

계통운전상태에서의 모선증분비용 산정 및 분해에 관한 연구

김용하\*\*\* · 이범\*\* · 최상규\* · 문혁기\*\*\* · 이재걸\*\*\* · 연준희\*\*\*  
 인천대학교 전기공학과\*\*\* · 여수대학교 전기공학과\*\* · 인양과학기술대학 전자통신정보학부\*

A Study on Calculation and Decomposition of Bus Incremental Cost on Power System Operation

Kim, Y.H.\*\*\* · LEE, Buhm\*\* · Choi, S.K.\* · Moon, H.K.\*\*\* · Lee, J.G.\*\*\* · Yeon, J.H.\*\*\*  
 University of Incheon\*\*\* · Yosu National University\*\* · Anyang Technical College\*

**Abstract** - This paper provides calculation and decomposition of Bus Incremental Cost on Power System Operation. In this method we show deriving Shadow Price from state variables in Optimal condition. And the decomposition can give a detailed description of each Bus Incremental Cost. The proposed method is applied to IEEE-30 and results shows the effectiveness of the method

1. 서 론

전력계통운용에서 경제적 신호를 제공하기 위하여 규제완화된 전력시장에서 모선가격(Nodal Price) 혹은 현물가격이론(Spot Price Theory)에 관한 연구가 진행되고 있다[1]. 지금까지는 주로 OPF의 결과로 나온 라그랑지안 승수, 즉 잠재가격(Shadow Price)을 이용하여 모선가격을 산정하여 왔다. 그러나 계통은 항상 최적으로만 운전되는 것은 아니며 또한 사고 발생시 등과 같은 경우에는 현재의 운전상태로부터 모선가격을 산정하는 것이 필요한 경우가 발생하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 먼저 현재의 계통운전상태로부터 직접적으로 잠재가격을 얻을 수 있는 방법을 제안하였다. 즉, 조류계산을 통해 구해진 계통의 상태로부터 잠재가격을 계산하고 이를 이용하여 모선증분비용(Bus Incremental Cost)을 산정하는 알고리즘을 개발하였다. 한편 이와같이 모선가격이 산정되더라도 전력시스템의 운전에는 발전기 출력, 전압의 상하한치, 선로피상조류, 수급조건등 많고 같은 다양한 종류의 제약조건이 부가되게 되며 이들이 모선증분비용에 어떠한 영향을 주는지는 정확히 알지 못한다. 그러므로 본 연구에서는 전력시스템의 운전에 영향을 주는 제약조건을 시장에서 거래되는 제약과 의 무적인 제약인(모선증분비용의 요소가 아닌) 거래되지 않는 제약으로 분류하고 이러한 제약을 음함수 이론(Implicit theory)에 적용하여 다양한 구성요소안에서 모선증분비용을 분해하기 위한 방법을 적용하였다. 이를 IEEE-30모선계통에 적용하여 본 연구의 유용성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 모선증분비용 산정

본 연구에서는 조류계산의 해인 계통운전상태만을 가지고 잠재가격 및 모선증분비용을 계산할 수 있는 방법을 제안하였다.

2.1.1 최적조건

계통의 운용 목적을 발전비용 최소화로 한 경우 전력계통은 다음과 같은 최적화 문제로 구성되어진다.

· 목적함수 : 발전비용 최소화문제

$$\text{Min} \sum_{i \in \Omega_D} f_i(P_{Gi}) \quad (2.1)$$

· 제약조건  
 등호제약조건 : 각 모선의 수급조건

$$P_{Dk} + \sum_{i \in \Omega_L} P_{Li} - P_{Gi} = 0, Q_{Dk} + \sum_{i \in \Omega_Q} Q_{Li} - Q_{Gi} = 0 \quad (2.2)$$

단,  $P_{Gi}, Q_{Gi}$  : i모선의 발전기 유·무효출력 [MW]  
 $P_{Di}, Q_{Di}$  : i모선의 부하 유·무효전력 [MW]  
 $P_{Li}, Q_{Li}$  : i모선과 연결된 선로유·무효조류 [MW]  
 부등호제약조건

① 발전기 모선의 유·무효전력

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (2.3)$$

모든 i 발전기모선의 유·무효전력에 대해

② 각 모선의 전압의 크기

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} : \text{모든 } i \text{ 모선의 전압크기에 대해} \quad (2.4)$$

③ 선로피상조류 상한치

$$T_l \leq T_l^{\max} : \text{모든 } l \text{ 선로의 피상조류에 대해} \quad (2.5)$$

여기서, 부등호제약조건에는 안정성(stability)과 안전제한(security limit)등의 상하한치와 같은 모든 변수의 제약과 함수제약을 포함할 수 있으나 모선증분비용 구하기 위한 현 계통의 모델은 식(2.1)~식(2.5)와 같이 구성하였다. 주어진 계통의 최적조건을 구하기 위해 constrained optimization 문제는 unconstrained optimization문제로 변환하면 라그랑지안 함수인 식(2.6)으로 표현할 수 있다.

$$L = \sum_{i \in \Omega_D} f_i(P_{Gi}) + \sum_{k \in \Omega_P} [\lambda_k (P_{Dk} + \sum_{i \in \Omega_L} P_{Li} - P_{Gi})] + \sum_{k \in \Omega_Q} [\lambda_{Qk} (Q_{Dk} + \sum_{i \in \Omega_Q} Q_{Li} - Q_{Gi})] + \sum_{i \in \Omega_D} [\rho_{P,i} (P_{Gi} - P_{Gi}^{\max})] + \sum_{i \in \Omega_D} [\rho_{Q,i} (Q_{Gi}^{\min} - Q_{Gi})] + \sum_{i \in \Omega_D} [\rho_{V,i} (Q_{Gi} - Q_{Gi}^{\max})] + \sum_{i \in \Omega_D} [\rho_{V,i} (V_i^{\min} - V_i)] + \sum_{i \in \Omega_D} [\rho_{V,i} (V_i - V_i^{\max})] + \sum_{l \in \Omega_T} [\rho_{T,l} (T_l - T_l^{\max})] \quad (2.6)$$

단,  $\lambda_{P,k}, \lambda_{Q,k}$  : i모선 수급조건과 관련된 잠재가격  
 $\rho_{P,i}, \rho_{Q,i}, \rho_{V,i}, \rho_{Q,i}, \rho_{V,i}$  : j발전기모선 유·무효출력 상·하한치와 관련된 잠재가격  
 $\rho_{V,i}, \rho_{V,i}$  : i모선 전압 상·하한치와 관련된 잠재가격  
 $\rho_{T,l}$  : 선로 피상조류 상한치와 관련된 잠재가격  
 라그랑지안 함수 식(2.6)의 최적조건은 다음과 같다.  
 · 조건1: 라그랑지안 함수와 관련된 모든변수에 대한 편미분값은 0이 된다.  
 · 조건2: 수급조건과 관련된 라그랑지안 함수를  $\lambda$ 에 대해서 편미분을 한다. 즉, 등호제약조건이 된다.  
 · 조건3: 부등호제약조건과 관련된 라그랑지안 함수를  $\rho$ 에 대해서 편미분을 한다. 즉, 부등호제약조건이 된다.  
 · 조건4: 부등호제약조건을 만족시키기 위한 쿤터커 베타조건이다.

2.1.2 계통상태로부터의 잠재가격 산정

라그랑지안 함수 식(2.6)은 잠재가격으로 구성된 전체비용이며 따라서 잠재가격을 산정하기 위해서는 라그랑지안 함수의 최적조건을 풀어야 한다. 등호제약에서의 i모선과 연결된 선로조류  $P_{Li}, Q_{Li}$ 와 부등호제약에서의 전압 상하한치, 선로피상조류는 상태변수로 구성되어있다. 하지만 발전기 출력이나 부하를 확대목적함수의 변수로 볼 경우 조건1에서 변수의 개수가 방정식의 개수보다 많아지게 된다. 따라서 본 연구에서는 발전기 출력과 부하를 상태변수로 구성할 수 있는 각 모선의 주입전력( $P_i, Q_i$ )으로 표현하도록 하였다. 최적조건을 정리하면 식(2.7)~식(2.10)과 같다.

조건1

$$\frac{\partial L}{\partial X_i} = \frac{\partial f(P_{Gi})}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} + \lambda_{PDK} \frac{\partial P_{Dk}}{\partial X_i} + \lambda_{QDK} \frac{\partial Q_{Dk}}{\partial X_i} - \rho_{P,i} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} + \rho_{Q,i} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} - \rho_{Q,i} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} + \rho_{Q,i} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} - \rho_{V,i} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{V,i} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{T,l} \frac{\partial T_l}{\partial X_i} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial X_i} = \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta} = \sum_{j \in \Omega} V_j V_l [G_{jl} \sin(\theta_j - \theta_l) + B_{jl} \cos(\theta_j - \theta_l)] \quad \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \sum_{j \in \Omega} V_j V_l [G_{jl} \cos(\theta_j - \theta_l) + B_{jl} \sin(\theta_j - \theta_l)]$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = \sum_{j \in \Omega} V_l [G_{ij} \cos(\theta_j - \theta_l) + B_{ij} \sin(\theta_j - \theta_l)] \quad \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \sum_{j \in \Omega} V_l [G_{ij} \sin(\theta_j - \theta_l) - B_{ij} \cos(\theta_j - \theta_l)]$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = V_i V_l [G_{il} \sin(\theta_l - \theta_i) - B_{il} \cos(\theta_l - \theta_i)] \quad \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = V_i V_l [-G_{il} \cos(\theta_l - \theta_i) - B_{il} \sin(\theta_l - \theta_i)]$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = V_l [G_{il} \cos(\theta_l - \theta_i) + B_{il} \sin(\theta_l - \theta_i)] \quad \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = V_l [G_{il} \sin(\theta_l - \theta_i) - B_{il} \cos(\theta_l - \theta_i)]$$

$$\frac{\partial T_l}{\partial X_i} = \frac{P_l}{\sqrt{P_l^2 + Q_l^2}} \frac{\partial P_l}{\partial X_i} + \frac{Q_l}{\sqrt{P_l^2 + Q_l^2}} \frac{\partial Q_l}{\partial X_i} \quad \frac{\partial f(P_{Gi})}{\partial P_i} = 2\alpha_i P_{Gi} + \beta_i$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial X_i} = \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta} = [-V_l V_i [G_{li} \cos \theta_l + b_i \sin \theta_l]] \quad \frac{\partial P_i}{\partial \theta} = 0$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = [2\alpha_i V_i - V_l [G_{li} \cos \theta_l + b_i \sin \theta_l]] \quad \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = [-2(b_i + \alpha_i) V_i - V_l [G_{li} \sin \theta_l - b_i \cos \theta_l]] \quad \frac{\partial P_i}{\partial \theta} = 1$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta} = [-V_l V_i [G_{li} \sin \theta_l - b_i \cos \theta_l]] \quad \frac{\partial Q_i}{\partial \theta} = [V_l V_i [G_{li} \cos \theta_l + b_i \sin \theta_l]] \quad \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 0$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = [-V_l [G_{li} \cos \theta_l + b_i \sin \theta_l]] \quad \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = [-V_l [G_{li} \sin \theta_l - b_i \cos \theta_l]] \quad \frac{\partial P_i}{\partial \theta} = 0$$

**조건 2**

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = P_i + \sum_{j=1}^n P_{j,i} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = Q_i + \sum_{j=1}^n Q_{j,i} = 0 \quad (2.8)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n E_{ij} E_{ij} [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)]$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n E_{ij} E_{ij} [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)]$$

**조건 3**

$$\frac{\partial L}{\partial P_{\alpha,i}} = P_{\alpha,i}^{min} - P_{\alpha,i} \leq 0 \quad \frac{\partial L}{\partial P_{\beta,i}} = P_i - P_{\alpha,i}^{max} \leq 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{\alpha,i}} = Q_{\alpha,i}^{min} - Q_{\alpha,i} \leq 0 \quad \frac{\partial L}{\partial P_{\beta,i}} = Q_i - Q_{\alpha,i}^{max} \leq 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{\gamma,i}} = V_i^{min} - V_i \leq 0 \quad \frac{\partial L}{\partial P_{\delta,i}} = V_i - V_i^{max} \leq 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{\tau,i}} = T_i - T_i^{max} \leq 0 \quad (2.9)$$

$$T_i = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}$$

$$P_i = G_{ij} V_i^2 - V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_i = -(b_{ij} + \theta_{ij}) V_i^2 - V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

**조건 4**

$$\rho_{P_{\alpha,i}} (P_{\alpha,i}^{min} - P_i) = 0 \quad \rho_{P_{\beta,i}} \geq 0 \quad \rho_{P_{\beta,i}} (P_i - P_{\alpha,i}^{max}) = 0 \quad \rho_{P_{\beta,i}} \geq 0$$

$$\rho_{Q_{\alpha,i}} (Q_{\alpha,i}^{min} - Q_i) = 0 \quad \rho_{Q_{\beta,i}} \geq 0 \quad \rho_{Q_{\beta,i}} (Q_i - Q_{\alpha,i}^{max}) = 0 \quad \rho_{Q_{\beta,i}} \geq 0$$

$$\rho_{V_{\alpha,i}} (V_i^{min} - V_i) = 0 \quad \rho_{V_{\beta,i}} \geq 0 \quad \rho_{V_{\beta,i}} (V_i - V_i^{max}) = 0 \quad \rho_{V_{\beta,i}} \geq 0$$

$$\rho_{T_i} (T_i - T_i^{max}) = 0 \quad \rho_{T_i} \geq 0 \quad (2.10)$$

단,  $P_i, Q_i$  : 각 모션의 주입전력  $P_i = P_{\alpha,i} - P_{\beta,i}, Q_i = Q_{\alpha,i} - Q_{\beta,i}$

$f(P) = \sum_{i=1}^n f_i(P_{\alpha,i}), P_i = \sum_{i=1}^n P_{\alpha,i}, Q_i = \sum_{i=1}^n Q_{\alpha,i}$   
 식(2.7)~식(2.10)에서 모든 최적조건들이 상태변수로 구성되어 있으며 라그랑지안 함수 식(2.6)의 조건1은 식(2.11)으로 표현되어 있는데 발전기유·무효출력에 대한 미분항을  $\lambda_{P_{\alpha,i}}, \lambda_{Q_{\alpha,i}}$ 로 정리해 상태변수에 대한 미분항에 대입하여 주입전력으로 표현하면 식(2.7)로 정리되어지므로 본 연구에서는 부하모션의 수급조건만을 고려해도 되도록 하였다.

$$\frac{\partial L}{\partial X_i} = \lambda_{P_{\alpha,i}} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} + \lambda_{Q_{\alpha,i}} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} + \lambda_{P_{\beta,i}} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} + \lambda_{Q_{\beta,i}} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i}$$

$$- \rho_{V_{\alpha,i}} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{V_{\beta,i}} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{T_i} \frac{\partial T_i}{\partial X_i} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{\alpha,i}} = \frac{\partial f(P)}{\partial P_{\alpha,i}} + \lambda_{P_{\alpha,i}} - \rho_{P_{\beta,i}} + \rho_{P_{\alpha,i}} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{\alpha,i}} = \lambda_{Q_{\alpha,i}} - \rho_{Q_{\beta,i}} + \rho_{Q_{\alpha,i}} = 0 \quad (2.11)$$

먼저 현재계통의 운전상태를 알기 위해 조류계산을 통한 상태변수를 구한 뒤 식(2.7)~식(2.10)을 계산하였다. 여기서 조건2는 조류계산을 통해 구해진 상태변수로 수급을 항상 만족하게 된다. 조건3과 조건4의 부동호제조건은 nonbinding되어지는 경우 잠재가격  $\rho$ 는 0이 되고 binding되는 경우 잠재가격  $\rho$  값을 가지게 되며 발전기모션이나 부하모션을 비롯해 부동호제조건 모두 상태변수로 계산되어진다. 이렇게 부동호제조건이 Binding되었는지를 판별하여 Binding되어있는 경우만 식(2.7)에 적용하면 식(2.12)과 같이 연립방정식의 형태로 구성하였다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} & \frac{\partial P_i}{\partial X_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} & \frac{\partial V_i}{\partial X_i} & \frac{\partial T_i}{\partial X_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_i}{\partial X_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} & \frac{\partial P_i}{\partial X_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} & \frac{\partial V_i}{\partial X_i} & \frac{\partial T_i}{\partial X_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{P_{\alpha,i}} \\ \lambda_{Q_{\alpha,i}} \\ \rho_{P_{\beta,i}} \\ \rho_{Q_{\beta,i}} \\ \rho_{V_{\beta,i}} \\ \rho_{T_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial f(P)}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

단,  $\rho_{P_{\beta,i}} \left\{ -\rho_{P_{\beta,i}}, \rho_{Q_{\beta,i}} \right\} \left\{ -\rho_{Q_{\beta,i}}, \rho_{V_{\beta,i}} \right\} \left\{ -\rho_{V_{\beta,i}}, \rho_{T_i} \right\}$  한편이 Binding된 경우  $\rho_{P_{\beta,i}}, \rho_{Q_{\beta,i}}, \rho_{V_{\beta,i}}, \rho_{T_i}$  상한치에 Binding된 경우  
 식(2.12)에서 변수의 개수가 방정식의 개수보다 많아진 경우에는 식(2.12)의 연립방정식의 해를 구할 수 없다. 그러나 계통에서의 운전제약조건은 상한치나 하한치를 동시에 위반하는 경우가 발생하지 않으며 모든 운전제약을 위반하게 운전되어지지 않는다. 실제로 시험계통을 적용했을 때 변수의 개수가 방정식의 개수보다 많은 경우는 발생하지 않았다. 또한 제약이 Binding되는 경우가 적어 변수의 개수가 방정식의 개수보다 적은 경우에 대해서는 LU분할법을 사용하기 위해 방정식의 개수만큼 정방행렬을 구성함으로써 즉, 관련없는 변수에 대해서는 0을 처리하여 계산하였다.

또한 상태변수를 통해 계산되어진 부동호제조건은 정확히 상한치나 하한치에 Binding되어 있어야 한다. 하지만 본 연구에서는 잠재가격 정보를 도출하기 위해 제약조건의 한계치에 근접한 것을 포함할 수 있도록 허용범위를 두어 효율적으로 계산할 수 있도록 하였다. 이는 제약치를 어느정도 범위내까지 시장가격으로 고려할 것인가를 결정할 수 있다. 식(2.7)

~식(2.10)의 부동호제약의 허용범위는 식(2.13), 식(2.14)로 하였다.

$$B^{max} - B \leq \epsilon_1 \quad \text{또는} \quad \frac{B}{B^{max}} \leq \epsilon_2 \quad (2.13)$$

$$B - B^{min} \leq \epsilon_1 \quad \text{또는} \quad \frac{B^{min}}{B} \leq \epsilon_2 \quad (2.14)$$

단,  $B$  : 제약조건의 계산치  
 $B^{max}$  : 제약조건의 상한치  
 $B^{min}$  : 제약조건의 하한치  
 $\epsilon_1, \epsilon_2$  : 허용범위

**2.1.3 모션증분비용의 계산**

앞서 언급한 2.1.2절에서 구한 잠재가격 정보를 이용해 모션증분비용을 산정하였다. 각 모션 유·무효 주입전력에 대한 전체비용으로 계산되어지는 모션증분비용을 발전기모션과 부하모션으로 정리하면 식(2.15)와 식(2.16)이 된다.

· 발전기 모션인 경우

$$\pi_{P_{\alpha,i}} = \frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{\partial f(P)}{\partial P_i} - \rho_{P_{\beta,i}} + \rho_{P_{\alpha,i}} \quad (2.15)$$

$$\pi_{Q_{\alpha,i}} = \frac{\partial L}{\partial Q_i} = -\rho_{Q_{\beta,i}} + \rho_{Q_{\alpha,i}}$$

· 부하 모션인 경우

$$\pi_{P_{\beta,i}} = \lambda_{P_{\beta,i}} \quad (2.16)$$

$$\pi_{Q_{\beta,i}} = \lambda_{Q_{\beta,i}}$$

단,  $\rho$  : Binding된 부동호제약조건의 잠재가격

**2.2 모션증분비용의 분해(2)**

본 연구에서는 잠재가격으로부터 모션증분비용을 계산하고 이를 분해하였다. 이러한 모션증분비용의 분해요소를 얻기위해 음함수이론을 적용하였으며 시장에서 거래되어지는 제약과 운전하는 동안 의무적인 제약인 거래되지않는 제약으로 분류하여 거래되지않는 제약(nontradable constraints)과 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)조건으로부터 유도되는 모션증분비용을 다양한 구성요소에서 분해하였다.

**2.2.1 제약조건의 분류**

경제적인 견해로부터, 라그랑지안 함수는 운전비용의 합과 제약조건에 관련된 비용이 더해진 것이다. 라그랑지안 함수에서 각 발전기의 증분비용은 다른 제약에 의한 증분비용과 분리되어야 하는 중요한 요소이다. 또한 제약조건들이 모션증분비용에 미치는 영향을 결정하기 위하여 모션증분비용을 분해할때는 라그랑지안 함수안에 있는 모든제약조건들중에서 관심을 가지는 구성요소를 결정해야 한다. 그러므로 수급조건과 같이 시장안에서 거래될 수 없는 제약인 nontradable constraints과 시장가격을 가지는 제약인 tradable constraints로 분류하였다. 이와같이 두 종류의 제약으로 분류하여 최적조건 식(2.7)~식(2.10)을 표현하면 식(2.17), 식(2.18)이 된다.

$$\frac{\partial L(X, \lambda, \rho, P, Q)}{\partial X_i} = \frac{\partial f(P)}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} + U(X, \alpha, P, Q) = 0 \quad (2.17)$$

$$M(X, P, Q) = 0 \quad (2.18)$$

여기서,  $U(X, \alpha, P, Q) = \lambda_{P_{\beta,i}} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} + \lambda_{Q_{\beta,i}} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} - \rho_{P_{\beta,i}} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} + \rho_{P_{\alpha,i}} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} - \rho_{Q_{\alpha,i}} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} + \rho_{Q_{\beta,i}} \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} - \rho_{V_{\beta,i}} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{V_{\alpha,i}} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{T_i} \frac{\partial T_i}{\partial X_i} = \alpha \frac{\partial M}{\partial X_i} + \beta \frac{\partial N}{\partial X_i}$

단,  $M$  : nontradable constraints  
 $N$  : tradable constraints  
 $\alpha$  : nontradable constraints와 관련된 라그랑지안 승수  
 $\beta$  : tradable constraints와 관련된 라그랑지안 승수

**2.2.2 모션증분비용 분해요소 계산**

증분비용 분해요소를 구하기 위해 음함수 이론에 의해 정의된  $(P, Q)$ 의 함수로써  $X(P, Q)$ 과  $\alpha(P, Q)$ 를 사용해 식(2.17)과 식(2.18)를 재구성하면 식(2.19)가 된다.

$$\frac{\partial f(X(P, Q), P, Q)}{\partial X} + U(X(P, Q), \alpha(P, Q), P, Q) = 0 \quad (2.19)$$

$M(X(P, Q), P, Q) = 0$   
 또한 라그랑지안 함수 식(2.7)를 식(2.20)으로 재구성하여 모션증분비용을 구하면 식(2.21)이 된다.

$$L(X(P, Q), \alpha(P, Q), P, Q) = f(X(P, Q), P, Q) + \alpha(P, Q)M(P, Q, P, Q) + \beta N(X(P, Q), P, Q) \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial L(X(P, Q), \alpha(P, Q), P, Q)}{\partial P_i} = \left( \frac{\partial f(X(P, Q), P, Q)}{\partial P_i} + \frac{\partial X(X(P, Q), P, Q)}{\partial P_i} \right)$$

$$\begin{aligned}
 & + \left( \frac{\partial \alpha(P, Q)}{\partial P_i} M(X(P, Q), P, Q) + \alpha(P, Q) \left( \frac{\partial M(X, P, Q)}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial P_i} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\partial M(X, P, Q)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P_i} \right) \right) + \beta \left( \frac{\partial M(X, P, Q)}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial P_i} + \frac{\partial M(X, P, Q)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P_i} \right) \quad (2.21)
 \end{aligned}$$

여기서 식 (2.21)에서 직접계산되지 않는 항인  $\frac{\partial X}{\partial P_i}$ 를 구해야 하는데 음함수 이론에 의해서 식(2.22)가 가정되어지며 식(2.23)의 선택함수를 통해 구해질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} + \frac{\partial U}{\partial X} \frac{\partial U}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial M}{\partial X} & 0 \end{bmatrix} \neq 0 \quad (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} f_{XX} + U_X \cdot U_\alpha \\ M_X & 0 \end{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial P_i} = \begin{bmatrix} -f_{X\alpha_i} - U_{\alpha_i} \\ -M_{\alpha_i} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

이를 정리하면 식(2.24)와 같다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L(X(P, Q), \alpha(P, Q), P, Q)}{\partial P_i} & = \left( \frac{\partial f(X, P, Q)}{\partial P_i} \frac{\partial X}{\partial P_i} + \frac{\partial f(X, P, Q)}{\partial P_i} \right) \\
 & + \beta \left( \frac{\partial M(X, P, Q)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P_i} + \frac{\partial M(X, P, Q)}{\partial P_i} \right) \quad (2.24)
 \end{aligned}$$

따라서 발전기 출력과 tradable constraint과 관련된 항은 각 요소의 합으로 구성되어 있으므로  $i$ 모선에서의 증분비용은 식(2.25)가 되므로 관심량에 대한 각각의 요소를 구할 수 있다.

$$\pi_{\alpha_i} = \sum_{j=1}^N \left( \frac{\partial f_j}{\partial X} \right) \left( \frac{\partial X}{\partial P_i} \right) + \sum_{k=1}^M \beta_k \left( \left( \frac{\partial N_k}{\partial X} \right) \left( \frac{\partial X}{\partial P_i} \right) + \left( \frac{\partial N_k}{\partial P_i} \right) \right) \quad (2.25)$$

단,  $\left( \frac{\partial f_j}{\partial X} \right) \left( \frac{\partial X}{\partial P_i} \right) + \left( \frac{\partial f_j}{\partial P_i} \right)$ :  $f_j$ 의 발전기 비용에 대한 분해요소  
 $\beta_k \left( \left( \frac{\partial N_k}{\partial X} \right) \left( \frac{\partial X}{\partial P_i} \right) + \left( \frac{\partial N_k}{\partial P_i} \right) \right)$ : tradable constraint  $N$ 에 대한 분해요소

### 3. 사례 연구

본연구에서는 제한한 알고리즘을 전체부가 총261.7[Mw]인 IEEE RTS-30 모델계통을 적용하여 최적조류계산을 통한 모선가격과 조류계산의 해인 상태변수를 이용한 모선증분비용을 산정하여 비교하였다. 표1에서 ①은 최적조류계산결과 나온 잠재가격을 이용해 모선증분비용을 산정하고 분해하였으며 ②는 부하가 큰 5번 모선의 부하를 94.2[Mw]에서 89.2[Mw]로 전체부하의 작은 비율(0.02)로 변화시켜 계통상태로부터 모선증분비용을 산정하고 분해하였다. 분해요소는 발전기 출력과 Binding된 제약을 모두 tradable constraints로 하였다.

표1. 모선증분비용 분해

모선 번호	부하	발전기 출력과 관련된 비용		Binding된 제약과 관련된 비용						모선 증분비용
		1번 발전기	2번 발전기	22번 모선의 전압	27번 모선의 전압	29번 모선의 전압	1번 발전기 출력제한	2번 발전기 출력제한	2번 모선	
1	①	10.939	8.371	0.588	0.337	-0.007	-0.005	-0.027	0.512	20.7693
	②	14.084	5.924	-0.152	-0.393	-0.082	-0.086	0.005	0.653	20.1609
2	①	12.409	8.710	1.200	0.354	-0.177	-0.148	-0.066	0.410	20.6924
	②	9.398	5.039	3.370	2.453	0.073	0.081	-0.167	-0.242	20.1835
3	①	7.743	3.610	5.229	3.558	0.142	0.129	-0.241	0.221	20.3910
	②	3.257	8.214	5.078	3.438	0.090	0.104	-0.238	-0.084	20.1465
4	①	4.189	5.964	6.049	3.909	0.095	0.090	-0.282	0.365	20.3779
	②	2.077	8.613	5.784	3.654	0.039	0.050	-0.277	-0.053	20.302
5	①	1.380	23.368	-1.454	-2.200	-0.488	-0.425	0.029	1.429	21.6385
	②	9.139	11.188	1.036	0.153	-0.145	-0.161	-0.086	-0.235	21.2815
18	①	3.394	10.047	7.146	0.159	-0.087	-0.094	-0.317	0.614	20.8612
	②	6.363	6.110	7.811	0.816	-0.003	-0.020	-0.360	-0.164	20.7676
19	①	2.991	9.546	8.346	-0.082	-0.104	-0.105	-0.411	0.584	20.7657
	②	6.084	5.445	9.035	0.587	-0.014	-0.029	-0.458	-0.156	20.6839
20	①	2.691	8.237	9.452	0.311	-0.072	-0.067	-0.472	0.504	20.5840
	②	4.847	5.592	9.847	0.699	-0.017	-0.022	-0.508	-0.125	20.5096
21	①	0.214	1.036	19.105	0.544	-0.244	-0.105	-1.458	0.083	19.1533
	②	0.084	1.126	19.056	0.571	-0.179	-0.100	-1.499	-0.002	19.0967
29	①	0.052	1.049	-0.619	19.525	-0.054	-0.035	0.017	0.064	19.9996
	②	1.173	-0.694	-0.275	19.858	-0.009	-0.001	0.001	-0.030	19.9996
30	①	0.174	3.508	-2.070	18.752	-0.181	-0.116	0.058	0.214	20.3383
	②	3.925	-2.322	-0.919	19.864	-0.030	-0.002	0.005	-0.101	20.3383

표 1은 모선증분비용이 결정되기 위해 각 요소들은 어떻게 영향을 주고 있는지를 알 수 있다. 예를 들어 5번모선은 2번 발전기가 모선증분비용에 가장 영향을 많이 주고 있으며 각 분해요소의 발전비용과 보상비용에 의해 결정됨을 알 수 있다. 부하를 작은 비율로 변화시켰을 때 1번 발전기 출력 제약이 하한치에 더 binding되었으며 이는 발전기 출력제약 하한치와 관련된 잠재가격이 모선증분비용에 영향을 주므로 전체적으로 모선증분비용은 감소하였으며 선로피상조류제약을 제외한 분해요소들은 많이 달라졌다. 분해요소중에서 각 모선의 1번발

전기, 22번모선전압제약, 29번선로피상조류제약, 2번발전기출력제약은 그림1~그림4와 같다.

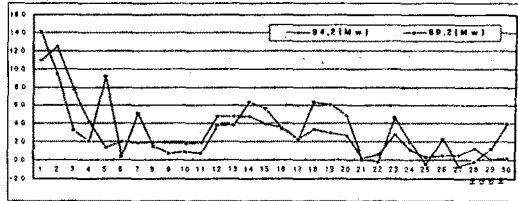


그림1. 각 모선의 1번발전기 분해요소

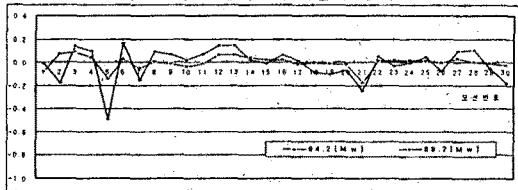


그림2. 각 모선의 22번모선전압제약 분해요소

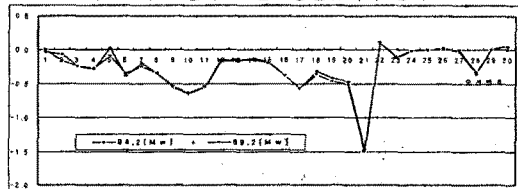


그림3. 각 모선의 29번선로피상조류제약 분해요소

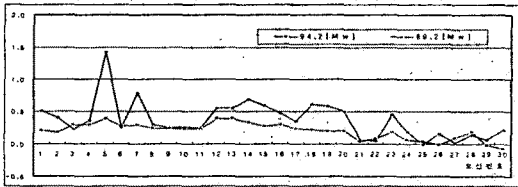


그림4. 각 모선의 2번발전기출력제약 분해요소

### 4. 결론

모선가격산정은 최적조류계산을 통한 잠재가격으로부터 계산되어진다. 하지만 계통이 항상 최적상태에서만 운전되지 않으며 또한 사고 발생시 등과 같이 현재의 운전상태로부터 잠재가격을 계산하여 모선증분비용을 산정할 수 있도록 방법을 제시하였다. 또한 시장참여자가 관심있는 제약에 대한 가격 결정을 할 수 있도록 제약을 분류하여 분해하였다. 이는 모선 증분비용이 어떠한 제한요소로부터 영향을 받고 있는지에 대한 정보를 제공하므로 양질의 전력서비스를 유지할 수 있도록 다양하고 효율적으로 계산할 수가 있다. 이후 이에 기초하여 안정성(stability)과 안전제약(security limit) 등과 같은 제약을 고려해 모선가격을 결정하여 실질적인 각종 정보를 도출하는 작업이 필요할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

"본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (1999-2-302-001-3) 지원 및 동북아전자클러스터 연구센터의 일부지원으로 수행되었음"

#### (참고 문헌)

- (1) Baughman, Martin L.; Siddiqi, Shams N, "Advanced pricing in electrical systems Part I: IEEE Transactions on Power Systems, Feb97, Vol. 12 Issue 1, p496
- (2) Luonan Chen, Suzuki, Hideki Wachi, Tsunehisa, Shimura, Yukihiko "Components of Nodal Prices for Electric Power Systems," IEEE Transactions on Power Systems, Feb2002, Vol. 17 Issue 1, p41, 9p
- (3) El-Keib, A.A.; Ma, X "Calculating short-run marginal costs of active and reactive power production" IEEE Transactions on Power Systems, May97, Vol. 12 Issue 2, p559, 7p