

## A New Approach to Calculation of the Components of Locational Marginal Price

李起松\* · 鄭允源\*\* · 朴宗培† · 愼重麟\*\*\* · 金眞鎬§  
 (Ki-Song Lee · Yun-Won Jeong · Jong-Bae Park · Joong-Rin Shin · Jin-Ho Kim)

**Abstract** - This paper presents a new methodology to draw the components of locational marginal price (LMP) in electricity market. Recently, the changing environments surrounding electricity industries resulted in the unbundled services provided by electricity market players, which may require the new pricing mechanisms based on the LMP. The changed pricing mechanisms will provide the price signals of time and location to the market participants. Most of the existing studies of LMP are based on the Lagrangian multipliers as shadow prices to evaluate the equivalent values of constraints or factors for security, reliability and quality. However, the shadow prices cannot provide enough information for components of LMP. In this paper, therefore, we proposed a new approach that LMP is divided into three components. To do this, we first present the method for shadow prices calculation and then break down LMP into a variety of parts corresponding to the concerned factors. The proposed approach is applied to 5-bus and modified IEEE 14-bus sample system in order to verify its validity.

**Key Words** : Locational Marginal Price, Shadow Price, Components of Locational Marginal Price, Marginal Loss Factor

### 1. 서 론

세계적으로 선진화된 전력시장에서 기본적인 가격결정 방법론은 적용이 간편한 총괄비용법에서 경제적 측면의 최적성이나 제반 계통운용 조건을 반영할 수 있는 한계비용법으로 접근하고 있고 점진적으로 우리나라도 이러한 방향으로 발전할 것으로 판단된다. 이러한 경쟁적 전력시장에서의 가격결정 방법론 변화의 가장 큰 목적은 시장참여자에게 시간과 위치에 따른 시장가격(Locational Marginal Price: LMP) 신호를 제공할 수 있다는 것이고, 이러한 시장가격을 통하여 시장참여자들에게 경제적이고 효율적인 장·단기적 사업운영을 할 수 있는 기반을 제공할 수 있다는 것이다[1]. 이는 F. C. Schweppe 등에 의해 처음으로 제안되었으며, 또한 FERC(Federal Energy Regulatory Commission)의 표준화된 도매시장설계를 위한 기본요소 중의 하나로 제시되고 있다[2].

모선별 한계가격에 대한 지금까지의 이론들은 잠재가격(Shadow Price)의 개념에 기반을 두고 있으며, 이는 구체적으로 라그랑지 승수(Lagrange Multiplier)를 등식 및 부등식

제약조건, 즉 전력수급조건, 안정도, 신뢰도 및 품질의 개선을 위한 제약요소 등의 내재가치화 수치를 의미한다[3]. 이러한 라그랑지 승수는 각각의 등식 및 부등식 제약조건(예를 들면, 송전 혼잡, 전압 제약 등)의 잠재가격을 기반으로 하여 어느 정도의 가치 있는 정보를 제공하였다. 하지만 이러한 잠재가격 정보만으로는 모선별 한계가격이 어떠한 인자에 의하여 영향을 받는지에 대한 정보를 제공하는 데에는 한계성이 존재한다. 즉, 상기 방법론에 의한 모선별 한계가격 도출 방법론은 모선별 전압제약, 선로제약 등이 특정 모선의 한계가격에 얼마나 영향을 주는지를 파악할 수 없다는 한계를 드러내고 있다.

이러한 한계점을 보완하기 위하여 L. Chen 등은 KKT(Karush-Kuhn-Tucker) 조건을 이용하여 에너지 시장에 대한 최적화 문제의 등식 및 부등식 제약조건을 시장가치에 따라 시장에서 거래할 가치가 있는 제약조건(Tradable Goods)과 거래할 가치가 없는 제약조건(Non-tradable Goods)으로 구분하고 모든 제약조건을 모선별 전압과 위상각과 같은 상태변수의 함수로 구성하여 모선별 한계가격의 구성요소를 도출하는 방법론을 제시하였다[3]. 상기 연구의 결과는 시장에서 거래될 가치가 있는 제약조건들만을 고려하여 한계가격을 구성할 수 있다는 점에서 매우 높게 평가되고 있으나, 상기 방법론에는 에너지 시장에 대한 최적화 문제를 수행하여 각 등식 및 부등식 제약조건에 대한 잠재가격을 도출하여야 하고 모선별 한계가격의 분해 결과가 음함수 기반의 함수가 되어 구현하는데 있어 명확하지 못하다는 한계점이 있다. 또한 T. Wu 등은 앞에서 언급한 모선별 한계가격의 구성요소들을 분해하기 위해서 전체 모선에 가상의 발전기가 위치해 있고 이 발전기들의 송전손실에 대한

† 교신저자, 正會員 : 建國大學 電氣工學科 助教授 · 工博  
 E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr

\* 正會員 : 建國大學 電氣工學科 工博

\*\* 正會員 : 建國大學 電氣工學科 博士課程

\*\*\* 正會員 : 建國大學 電氣工學科 教授 · 工博

§ 正會員 : 釜山大學 電氣工學科 助教授 · 工博

接受日字 : 2006年 3月 20日

最終完了 : 2006年 5月 29日

공급비율을 가지고 있다고 가정하여 모선별 한계가격의 구성요소를 분해하는 방법론을 제안하였다[4]. 하지만 상기 방법론은 송전손실 변수를 포함한 최적화 문제를 수행하고 각 등식 및 부등식 제약조건에 대한 잠재가격을 도출하여야 하지만 최적화 문제에서 송전손실 변수가 독립변수로 취급되어 실현 불가능한 해를 찾게 되고, 도출된 최적해에 대한 등식 및 제약조건에 대한 잠재가격을 이용하여 모선별 한계가격을 도출한다는 한계점이 존재한다.

본 논문에서는 모선별 한계가격을 세 가지 구성요소, 즉 손실비용, 혼잡비용, 그리고 전압품질비용으로 분해할 수 있는 새로운 방법론을 제안한다. 이를 위해서 먼저 모선별 한계가격을 포함한 등식과 부등식 제약조건에 대한 잠재가격을 도출할 수 있는 기법을 제시하고, 도출된 잠재가격으로부터 모선별 한계가격의 구성요소를 도출할 수 있는 방법론을 제안하였다. 또한, 본 논문에서 제안하는 방법론의 타당성을 입증하기 위하여 5모선 표본계통과 수정된 IEEE 14모선 표본계통에 적용하여 사례연구를 수행하였다.

2. 모선별 한계가격의 구성요소 분해 방법론

2.1 문제의 정식화

본 논문에서 사용한 AC 최적조류계산의 목적함수와 등식 및 부등식 제약조건은 다음과 같다.

■ 목적함수

$$\min \sum_{k=1}^{n_g} C_k(P_{g,k}) \tag{1}$$

■ 등식 제약조건

$$P_{L,i} - P_{ij}(X) - \sum_{k \in \Omega_i^P} P_{g,k} = 0 \tag{2}$$

$$Q_{L,i} - Q_{ij}(X) - \sum_{k \in \Omega_i^Q} Q_{g,k} = 0$$

■ 부등식 제약조건

$$P_{g,k}^{MIN} \leq P_{g,k} \leq P_{g,k}^{MAX} \tag{3}$$

$$P_{ij}^{MIN} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{MAX}$$

$$V_i^{MIN} \leq V_i \leq V_i^{MAX}$$

여기서,

- $C_k(\cdot)$  발전기-k의 입찰함수,
- $P_{g,k}, Q_{g,k}$  발전기-k의 유·무효 발전량,
- $V$  모선-i의 전압크기
- $P_{L,i}, Q_{L,i}$  모선-i에 연결된 유·무효 부하량,
- $P_{ij}(\cdot), Q_{ij}(\cdot)$  선로-ij의 유·무효 선로조류 함수,
- $X$  각 모선의 상태변수(즉, 모선별 전압크기와 위상각),
- $P_{g,k}^{MIN}, P_{g,k}^{MAX}$  발전기-k의 최소, 최대출력,
- $P_{ij}^{MIN}, P_{ij}^{MAX}$  선로-ij의 유효조류량의 최소, 최대량,
- $V_i^{MIN}, V_i^{MAX}$  모선-i의 전압크기의 최소, 최대값,
- $n_g$  전체 발전기의 수,

$\Omega_i^G$  모선-i에 연결된 발전기 집합.

2.2 잠재가격 도출 방법론

본 논문에서는 모선별 한계가격의 구성요소를 도출하기 위하여, 먼저 모선별 한계가격을 포함한 등식과 부등식 제약조건에 대한 잠재가격 도출방법론을 제시하고자 한다. 우선 본 논문에서 제안한 방법론을 쉽게 접근하기 위해, 아래의 그림과 같이 기준모선이 모선-1에 위치한 단순 3모선 계통의 최적화 방법론에서 잠재가격을 도출할 수 있는 방법론을 제시하고, 이후 일반화된 잠재가격 도출 방법론을 기술하고자 한다.

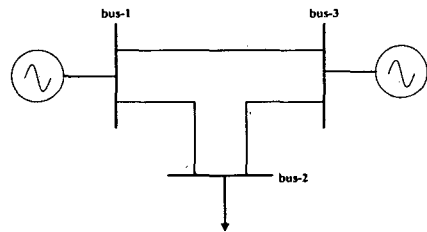


그림 1 단순 3모선 계통  
Fig. 1 3-bus sample system

다음은 본 논문에서 고려한 3모선 계통에 대한 최적화를 위한 라그랑지안 함수이다. 이때 모선-1에서 전압크기의 최대값에 제약이 발생하고, 또한 모선-1에서 모선-3으로 흐르는 유효전력량이 제약이 발생한다고 가정하면, 라그랑지안 함수는 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} L = & C_1(P_{g,1}) + C_3(P_{g,3}) \\ & + \lambda_2^P (P_{L,2} + P_{21}(X) + P_{23}(X)) + \lambda_3^P (P_{32}(X) + P_{31}(X) - P_{g,3}) \\ & + \lambda_1^Q (Q_{12}(X) + Q_{13}(X) - Q_{g,1}) + \lambda_2^Q (Q_{L,2} + Q_{21}(X) + Q_{23}(X)) \\ & + \lambda_3^Q (Q_{32}(X) + Q_{31}(X) - Q_{g,3}) \\ & + \lambda_1^V (P_{12}(X) + P_{13}(X) - P_{g,1}) \\ & + \rho_{13}^{P_{max}} (P_{13}(X) - P_{13}^{MAX}) + \rho_1^{V_{max}} (V_1 - V_1^{MAX}) \end{aligned} \tag{4}$$

여기서,

- $\lambda_i^P$  모선-i에 대한 유효전력 수급방정식에 대한 잠재가격(이때  $\lambda_1^P$ 는 기준모선의 잠재가격),
- $\lambda_i^Q$  모선-i에 대한 무효전력 수급방정식에 대한 잠재가격,
- $\rho_{13}^{P_{max}}$  선로-13의 유효 선로조류량의 최대값에 대한 잠재가격,
- $\rho_1^{V_{max}}$  모선-1의 전압크기의 최대값에 대한 잠재가격.

각 발전기의 유·무효발전량은 본 최적화 문제에서 제어변수가 되며, 각 모선의 전압과 위상각의 크기는 상태변수가 된다. 따라서 각 제어변수와 상태변수에 대한 최적해 존재에 대한 필요조건은 다음과 같다. 이때 본 논문에서는 최적화 과정에서 기준모선의 위상각을 제외하고 모든 모선의 전압의 크기와 위상각은 변할 수 있다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \theta_2} &= \lambda_2^P \left( \frac{\partial P_{21}(X)}{\partial \theta_2} + \frac{\partial P_{23}(X)}{\partial \theta_2} \right) + \lambda_3^P \left( \frac{\partial P_{32}(X)}{\partial \theta_2} \right) \\ &+ \lambda_1^Q \left( \frac{\partial Q_{12}(X)}{\partial \theta_2} \right) + \lambda_2^Q \left( \frac{\partial Q_{21}(X)}{\partial \theta_2} + \frac{\partial Q_{23}(X)}{\partial \theta_2} \right) \\ &+ \lambda_3^Q \left( \frac{\partial Q_{32}(X)}{\partial \theta_2} \right) + \lambda_1^P \left( \frac{\partial P_{12}(X)}{\partial \theta_2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5.a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \theta_3} &= \lambda_2^P \left( \frac{\partial P_{23}(X)}{\partial \theta_3} \right) + \lambda_3^P \left( \frac{\partial P_{32}(X)}{\partial \theta_3} + \frac{\partial P_{31}(X)}{\partial \theta_3} \right) \\ &+ \lambda_1^Q \left( \frac{\partial Q_{13}(X)}{\partial \theta_3} \right) + \lambda_2^Q \left( \frac{\partial Q_{23}(X)}{\partial \theta_3} \right) \\ &+ \lambda_3^Q \left( \frac{\partial Q_{32}(X)}{\partial \theta_3} + \frac{\partial Q_{31}(X)}{\partial \theta_3} \right) + \lambda_1^P \left( \frac{\partial P_{13}(X)}{\partial \theta_3} \right) \\ &+ \rho_{13}^{P_{31}^{\max}} \left( \frac{\partial P_{13}(X)}{\partial \theta_3} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5.b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial V_1} &= \lambda_2^P \left( \frac{\partial P_{21}(X)}{\partial V_1} \right) + \lambda_3^P \left( \frac{\partial P_{31}(X)}{\partial V_1} \right) \\ &+ \lambda_1^Q \left( \frac{\partial Q_{12}(X)}{\partial V_1} + \frac{\partial Q_{13}(X)}{\partial V_1} \right) + \lambda_2^Q \left( \frac{\partial Q_{21}(X)}{\partial V_1} \right) \\ &+ \lambda_3^Q \left( \frac{\partial Q_{31}(X)}{\partial V_1} \right) + \lambda_1^P \left( \frac{\partial P_{12}(X)}{\partial V_1} + \frac{\partial P_{13}(X)}{\partial V_1} \right) \\ &+ \rho_{13}^{P_{31}^{\max}} \left( \frac{\partial P_{13}(X)}{\partial V_1} \right) + \rho_1^{V_{\max}} = 0 \end{aligned} \quad (5.c)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial V_2} &= \lambda_2^P \left( \frac{\partial P_{21}(X)}{\partial V_2} + \frac{\partial P_{23}(X)}{\partial V_2} \right) + \lambda_3^P \left( \frac{\partial P_{32}(X)}{\partial V_2} \right) \\ &+ \lambda_1^Q \left( \frac{\partial Q_{12}(X)}{\partial V_2} \right) + \lambda_2^Q \left( \frac{\partial Q_{21}(X)}{\partial V_2} + \frac{\partial Q_{23}(X)}{\partial V_2} \right) \\ &+ \lambda_3^Q \left( \frac{\partial Q_{32}(X)}{\partial V_2} \right) + \lambda_1^P \left( \frac{\partial P_{12}(X)}{\partial V_2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5.d)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial V_3} &= \lambda_2^P \left( \frac{\partial P_{23}(X)}{\partial V_3} \right) + \lambda_3^P \left( \frac{\partial P_{32}(X)}{\partial V_3} + \frac{\partial P_{31}(X)}{\partial V_3} \right) \\ &+ \lambda_1^Q \left( \frac{\partial Q_{13}(X)}{\partial V_3} \right) + \lambda_2^Q \left( \frac{\partial Q_{23}(X)}{\partial V_3} \right) \\ &+ \lambda_3^Q \left( \frac{\partial Q_{32}(X)}{\partial V_3} + \frac{\partial Q_{31}(X)}{\partial V_3} \right) + \lambda_1^P \left( \frac{\partial P_{13}(X)}{\partial V_3} \right) \\ &+ \rho_{13}^{P_{31}^{\max}} \left( \frac{\partial P_{13}(X)}{\partial V_3} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5.e)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{g,1}} = \frac{dC_1(P_{g,1})}{dP_{g,1}} - \lambda_1^P = 0 \quad (5.f)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{g,3}} = \frac{dC_3(P_{g,3})}{dP_{g,3}} - \lambda_3^P = 0 \quad (5.g)$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{g,1}} = -\lambda_1^Q = 0 \quad (5.h)$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{g,3}} = -\lambda_3^Q = 0 \quad (5.i)$$

상기 열거된 각 방정식들은 각 잠재가격(즉,  $\lambda_i^P$ ,  $\lambda_i^Q$ ,  $\rho_i^{V_{\max}}$  등)의 선형연립방정식이 되기 때문에 다음과 같이 행렬의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial L}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial L}{\partial V_1} \\ \frac{\partial L}{\partial V_2} \\ \frac{\partial L}{\partial V_3} \\ \frac{\partial L}{\partial P_{g,1}} \\ \frac{\partial L}{\partial P_{g,3}} \\ \frac{\partial L}{\partial Q_{g,1}} \\ \frac{\partial L}{\partial Q_{g,3}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0^P & A_0^Q & A_0^{P_R} & A_0^J & 0 \\ A_V^P & A_V^Q & A_V^{P_R} & A_V^J & A_V^V \\ A_C^P & 0 & A_C^{P_R} & 0 & 0 \\ 0 & A_C^Q & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_2^P \\ \lambda_3^P \\ \lambda_1^Q \\ \lambda_2^Q \\ \lambda_3^Q \\ \lambda_1^P \\ \rho_{13}^{P_{31}^{\max}} \\ \rho_1^{V_{\max}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{dC_1(P_{g,1})}{dP_{g,1}} \\ -\frac{dC_3(P_{g,3})}{dP_{g,3}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,

- $A_0^P$   $\partial L/\partial \theta_i$ 의 선형방정식에서  $\lambda_i^P$ 의 계수,
- $A_0^Q$   $\partial L/\partial \theta_i$ 의 선형방정식에서  $\lambda_i^Q$ 의 계수,
- $A_0^{P_R}$   $\partial L/\partial \theta_i$ 의 선형방정식에서  $\lambda_i^P$ 의 계수,
- $A_0^J$   $\partial L/\partial \theta_i$ 의 선형방정식에서  $\rho_{13}^{P_{31}^{\max}}$ 의 계수,
- $A_V^P$   $\partial L/\partial V_i$ 의 선형방정식에서  $\lambda_i^P$  변수의 계수,
- $A_V^Q$   $\partial L/\partial V_i$ 의 선형방정식에서  $\lambda_i^Q$  변수의 계수,
- $A_V^{P_R}$   $\partial L/\partial V_i$ 의 선형방정식에서  $\lambda_i^P$  변수의 계수,
- $A_V^J$   $\partial L/\partial V_i$ 의 선형방정식에서  $\rho_{13}^{P_{31}^{\max}}$  변수의 계수,
- $A_V^V$   $\partial L/\partial V_i$ 의 선형방정식에서  $\rho_1^{V_{\max}}$  변수의 계수,
- $A_C^P$  기준모선에 연결된 발전기를 제외한  $\partial L/\partial P_g$ 의 방정식에서  $\lambda_i^P$ 의 계수,
- $A_C^{P_R}$  기준모선에 연결된 발전기의  $\partial L/\partial P_g$ 의 방정식에서  $\lambda_R^P$ 의 계수,
- $A_C^Q$   $\partial L/\partial Q_g$ 의 방정식에서  $\lambda_i^Q$ 의 계수.

상기 식에서  $A_0^P$ ,  $A_0^Q$ ,  $A_V^P$ ,  $A_V^Q$ 은 기준모선을 제외한 유·무효 유입전력을 모선별 전압과 위상각으로 미분한 행렬이 되며, 다음과 같이 AC 조류계산에서 자코비안 행렬의 전치행렬( $J^T$ )이 된다.

$$\begin{bmatrix} A_0^P & A_0^Q \\ A_V^P & A_V^Q \end{bmatrix} = J^T \quad (7)$$

또한, 기준모선의 유효 유입전력 방정식을 기준모선을 모선-n이라고 가정할 때  $A_0^{P_R}$ ,  $A_V^{P_R}$ 로 이루어진 행렬은 다음과 같이 모선별 전압과 위상각의 크기로 미분한 것이다.

$$A_0^{P_R} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_R}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_R}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_R}{\partial \theta_{n-1}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A_V^{P_R} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_R}{\partial V_1} & \frac{\partial P_R}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_R}{\partial V_n} \end{bmatrix}$$

상기 제시된 식은  $Ax=b$ 의 형태로 나타나는 잠재가격에

대한 선형연립방정식이나 방정식의 개수가 변수의 개수보다 많기 때문에  $a_{ij}$ 의 원소로 구성된 A 행렬의 의사역행렬 (Pseudo Inverse)을 구하여 잠재가격을 쉽게 도출할 수 있다. 또한 상기 식으로부터 발전기가 달려있는 모선(즉, 모선 1과 모선3)의 에너지에 대한 한계가격을 쉽게 도출할 수가 있다. 상기 식에서 라그랑지안 함수를  $P_{g,1}$ 과  $P_{g,3}$ 로 미분한 관계식을 살펴보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial P_{g,1}} &= A_G^{P_1} \lambda_1^P = -\frac{dC_1(P_{g,1})}{dP_{g,1}} \\ \frac{\partial L}{\partial P_{g,3}} &= A_G^{P_3} \lambda_3^P = -\frac{dC_3(P_{g,3})}{dP_{g,3}} \end{aligned} \quad (9)$$

또한, 상기 식으로부터  $A_G^{P_1}$ ,  $A_G^{P_3}$ 의 원소의 값은 -1이기 때문에 발전기가 달려있는 모선의 잠재가격(즉,  $\lambda_1^P$ ,  $\lambda_3^P$ )은 다음과 같이 발전기 제약이 없는 경우 발전기의 한계비용으로 나타나는 것을 알 수 있다.

$$\lambda_1^P = \frac{dC_1(P_{g,1})}{dP_{g,1}}, \quad \lambda_3^P = \frac{dC_3(P_{g,3})}{dP_{g,3}} \quad (10)$$

위의 본 논문에서 제안한 최적화 문제의 잠재가격 도출방법을 일반화하기 위해서 라그랑지안 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이때 최적화 방법론의 부등식 제약조건 중에서 제약이 발생한 제약조건만 고려한다.

$$\begin{aligned} L = & \sum_{k=1}^{n_s} C_k(P_{g,k}) \\ & + \sum_{i=1, i \neq R}^n \lambda_i^P \left( P_{L,i} - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}(X) - \sum_{k \in \Omega_i^C} P_{g,k} \right) \\ & + \sum_{i=1}^n \lambda_i^Q \left( Q_{L,i} - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}(X) - \sum_{k \in \Omega_i^C} Q_{g,k} \right) \\ & + \lambda_R^P \left( P_{L,R} - \sum_{j \in \Omega_R} P_{Rj}(X) - \sum_{k \in \Omega_R^C} P_{g,k} \right) \\ & + \sum_i \sum_j \bar{\rho}_{ij}^{P_{ij}^{\max}} (P_{ij} - P_{ij}^{MAX}) + \sum_i \sum_j \bar{\rho}_{ij}^{P_{ij}^{\min}} (P_{ij}^{MIN} - P_{ij}) \\ & + \sum_i \bar{\rho}_i^{V_i^{\max}} (V_i - V_i^{MAX}) + \sum_i \bar{\rho}_i^{V_i^{\min}} (V_i^{MIN} - V_i) \\ & + \sum_k \bar{\rho}_{P_{g,k}}^{\max} (P_{g,k} - P_{g,k}^{MAX}) + \sum_k \bar{\rho}_{P_{g,k}}^{\min} (P_{g,k}^{MIN} - P_{g,k}) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,

- $\Omega_i$  모선-i에 연결된 모선들의 집합,
- $\Omega_R$  기준모선에 연결된 모선들의 집합,
- $\Omega_i^C$  기준모선에 연결된 발전기들의 집합,
- $\lambda_i^P$  모선-i에 대한 유효전력 수급방정식에 대한 잠재가격,
- $\lambda_i^Q$  모선-i에 대한 무효전력 수급방정식에 대한 잠재가격,
- $\lambda_R^P$  기준모선에 대한 유효전력 수급방정식에 대한 잠재가격,
- $\bar{\rho}_{P_{g,k}}^{\max}, \bar{\rho}_{P_{g,k}}^{\min}$  발전기-k의 발전량이 최대, 최소 발전 제약에 의해 제약이 발생할 때의 잠재가격,
- $\bar{\rho}_{ij}^{P_{ij}^{\max}}, \bar{\rho}_{ij}^{P_{ij}^{\min}}$  선로-ij의 선로조류량이 최대, 최소선로 제약에 의해 제약이 발생할 때의 잠재가격,

$\bar{\rho}_i^{V_i^{\max}}, \bar{\rho}_i^{V_i^{\min}}$  모선-i의 전압크기가 최대, 최소전압제약에 의해 제약이 발생할 때의 잠재가격.

상기 라그랑지안 함수를 이용하여 최적화 문제를 수행하였을 때 최적해 조건하에서 라그랑지안 함수의 라그랑지안 승수 즉, 등식 및 부등식 제약조건에 대한 잠재가격은 다음과 같은 방법을 이용하여 도출할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial L}{\partial V} \\ \frac{\partial L}{\partial P_g} \\ \frac{\partial L}{\partial Q_g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_\theta^P & A_\theta^Q & A_\theta^{P_R} & A_\theta^f & 0 & 0 \\ A_V^P & A_V^Q & A_V^{P_R} & A_V^f & A_V^V & 0 \\ A_G^P & 0 & A_G^{P_R} & 0 & 0 & A_G \\ 0 & A_G^Q & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda^P \\ \lambda^Q \\ \lambda_R^P \\ \bar{\rho}_{P_{ij}}^{P_{ij}^{\max}} \text{ or } \bar{\rho}_{P_{ij}}^{P_{ij}^{\min}} \\ \bar{\rho}_i^{V_i^{\max}} \text{ or } \bar{\rho}_i^{V_i^{\min}} \\ \bar{\rho}_{P_g}^{\max} \text{ or } \bar{\rho}_{P_g}^{\min} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{dC(P_g)}{dP_g} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서,

- $\frac{\partial L}{\partial \theta}$  기준모선을 제외한 모선의 위상각으로 라그랑지안 함수를 미분한 선형방정식 벡터,
- $\frac{\partial L}{\partial V}$  모선 전압으로 라그랑지안 함수를 미분한 선형방정식 벡터,
- $\frac{\partial L}{\partial P_g}$  발전기의 유효 발전변수로 라그랑지안 함수를 미분한 선형방정식 벡터,
- $\frac{\partial L}{\partial Q_g}$  발전기의 무효 발전변수로 라그랑지안 함수를 미분한 선형방정식 벡터,
- $A_\theta^P$   $\partial L/\partial \theta$ 의  $\lambda^P$ 의 계수,
- $A_\theta^Q$   $\partial L/\partial \theta$ 의  $\lambda^Q$ 의 계수,
- $A_\theta^{P_R}$   $\partial L/\partial \theta$ 의  $\lambda_R^P$ 의 계수,
- $A_\theta^f$   $\partial L/\partial \theta$ 의  $\rho_{ij}^{P_{ij}^{\max}}$ 와  $\rho_{ij}^{P_{ij}^{\min}}$ 의 계수,
- $A_V^P$   $\partial L/\partial V$ 의  $\lambda^P$ 의 계수,
- $A_V^Q$   $\partial L/\partial V$ 의  $\lambda^Q$ 의 계수,
- $A_V^{P_R}$   $\partial L/\partial V$ 의  $\lambda_R^P$ 의 계수,
- $A_V^f$   $\partial L/\partial V$ 의  $\rho_{ij}^{P_{ij}^{\max}}$  혹은  $\rho_{ij}^{P_{ij}^{\min}}$  변수의 계수,
- $A_V^V$   $\partial L/\partial V$ 의  $\rho_i^{V_i^{\max}}$  혹은  $\rho_i^{V_i^{\min}}$  변수의 계수,
- $A_G^P$   $\partial L/\partial P_g$ 의  $\lambda_i^P$ 의 계수,
- $A_G^{P_R}$   $\partial L/\partial P_g$ 의  $\lambda_R^P$ 의 계수,
- $A_G^Q$   $\partial L/\partial Q_g$ 의  $\lambda_i^Q$ 의 계수.
- $A_G$   $\partial L/\partial P_g$ 의  $\bar{\rho}_{P_g}^{\max}$  혹은  $\bar{\rho}_{P_g}^{\min}$ 의 계수,
- $\lambda^P$  기준모선을 제외한 유효 등식제약조건에 대한 잠재가격 벡터,
- $\lambda^Q$  모든 모선의 무효 등식제약조건에 대한 잠재가격 벡터,
- $\lambda_R^P$  기준모선의 유효 등식제약조건에 대한 잠재가격 벡터,
- $\bar{\rho}_{P_{ij}}^{P_{ij}^{\max}}, \bar{\rho}_{P_{ij}}^{P_{ij}^{\min}}$  최대, 최소 선로제약이 발생한 제약조건에 대한 잠재가격 벡터,
- $\bar{\rho}_i^{V_i^{\max}}, \bar{\rho}_i^{V_i^{\min}}$  모선별 최대, 최소 전압제약이 발생한 제약조건에 대한 잠재가격 벡터,

$\bar{\rho}_{P_g}^{\max}, \bar{\rho}_{P_g}^{\min}$  발전기별 최대, 최소 발전제약이 발생한 제약조건에 대한 잠재가격 벡터.

여기서도 상기 식과 마찬가지로  $A_{\theta}^P, A_{\theta}^Q, A_V^P, A_V^Q$ 로 이루어진 행렬은 AC 조류계산의 자코비안 행렬의 전치행렬이 되고  $A_{\theta}^{P_R}, A_V^{P_R}$ 로 이루어진 행렬은 기준모선의 유효 유입전력 방정식을 모선별 전압과 위상각의 크기로 미분한 것이다. 상기 식에서 모선별 한계가격에 영향을 줄 수 있는 등식 및 부등식 제약조건에 대한 잠재가격을 도출하기 위해서는 모선별 전압과 위상각의 크기와 각 발전기의 발전량 정보만 주어지면 된다. 또한 마찬가지로 모든 모선에 가상의 발전기가 달려있다고 가정할 때 모선의 등식 제약조건에 대한 잠재가격은 상기 단순 3모선 계통의 예와 마찬가지로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial L}{\partial P_g} = [A_G^P \ A_G^Q] \begin{bmatrix} \lambda_1^P \\ \lambda_1^Q \end{bmatrix} + A_G(\bar{\rho}_{P_g}^{\max} \text{ or } \bar{\rho}_{P_g}^{\min}) = -\frac{dC(P_g)}{dP_g} \quad (13)$$

상기 식에서 발전제약에 대한 제약이 발생하지 않으면 발전기가 달려있는 모선의 한계가격은 상기 단순 3모선 예제와 마찬가지로 발전기의 한계비용과 동일하게 된다.

### 2.3 모선별 한계가격의 구성요소 분해 방법론

앞에서 제시한 등식 및 부등식 제약조건에 대한 잠재가격 도출 방법론을 통해 모선별 한계가격의 구성요소는 다음과 같이 분해가 가능하게 된다. 앞의 3모선 예제의 최적화를 수행하기 위한 라그랑지안 함수를 상태변수(즉, 모선별 전압 크기와 위상각, 이때 기준모선의 위상각은 고려하지 않음)만을 이용하여 편미분한 식 (5.a)~(5.e)는 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial L}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial L}{\partial V_1} \\ \frac{\partial L}{\partial V_2} \\ \frac{\partial L}{\partial V_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\theta}^P & A_{\theta}^Q & A_{\theta}^{P_R} \\ A_V^P & A_V^Q & A_V^{P_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_2^P \\ \lambda_2^Q \\ \lambda_1^P \\ \lambda_1^Q \\ \lambda_3^P \\ \lambda_3^Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rho_1^{V, \max} - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\partial P_{13}}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial P_{13}}{\partial V_1} \\ 0 \\ \frac{\partial P_{13}}{\partial V_3} \end{bmatrix} \rho_{13}^{P, \max} \quad (14)$$

앞에서 언급한 바와 같이 상기 식에서  $A_{\theta}^P, A_{\theta}^Q, A_V^P, A_V^Q$ 로 이루어진 행렬은 AC 조류계산의 자코비안 행렬의 전치행렬이 되고  $A_{\theta}^{P_R}, A_V^{P_R}$ 로 이루어진 행렬은 기준모선의 유효 유입전력 방정식을 모선별 전압과 위상각의 크기로 미분한 것이다. 따라서 상기 식은 다음과 같이 전개가 된다.

$$\begin{bmatrix} J^T & A_{\theta}^{P_R} \\ & A_V^{P_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_2^P \\ \lambda_3^P \\ \lambda_1^Q \\ \lambda_2^Q \\ \lambda_3^Q \\ \lambda_1^P \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rho_1^{V, \max} - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\partial P_{13}}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial P_{13}}{\partial V_1} \\ 0 \\ \frac{\partial P_{13}}{\partial V_3} \end{bmatrix} \rho_{13}^{P, \max} \quad (15)$$

상기 식은 다음과 같이 전개가 가능하다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_2^P \\ \lambda_3^P \\ \lambda_1^Q \\ \lambda_2^Q \\ \lambda_3^Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A_{\theta}^{P_R} \\ A_V^{P_R} \end{bmatrix} \lambda_1^P - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rho_1^{V, \max} - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\partial P_{13}}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial P_{13}}{\partial V_1} \\ 0 \\ \frac{\partial P_{13}}{\partial V_3} \end{bmatrix} \rho_{13}^{P, \max} \quad (16)$$

상기 식에서 자코비안 행렬의 역행렬을 구하여 전개하면 다음과 같은 식으로부터 모선별 한계가격에 영향을 주는 구성요소를 분해할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_2^P \\ \lambda_3^P \\ \lambda_1^Q \\ \lambda_2^Q \\ \lambda_3^Q \end{bmatrix} = - [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} A_{\theta}^{P_R} \\ A_V^{P_R} \end{bmatrix} \lambda_1^P - [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rho_1^{V, \max} - [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\partial P_{13}}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial P_{13}}{\partial V_1} \\ 0 \\ \frac{\partial P_{13}}{\partial V_3} \end{bmatrix} \rho_{13}^{P, \max} \quad (17)$$

상기 3모선용 기준으로한 모선별 한계가격의 구성요소의 분해방법론을 일반화하기 위하여, 앞의 잠재가격을 도출하기 위한 일반화된 행렬식을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \lambda^P \\ \lambda^Q \end{bmatrix} = - [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} A_{\theta}^{P_R} \\ A_V^{P_R} \end{bmatrix} \lambda_R^P - [J^T]^{-1} [A_V^V] (\bar{\rho}^{V, \max} \text{ or } \bar{\rho}^{V, \min}) - [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} A_{\theta}^f \\ A_V^f \end{bmatrix} (\bar{\rho}_{P_g}^{\max} \text{ or } \bar{\rho}_{P_g}^{\min}) \quad (18)$$

또한 상기 식의 구성요소 중  $- [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} A_{\theta}^{P_R} \\ A_V^{P_R} \end{bmatrix}$ 은 송전손실을 고려한 경제급전을 수행할 때 필요한 페널티계수의 역수가 되며, 현재 경쟁적 전력시장에서는 이 페널티계수의 역수를 한계송전손실계수(Marginal Loss Factor: MLF)로 명명하고 다음과 같이 정의하여 사용하고 있다[5,6].

$$MLF_i = 1 + \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{L,i}} \quad (19)$$

여기서,

$P_{loss}$  송전계통의 전체손실,

$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{L,i}}$  모선-i의 부하증가량에 대한 계통전체 손실증가량.

따라서 모선별 한계가격의 구성요소는 다음과 같이 분해될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \lambda^P \\ \lambda^Q \end{bmatrix} = [MLF] \lambda_R^P - [J^T]^{-1} [A_V^V] (\bar{\rho}^{V, \max} \text{ or } \bar{\rho}^{V, \min}) - [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} A_{\theta}^f \\ A_V^f \end{bmatrix} (\bar{\rho}_{P_g}^{\max} \text{ or } \bar{\rho}_{P_g}^{\min}) \quad (20)$$

일반적으로 모선별 한계가격은 손실비용과 혼잡비용 두 가지 요소로 구성되어 있다고 한다[7]. 하지만 본 논문에서 제안된 방법론에 의해 도출된 상기 식으로부터 모선별 한계가격은 한계송전손실계수가 고려된 손실비용과 선로혼잡과 관련된 잠재가격( $\bar{\rho}_{P_g}^{\max}, \bar{\rho}_{P_g}^{\min}$ )이 포함된 혼잡비용에 추가하

여 전력계통의 전력공급의 품질과 관련된 모선별 전압크기와 관련된 잠재가격( $\bar{\rho}^{V_{max}}, \bar{\rho}^{V_{min}}$ )이 포함된 전압품질비용도 포함된다고 할 수 있다. 또한 상기 식으로부터 발전기별 발전량과 관련된 정보를 제외하고 모선별 한계가격의 구성요소를 도출하기 위해서는 각 모선의 상태변수(모선별 전압크기와 위상각)와 전력조류계산의 자코비안 행렬, 기준모선의 등식제약조건에 대한 잠재가격, 부등식 제약조건에 대한 잠재가격만 주어지면 도출이 가능하다.

### 3. 사례연구

본 논문에서 제안한 방법론들의 효용성을 입증하기 위해서 5모선 표본계통과 수정된 IEEE 14모선 표본계통에 대해 다음과 같이 사례연구를 수행하였다. 상기 표본계통에 대한 사례연구는 GAMS의 모듈 중 CONOPT를 이용하여 수행하였다.

#### 3.1 5모선 표본계통 사례

##### 3.1.1 5모선 표본계통의 입력데이터

아래의 그림 2는 5모선 표본계통이다.

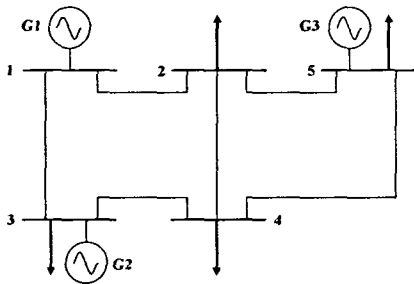


그림 2 5모선 표본계통도  
Fig. 2 5-bus sample system

표 1-3은 상기 5모선 표본계통에 대한 모선, 송전선로, 발전기 데이터 및 전압, 송전용량, 발전 제약에 나타낸다.

표 1 5모선 표본계통의 모선 데이터

Table 1 Bus data of 5-bus sample system

모선	초기전압	초기 위상각	전압제약		부하량	
			최대	최소	MW	MVar
1	1.04	0	1.05	0.9	0	0
2	1	0	1.05	0.9	70	70
3	1.03	0	1.05	0.9	25	25
4	1	0	1.05	0.9	25	25
5	1	0	1.05	0.9	30	30

표 2 5모선 표본계통의 발전기 데이터

Table 2 Generator data in 5-bus sample system

발전기명	모선	에너지 입찰가격데이터		발전제약	
		$a_i$	$b_i$	최소	최대
G1	1	7.92	0.001562	30	150
G2	3	7.85	0.00194	20	100
G3	5	7.97	0.00482	5	80

표 3 5모선 표본계통의 선로 데이터

Table 3 Line data of 5-bus sample system

선로 번호	모 선		저항	선로리액 팁스	송전용량제약	
	From	To			MAX	MIN
1	1	2	0.012	0.2	55	-55
2	1	3	0.013	0.25	55	-55
3	3	4	0.01	0.25	55	-55
4	2	5	0.02	0.2	55	-55
5	2	4	0.025	0.15	55	-55
6	4	5	0.012	0.15	55	-55

상기 데이터에서 에너지 시장에 다음과 같이 입찰가격을 제시한다고 가정하였으며, 각 발전기의 증감발율(Ramp Rate)은 동일하다고 가정하였다.

$$C_i = a_i + 2 \times b_i \times P_{G_i} \quad (21)$$

또한 상기 계통의 기준모선은 모선-1에 위치해 있으며 100MW를 기준값(Base)으로 설정하여 사례연구를 수행하였다.

##### 3.1.2 5모선 표본계통 최적화 결과

상기 데이터를 이용하여 5모선 표본계통에 대한 에너지 최적급전에 따른 발전기별 발전량 결과는 아래의 표 4와 같다. 아래의 결과로부터 5모선 표본계통의 발전량은 자신의 최대·최소 발전제약을 위반하지 않음을 알 수 있다.

표 4 각 발전기의 발전량 결과

Table 4 Results of generation at each generator

발전기명	모선	발전량	
		MW	Mvar
G1	1	57.338	36.811
G2	3	67.703	51.722
G3	5	25.977	76.691

아래의 표 5는 각 송전선로에서의 선로조류량을 나타낸다. 표 5에서 보는 바와 같이, 선로-12에서 최대 송전용량제약에 구속되었음을 알 수 있다.

표 5 각 송전선로의 선로조류량 결과

Table 5 Results of line flow at each transmission line

모 선		선로조류량	
From	To	MW	Mvar
2	4	-11.963	-11.755
2	5	-3.515	-29.280
2	1	-54.522	-28.965
3	4	45.040	26.595
3	1	-2.338	0.128
4	2	12.036	12.166
4	3	-44.792	-21.632
4	5	7.756	-15.535
5	2	3.696	30.642
5	4	-7.719	16.049
1	2	55.000	36.926
1	3	2.338	-0.115

표 6은 각 모선에서의 전압 및 위상각을 보여주며, 그 결과로부터 모선-1과 모선-3은 최대 전압제약조건에 구속되었음을 알 수 있다.

표 6 각 모선에서의 전압 및 위상각 결과  
Table 6 Voltage magnitude and angle at each bus

모선	전압	위상각(rad)
1	1.050	0.000
2	0.979	-0.103
3	1.050	-0.005
4	0.999	-0.089
5	1.024	-0.104

표 4-6의 결과로부터 상기 5모선 표본계통은 모선-1과 모선-3에서 최대 전압제약이 발생하고 또한 선로-12에서 최대 선로제약이 발생함을 알 수 있다. 따라서 이러한 제약과 등식제약조건에 대한 잠재가격을 본 논문에서 제안한 방법론과 GAMS에서 도출한 결과와 비교하면 다음과 같다.

표 7 5모선 표본계통에서의 잠재가격 결과  
Table 7 Results of shadow price in 5-bus sample system

제안방법 (\$/MWh)	GAMS (\$/MWh)	GAMS(pu) (\$/MWh)	오차 (%)	
$\lambda_1^P$	8.0991	809.9125	8.0991	0.002
$\lambda_2^P$	8.2422	824.2165	8.2422	0.003
$\lambda_3^P$	8.1127	811.2686	8.1127	0.001
$\lambda_4^P$	8.1937	819.3749	8.1937	0.005
$\lambda_5^P$	8.2204	822.0418	8.2204	0.002
$\lambda_1^Q$	0.0925	9.2518	0.0925	0.000
$\lambda_2^Q$	0.0000	0.0000	0.0000	0.000
$\lambda_3^Q$	0.0388	3.8756	0.0388	0.000
$\lambda_4^Q$	0.0000	0.0000	0.0000	0.000
$\lambda_5^Q$	0.0000	0.0000	0.0000	0.000
$\rho_1^{V_{max}}$	0.0343	-3.4287	-0.0343	0.000
$\rho_3^{V_{max}}$	0.0203	-2.0287	-0.0203	0.000
$\rho_{12}^{P_{max}}$	0.1626	-16.2631	-0.1626	0.000

위 결과에서 "제안방법"은 본 논문에서 제안한 방법론에 의해 도출한 결과이고 "GAMS"는 GAMS 내부에서 계산한 결과이다. "GAMS(pu)"는 현재 5모선 계통의 기준값이 100MW이기 때문에 "GAMS"의 결과를 이 기준값으로 나눈 결과이고 "오차"는 제안 방법론의 결과와 "GAMS(pu)" 결과를 비교한 것이다. 상기 결과의 "오차"를 보면 본 논문에서 제안한 방법론의 결과와 "GAMS"의 결과가 동일함을 알 수 있다. 상기 결과를 이용하여 모선별 한계가격의 구성요소는 현재 사례계통이 전압과 선로제약에 걸렸기 때문에 본 논문에서 제안한 방법론에 의하면 다음의 표 8과 같이 도출된다. 이때 기준모선은 모선-1이고, 모선-1의 유효전력 등식 방정식의 잠재가격은 8.0991\$/MWh 이다.

표 8 모선별 한계가격 구성요소 결과  
Table 8 Components of nodal prices

	제안 방법				잠재가격 (\$/MWh)	오차 (%)
	손실 (\$/MWh)	혼잡 (\$/MWh)	전압 (\$/MWh)	합계 (\$/MWh)		
$\lambda_2^P$	8.155	0.025	0.062	8.242	8.242	0.000
$\lambda_3^P$	8.099	0.011	0.003	8.113	8.113	0.000
$\lambda_4^P$	8.122	0.020	0.052	8.194	8.194	0.000
$\lambda_5^P$	8.138	0.023	0.059	8.220	8.220	0.000
$\lambda_1^Q$	-0.215	0.000	0.308	0.093	0.093	0.000
$\lambda_2^Q$	-0.268	0.000	0.268	0.000	0.000	0.000
$\lambda_3^Q$	-0.259	0.000	0.297	0.039	0.039	0.000
$\lambda_4^Q$	-0.282	0.000	0.282	0.000	0.000	0.000
$\lambda_5^Q$	-0.264	-0.001	0.265	0.000	0.000	0.000

상기 결과에서 "손실"과 "혼잡"은 송전손실과 송전선로 혼잡이 각각 모선별 한계가격에 얼마나 영향을 주는지를 나타낸다. "전압"은 전압제약조건에 구속됨으로써 모선별 한계가격에 얼마만큼의 영향을 주는지를 보여준다. 그리고 "잠재가격"은 상기에서 본 논문에서 도출한 방법론에 의한 모선별 한계가격의 결과이고, "오차"는 "합계"와 "잠재가격"의 차이이다. 위 결과로부터 본 논문에서 제안한 방법론에 의해 도출된 모선별 한계가격의 구성요소들의 합이 실제 GAMS 등의 최적화 방법론에 의해 도출된 잠재가격과 동일하고, 따라서 본 논문에서 제안한 방법론이 매우 정확하다는 것을 알 수 있다. 또한 상기 결과에서 모선별 한계가격은 송전손실과 선로제약, 전압과 같은 전력품질과 관련된 요인에 의해 결정된다고 볼 수 있다.

### 3.2 수정된 IEEE 14모선 표본계통 사례

#### 3.2.1 수정된 IEEE 14모선 표본계통의 입력데이터

아래의 그림 3은 수정된 IEEE 14모선 표본계통이다.

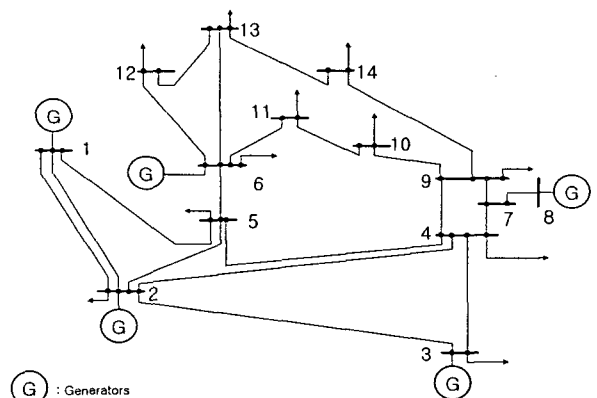


그림 3 수정된 IEEE 14모선 표본계통  
Fig. 3 Modified IEEE 14-bus sample system

다음의 표 9-11은 수정된 IEEE 14모선 표본계통에 대한 모선, 송전선로, 발전기 데이터 및 전압, 송전용량, 발전 제약을 나타낸다.

표 9 수정된 IEEE 14모선 표본계통의 모선 데이터  
Table 9 Bus data of modified IEEE 14-bus sample system

모선	초기전압	초기 위상각	전압제약		부하량	
			최대	최소	MW	MVar
1	1.06	0	1.05	0.9	0	0
2	1.045	0	1.05	0.9	21.7	12.7
3	1.01	0	1.05	0.9	94.2	19
4	1	0	1.05	0.9	47.8	-3.9
5	1	0	1.05	0.9	7.6	1.6
6	1.07	0	1.05	0.9	11.2	7.5
7	1	0	1.05	0.9	0	0
8	1.09	0	1.05	0.9	0	0
9	1	0	1.05	0.9	29.5	16.6
10	1	0	1.05	0.9	9	5.8
11	1	0	1.05	0.9	3.5	1.8
12	1	0	1.05	0.9	6.1	1.6
13	1	0	1.05	0.9	13.5	5.8
14	1	0	1.05	0.9	14.9	5

표 10 수정된 IEEE 14모선 표본계통의 선로 데이터  
Table 10 Line data of modified IEEE 14-bus sample system

선로 번호	모 선		저항	선로 리액턴스	대지 커패시턴스	송전용량제약	
	From	To				MAX	MIN
1	1	2	0.01938	0.05917	0.0528	45	-45
2	2	3	0.04699	0.19797	0.0438	45	-45
3	2	4	0.05811	0.17632	0.0374	45	-45
4	1	5	0.05403	0.22304	0.0492	45	-45
5	2	5	0.05695	0.17388	0.034	45	-45
6	3	4	0.06701	0.17103	0.0346	45	-45
7	4	5	0.01335	0.04211	0.0128	45	-45
8	5	6	0	0.25202	0	45	-45
9	4	7	0	0.20912	0	45	-45
10	7	8	0	0.17615	0	45	-45
11	4	9	0	0.55618	0	45	-45
12	7	9	0	0.11001	0	45	-45
13	9	10	0.03181	0.0845	0	45	-45
14	6	11	0.09498	0.1989	0	45	-45
15	6	12	0.12291	0.25581	0	45	-45
16	6	13	0.06615	0.13027	0	45	-45
17	9	14	0.12711	0.27038	0	45	-45
18	10	11	0.08205	0.19207	0	45	-45
19	12	13	0.22092	0.19988	0	45	-45
20	13	14	0.17093	0.34802	0	45	-45

표 11 수정된 IEEE 14모선 표본계통의 발전기 데이터  
Table 11 Generator data in modified IEEE 14-bus system

발전기명	모선	에너지 입찰가격데이터		발전제약	
		$a_i$	$b_i$	최소	최대
G1	1	18.28	0.0082	10	100
G2	2	18.28	0.0096	20	100
G3	3	18.28	0.0059	10	150
G4	6	18.6	0.006	20	100
G5	8	18.28	0.0087	10	120

3.2.2 수정된 IEEE 14모선 표본계통 최적화 결과

아래의 표 12는 상기 수정된 IEEE 14모선 표본계통에 대한 에너지 최적급전에 따른 발전기별 발전량 결과이며, 각

발전기는 자신의 최대·최소 발전제약을 위반하지 않는다.

표 12 각 발전기의 발전량 결과  
Table 12 Results of generation at each generator

발전기명	모선	발전량	
		MW	Mvar
G1	1	39.822	-0.627
G2	2	41.504	14.774
G3	3	86.448	19.468
G4	6	47.564	16.667
G5	8	45.000	18.549

표 13은 상기 표본계통에 대한 선로조류량 결과를 나타내며, 선로-87에서 최대 송전용량제약조건에 구속되었다.

표 13 각 송전선로의 선로조류량 결과  
Table 13 Results of line flow at each transmission line

모 선		선로조류량	
From	To	MW	Mvar
2	3	12.310	-0.697
2	4	17.732	1.513
2	5	12.988	1.479
2	1	-23.226	-0.221
3	2	-12.245	-1.411
3	4	4.493	1.879
4	2	-17.562	-3.017
4	3	-4.476	-3.693
4	5	-20.448	-0.779
4	7	-9.126	5.465
4	9	3.811	5.924
5	2	-12.897	-3.044
5	4	20.500	0.260
5	6	1.158	5.049
5	1	-16.361	-3.865
6	5	-1.158	-4.986
6	11	10.132	4.064
6	12	8.173	2.533
6	13	19.217	7.556
7	4	9.126	-5.243
7	8	-44.900	-14.764
7	9	35.874	20.007
8	7	45.000	18.549
9	4	-3.811	-5.665
9	7	-35.874	-18.229
9	10	2.521	3.869
9	14	7.665	3.425
10	9	-2.514	-3.851
10	11	-6.486	-1.949
11	6	-10.024	-3.838
11	10	6.524	2.038
12	6	-8.087	-2.354
12	13	1.987	0.754
13	6	-18.947	-7.025
13	12	-1.978	-0.745
13	14	7.425	1.970
14	9	-7.576	-3.235
14	13	-7.324	-1.765
1	2	23.322	-2.387
1	5	16.499	1.760



또한 표 14는 상기 표본계통에 대한 모선별 전압 및 위상각을 보여준다. 아래의 결과에서 모선-1과 모선-8에서 최대 전압제약에 구속되었음을 알 수 있다.

표 14 각 모선에서의 전압 및 위상각 결과

Table 14 Voltage magnitude and angle at each bus

모선	전압	위상각(rad)
1	1.050	0.000
2	1.046	-0.013
3	1.040	-0.035
4	1.033	-0.040
5	1.035	-0.032
6	1.023	-0.035
7	1.022	-0.022
8	1.050	0.052
9	1.001	-0.061
10	0.997	-0.062
11	1.006	-0.051
12	1.007	-0.052
13	1.001	-0.055
14	0.982	-0.077

따라서 표 12-14의 결과로부터 상기 표본계통은 선로-87에서 최대 송전용량제약이 발생하고, 모선-1과 모선-8에서 최대 전압제약이 발생함을 알 수 있다. 따라서 이러한 제약과 등식제약조건에 대한 잠재가격을 본 논문에서 제안한 방법론과 GAMS에서 도출한 결과와 비교하면 다음과 같다.

표 15 수정된 IEEE 14모선 계통에서의 잠재가격 결과

Table 15 Results of shadow price in modified IEEE 14-bus sample system

모선	제안방법 (\$/MWh)	GAMS (\$/MWh)	GAMS(pu) (\$/MWh)	오차 (%)
1	18.933	1893.301	18.933	0.001
2	19.077	1907.696	19.077	0.004
3	19.300	1930.020	19.300	0.020
4	19.425	1942.518	19.425	0.018
5	19.301	1930.070	19.301	0.030
6	19.171	1917.092	19.171	0.008
7	19.492	1949.163	19.492	0.037
8	19.063	1906.300	19.063	0.000
9	19.536	1953.617	19.536	0.017
10	19.599	1959.919	19.599	0.019
11	19.459	1945.938	19.459	0.038
12	19.508	1950.763	19.508	0.037
13	19.635	1963.505	19.635	0.005
14	20.034	2003.415	20.034	0.015

위 결과로부터 본 논문에서 제안 방법론과 GAMS에서 도출된 결과의 차이가 최대 0.038%에서 최소 0.001%이므로 거의 동일함을 알 수 있다. 또한 본 논문에서 제안한 방법론에 의해 수정된 IEEE 14모선 표본계통의 유효전력에 대한 모선별 한계가격 구성요소는 다음과 같다. 이때 기준모선은 모선-1이며, 모선-1에서의 유효전력에 대한 모선별 한계가격은 18.933(\$/MWh)이 된다.

표 16 모선별 한계가격 구성요소 결과

Table 16 Components of nodal prices

모선	제안 방법				잠재가격 (\$/MWh)	오차 (%)
	손실 (\$/MWh)	혼잡 (\$/MWh)	전압 (\$/MWh)	합계 (\$/MWh)		
2	19.056	0.000	0.021	19.077	19.077	0.039
3	19.243	0.000	0.057	19.300	19.300	0.007
4	19.360	0.000	0.065	19.425	19.425	0.006
5	19.248	0.000	0.053	19.301	19.301	0.000
6	19.115	0.000	0.056	19.171	19.171	0.048
7	19.453	0.000	0.038	19.491	19.492	0.058
8	19.536	-0.407	-0.066	19.063	19.063	0.003
9	19.437	0.000	0.099	19.536	19.536	0.026
10	19.496	0.000	0.103	19.599	19.599	0.041
11	19.374	0.000	0.085	19.459	19.459	0.009
12	19.419	0.000	0.089	19.508	19.508	0.025
13	19.539	0.000	0.096	19.635	19.635	0.038
14	19.896	0.000	0.138	20.034	20.034	0.029

위의 결과로부터 본 논문에서 제안한 모선별한계가격의 구성요소 도출 방법론은 송전손실, 선로혼잡, 모선별 전압제약이 모선별 한계가격에 얼마만큼의 영향을 주는지를 정확하게 분석할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문은 에너지 시장의 급전방법론에 의한 모선별 한계가격의 구성요소를 도출할 수 있는 새로운 방법론을 제안한다. 본 논문에서는 모선별 한계가격의 구성요소를 도출하기 위해서, 먼저 모선별 한계가격을 포함한 등식과 부등식 제약조건에 대한 잠재가격을 도출할 수 있는 방법론을 제시하였다. 그리고 제시된 잠재가격 도출방법론을 통해 도출된 잠재가격으로부터 모선별 한계가격의 구성요소를 도출할 수 있는 방법론을 제안하였다. 기존 연구에서는 모선별 한계가격을 손실비용과 혼잡비용만으로 구성한 반면, 본 논문에서 제안한 방법론을 통해 모선별 한계가격은 한계송전손실계수가 고려된 손실비용과 선로혼잡과 관련된 혼잡비용, 그리고 전력공급의 품질과 관련된 모선별 전압이 고려되는 전압품질비용까지도 도출해낼 수 있다. 또한 본 논문은 송전손실을 독립변수로 취급하여 실현불가능한 해를 도출할 가능성이 존재하던 기존 방법론의 한계를 극복하였다. 본 논문에서 제안한 방법론의 효용성을 입증하기 위해, 5모선 표본계통과 수정된 IEEE 14모선 표본계통에 적용하여 그 결과를 비교·분석하였다. 본 논문에서 제시한 잠재가격 도출방법론을 통해 도출된 결과는 최대 0.038%에서 최소 0.0%의 오차를 보이며, 또한 제안된 한계가격 구성요소 도출방법론의 결과는 최대 0.058%에서 최소 0.0%의 오차를 보여 제안된 방법론의 우수성이 증명되었다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법론을 통해 모선별 한계가격의 구성요소를 도출함으로써 시장참여자, 시장운영자 및 시장감시자 등에게 유용한 정보를 제공할 수 있다.

**감사의 글**

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-B-112) 주관으로 수행된 과제임.

**참 고 문 헌**

- [1] F. C. Schweppe, M. C. Caramanis, R. D. Tabors, and R. E. Bohn, Spot Pricing of Electricity, Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [2] US Federal Energy Regulatory Commissions, Remedying Undue Discrimination through Open Access Transmission Service and Standard Electricity Market Design, Docket No. RM01-12-000, 2002.
- [3] L. Chen, H. Suzuki, T. Wachi, and Y. Shimura, "Components of Nodal Prices for Electric Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 17, no. 1, Feb. 2002.
- [4] T. Wu, Z. Alaywan, and A. Papalexopoulos, "Locational Marginal Price Calculation Using the Distributed-Slack Power Flow Formulation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 20, no. 2, May. 2005.
- [5] J. B. Park, J. R. Shin, K. S. Lee, and J. H. Kim, "A New Analytical Approach for Calculation of Generator Marginal Loss Factors", KIEE International Transactions on PE, 12A-2, pp.66-72, 2002.
- [6] 박종배, 이기승, 신중린, 김성수, "무효전력을 고려한 한계송전손실계수 산정 방법론 개발 및 현물시장에의 적용", 전기학회논문지(A), 제52권, 제7호, pp. 429-436, 2003년 7월.
- [7] M. Shahidehpour, H. Yamin, and Z. Li, Market Operations in Electric Power Systems-Forecasting, Scheduling, and Risk Management, IEEE, 2002.

**저 자 소 개**



**이 기 승 (李 起 松)**

1974년 8월 4일생. 2000년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 GS칼텍스(주) 전력사업팀 근무.

Tel : 02-2005-6241  
Fax : 02-3452-9512  
E-mail : c16021@gscaltex.co.kr



**정 윤 원 (鄭 允 源)**

1977년 5월 8일생. 2002년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-458-4778  
Fax : 02-444-1418  
E-mail : ywjeong@konkuk.ac.kr



**박 종 배 (朴 宗 培)**

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 조교수.

Tel : 02-450-3483  
Fax : 02-444-1418  
E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr



**신 중 린 (愼 重 麟)**

1949년 9월 22일생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 교수.

Tel : 02-450-3487  
Fax : 02-444-1418  
E-mail : jrshin@konkuk.ac.kr



**김 진 호 (金 眞 鎬)**

1971년 11월 27일생. 1995년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 현재 부산대학교 공과대학 전기공학과 조교수.

Tel : 051-510-3515  
Fax : 051-513-0212  
E-mail : jinhkim@pusan.ac.kr