

## 예약요금제에서 사회적 이익을 고려한 예비력 요금에 관한 연구

김성수<sup>0</sup> 정혜성<sup>\*</sup> 박종근<sup>\*</sup>

\* 서울대학교 전기공학과

최준영<sup>\*\*</sup>

\*\* LG전자

홍준희<sup>\*\*\*</sup>

\*\*\* 경원대

## A Study on the Social Benefit Maximizing Reserve Pricing

Sung-soo Kim<sup>\*</sup> Hae-seong Jeong<sup>\*</sup> Jong-keun Park<sup>\*</sup> Joon-young Choi<sup>\*\*</sup> Jun-hee Hong<sup>\*\*\*</sup>

\* Seoul National University

\*\* LG Electronics

\*\*\* Kyungwon Univ.

### Abstract

This paper presents a theory on the pricing and allocation of spinning reserve. It is shown in this paper, that it is possible to maintain system security with many participants each attempting to optimize their own benefit, through pricing incentive. Participant offers power consumption/generation and reserve contribution according to its price. And Price setter only distribute pricing signal to acquire system security. Participants induce disturbance on power system and they pay the penalty according to the size of disturbance. And they also offers some reserve capacity to earn reserve cost. In this scheme, the amount of data communication is very small.

### 1. 서론

예비력은 송전선 사고나 발전기 고장, 수요예측의 불확실성 등의 이유로 인하여 발생하는 수급 불균형에 대처하기 위한 것이다. 예비력을 확보하려면 발전설비를 추가로 운전해야 하기 때문에 전기요금이 비싸지게 된다. 따라서 적정한 예비력의 비율은 각 수용가의 전력공급의 신뢰도와 요금사이의 타협점에서 결정되어야 한다. 최근 세계적으로 전력산업의 경쟁체제도입으로 민간 발전자의 참여가 늘고 있다. 또한 통신기술이 발달함에 따라 계통의 상황을 여러 수요가에게 빠르게 전달할 수 있다. 따라서 민간발전자나 수요자가 예비력 확보에 동참할 수 있는 방안이 마련된다면 사회적으로 보다 효율적인 전력계통 운영방안이 될 것이다.

최근에 예금결정자와 계통구성원과의 의사개화 있는 전력요금 구조를 통하여 전력계통의 참여자(발전자, 소비자) 각자가 자신의 이익을 최대로 하는 전력량과 예비력을 결정하면, 사회적으로 최적 수준의 안전성이 확보된다는 논문이 발표되었다 [1, 5]. 그러나 이 논문에서는 사고의 발생인인을 처리하는 부분이 모호하게 처리되어 있고, 예비력의 요금결정 구조가 복잡하여 실제 계통에서 구현하기 어려운 점이 있다. 따라서 본 논문에서는 각 참여자의 사고발생확률을 정규분포로 가정하여

이에따라 요금이 영향을 받게되는 요금제도를 제시하고자 한다.

### 2. 문제 정식화

#### 2.1 전력시장 및 사용전력 예약

본 논문에서는 발전자와 소비자를 특별히 구별하지 않고 참여자라 한다. 계통에 전력을 공급하면 발전자가 되고, 계통으로부터 전력을 소비하면 소비자가 된다. 참여자 전체집합을  $J$ , 발전자 집합을  $G$ , 소비자 집합을  $C$ 라 하면  $J = G \cup C$  가 된다 [3, 5].

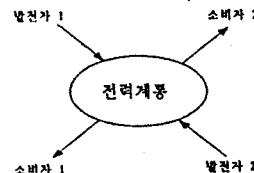


그림 1. 전력시장의 구성도

계통운전에 참여하는 구성원은 전력요금을 결정하는 가격 결정자와 전력을 공급하는 발전자, 그리고 소비자로 구성된다. 각 참여자는 가격 결정자가 제시한 가격에따라 공급/소비할 전력을 가격결정자에게 예약하고, 가격결정자는 예약된 전력의 수급조건으로부터 가격을 조정한다. 예약되는 전력( $y_j$ )은 소비자( $j \in C$ )의 경우 소비전력으로 양의 값이고, 발전자( $j \in G$ )의 경우  $y_j$ 는 발전전력으로 음의 값이다.

#### 2.2 예약불이행에 따른 부족전력

각 참여자가 실제 운전시에 사용하는 전력은 사고, 수요예측의 불확실성 등의 이유로 인하여 예약값으로부터 벗어나게 된다. 본 논문에서는 이 오차가 정규분포를 따른다고 가정하겠다. 즉 실제 사용되는 전력( $\bar{y}_j$ )은  $\bar{y}_j = y_j \cdot (1 + x_j)$ 로 주어진다. 여기서  $x_j$ 는 평균 0, 표준편차  $\sigma_j$ 인 정규분포를 따르는 확률변수로 확률밀도 함수는 다음과 같이 주어진다 [4].

$$f_{x_j}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (1)$$

실제 운전시에는 위와같은 예약값의 분일치로 인하여 확률적으로 다음과 같은 부족전력( $w$ )이 발생한다.

$$w = \sum_{j \in J} \hat{y}_j = \sum_{j \in J} y_j + \sum_{j \in J} y_j \cdot x_j \quad (2)$$

오차는 정규분포를 따른다고 하였으므로 이들의 가중합인 부족전력도 정규분포를 따르게 된다[4]. 부족전력의 평균값은 오차( $x_j$ )의 평균값이 0이므로 (2)식의 첫번째 항이 된다. 부족전력의 분산( $\sigma_w^2$ )은 각 참여자의 오차가 서로 독립이라고 가정하면 다음 식으로 주어진다.

$$\text{Var}(w) = E\left[\left(\sum_{j \in J} y_j \cdot x_j\right)^2\right] = \sum_{j \in J} y_j^2 \cdot \sigma_j^2 \quad (3)$$

따라서 수급조건을 부족전력( $w$ )의 평균값이 0이 되도록 수급조건을 맞춘다고 가정하면, 확률밀도 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$f_w(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_w} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_w^2}\right) \quad (4)$$

여기서  $\sigma_w = \sqrt{\sum_{j \in J} y_j^2 \cdot \sigma_j^2}$  이다.

### 2.3 안전운전 확률과 예비력에의

계통에 준비된 전체 예비력이 부족전력보다 크면 안전하게 운전할 수 있다고 가정하자. 만일 계통의 안전운전 확률을 사회적 합의에 의하여 도출하였다고 하면 이로부터 전력계통에서 확보해야하는 예비력량을 결정할 수 있다. 부족전력이 발생하면, 소비자 ( $j \in C$ )의 경우 소비전력을 줄이는 방법으로 예비력( $z_j$ )을 제공할 수 있고, 발전자 ( $j \in G$ )의 경우 발전량을 늘리는 방법으로 예비전력( $z_j$ )을 공급할 수 있다. 만일 부족전력이 음의 값이면 소비자는 소비를 늘리고, 발전자는 발전량을 줄이면 된다. 부족전력이 발생했을 때 모든 참여자가 자신이 제시한 양의 값으로 정의된 예비력( $z_j$ )에 비례하여 움동하는 방법을 생각한다면, 부족전력 발생시 각 참여자의 실제전력( $\hat{y}_j$ )은 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{y}_j = y_j - \alpha_j \cdot w \quad (5)$$

여기서  $\alpha_j = \frac{z_j}{\sum_k z_k}$  는 참여율로 양의 값이다.

앞에서 말한 사회적 합의에 의한 계통의 안전운전 확률을  $\chi$ 라 하면 계통의 전체 예비력( $z$ )은 다음 조건을 만족해야 한다. 여기서  $z = \sum_j z_j$  이다.

$$\Pr(|w| \leq z) = \chi \quad (6)$$

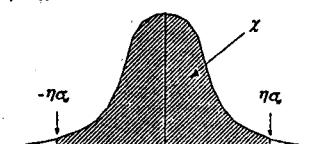


그림 2. 계통의 안전운전 확률과 예비력

부족전력( $w$ )의 확률밀도함수가 정규분포임을 고려

하면 (6)식은 다음과 같은 형태로 쓸 수 있다.

$$z \geq \eta \cdot \sigma_w \quad (7)$$

### 2.4 사회적 이득 및 최적화 문제

각 소비자는 효용을 양의 값으로 하고, 발전자는 비용을 음의 값으로 하여 모든 참여자에 대하여 더하면 사회전체의 이득이 된다. 즉 봉과비용과 예비력에 의한 추가비용을 무시하면 각 참여자의 이득함수( $b_j(\hat{y}_j)$ )는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$b_j(\hat{y}_j) = \begin{cases} u_j(\hat{y}_j) & \text{if } j \in C \\ -c_j(-\hat{y}_j) & \text{if } j \in G \end{cases} \quad (8)$$

여기서  $u_j(\cdot)$ 은 효용함수이고  $c_j(\cdot)$ 은 비용함수이다. 예비력이 클수록 사회적 부담이 커지므로 (7)식으로부터  $z = \eta \cdot \sigma_w$ 가 된다. 따라서 전력수급 계약과 예비력 계약 하에서 사회적 이득을 최대로 하는 문제는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\max_{\substack{y_1, \dots, y_n \\ z}} \sum_{j \in J} \int_{-\infty}^{\infty} b_j\left(y_j - \frac{z}{\eta \cdot \sigma_w} w\right) \cdot f_w(w) dw \quad (9)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j \in J} y_j = 0 \quad (10)$$

$$\eta \cdot \sigma_w - z \leq 0 \quad (11)$$

### 3. 최적해

#### 3.1 사회적 이득을 최대로하는 전력배분

계통의 안전운전 확률이 충분히 크면 적분 구간을 무한대로 확장해도 목적함수가 크게 달라지지 않는다. 이 가정을 사용하면  $j$  참여자의 최적해에 대한 Kuhn-Tucker 조건은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} b'_j\left(y_j - \frac{z_j}{\eta \cdot \sigma_w} w\right) \cdot f_w(w) dw \\ & + \frac{\sigma_j^2}{\eta \cdot \sigma_w^2} y_j \cdot \sum_{k \in J} \left[ z_k \cdot \int_{-\infty}^{\infty} b'_k\left(y_k - \frac{z_k}{\eta \cdot \sigma_w} w\right) \cdot w f_w(w) dw \right] \\ & + \frac{\sigma_j^2}{\sigma_w^2} y_j \cdot \sum_{k \in J} \int_{-\infty}^{\infty} b'_k\left(y_k - \frac{z_k}{\eta \cdot \sigma_w} w\right) \cdot \left\{ \frac{w^2}{\sigma_w^2} - 1 \right\} \cdot f_w(w) dw \\ & - \lambda - \eta \pi \cdot \frac{\sigma_j^2}{\sigma_w^2} y_j = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} b'_j\left(y_j - \frac{z_j}{\eta \cdot \sigma_w} w\right) \cdot \left( -\frac{w}{\eta \sigma_w} \right) \cdot f_w(w) dw + \pi = 0 \quad (13)$$

한편 이득함수의 2차 미분이상을 무시하여 Taylor 전개하여 (12), (13)식에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$b'_j(y_j) = \lambda + \eta \pi \cdot \frac{\sigma_j}{\sigma_w} (\sigma_j \cdot y_j) \quad (14)$$

$$b'_j(y_j) \cdot \frac{z_j}{\eta} + \eta \pi = 0 \quad (15)$$

(14)식은 예약전력을 결정하는 식으로 좌변은 소비자의 경우 수요함수가 되고, 발전자의 경우 한계비용 함수가 된다. 우변의 첫째항은 계통 한계비용이고 두번째 항은 예비력요금에 관한

항이다. 이 식에서 알 수 있는 것처럼 만일 참여자의 오차에 대한 분산( $\sigma^2$ )이 작아지면 수요함수나 한계비용이 계통한계비용에 가까워진다. 또 오차의 분산이 큰 참여자는 예비력에 관한 요금을 많이 지불하게 되어 부족전력을 발생시킨데 대한 비용을 지불하게 된다. 따라서 공평성의 원칙에도 부합된다.

(15) 식은 예비력의 양을 결정하는 식으로 각 참여자의 예비력량은 이득함수의 2차미분에 반비례하게 된다. 그런데 소비자의 경우 이득함수의 2차미분의 수요곡선 기울기의 음의 값이 되므로 이 값이 커지면 예비력에 적게 기여하게 된다. 수요곡선의 기울기가 큰 경우 가격탄력성이 작아지게 되므로 요금에 의한 예비력 유인이 작아져 결국 예비력에 대한 기여가 작아진다. 발전자의 경우도 같은 설명을 적용할 수 있다. 즉 각 참여자가 자신의 여력에 따라 예비력에 자발적으로 기여하게 된다.

### 3.2 참여자의 이득 최대화로 사회이득의 최대화

가격결정자가 각 참여자의 예약전력과 예비력으로부터 수급조건과 계통의 안전운전률을 만족하는 가격( $\lambda, \pi$ )을 결정했을 때 각 참여자는 자신의 이득에서 전력과 예비력요금을 뺀 부분을 최대화하고자 할 것이다. 목적함수는 소비자의 경우 자신의 효용(+)에서 요금(+)을 뺀 값이고, 발전자의 경우도 자신의 효용(-)에서 요금(-)을 뺀 값이 된다. 예비력이 안전운전률을 보장할 수 있고( $\bar{z} = \eta \cdot \sigma_w$ ), 참여자가 충분히 많아서 각 참여자의 예약불이행 크기가 계통의 부족전력 크기에 비하여 충분히 작다고( $\sigma_j y_j \ll \sigma_w$ ) 가정하여 1차 Taylor전개를 사용하면 다음과 같은 참여자의 목적함수를 얻을 수 있다.

$$\max_{y_j, z_j} \begin{cases} \int_w b_j \left( y_j - \frac{z_j}{\eta \cdot \sigma_w} w \right) \cdot f_w(w) dw \\ - \lambda \cdot y_j - \pi \cdot \left( \eta \cdot \frac{1}{2 \sigma_w} \cdot (\sigma_j y_j)^2 - z_j \right) \end{cases} \quad (16)$$

(16) 식에 대하여 Kuhn-Tucker 조건을 적용하면 (14), (15) 식이 염이진다. 따라서 가격결정자가 적절한 가격을 택함으로써 사회전체적으로 최적이 되는 운전상태를 결정할 수 있다. 이때 각 참여자가 지불하는 요금은 다음과 같이 주어진다.

$$c_j(y_j, z_j) = \lambda + \frac{\eta \pi}{2} \cdot \left( \frac{\sigma_j}{\sigma_w} \right) \cdot (\sigma_j y_j) - \pi \cdot z_j \quad (17)$$

소비자의 경우 요금은 계통한계비용( $\lambda$ )에 자신이 계통의 부족전력에 끼친 부분의 과징금  $\left( \frac{\eta \pi}{2} \cdot \left( \frac{\sigma_j}{\sigma_w} \right) \cdot (\sigma_j y_j) \right)$ 을 더한 값을 전력단가로 하여

지불한 전력요금과, 자신이 계통에 제공한 예비력에 대한 보상량( $\pi \cdot z_j$ )의 차가 된다. 발전자의 경우 전력요금은 계통한계비용에 의한 요금( $-\lambda \cdot y_j$ )과 계통의 부족전력에 끼친 부분의 과징금  $\left( \frac{\eta \pi}{2 \sigma_w} \cdot \sigma_j^2 y_j^2 \right)$

을 뺀 값이고, 예비력요금은 자신이 계통에 제공한 부분에 대한 보상량( $\pi \cdot z_j$ )이 된다.

예비력의 제공유인이 작고, 계통의 부족전력에 많은 영향을 끼치는 참여자는 많은 과징금을 내게되고, 예비력의 제공유인이 크고 계통의 부족전력에 작은 영향을 미치는 참여자는 예비력의 제공으로 인한 보상금을 받게 된다. 따라서 모든 참여자가 계통의 부족전력에 미치는 영향을 줄이려고 노력할 것이며, 또한 예비력요금에 따라 자발적으로 예비력에 기여하게 되므로 이로부터 예비력에 대한 투자를 줄일 수 있어 보다 저렴한 전력가격을 유지할 수 있을 것이다.

### 4. 결론

발전자와 소비자 그리고 가격결정자로 구성되는 전력이 약요금제를 통하여 사회적으로 효율적인 방법으로 계통의 안전성을 도모할 수 있음을 보았다.

본 논문의 결과에 따르면 사회적으로 최적인 예비력의 분배를 이를 수 있도록 하는 전력 및 예비력 요금이 존재한다. 각 참여자의 요금은 다음과 같은 세 부분으로 이루어 진다.

- 전력량 요금 : 사용전력량에 따른 에너지 요금
- 사고 과징금 : 예약불이행에 따라 추징되는 설비요금
- 예비력 보상 : 예비력을 제공하는 댓가로 주어지는 보상금

각 참여자는 사고과징금을 줄이기 위해 노력할 것이며 이로부터 계통전체의 예비력 확보량을 줄일 수 있다. 또한 예비력 보상에 따른 각 참여자의 자발적인 기여로 인하여 소요되는 예비력을 확보할 수 있다.

이 체계에서 가격결정자와 참여자간에 필요한 통신 데이터는 전력, 예비력의 가격과 예약량뿐이고, 각자의 사고확률에 대한 통계자료만 있으면 실제 구현도 어렵지 않다.

### 5. 참고문헌

- [1] R. John Kaye, Felix F. Wu, Pravin Varaiya, 'Pricing for System Security', IEEE 92 WM 100-8 PWRS
- [2] Caramanis M.C., Bohn R.E., Scheppe F.C., 'Optimal Spot Pricing : Practice and Theory', IEEE Trans. on PAS, Vol. 101, No 9, 1982.
- [3] R. J. Kaye, H. R. Outhred, 'A Theory of Electricity Tariff Design for Optimal Operation and Investment', IEEE Trans. PWRS, May 1989, pp. 606-613
- [4] Wilbur B. Davenport, Jr. 'Probability and Random Processes', McGraw-Hill
- [5] 임성황, 최준영, 박종근, '전력계통 안정성 확보를 위한 확률적 예약요금제', 전기학회, 제43권, 제2호, 1994.