

최소 가격 도매경쟁시장에서의 전력 거래에 관한 연구

서태민¹ · 이희상^{2*}

¹(주)LG전자 AE본부 RAC사업부 / ²성균관대학교 시스템경영공학과

A Study on Electrical Power Trading in Minimum Price Wholesale Market

Tae Min Seo¹ · Heesang Lee²

¹LG Electronics, AE Company, RAC Division

²Sungkyunkwan University, Department of Systems Management

The importance of renewable energy technology is discussed and next generation power transmission networks, which is called the smart grid, are constructed in developed countries. However for construction and operation of the smart grid, it is required not only to develop the electrical power generation technologies and transmission equipments but also to study systematic analysis and optimization for design and operation of the smart grid. In this paper we study electrical power trade in the smart grid using operations research models and simulation methods. We also consider future electrical power exchange markets in Korea and build four scenarios and the related optimization and simulation models, which reflect electrical power transaction pricing strategies of stake-holders. We can also simulate electrical power exchange market and analyze the results of electrical power trading, which can give us some insights for future electrical power exchange market.

Keyword: power trade, wholesale market, smart grid, simulation, management science models

1. 서론

지난 수십 년 동안 우리나라의 경제성장을 주도해온 전력산업은 지구온난화 방지를 위한 온실가스 감축이라는 세계적 과제와 전력 생산을 위한 자원 수입비용의 증가 등으로 인해 그 어느 때보다 심각한 도전에 직면하고 있고(KPX, 2011), 신재생 에너지 개발에 대한 관심과 연구가 국가적으로 크다. 또한 최근 스마트 그리드(Smart Grid)라는 이름으로 종전의 전력 송배전망을 정보화, 지능화, 친환경화, 고효율화, 분산화시키고 양방향성을 갖추는 노력도 활발하다. 스마트 그리드의 등장으로 인해 미래 전력망은 기존의 전력망과는 달리 지능적이지만 좀더 복잡하게 운영될 전망이다(Weiss, 2002; Ventosa, 2005, DOE,

2011).

미래 전력망인 스마트 그리드는 송배전의 제어가 지능화되는 것은 물론, 전기의 생산과 분배가 양방향으로 진행되어, 전력의 거래에 있어서도 큰 영향을 미칠 전망이다. 즉, 스마트 그리드에서의 전력 거래는 다양한 전력 공급/수요 집단들 간의 거래가 발생하게 됨에 따라 장기간에 걸쳐 양방향성의 전력 거래가 발생 할 것으로 예상된다. 또한 스마트 그리드에서는 대용량의 저장장치가 사용될 수 있어, 제조업자가 생산관리 및 판매관리에서 제품의 재고를 활용하듯이 전력을 저장하였다가 판매하는 것이 가능해질 전망이다. 이에 본 논문은 미래 전력망에서는 어떠한 과정을 거쳐 거래 가격이 결정되고 거래가 이루어지는지에 대한 시나리오들을 수립하고, 참여자들이 경

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0074081).

*연락처: 이희상 교수, 440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300 성균관대학교 시스템경영공학과,

Fax : 031-290-7610, E-mail : leehee@skku.edu

투고일(2011년 08월 23일), 심사일(1차 : 2011년 10월 18일, 2차 : 2011년 11월 03일), 게재확정일(2011년 11월 08일).

영과학적 모형을 통해 자신들의 거래 전략을 수립하는 과정에 대해 모델링과 시뮬레이션을 통해 미래 전력시장에서의 전력 거래의 양태와 예상되는 결과에 대해서 연구하였다.

2. 전력 거래 시장 분석

현재 한국의 전력 거래는 6개의 발전회사를 포함한 400여 개의 발전사업자와 판매사업자인 전력 거래소 사이에 한 시간 단위로 변동하는 가격으로 거래가 이루어지는 가격 경쟁의 도매시장으로 이루어져 있다(KPX, 2011). 이 시장에서는 전력 거래소가 입찰에 참여한 발전사업자의 발전기 중에서 사전 평가된 각 발전 변동비를 고려하여 가격이 낮은 발전기부터 급전을 실시하는 “변동 가격” 기반으로 거래를 결정한다. 또한 현행 전력시장은 전력 산업 구조개편 이전부터 독점적 전력수요자인 한국전력과 별도의 전력구입계약을 체결한 발전사업소를 제외한 모든 전력 거래에 대해 전력 거래소를 통해서만 거래가 가능하도록 한 “강제풀(Compulsory Pool)”의 성격을 지니고 있다.

기존의 전력 거래 방식을 자세히 살펴보면 다음의 <그림 1>과 같다. 먼저 전력 거래소가 과거수요실적자료 등을 바탕으로 수요를 예측하고, 전력공급자인 발전회사로부터 연간 표준발전기 공사비와 매월 연료비 단가의 자료를 바탕으로 발전비용을 산정하고 발전계획을 수립한다. 발전회사는 공급가능용량을 전력 거래소에 입찰하고, 전력 거래소는 발전공급가능용량을 통해 시장가격과 가동발전기를 선정할 후 발전회사에 입찰 결과를 통보해주는 과정을 거치고 있다. 전력시장의 시장가격 결정은 일반상품의 가격이 수요와 공급의 균형점에서 결정되는 것처럼 전력수요곡선(하루 전에 예측된 전력수요)과 공급곡선(공급입찰에 참여하는 발전기들로 형성)이 만나는 점에서 시장가격이 매 시간단위로 결정되는 방식을 취하고 있다. 이러한 시장가격 결정 과정에서 “계통한계가격”이 적용되고 있는데, 여기서 계통한계가격은 거래시간별로 봤을 때 발전기에 적용하는 전력시장가격(원/kWh)으로, 발전기의 변동비 중에서 가장 높은 가격으로 결정된다.

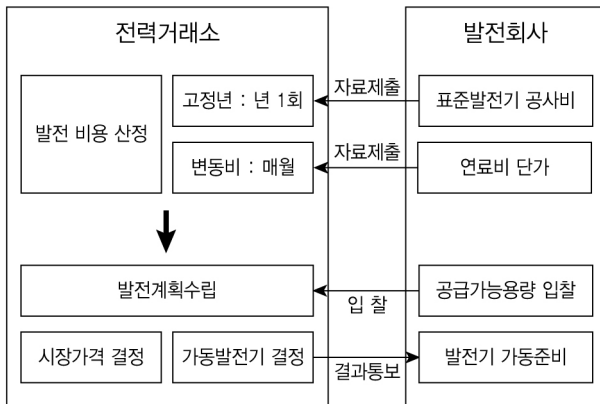


그림 1. 현재 운영되고 있는 변동비 반영 발전시장(KPX, 2011)

전력 거래 시장의 운영이나 가격 전략을 경영과학적 방법으로 모델링하는 연구는 통신시장이나 SCM 네트워크상의 거래와는 달리 그렇게 많지 않았다. 이는 예전의 전력망이 단순하고 일방적인 거래이었기에 전력공급자와 전력수요자 간의 전력 거래에서 과학적인 연구가 활발히 수행되지 않았기 때문이라고 분석되고 있다(Ventosa *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2007). 기존 전력시장의 모델링에서 경제학자들의 연구는 상대적으로 더 많았는데, 주로 가격과 시장균형에 대한 연구(Ventosa *et al.*, 2005), 경매전략에 대한 연구(Galiana *et al.*, 2002; Hudson, 2001), 게임이론이나 유전 알고리즘 적용 등이 있다(Son *et al.*, 2004; Richter *et al.*, 1998).

반면에 하나의 전력회사가 외부로부터의 전력 구매가 아닌 자신의 송배전망에서의 전력을 어떻게 분배하는 것이 경제적인지에 관한 연구는 “전력분배계획(power distribution planning)” 또는 “최적 전력흐름(OPF : optimal path flow) 문제”란 이름으로 상당히 많은 연구 성과가 존재한다(Acharyaa, 2006; Borges and Falco, 2006; Carrano *et al.*, 2006; Fang and David, 1999; Kator and Leung, 1989; Pavia *et al.*, 2005). 이 분야의 연구들은 단일기간 고려, 다중기간 고려 등으로 나누어지며, 지선 네트워크(feeder) 수준 및 여러 개의 지선을 하나의 시스템으로 보는 수준 등 다양한 문제가 정의되어 연구되어왔다. 이들은 경영과학적 모형의 관점에서는 위치선정(location) 문제, 부하할당(load allocation) 문제, 네트워크 설계 문제 등 여러 종류의 문제들로 연구되었다. 또한 방법론적으로는 LP, IP, NLP, stochastic function, 유전자 알고리즘, 시뮬레이티드 아닐링, 스왐 최적화 등 다양한 기법과 알고리즘들이 사용되고 있다(Gomez *et al.*, 2004; Paiva *et al.*, 2005; Lu and Adachi, 1992; Pandra *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2004).

3. 미래 전력경쟁시장 하에서의 시나리오 수립

앞으로 스마트 그리드 기반의 전력시장이 실제로 어떻게 형성되고 이것이 전력 거래 시장에 어떤 영향을 미칠지를 정확히 예측하기는 어렵다. 그러나 Acharyaa *et al.*(2006)이 전력 거래에서 도매경쟁시장이 구축되면 고정비나 변동비의 구분 없이 입찰한 가격에 따라 시장가격과 거래량이 결정될 것으로 예측하였듯이 지금까지처럼 변동비를 중심으로 비용만을 중요시하지는 않을 것이고 공급자가 다양한 가격제시와 전략적 선택을 할 수 있을 전망이다. 또한 스마트 그리드 기술이 제공하는 대형 전력저장장치가 전력공급자 및 수요자에게 모두 가능하다는 기술적인 문제도 거래에 큰 영향을 미칠 수 있을 것이다(DOE, 2011). 즉, 미래의 전력 거래 시장은 기존의 변동비 반영의 단순 경쟁거래시장이 갖고 있던 거래에 참여한 사업자들이 제시하는 최소가격으로 결정되는 가정은 유지되었지만, 이 때 제시되는 전력공급자의 가격이 변동비만이 아닌 전력공급자의 경쟁전략에 따른 다양한 가격제시에 기반하여 결정되고 저장장치를 통한 거래의 변화가 일어날 것으로 예측된다. 따라

서 본 연구의 대상인 전력 거래 시장은 현재의 시장처럼 각 시간대별의 거래에서 전력공급자와 전력수요자 간의 단 한 번의 입찰로 시장가격이 결정되는 것이 아니라, 여러 상황에 따라 여러 번 입찰을 실시할 수 있고, 각 입찰마다 전력공급자는 자신의 전력 생산 물량에 대해 다양한 가격을 제공할 수 있고, 저장을 하거나 상대방의 반응에 따라 거래를 취소하는 등의 전략을 실행할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 미래 전력시장의 다양한 가능성을 구체적으로 탐색하기 위해 시나리오 기반의 연구를 수행하였다. 즉, 본 연구가 대상으로 하는 전력 거래 시장은 스마트 그리드를 기반으로 한 전력시장으로 다양한 참여자들이 기존의 거래와는 다른 입찰과 가격결정 방식을 <표 1>과 같은 4가지 시나리오로 가정한다. 각각의 시나리오는 저장장치를 활용하고, 전력공급자가 변동비만이 아닌 다양한 가격요소에 기반하여 자신의 거래전략을 다양하게 사용하고, 여러 상황에 따라 여러 번 입찰을 실시할 수 있고, 상대방의 반응에 따라 거래를 취소하는 등의 상황을 단계적으로 반영하였다. 또한 각 시나리오별로 전력공급자, 전력수요자 각각의 입장을 최적화하는 적절한 경영과학 모형을 제안하였고 이를 사용하여 최적의 전략을 도출한다고 가정하였다.

표 1. 도매경쟁시장에서의 전력 거래에 관한 시나리오

시나리오	설명
1	전력수요자가 각 전력공급자의 공급량과 가격에 대한 모든 정보를 아는 경우
2	시나리오 1+스마트 그리드가 상용화될 때 사용될 수 있는 대형 전력 저장 장치의 존재가 있는 경우
3	전력수요자가 전력공급자에 대한 미래의 가격 정보를 모르고 단지 현재 시점에서의 전력공급자의 공급량과 가격을 알고 있는 경우
4	시나리오 3+전력공급자가 전력수요자와의 전력 거래를 거절할 수 있는 경우

각각의 시나리오대로 시장이 형성되었을 때 어떻게 거래가 일어나고, 각 전력수요자와 공급자의 최적화 전략이 무엇인지에 대해서 알아봄으로써 발전된 전력 거래 시장 참여자들의 거래전략을 분석하고자 한다. 모든 시나리오들에 대해서 다수의 전력공급자와 하나의 전력수요자간의 전력 거래를 가정하고 있다. 시장참여자들이 입찰 전략을 수립하는데 사용하는 경영과학 모형은 최적화 모형들이고, 최적화 모형의 목적함수는 전력 거래 비용의 최소화를 목적으로 한다.

4. 각 시나리오에 대한 경영과학 모델링

각 시나리오에 대한 경영과학 모델링에 들어가기에 앞서 본 논문에서 사용되는 각 용어의 정의와 의사결정 변수는 다음과

같이 정의된다. 각 시간대별 거래는 기간 p 로 나타내고, 입찰의 반복횟수는 반복 k 로 나타내고, 전력공급자는 j 로 나타낸다.

표 2. 각 용어의 종류 및 설명

용어(Terms)	설명
$P = \{1, \dots, l\}$	총 기간의 집합
$K = \{1, \dots, m\}$	총 반복의 집합
$J = \{1, \dots, n\}$	총 전력공급자의 집합
$c_j^{p,k}$	각 기간 p , 반복 k 에서 전력공급자 j 가 전력수요자에게 제시하는 전력공급 가격
$s_j^{p,k}$	각 기간 p , 반복 k 에서 전력공급자 j 가 전력수요자에게 제시하는 공급가능용량
d^p	각 기간 p 에서 전력수요자의 예측수요용량

표 3. 의사결정 변수의 종류 및 설명

의사결정 변수	설명
$x_j^{p,k}$	각 기간 p , 반복 k 에서 전력공급자 j 로부터 전력수요자와의 전력 거래량

4.1 시나리오 1

시나리오 1은 전력수요자가 기존의 공급량과 가격 예측 자료를 통해 각 전력공급자에 대한 공급량과 가격에 대한 모든 정보를 알고 있는 상황이다. 즉, 어떤 기간 p , 반복 k 에서 전력수요자가 전력공급자와 거래를 하지 않는 경우 또는 거래를 하는 경우가 발생했을 때 같은 기간 p , 다음 반복 $(k+1)$ 에서 전력공급자가 어떤 가격과 공급량을 제시할지를 미리 알고 있다면, 전력수요자는 주어진 기간 p 의 모든 반복을 한 번에 고려하여 의사결정을 할 수 있을 것이다. 이 시나리오에서의 시장 참여자들의 행동을 다음과 같이 가정한다.

- ① 전력수요자는 각 전력공급자에게 시간대별로 구입전력용량(d^p)을 제시한다.
- ② 각 전력공급자는 전력수요자에게 시간대별, 입찰회수별로 각 발전기별 가격($c_j^{p,k}$)과 공급가능용량($s_j^{p,k}$)을 입찰한다.
- ③ 전력수요자는 구입전력용량 이상을 확보해야만 하고, 최저가격 낙찰제도를 통해 전력 거래를 성사시킨다.
- ④ 입찰 반복횟수는 총 l 번으로 제한한다.

시나리오 1의 경영과학 모델링은 전력수요자 입장에서 최소의 전력 거래 비용에 목적을 두고 있는 다음과 같은 선형계획모형이다. 첫 번째 제약식은 해당 기간 내에 모든 반복에서 발생하는 전력 거래 용량의 총합이 전력수요자가 요구하는 전력 거래 용량을 만족시켜야 한다는 것이고, 두 번째 제약식은 해당 기간 내에 각 전력공급자들은 모든 반복에서 제공하는 전력 거래 용량의 총합이 자신이 제공할 수 있는 총 전력공급용량보다는 작아야 한다는 것이다.

$$\begin{aligned} \min & \sum_{\substack{p \in P, k \in K \\ j \in J}} c_j^{p,k} x_j^{p,k} \\ \text{s.t.} & \sum_{k \in K, j \in J} x_j^{p,k} \geq d^p \text{ for } p \in P & (\text{제약식 1}) \\ & \sum_{k \in K} x_j^{p,k} \leq s_j^p \text{ for } p \in P, j \in J & (\text{제약식 2}) \\ & x_j^{p,k} \geq 0 \text{ for } p \in P, k \in K, j \in J \end{aligned}$$

4.2 시나리오 2

시나리오 2는 스마트 그리드의 발전으로 경제적인 대형 용량의 저장장치가 존재하게 되는 상황이다. 먼저 전력수요자의 입장에서 바라보면, 전력공급자의 모든 가격과 전력량 정보를 알고 있기 때문에 모든 기간을 고려하여 가격이 싼 기간에 전력을 많이 공급받아 저장 장치에 저장을 한 후 다음 기간에 저장한 전력을 활용하기 위해 그기간의 요구량보다 더 적은 양을 전력공급자로부터 공급받는다면 더 저렴한 비용으로 전력을 살 수 있을 것이다. 반면에 전력공급자의 입장에서는 반복 k 에서 남은 전기를 저장하는 비용이 반복 $(k+1)$ 에서 전기를 팔 수 있는 비용보다 작아 다음 거래에서 팔 수 있다면 이익이 상승할 수 있다. 그러나 만약에 전기를 저장했으나 다음번에 다른 전력 거래소보다 가격을 높게 제시하여 팔지 못하게 된다면 반복 $(k+2)$ 까지 저장해야 하는 상황이 발생할 수 있기 때문에 이익이 달라질 수 있을 것이다. 이 시나리오에서의 시장 참여자들의 행동을 다음과 같이 가정한다.

- ① 전력수요자는 각 전력공급자에게 시간대별로 구입전력 용량(d^p)을 제시한다.
- ② 각 전력공급자는 전력수요자에게 시간대별, 입찰회수별, 발전기별 발전량($s_j^{p,1} + r_j^{p-1,t} \forall k=1, s_j^{p,k}, k \in K/\{1\}$)과 가격($c_j^{p,k}$)을 입찰한다.
- ③ 전력수요자는 구입전력용량 이상을 확보해야만 하고, 최저가격 낙찰제도를 통해 전력 거래를 성사시킨다.
- ④ 입찰 반복횟수는 총 t 번으로 제한한다.
- ⑤ 전력수요자는 각 기간에서 공급받고 남은 전력을 저장장치를 통해 다음 기간으로 전달이 가능하다. 이때의 저장량과 비용은 각각 u^p, q^p 라고 한다.
- ⑥ 전력공급자는 각 기간에서 공급받고 남은 전력은 저장장치를 통해 다음 기간으로 전달이 가능하다. 이때의 저장량은 $r_j^{p,t}$ 라고 한다.

시나리오 2의 경영과학 모델링도 전력수요자 입장에서 최소의 전력 거래 비용에 목적을 두고 있다. 다음의 <그림 2>는 첫 번째 제약식은 각각 기간, 반복에서 제공하는 전력공급자의 전력공급용량의 총 합($\sum_{k \in K, j \in J} x_j^{p,k}$)과 이전 기간에서 저장장치를 통해 공급되는 전력(u^{p-1})의 합은 이번 기간에서 요구하는 전력수요용량(d^p)과 다음 기간으로 전달되는 저장량(u^p)

의 합과 같아야 한다는 전력 재고 방정식을 보여주고 있다. 두 번째 제약식에서는 기간 p 에서 전력공급자가 전력생산을 통해 공급 가능한 s_j^p 의 전력량과 이전 기간 $(p-1)$ 에서 남은 전력량을 합친 것이 이번 기간 p 에서 전력공급자가 공급할 수 있는 전력량이 된다. 그리고 각 반복마다 전력량이 전력수요자에게 공급되고 남은 전력량은 다음 기간 $(p+1)$ 의 전력 거래에 사용하기 위해 저장장치를 통해 넘겨주게 된다.

$$\begin{aligned} \min & \sum_{\substack{p \in P, k \in K \\ j \in J}} c_j^{p,k} x_j^{p,k} + q^p u^p \\ \text{s.t.} & \sum_{k \in K, j \in J} x_j^{p,k} + (u^{p-1} - u^p) = d^p \text{ for } p \in P \\ & \sum_{k \in K} x_j^{p,k} + (r_j^{p,t} - r_j^{p-1,t}) = s_j^p \text{ for } p \in P, j \in J \\ & x_j^{p,k}, u^p \geq 0 \text{ for } p \in P, k \in K, j \in J \end{aligned}$$

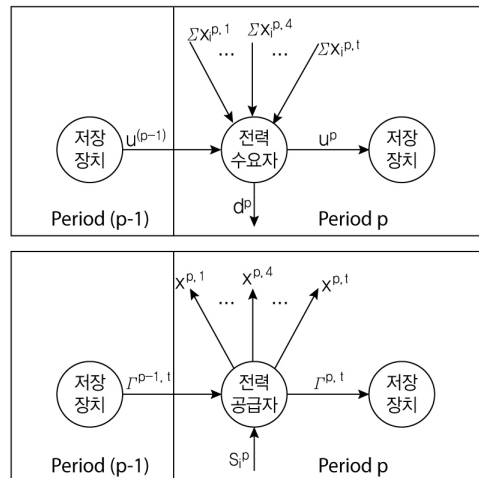


그림 2. 전력수요자/공급자가 취할 수 있는 전략

4.3 시나리오 3

이 경우는 앞의 경우와 달리 전력수요자가 현재의 전력공급자의 전력 거래 정보만 알고 다음 전력 거래 정보를 모르기 때문에 모든 경우를 동시에 고려한 최소의 전력 거래 비용을 구하기 어렵다. 따라서 전력수요자는 각 기간마다 주어지는 전력 거래 정보를 이용하여 전력공급자와의 전력 거래량을 결정하는 데에만 입찰결정의 최적화 모형을 적용할 것이다.

또한 이 시나리오에는 최소 전력 거래 비용에 중점을 두는 것이 아니라 전력시장 가격 형성에 초점을 둔다. 전력공급자는 단순히 각 기간마다 임의의 값으로 입찰하는 것이 아니라 앞 단계에서의 입찰 여부에 따라서 전력 거래 가격을 한 단계 올리거나 내리는 전략을 실행할 수 있다고 가정한다. 본 연구에서는 이와 같은 입찰전략을 사용하는 경우에 전력시장 가격이 어떻게 형성되어 가고 어디로 수렴해 가는지를 알아보고자 한다. 이 시나리오에서 시장 참여자들의 행동은 다음과 같이 가정한다.

- ① 전력수요자는 각 전력공급자에게 시간대별로 구입전력 용량(d^p)을 제시한다.
- ② 각 전력공급자는 전력수요자에게 시간대별로 각 발전기별 가격($c_{j,r}^p$)과 공급가능용량(s_j^p)을 입찰한다.
- ③ 전력수요자는 구입전력용량 이상을 확보해야만 하고, 최저가격 낙찰제도를 통해 전력 거래를 성사시킨다.
- ④ 각 전력공급자는 제시한 가격거래가 성립되면 가격의 조정 없이 전력을 공급해야 하며 다음 거래에서 이 자신의 가격정보를 바탕으로 가격 거래를 조정할 수 있다.
- ⑤ 각 전력공급자는 다른 전력공급자의 정보를 모르고 자신만의 가격 책정 전략을 가지고 있다.

전력공급자의 가격전략은 아래의 순서에 따라 결정된다.

- ① 전력공급자는 총 r 개($r = 1, \dots, s$)의 가격 전략을 가지고 있다.
- ② 총 r 개의 가격 전략 중 임의의 가격을 기간 1에서 제시한다.
- ③ 기간 1에서 거래에 성공한 전력공급자는 다음 거래에 한 단계 더 높은 가격을, 거래에 실패한 전력공급자는 다음 거래에 한 단계 더 낮은 가격을 제시하는 전략을 사용한다.
- ④ 기간 p 에서는 앞의 거래성립 여부에 따라 ③과 같은 방법으로 가격 전략을 바꾸게 된다.

표 4. 전력공급자의 가격 거래 전략

공급자 j	$c_{j,1}$	$c_{j,2}$	\dots	$c_{j,s-1}$	$c_{j,s}$
	← 저가				고가 →

전력 거래 가격결정 과정은 다음과 같은 절차를 따른다. 먼저 기간 1에서 전력공급자는 전력수요자에게 가격과 전력가능공급량을 제시하고, 전력수요자는 이 정보와 자신이 필요한 전력수요량을 바탕으로 <표 4>의 입찰결정 최적화 모형에 적용한다. 거래결과를 모든 전력공급자에게 통보하고 입찰에 성공한 전력공급자와 거래를 실시한다. 다음 기간부터는 이전 기간의 입찰 성공여부에 따라 전력공급자 개별마다 공급가격 전략에 의해 자신의 전력가격을 수정하고, 다음거래에 입한다. 이를 마지막 기간에 도달할 때까지 반복 진행한다.

표 5. 입찰결정 수리모형

각 용어의 종류 및 설명	입찰결정 수리모형
$J = \{1, \dots, n\}$: 전력공급자 s_j : 전력공급자 j 의 전력공급 가능량 d : 전력수요자의 전력수요 요구량 $c_{j,r}$: 거래가격	$\min \sum_{j \in J} c_{j,r} x_j$ $s.t. \sum_{j \in J} x_j \geq d$ $0 \leq x_j \leq s_j \text{ for } \forall j$
의사결정 변수의 종류 및 설명	
x_j : 전력 거래량	

4.4 시나리오 4

시나리오 4는 전력공급자의 가격 전략 방식과 입찰결정 모형은 시나리오 3과 같다. 그러나 거래가 성립하면 전력공급자가 무조건 전력을 공급하는 것이 아니라 자신의 거래 성립 확률에 따라 거래를 성립할 수도 거절할 수도 있다고 가정한다. 따라서 각 기간마다 한 번의 거래만이 발생하는 것이 아니라, 전력공급자가 거절한다면 그 만큼의 전력량을 다시 보충해야 하므로 전력수요자와 전력공급자 간에 재거래가 발생하게 된다.

기본적인 가정은 시나리오 3과 같으나 거래 성립 여부에 따라 거래 반복횟수가 존재하기 때문에 이 시나리오에서의 시장 참여자들의 행동에는 다음 가정을 추가한다.

- ① 전력수요자는 각 전력공급자에게 시간대별, 입찰횟수별로 구입전력용량($d^{p,k}$)을 제시한다.
- ② 각 전력공급자는 전력수요자에게 시간대별, 입찰횟수별로 각 발전기별 가격($c_{j,r}^{p,k}$)과 공급가능용량($s_j^{p,k}$)을 입찰한다.
- ③ 전력수요자는 구입전력용량 이상을 확보해야만 하고, 최저가격 낙찰제도를 통해 전력 거래를 성사시킨다.
- ④ 각 전력공급자는 제시한 가격거래가 성립되면 자신이 가지고 있는 거래 거절비율($\alpha_j^{p,k}$)에 의해 거래 여부를 결정하고, 거래를 거절하게 된다면 동시간대 다음 입찰에서 거래 가격을 높이고, 거래를 처음부터 거절당한 전력공급자는 다음 입찰에서 거래 가격을 낮춘다.
- ⑤ 각 전력공급자는 다른 전력공급자의 정보를 모르고 자신만의 가격 책정 전략을 가지고 있다.

전력공급자의 가격전략은 시나리오 3에서의 전략과 같고, 이 경우의 전력 거래 가격결정 과정은 다음 <그림 3>과 같은 절차를 따른다. 먼저 기간 1에서 전력공급자는 전력수요자에게 가격과 전력가능공급량을 제시하고, 전력수요자는 이 정보와 자신이 필요한 전력수요량을 바탕으로 입찰결정 최적화 모형에 적용한다. 거래결과를 모든 전력공급자에게 통보하게 되고, 전력공급자는 거래가 성립되면 자신의 거래비율에 의해 거래여부를 결정한다. 만약 거래가 성립되면 해당 전력량만큼 전력을 공급하고 다음 기간에 전력가격을 한 단계 높인다. 거래를 거절하면 전력을 공급하지 않고 다음 반복에서 전력가격을 한 단계 높인다. 그리고 거래를 처음부터 거절당한 전력공급자는 전력가격을 다음 반복에서 한 단계 낮춘다. 전력수요자는 전력공급자와 전력 거래가 성립된 전력량만큼 우선 공급받고 남은 전력량은 재거래를 통해서 다시 획득해야만 한다. 이와 같은 방식으로 해당 기간에 전력수요자의 전력수요량만큼을 확보하게 된다면 다음 기간으로 넘어가게 되고, 그렇지 않으면 지속적인 재거래를 통해 전력수요량만큼 확보해야만 하는 결과가 발생하게 된다. 이를 마지막 기간에 도달할 때까지 반복 진행한다.

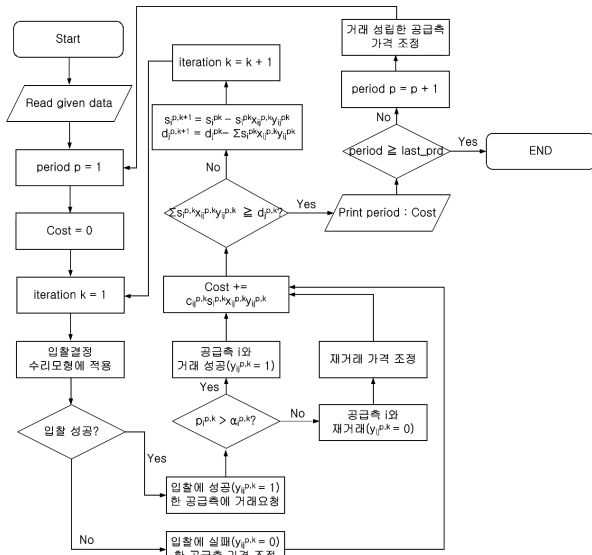


그림 3. 시나리오 3과 시나리오 4에서의 전력 거래 가격결정 규칙 기반 알고리즘

5. 실험 및 결과

5.1 시나리오 1

본 소절에서는 전력공급자 및 전력수요자의 개별 정보들을 바탕으로 제 4.1절에서 제시한 접근방법을 사용하여 최적화 모형을 적용한 결과를 보여주고 있다. 시나리오 1은 저장장치가 없어 이전 기간에 남은 전력이 다음 기간으로 전달되지 않기 때문에 각 기간마다 독립적이다. 따라서 전력수요자는 다음 <표 6>과 같이 한 기간 내에서 반복 3까지 전력공급자의 모든 가격정보를 알고 있다고 가정하였다. 전력공급자는 3명이고 전력수요자는 1명으로 설정하였다.

표 6. 시나리오 1: 전력공급자 가격 정보

	기간 1에서의 가격 정보		
	전력공급자 1	전력공급자 2	전력공급자 3
반복 1	1.5	2	1
반복 2	2	1	3
반복 3	3	2	0.5
전력공급량	20	15	10
전력수요량	25		

표 7. 시나리오 1: 모델링 적용 결과

시나리오 1	적용 결과
계산반복횟수	0
총 변수	9
총 제약식	5
최적값	20

실험 결과, 반복 2에서 전력공급자 2와, 반복 3에서 전력공급자 3과 전력 거래를 각각 15, 10을 실시하였고 이때의 총 비용은 20이었다. 다음의 <표 7>에서 보듯이 사용한 최적화 모델링은 단순한 선형계획법이고 변수와 제약식이 상대적으로 적기 때문에 수행 시간 측면에서는 빠른 특성을 보여주고 있다.

5.2 시나리오 2

본 소절에서는 전력공급자 및 전력수요자의 개별 정보들을 바탕으로 제 4.2절에서 제시한 접근방법을 사용하여 최적화 모형을 적용한 결과를 보여주고 있다. 이 시나리오는 저장장치를 통해 이전 기간에 남은 전력이 다음 기간으로 전달되기 때문에 기간이 서로 종속적이다. 따라서 전력수요자는 다음 <표 8>과 같이 2개의 기간에서 각각의 반복 2까지 전력공급자의 모든 가격정보를 알고 있다고 가정하였다. 전력공급자는 3명이고 전력수요자는 1명으로 설정하였다.

표 8. 시나리오 2: 전력공급자 가격 정보

		가격 정보		
		전력공급자 1	전력공급자 2	전력공급자 3
기간 1	반복 1	1.5	2	1
	반복 2	2	0.5	3
	전력공급량	20	20	10
	전력수요량	25		
기간 2	반복 1	3	2	1.5
	반복 2	2	1.5	3
	전력공급량	20	20	15
	전력수요량	35		
저장비용		0.1		

실험 결과, 기간 1에서는 반복 1에서 전력공급자 3과, 반복 2에서 전력공급자 2와 전력 거래를 각각 10, 20 만큼의 전력량으로 거래하였고, 전력량 25를 소비하고 남은 전력량 5는 다음 기간으로 전송되었다. 기간 2에서는 반복 1에서 전력공급자 3과, 반복 2에서 전력공급자 2와 전력 거래를 전력량 10, 20을 거래하였으며, 이전 기간에서 전송된 전력량 5까지 포함하여 전력수요량 35를 충족하고 있다. 다음의 <표 9>에서 보여주듯이 제 5.1절의 실험결과와 마찬가지로 사용한 최적화 모형은 단순한 선형계획법이고 변수와 제약식이 상대적으로 적기 때문에 수행 시간 측면에서는 빠른 특성을 보여주고 있다

표 9. 시나리오 2: 모델링 적용 결과

시나리오 2	적용 결과
계산반복횟수	6
총 변수	16
총 제약식	9
최적값	65.5

5.3 시나리오 3 및 시나리오 4

시나리오 3과 시나리오 4의 전력 거래 가격 결정의 전산 시뮬레이션을 다음과 같이 초기 설정하였다.

- ① 총 10기간까지 진행하고, 반복은 수요자의 수요를 만족할 때까지 진행한다.
- ② 공급자는 10명으로 설정하였고, 매 기간마다 50~80(MW) 사이에서 전기에너지를 생산한다.
- ③ 수요자는 매 기간마다 200~320(MW) 사이에서 전기에너지를 요구한다.
- ④ 매 기간마다 공급자가 생산한 전기에너지의 총 합은 수요자가 원하는 전기에너지보다 항상 크거나 같아야 한다.
- ⑤ 각 공급자는 제시한 자료를 바탕으로 수요자로부터 거래 제의가 들어오면 $\alpha_j^{p,k}$ 의 확률로 거래를 거절할 수 있다.
- ⑥ 각 공급자들은 1에서 10까지 총 10가지 가격을 가지고 있고, 초기에는 임의의 가격을 선정하여 전력 거래에 참여하게 된다.

공급자의 전력 제의 거절 확률이 변화하면서 어떻게 가격이 형성되어 가는지를 알아보았다. 우리는 모든 공급자가 자신의 거래 가격에 상관없이 거절확률이 α 로 모두 동일한 경우와 개별 공급자가 자신의 거래 가격에 따라 거절확률이 $\alpha_j^{p,k}$ 로 변화하는 경우에 대해서 전산실험을 실시해 보았다. 여기서 거절 확률 $\alpha_j^{p,k}$ 는 다음과 같이 정의하였다.

기간 p , 반복 k 에서 공급자 j 의 거절 확률은 $\alpha_j^{p,k} = (\text{현재 공급자 } j \text{의 가격 전략 순위}) / (\text{공급자 } j \text{의 총 가격 전략의 수})$ 로 정의한다.

실험 결과 거절 확률이 0%인 경우에는 수요자로부터 전력 제의가 들어왔을 때 공급자는 무조건 전력 제의를 수락하게 되고, 다음 기간에서만 전력 가격 수정이 발생하여 전력 가격 변동이 작지만, 거절 확률이 20%이거나 40%인 경우에는 수요자로부터 전력 제의가 들어왔을 때 공급자는 거절 확률에 따라 전력 거래를 다시 하는 경우가 발생하게 된다. 이로 인해 한 기간 내에서 발생하는 전력 거래가 많아지게 됨에 따라 공급자 간에 전력 가격 수정 또한 더 많이 발생하게 되어 가격 변동의 폭이 커졌다. 거절확률이 $\alpha_j^{p,k}$ 로 변화하는 경우에는 각 공급자가 제시한 가격이 낮을수록 수요자로부터 전력 제의를 많이 받으나, 이 공급자가 전력 거래를 실시할 확률 또한 낮아지기 때문에 각 기간 내에서 수십 번 이상의 전력 거래가 발생하였다. 이로 인해 낮은 가격을 제시한 공급자가 전력 거래 거절과 동시에 자신의 전력 거래 가격을 높이게 되어 더 높은 가격에서 거래가 성립될 것이라고 예상하였지만, 더 많은 전력 거래는 오히려 높은 가격을 제시한 공급자에게 전력 거래 가격을 낮출 수 있는 기회를 더 많이 제공해 줌으로써 자신은 점차

전력 거래 제의에서 밀려나게 되고, 전력 거래를 다시 하기 위해서 가격을 낮추게 되는 상황으로 이어졌다. 따라서 이 전략에서는 모든 상황에 대한 전력 거래 가격이 최저 가격에서 형성되어지고 있다.

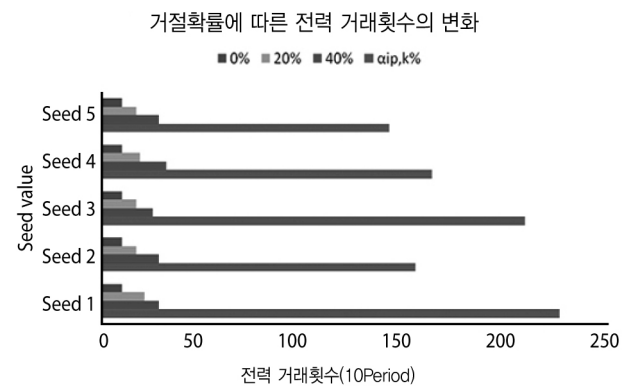


그림 4. 거절확률에 따른 전력 거래횟수의 변화

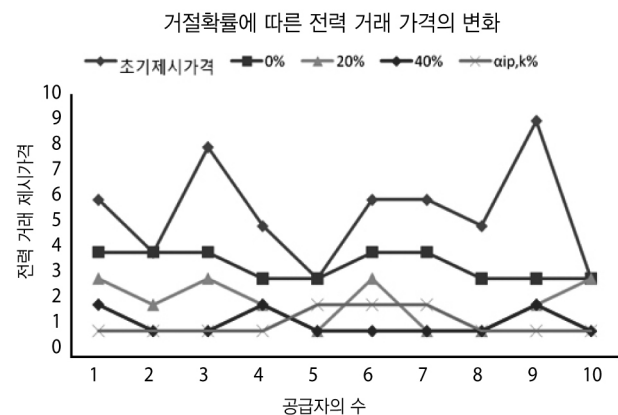


그림 5. 거절확률에 따른 전력 거래 가격의 변화

6. 결론

본 연구는 우리나라의 현재 전력 거래시장을 분석하고, 이를 바탕으로 향후 스마트 그리드가 구축된 도매 경쟁시장에서 발생할 수 있는 여러 전력 거래 시나리오들을 경영과학 모델링으로 접근하였다. 도매 경쟁 시장에서는 기존의 변동비 반영 전력시장이 가격입찰 전력시장으로 변하기 때문에, 이러한 전력시장에서 일어날 수 있는 시나리오들을 설정하였다. 각 시나리오에 대해서 최소의 전력 거래 비용을 위한 최적화 모형과 전력 거래 가격결정 알고리즘을 사용하여 전산실험을 실시하였다.

전산실험 결과 자신의 전력가격을 높이기 위해서 전력 제의 거절을 많이 할수록 전력 거래 또한 많이 발생하게 되고, 이는 전력 거래에 실패한 공급자들의 전력 거래가격 하락 속도를 오히려 증가시킴을 알 수 있었다. 이로 인해 공급자들의 거절 확률이 높은 경우일 때 낮은 경우보다 싼 전력 거래가격이 형성됨을 확인할 수 있었다.

본 연구의 전력 거래에서는 전력공급자가 가질 수 있는 가격 전략을 간단하게 변경하거나 입찰결정을 거절하는 등의 단순한 경우에 한해서만 실험하였다. 향후에 전력공급자 간의 정보 공유 등 좀 더 다양한 전략에 대한 연구가 시행된다면 여러 상황에서 전력공급자가 전력 거래 시 유리한 입장을 선점할 수 있는 방법들을 모색할 수 있을 전망이다.

참고문헌

- Acharyaa, N., Mahata, P., and Mithulananthan, N. (2006), An analytical approach for DG allocation in primary distribution network, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 28(10), 669-678.
- Borges, C. L. T. and Falcao, D. M. (2006), Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement, *Electrical Power and Energy Systems*, 28, 413-420.
- Carrano, E. G., Soares, L. A. E., Takahashi, R. H. C., Saldanha, R. R., and Neto, O. M. (2006), Electric Distribution Network Multiobjective Design Using a Problem-Specific Genetic Algorithm, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(2), 995-1005.
- DOE (2011), Smart Grid, (<http://energy.gov/smart-grid>).
- Fang, R. S. and David, A. K. (1999), Optimal dispatch under transmission contracts, *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(2), 732-737.
- Galiana, F. D., Kockar, I., and Franco, P. C. (2002), Combined pool/bilateral dispatch-Part I : performance of trading strategies, *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(1), 92-99.
- Gomez, J. F., Khodr, H. M., De Oliveira, P. M., Ocque, L., Yusta, J. M., Villasana, R., and Urdaneta, A. J. (2004), Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits, *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2), 996-1004.
- Hudson R. (2001), *Analysis of uniform and discriminatory price auctions in restructured electricity markets*, Technical report, Energy Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee : CERTS, US Department of Energy.
- Jin, Y. X., Cheng, H. Z., Yan, J. Y., and Zhang, L. (2007), New discrete method for particle swarm optimization and its application in transmission network expansion planning, *Electric Power Systems Research*, 77(3-4), 227-233.
- Kator, S. K. and Leung, L. C. (1989), Power distribution planning : a review of models and issues, *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(3), 1151-1159.
- KPX (2011), Korea Power Exchange Homepage (<http://www.kpx.or.kr>).
- Lu, J. Q. and Adachi, T. (1992), Parameter optimization method for electronic circuit design using stochastic model function, *Electronics and Communications in Japan, Part III : Fundamental Electronic Science*, 75(4), 13-25.
- Paiva, P. C., Khodr, H. M., Domínguez-Navarro, J. A., Yusta, J. M., and Urdaneta, A. J. (2005), Integral Planning of Primary-Secondary Distribution Systems Using Mixed Integer Linear Programming, *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2), 1134-1143.
- Parada, V., Ferland, J. A., Arias, M., and Daniels, K. (2004), Optimization of Electrical Distribution Feeders Using Simulated Annealing, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(3), 1135-1141.
- Richter C. W. (1998), Genetic algorithm evolution of utility bidding strategies for the competitive marketplace, *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(1), 256-261.
- Son, Y. S., Baldick, R., Lee, K. H., and Siddiqi, S. (2004), Short-term electricity market auction game analysis : Uniform and pay-as-bid pricing, *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(4), 1990-1998.
- Ventosa, M., Baillo, A., Ramos, A., and Rivier, M. (2005), Electricity market modeling trends, *Energy Policy*, 33(7), 897-913.
- Weiss, J. (2002), Market power and power markets, *Interfaces*, 32(5), 3746-3748.
- Wu, X., Hong, X., Cai, Y., Luo, Z., Cheng, C. K., Gu, J., and Dai, W. (2004), Area Minimization of Power Distribution Network Using Efficient Nonlinear Programming Techniques, *IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 23(7), 1086-1094.
- Zhang, W., Li, F., and Tolbert, L. (2007), Review of reactive power planning : objectives, constraints, and algorithms, *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4), 2177-2186.
- Zhao, B., Guo, C. X., and Cao, Y. J. (2005), A multiagent-based particle swarm optimization approach for optimal reactive power dispatch, *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2), 1070-1078.



서태민

성균관대학교 시스템경영공학과 학사
 성균관대학교 산업공학과 석사
 현재 : (주)LG전자 AE본부 RAC사업부 연구원,
 관심분야 : 경영과학, 시뮬레이션, 정보통신



이희상

서울대학교 산업공학과 학사
 서울대학교 산업공학과 석사
 Georgia Institute of Technology, School of Industrial
 and Systems Engineering Ph.D.
 현재 : 성균관대학교 시스템경영공학과 교수
 관심분야 : 경영과학, 기술경영