

확률적 운전비계산 모형에 기초한 발전기 수입/순익 평가 방법론 개발

論 文

51A-12-7

An Efficient Revenue/Profit Evaluation Method Based on Probabilistic Production Costing Technique

朴宗培* · 愼重麟** · 金敏洙*** · 全榮煥§

(Jong-Bae Park · Joong-Rin Shin · Min-Soo Kim · Yeong-Han Chun)

Abstract - This paper presents an efficient algorithm for evaluating the profit and revenue of generating units in a competitive electricity market based on the probabilistic production costing technique. The accurate evaluation of the profit and revenue of generating units for long-term perspectives is one of the most important issues in a competitive electricity market environment. For efficient calculation of the profit and revenue of generating units under the equivalent load duration curve(ELDC), a new approach to figure out the marginal plants and the corresponding market clearing prices during a time period in a probabilistic manner is developed. The mathematical formulation and illustrative application of the suggested method is presented.

Key Words : Probabilistic production costing technique, Profit and revenue of generating unit, Competitive electricity market, Equivalent load duration curve

1. 서 론

규제된 전력 산업의 퇴조와 경쟁적 전력 시장의 출현으로 전력의 거래가 시장에서 가격이 책정되는 방법으로 변하고 있으며, 시장 참여자가 미래의 전력 시장에 대한 기대를 평가하는 것이 점차적으로 어려워지고 있다[1,2]. 전력 산업에 경쟁 원리의 도입으로 인하여, 발전 사업자나 규제 기관의 관점에서 발전 부문 투자의 영향을 측정하기 위해서 새로운 구조가 필요하다[3,4]. 이러한 경제성 평가는 발전기의 기대 수입, 비용 및 순익을 포함하고 신뢰성이 장기적 관점에서 측정된다.

Baleriaux 등[5]과 Booth[6]에 의해 소개되고 몇몇의 새로운 접근법[7-9]이 수행된 확률적 생산비용 계산 기법은 기본적으로 부하지속곡선(Load Duration Curve : LDC)에서 표현된 수요의 확률적 특성과 동시에 확률 변수의 상승 적분(convolution) 과정과 동일한 발전기의 임의의 고장 정지를 고려하기 위한 등가부하지속곡선(Equivalent Load Duration Curve : ELDC) 구조를 채택한다[10].

확률적 생산비용 평가 방법은 각 발전기의 기대 발전과

비용 선택에 따른 총 운전비용, 그리고 신뢰도 측정 등과 같은 다양한 유용한 정보를 제공할 수 있기 때문에 전기 설비 계획, 예방정비 계획, 그리고 전력 계통 운전 문제에 광범위하게 적용되고 있다. 그러나, 경쟁적 전력 시장 분석에 생산 비용 평가기법을 적용하기 위해서는 시장 가격(Market Clearing Price : MCP), 각 발전기의 기대 수입 및 순익 등의 새로운 추가적인 정보가 필요하다. 또한 Huang과 Hobbs는 확률적 시뮬레이션 기법에 기반하여 발전기의 관점에서 계통 한계 비용을 평가하기 위해서 새로운 해석적인 방법을 개발하였다[11]. 또한 Wang 등은 가용 용량 확률 밀도 함수를 사용하여 발전기 관점에서 계통 한계 비용과 계통 발전 비용을 계산하기 위한 효율적인 방법을 제안하였다[12]. 비록 접근방법들이 전통적인 전원 확충 계획, 예방정비 계획, 그리고 요금 설계 문제에서 유용하게 사용될 수 있지만, 정보의 한계로 인하여 경쟁적 전력 시장 분석에 직접적으로 적용할 수 없다.

본 논문에서는, 경쟁적 전력 시장에서 직접적으로 적용할 수 있는 각 발전기에 대한 효율적인 순익 평가 알고리즘을 제안하였다. 또한 수정된 확률적 생산비용 평가기법에 기반하여 기대 발전에 대한 표현식을 도출하였으며, 이로부터 발전기 j 가 한계 설비일 경우, 발전기 i 의 기대 발전에 대해 시간대별 접근법과 동일한 결과를 얻을 수 있다.

제안한 방법은 시간대별 시뮬레이션 알고리즘[13]과 비교할 때 각 발전기의 기대 수입, 비용 및 순익과 같은 필요한 정보를 얻기 위한 계산 시간을 상당히 감소시킬 수 있다. 그러므로, 제안한 방법은 경쟁적 전력시장 환경에서 설비 투자의 경제성 평가와 예방정비 계획 전략의 개발에 유용하고 효과적으로 사용될 수 있다.

* 正會員 : 建國大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

** 正會員 : 建國大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

*** 正會員 : 弘益大 工大 電氣工學科 博士課程

§ 正會員 : 建國大 工大 電子電氣工學部 助教授 · 工博

接受日字 : 2002年 10月 5日

最終完了 : 2002年 11月 25日

2. 기본 가정

2.1 발전기 및 수요 모델

본 논문에서, 발전기는 2-상태 표현(즉, 전용량을 가진 on-상태와 "zero"용량을 가진 off-상태)으로 모델링하고 전력 계통은 연료 제한 없이 오직 화력 발전기만으로 구성되어 있다. 또한, 각 발전기의 운전비용은 상수로 간주한다. 반면에, 그 값은 실제 문제에서 출력수준에 따라서 변한다. 시장 가격에 대한 수요 탄력성과 수요의 통계적 특성은 본 논문에서 무시된다.

2.2 시장 모델

일반적으로, 단기 관점에서 전력 시장은 발전기 중에서 수요에 전력을 공급하는 권리에 대한 일련의 경매로 모델링될 수 있다. 또한, 각 경매는 밀봉호가(sealed-bid) 및 균일한 가격으로 특성화될 수 있다. 그러나 장기 분석에 관심이 있기 때문에, 전력 시장 모델은 발전기의 임의 고장 정지를 통합해야 한다. 그러므로, 시장 결재 특징이 또한 발전기의 임의성을 반영하고 있는 확률적 특성이 있다고 가정하였다.

또한, 각 발전사업자의 입찰 가격을 전 용량에 대한 상수 값으로 한정한다. LDC에서 발전기 사이의 급전 순서는 입찰가격이 증가하는 순서로 결정된다. 이것은 전통적인 확률적 생산비용 평가 기법에서 급전 상황과 매우 유사하다.

각 경매의 시장 가격(MCP)은 한계 발전기의 입찰 가격에 의해 결정되고 여기서 MCP는 전력 부족이 발생할 경우를 고려하여 사전에 결정된 상수 값으로 상한이 정해진다.

3. 수학적 모델

본 장에서는, LDC하에서 발전기의 기대 에너지, 비용, 수입 및 순익을 평가하는 방법을 기술할 것이다. 시장이 n 개의 발전기를 보유하고 있고 발전기가 입찰가격의 오름차순에 의한 색인이 부여된다고 가정하자. 발전기 i 가 C_i [MW]의 용량과, q_i 의 고장 정지율, oc_i [\$ /MWh]의 운전 비용 및 ob_i [\$ /MWh]의 입찰 가격을 가지고 있다고 하자. LDC의 시간 구간을 DT [hours], 발전기 i 까지의 누적 용량을 x_i [MW]로 각각 나타낸다.

Π_i 를 발전기 i 의 기대 순익이라 하면, 시장 가격에 따라서 이 값을 분리할 수 있다. 만약 시장 가격이 발전기 j 의 입찰가격과 가격 상한 mcp^{cap} 에 각각 포함될 때 Π_i^j 와 Π_i^{cap} 를 발전기 i 의 기대 순익이라고 한다면, Π_i 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Pi_i = \sum_{j=1}^n \Pi_i^j + \Pi_i^{cap} \quad (1)$$

$\Pi_i^j = 0, \forall j < i$ 이기 때문에, (1)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\Pi_i = \sum_{j=i}^n \Pi_i^j + \Pi_i^{cap} \quad (2)$$

발전기 j 가 한계 설비일 때와 가격 상한 값이 시장 가격이 될 때를 각각 E_i^j 와 E_i^{cap} 라고 할 때 발전기 i 의 기대 발전을 정의하자. 그러면 Π_i^j 와 Π_i^{cap} 이 식 (3)과 (4)로 표현되고 이것은 수입 요소(즉, $ob_j \cdot E_i^j$ 와 $mcp^{cap} \cdot E_i^{cap}$)와 비용 요소(즉, $oc_i \cdot E_i^j$ 와 $oc_i \cdot E_i^{cap}$)로 구성된다.

$$\Pi_i^j = (ob_j - oc_i)E_i^j \quad (3)$$

$$\Pi_i^{cap} = (mcp^{cap} - oc_i)E_i^{cap} \quad (4)$$

그러므로, 기대 순익은 모든 발전기에 대해서 단지 E_i^j 와 E_i^{cap} 을 얻는다면 정할 수 있다. 전통적인 상승 적분 이론에 기반하여, 등가부하지속곡선(ELDC)을 사용하여 발전기의 임의 고장정지 특성을 고려할 수 있다. 일반적으로, ELDC는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} f^{(i)}(x) &= f^{(0)}(x) \oplus G_1 \oplus G_2 \oplus \dots \oplus G_i \\ &= f^{(i-1)}(x) \oplus G_i \\ &= p_j f^{(i-1)}(x) + q_j f^{(i-1)}(x - G_i) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

G_i : 발전기 i 를 나타내는 확률 변수

\oplus : 상승 적분 연산자

$f^{(0)}(x)$: 원래의 부하지속곡선.

모든 발전기에 대한 해석적 표현식으로 E_i^j 와 E_i^{cap} 를 개발하기 위해서, 잠정적 확률 상황을 반영하는 새로운 형태의 ELDC를 정의할 필요가 있다. 이를 해결하기 위해서, 발전기 i 가 b_i 의 확률을 가지고 on-상태이고 그 발전기가 발전기 j 까지 포함되는 상황하에서 잠정적 ELDC로 $f_i^{(j)}(x)$ 로 정의하였다. 그러면, $f_i^{(j)}(x)$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다:

$$f_i^{(j)}(x) = \begin{cases} p_j f^{(j)}(x) & \text{if } j < i \\ p_j f^{(i-1)}(x) & \text{if } j = 1 \\ p_j f^{(i-1)}(x) \oplus G_{i+1} \oplus \dots \oplus G_j & \text{if } j > i \end{cases} \quad (6)$$

j 가 i 보다 작을 경우에, 발전기 i 는 발전기 j 까지 상승 적분 과정이 무의미하다. 그러므로, $f_i^{(j)}(x)$ 는 $p_j f^{(j)}(x)$ 가 된다. j 가 i 와 같을 경우에, 상승 적분 과정이 발전기 $(i-1)$ 까지 반복되고 발전기 i 의 on-상태 상

항이 p_i 를 곱함으로써 조절된다. 그러므로, $f_i^{(j)}(x)$ 는 $p_j f^{(i-1)}(x)$ 로 표현된다. j 가 i 보다 큰 경우에는. 상승 적분 과정이 발전기 i 를 제외한 발전기 j 까지 포함하여 수행되어 $f_i^{(j)}(x)$ 는 $p_j f^{(i-1)}(x) \oplus G_{i+1} \oplus \dots \oplus G_j$ 가 된다.

식 (6)에서 정의된 잠정적 ELDC에 기반하여, 순환적인 형태로 각 발전기의 기대 에너지에 대한 해석적인 표현식을 얻을 수 있다. 여기서, E_i^j 가 할당될 때, 발전기 j 가 한계 설비이고 발전기 j 의 임의성이 on-상태 조건에 의해 각각 고려되었기 때문에 발전기 $j, j+1, \dots, \text{and } n$ 을 포함할 필요가 없다는 것을 주목해야 한다. E_i^j 는 3가지 경우로 분류될 수 있다; 1) $j < i$ 인 경우, 2) $j = i$ 인 경우, 3) $j > i$ 인 경우. $j < i$ 인 경우에서, E_i^j 의 값은 발전기 i 의 급전 순서가 발전기 j 보다 앞서기 때문에 명백하게 "0"이 된다. $j = i$ 인 경우에서, E_i^i (즉, E_i^i)는 발전기 i 자신이 한계 설비가 되기 때문에 $f_i^{(i-1)}(x)$ (즉, $p_i f^{(i-1)}(x)$)에 기반하여 계산되어야 한다. 발전기 i 의 총 기대 에너지는 $DT \int_{x_{i-1}}^{x_i} f_i^{(i-1)}(x) dx$ 로 표현할 수 있고 발전기 i 가 한계 설비가 아닐 때 발전기 i 의 기대 에너지는 $DT \cdot C_i \cdot f_i^{(i-1)}(x_i)$ 로 표현할 수 있다. 그러므로, E_i^i 는 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$E_i^i = DT \left[\int_{x_{i-1}}^{x_i} f_i^{(i-1)}(x) dx - C_i f_i^{(i-1)}(x_i) \right] \quad (7)$$

한편, E_i^j 를 얻을 때, 여기서 $j > i$, 조건을 하나 더 부여해야 한다. 발전기 j 는 on-상태이어야 한다. 왜냐하면 그렇지 않을 경우 발전기 j 가 한계 설비가 될 수 없기 때문이다. 이 확률적인 상황은 $p_j \cdot f_i^{(j-1)}$ 에 의해 다루어질 수 있다. 발전기 i 의 on-상태 조건하에서 한계 설비로 발전기 j 의 확률은 $p_j \cdot [f_i^{(j-1)}(x_{j-1}) - f_i^{(j-1)}(x_j)]$ 로 표현될 수 있다. 그러므로, E_i^j 는 다음 식과 같이 계산될 수 있다.

$$E_i^j = DT \cdot C_i \cdot p_j \cdot [f_i^{(j-1)}(x_{j-1}) - f_i^{(j-1)}(x_j)] \quad (8)$$

마지막으로, E_i^{cap} 을 평가하기 위해서 발전기 i 를 제외한 모든 발전기의 임의의 고장정지를 고려해야 한다. 발전기 i 에 대해서, off-상태는 E_i^{cap} 에 영향이 없기 때문에 오직 on-상태만이 관심대상이다. $f_i^{(n)}$ 은 이 확률적인 상황을 다룰 수 있고 따라서 E_i^{cap} 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$E_i^{cap} = DT \cdot C_i \cdot f_i^{(n)}(x_n) \quad (9)$$

그러므로, 가격 상한 상황을 포함하는 E_i^j 에 대한 일반적인 표현식은 다음과 같다.

$$E_i^j = \begin{cases} 0 & \text{if } j < i \\ DT \left[\int_{x_{i-1}}^{x_i} f_i^{(i-1)}(x) dx - C_i f_i^{(i-1)}(x_i) \right] & \text{if } j = i \\ DT \cdot C_i \cdot p_j \cdot [f_i^{(j-1)}(x_{j-1}) - f_i^{(j-1)}(x_j)] & \text{if } j > i \\ DT \cdot C_i \cdot f_i^{(n)}(x_n) & \text{if } j = cap \end{cases} \quad (10)$$

결과적으로, 발전기 i 의 기대 수익은 식 (3), (4) 및 (10)을 조합하여 얻을 수 있다. 이 방법에 대한 수학적 증명은 부록에 수록하였다.

4. 도식적 표현

본 장에서는, 식 (10)이 수학적 방법 대신에 직관적인 판단으로 유도되었기 때문에, 한계 설비의 집합과 전력 부족의 상황을 고려하여 발전기 i 의 기대 에너지의 도식적 해석을 제공할 것이다. 3장에서 언급한 것처럼, 발전기 i 의 기대 에너지는 세 가지의 다른 경우로 분류될 수 있다; E_i^i , E_i^j 및 E_i^{cap} . E_i^i 의 평가는 그림 1에서 나타난 잠정적 ELDC를 필요로 한다. 그림 1에서 빗금 친 부분이 발전기 i 가 on-상태인 조건하에서 한계 설비가 될 때 발전기 i 의 기대 에너지이다.

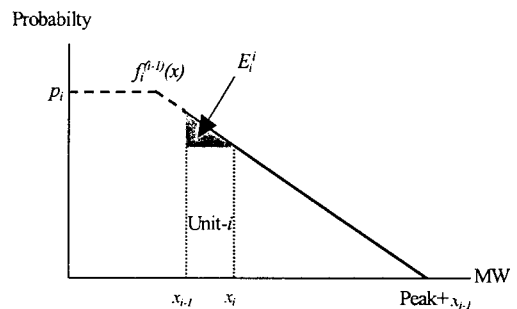


그림 1 E_i^i 에 대한 $f_i^{(i-1)}$ 의 잠정적 ELDC
Fig. 1 Conditional ELDC of $f_i^{(i-1)}$ for E_i^i

그림 2는 $j > i$ 일 때 $f_i^{(j-1)}$ 를 나타내고 빗금 친 부분은 발전기 j 가 E_i^j 에 의해 정의된 발전기 i 의 on-상태 조건하에서 한계 설비가 될 때 발전기 i 의 기대 에너지에 상응한다.

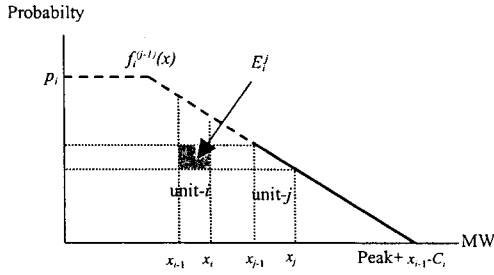


그림 2 E_i^j 에 대한 f_i^{j-1} 의 잠정적 ELDC
 Fig. 2 Conditional ELDC of f_i^{j-1} for E_i^j

그림 3은 f_i^n 을 나타내고 빗금 친 부분은 E_i^{cap} 에서 나타내는 발전기 i 의 on-상태 조건하에서 가격 상한이 시장 가격이 될 때 발전기 i 의 기대 에너지이다.

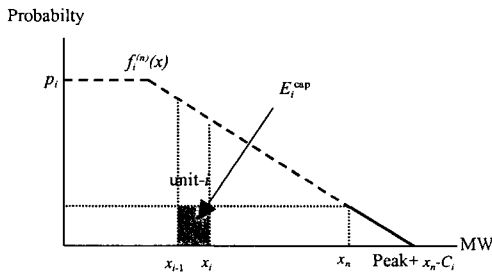


그림 3 E_i^{cap} 에 대한 f_i^n 의 잠정적 ELDC
 Fig. 3 Conditional ELDC of f_i^n for E_i^{cap}

5. 사례 연구

5.1 예제 계통

각 발전기의 순익 평가를 위해서 개발된 알고리즘은 발전기 3대로 구성된 예제 계통에 적용하였다. 각 발전기의 데이터는 다음 표 1에 제시하였다. 전력 시장에서 급전 순서는 표 1의 5번째 열에서 나타낸 입찰가격에 의해서 결정된다.

표 1 예제 계통의 발전기 데이터

Table 1 Generator data of test system

발전기 번호	용량 [MW]	FOR [%]	운전비용 [\$/kWh]	입찰가격 [\$/kWh]
발전기 #1	200	5.0	0.024	0.025
발전기 #2	200	5.0	0.027	0.028
발전기 #3	150	10.0	0.030	0.031

고려된 3시간 동안의 시간대별 수요를 그림 4에 나타내었으며, 여기서 기저부하는 100 [MW], 중간 부하는 300 [MW], 그리고 첨두 부하는 500 [MW] 이다.

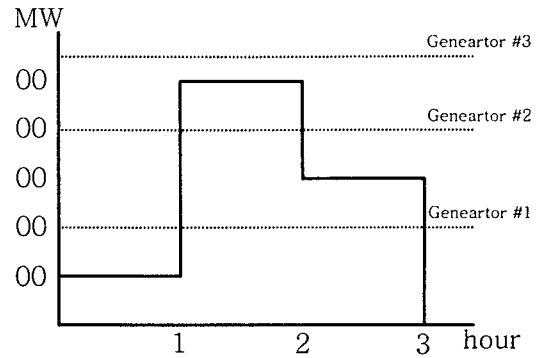


그림 4 예제 계통의 시간대별 수요
 Fig. 4 Chronological demand of test system

5.2 사례 연구

본 절에서는, 제안한 알고리즘을 사용하여 예제 계통에 대한 각 발전기의 기대 발전, 비용, 수입 및 순익을 계산할 것이다. 또한, 제안한 알고리즘의 유효성을 나타내기 위해서 제안한 알고리즘의 결과를 일반적인 시간대별 접근법의 결과와 비교한다.

시간대별 접근법을 사용하여 확률적 방법에서 필요한 정보를 평가하기 위해서, 표 2에서 나타난 모든 가능한 결과를 확인하는 것이 필요하다. 각 결과는 벡터 원소(즉, i 번째 요소는 i 번째 발전기에 상응)가 2진 값(여기서, on-상태는 1로 off-상태는 0으로 표현)으로 표현된 행 벡터로 표현한 상태로 정의한다. 예제 계통에 대해서, 각 시간대에 8개의 상태가 존재하고, 상응하는 확률은 상태 정보로부터 얻을 수 있다. 또한, 각 상태의 MCP는 한계 설비의 입찰 가격이나 가격 상한이다.

표 2 예제 계통의 상태 조사

Table 2 State Enumerations of the test system

상태	확률	시간-1 (100MW)		시간-2 (500MW)		시간-3 (300MW)	
		발전	MCP	발전	MCP	발전	MCP
(1,1,1)	0.8123	100,0,0	0.025	200,200,100	0.031	200,100,0	0.028
(1,1,0)	0.0903	100,0,0	0.025	200,200,0	0.1	200,100,0	0.028
(1,0,1)	0.0428	100,0,0	0.025	200,0,150	0.1	200,0,100	0.031
(1,0,0)	0.0048	100,0,0	0.025	200,0,0	0.1	200,0,0	0.1
(0,1,1)	0.0428	0,100,0	0.028	0,200,150	0.1	0,200,100	0.031
(0,1,0)	0.0048	0,100,0	0.028	0,200,0	0.1	0,200,0	0.1
(0,0,1)	0.0023	0,0,100	0.031	0,0,150	0.1	0,0,150	0.1
(0,0,0)	0.0003	0,0,0	0.1	0,0,0	0.1	0,0,0	0.1

표 2의 결과를 바탕으로, 각 시간대별 각 발전기의 기대 발전, 비용, 수입 및 순익을 쉽게 구할 수 있다. 결과는 표 3에 나타내었다. 예를 들면, 발전기 #1은 확률적 관점에서 3시간 동안 475 [MW]를 발전하고 4.18 [\$]의 순익을 얻는다. 시간대별 접근법은 모든 발전기의 확률적 상황을 정확하게

표 3 시간대별 분석으로부터의 기대 발전 및 순익

Table 3 Expected generation and profit from chronological analysis

	발전기 #1				발전기 #2				발전기 #3			
	H1	H2	H3	총합	H1	H2	H3	총합	H1	H2	H3	총합
기대 발전 [MWh]	95	190	190	475	4.75	190	99.75	294.5	0.23	94.39	8.89	103.5
기대 수입 [\$]	2.38	7.79	5.41	15.58	0.13	7.79	2.89	10.81	0.01	3.83	0.30	4.14
기대 비용 [\$]	2.28	4.56	4.56	11.4	0.13	5.13	2.69	7.95	0.01	2.83	0.27	3.11
기대 순익 [\$]	0.10	3.23	0.85	4.18	0.01	2.66	0.19	2.86	0.00	1.00	0.03	1.04

고려할 수 있다. 반면에 고려되는 계통의 규모가 커질수록 차원의 문제(curse of dimensionality)를 가지고 있다.

지금부터, 동일한 예제 계통으로 제안한 알고리즘의 유효성과 효율성을 보여줄 것이다. 앞서 논의한 것처럼, 표 3에서 각 발전기의 모든 정보는 식 (3), (4) 및 (10)을 사용하여 얻을 수 있다. 오직 발전기 #1에 초점을 맞추어 해를 구하는 절차를 표현할 것이다. 원래의 LDC를 포함하는 발전기 #1에 대한 잠정적 ELDC는 식 (6)으로부터 얻을 수 있으며 그림 5에 나타내었다.

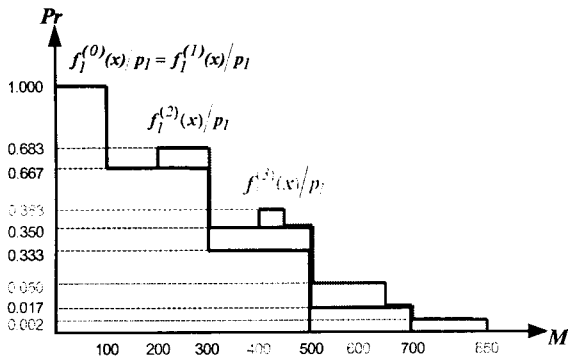


그림 5 발전기 #1에 대한 잠정적 ELDC
Fig. 5 Conditional ELDCs for generator #1

발전기 #1의 기대 발전(즉, E_1)은 4개의 원소(즉, $E_1^1, E_1^2, E_1^3, E_1^{cap}$)로 구성된다. 각 원소는 다음과 같이 식 (6)과 (10)을 사용하여 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_1^1 &= DT \cdot \left[\int_{x_0}^{x_1} f_1^{(0)}(x) dx - C_1 \cdot f_1^{(0)}(x_1) \right] \\
 &= 3 \cdot \left[\int_0^{200} f_1^{(0)}(x) dx - 200 \cdot f_1^{(0)}(200) \right] \\
 &= 3 \cdot 0.95 \cdot \left[100 + 100 \cdot \frac{2}{3} - 200 \cdot \frac{2}{3} \right] \\
 &= 95 \text{ [MWh]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_1^2 &= DT \cdot C_1 \cdot p_2 \cdot [f_1^{(1)}(x_1) - f_1^{(1)}(x_2)] \\
 &= 3 \cdot 200 \cdot 0.95 \cdot \left[0.95 \cdot \frac{2}{3} - 0.95 \cdot \frac{1}{3} \right] \\
 &= 180.5 \text{ [MWh]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_1^3 &= DT \cdot C_1 \cdot p_3 \cdot [f_1^{(2)}(x_2) - f_1^{(2)}(x_3)] \\
 &= 3 \cdot 200 \cdot 0.9 \cdot [0.95 \cdot 0.35 - 0.95 \cdot 0.017] \\
 &= 171 \text{ [MWh]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_1^{cap} &= DT \cdot C_1 \cdot f_1^{(3)}(x_3) = 3 \cdot 200 \cdot 0.95 \cdot 0.05 \\
 &= 28.5 \text{ [MWh]}
 \end{aligned}$$

그러므로, E_1 은 475 [MWh]가 되며 이것은 시간대별 접근법의 결과와 정확하게 일치한다. 발전기 #1의 각 순익 요소(즉, Π_1^i)는 식 (3)과 (4)에 의해 다음과 같이 쉽게 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \Pi_1^1 &= (op_1 - oc_1) \cdot E_1^1 = (0.025 - 0.024) \cdot 95 \\
 &= 0.095 \text{ [$]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Pi_1^2 &= (op_2 - oc_1) \cdot E_1^2 = (0.028 - 0.024) \cdot 180.5 \\
 &= 0.722 \text{ [$]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Pi_1^3 &= (op_3 - oc_1) \cdot E_1^3 = (0.031 - 0.024) \cdot 171 \\
 &= 1.197 \text{ [$]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Pi_1^{cap} &= (mcp^{cap} - oc_1) \cdot E_1^{cap} = (0.1 - 0.024) \cdot 28.5 \\
 &= 2.166 \text{ [$]}
 \end{aligned}$$

그러므로, 발전기 #1의 전체 순익은 4.18 [\$]가 되고 이것 역시 표 3에서의 결과와 정확하게 일치한다. 발전기 #2와 #3의 순익은 동일한 절차에 의해서 각각 2.86 [\$]와 1.04[\$]로 계산된다. 이것은 표 3의 결과와 동일하다.

제안한 알고리즘이 각 발전기의 순익 평가에 대한 계산 횟수를 상당히 감소시킬 수 있다는 것을 주목하라. 예를 들면, 본 사례 연구에서 전체 계산 횟수는 9(즉, 4+3+2)가 되고 반면에 시간대별 접근법은 24(즉, 3×23)번의 계산이 필요하다. 그러므로, 실제 계통에서 계산에 대한 부담 없이 제안한 알고리즘을 사용할 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 확률적 생산비용 평가 기법의 변형에 기반하여 경쟁적 전력 시장에서 발전기의 순익과 수익을 평가하기 위

한 효율적인 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘에서, 각 발전기의 기대 순익은 발전기의 관점에서 확률적으로 한계 설비를 취급함으로써 획득될 수 있다. 확률적 시간대별 방법의 정확성에 대한 문제없이, 제안한 방법이 계산상의 복잡성을 상당히 감소시킬 수 있다. 그러므로, 제안한 방법은 경쟁적 전력시장 환경에서 장기 전력 계통 계획 문제에 대해 충분히 적용 가능하다.

부록. 수학적 증명

일반적인 수학적 접근 대신에 예를 통하여, 특히 식 (10) 과 (6)에 초점을 맞추어 개발한 이론을 유도할 것이다. 그림 A.1과 같이 시장에서 급전되는 발전기 3개가 있는 예제 계통을 고려하자. 또한, 모든 j 에 대한 E_j^i 의 합이 ELDC 접근으로부터 얻어진 결과와 동일하다는 것을 증명할 것이다.

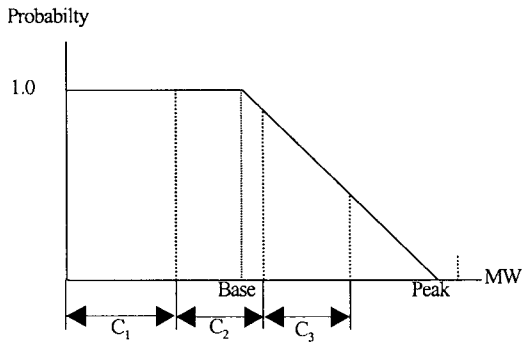


그림 A.1 3개의 발전기가 있는 예제 계통
 Fig. A.1 Sample system with 3 generating units

발전기-1의 기대 발전은 상응하는 한계 발전기에 대한 모든 가능한 결과를 계산함으로써 얻을 수 있다. 표 A.1에서 표현된 것처럼 발전기-1이 on-상태인 조건하에서 8개의 가능한 상태 존재한다.

표 A.1 한계 발전기에 대한 발전기-1의 상태
 Table A.1 States of unit-1 with regard to marginal units

발전기-1의 상태			한계 발전기
발전기-1	발전기-2	발전기-3	
ON	-	-	발전기-1
ON	ON	-	발전기-2
ON	ON	ON	발전기-3
ON	OFF	ON	발전기-3
ON	OFF	OFF	없음
ON	ON	OFF	없음
ON	ON	ON	없음
ON	OFF	ON	없음

명백하게, 발전기-1의 기대 발전은 각 결과에서 발전의 총합이 되고 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_1 = & DT \cdot p_1 \cdot \int_{f^{(0)}(0)}^{f^{(0)}(C_1)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx \\
 & + DT \cdot C_1 \cdot p_1 p_2 [f^{(0)}(C_1) - f^{(0)}(C_1 + C_2)] \\
 & + DT \cdot C_1 \cdot p_1 p_2 p_3 [f^{(0)}(C_1 + C_2) \\
 & \quad - f^{(0)}(C_1 + C_2 + C_3)] \\
 & + DT \cdot C_1 \cdot p_1 q_2 p_3 [f^{(0)}(C_1) \\
 & \quad - f^{(0)}(C_1 + C_3)] \tag{A.1} \\
 & + DT \cdot C_1 \cdot p_1 q_2 q_3 [f^{(0)}(C_1)] \\
 & + DT \cdot C_1 \cdot p_1 p_2 q_3 [f^{(0)}(C_1 + C_2)] \\
 & + DT \cdot C_1 \cdot p_1 p_2 p_3 [f^{(0)}(C_1 + C_2 + C_3)] \\
 & + DT \cdot C_1 \cdot p_1 q_2 p_3 [f^{(0)}(C_1 + C_3)]
 \end{aligned}$$

식 (A.1)에서 첫 번째 항, 원래의 LDC의 역함수의 적분, 이 그림 1에서 빗금 친 부분과 상응하는 것을 주목하라. 식 (A.1)은 다음과 같이 한계 발전기에 대해서 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_1 = & DT \cdot p_1 \cdot \int_{f^{(0)}(0)}^{f^{(0)}(C_1)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx \\
 & + DT \cdot C_1 \cdot p_2 [p_1 f^{(0)}(C_1) - p_1 f^{(0)}(C_1 + C_2)] \\
 & + DT \cdot C_1 \cdot p_3 [p_2 \{p_1 f^{(0)}(C_1 + C_2)\} \\
 & \quad + q_2 \{p_1 f^{(0)}(C_1)\}] \\
 & - [p_2 \{p_1 f^{(0)}(C_1 + C_2 + C_3)\} \\
 & \quad + q_2 \{p_1 f^{(0)}(C_1 + C_3)\}] \tag{A.2} \\
 & + DT \cdot C_1 [p_3 [p_2 \{p_1 f^{(0)}(C_1 + C_2 + C_3)\} \\
 & \quad + q_2 \{p_1 f^{(0)}(C_1 + C_3)\}] \\
 & + q_3 [p_2 \{p_1 f^{(0)}(C_1 + C_2)\} + q_2 \{p_1 f^{(0)}(C_1)\}]]
 \end{aligned}$$

전통적인 상승 적분 이론을 사용하여, 식 (A.2)는 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_1 = & DT \int_{f^{(0)}(0)}^{f^{(0)}(C_1)} (p_1 f^{(0)})^{-1}(x) dx \\
 & + DT \cdot C_1 \cdot p_2 [p_1 f^{(0)}(C_1) - p_1 f^{(0)}(C_1 + C_2)] \\
 & + DT \cdot C_1 \cdot p_3 [p_1 f^{(0)}(x) \oplus G_2]_{x=C_1+C_2} \\
 & \quad - p_1 f^{(0)}(x) \oplus G_2]_{x=C_1+C_2+C_3} \tag{A.3} \\
 & + DT \cdot C_1 [p_1 f^{(0)}(x) \oplus G_2 \oplus G_3]_{x=C_1+C_2+C_3}
 \end{aligned}$$

식 (6)의 정의를 적용하여, 식 (10)의 해석적 표현식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_1 = & DT \int_0^{C_1} f_1^{(0)}(x) dx - C_1 f_1^{(0)}(C_1) \\
 & + DT \cdot C_1 \cdot p_2 [f_1^{(1)}(C_1) - f_1^{(1)}(C_1 + C_2)] \\
 & + DT \cdot C_1 \cdot p_3 [f_1^{(2)}(C_1 + C_2) - f_1^{(2)}(C_1 + C_2 + C_3)] \\
 & + DT \cdot C_1 [f_1^{(3)}(C_1 + C_2 + C_3)]
 \end{aligned} \tag{A.4}$$

발전기-2와 발전기-3에 대해서도 발전기-1과 같이 유사한 유도 절차를 적용할 수 있다. 발전기-2와 발전기-3에 대한 (A.1)에 상응하는 표현식은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_2 = & DT \cdot p_1 p_2 \int_{f^{(0)}(C_1)}^{f^{(0)}(C_1+C_2)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx \\
 & + DT \cdot q_1 p_2 \int_{f^{(0)}(0)}^{f^{(0)}(C_2)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx \\
 & + DT \cdot C_2 \cdot p_1 p_2 p_3 [f^{(0)}(C_1 + C_2) \\
 & \quad - f^{(0)}(C_1 + C_2 + C_3)] \\
 & + DT \cdot C_2 \cdot q_1 p_2 p_3 [f^{(0)}(C_2) \\
 & \quad - f^{(0)}(C_2 + C_3)]
 \end{aligned} \tag{A.5}$$

$$\begin{aligned}
 & + DT \cdot C_2 \cdot p_1 p_2 p_3 [f^{(0)}(C_1 + C_2 + C_3)] \\
 & + DT \cdot C_2 \cdot q_1 p_2 p_3 [f^{(0)}(C_2 + C_3)] \\
 & + DT \cdot C_2 \cdot p_1 p_2 q_3 [f^{(0)}(C_1 + C_2)] \\
 & + DT \cdot C_2 \cdot q_1 p_2 q_3 [f^{(0)}(C_2)]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_3 = & DT \cdot p_1 p_2 p_3 \int_{f^{(0)}(C_1+C_2+C_3)}^{f^{(0)}(C_1+C_2+C_3)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx \\
 & + DT \cdot p_1 q_2 p_3 \int_{f^{(0)}(C_1)}^{f^{(0)}(C_1+C_3)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx \\
 & + DT \cdot q_1 p_2 p_3 \int_{f^{(0)}(C_2)}^{f^{(0)}(C_2+C_3)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx \\
 & + DT \cdot q_1 q_2 p_3 \int_{f^{(0)}(0)}^{f^{(0)}(C_3)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx \\
 & + DT \cdot C_3 \cdot p_1 p_2 p_3 [f^{(0)}(C_1 + C_2 + C_3)] \\
 & + DT \cdot C_3 \cdot p_1 q_2 p_3 [f^{(0)}(C_1 + C_3)] \\
 & + DT \cdot C_3 \cdot q_1 p_2 p_3 [f^{(0)}(C_2 + C_3)] \\
 & + DT \cdot C_3 \cdot q_1 q_2 p_3 [f^{(0)}(C_3)]
 \end{aligned} \tag{A.6}$$

식 (A.5)와 (A.6)을 정리하여 다음과 같이 상승 적분 형태로 방정식을 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_2 = & DT \cdot p_2 [p_1 \int_{f^{(0)}(C_1)}^{f^{(0)}(C_1+C_2)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx \\
 & + q_1 \int_{f^{(0)}(0)}^{f^{(0)}(C_2)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx] \\
 & + DT \cdot C_2 \cdot p_3 [p_2 \{p_1 f^{(0)}(C_1 + C_2) + q_1 f^{(0)}(C_2)\} \\
 & \quad - p_2 \{p_1 f^{(0)}(C_1 + C_2 + C_3) + q_1 f^{(0)}(C_2 + C_3)\}] \\
 & + DT \cdot C_2 [p_3 [p_2 \{p_1 f^{(0)}(C_1 + C_2 + C_3) \\
 & \quad + q_1 f^{(0)}(C_2 + C_3)\}] \\
 & \quad + q_3 [p_2 \{p_1 f^{(0)}(C_1 + C_2) + q_1 f^{(0)}(C_2)\}]]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 = & DT \int_{f^{(0)}(C_1)}^{f^{(0)}(C_1+C_2)} (p_2 f^{(1)})^{-1}(x) dx \\
 & + DT \cdot C_2 \cdot p_3 [p_2 f^{(1)}(C_1 + C_2) \\
 & \quad - p_2 f^{(1)}(C_1 + C_2 + C_3)] \\
 & + DT \cdot C_2 [p_2 f^{(1)}(x) \oplus G_3 |_{x=C_1+C_2+C_3}]
 \end{aligned} \tag{A.7}$$

$$\begin{aligned}
 E_3 = & DT \cdot p_3 [p_2 [p_1 \int_{f^{(0)}(C_1+C_2)}^{f^{(0)}(C_1+C_2+C_3)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx \\
 & \quad + q_1 \int_{f^{(0)}(C_2)}^{f^{(0)}(C_2+C_3)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx] \\
 & + q_2 [p_1 \int_{f^{(0)}(C_1)}^{f^{(0)}(C_1+C_3)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx \\
 & \quad + q_1 \int_{f^{(0)}(0)}^{f^{(0)}(C_3)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx] \\
 & + DT \cdot C_3 [p_3 [p_2 \{p_1 f^{(0)}(C_1 + C_2 + C_3) \\
 & \quad + q_1 f^{(0)}(C_2 + C_3)\}] \\
 & \quad + q_2 \{p_1 f^{(0)}(C_1 + C_3) + q_1 f^{(0)}(C_3)\}]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 = & DT \int_{f^{(0)}(C_1+C_2)}^{f^{(0)}(C_1+C_2+C_3)} (p_3 f^{(2)})^{-1}(x) dx \\
 & + DT \cdot C_3 [p_3 f^{(2)}(x)]
 \end{aligned} \tag{A.8}$$

그러므로, 식 (6)의 정의를 적용하여 발전기-2와 발전기-3에 대한 식 (10)의 해석적인 표현식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_2 = & DT \int_{C_1}^{C_1+C_2} f_2^{(1)}(x) dx - C_2 f_2^{(1)}(C_1 + C_2) \\
 & + DT \cdot C_2 \cdot p_3 [f_2^{(2)}(C_1 + C_2) \\
 & \quad - f_2^{(2)}(C_1 + C_2 + C_3)] \\
 & + DT \cdot C_2 [f_2^{(3)}(C_1 + C_2 + C_3)]
 \end{aligned} \tag{A.9}$$

$$E_3 = DT \left[\int_{C_1+C_2}^{C_1+C_2+C_3} f_3^{(2)}(x) dx - C_3 f_3^{(2)}(C_1+C_2+C_3) \right] + DT \cdot C_3 [f_3^{(3)}(C_1+C_2+C_3)] \quad (A.10)$$

결과적으로, 식 (10)과 같이 발전기 i 의 기대 발전에 대한 일반적인 공식을 추론할 수 있다.

다음으로, 제안한 방법의 기대 발전이 전통적인 상승 적분 접근과 동일하다는 것을 증명할 것이다. 이것을 증명하기 위해서, 발전기-1과 발전기-2의 모든 상황을 포함하는 오직 발전기-3만을 다룰 것이다. 발전기-3의 기대 발전은 다음과 같이 전통적인 상승 적분 이론과 ELDC로부터 얻을 수 있다.

$$E_3 = DT \cdot p_3 \left[\int_{C_1+C_2}^{C_1+C_2+C_3} f^{(2)}(x) dx \right] = DT \cdot p_3 \left[p_2 \left\{ p_1 \int_{C_1+C_2}^{C_1+C_2+C_3} f^{(0)}(x) dx + q_1 \int_{C_1+C_2}^{C_1+C_2+C_3} f^{(0)}(x-C_1) dx \right\} + q_2 \left\{ p_1 \int_{C_1+C_2}^{C_1+C_2+C_3} f^{(0)}(x-C_2) dx + q_1 \int_{C_1+C_2}^{C_1+C_2+C_3} f^{(0)}(x-C_1-C_2) dx \right\} \right] \quad (A.11)$$

식 (A.8)과 (A.11)을 비교하면, 다음과 같은 네 가지의 관계를 도출할 수 있다.

$$DT \cdot p_3 p_2 p_1 \int_{C_1+C_2}^{C_1+C_2+C_3} f^{(0)}(x) dx \quad (1st \text{ term of } A.11) = DT \cdot p_3 p_2 p_1 \int_{f^{(0)}(C_1+C_2)}^{f^{(0)}(C_1+C_2+C_3)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx + DT \cdot C_3 \cdot p_3 p_2 p_1 f^{(0)}(C_1+C_2+C_3) \quad (A.12.1)$$

(1st & 5th terms of A.8)

$$DT \cdot p_3 p_2 q_1 \int_{C_1+C_2}^{C_1+C_2+C_3} f^{(0)}(x-C_1) dx \quad (2nd \text{ term of } A.11) = DT \cdot p_3 p_2 q_1 \int_{f^{(0)}(C_2)}^{f^{(0)}(C_2+C_3)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx + DT \cdot C_3 \cdot p_3 p_2 q_1 f^{(0)}(C_2+C_3) \quad (A.12.2)$$

(2nd & 6th terms of A.8)

$$DT \cdot p_3 q_2 p_1 \int_{C_1+C_2}^{C_1+C_2+C_3} f^{(0)}(x-C_2) dx \quad (3rd \text{ term of } A.11) = DT \cdot p_3 q_2 p_1 \int_{f^{(0)}(C_1)}^{f^{(0)}(C_1+C_3)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx + DT \cdot C_3 \cdot p_3 q_2 p_1 f^{(0)}(C_1+C_3) \quad (A.12.3)$$

(3rd & 7th terms of A.8)

$$DT \cdot p_3 q_2 q_1 \int_{C_1+C_2}^{C_1+C_2+C_3} f^{(0)}(x-C_1-C_2) dx \quad (1st \text{ term of } A.11) = DT \cdot p_3 q_2 q_1 \int_{f^{(0)}(0)}^{f^{(0)}(C_3)} (f^{(0)})^{-1}(x) dx + DT \cdot C_3 \cdot p_3 q_2 q_1 f^{(0)}(C_3) \quad (A.12.4)$$

(4th & 8th terms of A.8)

결과적으로, 제안한 방법으로부터 기대 발전이 전통적인 ELDC 접근과 동일하다는 것을 관찰할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 및 한국전력연구원의 대학 전력센터 지원 프로그램에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] B. Murray, Electricity Markets Investment, Performance and Analysis, Electricity Market Service Ltd., Woking, John Wiely & Sons, UK, 1998.
- [2] Sally Hunt and Graham Shuttleworth, Competition and Choice in Electricity, John Wiley & Sons, 1996.
- [3] J. B. Park, J. H. Kim and K. Y. Lee, "Generation expansion planning in a competitive environment using a genetic algorithm", Proceedings of IEEE Power Engineering Society 2002 Summer Meeting, Paper No. 0-7803-7519-X/02, 2002.
- [4] A. S. Chuang, F. Wu and P. Varaiya, "A game-theoretic model for generation expansion planning: Problem formulation and numerical comparisons", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 16, No. 4, pp. 885-891, 2001.
- [5] H. Baleriaux, E. Jamouille, Linard de Guertechin, Simulation de l'exploitation dun parc de machines thermiques de production d'électricité couplé a dès stations de pompage, Rev. (SRBE), Vol. 5, No. 7, pp. 225-245, 1967.
- [6] R. R. Booth, "Power system simulation model based on probability analysis", IEEE Trans. PAS-91 (1), pp. 62-69, 1972.
- [7] J. P. Stremel, R. T. Jenkins, R. B. Babb and W. D. Bayless, "Production costing using the cumulant method of representing the equivalent load curve", IEEE Trans. PAS-99 (5), pp. 1947-1956, 1980.
- [8] K. F. Schenk, R. B. Mirsa, S. Vassos and W. Wen, "A new method for the evaluating of expected energy generation and loss of load probability", IEEE Trans. PAS-103 (2), pp. 294-303, 1984.

- [9] S. R. Lakshmi, S. C. Tripathy, K. S. P. Rao and R. Balasubramanian, "Production costing using mixed-radix and Winograd Fourier transforms", IEE Proceedings-C, Vol. 139, Issue 6, pp. 536-540, 1992.
- [10] X. Wang and J. R. McDonald, Modern Power System Planning, McGraw-Hill Book Company, London, 1994.
- [11] W. Huang and B. F. Hobbs, "Estimation of marginal system costs and emissions of changes in generating unit characteristics", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 1251-1258, 1992.
- [12] S. J. Wang, S. M. Shahidehpour and N. D. Xiang, "Power systems marginal cost curve and its applications", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 3, pp. 1321-1328, 1995.
- [13] G. B. Sheble, Computational auction mechanisms for restructured power industry operation, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [14] M. V. F. Pereira, B. G. Gorenstin, M. Morozowski Fo and J. B. Silva, "Chronological probabilistic production costing and wheeling calculations with transmission network modeling", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 885-891, 1992.

저 자 소 개



박종배 (朴宗培)

1963년 11월 24

일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 조교수.

Tel : 02-450-3483

E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr



김민수 (金敏洙)

1974년 3월 13일생. 1999년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

Tel : 02-458-4778

E-mail : minsoo@konkuk.ac.kr



신중린 (愼重麟)

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

Tel : 02-450-3487

E-mail : jrshin@konkuk.ac.kr



전영환 (全瑩煥)

1961년 2월 8일생. 1983년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동경대 대학공학부 졸업(공학박사). 현재 홍익대학교 전자전기공학부 조교수.

Tel : 02-320-1620

E-mail : yhchun@wow.hongik.ac.kr