

경쟁시장내의 수요자원입찰을 고려한 모선별 한계가격의 구성요소산정 기법

論 文

57-7-6

Calculation for Components of Locational Marginal Price considering Demand-Side Bidding in a Competitive Electricity Market

金 鉉 烘* · 金 眞 鎬† · 朴 宗 培** · 愼 重 麟***

(Hyun-Houng Kim · Jin-Ho Kim · Jong-Bae Park · Joong-Rin Shin)

Abstract - This paper presents a new approach for the evaluation of location marginal prices (LMPs) considering demand-side bidding (DSB) in a competitive electricity market. The stabilization of the electric power supply and demand balance is one of the major important activities in electric power industry. In this paper, we present an analytical method for calculation of LMPs considering DSB, which has opportunity to compete with generating units, as England & Wales Pool's DSB scheme[1]. Also, we propose a new approach that LMP considering DSB is divided into three components. The proposed approach can be used for the evaluation of demand-side bidding into the electricity market and the assessment of the influence of DSB on total production costs and LMPs as well as three components.

Key Words : Location marginal price, Demand-side bid, Shadow price, Congestion cost,

1. 서 론

수직통합, 독점 및 규제 등으로 특정 지어지던 과거의 전력산업은 시장원리의 변화에 따라 경쟁도입, 규제 완화, 민간자본의 참여 등으로 인한 새로운 패러다임으로 변화하고 있다. 이러한 전력산업의 변화는 전력산업의 효율성 향상, 전력요금의 감소, 전력공급 서비스의 향상, 소비자의 선택권을 보장해주며 근본 목적을 두고 있다[2]. 전력의 생산과 소비의 균형은 전력시스템에 있어서 가장 중요한 메커니즘으로 발전기의 탈조, 송전선의 고장과 같은 갑작스러운 사고가 발생하여도 소비자가 원하는 시기에 항상 공급을 해야 하는 의무를 가지고 있다. 전력수급 안정화를 도모하기 위한 기존의 방법은 증가하는 수요에 맞추어 발전설비를 확충하는 것이나, 환경적인 입지난, 발전소 건설의 어려움 등에 의한 제약적인 여건으로 인하여 수요의 증가에 따른 공급을 충족하기에는 상당한 어려움이 나타나고 있다. 제약적인 여건을 극복하기 위해 해외 여러 나라에서 부하관리를 통한 전력수급 안정화를 도모하고 있다[3]. 이러한 방법 중 가장 널리 쓰이고 있는 프로그램에는 직접부하제어와 같은 인센티브 기반 수요반응과 피크요금제와 같은 가격기반의 수요반응이 있다[4]. 수요반응은 전력수급 상황에 따라 적절한 수요자원 활용을 통해 효과적으로 운영을 할 수 있다는 장점을 가질 수 있다. 수요관리 프로그램 중 수요 입찰 프로그램의 경우

도매전력시장에서 입찰을 통해 소비자가 가격에 반응하여 수요를 줄이는 방법으로 수요자원을 하나의 발전자원으로 고려할 수 있다[5]. 우리나라의 경우, 이러한 수요반응 자원의 경제적 가치에 대한 연구가 매우 미흡한 실정이다. 특히 우리나라에서 운영하고 있는 변동비 반영시장에서 해외 선진국에서 운영하고 있는 양방향 시장으로 진화할 경우 부하자원이 입찰을 통해 가격에 반응하여 거래가 되었을 시, 부하자원이 가질 수 있는 가치에 대한 연구가 필요할 것이다. 또한 선진전력시장에서는 총괄 비용법에 의한 가격결정 방법론에서 경제적 측면의 최적성이나 제반 계통운용 조건을 반영할 수 있는 한계 비용법으로 접근하고 있어 점진적으로 우리나라도 이러한 방향으로 발전해야 할 거라 판단된다. 이러한 가격결정 방법론 변화의 가장 큰 목적은 시장참여자에게 시간과 위치에 따른 시장가격(Location Marginal Price:LMP)신호를 제공할 수 있다는 것과 시장참여자로 하여금 경제적인 사업운영을 할 수 있는 기반을 제공하기 때문이다[6]. 초기 수요자원에 대한 연구는 총괄 비용법을 기반으로 하여 수요자원을 단순한 제어형태로 일정한 시간대에 사용하기 위한 인센티브 형태의 연구가 대부분을 차지하였으며[2-7], 최근 일부 논문에서 가격기반의 연구가 진행되고 있다[1,8]. 그러나 이러한 연구들의 대부분이 수요자원을 보조 서비스시장(Ancillary Service Market)에서 운영하는 형태로 일정한 한계를 가지고 있다. 그러나 전력시장 여건의 변화에 따라 수요자원 또한 하나의 발전기와 같은 형태의 제어가 가능하게 되어, 수요자원이 현물시장(Spot Market)자원으로 고려할 수 있게 됨에 따라 추가적인 연구가 필요하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 우리나라의 시장을 양방향 시장으로 가정하여 수요자원을 입찰을 통한 현물시장자원으로 고

† 교신저자, 正會員 : 暎園大學 電氣情報工學 助教授 · 工博

E-mail : kimjh@kyungwon.ac.kr

* 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 副教授 · 工博

*** 正會員 : 建國大學 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2008年 2月 20日

最終完了 : 2008年 6月 3日

려하였으며, [16]에서 제안한 잠재가격 도출방법론을 이용하여 수요반응자원을 단순한 차단형태의 개념에서 입찰을 통한 하나의 발전자원과 같은 개념으로 상정하여 등식과 부등식 제약조건에 대한 해석적인 기법으로 도출하였으며, 도출한 모션별 한계가격을 세 가지의 구성요소로 분해하였다. 이러한 수요반응자원의 지역별 모의를 위해서 IEEE RTS 시스템을 사용하였다[7].

2. 전력시장의 수요자원

2.1 전력시장에서의 수요반응 자원

전력시스템에서의 수요반응(Demand Response :DR)은 전력시장에서 실시간으로 변화하는 가격에 반응하여 최종사용자가 전기사용의 패턴을 변화시키기 위해 고안된 요금제도 또는 시장가격이 변화하거나 계통신뢰도가 위협받는 경우 소비자로 하여금 전기사용 감소를 유도하기 위해 고안된 인센티브 제도로 정의 할 수 있다[8]. 결국 전기를 사용하는 최종사용자의 소비 형태를 변화시키는 모든 형태의 제도를 수요반응의 범위안에 포함할 수 있다. 미국을 중심으로 한 해외 전력시장에서는 두 가지 형태의 수요반응 제도 즉, 경제성 측면의 가격기반 수요반응 프로그램(Tariffs or Price-based Demand Response :PBP)과 신뢰도 측면의 인센티브기반 수요반응 프로그램(Incentive-based Demand Response :IBP)이 운영되고 있다[8]. 인센티브 기반의 수용 반응은 전력계통의 신뢰도에 문제가 되는 비상시에 전력시스템의 운영자가 프로그램에 참여하는 참여자에게 전력을 공급을 중단하거나 직접 제어하는 방법으로 비상시와 같이 일정한 시간대에 사용하기 위하여 참여자에게 일정한 인센티브를 계속적으로 지원해 주어야 한다. 시장기반의 수요반응은 산업부하와 같은 대용량의 소비자 혹은 대규모의 소비자가 자신의 전기사용량을 발전자원과 같이 전력시장에 입찰함으로써 부하를 줄이는 방법으로 시장가격을 결정하는 최종 발전사업자보다 낮은 가격의 입찰이 필요하다. 또한, 그림 1에서 볼 수 있듯이 가격에 탄력적으로 반응하는 전력 수요를 탄력적으로 바꿀 수 있으며, 작은 수요의 변화에도 높은 가격감소의 결과를 이끌어 낼 수 있다[8].

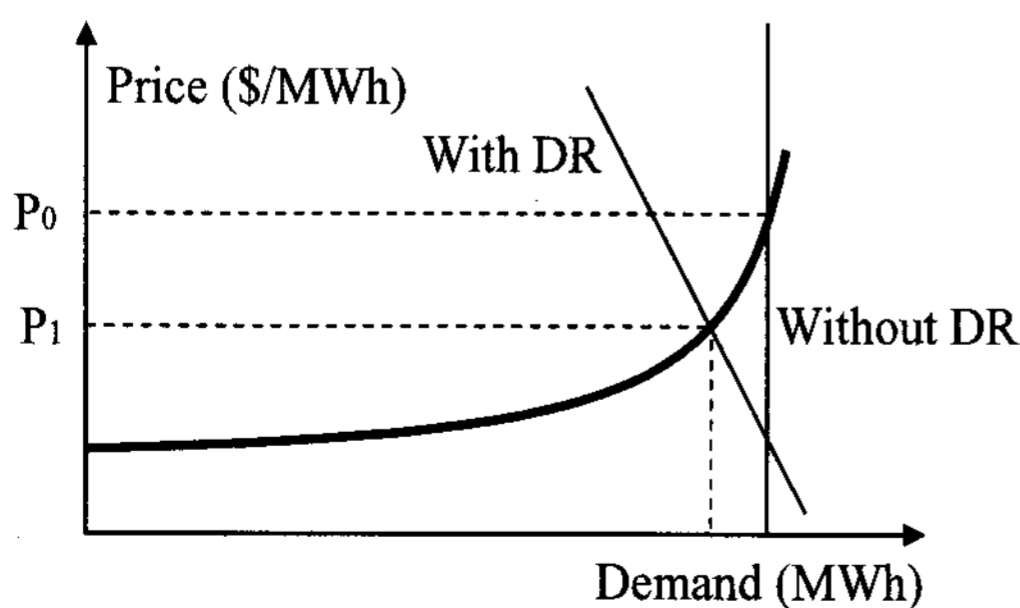


그림 1 DR에 따른 전력시장가격의 영향
Fig. 1 Simplified effect of DR on electricity market prices

현재 우리나라에서는 인센티브기반 형태의 수요관리를 시행하고 있다. 결국 신뢰도나 비상시를 위한 단순한 형태의 제어개념으로 특정한 시간대를 위해 지속적인 인센티브를 지급하고 있다. 그러나 그림 1에서 볼 수 있듯이 수요반응자원을 이용하여 수요의 비탄력적인 문제를 탄력적으로 전환 할 수 있다면 발전기의 건설, 보수와 같은 문제에 있어서 큰 역할을 할 수 있다. 그러나 수요자원입찰은 수요가 시장 가격에 반응하여 입찰하는 개념으로, 자신의 전력사용 시간을 임의적으로 조정하여 전력계통의 총 에너지 사용량에는 변화가 없을 수도 있다. 이러한 문제는 시스템운영자가 수요반응자원의 시간을 조정함으로써 이 문제를 해결할 수 있다. 2.2에서는 시스템 운영자가 수요자원입찰을 어떻게 조정함으로써 수요감소와 회수의 관계를 조정할 수 있는지를 설명한다.

2.2 수요 감소와 회수의 관계

전력시장에 수요관리는 수요가 가장 높은 시간에 적절하게 투입함으로써 수요를 줄일 수 있는 매우 효과적인 방법이다. 그러나 수요관리가 반드시 전력 에너지를 감소시키는 효과를 이끌어 내는 것은 아니다. 경쟁전력시장에서는 시장에 대한 정보가 공개 되어 있어, 대용량의 소비자의 경우 자신의 전력사용량을 탄력적으로 가격에 반응하여 이동시킬 수 있어, 전력의 수요를 재배치시키는 결과로 나타날 수 있다. 결국 수요를 줄이는 기간만큼 역으로 수요가 재배치되어, 부하가 증가하는 기간에는 추가적인 발전이 필요하게 된다. 그러나 부하 입찰시간과 부하 회수 기간을 적절하게 재배치 시켜 회수기간을 줄일 수 있다[1]. 간단한 예를 통해 이를 증명하도록 한다. 그림 2의 A와 B는 입찰을 통해 부하를 줄일 수 있는 대용량 소비자라 가정한다. 이때, 부하입찰, 부하회수의 계수를 -1과 1로 하며, 이에 따른 입찰 시간은 1시간, 회수 시간은 2시간으로 한다. 또한 부하의 입찰시간과 회수 시간은 시스템 운영자에 의해 투입시기를 결정할 수 있으며, 그림 2에서는 30분 간격으로 가정한다.

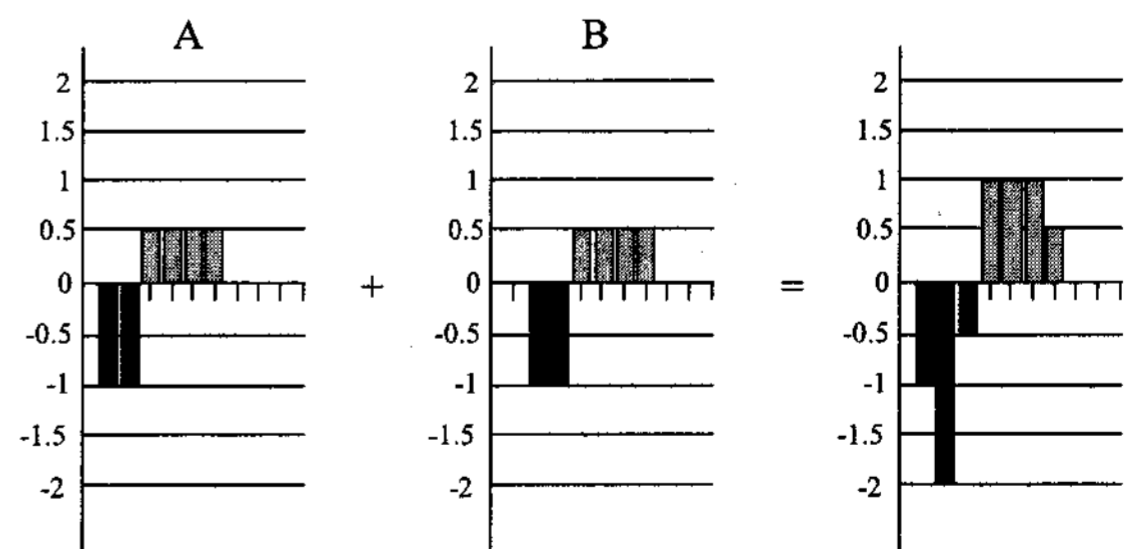


그림 2 부하입찰과 부하회수기간의 혼합에 따른 부하의 총 변화
Fig. 2 Total change in demand with an overlap in load reduction and load recovery

그림 2에서 볼 수 있듯이 A 사업자는 입찰시간을 30분 간격으로 2회 시행하고 있으며, 이에 따른 회수기간은 30분

간격으로 4회 시행한다. B사업자는 A 사업자에 비해 30분 늦게 부하자원을 투입하며, A 사업자와 동일한 방법으로 부하자원을 운영한다. 결국 A, B 두 사업자의 입찰에 의해 부하자원 투입시간을 겹치게 함으로써 부하 회수기간은 2시간으로 일정하지만 수요 감소시간은 1시간 30분으로 늘릴 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 결국 부하 감소시간과 부하 회수기간을 적절하게 재배치 시켜 부하회수기간을 줄일 수 있다. 그러나 에어컨, 난방과 같이 일정한 소비시간을 가지는 부하의 경우, 감소시간과 회수기간이 위에서 설명한 것과 같이 상대적으로 나타나는 것은 아니다. 그러므로 감소시간과 회수기간간의 최적 배치를 위한 추가적인 연구가 필요할 것이다. 본 논문에서는 부하의 입찰에 대한 투입시간은 피크 시간대로 가정하며, 회수기간은 고려하지 않는다. 회수시간을 고려하지 않을 경우 특정한 시간에 대해서만 수요자원입찰을 고려하는 것이 되어 수요자원입찰이 가질 수 있는 자원적 이득에 대해서 왜곡 될 수도 있다. 그러나 위에 설명하였듯이 감소시간과 회수기간을 적절하게 배치함으로써 회수시간을 줄일 수 있으며, 본 논문의 관점은 수요자원입찰이 모선별 한계가격에 어떠한 영향을 줄 수 있는가에 대한 연구이므로, 본 논문에서의 관점에서는 큰 문제가 되지는 않을 것이다.

3. 입찰에 의한 수요자원을 고려한 모선별 한계가격

모선별 한계가격에 대한 대부분의 이론들은 잠재가격에 기반을 두고 있으며, 이는 라그랑지 승수를 등식 및 부등식 제약조건, 즉 전력수급조건, 안정도, 신뢰도 및 품질 개선을 위한 제약 요소 등의 수치화를 의미하였다[9]. 이러한 라그랑지 승수는 각각의 등식 및 부등식 제약조건(예를 들면, 송전혼잡, 전압제약)의 잠재가격을 기반으로 모선별 한계가격을 제공하였으나, 이는 모선별 한계가격이 어떠한 인자에 의하여 영향을 받는지에 대한 한계성이 존재하였다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 [9]에서는 KKT(Karush-Kuhn-Tucker) 조건을 이용하여 에너지 시장에서 최적화 문제의 등식 및 부등식 조건 중 시장에서 거래한 가치가 있는 제약조건을 구분하여 모든 제약조건을 모선별 전압과 위상각과 같은 상태변수의 함수로 구성하여 모선별 한계가격의 구성요소를 도출하는 방법론을 제시하였으나, 모선별 한계가격의 분해결과가 음함수 기반의 함수가 되어 구현하는데 있어 명확하지 못한 한계성이 존재한다. [10,11]는 모선별 한계가격의 구성요소를 분해하기 위해 전체 모선에 가상의 발전기가 위치하고 이 발전기들의 송전손실에 대한 공급비율을 가지고 있다고 가정하여 구성요소를 분해하였으나, 최적화문제에서 송전손실 변수가 독립변수로 취급되어야 한다. 또한 [12]에서는 [13-15]의 모선별 한계가격의 구성요소의 분해를 발전적으로 개선하였지만, 슬랙모선과 상황에 대한 한계성을 주장하였다. 본 논문에서는 수요자원입찰을 고려한 모선별 한계가격을 세 가지 구성요소, 손실비용, 혼잡비용, 전압품질비용으로 분해할 수 있는 방법론을 제안하며, 이를 위해서 수요자원입찰을 고려한 모선별 한계가격을 포함한 등식과

부등식 제약조건에 대한 잠재가격을 도출하며, 이를 통해 수요자원입찰을 고려한 모선별 한계가격의 구성요소를 도출하는 방법론을 제안한다.

3.1 수요자원입찰을 고려한 모선별 한계가격의 정식화

본 논문에서는 입찰에 의한 수요자원입찰을 고려하여 모선별 한계가격 및 구성요소를 분해하는 방법론을 제시하며, 세 가지 구성요소는 전압품질비용, 손실비용, 혼잡비용으로 분해하였다. 다음 식은 AC최적 조류계산의 목적함수와 등식 및 부등식 제약조건을 나타낸다. 발전기의 비용함수에 수요자원입찰 함수를 추가하여 식(2)와 같이 유도할 수 있다. 식(2)의 제약조건 중 수요자원입찰에 의한 감소 무효전력은 고려하지 않았다.

$$\min \sum_{t=1}^I \sum_{k=1}^n C_k(P_{t,k}^g) + \sum_{t=1}^I \sum_{s=1}^m B_s(Y_{t,s}) \quad (1)$$

subject to

$$P_{t,i}^L - P_{ij}(X) - \sum_{s \in \Omega_i^L} Y_{t,s} - \sum_{k \in \Omega_i^g} P_{t,k}^g = 0 \quad (2)$$

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

$$P_k^{gMIN} \leq P_{t,k}^g \leq P_k^{gMAX}$$

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

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

여기서,

- $C_k(P_{t,k}^g)$: t 시간대의 발전기- k 의 입찰함수
- $B_s(Y_{t,s})$: t 시간대의 부하- s 의 입찰함수
- $P_{t,k}^g, Q_{t,k}^g$: t 시간대의 발전기- k 의 유·무효 발전량
- $Y_{t,s}$: t 시간대의 부하- s 의 입찰 유효 감소량
- $P_{t,i}^L, Q_{t,i}^L$: t 시간대의 모선- i 에 연결된 유·무효 부하량
- $P_{ij}(X), Q_{ij}(X)$: 선로- ij 의 유·무효 선로조류 손실
- X : 각 모선의 상태변수, 즉 모선별 전압크기와 위상각
- P_k^{gMIN}, P_k^{gMAX} : 발전기- k 의 최소, 최대출력
- $P_{ij}^{MIN}, P_{ij}^{MAX}$: 선로- ij 의 유효 조류량의 최소, 최대량
- V_i^{MIN}, V_i^{MAX} : 모선- i 의 전압크기의 최소, 최대값
- Ω_i^g : 모선- i 에 연결된 발전기 집합.
- Ω_i^L : 모선- i 에 연결된 부하의 집합.
- n : 기준계통의 총 발전기 수.
- m : 총 입찰부하의 수
- I : 총 Scheduling 기간

3.2 수요자원입찰을 고려한 모선별 한계가격 유도

본 논문에서 일반화된 잠재가격을 도출하기 위하여 라그랑지안함수를 이용하여 식(3)과같이 표현하였다.

$$\begin{aligned}
 L = & \sum_{t=1}^{t=I} \sum_{k=1}^n C_k P_{t,k}^g + \sum_{t=1}^{t=I} \sum_{s=1}^m B_s Y_{t,s} \\
 & + \sum_{i=1, i \neq R}^n \lambda_i^P \left(P_{t,i}^L - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}(X) - \sum_{s \in \Omega_i^L} Y_{t,s} - \sum_{k \in \Omega_i^G} P_{t,k}^g \right) \\
 & + \sum_{i=1}^n \lambda_i^Q \left(Q_{t,i}^L - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}(X) - \sum_{k \in \Omega_i^G} Q_{t,i}^g \right) \\
 & + \lambda_R^P \left(P_{t,R}^L - \sum_{j \in \Omega_R} P_{Rj}(X) - \sum_{s \in \Omega_R^L} Y_{t,s} - \sum_{k \in \Omega_R^G} P_{t,k}^g \right) \\
 & + \sum_i \sum_j \bar{\rho}_{ij}^{P, \max} (P_{ij} - P_{ij}^{MAX}) + \sum_i \sum_j \bar{\rho}_{ij}^{P, \min} (P_{ij}^{MIN} - P_{ij}) \\
 & + \sum_i \bar{\rho}_i^{V, \max} (V_i - V_i^{MAX}) + \sum_i \bar{\rho}_i^{V, \min} (V_i^{MIN} - V_i) \\
 & + \sum_k \bar{\rho}_{Pg,k}^{\max} (P_{t,k}^g - P_{t,k}^{MAX}) + \sum_k \bar{\rho}_{Pg,k}^{\min} (P_{t,k}^{MIN} - P_{t,k}^g)
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서,

R : 기준모선

Ω_i : 모선-i에 연결된 모선들의 집합,

Ω_i^G : 모선-i에 연결된 발전기들의 집합,

Ω_i^L : 모선-i에 연결된 부하자원들의 집합,

Ω_R : 기준모선에 연결된 모선들의 집합,

Ω_R^G : 기준모선에 연결된 발전기들의 집합,

Ω_R^L : 기준모선에 연결된 직접부하자원들의 집합,

λ_i^P : 모선-i에 대한 유효전력 수급방정식에 대한 잠재가격,

λ_i^Q : 모선-i에 대한 무효전력 수급방정식에 대한 잠재가격,

λ_R^P : 기준모선에 대한 유효전력 수급방정식에 대한 잠재가격,

$\bar{\rho}_{Pg,k}^{\max}, \bar{\rho}_{Pg,k}^{\min}$: 발전기-k의 발전량이 최대, 최소 발전제약에

의해 제약이 발생할 때의 잠재가격,

$\bar{\rho}_{ij}^{P, \max}, \bar{\rho}_{ij}^{P, \min}$: 선로-ij의 선로조류량이 최대, 최소선로제

약에 의해 제약이 발생할 때의 잠재가격,

$\bar{\rho}_i^{V, \max}, \bar{\rho}_i^{V, \min}$: 모선-i의 전압크기가 최대, 최소전압제약에

의해 제약이 발생할 때의 잠재가격.

본 논문에서는 [16]에서 제안한 잠재가격 도출방법론을 이용하여 수요반응자원을 입찰형태의 자원으로 고려하여 모선별 한계가격을 유도하며, 이를 이용하여 모선별 한계가격의 구성요소인 손실비용, 혼잡비용, 전압품질비용을 유도한다. 상기 라그랑지안 함수를 이용하여 최적화 문제를 수행하였을 때 최적해 조건하에서 라그랑지안 함수의 라그랑지안 승수 즉, 등식 및 부등식 제약조건에 대한 잠재가격은 식 (4)와 같은 방법을 이용하여 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial L}{\partial V} \\ \frac{\partial L}{\partial P_{g,Y}} \\ \frac{\partial L}{\partial Q_g} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{\theta}^{P_R} & A_{\theta}^P & A_{\theta}^Q & A_{\theta}^f & 0 & 0 \\ A_V^{P_R} & A_V^P & A_V^Q & A_V^f & A_V^V & 0 \\ A_G^{P_R} & A_G^P & 0 & 0 & 0 & A_G \\ 0 & 0 & A_G^Q & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_R^P \\ \lambda^P \\ \lambda^Q \\ \rho_{Pg,k}^{P, \max}, \rho_{Pg,k}^{P, \min} \\ \rho_{ij}^{V, \max}, \rho_{ij}^{V, \min} \\ \rho_{Pg,k}^{\max}, \rho_{Pg,k}^{\min} \end{bmatrix} \tag{4}
 \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{dM(P_t^{g,Y})}{dP_t^{g,Y}} \\ 0 \end{bmatrix}$$

여기서,

$\frac{\partial L}{\partial \theta}$: 기준모선을 제외한 모선의 위상각으로 라그랑지안 함수를 미분한 선형방정식 벡터

$\frac{\partial L}{\partial V}$: 모선전압으로 라그랑지안 함수를 미분한 선형방정식 벡터

$\frac{\partial L}{\partial P_{g,Y}}$: 발전기, 부하자원의 유효 발전변수로 라그랑지안

함수를 미분한 선형방정식 벡터

$\frac{\partial L}{\partial Q_g}$: 발전기의 무효 발전변수로 라그랑지안 함수를 미분

한 선형방정식 벡터

$A_{\theta}^{P_R}$: $\partial L / \partial \theta$ 의 λ_R^P 의 계수

A_{θ}^P : $\partial L / \partial \theta$ 의 λ^P 의 계수

A_{θ}^Q : $\partial L / \partial \theta$ 의 λ^Q 의 계수

A_{θ}^f : $\partial L / \partial \theta$ 의 $\rho_{ij}^{P, \max}$ 와 $\rho_{ij}^{P, \min}$ 의 계수

A_V^P : $\partial L / \partial V$ 의 λ^P 의 계수

A_V^Q : $\partial L / \partial V$ 의 λ^Q 의 계수

$A_V^{P_R}$: $\partial L / \partial V$ 의 λ_R^P 의 계수

A_V^f : $\partial L / \partial V$ 의 $\rho_{ij}^{P, \max}$ 혹은 $\rho_{ij}^{P, \min}$ 변수의 계수

A_V^V : $\partial L / \partial V$ 의 $\rho_{ij}^{V, \max}$ 혹은 $\rho_{ij}^{V, \min}$ 변수의 계수

$A_G^{P_R}$: $\partial L / \partial P_{g,Y}$ 의 λ_R^P 의 계수

A_G^P : $\partial L / \partial P_{g,Y}$ 의 λ^P 의 계수

A_G^Q : $\partial L / \partial Q_g$ 의 λ^Q 의 계수

A_G : $\partial L / \partial P_g$ 의 $\bar{\rho}_{Pg,k}^{\max}$ 혹은 $\bar{\rho}_{Pg,k}^{\min}$ 의 계수

λ^P : 기준모선을 제외한 유효 등식제약조건에 대한 잠재가격 벡터

λ^Q : 모든 모선의 무효 등식제약조건에 대한 잠재가격 벡터

λ^{P_R} : 기준모선의 유효 등식제약조건에 대한 잠재가격 벡터

$\bar{\rho}_{Pg,k}^{\max}, \bar{\rho}_{Pg,k}^{\min}$: 최대, 최소 선로제약이 발생한 제약조건에 대한 잠재가격 벡터

$\bar{\rho}_i^{V, \max}, \bar{\rho}_i^{V, \min}$: 모선별 최대, 최소 전압제약이 발생한 제약조건에 대한 잠재가격 벡터

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

식 (4)에서 모선별 한계가격에 영향을 줄 수 있는 등식 및 부등식 제약조건의 잠재가격을 도출하기 위해서는 모선별 전압과 위상각의 크기와 각 발전기의 발전량 정보만 주어지면 된다. 또한 마찬가지로 모든 모선에 가상의 발전기

가 달려있다고 가정할 때 모선의 등식 제약조건에 대한 잠재가격은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial L}{\partial P_{g,Y}} = [A_G^{P_R} \ A_G^P] \begin{bmatrix} \lambda^{P_R} \\ \lambda^P \end{bmatrix} + A_G(\rho_{P_g}^{\max} \text{ or } \rho_{P_g}^{\min}) = -\frac{dM(P_t^{g,Y})}{dP_t^{g,Y}} \quad (5)$$

3.3 수요자원입찰을 고려한 모선별 한계가격의 구성요소 분해 방법론

식 (5)에서 발전제약에 대한 제약이 발생하지 않으면 발전기가 달려있는 모선의 한계가격은 발전기의 한계비용과 동일하게 된다. 또한, 모선별 한계가격의 구성요소는 식 (6)과 같이 일반화된 분해가 가능하다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \lambda^P \\ \lambda^Q \end{bmatrix} = & -[J^T]^{-1} \begin{bmatrix} A_{\theta}^{P_R} \\ A_V^{P_R} \end{bmatrix} \lambda_R^P - [J^T]^{-1} [A_V^V] (\bar{\rho}^{V,\max} \text{ or } \bar{\rho}^{V,\min}) \\ & - [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} A_{\theta}^f \\ A_V^f \end{bmatrix} (\bar{\rho}_{P_g}^{\max} \text{ or } \bar{\rho}_{P_g}^{\min}) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)의 구성요소 중 $-[J^T]^{-1} \begin{bmatrix} A_{\theta}^{P_R} \\ A_V^{P_R} \end{bmatrix}$ 은 송전손실을 고려한 경제급전 문제 중 페널티 계수의 역수가 되며, 이는 한계송전손실계수(Marginal Loss Factor)로 나타낼 수 있다. 결론적으로 식 (6)로부터 한계송전손실을 고려한 손실비용, 선로 혼잡의 잠재가격($\bar{\rho}_{P_g}^{\max}$ or $\bar{\rho}_{P_g}^{\min}$)이 포함된 혼잡비용은 $-[J^T]^{-1} \begin{bmatrix} A_{\theta}^f \\ A_V^f \end{bmatrix} (\bar{\rho}_{P_g}^{\max} \text{ or } \bar{\rho}_{P_g}^{\min})$ 로 분리가 가능하며, 전압 품질 비용은 $-[J^T]^{-1} [A_V^V] (\bar{\rho}^{V,\max} \text{ or } \bar{\rho}^{V,\min})$ 로 분리가 가능하다. 결국 식 (6)을 이용하여 잠재가격으로부터 모선별 한계가격의 구성요소를 도출할 수 있게 된다. 본 논문에서 제안된 식으로부터 발전기별 발전량과 관련된 정보를 제외하고, 각 모선의 전압, 위상크기, 전력조류계산의 자코비안 행렬, 기준 모선의 등식, 부등식제약조건에 대한 잠재가격이 있으면 모선별 한계가격의 구성요소를 분해 할 수 있다.

4. 사례연구

4.1 사례연구 대상시스템

본 논문에서는 제안한 방법론들의 효용성을 입증하기 위해서 IEEE 14 표본계통에 대해서 사례연구를 수행하며, 입찰된 부하의 변화에 따른 모선별 한계가격의 변화추이를 수행하기 위해 IEEE RTS를 이용 하였다[7]. 그림 3은 IEEE 14모선 계통이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 예제 시스템은 발전기 5대로 구성되어 있는 시스템으로, 표 1은 각 발전기별 발전비용 및 발전용량, 표 2는 선로데이터, 그리고 표 3은 모선데이터를 나타내고 있다.

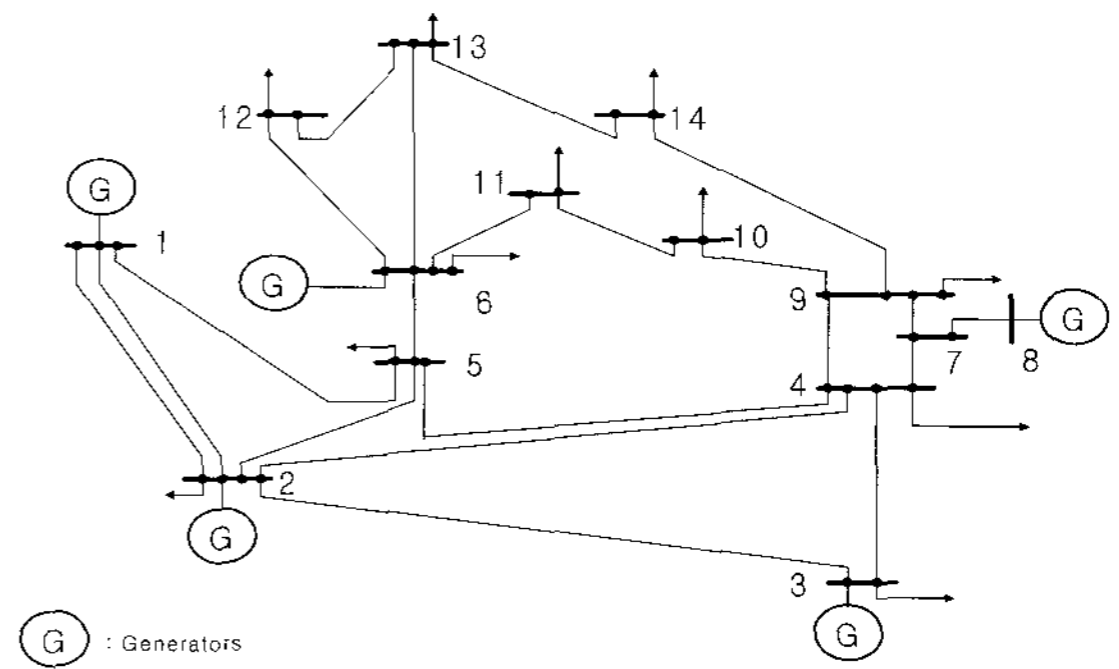


그림 3 IEEE 14모선 표본계통

Fig. 3 IEEE 14-bus sample system

표 1 IEEE 14모선 표본계통의 발전기 데이터

Table 1 Generator data in IEEE 14-bus system

발전기명	모선	에너지 입찰가격데이터		발전제약	
		a_i	b_i	최소	최대
G1	1	19.12	0.0082	10	100
G2	2	18.28	0.0096	20	100
G3	3	18.28	0.0059	10	150
G6	6	18.6	0.006	20	100
G8	8	18.28	0.0087	10	120

표 2 IEEE 14모선 표본계통의 선로 데이터

Table 2 Line data of IEEE 14-bus sample system

선로 번호	모선		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 2에서 볼 수 있듯이 모든 선로의 송전용량을 동일한 것으로 가정하였다. 이러한 가정은 선로계수의 차이에 의해 현실성이 떨어 질수 도 있다. 그러나 선로용량을 임의적으로 수정하여 혼잡등과 같은 제약을 더욱 발생시키는 방법은 사례연구를 더욱 왜곡 시킬 수 있다. 그래서 본 논문에서는 사례연구 1, 2로 나누워 부하를 증대시키는 방법을 이용하여 제약을 더욱 발생시키는 방법을 사용하였다.

표 3 IEEE 14모선 표본계통의 모선 데이터

Table 3 Bus data of 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

에너지 시장에 식(7)과 같이 입찰가격을 제시한다고 가정하였으며, 각 발전기의 증감발율은 각 발전기가 동일하다고 가정한다.

$$C_k = a_k + 2b_k P_{t,k}^g \quad (7)$$

여기서, a_k : 발전기 입찰함수의 1차 계수 b_k : 발전기입찰함수의 2차 계수

또한 기준모선은 모선 -1에 위치하고 있으며, 100MW를 기준 값으로 설정한다. 또한 수요자원입찰시의 입찰가격은 한계가격을 결정하는 발전기의 입찰가격보다 작아야 한다. 만약 수요자원의 입찰가격이 한계발전기보다 클 경우, 시장 운영자의 입장에서는 통제와 관리가 쉬운 발전기를 반영할 가능성이 더욱 크다. 본 논문에서는 이러한 조건을 반영하여 유효전력에 대한 입찰가격을 $B_s = 18.7 + 0.008 Y_{t,s}$ 로 가정하며, 무효전력은 고려하지 않는다. 무효전력 입찰은 특정한 수용가에 대해서만 제어가 가능하며, 조상기동 전력설비에 의해 추가적인 공급이 가능하므로, 무효전력은 입찰을 하지 않는 것으로 가정한다.

그림 4는 RTS를 이용하여 부하의 변화를 나타낸 것으로 피크시간을 기준으로 5대의 발전기가 부하를 어떻게 담당하고 있는지를 나타내고 있다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 피크시를 제외한 나머지 시간에는 G1 발전기가 발전을 하지 않는다. 결국 피크 시에 G1 발전기가 발전함으로써 모선별 한계가격이 상승하게 된다. 본 논문에서는 G1발전기를 수요자원입찰으로 대체 하였을 때와 그렇지 않았을 때를 모선별 한계가격과 구성요소를 통하여 비교함으로써 수요자원이 가질 수 있는 이익을 나타낸다. 본 논문에서는 이러한 피크시간대를 모의하기 위해서 13시-14시를 기준으로 수요입찰자원을 투입한다.

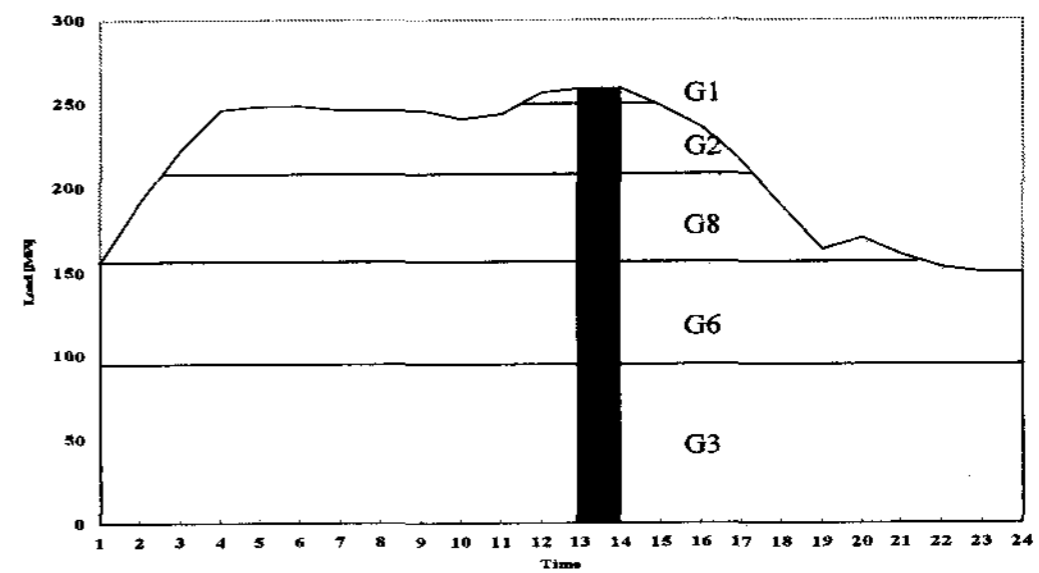


그림 4 총 부하의 변화에 따른 발전기의 스케줄링

Fig. 4 Change of Gross demand according generation scheduling

4.2 사례연구 1 : 단순 IEEE14 모선

아래의 표 4과 5는 수요자원입찰을 고려하지 않았을 때의 조류계산의 결과를 나타내고 있다. 표 4에서 볼 수 있듯이 수요자원입찰을 고려하지 않았을 때의 각 발전기의 발전량 결과이며, G1 발전기는 자신의 최소 발전제약에 구속되고 있다. 표 5는 수요자원입찰을 고려하지 않았을 때의 각 모선의 전압 및 위상각 결과를 나타내고 있다. 표 5에서 볼 수 있듯이 모선 1, 모선 8에서 최대 전압제약에 구속되어 있다.

표 4 각 발전기의 발전량 결과

Table 4 Results of generation at each generator

발전기명	모선	발전량	
		MW	Mvar
G1	1	10	-0.627
G2	2	52.388	14.774
G3	3	95.163	19.468
G6	6	57.592	16.667
G8	8	45.000	18.549

표 5 각 모선에서의 전압 및 위상각 결과

Table 5 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

본 논문에서는 모든 선로의 송전용량제약을 최소 -45MW, 최대 45MW로 제한하였으며, 조류계산의 결과에 따라 선로

7,8에서 최대 송전용량제약조건에 구속되고 있다. 아래의 표 6, 그림 5는 수요자원입찰(DSB)을 고려하였을 때 와 그렇지 않았을 때의 모선별 한계가격의 변화를 나타내고 있다.

표 6 IEEE 14모선 계통의 모선별 한계가격 결과
Table 6 Results of LMP in IEEE 14-bus sample system

모선명	LMP without DSB [\$/MWh]	LMP with DSB [\$/MWh]	가격감소 [\$/MWh]
1	18.976	18.888	0.088
2	19.437	19.040	0.033
3	19.979	19.587	0.392
4	19.637	19.467	0.169
5	19.451	19.286	0.165
6	20.073	19.680	0.393
7	19.063	19.063	0
8	20.133	19.739	0.394
9	20.149	19.790	0.359
10	19.881	19.615	0.266
11	19.796	19.623	0.173
12	19.961	19.763	0.198
13	20.520	20.206	0.314
14	19.071	18.990	0.081

표 6에서 볼 수 있듯이 수요자원입찰을 고려하였을 때 모선별 한계가격이 약간 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 G1 발전기의 발전량에 따라 수요자원입찰이 10MW 밖에 투입되지 않기 때문에 수요자원입찰을 투입하더라도 가격 감소폭이 작기 때문이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 모선 8의 가격 감소폭이 제일 큰 것을 알 수 있다. 이것은 수요자원입찰을 고려하지 않았을 때 송전혼잡과 전압 제약이 8번 모선에 나타나고 있으나, 수요자원입찰을 고려함으로써 송전혼잡이 감소하게 되어, 결국 모선별 한계가격의 감소로 나타나기 때문이다. 모선 7의 경우, 연결모선이므로 특별한 변화가 나타나지 않는다.

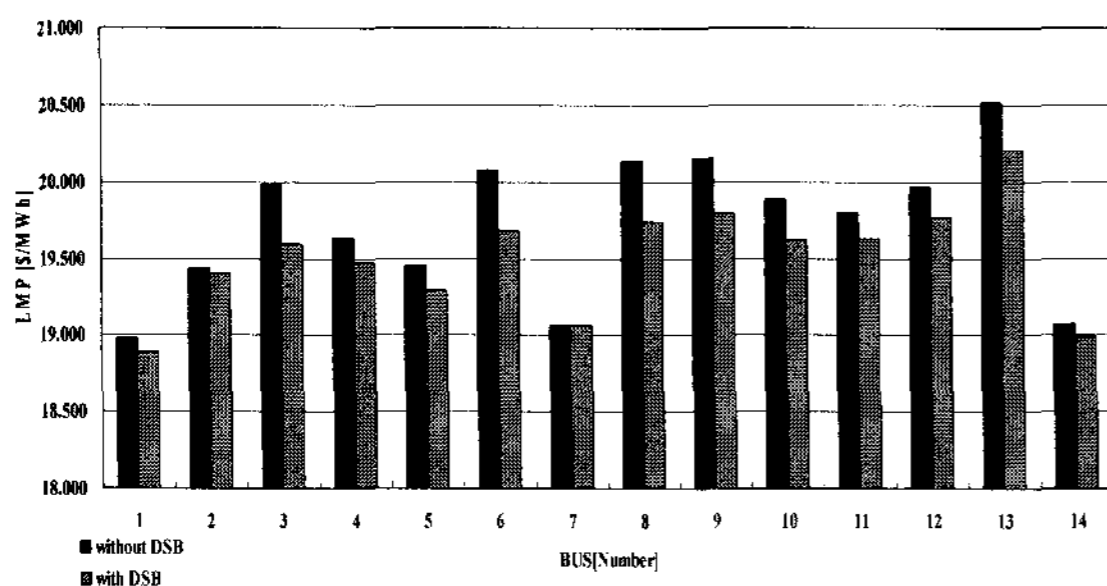


그림 5 DSB의 투입에 따른 모선별 한계가격의 변화
Fig. 5 Change of LMP according with and without DSB

4.3 사례연구 2 : 수정된 IEEE14 모선

사례연구 1에서 볼 수 있듯이, IEEE 14 모선의 경우 부하자원의 크기가 작아, 전압제약과 송전혼잡과 같은 모선별 한계가격의 구성요소의 변화가 나타나기 쉽지 않았다. 예를 들면 전압제약이나 송전혼잡에 의해 주변 모선들에 대해서 영향이 나타나야 하지만, 사례연구 1에서는 크게 나타나지

않았다. 본 논문에서는 수요자원입찰에 따른 모선별 한계가격의 변화와 구성요소의 변화에 따른 수요자원입찰의 이익을 구현하기 위하여 예제 계통에 대해서 다음과 같이 수정하였다. 표 7, 8에서 볼 수 있듯이 부하를 2배 증가하였다.

표 7 수정된 IEEE 14모선 계통의 모선데이터
Table 7 Bus data of modified IEEE 14-bus 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	43.4	12.7
3	1.01	0	1.05	0.9	188.4	19
4	1	0	1.05	0.9	95.6	-3.9
5	1	0	1.05	0.9	15.2	1.6
6	1.07	0	1.05	0.9	22.4	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	59	16.6
10	1	0	1.05	0.9	18	5.8
11	1	0	1.05	0.9	7	1.8
12	1	0	1.05	0.9	12.2	1.6
13	1	0	1.05	0.9	27	5.8
14	1	0	1.05	0.9	29.8	5

표 8 수정된 IEEE 14모선 표본계통의 발전기 데이터
Table 8 Generator data in modified IEEE 14-bus system

발전기명	모선	에너지 입찰가격데이터		발전제약	
		a_i	b_i	최소	최대
G1	1	36.12	0.0082	0	200
G2	2	18.28	0.0096	20	200
G3	3	18.28	0.0059	10	300
G4	6	18.6	0.006	20	200
G5	8	18.28	0.0087	10	240

표 9와 그림 6는 수정된 IEEE 14모선에 따른 모선별 한계가격을 나타내고 있다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 모선별 한계가격이 그림 5에 비하여 제약지역에서 보다 크게 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 감소폭이 모든 모선에 걸쳐 크게 나타나는 것은 아니다. 이것은 발전기의 발전비용을 대신하여 부하자원 입찰 비용이 포함되어 있으며, 수요자원입찰이 모든 지역에 걸쳐서 동일한 효과를 얻지 못하기 때문이다.

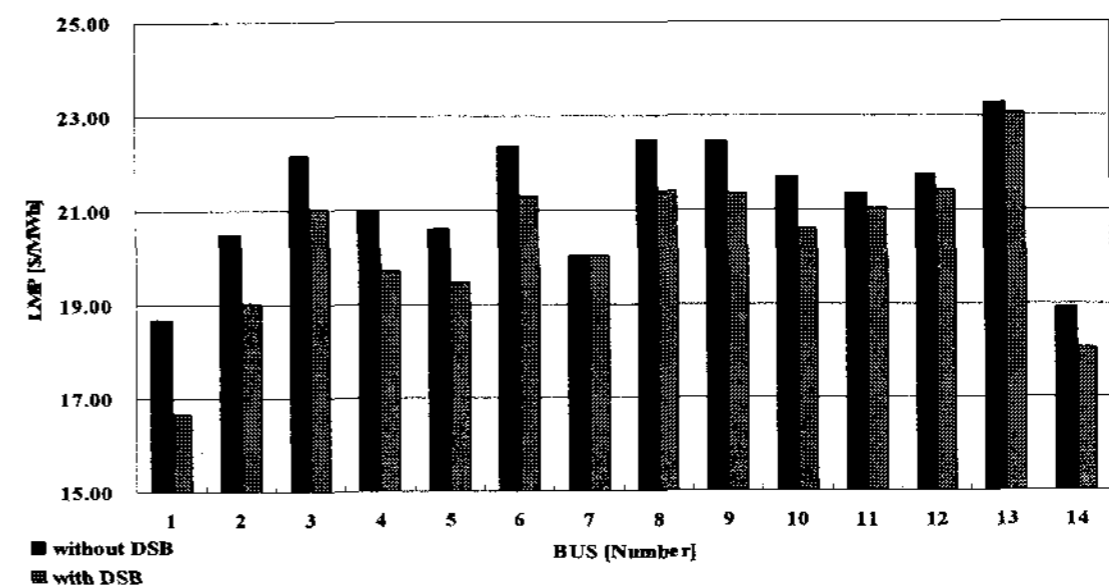


그림 6 DSB의 투입에 따른 모선별 한계가격의 변화 (수정된 시스템)
Fig. 6 Change of LMP according with and without DSB

표 6과 표 9를 통하여 송전혼잡(선로7-8), 전압제약(모선 1,8) 모선들 주변으로 모선별 한계가격의 감소폭이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 사례연구1에서는 제약 크게 발생하지 않음으로써 부하자원입찰이 큰 역할을 할 수 없었다. 그러나 사례연구 2에서는 부하를 2배 증가시킴으로써 제약이 크게 발생하게 되고, 이로 인하여 부하입찰자원이 제약 지역 내에서 큰 역할을 할 수 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 통하여 부하자원이 입찰을 통해 발전자원을 대치하여 전체적인 한계가격의 낮출 수 있는 요인이 된다.

표 9 수정된 IEEE 14모선 계통의 모선별 한계가격 결과
Table 9 Results of LMP in modified-IEEE 14-bus sample system

모선명	Without DSB [\$/MWh]	With DSB [\$/MWh]	가격감소 [\$/MWh]
1	18.67	16.65	2.02
2	20.49	19.016	1.51
3	22.17	21.02	1.16
4	20.97	19.71	1.27
5	20.58	19.47	1.12
6	22.36	21.30	1.06
7	20.02	20.02	0
8	22.50	21.39	1.10
9	22.47	21.36	1.11
10	21.70	20.58	1.12
11	21.35	21.03	0.31
12	21.76	21.44	0.32
13	23.28	23.06	0.22
14	18.91	18.49	0.42

표 10은 각 모선별 한계가격의 구성요소를 나타내고 있는 표이다.

표 10 모선별 한계가격의 구성요소
Table 10 Components of LMP Comparison

모선	손실비용(\$/MWh)		혼잡비용(\$/MWh)		전압비용(\$/MWh)	
	without DSB	with DSB	without DSB	with DSB	without DSB	with DSB
2	20.056	19.056	0.312	0.061	0.121	0.021
3	21.242	20.211	0.873	0.747	0.057	0.057
4	20.360	19.214	0.547	0.428	0.065	0.065
5	20.248	19.228	0.284	0.118	0.053	0.053
6	22.115	21.227	0.187	0.018	0.056	0.056
7	19.453	19.513	0.529	0.469	0.038	0.038
8	21.736	21.413	0.707	0.113	0.053	0.026
9	21.637	20.937	0.734	0.324	0.099	0.099
10	21.166	20.196	0.43	0.284	0.103	0.103
11	21.174	20.774	0.289	0.175	0.085	0.085
12	21.419	21.219	0.256	0.135	0.089	0.089
13	22.539	22.436	0.642	0.525	0.096	0.096
14	18.896	18.264	0.12	0.112	0.138	0.114

표 10에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제안한 수요자원입찰을 고려한 모선별 한계가격의 구성요소 도출 방법론은 송전손실, 선로혼잡, 모선별 전압제약이 모선별 한계가격에 일

마만큼의 영향을 주는지를 분석 할 수 있다. 그림 7은 수요자원입찰의 투입에 따른 혼잡비용의 변화를 나타내고 있다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 송전제약 선로인 7, 8에서 수요자원입찰의 효과가 크게 나타나고 있다. 결국 수요자원입찰이 혼잡비용 측면에서도 효과를 나타낼 수 있다.

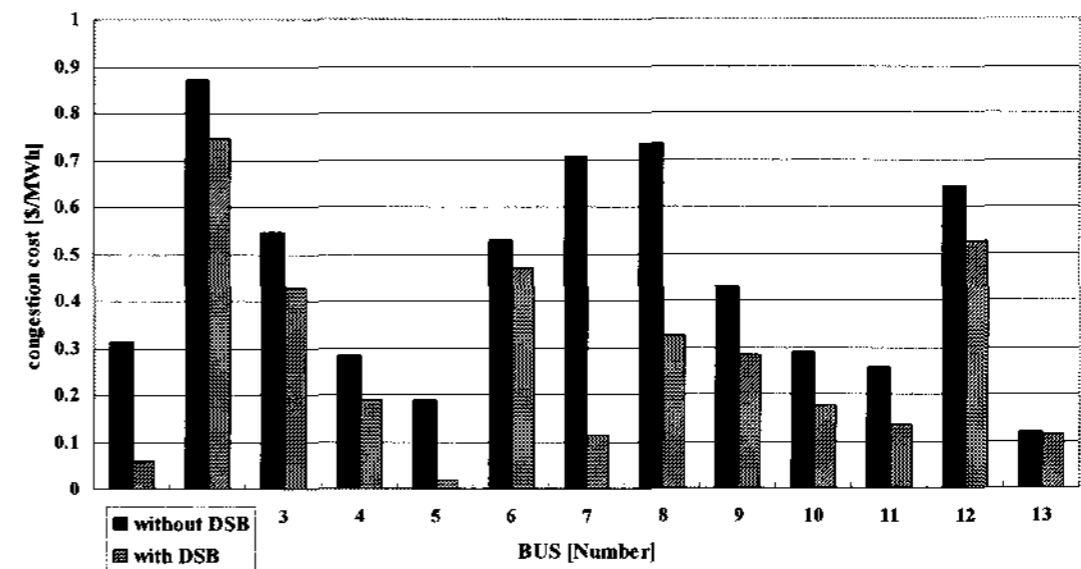


그림 7 DSB의 투입에 따른 혼잡비용의 변화
Fig. 7 Change of congestion cost according with and without DSB

그림 8은 수요자원입찰을 피크시간대(11시-14)에 고려 하였을때 모든 발전기의 총 비용의 변화를 나타내고 있다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 수요자원입찰을 고려하지 않았을때는 한계발전기(G1)가 가동되어 피크시간대의 비용 증가하게 된다. 수요자원입찰을 고려 하였을때는 한계발전기를 수요자원입찰이 대신 하게되어 비용의 급등을 억제 할 수 있다. 결국 수요자원입찰을 고려하지 않을 경우의 비용은 그림 4에서 볼 수 있듯이 C3+C6+C8+C2+C1형태로 나타나게 되며, 수요자원입찰을 고려할 경우의 비용은 한계발전기(C1)의 비용을 수요자원입찰(B1)이 대체 하게 되어 C3+C6+C8+C2+B 형태로 나타나게 된다. 이는 한계비용측면에서 비용이 급격하게 증가되는 일부 시간대에 수요입찰자원이 비용의 급등을 억제할 수 있다.

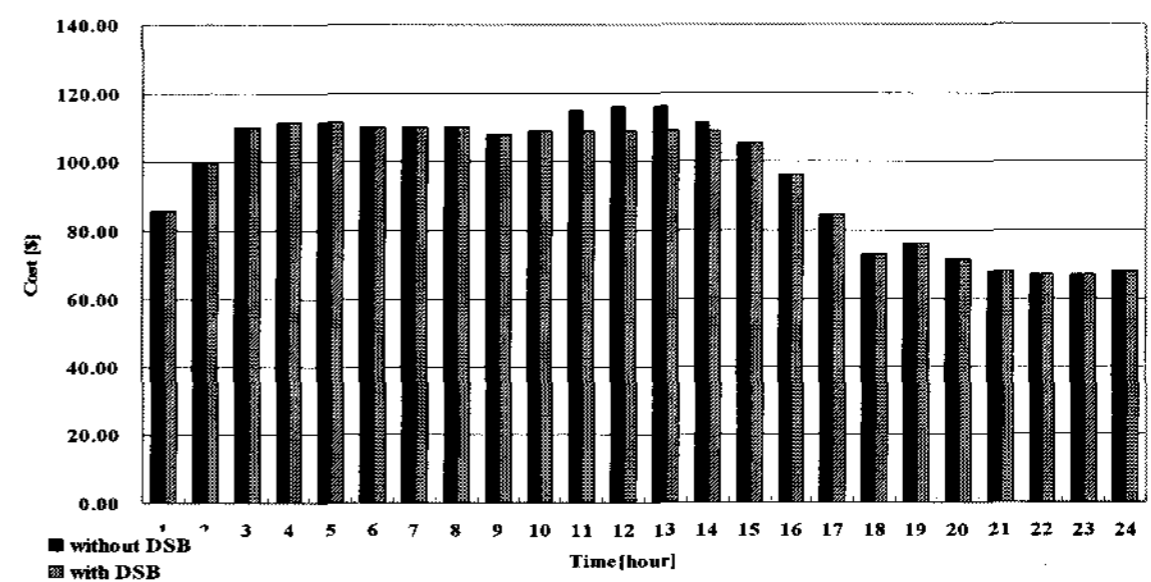


그림 8 DSB의 투입에 따른 총 비용의 변화
Fig. 8 Change of total cost with and without DSB

결국 수요자원입찰이 발전자원과 같이 전력시장내에서 하나의 자원으로 고려할 수 있으나, 상기 사례연구의 결과에서 알 수 있듯이 수요자원이 지역과 시간에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 수요자원입찰이 단순한 보조서비스시장 내에서의 비상시를 위한 역할에서 한정하지 않고, 에너지시장 내에서도 하나의 자원이 고려할 수 있을 것이다.

5. 결 론

수요자원입찰은 수력발전과 같이 특정한 시간대에 입찰을 통해 모선별 한계가격 또는 시장가격이 급등하는 효과를 억제할 수 있으며, 비상시나 발전기 보수계획과 같은 전력시스템 운용에 있어서도 큰 효과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 수요자원이 입찰을 통해 전력시장에서 가질 수 있는 가치를 모선별 한계가격의 해석적 산정방법에 추가하여 이의 분석을 수학적으로 수행하였으며, 이를 이용하여 수요자원입찰이 가질 수 있는 가치에 대해서 증명하였다. 이러한 가치를 평가하기 위해서 잠재가격기반의 모선별 한계가격의 계산 방법에 수요 반응자원이 전력시장에서 단순히 부하를 줄이는 개념이 아니라, 발전 자원처럼 수요자원 또한 하나의 자원으로 고려 할 수 있음을 증명하였다. 결국, 본 논문에서는 모선별 한계가격을 분석하여 보다 효과적으로 수요자원 입찰을 수립 할 수 하나의 검토단계라 할 수 있다. 본 논문에서 제안한 방법론은 우리나라 수요반응자원에 대한 경제성 검토의 시작단계에 있는 것이라 할 수 있으며, 향후 수요반응자원에 대한 다양한 경제적 가치 평가 연구가 활성화 되면, 수요자원입찰의 국내 도입에 따른 정책적인 판단 및 제도 수립의 방향을 제시 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 전력IT 국가과제(과제번호: R-2005-1-396-001)의 지원에 의해 수행되었으며, 관계기관에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] G.Strbac, E.D.Farmer, B.J.Cory, "Frame work for the incorporation of demand-side in a competitive electricity market", IEE Proc-Gener., Distrib., Vol. 143, No.3, May 1996

[2] National Grid Company Settlements: "An introduction to the initial pool rules", Nottingham, 1991

[3] W. W. Sharkely, The Theory of Natural Monopoly, Cambridge, University Press, 1982.

[4] Peak Load Management Alliance, Demand Response : Design Principles for Creating Customer and Market Value, November 1998.

[5] U.S. Department of Energy, Benefit of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving them, February 2006.

[6] F. C. Schweppe, M. C. Caramanis, R. D. Tabors, and R. E. Bohn, Spot Pricing of Electricity, Kluwer Academic Publishers, 1988.

[7] "IEEE RELIABILITY TEST SYSTEM", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-98, No.6,

Nov./Dec. 1979, pp.2047-2054

[8] M.H.Albadi, E.F.El-Saadany, "Demand Response in Electricity Markets: An Overview", Power Engineering Society General Meeting 2007, 24-28 June 2007, pp. 1-5

[9] 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.

[10] T. Wu, Z. Alaywan, and A. Papalexopoulos, "Location Marginal Price Calculation Using the Distributed-Slack Power Flow Formulation", IEE Trans. on Power System, Vol. 20, no. 2, May. 2005.

[11] T. Wu, Z. Alaywan, and A. D. Papalexopoulos, "Location Marginal Price Calculation ", IEEE Trans. on Power System, Vol. 20, no. 2, pp.1188-1190, May. 2005.

[12] Xu Cheng, Thomas J. Overbye, " An Energy Reference Bus Independent LMP Decomposition Algorithm", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No 3. Augest 2006, pp. 1041-1049

[13] M.River and I.J.Perez-Arriaga, "Computation and decomposition of spot prices for transmission pricing", in Proc. PSCC, Avignon, Fance, 1993, pp. 371-378

[14] X.Kai, Y. Song, E. Yu, and G. Liu, "Decomposition model of spot pricing and interior point method implementation", in Proc. POWERCON, 1998, pp. 32-37

[15] H.Chao and S.Peck. "A market mechanism for electric power transmission", J. Reg. Econ., vol. 10, pp. 25-59, 1996

[16] 이기송, 정윤원, 박종배, 신중린, 김진호, "모선별 한계 가격의 구성요소 산정 기법", 전기학회논문지(A), 제 55권, 제 8호, 2006년 8월, pp.341-350

저 자 소 개



김 현 홍 (金鉉烘)

1977년 12월 28일생. 2004년 전주대 공대 전기공학과 졸업. 2006년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 건국대학교 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-458-4778

Fax : 02-444-1418

E-mail : hhblue@konkuk.ac.kr



김진호 (金眞鎬)

1971년 11월 27일생. 1995년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동대학 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2001년 동대학 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사). 2004년 부산대 전기공학과 조교수. 현재 경원대 전기공학부 조교수

Tel : 031-750-8825

Fax : 031-750-8571

E-mail : kimjh@kyungwon.ac.kr



박종배 (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 부교수.

Tel : 02-450-3483

Fax : 02-444-1418

E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr



신중린 (慎重麟)

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