

Probabilistic Precontract Pricing for Power System Security

林 聖 皇\* · 崔 峻 榮\*\* · 朴 鍾 根\*\*\*  
 (Seong-Hwang Rim · Joon Young Choi · Jong-Keun Park)

**Abstract** – Security of a power system refers to its robustness relative to a set of imminent disturbances (contingencies) during operation. The socially optimal solution for the actual level of generation/consumption has been well-known spot pricing at short-run marginal cost. The main disadvantage of this approach arises because serious contingencies occur quite infrequently. Thus by establishing contractual obligations for contingency offering before an actual operation time through decision feedback we can obtain socially optimal level of system security. Under probabilistic precontract pricing the operating point is established at equal incremental cost of the expected short-run and collapse cost of each participant. Rates for power generation/consumption and for an offer to use during a contingency, as well as information on the probability distribution of contingency need for each participant, are derived so that individual optimization will lead to the socially optimal solution in which system security is optimized and the aggregate benefit is maximized.

**Key Words** : Contingency Offering, Probabilistic Precontract Pricing, Socially Optimal Level of Security, Decision Feedback

1. 서 론

전력계통을 운전하는 과정에서 어떠한 원인에 의해 전력수급 불균형현상이 발생했을 때, 이러한 사태에 대비하는 여분의 발전력이 준비되어 있지 않으면 대규모 정전사태가 일어날 수 있고 이 때 발생하는 전력공급지장과 설비파손으로 인한 경제적 손실은 사회가 현대화되고 경제규모가 커져 사회의 전력 의존도가 높을수록 커진다. 따라서 이러한 대정전 사태를 초래하지 않고 사회적 효용을 극대화시키기 위하여 전력시스템 계획이나 운전과정에서 고려해야할 가장 중요한 요소 중의 하나가 안정성 확보이다. 전력계통의 안정성이란 발전전력이나 송전전력 상실과 같은 발생가능한 사고에 전

력계통이 견디는 능력을 말한다. 이를 위해 계획과정에서는 전력수요를 정확히 예측하여야 하며 운전과정에서는 확보된 설비들을 이용하여, 계속적으로 변화하는 전력수요에 대응하고 수시로 발생할 수 있는 전력시스템 사고를 극복해나갈 방안을 마련해야한다. 기존에는 안정성확보 방안으로, 예상되는 수요보다 많은 발전력을 유지할 수 있도록 계통 측면에서 발전력을 계획하는 것인데, 이 때 적정예비력을 계산하는 것은 매우 어려우며 사용자의 효용을 모르는 계통계획자가 계산한 예비력의 적정성 여부는 논란의 여지가 많다.

근래의 전력산업의 상황을 보면 경제규모의 성장으로 전력회사 소유가 아닌 발전설비가 증가되고 있으며 통신 및 전산기술 발달로 장거리 통신의 신뢰도가 높아졌고 단위시간당 자료교환 및 계산능력이 향상되어 전력설비 소유자가 전력계통 상태에 신속히 대응할 수 있게 되었다. 그리고 최근에 전력계통 참여자 각자가 자신의 최대이익을 추구하면 그것이 사회의 최대이익을 추구하는 것이라는 논문[4]이 발표되었다. 따라서 이러한 전력설비 소유자들을 운전과정에 참여시켜 어떤 시점

\* 准 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 碩士課程  
 \*\* 正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 博士課程  
 \*\*\* 正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 副教授 · 工博  
 接受日字 : 1993年 6月 1日  
 1次修正 : 1993年 8月 16日  
 2次修正 : 1993年 9月 25日  
 3次修正 : 1993年 11月 9日  
 4次修正 : 1993年 12月 6日

에서 다음 순간에 운전하게될 전력량과 전력요금을 계통구성원과 요금 결정자간의 의사교환을 통해 각자의 이득을 극대화 하는 방향으로 결정함으로써 사회적으로 최적수준의 전력계통 안정성확보를 이루고자 하는 확률적 모형의 요금제도가 소개되었다.[1] 이것은 전통적 전력요금체계가 지니고 있는 수치균형 유지의 역할과 한계비용 전력요금체계[5]가 추가한 자원의 최적배분의 역할뿐만 아니라 사고대비 기능을 전력요금의 역할에 추가하고자 하는 것이다.

그러나, 이 논문에서는 사회전체 및 각 참여자의 이득함수 설정에 있어서 사고발생확률 적용 상 문제점이 있고, 안정성 확보가 주된 요점이므로 붕괴비용의 처리가 중요한데 붕괴비용을 상수로 처리하여 사고대비전력 유인에 문제가 있으며, 요금구조에 있어서 다른 참여자의 공헌에 지불하는 부분을 고려치 않아 전력요금의 산정에 불합리성을 유발하였다. 따라서 본 논문에서는 사회전체 및 각 참여자의 이득함수에 참여자 각자의 안정운전확률을 감안한 각 사건별 사고 발생확률을 적용하였으며, 붕괴비용을 계약전력량의 함수로 처리하였고, 사고시 시스템붕괴를 막기 위해 임의의 전력계통 참여자가 제공하는 발전력 또는 수요절감전력에 대한 상호 보상관계를 명확히 하여 전력요금구조를 변경함으로써 참여자들의 공정한 비용분담으로 사회적으로 최적인 안정성을 확보할 수 있었다.

## 2. 본 론

### 2.1 확률적 예약요금제

#### 2.1.1 사용전력 및 사고대비전력 예약

본 논문에서는 전력 생산자와 소비자를 특별히 구별하지 않고 계통운전에 참여하는 구성원을 참여자(participants)라 한다. 그러나 발전력과 소비전력의 상대적 크기에 따라 발전력이 소비전력보다 큰 참여자는 발전자의 역할을 하고, 소비전력이 더 큰 참여자는 전력소비자의 역할을 한다. 참여자 전체집합을  $J$ , 발전자역할 참여자집합을  $G$ , 전력소비자역할을 하는 참여자집합을  $C$ 라 하면 다음 식이 성립한다.

$$J = G \cup C \tag{1}$$

$j \in G$ 인 참여자에게 있어서  $y_j$ 는 발전력을 나타내고,  $z_j$ 는 사고시 발전력을 증가시켜 시스템에 제공하게 될 최대 발전력이며 모두 양의 값이다.  $j \in C$ 인 참여자에게 있어서  $y_j$ 는 소비전력을 나타내고,  $z_j$ 는 사고시 소비전력을 절감하여 감소된 최소 소

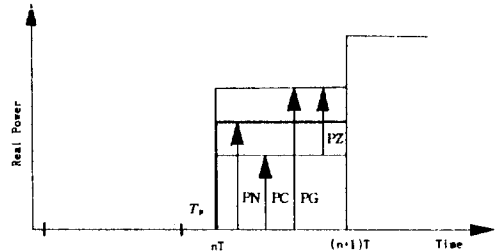


그림 1 확률적 예약요금제의 구조

Fig. 1 The Structure of Probabilistic Precontract Pricing

비전력으로 모두 음의 값이다. 그리고 전력요금 확정 의무와 각종 예측치를 각 참여자에게 제공하는 임무를 수행하는 실체가 존재하는데 이를 가격결정자(Price setter)라 한다.

각 참여자는 실제 운전기간 전에 그 운전기간에 실제로 사용할 전력량과 그 운전기간 동안 사고가 발생하면 이를 극복하기 위해 추가로 발전하거나(발전자의 경우) 소비전력을 절감해 줄 수 있는(전력소비자의 경우) 전력량을 결정해야 한다. 즉 실제운전에 앞서 참여자 자신의 이득을 극대화시키는 상호간의 의사교환으로 다음 운전기간의 전력량을 예약함으로써 실제 운전기간중의 수요와 발전력을 일치시킬 수 있으며 사회적 최적수준의 사고대비전력을 결정할 수 있다. 운전기간 중 각 참여자는 예약된 계약전력을 초과하여 사용하거나(전력소비자의 경우) 부족하게 발전(발전자의 경우)하여서는 안된다. 만일 부득이한 사정으로 즉, 예상치 않았던 전력사용 필요성이 생기거나 자신의 발전기 사고 등으로 계약전력 생산을 이행할 수 없게되면 그 참여자는 사고를 유발시킨 것으로 판단되어 그 참여자의 사고발생 확률이 높아지므로 앞으로의 계약에 있어서 전력요금상으로 불이익을 받게 된다. 따라서 각 참여자는 다음 운전기간의 사용전력량을 정확히 산출하는 것이 중요하며 운전기간 동안에는 가격결정자의 지시에 따라 예약된 계약전력 범위내에서 전력계통 운전 참여해야 한다. 예약시점은 현 설비상태를 파악하기 가장 좋은 실제 운전기간 바로 직전이 최적이지만 운전준비상 어려움이 있을 때에는 운전기간의 사용전력 산출의 정확성을 해치지 않는 시간만큼 앞서 행할 수도 있다. 이렇게 하여 사고확률을 감안한 사용전력 및 사고대비 전력량을 예약할 수 있다. 이것을 제1차예약이라 한다.

제1차 예약이 합의되면 참여자가 합의한 사고대비 전력량이 결정되는데 이를 초과하는 사고가 발생하면 시스템붕괴로 제1차예약은 효력을 상실한

다. 그러나 이러한 사고에도 살아남는 발전력은 존재하고 전력소비자가 이를 사용할 의사가 있으면 새로운 운전점에서 잔여발전력이 재배분이 될 수 있다. 이렇게 하면 계통붕괴사고 발생 후의 잔여전력을 사용할 권리가 새롭게 형성되는 제2차에약을 할 수 있다. 즉 제2차 예약은 실제 운전에서 제1차 예약시 합의된 사고대비전력량 이상의 사고가 발생했을 때 상실 발전력을 제외한 잔여 발전력의 사용에 관한 예약이며 이러한 추가에약을 하면 이론적으로는 발전력이 모두 상실될 때까지 예약이 가능하여, 운전기간 중에 사고대비전력 이상의 사고가 발생하여 전력계통이 붕괴할 상황을 발생했을 때부터 그 다음 운전시점까지 부하관리 및 운전방향을 결정할 수 있다. 본 논문에서는 제1차에약에 관해서만 논하고자 한다.

**2.1.2 계약지속시간의 의미**

확률적 예약요금제는 각 참여자의 수요예측, 사고발생확률, 기타 정보처리 시간에 영향을 받는다. 왜냐하면 실제 사용량의 실적에 따라 사후에 요금이 부과되는 것이 아니라 예약한 사용전력량과 사고대비전력에 의해 예약시점에서 계약지속시간 동안 동일한 전력이 사용될 것이라는 가정하에 전력요금이 부과되기 때문이다. 전력소비자의 입장에서 보면 어떤 기간 전체에 동일한 전력을 계속해서 사용한다는 것은 기간이 길어질수록 어려워진다. 계약지속시간(운전기간)은 의사소화에 의해 요금이 일정하게 부과되는 기간과 동일하게 되므로 참여자와 가격결정자간의 이득계산과 정보교환에 소요되는 시간에 의존하는데 만일 계약지속시간(운전기간)이 상당히 짧으면 그 기간 동안 각 참여자가 사용하는 전력은 거의 일정하다고 볼 수 있고 이때 확률적 예약요금제는 실시간 요금제도(Real time pricing)와 동일한 개념이 된다.

**2.2 문제의 정식화**

**2.2.1 용어의 정의**

임의의 운전기간 중 사회적 최적 사용전력량 및 사고대비 전력량의 해  $(\hat{y}, \hat{z})$  및 각 참여자의 최적해  $(\hat{y}_j, \hat{z}_j)$ 를 계산하기 위해 참여자들의 이득 및 비용을 나타내는 식이 정의되어야 한다. 비용은 음의 이득으로 생각함으로써 이득 및 비용을 묶어 이득함수로 간주할 수 있다. 따라서 사회전체 및 각 참여자의 이득 함수를 찾기위해 다음을 정의한다.

$\Omega$  : 발전자, 전력소비자, 송전계통에 의한 모든 사고집합

$\zeta_j(\omega)$  :  $\omega \in \Omega$  사고 발생시 참여자  $j$ 가 계통

에 제공할 실제 전력

만일  $z_j \geq 0$  이면  $0 \leq \zeta_j(\omega) \leq z_j$  (2)

만일  $z_j \leq 0$  이면  $y_j \leq \zeta_j(\omega) \leq z_j$  (3)

임의의 사고시 계통의 사고극복 여부는 사고의 크기와 참여자들이 이의 극복을 위해 계통에 제공하는 사고대비전력의 합에 따라 결정된다.

$y, z, \zeta$  :  $y, z, \zeta$ 의  $J$ -벡터

$S(\zeta(\omega), \omega)$  :  $\omega \in \Omega$  사고 발생시 계통의 안정여부를 나타내는 모든 식.

사고시 전력계통이 안정되면 다음식과 같은 부등호로 표시한다.

$S(\zeta(\omega), \omega) \leq 0$  (4)

$\Omega_k(z) = \{\omega \in \Omega : \exists \zeta(\omega), \text{ s.t. } 0 \leq \zeta_k(\omega) \leq z_k, \forall k \in J, S(\zeta(\omega), \omega) \leq 0\}$

$J$ 를 제외한 참여자들이 발생시킨 사고중  $J$ 를 포함한 모든 참여자의 사고대비전력으로 극복가능한 사고

주어진  $z$ 와  $\omega \in \Omega_k(z)$ 에 있어서  $\zeta(\omega)$ 는 유일하지 않을 수 있고 이때  $\zeta(\omega)$ 의 선택은 계통운전자가 합리적 기준에 의해 결정한다. 예를 들면 모든 참여자들로부터 추가전력량의 선택비율을 같게 하는 기준에 따라 결정할 수 있다. 자세한 언급은 식(7)에서 볼 수 있다.

$b_j(y, z)$  : 사고가 없을 때  $j$ 의 정상운전에 의한 이득

예를 들면  $j$ 기 전력소비자라면 전력을 사용하여 생산한 상품의 판매로 얻은 수입에서 그 상품을 생산하는데 든 비용(임금, 원료가격 단, 원료에서 전력은 제외)을 제한 값을 말한다.

$\beta_j(z, \zeta)$  : 사고시  $j$ 가  $z_j$  범위안에서  $\zeta_j$  운전시 발생하는 이득

$b_j$  : 참여자  $j$ 의 인정운전확률(계통과 분리된 상태의 개체확률)

$P_j(\cdot)$  :  $J$ 를 제외한 참여자들이 발생시킬 사고의 확률분포

$P_0$  : 사고없이 정상상태운전을 할 확률(참여자 전체의 안정운전확률 곱)

$R_j(z) = \int \Omega_{js}(z) dp_j(\omega)$  :  $J$ 를 제외한 참여자들이 극복가능한 사고를 발생시킬 확률(정상상태 제외)

$K_j(y)$  : 계통붕괴시  $j$ 가 임계될 붕괴비용의 크기(양의값)

$h_j(y_i, z_i) \leq 0$  : 과부하 및 전압강하에 의한  $j$ 의 발전전력 한계

$Y_{j,m}$  : 전력계통 외부로의 공급 또는 외부로부터의 주입을 나타내며 전력손실을 포함한다. 따라서 전력균형식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & Y_{mn} + \sum y_j = 0 \quad (5) \\
 & \pi_j(y_j, z_j) : \text{참여자 } j \text{가 계약시 받거나 지불할} \\
 & \text{전력요금} \\
 & F_{\Omega_{js}}(z_j | z_j) : \text{참여자 } j \text{가 } z_j \text{를 제약하고 } \Omega_{js}(z) \\
 & \text{사고 발생시 계통 운전자에게 의해 요구되어질} \\
 & \text{전력의 확률분포} \\
 & \Theta : \text{계약전력의 단위 판매가격}
 \end{aligned}$$

**2.2.2 사회 전체의 이득함수 및 최적해**

비용을 음의 이득으로 고려하면 사회 전체의 이득 및 비용함수식을 이득함수로 만들 수 있으며 적정 전력가격 결정의 목표가 사회 전체의 이득을 최대화하는 것이므로 이것을 만족시키는 최적해를 다음 식에서 찾을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \max \left[ \sum_{j \in J} \left\{ P_{0j} b_j(y_j, z_j) + p_j R_j(z) \int_0^{z_j} \beta(z_j, \zeta_j) \right. \right. \\
 & \left. \left. dF_{\Omega_{js}}(z_j | z_j) - (1 - P_0 - p_j R_j(z)) K_j(y_j) \right\} : \right. \\
 & \left. h_j(y_j, z_j) \leq 0, \forall j \in J, Y_{mn} + \sum_{j \in J} y_j = 0 \right] \quad (6)
 \end{aligned}$$

목적함수의 첫번째 항은 사고가 없을 때 참여자들의 기대이득의 합이고 두번째 항은 극복가능한 사고 발생시 가동중인 참여자들의 기대이득의 합이고 세번째 항은 가동이 중단된 참여자의 음의 기대이득(붕괴비용)이다. 그리고 전력요금의 수수는 재화의 참여자간 이동이므로 사회전체적인 측면에서 보면 이득함수에 고려되지 않는다. 여기서 ω 사고 발생시 전력계통 운전자가 각 참여자로부터 계통에 제공받을 ζ(ω)를 선택하는 것은 다음식에 따른다.

$$\zeta_j(\omega) = t \cdot (z_j - y_j) + y_j : s.t. \omega = \sum_{j \in J_{\Omega S}} \zeta_j(\omega), \quad (7)$$

$$0 \leq t \leq 1 \quad \forall j \in J_{\Omega S}, S(\zeta(\omega), \omega) \leq 0$$

(단, J<sub>ΩS</sub> : 사고나지 않은 참여자의 집합)

즉, 가격결정자는 식 (7)과 같이 모든 극복가능사고에 대하여, 사고가 나지 않은 모든 참여자로부터 추가전력(z<sub>j</sub> - y<sub>j</sub>)에 대한 같은 비율의 전력을 추가로 발전 또는 부하를 절감하게 하는 전력 ζ<sub>j</sub>(ω)를 계산하여 ζ(ω)를 선택하고 각 극복 가능사고의 발생확률을 이용하여 F<sub>Ω<sub>js</sub></sub>(z)(ζ<sub>j</sub> | z<sub>j</sub>)를 결정한다.

**2.2.3 각 참여자의 이득함수와 최적해**

임의의 참여자 k는 전력계통 안정성을 유지하면서 자신의 이득을 최대화시키도록 y<sub>k</sub> 및 z<sub>k</sub>를 전력계통에 제공할 것을 결정할 것이다. 따라서 아래와 같이 순이득 함수를 설정하고 이것이 최대화 되도록 (y<sub>k</sub>, z<sub>k</sub>)를 결정한다.

$$\begin{aligned}
 & \max \{ P_{0k} b_k(y_k, z_k) + p_k R_k(z) \int_0^{z_k} \beta_k(z_k, \zeta_k) dF_{\Omega_{ks}}(z) \\
 & (\zeta_k | z_k) \} - (1 - P_0 - p_k R_k(z)) K_k(y_k) - \pi_k(y_k, z_k) \\
 & : h_k(y_k, z_k) \leq 0 \quad (8)
 \end{aligned}$$

목적함수의 첫번째 항은 사고가 없을 때 k의 기대이득이고 두번째 항은 k를 제외한 다른 참여자가 극복가능한 사고를 발생시켰을 때 k의 비용이 증가된 운전 기대이득이며, 세번째 항은 k가 자신의 사고 및 계통사고로 인해 가동 불능시 입게되는 붕괴 기대비용이고 네번째 항은 k가 받거나 주게 될 전력요금이다.

**2.3 적정 전력요금의 결정**

각 참여자가 가격결정자(Price setter)로 부터 참여자들의 안정성에 관한 요구가 반영된 요금신호와 각 참여자가 제공하는 사고대비전력의 사용에 관한 확률분포에 관한 정보를 얻는다면 각 참여자들이 자신의 최적해 (y<sub>k</sub>, z<sub>k</sub>)로 부터 사회 전체의 최적해를 얻을 수 있음을 증명할 수 있다. 이를 위해 다음을 정의한다.

$\bar{A}^k$  : k번째 성분을 제외한 나머지 성분이 최적 성분을 갖는 임의의 A 벡터

$\frac{\partial R_j(z^k)}{\partial z_k}$  : k의 사고대비전력(z<sub>k</sub>)의 변화에 의

한 R<sub>j</sub>(z<sup>k</sup>) 변화로 z<sub>k</sub>가 증가하면 사고대비전력이 증가하므로 R<sub>j</sub>(z<sub>k</sub>)가 증가하여 양의 값이 된다.

$$\lambda_{jk} = P_j - \frac{\partial R_j(\bar{z}_k)}{\partial z_k} \left\{ K_j(y_j) + \int_0^{\bar{z}_k} \beta_j(z_j, \zeta_j) dF_{\Omega_{js}}^{\zeta_j | z_j}(z) \right\} \quad (9)$$

λ<sub>jk</sub>는 참여자 k에의 사고대비전력 z<sub>k</sub>에 의해 계통이 안정되므로써 참여자 j가 받는 기대이득으로서 첫번째 항은 j의 붕괴 기대비용이 감소분이며 두번째 항은 j의 사고대응 기대비용의 감소분이다. 즉 참여자 j에게 제공된 참여자 k의 공헌이다. 역으로 λ<sub>jk</sub>는 참여자 k에게 제공된 참여자 j의 공헌이다. 상기 식은 다음 정리와 요금의 합은 영이라는 조건에 의해 구해진다.

**정리** 참여자 k에게 다음과 같은 요금과 사고대비 전력 선택확률이 주어진다면

$$\pi_k(y_k, z_k) = -y_k - \sum_{j \neq k} \Theta y_k - \sum_{j \neq k} \lambda_{jk} z_k + \sum_{j \neq k} \lambda_{kj} z_j \quad (10)$$

$$F_{\Omega_{ks}}(z)(\zeta_k | z_k) = P(\{\omega \in \Omega_{js}(z_k) : \zeta_k \leq z_k\}) \quad (11)$$

식 (8)에 의해 각 참여자가 내린 결정은 사회적으로 최적이 된다.

다시말하면  $\bar{y}_k = \bar{y}_k$  (12)

$$\bar{z}_k = \hat{z}_k \text{이다.} \quad (13)$$

전력요금은 2가지의 요소를 가지는데 하나는 참여자의 발전력 혹은 소비전력에 따른 가격이고 다른 하나는 사고대비전력에 관련된 가격이다. 식(10)의 첫번째 항은 발전 또는 소비전력에 부과되는 k의 요금이고, 두번째 항은 k가  $z_k$ 의 사고대비 전력을 제공할 때 다른 참여자에게 베푼 공헌에 대한 k가 받는 요금이며, 세번째 항은 다른 참여자들이  $z_j$ 를 제공하여 k가 받은 공헌에 대한 k의 지불요금이다.

**정명**  $\hat{y}_j, \hat{z}_j, \Theta, \gamma_j, \forall j \in J$ 가 방정식 (6)의 Kuhn-Tucker 방정식의 해집합이라 하면 다음이 성립한다.

$$P_0 \frac{\partial b_k}{\partial y_k} - (1 - P_0 - p_k R_k(z)) \frac{\partial K_k(y_k)}{\partial y_k} + \gamma_k \frac{\partial h_k}{\partial y_k} + \Theta = 0 \quad (14)$$

$$P_0 \frac{\partial b_k}{\partial z_k} + \sum_{j \in J} p_j \frac{\partial R_j(z)}{\partial z_k} \int_0^{z_j} \beta_i(z_j, \zeta_j) dF_{\Omega_j(z)}(\zeta_j | z_j) + p_k R_k(z) \frac{\partial}{\partial z_k} \int_0^{z_k} \beta_k(z_k, \zeta_k) dF_{\Omega_k(z)}(\zeta_k | z_k) + \sum_{j \in J} p_j \frac{\partial R_j(z)}{\partial z_k} K_j(y_j) + \gamma_k \frac{\partial h_k}{\partial z_k} = 0 \quad (15)$$

$$\gamma_k \begin{cases} = 0 & \text{if } h_{k,i}(y_k, z_k) < 0 \\ \geq 0 & \text{if } h_{k,i}(y_k, z_k) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$Y_{non} + \sum_{j \in J} y_j = 0 \quad (17)$$

또한  $\bar{y}_j, \bar{z}_j, \bar{\Theta}_j, \bar{r}_j \forall j \in J$ 가 방정식 (8)의 Kuhn-Tucker 방정식의 해집합이라 하면 다음이 성립한다.

$$P_0 \frac{\partial b_k}{\partial y_k} - (1 - P_0 - p_k R_k(z)) \frac{\partial K_k}{\partial y_k} + \gamma_k \frac{\partial h_k}{\partial y_k} - \frac{\partial \pi_k}{\partial y_k} = 0 \quad (18)$$

$$P_0 \frac{\partial b_k}{\partial z_k} + p_k \frac{\partial R_k(z)}{\partial z_k} \int_0^{z_k} \beta_k(z_k, \zeta_k) dF_{\Omega_k(z)}(\zeta_k | z_k) + p_k R_k(z) \frac{\partial}{\partial z_k} \int_0^{z_k} \beta_k(z_k, \zeta_k) dF_{\Omega_k(z)}(\zeta_k | z_k) + P_k \frac{\partial R_k(z)}{\partial z_k} K_k + \gamma_k \frac{\partial h_k}{\partial z_k} - \frac{\partial \pi_k}{\partial z_k} = 0 \quad (19)$$

$$\gamma_k \begin{cases} = 0 & \text{if } h_{k,i}(y_k, z_k) < 0 \\ \geq 0 & \text{if } h_{k,i}(y_k, z_k) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

식 (10)을 식 (18)에 대입하면 (14)가 얻어지고, 식 (10)을 식 (19)에 대입하면 식 (15)이 얻어진다. 따라서  $\bar{y}_k = \hat{y}_k$ 이고  $\bar{z}_k = \hat{z}_k$ 이다.

**2.4 참여자의 이득 최대화로 사회의 이득 최대화 실현**  
앞에서 정리와 증명을 통해 각참여자의 최대이

득 추구가 사회전체의 최대이득 추구를 이룰 수 있는 요금의 구조가 존재함을 보였다. 즉 참여자 k는 가격결정자로부터 식 (10)의 가격과 식 (11)의 확률정보( $\frac{\partial R_k(z)}{\partial z_k}$ 포함)를 받아서 식 (8)의 이득함수를 구성하여 식 (18), (19), (20)에 의해 최적의 전력량 ( $\bar{y}_k, \bar{z}_k$ )을 찾아서 가격결정자에게 보내고 가격결정자는 참여자들로 부터 받은  $y, z$ 를 사용하여 식 (5), (7)을 풀이 새로운 가격과 확률정보를 참여자에게 보내는 작업을 식 (5)가 만족되고 사고대비전력의 벡터  $z$ 의 변화가 수렴할 때까지 반복하여 사회전체적으로 최적의  $h(\hat{y}_k, \hat{z}_k)$ 를 찾았으므로써 가격결정자가 참여자의 이득정보 없이 즉, 식 (6)의 풀이를 하지 않고 사회의 이득 최대화를 실현할 수 있다.

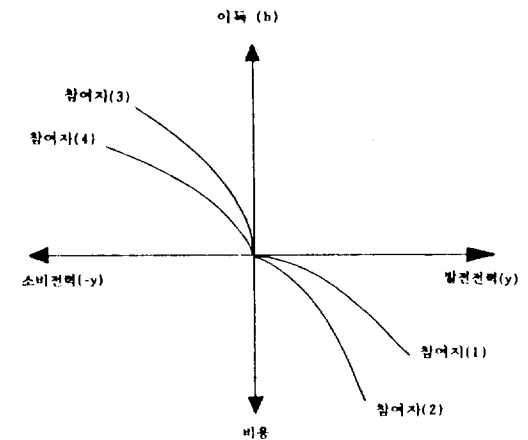
**2.5 안정운전확률과 단위전력 붕괴비용**

식(14)에서  $-\Theta$ 는 단기운전 기대비용과 붕괴 기대비용의 합인 한계비용으로서 각 참여자의 운전점은  $-\Theta$  값이 같은 점에서 결정된다. 따라서 전력계통 붕괴비용을 고려하지 않던 기존의 개념하에서 단기운전한계비용이 같은 점에서 운전점이 결정되던 것과는 다른 점을 볼 수 있다. 그리고 참여자 k의 붕괴비용을 전력량에 비례하는 것으로 보면 다음과 같이 정의할 수 있다.

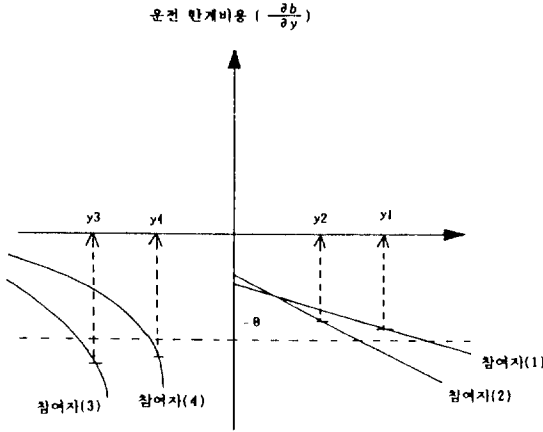
$$K_k(y_k) = \alpha_k |y_k| \quad (\alpha_k : \text{단위전력 붕괴비용, 양의 값}) \quad (21)$$

이것의 제약전력에 따른 변화량은 다음과 같다.

$$\frac{\partial K_k(y_k)}{\partial y_k} = \alpha_k \text{ (if } y_k > 0, \text{ 즉 발전자의 경우)} \\ = -\alpha_k \text{ (if } y_k < 0, \text{ 즉 소비자의 경우)}$$



**그림 2** 참여자들의 이득함수  
**Fig. 2** Benefit functions of Participants



**그림 3** 참여자의 단기운전한계비용과 운전점  
**Fig. 3** Participant's Short-run marginal cost and operating point

이것을 식 (14)에 대입하고 정리하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial b_k}{\partial y_k} = \frac{1}{P_0} \{ (1 - P_0 - p_k R_k(z)) \alpha_k - \Theta \} \text{ if } y_k > 0$$

$$= \frac{1}{P_0} \{ - (1 - P_0 - p_k R_k(z)) \alpha_k - \Theta \} \text{ if } y_k < 0$$

상기식은 각 참여자의 운전점이 단기한계비용의 관점에서 볼 때  $-\Theta$ 에서 다음과 같이 이동된 점에서 결정됨을 보여준다. 즉 발전자의 경우에는 현재의 계통 붕괴확률에 단위전력 붕괴비용을 곱한 만큼 양의 방향으로 이동한 단기한계비용에서, 전력소비자의 경우에는 같은 크기의 음의방향으로 이동한 단기한계비용에서 결정된다.

그림2는 참여자별 운전비용 및 이득함수를 보여준다. 참여자 (1), (2)는 발전자로서 운전비용은 전력생산량의 증가에 따라 증가한다. 참여자 (3), (4)는 전력소비자로서 이득은 전력사용량이 증가함에 따라 효용체감에 따라 증가량이 감소하는 형태를 가진다. 그림3은 참여자별 운전비용 및 이득함수의 전력량에 대한 변화량(미분값), 다시말하면 단기운전한계비용과 운전점과의 관계를 보여준다.

그림3에서 단기운전한계비용은 음의 값이므로 이것을 식 (23)에 적용하면 다음이 성립한다.

$$(1 - P_0 - p_k R_k(z)) \alpha_k - \Theta < 0$$

여기서  $\alpha_k = s_k \Theta$  라면 즉, 단위전력 붕괴비용이 사용전력요금의  $s_k$ 배라면 이것을 식 (24)에 대입하여  $s_k$ 의 범위를 결정할 수 있다.

$$0 < s_k < \frac{1}{1 - P_0 - p_k R_k(z)}$$

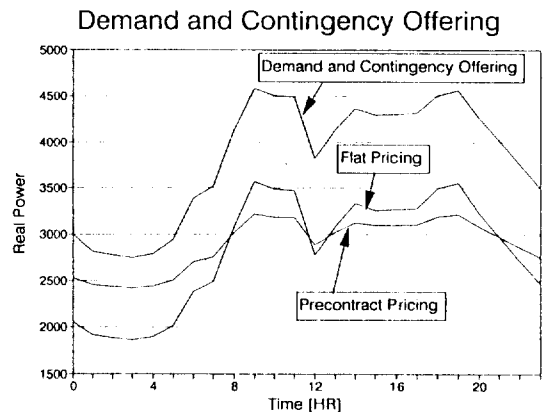
이 식은 붕괴비용이 사용전력량과 비례할 때 단위 붕괴전력의 평가범위를 나타내는데 단위붕괴전력의 평가가 현재계의 상태에 따라 달리 평가되어야 함을 말해준다. 예를 들어  $R_k(z)$ 가 작은 값이므로

$p_k R_k(z)$ 를 무시하고, 계통이 안정되어 계통전체의 안정운전확률( $P_0$ )이 커져 1에 가까워지면 식 (25)에서  $s_k$ 의 범위가 넓어지는데 이것은 참여자의 계통에 대한 신뢰도가 높아질수록 단위붕괴전력의 평가범위가 넓어짐을 알 수 있다. 또한 계통이 불안하여 안전운전확률( $P_0$ )가 작아지면  $s_k$ 의 범위가 줄어들는데 이것은 참여자의 계통에 대한 신뢰도가 낮아지면 단위붕괴전력의 평가범위가 제한된다는 것을 알 수 있다. 단위붕괴전력의 가격평가에 있어서 최적평가는 결국 선택의 문제가 되지만 현재의 전력계통 안정운전확률에 따라 제한된 범위 내에서 평가되어야 함을 확인할 수 있다.

### 3. 사례연구

제안된 확률전 예약요금제하에서 각 참여자와 가격결정자 간의 의사교환에 의해 사용전력과 사고대비전력의 사회적 최적수준을 찾을 수 있었는데 그 결정 과정을 간단한 예로 살펴보았다. 2명의 전력생산자와 2명의 전력소비자로 구성된 계통을 대상으로 하였으며 각자의 이득 및 비용함수는 다음과 같다.

$\beta_j(z_j, \xi_j)$ 는  $b_j(y_j, z_j)$ 와 동일한 함수이고 극복가능 사고발생시 발전력 및 사용전력량이 달라진다고 보았다.



**그림 4** 운전상황에서 부하와 사고대비전력  
**Fig. 4** The Trend of Load and Contingency offering in Operation

$$b_1(y_1, z_1) = -0.008y_1^2 - 22y_1 - 0.046z_1^2 + 100z_1$$

$$b_2(y_2, z_2) = -0.005y_2^2 - 11y_2 - 0.25z_2^2 + 100z_2$$

$$b_3(y_3, z_3) = 6988(-y_3)^{0.5} + 6988(-z_3)^{0.5}$$

$$b_4(y_4, z_4) = 2612(-y_4)^{0.5} + 2612(-z_4)^{0.5}$$

그림 4는 계약지속시간(운전기간)을 한시간으로 하고 하루동안 확률적 예약요금제를 적용하였을 때와 균일요금제(Flat Pricing)을 적용하였을 때 부하의 변화 및 사고대비전력의 변화를 비교하여 준다. 여기에 사용한 안정운전확률과 단위 전력붕괴 비용의 평가가격은 다음과 같다.

$$p_1 = 0.98, p_2 = 0.98, p_3 = p_4 = 1, \alpha = 5 \text{ \textcircled{C}}$$

균일요금제 적용시 부하곡선은 한전의 일부하곡선을 조정한 것을 사용하였다. 그림에서 보면 사고대비전력의 합 즉, 운전예비율은 부하가 적을 때 보다 부하가 많아질수록 증가함을 보여주는데 이것은 각 참여자들의 전력에 대한 효용은 부하가 많아질수록 크다는 것을 말해 준다. 또한 확률적 예약요금제를 적용했을 때는 균일요금제를 적용했을 때보다 부하율이 개선되는데 이것은 확률적 예약요금제에 단기운전 한계비용의 개념이 도입되었기 때문이다.

그림5는 상기와 같은 자료를 사용했을 때 하루동안의  $\Theta$  값의 변화를 보여준다.  $\Theta$ 는 한계비용이므로 부하가 크면 큰 값이 되어 부하를 줄이고 부하가 적으면 작은 값이 되어 부하의 창출을 유도하여 부하율을 높여 줌을 알 수 있다.

그림6은 상기와 같은 자료를 사용했을 때 하루동안의  $\lambda$  값의 변화를 보여준다. 그림을 보면 부하가

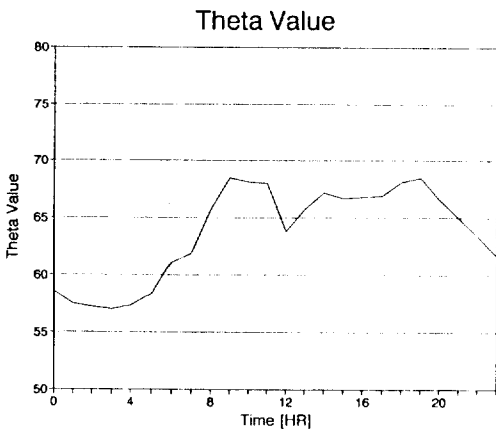


그림 5 운전과정에서의  $\Theta$  값 변화  
Fig. 5 The Trend of  $\Theta$  in Operation

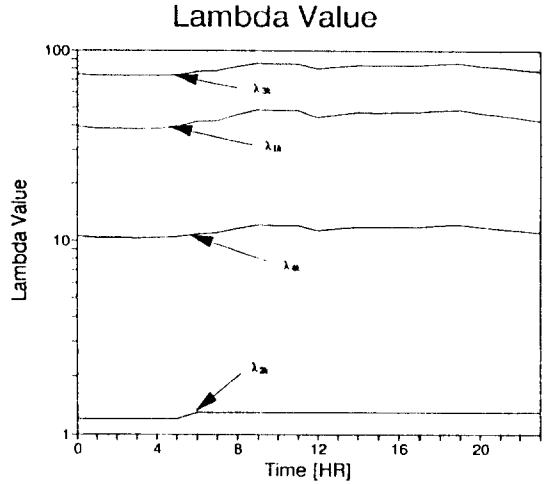


그림 6 운전과정에서의  $\lambda$  값 변화  
Fig. 6 The Trend of  $\lambda$  in Operation

커질수록  $\lambda$  값이 커지는데, 그 이유는 (9)에서 알 수 있듯이  $\lambda$  값이 붕괴비용 및 사고대비용에 대한 사고대비전력의 기여도이므로 부하가 커질수록 사용전력이 많아져서 이를 높이 평가하기 때문이다. 그리고 발전자보다는 사용자의  $\lambda$  값이, 작은 용량보다는 큰 용량의 참여자의  $\lambda$  값이 크게 평가됨을 볼 수 있다.

그림7과 그림8은 참여자 (1), (2)의 안정운전확률을 변화시켰을 때 사고대비전력의 변화를 보여준다. 두그림 모두에서 안정운전확률이 커짐에 따라 사고대비전력이 낮아짐을 알 수 있는데 이것은 계통 전체의 안정운전확률이 높아지기 때문에 사고대비전력이 줄어들기 때문이고, 그리고 부하가 증가하

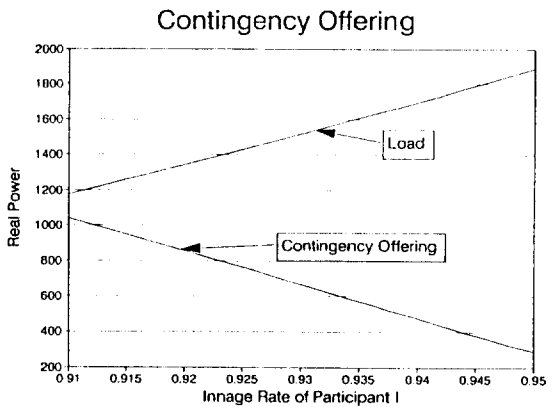
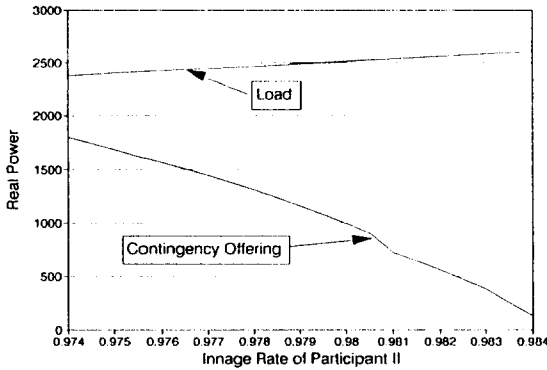


그림 7 참여자 (1)의 안정운전확률 변화에 따른 사고대비전력  
Fig. 7 Contingency offering and Load Trend depending on Participant(1)'s Innage Rate

### Contingency Offering

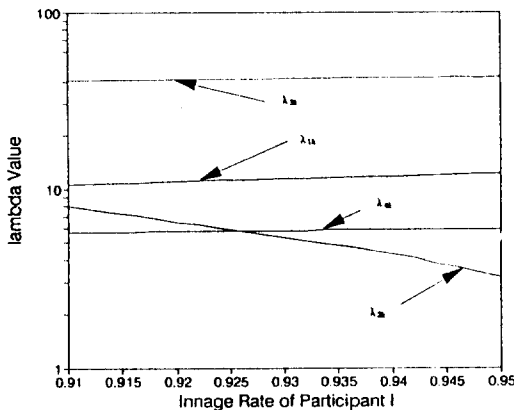


**그림 8** 참여자 (2)의 안정운전확률 변화에 따른 사고대비전력  
**Fig. 8** Contingency offering and Load Trend depending on Participant(2)'s Innage Rate

는데 이것은 식 (23)에서 알 수 있듯이 전력소비자의 운전점이 한계비용이 낮은 점으로 이동되었기 때문이다.

그림9는 참여자(1)의 안정운전확률을 0.91에서 0.95까지 변화시켰을 때 각 참여자의  $\lambda$ 값 변화를 보여준다. 참여자 (1)은 안정운전확률이 높아짐에 따라 큰 출력을 발생하는 방향으로 운전점이 결정되어 계통에 판매하는 전력이 늘어 전력량에 비례하는 붕괴비용이 늘고 이에 따른  $\lambda$ 값이 커졌으며, 참여자(2)는 참여자(1)과 같은 전력판매자로서 참여자(1)의 안정운전확률이 높아지므로 자신이 상대적으로 사고대응비용이 감소하여  $\lambda$ 값이 작아졌다. 참여자 (3), (4)는 전력소비자로서 참여자 (1)의 안정운전확률이 높아진 것은 계통전체의 고장확률이 감소된

### Lambda Value



**그림 9** 참여자 (1)의 안정운전확률 변화에  $\lambda$ 값 변화  
**Fig. 9** The Trend of  $\lambda$  depending on Participant (1)'s Innage Rate

**표 1** 단위전력붕괴비용변화에 따른  $\lambda$ 값 변화  
**Table 1** The Trend of  $\lambda$  depending on Collapse Cost of Unit Power

$\alpha$	$\lambda_{1k}$	$\lambda_{2k}$	$\lambda_{3k}$	$\lambda_{4k}$
$\alpha = 0$	1.0	0.0	32.0	4.5
$\alpha = 3\%$	13.7	0.5	46.5	6.5
$\alpha = 5\%$	27.0	1.0	59.7	8.3
$\alpha = 7\%$	39.8	1.2	74.9	10.5

것과 동일하므로 사고대비전력의 평가를 높게하여  $\lambda$ 값이 커졌다.

표1은 단위전력 붕괴비용을 사용전력가격의 1배에서 7배로 변화시켰을 때  $\lambda$ 값의 변화를 보여준다. 단위전력 붕괴비용을 크게 평가해 줄수록  $\lambda$ 값이 크게 나타나는 것은 식 (9)에서 보듯이 붕괴비용이 커졌기 때문에 발생하는 결과이다.

### 4. 결 론

전력생산과 사용에 있어서 자신의 이득을 최대화시키는 전력회사, 독립전력 생산자, 열병합발전자, 그리고 전력소비자를 포함한 모든 참여자가 존재하는 운전과정에서 요금과 예측정보들을 통해 사용전력 및 사고대비전력을 의사제한을 통해 예약함으로써 전력계통의 안정성을 확보할 수 있음을 알 수 있었다.

사회 전체 및 참여자의 비용합수를 각 사건이 일어날 확률을 고려하여 선정하므로써 각 참여자의 사고발생 확률이 자신의 전력요구에 반영됨을 알 수 있었고, 전력요금은 자신의 정상상태 사용용량과 사고대비전력의 예약용량 뿐만 아니라 다른 참여자가 계통의 안정성을 위해 제공하는 사고대비 전력량에도 관계있음을 알 수 있었다. 즉 계통 안정성확보에 대한 참여자간의 상대적 기여정도에 따라 차등적으로 전력요금을 적용하므로써 사고대비 전력이 요금에 의해 유인됨을 보았다.

또한 단위전력 붕괴비용은 계통안정운전확률에 의해 그 평가범위가 결정되며 운전점은 각참여자의 단기운전 기대비용과 붕괴 기대비용의 합의 한계비용이 같은 점에서 결정됨을 알 수 있었다.

이와같이 제안된 접근법을 실현하려면 요금계산과 정보의 예측 그리고 이것을 참여자에게 제공할 수 있는 통신, 계산, 제어시스템이 갖추어져야 한다. 앞에서 제시한 제1차 예약 및 추가예약을 시행할 수 있으면 계통붕괴사고 이후에도 새로운 전력 배분에 의해 계통운전이 가능하다.

앞으로 의사수렴 시간에 따라 계약유지시간 결정문제, 각 참여자의 안정운전확률 결정문제, 각 참여자의 이득과 전력량과의 상관관계에 의한 정확한 이득 및 비용합수 산출에 대하여 심도있는



연구가 필요하리라 생각된다.

### 참 고 문 헌

- [1] R.J.Kaye, Felix F. Wu and Pravin Varaiya  
"Pricing for system security" PWRS, 92 WM  
100-8
- [2] F.F.Wu and S. Kumagai, "Steady-state security regions of power systems," IEEE Trans. Circuits and Systems, vol. CAS-29, Nov. 1982, pp.703-711.
- [3] R.J.Kaye and F.F.Wu, "Dynamic security regions of power systems," IEEE Trans. Circuits and systems, vol. CAS-29, Sep. 1982, pp.612-623.
- [4] R.J.Kaye and H. R. Outhred, "A Theory of Electricity Traff Design for Optimal Operation and Investment," IEEE Trans. Power Systems, vol. PWRS-4, May 1989, pp.606-613.
- [5] A.K.David, "Optimal consumer response for electricity spot pricing," IEE Proceedings, Vol. 135, Pt. C, No. 5, Sep. 1988.
- [6] M.C.Caramanes, R.E.Bohn, F.C.Scheweppe "Optimal spot pricing: practice and theory," IEEE Trans. PAS-101, No.9,pp. 3234-3245, Sep. 1982.
- [7] 정해권, "시스템붕괴비용을 고려한 시스템안정성을 위한 전력가격," 서울대 대학원 전기공학과 석사학위논문, 1993.

## 저 자 소 개



### 임성황 (林聖皇)

1959년 6월 2일생. 1987년 2월 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1994년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 한국전력공사 전원계획처 과장.



### 최준영 (崔峻榮)

1963년 7월 9일생. 1986년 2월 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1988년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학)



### 박종근 (朴鍾根)

1952년 10월 21일생. 1973년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 일본 동경대 대학원 전기 공학과 졸업(석사), 1982년 일본 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 서울대 공대 전기공학과 교수. 당학회 평의원.