

전력시장하에서 전압상태변수를 이용한 Zone의 구성과 Zonal price

김용하*** · 이범** · 최상규* · 김동근*** · 우성민*** · 김용태****
 인천대학교 전기공학과*** · 여수대학교 전기공학과** · 안양과학대학 전자통신정보학부* · 인천지하철****

A new method of splitting zones using voltage variables and Zonal price in the power market

Kim, Y.H.*** · LEE, Buhm** · Choi, S.K.* · KIM, D.K.*** · Woo, S.M.*** · KIM, Y.T.***
 University of Incheon *** · Yosul National University** · Anyang Technical College* · Incheon Metropolitan City****

Abstract - This paper provides calculation of nodal price using voltage variables on Power System Operation. In this method we show deriving Shadow Price from state variables in Optimal condition. and we presentsd a new splitting method using voltage variables for zonal price. The proposed method is applied to IEEE-30 and results shows the effectiveness of the method.

1. 서 론

전통적으로 전력산업은 규모의 경제가 적용되는 대표적인 장치 산업으로서 독점체제가 당연시 되어 왔으며, 전기는 생산과 동시에 소비되기 때문에 시장거래가 불가능한 재화로 인식되어 모든 나라는 발송배전 산업을 일관 통합체제로 운영해 왔다. 그러나 기술의 발달에 따라 소규모 고효율의 발전기가 개발되어 발전부문에서는 전통적 의미의 규모의 경제가 상실되고 경쟁을 통한 효율성 제고가 가능하게 됨에 따라 송전 부문은 단일계통으로 운영하여 규모의 경제를 활용하되 발전 및 배전 부문에는 경쟁을 도입하는 형태로의 변화가 가능하게 되었다. 정보통신 기술의 발달로 전자식 전력거래가 개발되어 실시간 전력거래도 가능하게 되어 전력산업에도 시장경쟁체제 도입이 가능한 여건이 형성되었다. 실제로 우리나라의 전력산업구조 개편은 1997년에 전력산업 구조개편 협의체가 설립되면서 시작되어 기존의 수직독점체제의 운영체제에서 경쟁체제의 전력시장구조로 변화되어 가고 있는 상황이다. 현재의 단계는 발전경쟁 단계로서 발전부문에 대한 입찰만을 시행하고 있으며 발전원가수준에 따라 전력공급의 우선순위를 결정하는 원가반영시장(Cost-Based Pool)의 형태로 시장을 운영하고 있다. 하지만 최근에 한전에서 2006년부터 배전부문에 '독립사업부제'를 추진할 방침을 밝힌바 있다. 따라서 머지않은 미래에 판매전담회사가 나타남으로써 소비자가 발전회사와 판매회사를 선택할 수 있는 소매경쟁단계로 발전할 것이다. 이러한 전력시장 구조적 변화에 적합하도록 시장의 운영 역시 발전부문(공급)과 배전부문(수요) 양방향에서 동시에 입찰하는 양방향 입찰제(Two-Way Bidding Pool)를 바탕으로 하는 체제로 바뀔 것이다. 또한 전력거래가 본격화 됨에 가장 우선시 되어 할 것은 소비자들에게 전력 가격에 대해 정확하고 합리적인 경제적 신호를 줄수 있는 가격체제를 마련하는 것이다. 또한 이가격체제는 특정 송전선로를 통하여 전달되는 전력이 송전선로의 공급능력을 벗어나게 되는 송전 혼잡, 안전도 등 전력계통 운영에 직접적인 영향을 줄수 있는 요소들에 대해 민감하게 반응해야 한다.

본연구에서는 전압상태 변수를 사용하여 Nodal price를 산정하고 전압상태변수에 대한 모선가격의 민감도를 구할 수 있는 방법을 개발하였다. 모선가격의 민감도로부터 zone을 구분하는 방법을 제안하였으며, 이를 시험계통에 적용하여 본 연구의 유용성을 입증하였다.

2. 모선가격 (Nodal price)

모선가격이란 각모선의 부하변화에 따른 전체 계통의 비용의 변화로 정의 할수 있다.[1] 전체계통의 비용이라는 것은 라그랑지 함수로 표현이 가능하고 계통의 비용을 나타내는 라그랑지안 함수는 발전비용최소화의 목적함수, 계통에서 발전기 출력 상하한 제약, 모선전압제약, 선로조류제약과 등호제약인 부하모선의 수급조건으로 구성하였다. 라그랑지 함수는 식(1)과 같다.

$$L = \sum_{i=1}^{Ngen} f_i(p_{Gi}) + \sum_{j=1}^{Nbus} [\lambda_{Bj} (p_{Dj} + \sum_{m=1}^{Nbus} p_{ijm} - p_{Gi})] + [\lambda_{Gj} (q_{Dj} + \sum_{m=1}^{Nbus} q_{ijm} - q_{Gi})] + \sum_{i=1}^{Ngen} [\rho_{Gj}^{min} (p_{Gi}^{min} - p_{Gi})] + \sum_{i=1}^{Ngen} [\rho_{Gj}^{max} (p_{Gi} - p_{Gi}^{max})] + \sum_{i=1}^{Ngen} [\rho_{Gj}^{min} (q_{Gi}^{min} - q_{Gi})] + \sum_{i=1}^{Ngen} [\rho_{Gj}^{max} (q_{Gi} - q_{Gi}^{max})] + \sum_{i=1}^{Nbus} [\rho_{Vj}^{min} (v_i^{min} - v_i)] + \sum_{i=1}^{Nbus} [\rho_{Vj}^{max} (v_i - v_i^{max})] + \sum_{i=1}^{Nbus} [\rho_{Ti}^{max} (T_i - T_i^{max})] \tag{1}$$

단, $\lambda_{Bj}, \lambda_{Gj}$: 모선 수급조건과 관련된 잠재가격
 $\rho_{Gj}^{min}, \rho_{Gj}^{max}, \rho_{Vj}^{min}, \rho_{Vj}^{max}$: j발전기모선 유무효출력 상하한치와 관련된 잠재가격
 $\rho_{Gj}^{min}, \rho_{Gj}^{max}$: i모선 전압 상하한치와 관련된 잠재가격
 ρ_{Vj}^{max} : i선로 피상조류 상한치와 관련된 잠재가격

현재상태를 반영하기 위해서 각모선의 유·무효전력을 각모선의 상태변수로 표현가능한 모선의 주입전력으로 표현하도록 하였으며 모선가격을 정의에 따라 정식화하면 식(2)와 같다.

$$\pi_i = \frac{\partial L}{\partial P_i} \tag{2}$$

식(2)는 확대목적함수에서 라그랑지 승수 즉 잠재가격을 구하는 과정인 최적조건 식(3)~식(5)에 포함됨을 알 수 있다.

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = \frac{\partial f_i(P_{Gi})}{\partial P_{Gi}} - \lambda_{Pi} - \rho_{Pi}^{min} + \rho_{Pi}^{max} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{Gi}} = \lambda_{Gj} - \rho_{Gj}^{min} + \rho_{Gj}^{max} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial L}{\partial X_i} = \lambda_{Pi} \frac{\partial P_{ijm}}{\partial X_i} + \lambda_{Gj} \frac{\partial Q_{ijm}}{\partial X_i} - \rho_{Vj}^{min} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{Vj}^{max} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{Ti}^{max} \frac{\partial T_i}{\partial X_i} = 0 \tag{5}$$

$$\text{단 } P_i = \sum_{m=1}^n p_{i,m}, \quad Q_i = \sum_{m=1}^n q_{i,m}$$

잠재가격을 산정하기 위해 식(5)에서 부하모선과 발전기 모선에 대한 수급조건을 구분해서 정리하면 식(6)와 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial X_i} = \lambda_{PG_i} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} + \lambda_{QG_i} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} + \lambda_{PDk} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} + \lambda_{QDk} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} - \rho_{V_i}^{\min} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{V_i}^{\max} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{P_i}^{\max} \frac{\partial T_i}{\partial X_i} = 0 \quad (6)$$

식(6)에서 $\lambda_{PDk}, \lambda_{QDk}$ 는 k모선의 부하전력과 관련된 라그랑지 승수를 나타내고 있다. 식(3)과 식(4)에서 발전기에 대한 편미분항을 수급조건에 관련된 잠재가격에 대해 정리하면 식(7) 및 식(8)과 같다.

$$\lambda_{PG_i} = -\frac{\partial f(P_{G_i})}{\partial P_{G_i}} + \rho_{P_i}^{\min} - \rho_{P_i}^{\max} \quad (7)$$

$$\lambda_{QG_i} = \rho_{Q_i}^{\min} - \rho_{Q_i}^{\max} \quad (8)$$

식(7)와 식(8)을 식(6)에 대입하면 식(9)로 정리된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial X_i} = & -\frac{\partial f(P_{G_i})}{\partial P_{G_i}} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} + \rho_{P_i}^{\min} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} - \rho_{P_i}^{\max} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} + \rho_{Q_i}^{\min} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} - \rho_{Q_i}^{\max} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} \\ & + \lambda_{PDk} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} + \lambda_{QDk} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} - \rho_{V_i}^{\min} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{V_i}^{\max} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{P_i}^{\max} \frac{\partial T_i}{\partial X_i} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

발전기 모선이나 부하모선의 유무효전력을 각 모선의 주입전력(P_i, Q_i)으로 표현하면 식(10)과 같다.

$$P_i = P_{D_i} - P_{G_i} \quad Q_i = Q_{D_i} - Q_{G_i}$$

$$P_{G_i} < P_{D_i} \quad P_i = \sum_{m=1}^n P_{i,m} \quad Q_{G_i} < Q_{D_i} \quad Q_i = \sum_{m=1}^n Q_{i,m}$$

$$P_{G_i} > P_{D_i} \quad P_i = -\sum_{m=1}^n P_{i,m} \quad Q_{G_i} > Q_{D_i} \quad Q_i = -\sum_{m=1}^n Q_{i,m} \quad (10)$$

따라서 식(10)의 관계를 식(9)에 대입하여 다시 정리하면 식(11)과 같이 계통의 상태변수로 최적조건을 구할 수 있고 등호제약과 관련된 라그랑지 승수는 부하모선에 대한 수급만 고려해도 됨을 알 수 있다. 따라서 최적조건을 모선의 주입전력으로 정리하면 식(11)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial X_i} = & \frac{\partial f(P_{G_i})}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} - \rho_{P_i}^{\min} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} + \rho_{P_i}^{\max} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} - \rho_{Q_i}^{\min} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} + \rho_{Q_i}^{\max} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} + \lambda_{PDk} \frac{\partial P_k}{\partial X_i} + \lambda_{QDk} \frac{\partial Q_k}{\partial X_i} \\ & - \rho_{V_i}^{\min} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{V_i}^{\max} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{P_i}^{\max} \frac{\partial T_i}{\partial X_i} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

먼저 조류계산을 통해 상태변수를 구한 뒤 식(11)을 만족시키는 라그랑지 승수, 즉 잠재가격을 계산하였다. 이 최적화 문제에서 고려하고자 하는 부등호 제약조건이 Binding되었는지를 판별하여 Binding되어있는 경우만 식(11)에 포함시켜 식(12)과 같은 연립방정식으로 정리하였다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial X_1} & \frac{\partial Q_k}{\partial X_1} & \frac{\partial P_j}{\partial X_1} & \frac{\partial Q_j}{\partial X_1} & \frac{\partial V_i}{\partial X_1} & \frac{\partial T_i}{\partial X_1} \\ \frac{\partial L}{\partial X_2} & \frac{\partial Q_k}{\partial X_2} & \frac{\partial P_j}{\partial X_2} & \frac{\partial Q_j}{\partial X_2} & \frac{\partial V_i}{\partial X_2} & \frac{\partial T_i}{\partial X_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial X_j} & \frac{\partial Q_k}{\partial X_j} & \frac{\partial P_j}{\partial X_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial X_j} & \frac{\partial V_i}{\partial X_j} & \frac{\partial T_i}{\partial X_j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial X_n} & \frac{\partial Q_k}{\partial X_n} & \frac{\partial P_j}{\partial X_n} & \frac{\partial Q_j}{\partial X_n} & \frac{\partial V_i}{\partial X_n} & \frac{\partial T_i}{\partial X_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{PDk} \\ \lambda_{QDk} \\ \rho_{P_{m,j}} \\ \rho_{Q_{m,j}} \\ \rho_{V_i} \\ \rho_{T_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(P_{G_i})}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial X_1} \\ \frac{\partial f(P_{G_i})}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial X_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f(P_{G_i})}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial X_j} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\text{단, } \left\{ \begin{array}{l} -\rho_{P_{m,j}}, -\rho_{Q_{m,j}} \\ \rho_{P_{m,i}}, \rho_{Q_{m,i}} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} -\rho_{P_{m,i}}, -\rho_{V_{m,i}} \\ \rho_{P_{m,i}}, \rho_{V_{m,i}} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} -\rho_{V_{m,i}} \text{ 하한치에 Binding된 경우} \\ \rho_{V_{m,i}} \text{ 상한치에 Binding된 경우} \end{array} \right.$$

위의 연립방정식의 해인 라그랑지 승수로부터 모선가격을 다시 정리하여 표현하면 식(13), (14)와 같다.

발전기 모선인 경우

$$\pi_{P_i,k} = \frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{\partial f(P_{G_i})}{\partial P_i} - \bar{\rho}_{P_{m,i}} + \bar{\rho}_{P_{m,i}} \quad (13)$$

$$\pi_{Q_i,k} = \frac{\partial L}{\partial Q_i} = -\bar{\rho}_{Q_{m,i}} + \bar{\rho}_{Q_{m,i}}$$

부하 모선인 경우

$$\pi_{P_i,k} = \lambda_{PDk} \quad (14)$$

$$\pi_{Q_i,k} = \lambda_{QDk}$$

단, $\bar{\rho}$: Binding된 부등호제약조건 of 잠재가격

3. 지역 가격 (Zonal price)

지역가격을 구하기 위해서는 위에서 구한 모선가격을 이용하여 비슷한 경향을 갖고 있는 모선가격을 모아 하나의 zone을 형성하고 하나의 모선처럼 취급을 한다. 또한 계통의 지역가격을 선정하는데 있어 가장 중요한 요소는 zonal boundary를 결정하고 zone의 대표 가격을 선정하는 것이다. 본연구에서 위에서 구한 모선가격의 이론을 그대로 사용하여 상태변수에 대한 모선가격의 민감도를 계산하여 zone을 구성하는 방법을 제시하였다.

3.1 모선가격의 민감도

Zone을 구성하는 node들은 각 node의 nodal price에 대해 유사성을 가지고 있다. 본연구에서 nodal price의 유사성을 제시 하는 방법으로 상태변수에 대한 Nodal price의 민감도가 유사한 node를 모아 하나의 zone으로 구성했다. 각모선의 상태변수에 대한 모선가격의 민감도를 표현하면 식(15)와 같다.

발전기 모선인 경우

$$\frac{\partial \pi_{P_i,k}}{\partial X_i} = \frac{\partial^2 L}{\partial P \partial X} = \frac{\partial^2 f(P_{G_i})}{\partial P^2} \frac{\partial P_{G_i}}{\partial X} - \frac{\partial \bar{\rho}_{P_{m,i}}}{\partial X} + \frac{\partial \bar{\rho}_{P_{m,i}}}{\partial X}$$

부하 모선인 경우

$$\frac{\partial \pi_{P_i,k}}{\partial X} = \frac{\partial \lambda_{PDk}}{\partial X} \quad (15)$$

식(15)에서 상태변수로 잠재가격을 편미분한 항 $\frac{\partial \bar{\rho}_{P_{m,i}}}{\partial X}$,

$\frac{\partial \bar{\rho}_{P_{m,i}}}{\partial X}, \frac{\partial \lambda_{PDk}}{\partial X}$ 을 구하기 위해서 음함수 이론을 적용하였다. 각 모선의 유효부하전력은 모선의 주입전력으로 표현되며 또한 모선의 주입전력을 상태변수의 함수로 표현하면 식(16)과 같다.

$$P_{G_i} = P_j(E_i, \theta_i), \quad Q_{G_i} = Q_j(E_i, \theta_i) \quad (16)$$

단 j: 발전기 모선, i: 계통의 모든 모선

$$P(E_i, \theta_i) = E_i^2 G_n + E_i \sum_{j=1}^n E_j (G_n \cos \theta_n + B_n \sin \theta_n)$$

$$Q(E_i, \theta_i) = -E_i^2 G_n + E_i \sum_{j=1}^n E_j (G_n \sin \theta_n - B_n \cos \theta_n)$$

식(12)로부터 라그랑지 승수가 상태변수의 함수로 표현이 됨을 알 수 있으며 라그랑지승수를 상태변수의 함수로 표현하면 식(17)과 같다.

$$\lambda_k = \lambda_k(E_i, \theta_i), \quad \rho_k = \rho_k(E_i, \theta_i) \quad (17)$$

단 k: 부하모선, h: 부등호제약조건

위의 식(16), (17)로써 다시 최적조건을 나타내는 식(11)을 상태변수로 이루어진 식으로 표현하면 식(18)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(P(E_i, \theta_i), Q(E_i, \theta_i), \lambda_k(E_i, \theta_i), \rho_k(E_i, \theta_i), E_i, \theta_i)}{\partial X_i} = & \frac{\partial f(P_{G_i}(V_i, \theta_i))}{\partial P_i} \frac{\partial P_i(V_i, \theta_i)}{\partial X_i} \\ & + \lambda_{PDk}(V_i, \theta_i) \frac{\partial P_k(V_i, \theta_i)}{\partial X_i} + \lambda_{QDk}(V_i, \theta_i) \frac{\partial Q_k(V_i, \theta_i)}{\partial X_i} \\ & - \rho_{P_i}^{\min}(V_i, \theta_i) \frac{\partial P_i(V_i, \theta_i)}{\partial X_i} + \rho_{P_i}^{\max}(V_i, \theta_i) \frac{\partial P_i(V_i, \theta_i)}{\partial X_i} \\ & - \rho_{Q_i}^{\min}(V_i, \theta_i) \frac{\partial Q_i(V_i, \theta_i)}{\partial X_i} + \rho_{Q_i}^{\max}(V_i, \theta_i) \frac{\partial Q_i(V_i, \theta_i)}{\partial X_i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\rho_{V_i}^{\min}(V_i, \theta_i) \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{V_i}^{\max}(V_i, \theta_i) \frac{\partial V_i}{\partial X_i} \\
 & + \rho_{T_i}^{\max}(V_i, \theta_i) \frac{\partial T_i(V_i, \theta_i)}{\partial X_i} = 0 \quad (18)
 \end{aligned}$$

식(18)을 발전비용함수와 제약조건의 함수로 표현을 하면 식(19)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial L(P_i(E_i, \theta_i), Q_i(E_i, \theta_i), \lambda_k(E_i, \theta_i), \rho_k(E_i, \theta_i), E_i, \theta_i)}{\partial X_i} \\
 & = -\frac{\partial f(P_G(V_i, \theta_i))}{\partial P_i(V_i, \theta_i)} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} \\
 & \quad + U(P_i(V_i, \theta_i), Q_i(V_i, \theta_i), \lambda_k(V_i, \theta_i), \rho_k(E_i, \theta_i), E_i, \theta_i) \\
 & = F_X + U = 0 \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{단, } F_X &= \frac{\partial f(P_G(V_i, \theta_i))}{\partial P_i(V_i, \theta_i)} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} \\
 & \quad U(P_i(V_i, \theta_i), Q_i(V_i, \theta_i), \lambda_k(V_i, \theta_i), \rho_k(E_i, \theta_i), E_i, \theta_i) \\
 & = \lambda_{P_k}(V_i, \theta_i) \frac{\partial P_k(V_i, \theta_i)}{\partial X_i} + \lambda_{Q_k}(V_i, \theta_i) \frac{\partial Q_k(V_i, \theta_i)}{\partial X_i} \\
 & \quad - \rho_{P_i}^{\min}(V_i, \theta_i) \frac{\partial P_i(V_i, \theta_i)}{\partial X_i} + \rho_{P_i}^{\max}(V_i, \theta_i) \frac{\partial P_i(V_i, \theta_i)}{\partial X_i} \\
 & \quad - \rho_{Q_i}^{\min}(V_i, \theta_i) \frac{\partial Q_i(V_i, \theta_i)}{\partial X_i} + \rho_{Q_i}^{\max}(V_i, \theta_i) \frac{\partial Q_i(V_i, \theta_i)}{\partial X_i} \\
 & \quad - \rho_{V_i}^{\min}(V_i, \theta_i) \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{V_i}^{\max}(V_i, \theta_i) \frac{\partial V_i}{\partial X_i} \\
 & \quad + \rho_{T_i}^{\max}(V_i, \theta_i) \frac{\partial T_i(V_i, \theta_i)}{\partial X_i}
 \end{aligned}$$

식(19)는 상태변수로 이루어진 함수이므로 상태변수의 편미분을 하면 식(20)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 L}{\partial X_i^2} &= \frac{\partial F_X}{\partial X_i} + \frac{\partial U}{\partial X_i} \\
 &= F_{XX} + U_X = 0 \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{단 } F_{XX} &= \frac{\partial^2 f(P_G(V_i, \theta_i))}{\partial P_i(V_i, \theta_i)^2} \frac{\partial^2 P_i}{\partial X_i^2} \\
 U_X &= \frac{\partial U(P_i(V_i, \theta_i), Q_i(V_i, \theta_i), \lambda_k(V_i, \theta_i), \rho_k(E_i, \theta_i), E_i, \theta_i)}{\partial X_i}
 \end{aligned}$$

식(20)으로부터 $\frac{\partial^2 f}{\partial X^2}, \frac{\partial^2 U}{\partial X^2}, \frac{\partial^2 L}{\partial X^2}$ 의 값을 구하였으며 이는 모든 모선을 표현하고 있다.

식(20)은 일반화 하여 표현한 것이다. 식(20)으로 표현한 방정식은 상태변수의 수만큼 식의 수가 존재 하게 되며, 라그랑지 승수를 상태변수로 편미분한 값도 상태변수의 수만큼 존재 하게 된다. 따라서 N개의 모선으로 구성된 계통에서 전체적인 방정식의 수는 총 2N개 이다. 상태변수에 대한 각 모선가격의 민감도역시 상태변수의 수만큼 인 2N개가 존재하게 된다.

3.2 모선가격의 민감도를 이용한 zone의 구성

2N 개인 모선가격의 민감도를 전압의 크기 N개, 위상 N개로 구분한다. zone의 구분은 전압의 크기와 위상으로 분류하여 두가지 형태로 구분 하도록 하였으며 전압의 크기와 위상에 대한 모선가격의 민감도를 가지고 zone을 구성하는 방법을 정리하면 다음과 같다.

step 1> 하나의 상태변수에 대한 각모선가격의 민감도의 표준편차를 구한다.

step 2> 구한 표준편차를 각 모선가격의 민감도에 더한 값을 max, 각 모선의 민감도에서 표준편차값을 뺀 것을 min으로 한다.

step 3> 하나의 상태변수에 대해 하나의 모선을 기준으로 하여 max 와 min 값을 기준으로 한후 기준을 삼은 모선을 제외한 나머지 모선가격의 민감도와 비교 하여 포함이 되는 모선은 기준모선의 모선가격 민감도와 같은 경향을 갖는 모선으로 판정한다.

step 4> 상태변수는 고정으로 하고 기준모선을 다른 모선으로 하여 새로운 max 와 min 값을 산정하고 다시 모든 모선가격의 민감도와 비교를 한다.

step 5> 상태변수를 고정한 상태에서 기준모선이 모든 모선으로 하여 max와 min 값을 다 적용하여 같은 경향을 갖는 모선이 판정이 되면 다시 상태변수를 다른 상태변수로 바꾸어 step3 에서부터 step 5 과정을 실행한다.

4. 사례연구

본 논문에서 제안한 상태변수에 대한 모선가격의 민감도를 이용하여 zonal boundary 설정에 대한 타당성을 입증하기 위하여 제안된 알고리즘을 IEEE RTS-30계통에 적용하였다.

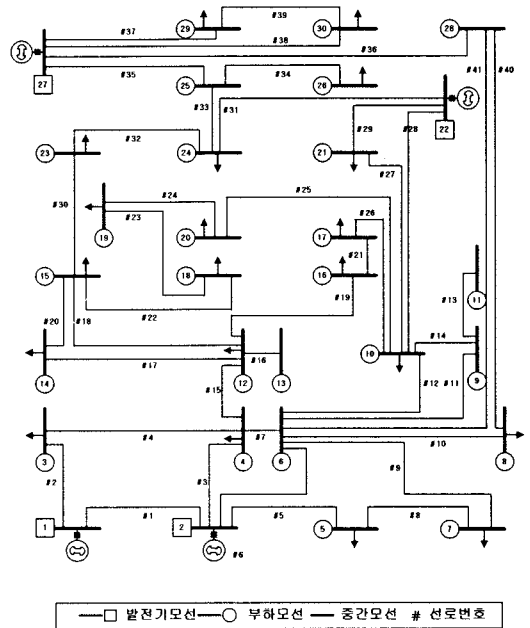


그림 1. IEEE-30모델계통

우선 IEEE-30 모델계통에 대한 모선가격을 산정한 결과는 표 1과 같다.

표1. 모선가격

모선번호	모선가격	모선번호	모선가격	모선번호	모선가격
1	53.4393	11	36.4698	21	34.5247
2	52.9133	12	40.6723	22	37.4002
3	43.4738	13	40.6723	23	39.5885
4	41.6319	14	41.0243	24	38.2392
5	47.5572	15	40.3956	25	36.5351
6	35.7893	16	39.2389	26	37.1608
7	41.0051	17	37.6842	27	35.3028
8	36.0885	18	39.7252	28	35.4734
9	36.4698	19	39.1513	29	36.2087
10	36.8184	20	38.5798	30	36.8256

4.1 전압 크기에 대한 ZONE의 구성

표1의 결과를 이용하여 전압크기에 대한 모선가격의 민감도를 계산 하면 상태변수 30개에 대한 각모선의 민감도 이므로 900개의 값이 존재 하게 된다. 이들 값중 대 표로 1번모선의 상태변수에 대한 각모선의 민감도는 표 2.와 같다

표2. 1번모선의 전압크기에 대한 모선가격의 민감도

모선	E_1	모선	E_1	모선	E_1
1	8.5512	11	2.6907	21	0.6067
2	90.4835	12	13.3796	22	0.0000
3	18.3432	13	13.3796	23	7.1648
4	18.6520	14	12.5306	24	2.5539
5	50.1486	15	10.6968	25	0.9353
6	1.1925	16	9.2216	26	0.9720
7	21.9985	17	5.2294	27	0.0000
8	1.5528	18	8.4363	28	0.4056
9	2.6907	19	6.9953	29	0.0000
10	3.4523	20	6.1021	30	0.0000

3.2절의 step1~step5의 절차에 따라 전압크기에 대해 zone을 구분한 결과를 정리하면 표3 및 그림 2와 같다.

표3. 전압의 크기에 대한 zone 구분

zone	모선	zone	모선
1	3,4	6	21,24
2	6,8,18	7	25,26
3	9,11	8	29,30
4	10,15,16,18,19,20,23	독립	1,2,5,7,14,22,27
5	12,13		

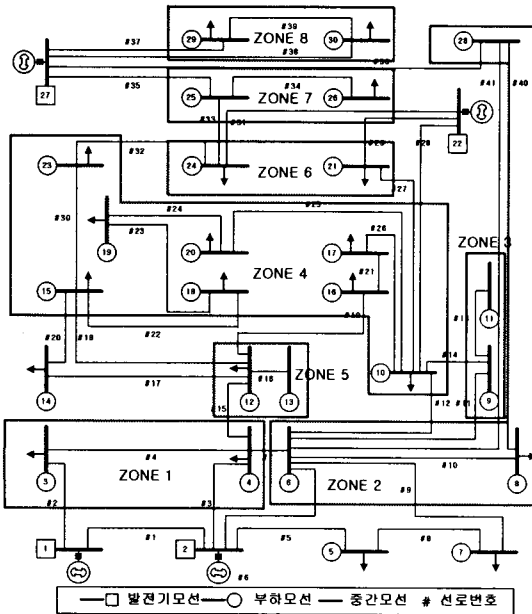


그림 2. 각모선의 전압크기에 따른 ZONE 구분

4.2 위상각에 대한 ZONE의 구성

상태변수 위상각에 대한 각모선의 민감도는 표4와 같다.

표4. 위상각에 대한 모선가격의 민감도

모선	theta1	모선	theta1	모선	theta1
1	2.4603	11	3.4787	21	2.7052
2	5.7825	12	7.6926	22	2.4603
3	11.6112	13	7.6926	23	5.2623
4	9.2727	14	7.3932	24	3.4659
5	8.5943	15	6.6421	25	2.8260
6	2.9213	16	6.0346	26	2.8417
7	5.5337	17	4.4569	27	2.4603
8	3.0516	18	5.7442	28	2.6326
9	3.4787	19	5.1687	29	2.4603
10	3.7623	20	4.8104	30	2.4603

3.2절의 step1~step5의 절차에 따라 위상각에 대해 zone을 구분한 결과를 정리하면 표5 및 그림 3과 같다.

표5. 위상각에 대한 zone의 구분

zone	모선	zone	모선
1	3,4	6	18,19,20
2	6,8,18	7	21,24,25,26
3	9,11	8	29,30
4	10,16,17	독립	1,2,5,7,22,27
5	12,13,14,15,23		

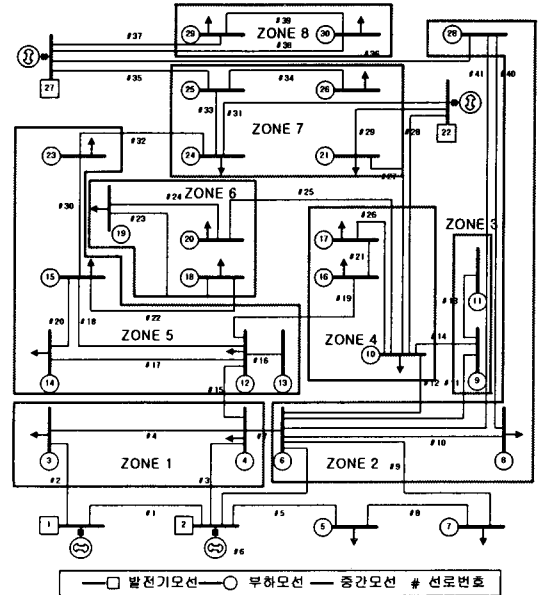


그림 3. 각모선의 위상에 따른 ZONE 구분

5. 결론

본 연구에서는 현재 계통의 상태를 반영하도록 상태변수로 nodal price를 재구성할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 또한 각모선 가격의 유사성을 파악하여 zone을 구성하기 위해서 각 모선의 상태변수에 대한 모선가격의 민감도를 통하여 zone을 구성하였다. 본연구에서 구성한 zone의 구분을 바탕으로 하여 우리나라 실정에 맞는 효과적인 zonal price를 산정하는 방법을 제시할 수 있는 작업이 필요함이 사료된다.

감사의 글

"본연구는 한국과학재단 지정 인천대학교 동북아 전자물류연구센터의 지원 및 산업자원의 일부 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2003-B-343) 주관으로 수행된 과제임"

[참고 문헌]

- [1] '전력거래 기본법', 한국전력거래소, 2003년
- [2] Luonan Chen, "Components of Nodal Prices for Electric Power Systems", IEEE Trans Power Syst., VOL. 17, p41-49, Feb 2002
- [3] 김용하, 문혁기, "계통운전상태에서의 모선중분비용 산정 및 분해에 관한 연구(II)", 대한전기학회 논문지, vol. 52, No.9, 2003
- [4] Frame, J. "Locational marginal pricing" Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE, Volume: 1, 28 Jan.-1 Feb. 2001
- [5] Luonan Chen, Suzuki, Hideki Wachi, Tsunehisa, Shimura, Yukihiro "Components of Nodal Prices for Electric Power Systems." IEEE Transactions on Power Systems, Feb2002, Vol. 17 Issue 1, p41, 9p