

# 경쟁적 전력시장 하에서의 최적조류계산 응용에 관한 연구

論 文
50A-8-5

## The Uses of Optimal Power Flow in a Competitive Electric Power Market

許 焯\* · 朴 鍾 根\*\* · 金 發 鎬\*\*\*  
(Don Hur · Jong-Keun Park · Balho H. Kim)

**Abstract** - This paper shows that we can make simple modifications to an existing optimal power flow (OPF) algorithm that minimizes generation costs in order to solve the maximization of social welfare objective of the OPF in a competitive electric power market. We have illustrated the potential for the use of OPF in light of the marked impacts on nodal prices and generation/demand allocation levels among competing suppliers. This paper can provide all market players with the transparent information that ensures sufficient control over producers and consumers in case of economic or secure operation with transmission line outage while maximizing the sum of participants' social benefit of participating in the electricity energy market.

**Key Words** : Competitive Electric Power Market, Optimal Power Flow (OPF), Social Welfare Maximization

### 1. 서 론

지금까지의 전력산업은 일반적으로 발전, 송·배전 및 판매 부문이 수직적으로 통합된 구조를 이루고 있었다. 이것은 전력이라는 에너지가 저장이 어렵고, 광속의 빠른 속도로 전송되므로 발전과 소비가 매순간 일치하여야 하는 특성을 가지고 있기 때문에 한 회사가 생산, 수송, 공급하는 수직통합형 구조가 더 합리적이고 효율적일 것이라고 판단되었기 때문이다. 특히 송·배전과 같은 망사업은 자연 독점적인 성격을 가지고 있어서 전력회사는 당연히 지역 독점적인 형태를 가지게 된다 [1]. 이에 따라, 국가는 사업의 독점을 허용하는 대신 공공의 이익을 위해 설비 투자 계획, 가격 등을 규제하는 방식으로 전력산업을 운영하게 된다.

그러나 최근 전력사업의 규모가 점차 방대해지고 복잡·다양해짐에 따라 사업의 독점과 규제에 따른 비효율성 및 비경제성의 문제가 대두되었으며, 이에 대한 대안으로 전력을 공급하기 위한 지역에 대한 규제 및 제약을 완화하고 있으며, 이것은 저비용, 고품질 등 전력의 생산 및 분배의 효율성을 극대화하기 위한 전세계적인 추세로 자리잡고 있다. 이와 같은 상황 하에서 우리나라의 전력산업도 전력산업 구조개편의 틀 안에서 다양한 형태의 시장경쟁체제로 변화할 것이다. 따라서 현재 우리나라 전력산업의 구조개편 추이 및 장래 인접국과의 계통 연계 가능성 등을 고려할 때 계통

간 전력 유통을 통한 효율적 계통 운용의 필수적 요소인 최적조류계산(Optimal Power Flow)에 대한 연구는 상당히 중요하다 하겠다.

최적조류계산은 전력계통의 운용 및 물리적 특성에 의하여 발생하는 여러 제약조건을 만족시키면서 특정 목적함수의 최적값을 구하는 다양한 종류의 비선형 문제를 총칭하는 용어이다 [2], [3]. 기존의 최적조류계산 문제는 유효 전력과 무효 전력의 수급균형 제약조건 및 기타 물리적 운용 제약 등을 만족시키면서 발전기의 연료비용을 최소화하는 것이었지만, 앞으로는 전력시장 하에서 신뢰도 평가와 관련하여 경쟁 환경에서의 적정 신뢰도 수준의 구체적인 평가 방법, 사회적 후생의 최대화 관점에서 본 시장 참여자들의 편익 극대화, 신뢰도 확보를 위한 장·단기 측면에서의 대책 및 신뢰도 유지를 위한 메카니즘 개발 등의 검토에 최적조류계산 문제가 적용될 것이다. 본 논문에서는 단기전력시장 내의 사회적 후생을 최대화 하는 전력거래 및 평상시와 송전선 사고 발생시의 시장 균형가격의 변화, 그리고 혼잡이 발생하여 수급 운용의 최적성이 저해된 경우 전력계통 내의 신뢰도 유지를 위해서 최적조류계산 문제를 적용하기로 한다.

먼저 2장에서는 시장참여자들의 순편익의 합으로 표현된 사회적 후생의 정의에 대해 알아보고, 기존의 최적조류계산 문제에 약간의 수정을 가하여 경쟁환경 하에서의 사회적 후생을 최대화 하는 전력 거래량 및 시장 균형가격을 결정하기 위한 문제의 정식화에 대해 설명하기로 한다. 다음 3장에서는 간단한 3모선 계통을 통하여 신규발전사업자가 계통에 진입하였을 경우 송전선 사고를 고려하지 않은 최적경제 운용의 결과와 송전선 사고를 고려한 최적안전운용에 대한 결과를 비교·검토한다. 또한 신규발전사업자의 접속 모선의 차이에 의한 사회적 후생의 변화도 함께 살펴보기로 한다. 마지막 4장에서는 본 논문의 결론 부분으로 본 논문의

\* 正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學部 博士課程  
\*\* 正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學部 教授 · 工博  
\*\*\* 正 會 員 : 弘益대 工大 電子電氣工學部 助教授 · 工博  
接受日字 : 2001年 4月 12日  
最終完了 : 2001年 7月 30日

요약과 더불어 향후 신뢰도 유지에 필요한 전제 조건 등에 대해 논의하기로 한다.

## 2. 송전선 혼잡을 고려한 모선가격 산정 방법

### 2.1 사회적 후생의 정의

일반적으로 시장 내에서 생산자(발전사업자)와 소비자(수용가) 각각의 행동 규범은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다 [4].

$$\begin{aligned} & \text{소비자 잉여(Consumer Surplus)} \\ & = \text{효용(Utility) 또는 편익(Benefit) - 지출(Expenditure) (1)} \\ & \text{생산자 잉여(Producer Surplus)} \\ & = \text{수입(Revenue) - 비용(Cost) (2)} \end{aligned}$$

여기서, 소비자 잉여는 다음과 같이 설명할 수 있다. 우리가 어떤 물건을 얼마만큼 샀다고 했을 때, 그 대가로 지불하는 금액은 일반적으로 우리가 그 물건을 얻기 위해 최대한으로 지불할 용의가 있는 금액(Willingness to pay), 다시 말하면 그 물건을 사용함으로써 얻게되는 가치보다는 작다. 즉, 상품의 교환으로부터 발생하는 이득이라고 볼 수 있는 바로 이 잉여분을 소비자 잉여라고 할 수 있다. 마찬가지로, 생산자 잉여는 이윤이라는 말로 대체할 수 있는데, 즉 생산된 상품을 판매함으로써 얻을 수 있는 총수입과 어떤 수준의 산출량을 생산하는 데 드는 총비용의 차이라고 정의할 수 있다. 이것을 자원 배분의 효율성을 중시하는 후생 경제학의 관점에서 보면, 소비자 잉여와 생산자 잉여의 합으로 구성되는 사회적 후생(Social Welfare)을 최대화하는 것이 가장 바람직하다고 볼 수 있다.

### 2.2 평상시 송전선 혼잡을 고려한 모선가격 산정 방법

기존의 최적조류계산 문제는 전력조류 방정식과 부등식 제약조건을 만족하면서 유효 전력의 발전비용을 최소화하는 문제로 정의할 수 있다. 수학적으로는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min. \quad & F = \sum_{i=1}^{NG} C(G_i) \\ \text{s.t.} \quad & g(x, u) = 0 \\ & h(x, u) \leq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 목적함수  $F$ 는 발전기  $i$ 의 비용곡선  $C(G_i) = (A_{gi} \times G_i^2 + B_{gi} \times G_i + C_{gi})$ 의 합으로 구성된 2차 함수의 형태이며,  $g(x, u)$ 는 등식 제약조건으로 전력조류 방정식이다. 그리고  $h(x, u)$ 는 상한과 하한을 갖는 선로 용량, 발전 용량 등이 될 수 있다.

본 논문에서는 기존의 최적조류계산의 정식화에 약간의 수정을 가하여 완전경쟁시장 하에서 계통 전체의 사회적 후생을 최대화 하는 전력 수급 균형량을 찾기 위하여 소비자(수용가)의 편익함수  $B(D)$ 를 도입하기로 한다. 사회적 후생은 앞서 언급했듯이, 소비자 잉여와 생산자 잉여의 합으로

구성된다. 그러나 생산자 잉여의 수입 부분은 결국 소비자 잉여의 지출 부분이 되므로 사회적 후생을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{사회적 후생(Social Welfare)} \\ & = \text{소비자의 효용(Utility) - 생산자의 비용(Cost)} \end{aligned}$$

사회적 후생을 최대화하는 문제를 발전비용 최소화 문제와의 통일성을 위해 최소화 문제로 변형하여 정식화하면 다음과 같다 [5].

$$\min. \quad OB = \sum_{i=1}^{NG} C(G_i) - \sum_{j=1}^{ND} B(D_j) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^{NG} G_i = \sum_{j=1}^{ND} D_j \\ & G_{\min,i} \leq G_i \leq G_{\max,i} \quad (5) \\ & 0 = D_{\min,j} \leq D_j \\ & PF_k \leq PF_{\max,k} \end{aligned}$$

여기서,  $C(G_i)$ 는 발전사업자  $i$ 의 발전량이  $G_i$  [MW]일 때의 발전비용 [\$]이고,  $B(D_j)$ 는 수용가  $j$ 의 수요량이  $D_j$  [MW]일 때의 효용 또는 편익 [\$]이고,  $NG$ 는 계통 전체의 발전사업자의 총수이고,  $ND$ 는 수용가의 총수를 나타낸다. 그리고, 제약조건 내의  $G_{\max,i}$ 와  $G_{\min,i}$ 는 발전기  $i$ 의 출력 상·하한 제약 [MW]이고, 각 수용가의 수요량은 0 이상의 값을 가져야 하므로 수용가  $j$ 의 수요량  $D_j$  [MW]는 0 이상이어야 한다는 제약조건을 추가하였고,  $PF_k$ 는 두 모선 사이의 송전선  $k$ 에 흐르는 전력 조류량 [MW]이고,  $PF_{\max,k}$ 는 송전선  $k$ 의 최대 송전용량 [MW]를 의미한다.

각각의 제약조건을 만족하면서 주어진 목적함수인 사회적 후생을 최대화 하는 발전량과 수요량을 구하기 위해 아래와 같은 라그랑지안 함수를 구성할 수 있다 [6].

$$\begin{aligned} \phi = & \left( \sum_{i=1}^{NG} C(G_i) - \sum_{j=1}^{ND} B(D_j) \right) + \lambda \cdot \left( \sum_{j=1}^{ND} D_j - \sum_{i=1}^{NG} G_i \right) + \\ & \sum_{i=1}^{NG} \{ \mu_{GU_i} \cdot (G_{\max,i} - G_i) \} + \sum_{i=1}^{NG} \{ \mu_{GL_i} \cdot (G_i - G_{\min,i}) \} + \\ & \sum_{j=1}^{ND} \{ \mu_{DL_j} \cdot (D_j - D_{\min,j}) \} + \sum_{k=1}^{NB} \{ \mu_{Tk} \cdot (PF_{\max,k} - PF_k) \} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $\lambda$ 는 전력 수급제한(수급 균형가격),  $\mu_{GU_i}$ ,  $\mu_{GL_i}$ 는 발전기의 상·하한 출력제한,  $\mu_{DL_j}$ 는 수요량의 하한 제약,  $\mu_{Tk}$ 는 송전용량 제약과 관련된 라그랑지안 미정계수이고,  $NB$ 는 송전선의 총수이다. 각각의 제약조건이 성립하는 수급 균형시의 발전 및 부하 모선의 모선가격(nodal price)은 Karush-Kuhn-Tucker 조건에 의해 다음과 같이 표현된다 [7].

발전기 모선의 모선가격( $P_{Gi}$ [\$/kWh])은 다음 식과 같다.

$$P_{Gi} = \lambda + \mu_{GU_i} - \mu_{GL_i} + \sum_{k=1}^{NB} (\mu_{Tk} \cdot \frac{\partial PF_k}{\partial G_i}) \quad (7)$$

마찬가지로 부하 모선의 모선가격( $P_{Dj}$  [\$]/kWh)은 다음과 같다.

$$P_{Dj} = \lambda + \mu_{DLj} - \sum_{k=1}^{NR} (\mu_{Tk} \cdot \frac{\partial PF_k}{\partial D_j}) \quad (8)$$

만약 계통 전체의 송전선에 혼잡이 발생하지 않고, 발전기 출력의 상·하한 제약 및 부하의 비음(非陰)조건 등이 구속(binding)되어 있지 않다고 가정하면, 전체 모선의 모선가격은 그림 1과 같이 시장 균형가격  $\lambda$ 와 같아진다. 즉,  $P_{Gi}$ (또는  $P_{Dj}$ ) =  $\lambda$ 이다. 그러나 혼잡이 발생하는 경우에는 송전회사는 그 송전을 해소하기 위해 수급조정을 시행한다. 송전용량 제약을 만족하는 새로운 수급 균형량을 구할 경우(그림 2), 혼잡에 의해 발생하는 혼잡 비용이 시장 참여자에게 배분되어 각 모선의 모선가격은 같지 않게 된다. 이와 같이 혼잡으로 인한 수급조정에 의해 수급 균형량이 감소하는 경우에는 사회적 후생(수용가의 소비자 잉여 + 발전사업자의 이익)은 감소하게 된다.

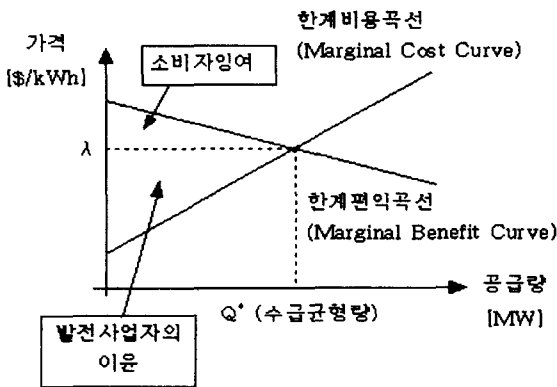


그림 1 혼잡이 발생하지 않은 경우의 사회적 후생  
Fig. 1 Representation of social welfare without congestion

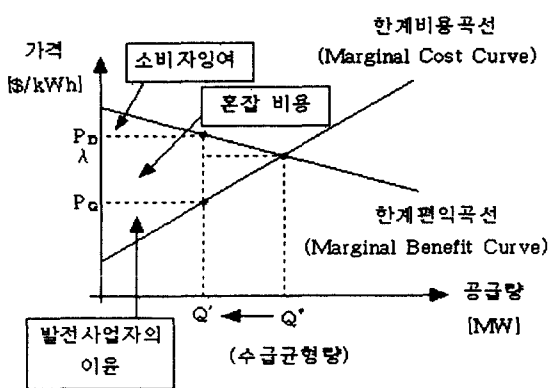


그림 2 혼잡이 발생한 경우의 사회적 후생  
Fig. 2 Representation of social welfare with congestion

### 2.3 송전선 사고를 고려한 모선가격 산정 방법

먼저, 계통 내의 송전선 중에서 1개의 송전선에 사고가 발생한다고 가정한다. 그리고 나서 이 사고 송전선의 임피

던스와 송전용량을 변경한다. 본 논문에서 상정한 송전선 사고는 복수 회선 중에서 하나의 회선이 사고에 의해 차단된 경우이다. 예를 들면, 2회선 중 1회선에서 차단 사고가 발생한 경우, 해당 송전선의 송전특성계수(임피던스)는 정상 상태의 2배가 되고, 송전용량은 0.5배가 된다.

송전선 사고를 고려한 각각의 모선가격은 기존의 라그랑지안 함수, 즉 식 (6)에 상정사고 후의 조류상태가 반영된 항을 고려하여 수정된 새로운 라그랑지안 함수를 구성하여 도출한다.

$$\begin{aligned} \Phi^* = & \left( \sum_{i=1}^{NG} C(G_i) - \sum_{j=1}^{ND} B(D_j) + \lambda \cdot \left( \sum_{j=1}^{ND} D_j - \sum_{i=1}^{NG} G_i \right) + \right. \\ & \sum_{i=1}^{NG} \{ \mu_{Gi} \cdot (G_{\max,i} - G_i) \} + \sum_{j=1}^{ND} \{ \mu_{GLj} \cdot (G_j - G_{\min,j}) \} + \\ & \sum_{j=1}^{ND} \{ \mu_{DLj} \cdot (D_j - D_{\min,j}) \} + \\ & \left. \sum_{k=1}^{NR} \{ \mu_k^{(KOUT)} \cdot (PF_{\max,k}^{(KOUT)} - PF_k) \} \right) \quad (9) \end{aligned}$$

단,  $k \neq KOUT$ 이면,  $PF_{\max,k}^{(KOUT)} = PF_{\max,k}$

$k = KOUT$ 이면,  $PF_{\max,k}^{(KOUT)} < PF_{\max,k}$

여기서,  $\mu_k^{(KOUT)}$ 는 KOUT 송전선 사고시의 송전용량 제약과 관련된 라그랑지안 미정계수이고,  $PF_{\max,k}^{(KOUT)}$ 은 KOUT 송전선에 사고가 발생했을 경우 k 송전선의 최대 송전용량이고,  $PF_{\max,k}$ 는 정상 상태일 때의 k 송전선의 최대 송전용량을 의미한다. 따라서 사고가 발생하지 않은 다른 송전선의 송전용량은 정상 상태와 동일한 값을 가지게 되고, 사고가 난 송전선의 경우에는 정상 상태의 송전용량 값보다 작은 값을 가지게 된다. 송전선 사고를 고려할 때에는 기존의 제약조건 이외에 상정사고시의 수정된 송전용량 제약을 추가하여 최적조류계산을 수행한다. 이와 같이 확장된 라그랑지안 함수와 제약조건을 이용하여 정상 상태뿐만 아니라, 사고 상태에서의 송전선 혼잡을 동시에 고려한 모선가격을 구해 보면 다음과 같다.

$$P_{Gi} = \lambda + \mu_{Gi} - \mu_{GLi} + \left( \sum_{k=1}^{NR} (\mu_k^{(KOUT)} \cdot \frac{\partial PF_k}{\partial G_i}) \right) \quad (10)$$

$$P_{Dj} = \lambda + \mu_{DLj} - \left( \sum_{k=1}^{NR} (\mu_k^{(KOUT)} \cdot \frac{\partial PF_k}{\partial D_j}) \right) \quad (11)$$

## 3. 사례 연구

### 3.1 사례 연구 대상 계통

신규발전사업자의 참여가 계통(또는 시장)내의 수급 균형과 시장 균형가격에 미치는 영향을 파악하기 위해 다음 그림 3과 같은 3모선 계통을 이용하였다. 본 논문에서는 사례 연구를 위해 다음과 가정을 설정하였다.

- 각 발전기는 독립발전사업자가 소유하고 운전한다.
- 전력시장 내에서는 송전선비를 소유, 관리하는 송전회사가 운용 제약(송전선의 용량 제약 등)을 만족시키고, 각 발전사업자와 수용가의 수급 균형을 유지하도록 수급조정을 실시한다.
- 하나의 새로운 발전사업자가 전력시장에 진입한 경우,

신규참여자의 접속 모선의 차이에 의한 수급 균형량 및 각 모선별 가격의 차이를 알아보기 위해 표 1과 같이 기준 Case와 신규참여 Case로 분류하여 모의하였다.

· 신규참여의 경우는 평상시(사고를 무시) 및 사고시의 혼잡 관리에 따라 평상시의 송전선 혼잡만을 고려한 최적경제운용 (EO : Economic Operation) 과 평상시와 사고시 모두의 혼잡을 고려한 최적안전운용 (SO : Secure Operation) 으로 분류할 수 있다.

· 발전기 사고나 모선 사고 등은 고려하지 않고, 단지 송전선 사고만을 고려한다. 또한 송전선 사고도 루트(route) 사고가 아닌 회선 사고만을 대상으로 한다. 동시에 복수 개의 송전선 사고는 고려하지 않는다. 즉, 본문에서의 신뢰도 기준은 어느 한 회선의 사고만을 고려한 (N-1)이다. 각 송전선의 회선 사고시의 송전용량은 그림 3에 나타나 있다 [8].

· 기존·신규발전사업자의 발전 연료비용 함수와 수용가의 편익함수의 계수 및 각 발전기, 부하의 상·하한 출력 제약 등의 모든 데이터가 표 2에 제시되어 있다.

· 편의상 전체 계통의 무효 전력 및 송전 손실은 고려하지 않기로 한다. 단, 전압 제약은 계통 운용상 10%의 여유를 두기로 한다.

3.2 기준 Case

다음 그림 4는 신규발전사업자(G3)가 참여하기 전인 기준 Case의 계통 상태를 나타낸다. 계통 내에서 평상시의 전체 전력 거래량은 그림 4에서 알 수 있듯이, 386.609MW이고, 각 모선의 가격은 11.67 [\$/kWh]로 동일하다. 평상시에는 계통 내에서 혼잡이 발생하지 않으므로 혼잡 비용은 0이 되고, 또한 전체 모선의 가격도 같은 값을 가지게 된다. 한편, 송전선 T2에 사고가 발생한 경우에도 송전선 전체에 걸쳐 혼잡은 발생하지 않는다. 이 때 각 발전량과 수요량은 송전선 사고가 발생하지 않았을 때(평상시)의 수급 균형량과 일치한다. 다음 그림 5가 이것을 설명해 준다.

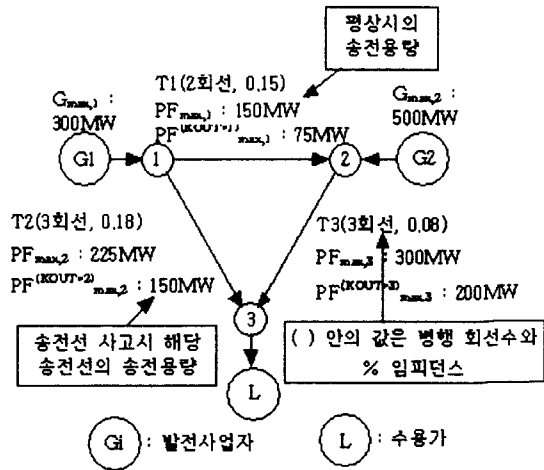


그림 3 3모선 사례 연구 계통  
Fig. 3 3-bus case study system

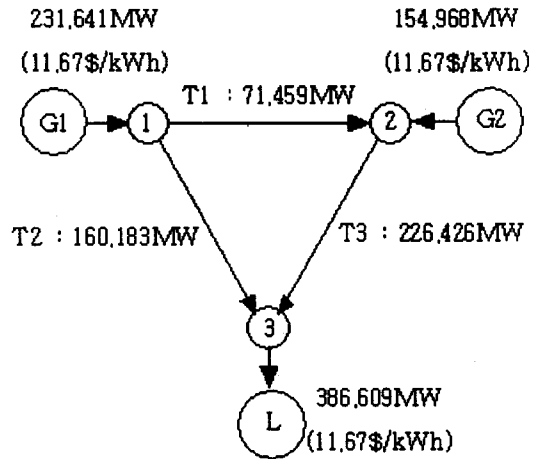


그림 4 기준 Case의 계통 상태 (평상시)  
Fig. 4 System state of base case (no outage)

표 1 사례 연구 대상의 선정  
Table 1 Determination of case study system

구 분	시장 참여자	혼잡 관리		비 고
		평상시	사고시	
기준 Case	기존발전사업자 (2사) + 수용가	○	○	
신규참여 Case	경제 운용	○	×	정상 상태에서의 송전선 혼잡만을 고려한 최적경제운용(Economic Operation). 여기서는 송전선 사고는 고려하지 않는다.
	안전 운용	○	○	송전선 사고(N-1 기준)를 고려한 최적안전운용(Secure Operation)

표 2 사례 연구 계통의 주요 데이터 (발전·수요부문)

Table 2 Key data for case study (generation·demand)

발전사업자 <sup>1</sup>	$G_{min}$ [MW]	$G_{max}$ [MW]	발전 비용 함수 <sup>3</sup>		
			$A_g$	$B_g$	$C_g$
G1 (1)	0.0	300.0	0.009	7.5	210
G2 (2)	0.0	500.0	0.007	9.5	200
G3 <sup>2</sup>	0.0	300.0	0.005	8.0	220
수용가	$D_{min}$ [MW]	$D_{max}$ [MW]	편익 함수 <sup>4</sup>		
			$A_d$	$B_d$	$C_d$
L (3)	0.0	-	-0.025	31.0	200

주 1 : ( )안의 값은 발전사업자 및 수용가의 접속 모션. 여기서 G1과 G2는 기존발전사업자이다.

주 2 : G3은 신규발전사업자로서, 그 접속 모션은 사례 연구 대상에 따라 달라진다.

주 3 : 연료비용함수는  $C(G)=(A_g \times G^2 + B_g \times G + C_g)$ 의 2차 블록함수 형태이다.

주 4 : 편익함수는  $B(D)=(A_d \times D^2 + B_d \times D + C_d)$ 의 2차 오목함수 형태이다. 편익함수를 2차 오목함수로 근사화한 이유는 다음과 같다. 한계편익곡선을 그림 1에서 보는 바와 같이 우하향하는 일차함수의 형태로 가정할 때,

소비자의 편익함수는 한계편익곡선의 아래 부분의 면적이 되므로 수요량에 대해서 적분을 취하게 되면, 다음과 같은 2차 오목함수의 형태를 가지게 된다.

$$\text{즉, } B(D) = \int (-aD + b)dD = -\frac{aD^2}{2} + bD + c \text{이다. 그리고, 소}$$

비자 편익함수는 소비자가 재화를 소비하면 할수록 효용(편익)은 증가하게 되므로 증가함수의 성질을 가지게 된다. 한계편익함수가 우하향하는 형태를 가지는 이유는 한계효용체감의 법칙을 생각해 보면 쉽게 이해가 된다 [4].

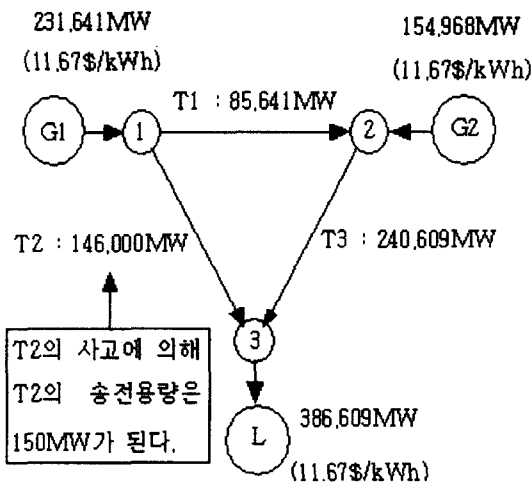


그림 5 기준 Case의 계통 상태 (T2 회선 사고시)  
Fig. 5 System state of base case (T2 line outage)

은 송전선이라도 혼잡의 정도에 차이가 발생한다. 예를 들어, 표 3에 의하면 G3가 모션 1에 접속하였을 때, 송전선 T1은 사고가 T1에서 발생한 경우보다도 T2에서 사고가 발생한 경우에 과부하조류가 더 크다는 것이다. G3가 모션 1에 접속하였을 때 송전선 T1에 발생하는 혼잡을 해소하기 위해 수급조정을 실시하게 되고, 그 결과 계통 내 수급 균형량은 415.57 [MW]가 되고, 시장 균형가격( $\lambda$ )은 10.22 [\$/kWh]가 된다. 그리고 그림 6에 나타난 바와 같이 G3가 모션 1에 접속함으로써 생기는 혼잡을 해소하기 위해 모션 1에 접속하고 있는 발전기 G1과 G3는 출력을 감소하게 되고, 이 감소분을 충당하기 위하여 모션 2에 접속하고 있는 발전사업자 2의 발전량은 증가하게 되고, 한계비용이 높은 발전기의 출력증가로 말미암아 시장 균형가격은 높아진다. 그러나 G3가 모션 2에 접속한 경우에는 계통 내에 혼잡이 발생하지 않고, 그 때의 수급 균형량은 416.324 [MW]이고, 균형가격은 10.184 [\$/kWh]가 된다. 전술한 바와 같이 혼잡이 일어나지 않으므로 각 모션의 모션가격은 균형가격과 같아진다.

### 3.3 신규참여에 의한 경제적 효과

#### 3.3.1 정상시의 혼잡 관리(EO Case)

신규발전사업자(G3)가 모션 1 또는 모션 2에 접속하였을 경우, 정상시 및 사고시의 각 선로조류 및 과부하조류(선로조류-송전용량)가 표 3에 나타나 있다. 또한 정상시 송전선 혼잡만을 고려한 경제운용의 경우에 대한 계통 상태가 그림 6과 7에 표시되어 있다. 신규참여자(G3)가 모션 1에 접속한 경우, 정상시와 사고시 모두 송전선 혼잡이 발생할 가능성이 있음을 표 3에서 알 수 있다.

사고 발생 장소에 의해 조류 분포가 달라지기 때문에 같

#### 3.3.2 사고시의 혼잡 관리(SO Case)

사고시의 조류상태를 반영하여 송전선 사고 후에도 계통 내에 혼잡이 발생하지 않도록 하는 정상시의 운용상태가 그림 8과 9에 나타나 있다. 신규참여자(G3)가 모션 1에 접속한 경우, 송전선 T1 사고시 송전선 T1과 T2에 혼잡이 발생하지 않도록 수급조정을 실시하게 되면 그림 8과 같은 수급 균형상태(정상시)를 얻게 된다. 그 결과 시장 내의 수급 균형량은 정상시 경제운용 경우의 415.57 [MW]에서 404.384 [MW]로 감소하게 되고, 시장 균형가격은 경제운용시의 10.22 [\$/kWh]에서 10.781 [\$/kWh]로 높아지게 된다.

반면에 G3가 모션 2에 접속할 경우에는 정상시에는 혼잡

표 3 신규발전사업자의 참여에 의한 혼잡 발생 현황

Table 3 Illustration of power flow by new entry of power producer

구분	송전선	송전용량 [MW]	G3가 모선 1에 접속한 경우		G3가 모선 2에 접속한 경우	
			선로조류 [MW]	과부하조류 <sup>1</sup> [MW]	선로조류 [MW]	과부하조류 [MW]
정상시	T1	150.00	154.619	4.619	13.318	
	T2	225.00	212.862		135.783	
	T3	300.00	203.462		280.541	
사고시	T1 <sup>2</sup>	75.00	114.120	39.120	9.982	
	T2	225.00	253.361	28.361	139.119	
	T3	300.00	162.963		277.205	
	T1	150.00	194.978	44.978	38.420	
	T2	150.00	172.503	22.503	110.680	
	T3	300.00	243.821		305.644	5.644
	T1	150.00	137.378		-11.898	
	T2	225.00	230.102	5.102	160.998	
	T3	200.00	186.222		255.326	55.326

주 1 : 과부하조류[MW]=선로조류-송전용량으로서, 선로조류는 송전제약을 고려하지 않은 경우의 수급 균형시 각 발전량과 수

요량을 토대로 해서 계산된 것이다.

주 2 : T1<sup>2</sup>는 사고 송전선을 의미한다.

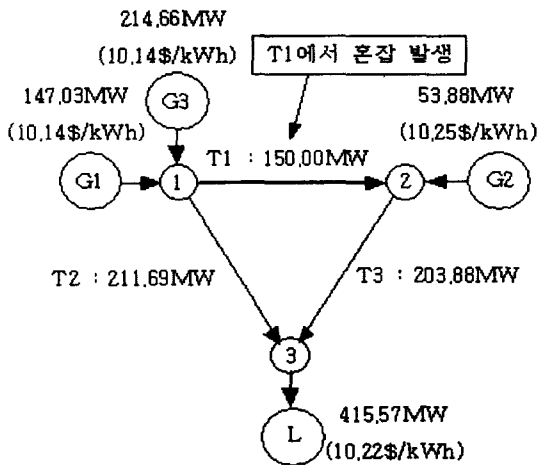


그림 6 신규참여자가 모선 1에 접속한 경우 (정상시)  
Fig. 6 New player's access to Bus 1 (EO1)

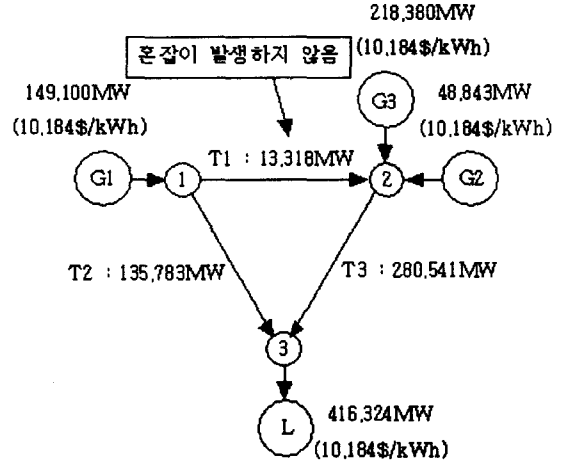


그림 7 신규참여자가 모선 2에 접속한 경우 (정상시)  
Fig. 7 New player's access to Bus 2 (EO2)

이 발생하지 않지만, 송전선 T3에 사고가 날 경우에는 혼잡이 발생하게 된다. 그림 9에서와 같이 T3에서 발생하는 혼잡을 해소하기 위해 모선 2에 접속하고 있는 발전기 G2와 G3는 출력을 감소하게 된다. 그러나 수급 균형을 유지하기 위해서는 G1 발전기는 출력을 증가하게 되는데, G1의 공급 전력은 송전선 T1을 거쳐 T3으로 흐르게 되므로 송전선 T3의 사고시 감소된 송전용량에 의해 G1의 출력 증가도 제약 받게 된다. 그 결과 송전선 사고를 고려한 시장 내의 수급 균형량은 경제운영 경우의 416.324 [MW]에서 379.792 [MW]로 감소하게 된다. 그리고 시장 균형가격은 경제운영시의 10.184 [\$/kWh]에서 12.010 [\$/kWh]로 높아지게 된다. 그림 9에서 보면 송전선 사고를 고려한 경우에는 송전선 T3의 선로조류는 237.731 [MW]로서, 전체 계통이 정상상태일 때의 송전용량 제약인 300 [MW]보다는 작지만, 경제운영 경우인 그림 7의 280.541 [MW]보다 훨씬 엄격한 선로조류를 갖게 된다는 것을 알 수 있다.

결론적으로 기존발전사업자보다도 발전한계비용이 싼 발전사업자가 시장에 신규진입 할 경우에는 각 송전선의 선로조류의 증감이 뚜렷하다는 것을 예상할 수 있다. 그리고 G3가 모선 2에 접속하였을 경우 송전선 사고를 고려하여 수급조정(그림 9)을 수행하면 신규진입이 없는 경우(그림 4)보다 수급 균형량은 감소하고, 시장 균형가격은 높아지는 경우도 발생한다는 것을 알 수 있다. 다시 말해서, 계통 구성과 발전사업자 및 수용가의 접속 장소 등에 따라 송전계통 내에서의 정상시, 사고시의 혼잡 정도가 달라지므로 신규진입에 의한 경제적 장점을 상쇄시키는 결과, 즉 사회적 후생의 악화를 가져올 수도 있다는 것이다.

### 3.4 혼잡 비용의 변화와 사회적 후생에의 영향

엄격한 송전제약을 기초로 해서 수급조정이 수행되는 안

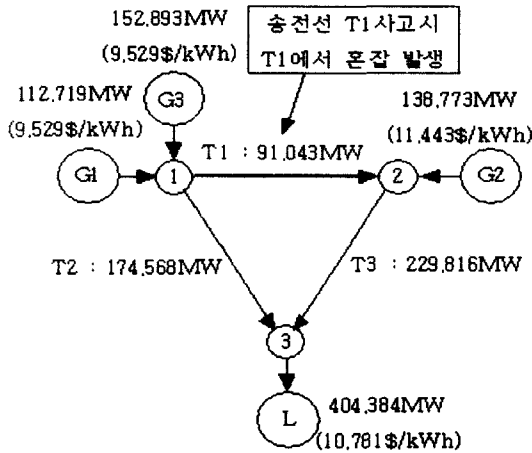


그림 8 신규참여자가 모선 1에 접속한 경우 (사고시)  
Fig. 8 New player's access to Bus 1 (SO1)

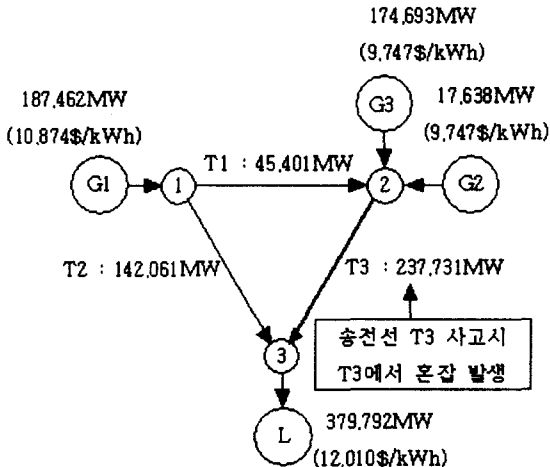


그림 9 신규참여자가 모선 2에 접속한 경우 (사고시)  
Fig. 9 New player's access to Bus 2 (SO2)

전운용의 경우는 경제운용의 경우에 비해서 송전선 혼잡과 관련된 혼잡 비용이 더 크다는 것을 그림 10에서 알 수 있다. 그림 10의 두 경우에 있어서 경제운용과 안전운용 사이의 혼잡 비용 차이를 송전계통의 (N-1) 신뢰도 기준을 만족시키기 위해 필요한 비용으로 해석할 수 있다. 이 혼잡 비용의 증가는 시장 전체의 사회적 후생에도 영향을 미쳐서 그림 11에서와 같이 발전사업자와 수용가 사이의 사회적 후생의 감소를 가져온다. 특히 혼잡 비용이 가장 큰 경우 (SO(2)의 경우)는 시장 균형가격의 증가가 현저하다. 여기서, 사회적 후생의 감소는 시장 균형가격의 증가로 인한 수용가의 소비자 잉여 감소가 주원인이다.

그림 11에서는 기준 Case 및 신규발전사업자가 모선 1, 모선 2에 접속한 경우를 평상시와 사고시로 구분하여 기존 발전사업자와 신규발전사업자의 이윤 및 소비자 잉여를 보여주고, 그림 12는 그에 따른 시장 균형가격의 변화를 나타

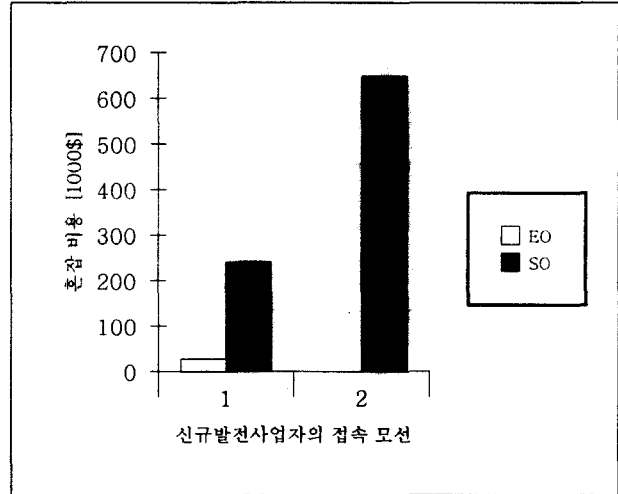


그림 10 신규참여자에 의한 혼잡 비용  
Fig. 10 Congestion cost by new entry

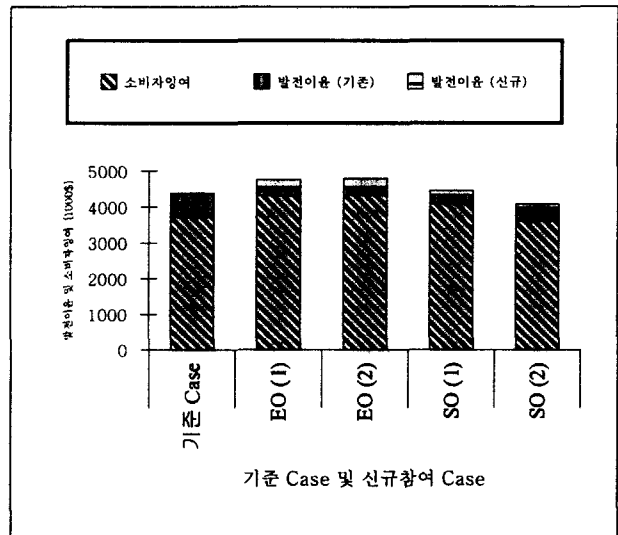


그림 11 사회적 후생의 변화  
Fig. 11 Comparison of social welfare in each case

주 : 기준 Case : 시장 내에 기존발전사업자만 존재하는 경우 (평상시)

EO(1), SO(1) : 신규참여자(G3)가 모선 1에 접속한 경우의 최적 경제운용 및 최적안전운용

EO(2), SO(2) : 신규참여자(G3)가 모선 2에 접속한 경우의 최적 경제운용 및 최적안전운용

낸다. 그림 11과 12에 의하면, 발전한계비용이 기존발전사업자(기준 Case)보다도 싼 신규발전사업자가 시장 내에 참여하게 되면 계통 내의 수급 균형량은 증가하고, 시장 균형가격 ( $\lambda$ )은 낮아진다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 발전사업자의 신규참여에 의한 전력 거래량의 변화로 말미암아 그림 11에서 알 수 있듯이, 계통 전체의 사회적 후생은 증가한다. 예를 들어, 신규발전사업자가 모선 2에 접속한 평상시의 경우(EO(2)의 경우)를 생각해 보면 신규발전사업자의 발전이

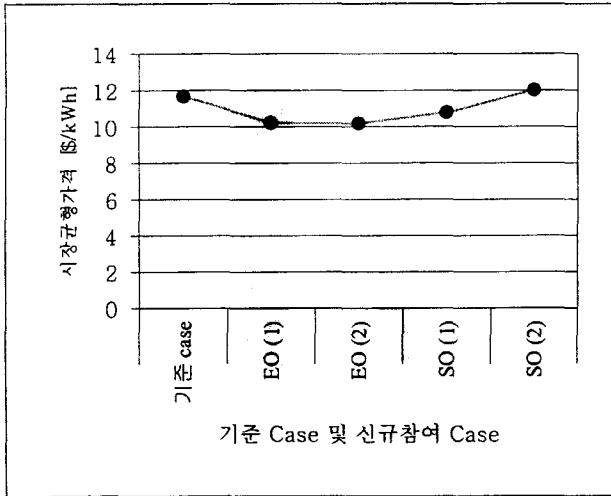


그림 12 시장 균형가격의 변화  
Fig. 12 Trend of transaction price in each case

윤은 총 발전이윤의 52.38%를 차지하고, 그러나 계통 내의 발전사업자의 총 이윤은 기준 Case를 100으로 할 때 69.92로 감소하게 된다. 사회적 후생은 기준 Case를 100으로 할 때 신규참여의 경우는 109.13으로 증가하게 되는데, 이것은 한계비용이 싼 발전사업자의 참여로 인해 시장 균형가격이 하락함으로써 소비자 잉여(수용가의 전력소비로 인한 순편익)가 증가하는 것으로 해석할 수 있다.

그러나 송전선 사고를 고려한 경우에는 신규발전사업자의 등장으로 인해 오히려 사회적 후생의 악화를 가져오는 경우(SO(2)의 경우)도 있음을 알 수 있다. 기준 Case의 사회적 후생을 100이라 할 때, SO(2)의 경우는 92.92가 된다. 이것은 그림 12로부터 시장 균형가격이 기준 Case의 11.67 [\$/kWh]에서 12.01 [\$/kWh]로 높아짐으로써 소비자 잉여가 상당 부분 감소한 것으로부터 기인한다. 또한 그림 12에서 보면 평상시에는 모선 2에 접속한 경우의 시장 가격이 10.184 [\$/kWh]로서 모선 1에 접속한 경우인 10.22 [\$/kWh]보다 낮는데, 이것은 계통 내에 혼잡이 발생하지 않으므로 혼잡 비용이 없고, 신규발전사업자 G3의 참여에 의해 한계비용이 높은 기존의 발전사업자 G2의 발전량이 감소하기 때문이다. 그러나 사고시에는 신규발전사업자 G3가 모선 2에 접속함으로써 더 높은 시장가격 12.01 [\$/kWh]를 형성하게 되는데, 이것은 사고발생 송전선 T3에 혼잡이 발생한 경우로서 보다 엄격한 송전 제약이 주어지게 되고, 그 결과 사고시 시장 내의 총거래량 379.792 [MW]는 평상시의 거래량 416.324 [MW]보다 훨씬 감소하게 되어 시장 균형가격은 훨씬 높아지게 된다.

결론적으로 평상시의 경우에는 신규발전사업자가 모선 1에 접속하였을 경우(사회적 후생은 \$4,760,745)보다 모선 2에 접속함으로써(사회적 후생은 \$4,788,369) 사회적 후생이 극대화되고, 사고시의 경우에는 신규발전사업자가 모선 1에 접속할 경우(사회적 후생은 \$4,454,159)가 모선 2(사회적 후생은 \$4,077,198)에 접속할 때보다 사회적 후생이 더 크다는 것을 그림 11로부터 알 수 있다. 실제 송전선로의 사고율을 약 0.3%로 가정하고, 신규발전사업자가 모선 2에 접속한 경

우의 경제운용(EO)과 안전운용(SO)으로 인한 기대 효용은 다음과 같이 계산된다.

$$U(E) = 0.003 \times U(SO(2)) + 0.997 \times U(EO(2)) \quad (12)$$

$$= 4,786,235 \text{ [\$]}$$

여기서 우리는 불확실성 하에서의 선택의 문제에 직면하게 되는데, 즉 위의 식 (12)의 기대 효용을 가지고 경제운용을 선택하게 된다면 이 때의 의사결정은 위험선호적 태도를 가졌다고 할 수 있으며, 이와는 반대로 안전운용을 선택하게 된다면 위험기피적 태도를 가졌다고 볼 수 있다. 의사결정자가 안전운용을 선택할 경우, 경제운용과 안전운용으로 인한 사회적 후생의 차이, 즉  $U(EO(2)) - U(SO(2)) = 711.171$  [\\$]는 기회비용(안전운용을 선택함으로써 말미암아 포기할 수밖에 없는 경제운용이 가지고 있는 가치)의 증가분으로 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 사회적 후생을 최대화 하는 전력거래량, 각 모선별 가격 등의 해를 결정하기 위해 최적조류계산을 적용하였다. 그리고 3모선 계통을 이용한 사례 연구를 통해 신규발전사업자의 접속 장소의 차이가 수급 균형량, 즉 시장 내의 전력 거래량과 각 모선가격에 미치는 영향을 살펴보고, 신뢰도 확보에 필요한 부수적인 비용, 다시 말하면 최적 경제운용과 최적안전운용사이의 혼잡 비용 차이에 대해서도 검토하였다. 계통 내 신규참여자의 접속 모선에 따라 평상시 또는 사고시 송전선 혼잡이 발생하게 되고, 시장 균형가격이 상승하게 되고, 각 모선가격의 차이가 커지게 되고, 신규참여에 의한 경제효과가 상실되고, 최종적으로 시장의 경제성을 잃게 될 가능성에 대해서도 논의하였다. 또한 평상시 및 송전선 사고시의 혼잡을 고려한 모선가격이 각 시장 참여자에게 가격신호로서 기능을 하게 되면 전력 계통을 운영하는 데 있어서 신뢰도 유지 대책의 하나로서 중요한 역할을 하게 될 것으로 기대된다. 궁극적으로는 송전선 건설·확충 등의 하드웨어적인 측면과 본 논문에서 검토한 수급조정 등의 소프트웨어적인 측면을 유기적으로 결합한 종합적인 신뢰도 유지 대책이 필요할 것으로 보인다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Sanford V. Berg, and John Tschirhart, Natural Monopoly Regulation: Principles and Practice, Cambridge University Press, New York, 1988.
- [2] Badrul H. Chowdhury, and Saifur Rahman, "A review of recent advances in economic dispatch," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, No. 4, pp.1248-1257, November 1990.
- [3] Alex Papalexopoulos, Shangyou Hao, Edwin Liu, Ziad Alaywan, and Ken Kato, "Cost/benefit analysis of an optimal power flow: The PG&E experience," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, No. 2,



pp.796-804, May 1994.

[4] Hal R. Varian, Microeconomic Analysis, Norton & Company, New York, 3rd edition, 1992.

[5] J. D. Weber, T.J. Overbye, and C. L. DeMarco, "Inclusion of price dependent load models in the optimal power flow," Proc. IEEE 31st Annual Hawaii International Conference on System Sciences, pp.62-70, 1998.

[6] David G. Luenberger, Linear and Nonlinear Programming, Addison-Wesley, 2nd edition, 1989.

[7] Fred C. Schweppe, Michael C. Caramanis, Richard D. Tabors, and Roger E. Bohn, Spot Pricing of Electricity, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1988.

[8] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, Wiley, New York, 2nd edition, 1996.

## 저 자 소 개



허 돈 (許 焯)

1974년 1월 17일 생. 1997년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 전기공학부 박사과정

Tel : 02-886-3101, Fax : 02-886-3102  
E-mail : hanwha@snu.ac.kr



김 발 호 (金 發 鎬)

1962년 7월 11일 생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 미국 University of Texas at Austin 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 미국 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~현재 홍익대

전자전기공학부 조교수  
Tel : 02-320-1462, Fax : 02-320-1110  
E-mail : bhkim@wow.hongik.ac.kr



박 종 근 (朴 鍾 根)

1952년 10월 21일 생. 1973년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 일본 동경대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1983년~현재 서울대 전기공학부 교수

Tel : 02-880-5516, Fax : 02-883-0827  
E-mail : parkjk@snu.ac.kr