

에이전트 기반 모델을 활용한 전력시장 지표 개발

*김선교 *Sherzod **이상성 *윤용태
*서울대학교 전기컴퓨터공학부, **기초전력연구원

Electricity market Index By Using Agent-based Model

*S. K. Kim *Sherzod R. Usmanov **S. S. Lee *Y. T. Yoon
*Seoul National Univ. **PSRD and RERI of KESRI,

Abstract - 전력산업의 구조를 기존의 독점적 구조에서, 분할을 통한 경쟁체제로 변환하려는 움직임이 현재 진행 중이다. 전력산업에 경쟁을 도입함으로써 효율성을 최대화하기 위함이다. 향후 형성될 도매경쟁시장에서 발생할 시장참여자의 여러 가지 행태에 대한 예상과 분석은 시장의 불안정 요소를 미리 찾아내고, 이를 사전에 예방할 수 있는 규제수단을 개발하기 위해 아주 중요하다. 본 논문에서, 우리는 에이전트 기반 모델을 활용해서 전력 시장의 주요 논제를 평가할 수 있는 지표를 정의하여 제시할 것이다. 그 지표에는 시장운영지표, 시장수급지표, 시장예측지표가 있다. 그리고 에이전트 기반 모델 접근법은 전력시장의 개편으로 인해 더욱 복잡해진 시장 환경을 반영하여서, 기존의 게임이론의 한계를 넘어서 실제적인 값들을 지표에 반영시켜줄 것이다

1. 서 론

전력산업의 구조를 수직적 독점체제로부터 경쟁을 도입하여 분할하려는 움직임은 1970년대부터 선진국을 시작으로 확산되어 왔다. 우리나라 전력산업의 구조 개편은 송전망을 제외한 발전, 배전, 판매부문에 경쟁을 도입하는 것을 근간으로 하고 있다. 우리나라의 경우 '전력산업구조개편촉진법률'(2000), '전기사업법'(2001)이 발효되어 전력거래소가 설립되었고, 2000년 4월에 6 개의 한전 발전 자회사로 분할되었으며 2009년까지 배전 및 판매부분도 여러 개의 회사로 분할하여 경쟁을 도입하고 송전망도 민간기업이 이용할 수 있도록 적절하게 개방한다는 원칙을 세워놓고 있다. 따라서 공정한 경쟁시장 구축을 위한 여건 조성이 우선되어야 하며, 이를 위해 시장지배력 행사 등의 다양한 형태의 불공정 행위의 여지를 최소화하기 위한 종합적이고 포괄적인 노력이 필요하다. 일반상품은 독점금지법과 같은 법률적 규제에 의해 그 조건을 충족시킬 수 있지만 전력시장은 다음의 특성 때문에 시장 감시가 강조된 특별한 운영 시스템이 필요하다.

첫째, 전력산업은 독점적 구조에서 경쟁시장으로 개편되는 과정 중에 있음.

둘째, 전기의 고유의 특징은(송전망의 제약성, 수요 및 공급의 실시간 일치) 시장 지배력 행사의 기회를 제공해줄 수 있다.

셋째, 전력은 활동을 유지하는 필수적인 제하임.

넷째, 전력산업은 발전소 건설에 막대한 비용과 장기간의 시간이 필요하기 때문에 시장진입 다른 산업에 비해 용이하지 않음.

물론, 수직적 독점을 해체하여, 분할하는 것이 적절한 경쟁을 도입한다는 것을 의미하지 않는다. 오히려 잘못된 시장구조와 규칙은 상황을 이전 독점구조에서 보다 더 안 좋은 결과를 초래할 수 있다. 그러나 잘 짜여진 시작규칙과 정부의 적절한 인센티브 및 규제가 보조를 맞춘다면 구조개편의 결과를 성공적일 수 있다. 중요한 것은 시장규칙의 내용이며 민간기업의 이윤극대화동기와 담합을 제어할 수 있는 정부의 경쟁정책의 효율성이다. 구조 개편은 일회적인 사건(event)이 아니라 하나의 지속적인 과정(process)이며 결국은 변화하고 있는 환경에 맞도록 규칙과 제도를 만들고 지속적으로 고쳐나가는 것이다. 따라서 올바른 시장 규칙 설정을 위한 기준을 만드는 것은 매우 중요한 일이라고 볼 수 있다.

2. 본 론

2.1 Background

새로운 전력 시장 구조로부터 파생되는 주요 관심사들을 표현하기 위해서는 새로운 분석적 접근이 필요하다. 전력시장 운영에 있어 주요 관심사는 시장참여자들의 시장 지배력 행사 가능성을 감시하고 억제하는

것이다. 시장지배력을 측정하기 위한 많은 연구가 그 동안 있어왔다. 예를 들어 허핀달-허시먼 지수 (HHI)는 시장 집중도를 측정하는 지표이다. 그러나 전력 시장에서의 잠재적인 시장 지배력을 평가하는 데는 유용하지 못한 것 알려져 있다.

다른 지표로는 러니 인덱스(Lerner Index)와 주요 공급자 지표(Pivotal supplier index)등이 시장 지배력을 측정하기 위해 사용된다. 그러나 이 지표들은 전력시스템에서 송전제약을 고려되었을 때의 상황을 충분히 반영하지 못한다.

게임이론에서의 시장지배력을 측정하는 전통적인 방법으로써는 쿠르노 (Cournot), 공급 균형 함수 (supply function equilibrium), 다단계 입찰 모형 (multiple-unit auction)등이 있다. 이 모델들은 이론적인 균형점을 결정하는 데 유용하게 쓰일 수 있다.

그러나, 이 모델들은 시장개방화로 인해 더욱 복잡해진 전력시장의 특성을 제대로 반영하지 못하고 있다. 쿠르노 모형은 그 자체로 입찰가격 형성의 한 유형을 제시하고 있는데 불과하며, 이 모형에서 구해진 입찰 균형가격이 그대로 도매전력 시장의 시장청산가격이 되는 것은 아니다. 시장 청산가격의 예상을 위해서는 쿠르노 모형이 이외에 계통운영 및 설비확장을 포함하는 모형이 필요하다.

그 이유는 기본적으로 쿠르노 모형이 실제 급전을 위해 고려되는 여러 요소를 고려하고 있지 않고 있기 때문이다. 즉 송전 제약 및 계통 안정성 등 물리적인 제약과 기술적 제약, 시간대별 수요의 변동, 연료계약, 환경계약 등이 고려되지 않고 있다. 공급 균형 함수의 모델의 가장 큰 장점은 현실의 한 측면 즉(가격,수량)의 조합인 실제 입찰을 가장 가깝게 묘사할 수 있다는 점이다. 그리고 사용된 비용함수가 연속적이고 미분 가능한 형태로서 수학적인 유도가 용이하다는 점이 있다. 한편 이 모형을 실제 자료에 적용하기 위해서는 추가적인 가정을 도입하여 모형을 단순화시켜야 한다. 한 발전회사의 한계 비용곡선은 계단함수의 형태가 일반적이므로 이를 우-상향하는 연속선으로 근사하는 것은 너무 오차를 크게 하므로 비현실적이라는 점이다. 또한 수요곡선이 탄력적인 것으로 그려지고 있으나 실제 풀-시장(Pool-Market)에서 수요 측 입찰은 의미가 없고 어느 시점에 수직선으로 예측 값이 주어지는 형태인 경우 다른 분석이 필요하게 된다. 결국 수학적으로 정교해지고 어려워지는 대신 여러 제도적인 요인을 고려하기가 어렵고 균형입찰의 범위를 유도하는 것 이외의 풍부한 합의를 얻기가 어렵다.

다단계 입찰 모형(multiple-unit auction)의 장점은 입찰이론으로 정교한 논의들을 전력시장에 적용해 볼 수 있다는 것이다. 즉 전력시장에서 기업들의 행위에 대한 예측을 가능하게 하는 여러 가지 실험들을 할 수 있다는 장점이 있다. 위에서 본대로 여러 가정 하에서 구축된 모델 속에서 mark up의 크기를 계산할 수도 있고, 기업의 수가 입찰액에 미치는 효과도 계산할 수 있으며 시장 제도적인 측면에서 입찰빈도수와 입찰액 크기의 상관관계에 대한 시뮬레이션을 행할 수도 있다. 또한 공급 함수 균형 모델에서 연속적인 비용함수를 가정한 것과는 달리 한 발전회사에 속한 각 발전기들의 한계비용을 이산적인 형태로 상정하고 논의를 전개할 수 있다. 이 모형은 여러 가지 이론적 실험을 가능하게 해주지만, 전력도매시장에서 실제 가격을 예측하는 모형으로서의 활용되기 어려운 단점이 있다. 이 이론자체가 많은 여러 가지 가정 하에서 구축된 것이기 때문에 행위에 대한 예측을 넘어서 정확한 입찰 균형가격의 예측모형으로 활용될 수 없다.

에이전트 기반 모델은 전통적인 경쟁적 혹은 게임이론적 균형점에서 다루지 못하는 범위까지 모의실험 할 수 있다. 게다가 에이전트 기반 모델의 패러다임은 모의실험기간 동안 각 에이전트들이 전략을 학습하여 수정할 있게 한다. 에이전트 기반 모델의 중요한 장점은 전력시장 및 시스템의 상황을 고려할 수 있게 한다는 것이다. 전력시장은 시장 참여자의 전략에 영향을 미칠 수 있는 매우 복잡한 규칙과 규제에 이루어져 있기 때문에 위의 사실은 중요하다.

2.2 에이전트 기반 모델을 활용한 발전사업자의 전략적 행동 분석

전력시장에서 발전사업자의 입찰 전략은 대체로 시장 지배력과 관련이 많은 것으로 논의되어왔다. 에이전트 기반 모델링 기반 프로그램인 EMCAS는 이용자가 하나의 시스템에서 서로 다른 발전기별 다른 입찰 전략을 수행할 수 있게 한다. 전략은 정적일 수도 동적일 수도 있다. 그것은 발전 회사와 발전기의 유형에 따라 바뀔 수 있기 때문이다. 예제에서 우리는 화력 발전기만을 전력시스템에 포함시켰다. 발전회사는 하루에 1회씩 입찰한다. (예를 들면, 우리는 실시간에 제입찰은 없다고 가정하였다.) EMCAS에서 사용자가 선택할 수 있는 입찰 전략은 다음과 같다.

생산 비용 입찰(Production cost bidding)

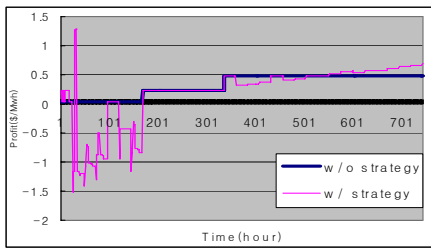
생산 비용 전략 하에서, 발전사업자들은 시장에서 순수한 가격 수용자로서 묘사된다. 이 전략 하에서 발전사업자는 열효율(heat rate) 곡선에 의해 표현되는 각 발전기의 한계생산 비용에 따라 입찰한다. 그리고 만약 발전 사업자가 한계 생산 비용에 따라 입찰하고 있다면, 그리고 만약 그 입찰이 시장에서 승인을 받는다면, 이 경우엔 가격이 총 생산 비용을 감당하지 못할 것이다. 왜냐하면 한계 생산 비용은 화력발전소의 평균 생산 비용보다 낮기 때문이다.

시스템 예비력에 기반한 물리적 용량철회(Physical withholding based on system reserve)

이 전략 하에서, 발전사업자는 예상되는 시스템의 예비력이 낮을 때 용량 철회를 통해 시장 가격을 증가시키기 위해 노력한다. 발전 사업자는 수요예측에 근거하여 다음 날의 시스템 예비력을 예측한다. 만약 예상되는 시스템 예비력이 특정 임계점 이하로 낮아지게 된다면, 발전사업자는 시스템 예비력을 감소시키기 위해 노력할 것이다. 그러나 발전사업자가 얼마만큼의 용량을 철회시키려 하는가에 따라 한계가 정해진다.

경제적 용량철회-고정된 증분 가격 탐색(Economic withholding - fixed increment price probing)

이 전략 하에서는, 발전사업자는 이전의 배전의 결과에 근거하여 입찰 전략을 바꿈으로써 시장 가격의 영향을 주는 정도를 탐색한다. 만약 어떤 특정 시간이 입찰이 받아들여진다면, 발전 사업자는 특정비율로 입찰 가격을 증가시킨다. 이러한 방법에 의해, 발전사업자는 시장가격을 그 시간동안 증가시키기를 희망한다. 반대로, 만약 입찰이 받아들여지지 않는다면, 발전사업자는 그 가격을 같은 비율로 내리고, 다음 입찰 기간에는 입찰이 되어지기를 희망한다. 입찰가격이 비현실적으로 너무 낮게 내려가지 않게 하기 위해 하한선을 EMCAS에서는 설정할 수 있게 하였다.



<그림 2.1> 에이전트 기반 모델 시뮬레이션 결과

2.3 전력시장 지표

에이전트 기반 시뮬레이션을 이용하여, 전략적 행동이 없을 때 가격 값과 전략적 행동을 취하였을 때, 그 값을 비교해보면, 발전 사업자들의 전략적 용량보류로 인해 가격이 상승하였음을 확인할 수 있다. 그러면, 우리는 전략적 입찰 행동으로 인한 후생손실을(welfare-loss)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$SW^{loss} = SW^{base} - SW^{w/s} \quad \text{식 2.1}$$

$$= \sum_k (\sum_i (P_i^{w/s}[k] - P_i^{base}[k]) \times q_i[k]) \quad \text{식 2.2}$$

$$\text{subject to } q_i = q_{di} - q_{gi}$$

SW^{loss} : 사회적 후생 손실

SW^{base} : 전략적 행동이 없을 때 사회적 후생

$SW^{w/s}$: 전략적 행동이 있을 때 사회적 후생

$P_i^{w/s}[k]$: 전략적 행동이 있을 때 i-발전기의 시간 k에서의 입찰 가격

$P_i^{base}[k]$: 전략적 행동이 없을 때 i-발전기의 시간 k에서의 입찰 가격

$q_i[k]$: 시간 k에서의 i-발전기의 생산량

시장운영지표

시장운영지표는 혼잡을 고려한 Lerner index를 다음과 같이 제시할 수 있다

$$MLI = \frac{\sum_k (\sum_i (P_i^{w/s}[k] - P_i^{base}[k]) \times q_i[k])}{\sum_i (q_i[k])} \quad \text{식2.3. [4]}$$

시장수급지표

시장수급지표를 EMCAS에서 나온 결과 값을 다음 식에 적용시켜 정의 내릴 수 있다.

$$FC_{g_{i_0}} \leq 5 \times \Pi_{g_{i_0}} = \sum_k (P^{w/s}[k] \times q_{g_i}[k] - TC[q_{g_i}[k]]) \quad \text{-식2.4.}$$

$$\Pi_{g_{i_0}} = \sum_k P^{w/s}[k] - MC \times (q_{g_i}[k] - TC[q_{g_i}[k]]) \quad \text{-식2.5}$$

FC_{g_i} : 투자시의 고정비용

$\Pi_{g_{i_0}}$: 발전기 i의 수익

$TC[q_{g_i}[k]]$: 생산량 q의 총 비용

시장예측지표

EMCAS를 통해 계산된 가격들을 한계 가격과 비교하여서 다음과 같이 시장예측지표를 정의할 수 있다.

$$(\#_of_times_when_{P^{w/s} = P^{cap}}) - (\#_of_times_when_{P^{base} = P^{cap}}) \quad \text{-식2.6.}$$

$(\#_of_times_when_{P^{w/s} = P^{cap}})$: 전략이 있을 때 시장가격과 가격상한선이 일치하는 빈도수

$(\#_of_times_when_{P^{base} = P^{cap}})$: 전략이 없을 때 시장가격과 가격상한선이 일치하는 빈도수

3. 결론

본 논문에 우리는 에이전트 기반 모델을 활용하여서, 게임 이론적 접근법의 한계를 극복할 수 있는 대안으로써 에이전트 기반 모델링을 활용하였다. 전력시장의 행위(conduct)와 성과를 적절히 분석하기 위해서는 전력시장의 물리적 환경특성인 설비 및 송전계약과 시장 참여자들의 복잡한 전략행동들을 이해하고 있어야 한다. 또한 시장참여자의 일간으로 반복되는 입찰행동의 경험과 그 결과인 균형가격으로, 시장 참여자는 다른 참여자들의 전략을 이해하게 되고 스스로의 최선의 전략을 개발할 것이다. 실제 시장에서 복잡한 거래를 반영한 에이전트 기반 모델을 활용한 시장지표들을 올바른 전력시장 구축을 위해 의미 있게 활용될 수 있을 것이다.

[참고 문헌]

- [1] BalDick, R., and W.Hogan " Capacity Constrained Supply Function Equilibrium Models for Electricity Market: Stability, Non-Decreasing Constraints , and Function Space Iterations," UCEI POWER Working Paper, PWP-089, 2002
- [2] Abel, Andrew B., "Optimal Investment Under Uncertainty," American Economic review 73(March), 228-233, 1983
- [3] Wood, A., and B. Wollenberg, "Power generation, operation, and Control" NY, John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- [4] IN-KOO CHO AND HYUNSOOK KIM, "MARKET POWER AND NETWORK CONSTRAINT IN A DEREGULATED", 2002

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제이며 관계 기관에 감사드립니다.