & \Delta \theta_l / \Delta P_L \\ \Delta \lambda_l / \Delta P_L & \Lambda & \Delta \lambda_l / \Delta P_L \\ M & O & M \\ \Delta \lambda_l / \Delta P_L & \Lambda & \Delta \lambda_l / \Delta P_L \\ M & O & M \\ \Delta \lambda_l / \Delta P_L & \Lambda & \Delta \lambda_l / \Delta P_L \\ \Delta \mu_c / \Delta P_L & \Lambda & \Delta \mu_c / \Delta P_L \\ M & O & M \\ \Delta \mu_c / \Delta P_L & \Lambda & \Delta \mu_c / \Delta P_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \ \Lambda \ 0 \\ M \ O \ M \\ 0 \ \Lambda \ 0 \\ 1 \ \Lambda \ 0 \\ M \ 1 \ M \\ 0 \ \Lambda \ 1 \\ 0 \ \Lambda \ 0 \\ M \ O \ M \\ 0 \ \Lambda \ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

#### 2.3.1 부하의 변화에 대한 발전기 모선의 한계비용 민감도

DC Load Flow를 나타낸 발전기의 출력과 위상각 사이의 관계식을 이용하여 부하의 변화에 대한 발전기 출력의 변화량은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta P_g}{\Delta P_L} = \sum_j \frac{1}{X_{jg}} \left( \frac{\Delta \theta_j}{\Delta P_L} - \frac{\Delta \theta_g}{\Delta P_L} \right) \quad (9)$$

발전기 모선의 한계비용은 발전비용 함수를 미분하여 구할 수 있다.

$$\lambda_g = C'(P_g) = 2\alpha P_g + \beta \quad (10)$$

DC Load Flow를 이용하여 발전기 모선  $g$ 에서의 출력  $P_g$ 를 부하의 함수로 나타낼 수 있으며 이를 식(10)에 대입하여 발전기 모선에서의 한계비용을 부하의 함수로 나타낼 수 있다. 부하의 함수로 나타내어진 발전기 모선의 한계비용을 변수인 부하로 편미분 하면 발전기 모선의 한계비용 민감도를 구할 수 있다. 이 값을 분석하여 부하모선과 발전기 모선간의 전기적 상관관계를 알 수 있다.

#### 2.3.2 부하의 변화에 대한 부하 모선의 한계비용 민감도

부하모선에서의 한계비용도 역시 부하의 함수로 나타낼 수 있으며 식(8)을 이용하여 나타낼 수 있다. 이렇게 구하여진 부하모선의 한계비용을 각 부하에 대해서 편미분 하면 부하모선에서의 한계비용 민감도를 구할 수 있다. 또한 이같은 한계비용 함수를 먼저 구할 필요없이 식(8)에서 구해진 값을 바로 써도 된다.

#### 2.3.3 한계비용 민감도를 이용한 계통 분할

한계비용 민감도를 통해 각 부하를 변화시켰을 경우, 관심있는 모선에서의 한계비용의 변화량을 알 수 있으므로, 같은 패턴의 민감도를 가진 모선들을 같은 zone으로 구분하고 다른 패턴을 가진 모선들과 분리한다. 이 방법을 통해서 어떤 모선들을 같은 zone으로 구분할 것인지, 몇개의 zone으로 나눌것인지가 시스템의 특성을 반영하여 명확하게 정해지게 된다. 다음 절에서 사례연구를 통하여 제안된 방법을 적용해 보았다.

### 2.4 사례연구

IEEE 39모선 시스템인 New England지역의 345kV 송전시스템을 대상 계통으로하여 제안된 방법을 적용하여 보았다. 송전계약이 없을 경우 모든 모선에서의 한계비용은 같지만 혼잡이 발생하면 모두 달라지게 된다. 여기서는 모선 4와 모선 14간의 선로에 전송될 수 있는 전력을 최대 70MW로 제약하였다. 비계약하에서 DC Load Flow를 이용하여 선로를 통해 전송되는 전력을 구해보면 123.3256MW이므로 혼잡이 발생했음을 알 수 있다.

선로 4-14에 혼잡이 발생했을 경우 각 모선에서의 한계 비용 민감도를 구하여 그래프로 나타내었다.

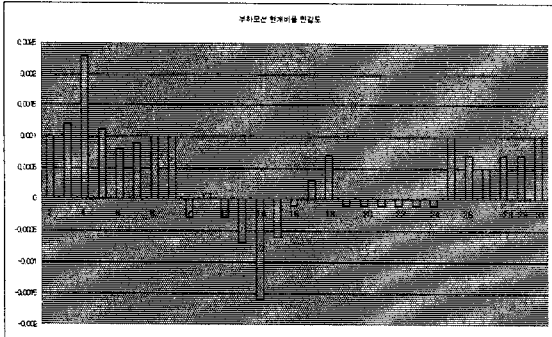


그림 1. 부하모선 2에서 부하량  $P_2$ 의 변화에 따른 각 부하모선에서의 한계비용의 변화량(한계비용 민감도)

한계비용 민감도를 구한 결과 부하의 변화에 따라서 전기적 상관관계가 큰 모선끼리는 같은 패턴을 보였다. 위 그림은  $P_2$ 가 미소변화할 때의 한계비용 민감도를 나타낸 것인데, 어떤 모선은 한계비용이 증가를 하는 반면, 감소하는 모선들도 보인다. 상관관계가 큰 모선끼리는 변화를 시켰을 때 역시 전체적으로 같은 패턴을 보이는 반면 상관관계가 적은 모선은 전혀 다른 패턴의 민감도 패턴을 가지게 된다. 한계비용이 증가하는 모선과 감소하는 모선의 경계치 값을 갖는 모선 중 모선 9에서의 부하량을 변화시켰을 때는 그림 1과 같은 패턴의 한계 비용 민감도를 가지나, 모선 10의 부하량을 변화시키면 전혀 다른 패턴의 한계비용 민감도를 나타낸다. 따라서 비슷한 패턴을 가진 모선을 부하모선을 기준으로하여 같은 zone으로 구분하여 다음과 같이 계통분할 하였다.

표 1. 한계비용 민감도 분석을 하여 부하모선을 기준으로 전체 계통을 zone으로 분할한 결과

	모 선
zone 1	2-9, 25, 31
zone 2	10-16, 19-24
zone 3	18, 26, 28, 29
zone 4	17, 27

제안된 방법을 이용하면 각 모선간의 전기적 상관관계를 해석 할 수 있으며 몇 개의 그룹으로 특징지어진다. 따라서 몇 개의 zone으로 나눌것인지는 시스템의 토폴로지 자체가 결정하는 것임을 알 수 있으며, zone간의 경계를 명확하게 결정지을 수 있다. 위에서 분할한 모의계통을 그림으로 나타내었다.

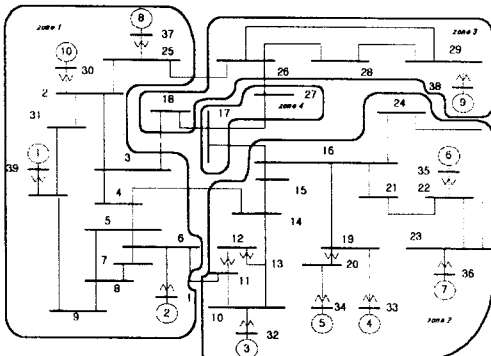


그림 2. IEEE 39모선 시스템을 한계비용 민감도를 이용하여 개의 zone으로 분할한 결과

### 3. 결 론

본 논문에서는 혼잡으로 인해 초래된 비용을 적절하게 배분하기 위해서 계산의 시간적 효율과 신속성을 가지는 Zonal pricing을 위한 계통분할에 초점을 맞추었다. Zonal pricing을 통해 망 사용자들에게 더욱 공평하고 효과적인 price signal을 제공하기 위해서는 전체 계통의 subnetwork로의 적절한 분할이 요구되며 따라서 분할을 위한 criterion이 주요 쟁점이 된다. 본 논문에서는 기존의 통계적 방법에 의한 분할로 인해 파생되는 문제점들을 개선하여 한계비용 민감도라는 개념을 도입하여 IEEE39모선계통을 4개의 zone으로 나누었다. 한계 비용 민감도를 이용한 분할은 각 모선간의 전기적 특성을 잘 반영하며 몇 개의 zone으로 나눌것인지, 어떻게 나눌것인지에 대한 명확한 기준을 제시해 주었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] 기초전력공학공동연구소, "A study on procurement of ancillary service and power system operation mechanism in transmission congestion for the power pool/wheeling model," 한국전력공사 계통운영처 과제, pp. 237~239, 2000
- [2] Recharad D.Christie, Bruce F. Wollenberg, Ivar Wangensteen, "Transmission Management In the Deregulated Environment," *Proceeding of the IEEE*, Vol.88, No.2, February 2000
- [3] Mette Bjørndal, Kurt Jørnsten, "Zonal Pricing in a Deregulated Electricity Market," *The Norwegian School of Economics and Business Administration discussion paper*, 1999
- [4] 장시진, 정해성, 박종근, "송전제약하에서 DC Load Flow를 한 한계비용의 분석과 계통의 분할에 관한 연구," *대한전기학회 하계학술대회 논문집*, A권, 2000
- [5] Allen J.Wood, Bruce F.Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control," *John Wiley & Sons, Inc.*, pp58-72
- [6] Pierre Hansen, Brigitte Jaumard, "Cluster analysis and mathematical programming," *The Mathematical Programming Society, Inc*, 1999
- [7] Chien-Ning Yu, Marija D. Ilić, "Congestion Clusters-Based Markets for Transmission Management," *IEEE*, 1998