

송전 혼잡하에서 한계비용 민감도를 이용한 계통분할

김 성필 맹 근호 정 해성 박 종근
 서울대학교 전기공학부

A Network partition Technique Using Marginal Cost Sensitivity Under Transmission Congestion

Sung-Pil Kim Keun-Ho Mang Hae-Seong Jeong Jong-Keun Park
 School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - 본 논문에서는 경쟁적 전력시장에서 송전 제약에 관한 비용을 모션에서 한계비용 민감도를 이용해서 분할하는 방법을 제시하였다. 구조개편된 전력시장에서는 단순하면서도 분명한 전력 요금 시스템이 요구된다. Zonal pricing은 이런 면에서 좋은 pricing 시스템이다. 하지만, zone을 효과적으로 나누는 것은 상당히 어렵다. 기존의 방법에서는 오직 부하만을 고려하여 분류를 하였지만, 에너지 시장에서의 전력의 매매행위를 고려할 때, 시스템 내부의 모든 사업자에 대한 고려가 필요하다. 그래서, 본 논문에서는 한계비용 민감도를 이용해서 모든 에너지 시장 참여자를 고려하여, 네트워크를 분할하였다. 모든 노드에서의 민감도의 패턴이 분석되었고 동일한 패턴을 가진 노드들을 같은 zone으로 분류하였다. 6-모션 전력시스템을 이용해서 제안한 방법을 설명하였다.

안 중에서 효과적인 혼잡비용의 배분방법인 zonal pricing에 중점을 두고 있으며, 일정기준에 의해 몇 개의 모션을 같은 zone으로 형성하여 하나의 모션처럼 계산하는 zonal pricing은 계산의 신속성과 효과적인 price signal을 제공해 주어서 많은 나라에서 사용되고 있다. 그러나, zonal pricing에서는 zonal boundary의 결정에 합리성과 투명성이 요구된다. 기존의 방법에서는 시스템의 운영자가 정한 기준에 의해 설정 범위 내의 한계비용을 갖는 모션들을 같은 zone으로 형성하는 통계적인 방법에 의하였다. 이 방법은 시스템 운영자의 임의성이 반영되는 모호한 알고리즘이라는 단점을 가지고 있어서, 본 논문에서는 보다 분명한 기준으로서 한계비용민감도를 사용해서 각 모션들간의 전기적 상관관계를 분석하고, 이를 바탕으로 zonal boundary를 결정하는 방법을 제시하고자 한다.

1. 서 론

2. 본 론

규모의 경제성에 기인하여 독점사업으로 인정되던 전력 산업이 기술 발달로 인해서 규모의 경제가 소멸함에 따라 전력시장이 개방되고, 구조개편이 이루어지면서 과거 전력산업의 패러다임이 바뀌고 있다. 규제 완화된 경쟁적 전력산업 환경 하에서는 기존의 자연 독점 성격이 있는 송전, 계통운영, 배전 등을 제외하고, 발전과 공급 부문에 경쟁이 도입되고 있으며, 우리나라도 현재 추진 중에 있다. 송전망의 제약으로 인해서 전력거래에 대한 신중한 관리가 전력산업 구조개편중에 중요한 임무가 되었다. 왜냐하면, 계약상의 합의된 사항과 실제 송전시스템의 전력흐름의 차이가 시스템을 불안정하게 만들기 때문이다. 전력거래로 인하여 특정 송전선로를 통하여 전달되는 전력이 송전선로의 공급능력을 벗어나게 되기도 하는데 이러한 경우 혼잡(Congestion)이 발생하였다고 한다.

2.1 모션 한계비용

모션에서의 전력은 식 (1)과 같이 발전기에 의해 공급되는 전력과 부하에 의해 추출되는 전력의 차로 나타낼 수 있다.

$$P_i = P_i^g - P_i^d \quad (1)$$

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

2.1.1 한계비용의 정의와 구성

모션 k에서의 한계비용은 모션 k의 부하 전력변화에 대한 발전기의 총비용의 변화량으로 정의되며 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_k = \frac{\partial(\sum C_i(P_i^g))}{\partial P_k^d} = \sum C_i(P_i^g) \left(\frac{\partial P_i^g}{\partial P_k^d} \right) \quad (2)$$

손실이 없는 DC load flow를 가정하면 다음 식이 성립한다.

$$\sum P_i^g = \sum P_i^d \quad (3)$$

식 (3)로부터 다음 식이 유도된다.

$$\sum \frac{\partial P_i^g}{\partial P_i^d} = \sum \frac{\partial P_i^g}{\partial P_i^d} = 1 \quad (4)$$

식 (4)에서 임의의 부하전력변화에 대하여, 각 발전기의 출력의 변화량의 합은 부하의 변화량의 합과 같으며, 이로부터 모션의 한계비용이 각 발전기의 한계비용의 가중평균이라는 것을 알 수 있다.

2.2 송전망 혼잡해석

혼잡으로 인해 전체 시스템에 유기되는 영향은 심각하

전력 수송은 송전망을 통하여 이루어지며, 선로의 열용량 또는 안정도 등의 다른 요인으로 인하여 그 한계를 가지고 있다. 송전망에 혼잡이 발생하면 그 선로를 통해서 더 이상의 전력을 전송할 수 없게 되며, 이러한 혼잡이 다른 거래에도 나쁜 영향을 미쳐, 최악의 경우 전력거래 자체가 불가능하게 될 수도 있다. 따라서 시스템의 안정도와 원활한 전력거래를 위해 혼잡처리는 매우 중요한 쟁점이 되고 있다. 경쟁적 전력시장에서 혼잡해소를 위한 방법은 다음과 같다. 첫째, 특정선로에 혼잡이 일어날 확률에 관한 정보와 장려금을 시스템 사용자에게 제공한다. 둘째, 전력거래를 줄인다. 그럼에도 불구하고 발생한 혼잡에 대한 처리 방법은 다음의 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째, 송전용량의 충분한 확보를 위해서 송전제통을 건설하는 것이다. 이 방법은 송전선로 건설 기간과 비용의 문제가 있고, 발전소 건설계획과 연동되어야 하며 송전계획도 연구되어야 한다. 둘째, 미래 시점이 아닌 현재 시점의 송전망에 대한 혼잡처리 방안이다.

본 논문에서는 현재시점의 송전망에 대한 혼잡처리 방

면서도 많은 문제들이 있다. 혼잡발생원인 제공자에게 더욱 많은 혼잡요금을 부과하므로써 공평한 요금할당을 한다. 이는 사용자 스스로의 부하조정을 유도하여 혼잡을 해결하는 효과를 내포하고 있다. 따라서 계통의 모선 간의 전기적 상관관계를 이용한 계통분할 알고리즘을 제안한다. 알고리즘을 명확하고 간단하게 전달하기 위하여 아래와 같이 몇 가지 가정을 한다.

- 1) DC load flow를 이용한다.
- 2) 발전기의 운전제약은 고려하지 않는다.
- 3) 발전비용의 최소화를 목적 함수로 한다
- 4) 기중모선은 1번 모선으로 한다.

2.2.1 혼잡문제의 정식화

계통에서 혼잡이 발생할 경우 가정에서와 같이 발전비용의 최소화를 목적함수로 하며 각 부하모선에서의 필요 전력량과 각 선로의 제약을 각각 등식제약과 부등식 제약으로 두어 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum C_i(P_i) \\ \text{s.t. } & \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \\ & \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{c} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$C_i(P_i) = \alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i$: 발전기 비용함수,

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$: 발전기 연료비 계수,

$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0$: 전력 조류방정식,

$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{c}$: 선로용량제약

$\mathbf{x} = [P_i^G, \theta, \lambda, \mu]$ 이다.

위 최적화 문제를 풀기 위해서 식 (5)를 Lagrange function 으로 나타내면 다음과 같다.

$$L = \sum C_i(P_i) - \lambda^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mu^T (\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{c}) \quad (6)$$

λ 는 각 모선에서의 등식제약 조건에 관련된 Lagrange Multiplier이며, μ 는 부등식 제약조건 즉, 선로 용량제약과 관련된 Lagrange Multiplier이다.

식 (5)에서 전력조류방정식은 DC Load Flow를 이용하면 각 모선의 위상각과 발전량의 함수로 표현할 수 있으므로, 이를 식 (6)에 적용하면 Lagrange function은 각 모선의 위상각과 발전량의 함수로 나타내어진다. 따라서, Lagrange function의 최적화 값을 구하기 위해서 각 변수에 대한 편미분(K.K.T condition)을 하면 다음의 형태가 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial P_i^G} &= 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \theta} &= 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \mu} &= 0 \end{aligned} \Rightarrow \mathbf{Ax} = \mathbf{B} \quad (7)$$

이를 행렬 형태로 정리하면,

$$\begin{bmatrix} 2\Gamma & \dots & 0 & \dots & -I & \dots & 0 & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & -B' & \dots \\ -I & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots \\ 0 & \dots & -B & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots \\ A^T & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i^G \\ \theta \\ \lambda \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ -P_L \\ \dots \\ P^{\max} \end{bmatrix} \quad (8)$$

위 식에서 Γ 는 발전기 비용함수의 2차항의 계수이며, β 는 발전기 비용함수의 1차항의 계수를 나타내며, A 는 제약에 걸린 선로의 변수에 대한 그래디언트이고, B 는 모선 1의 θ 에 대한 첫 번째 행이 소거된 Y_{bus} 행렬의 허수부분으로 구성된 행렬이다.

2.3 부하의 변화에 대한 영향분석

임의의 모선 i 에서 부하의 변화가 전체 모선에 어떤 영향을 미치는지 분석하기 위하여 식(9)에서는 식(7)의

열벡터 B 중 각 모선의 부하부분을 미소 증가시켜 각 발전기의 출력, 모선의 위상각, 한계비용, 그리고 송전제약에 대한 Lagrange 승수 μ 의 변화량을 나타내었다. 먼저 임의의 모선 i 에서 부하량이 미소 증가할 경우 전체 변수의 변화량은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i^G / \Delta P_i^L \\ \Delta \theta / \Delta P_i^L \\ \Delta \lambda_i^G / \Delta P_i^L \\ \Delta \lambda_i^L / \Delta P_i^L \\ \Delta \lambda_j^G / \Delta P_i^L \\ \Delta \lambda_j^L / \Delta P_i^L \\ \Delta \mu / \Delta P_i^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(9)을 이용해서 계통내 모든 모선의 부하 전력의 미소 변화시 한계비용의 변화를 고려하면 식(10)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i^G / \Delta P_i^L & \dots & \Delta P_i^G / \Delta P_i^L \\ \Delta \theta / \Delta P_i^L & \dots & \Delta \theta / \Delta P_i^L \\ \Delta \lambda_i^G / \Delta P_i^L & \dots & \Delta \lambda_i^G / \Delta P_i^L \\ \Delta \lambda_i^L / \Delta P_i^L & \dots & \lambda_i^L / \Delta P_i^L \\ \Delta \mu / \Delta P_i^L & \dots & \Delta \mu / \Delta P_i^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ I \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

계통내 모든 모선에서의 한계비용은 식 (8)를 이용하여 나타낼 수 있다. 이렇게 구하여진 각 모선의 한계비용을 모선의 부하전력에 대해서 편미분하면 식(10)에서 보여지듯이 각 모선에서의 한계비용민감도를 구할 수 있다. 하나의 zone은 한계비용민감도의 pattern이 동일한 모선들로 이루어진다.

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1 & (S_{ij} \geq S^{\max}) \\ \frac{S_{ij} - S^{\min}}{S^{\max} - S^{\min}} & (S^{\min} < S_{ij} < S^{\max}) \\ 0 & (S_{ij} \leq S^{\min}) \end{cases} \quad (11)$$

식 (11)을 이용해서 한계비용의 변화가 최대인 것을 S^{\max} 로 정하고, 그 변화가 가장 작은 것을 S^{\min} 으로 정해 그 변화의 정도를 스케일링했다.

2.4 사례연구

본 연구의 결과를 검증하기 위하여 시험계통으로 6모선 계통을 이용한다.

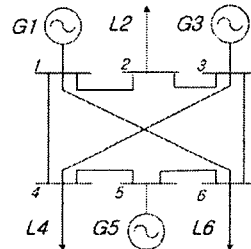


그림 1. 6모선 계통도

이 계통에 대한 발전기의 비용함수는 표 1과 같이 정리할 수 있다.

표 1. 6모선 계통의 발전기 비용함수 데이터

Bus	연료비 계수		
	α	β	γ
1	0.10	1.0	0
3	0.12	0.8	0
5	0.14	0.6	0

주) 발전기 비용함수 $F = \alpha_i (P_i^G)^2 + \beta_i P_i^G + \gamma_i$.

선로리액턴스는 $X_{34}=3pu$, $X_{16}=2pu$ 이고, 그 외 다른 선로는 $1pu$ 이다. 각 부하 모선에서 필요로 하는 전력은 $P_2=P_4=P_6=5MW$ 이다. 모선 1과 2를 연결하는 선로의 용량만이 제한되어 있으며($T_{12}=1.5MW$), 다른 선로는 충분한 전송능력을 가진 것으로 가정한다.

2.4.1 문제의 정식화

송전용량이 정해진 선로에 대해서 혼잡을 고려하고, 동시에 가장 경제적인 방법으로 급전하는 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum C_i(P_i) \\ & \text{s.t. } P_1 = -\theta_2 - \theta_4 - 0.5\theta_6 \\ & P_3 = -\theta_2 + \frac{1}{3}\theta_3 - \frac{1}{3}\theta_4 - \theta_6 \\ & P_5 = -\theta_4 + 2\theta_5 - \theta_6 \\ & P_2 = -5 = -2\theta_2 + \theta_3 \\ & P_4 = -5 = \frac{1}{3}\theta_3 - \frac{7}{3}\theta_4 + \theta_5 \\ & P_6 = -5 = \theta_3 + \theta_5 - \frac{5}{2}\theta_6 \\ & -\theta_2 \leq 1.5 \end{aligned} \quad (12)$$

이제 주어진 최적화 문제를 풀기 위해 라그랑지 함수를 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L = & 0.1P_1^2 + P_1 + 0.12P_3^2 + 0.8P_3 + 0.14P_5^2 + 0.6P_5 + \\ & \lambda_1^t(-\theta_2 - \theta_4 - 0.5\theta_6 - P_1) + \lambda_2^t(-5 + 2\theta_2 - \theta_3) + \\ & \lambda_3^t(-\theta_2 + \frac{1}{3}\theta_3 - \frac{1}{3}\theta_4 - \theta_6 - P_3) + \\ & \lambda_4^t(-5 - \frac{1}{3}\theta_3 + \frac{7}{3}\theta_4 - \theta_5) + \\ & \lambda_5^t(-\theta_4 + 2\theta_5 - \theta_6 - P_5) + \\ & \lambda_6^t(-5 - \theta_3 - \theta_5 + \frac{5}{2}\theta_6) + \mu(-\theta_2 - 1.5) \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)의 라그랑지 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L = \frac{1}{2} z^T Wz + g_0 z \quad (14)$$

식(12)의 최적화 문제는 식(14)의 라그랑지 함수의 1계미분조건(K.K.T condition)을 이용하여 해를 구할 수 있다.

임의의 모선에서의 부하전력변화가 각 모선에 주는 영향을 고려하기 위해서 임의의 한 모선의 부하전력 P_i^L 를 $P_i^L + \Delta P_i^L$ 로 증가시킬 때 각 발전기의 출력, 모선의 위상각, 한계비용 및 송전 제약에 대한 승수 μ 의 변화량을 구할 수 있다.

그 중에 부하전력변화에 한계비용의 변화, 즉 한계비용 민감도를 나타내면 표 2와 같다.

표 2. 모선의 한계비용민감도

모선 한계비용민감도	1	2	3	4	5	6
1	0.17	-0.16	-0.03	0.10	0.08	0.05
2	-0.16	0.69	0.36	0.02	0.08	0.15
3	-0.03	0.36	0.21	0.05	0.08	0.11
4	0.10	0.02	0.05	0.08	0.08	0.07
5	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
6	0.05	0.15	0.11	0.07	0.08	0.09

2.4.2 한계비용의 민감도 분석

혼잡이 발생할 경우 제약 선로의 용량을 효율적으로 사용하기 위한 인센티브로서 price signal이 주어지며, 보다 효과적이고 신속한 sinal 제공을 위해 전체 네트워크를 zone으로 분할을 한다. 분할시 몇 개의 zone으로 나눌 것이며, zone boundary를 어떻게 설정할 것인지가 관심사항이다. 효과적인 price signal 제공

을 위해서는 더욱 많은 수의 zone으로 분할을 해야 할 것이며, 계산 속도의 향상을 위해서는 하나의 zone에 더욱 많은 수의 node가 포함되어야 할 것이다.

기존의 zonal boundary 설정은 nodal price 분포의 표준편차를 이용한 통계적인 방법에 의해서였다. 그러나 통계적인 방법은 네트워크의 특성에 대한 해석이 부족하다는 단점이 있다. 본 논문에서는 한계비용 민감도를 이용해서 임의의 모선에서 부하전력변화가 계통내 다른 모선에서의 한계비용에 미치는 영향을 제안했다. 이때, 한계비용민감도는 식(11)을 이용해서 나타내면 그림 2와 같다. 이러한 모선에서의 부하전력변화에 대한 각각 모선의 한계비용의 민감도는 어떤 모선에 대한 전기적 거리와 발전비용 함수에 의해 결정이 된다. 따라서 zone내의 모선들은 전기적 상관관계가 큰 것, 즉 계통내 모선에서의 한계비용의 변화에 미치는 영향이 유사한 것으로 구성된다.

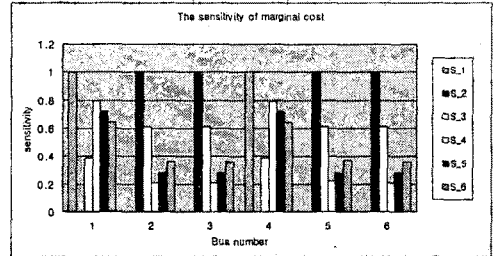


그림 2. 한계비용민감도

그림 2의 결과를 바탕으로 6모선 계통은 표3과 같이 zone으로 분할이 된다.

표 3. 한계비용 민감도를 이용한 계통분할

zone 1	1, 4.
zone 2	2, 3, 5, 6

3. 결 론

송전제약으로 인한 혼잡이 발생한 경우, DC load flow를 이용한 계통의 분석을 통해 모선의 부하전력변화에 대한 한계비용의 민감도를 구하였다. 한계비용의 민감도는 계통의 topology와 발전기의 비용함수에 의해 결정되며 이러한 성질을 이용하여 혼잡이 일어난 계통에 효과적인 price signal을 주도록 subnetwork로의 분할의 기준을 제시하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Allen J.Wood, Bruce F.Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & sons, Inc., pp58-72
- [2] Tomas W.Gedra, "On Transmission Congestion and Pricing", IEEE Transaction on Power System, Vol.14, No.1, February, 1999
- [3] 장시진, 정해성, 박종근, "송전제약하에서 DC Load Flow를 이용한 한계비용의 분석과 계통의 분할에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, A권, 2000
- [4] 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
- [5] Mohammad Shahidehpour, Hatim Yamin, and Zuyi Li, Market operation in electric power systems, John Wiley & Sons, Inc. pp. 369-431.
- [6] D.P. Bertsekas, Nonlinear Programming, Massachusetts, Athena Scientific, 1995.