

## 프로슈머 간 전력 거래를 위한 매칭 알고리즘 및 VCG 기반 경매에 대한 조사

이정화, Arooj Masood, 오준석, 조성래

중앙대학교 컴퓨터공학과

{jeonghwa, arooj, jsch}@uclab.re.kr, srcho@cau.ac.kr

## A Study on the Matching Algorithm and VCG-based Auction for Power Transaction Between Prosumer

Jeonghwa Lee, Arooj Masood, Junsuk Oh, Sungrae Cho

Department of Computer Science and Engineering, Chung-Ang Univ

## 요약

본 논문은 신기후체제에 대응하기 위한 4대 분야 에너지 신산업 중 하나인 에너지 프로슈머(E-Prosumer)의 등장과 더불어 개인 간 전력 거래의 필요성이 증가함에 따라 프로슈머 간 전력 거래에 이용될 수 있는 매칭 알고리즘 및 Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 방식의 경매에 대해 조사하였다. Vickrey-Clarke-Groves (VCG) Auction은 진실성이 보장되어 시장조작을 방지할 수 있으며 Hungarian Algorithm은 작업 매칭 문제에 자주 이용되는 검증된 알고리즘이다. 이 방안은 적절한 구매자, 판매자 매칭을 보장하여 공정한 거래 이행 및 신재생에너지 거래시장 증대에 기여할 수 있다.

## I. 서론

국내의 에너지 산업은 석탄, LNG, 원자력 등의 중앙 집중형 공급방식으로 고착화되어있다. 그러나 전 세계적으로 온실가스 감축의 중요성이 증가함에 따라 온실가스 감축을 위해 탄소 배출이 높은 에너지 분야에서 친환경 연료전환, 분산형 발전, 에너지 효율화가 필요하게 되었고 에너지 신산업이 주목받게 되었다. 국내에서는 신(新)기후체제에 대응하기 위한 ‘2030 에너지 신산업 확산전략’으로 에너지 프로슈머(E-Prosumer)가 발표되었다. 에너지 프로슈머는 생산자(Producer)와 소비자(Consumer)가 결합된 개념으로 생산한 신재생에너지를 직접 사용하고 남은 전력을 소비 시장에 판매 하여 이익을 창출할 수 있다. 즉 태양광, 풍력 등 신재생 에너지 생산 기술의 발전 및 보급 확대에 의해 소비자들이 전력 소비 외에 전력을 생산할 수 있게 되었다.[1] 에너지 프로슈머의 증가 및 국내의 ‘2030년 신산업 정책방향’에서 에너지 프로슈머 전력 시장(분산자원 중개 시장) 개설 및 다양한 유형의 에너지 프로슈머 사업을 국내 전역으로 확대하여 총 발전량의 12.8% 규모까지 상향시키는 목표를 설정함에 따라 프로슈머 간 전력 거래 기술 및 구매자와 판매자 적절한 매칭의 중요성이 증가하였다.[2] 따라서 프로슈머 간 전력 거래에서 판매자와 구매자 매칭과 경매 방식 도입이 주목받게 되었다. 본 논문에서는 헝가리안 알고리즘을 통한 매칭 과정 및 Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 방식의 경매에 대해 조사하였다.

## II. 본론

최근 분산자원의 보급률이 증가하고 있으며, 이러한 분산자원을 통해 생산한 전력을 소비하고 남은 잉여 전력량 역시 매년 늘어나고 있다. 따라서 소비자들 간 개인 거래를 할 수 있는 P2P 전력시장에 대한 많은 연구가 필요하게 되었다.[3] 국내에서도 효율적으로 잉여전력을 운용하기 위해서 ‘2030년 신산업 정책방향’에서 에너지 프로슈머 전력 시장(분산자원 중개 시장) 개설 및 다양한 유형의 에너지 프로슈머 사업을 국내 전역으로 확대

하여 총 발전량의 12.8% 규모까지 상향시키는 목표를 설정하였고 P2P 전력시장 연구들이 진행되고 있다. 해외에서는 Pico, Vandebron 등의 플랫폼을 통해서 프로슈머와 소비자 간 거래가 이루어지고 있다[4]. 본 논문에서는 P2P 전력 거래에서의 판매자와 구매자 매칭 알고리즘과 VCG 방식 경매 두 가지를 설명하고자 한다.

## ○ Hungarian 매칭 알고리즘

할당 문제는 수송 문제의 특별한 경우로 다수의 공급처와 수요처가 있을 때 각각의 공급량과 요구량이 모두 1인 경우이다. 하나의 공급처는 비용을 최소로 하는 하나의 수요처만을 선택하여야 하고 하나의 수요처는 반드시 하나의 공급처를 선택해야만 한다.[5] 이는 작업자와 작업을 할당하는 경우, 기계에 일을 부여하는 경우 등에 일반적으로 적용한다. 전력거래에서는 이를 각각의 전력공급자(프로슈머)를 전력수요자(소비자)에 할당하는 것으로 적용할 수 있다. 이러한 할당 과정에 있어서 할당 비용을 최소로 하는 해를 구하는 것이 할당문제이며 이를 정형적으로 표현하는 수식은 다음과 같다.

Cij: i번째 작업자를 j번째 작업에 할당하는데 드는 비용

Xij: i번째 작업자가 j번째 작업에 할당되면 1, 할당되지 않으면 0

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij}$$

$$\text{s.t.}) \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, m$$

$$x_{ij} = 0 \text{ or } 1 \quad \forall i, j$$

Hungarian Algorithm은 이러한 할당문제의 해결책으로 Harold Kuhn이 제안한 알고리즘으로 작업 매칭 문제 해결에 자주 이용되는 방법이다.

Hungarian Algorithm 수행과정은 다음과 같다.

1단계 : 비용행렬에서 최솟값을 감산하여 각 행과 열에 0의 값을 갖는 성

본이 최소 하나 이상 있도록 한다.

2단계 : 최소의 선으로 0 값을 가진 행과 열을 지운다.

3단계 : 선에 포함되지 않은 감소된 비용행렬에서 최소비용을 찾은 후 1단계의 과정을 다시 반복한다.

4단계 : 행과 열에서 0이 중첩되지 않게 1개씩 선택한 후 비용을 모두 더하여 최적해를 얻는다.

Hungarian Algorithm은 균형 할당 문제에서 항상 최적해를 찾을 수 있으며 알고리즘 수행 복잡도는  $O(n^3)$ 이다. 본 알고리즘은 하나의 공급처는 비용을 최소로 하는 하나의 수요처만을 선택하여야 하고 하나의 수요처는 반드시 하나의 공급처를 선택해야만 하는 일대일 매칭을 기준으로 하지만 이 알고리즘을 통해 1차 할당된 값을 업데이트한 후 할당되지 못한 소비자 및 판매자의 잉여전력을 고려하여 대해 알고리즘을 재 실행하여 다시 전력 거래를 이행함으로써 한 프로슈머에 대한 다수 매칭에도 적용이 가능하다.

○ Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 방식 경매

전력 거래를 위한 매칭을 위해 경매를 진행하는 방법도 널리 쓰인다. 보통의 경매는 구매권 획득이 목적이기에, 입찰자는 곧 구매자가 된다. 반대로 판매권을 얻기 위한 경매를 역경매라고 하며, 더 낮은 가격에 입찰한 참여자가 낙찰되어 구매자에게 서비스, 물품 등을 더 낮은 가격에 제공해 줄 수 있는 판매자가 낙찰되는 방식이다. 즉, 구매자의 수요 요청이 먼저 제시되고 그 이후 입찰이 시작된다면 이는 역경매로 진행된다.[6] 프로슈머 간 전력 거래 경매에서의 진행 과정은 다음과 같다. 참여자는 전력 수요가 필요한 구매자와 잉여 전력을 판매하는 판매자, 중개시스템으로 구분되며 역경매 방식으로 진행되기에 구매자가 먼저 수요 요청을 한 후 판매자의 경매 입찰이 시작된다. 즉, 구매자의 수요 벡터를 발표 후 판매자는 입찰 벡터를 제공하는 방식으로 판매자, 구매자 매칭 및 거래가 진행된다.[3] 이러한 경매 방식 중 Vickrey-Clarke-Groves (VCG) Auction은 차가불인경매라고도 불리며 경매 참여자들 간 입찰 가격을 공유할 수 없으며 지불 가격을 자신이 입찰한 가격이 아닌 두 번째로 높은 입찰액을 지불하는 경매 방식이다. [7] 이 VCG 방식이 주목을 받는 이유는 진실성 (Truthfulness)이 보장되기 때문이다. 진실성 보장을 통해 모든 입찰자가 경매에서 자신이 판단한 가치를 조작하지 않고 경매 대상에 대한 자신의 가치평가액과 일치하는 입찰가를 제출하는 것이 약우월전략이다.[8] 즉, 다른 입찰 참여자의 가치를 아는 것과 상관없이 자신이 생각한 가치대로 조작없이 입찰하는 것이 VCG 경매에서의 약우월전략으로 최소한 손해를 보지않는 방법이다. 경매를 통해 효율적으로 자원을 배분하기 위해서는 경매 대상에 대해 가장 높게 평가하는 입찰자에게 자원이 배분되어야 한다. 그러나 각 입찰자가 측정한 가치가 사적 정보이고 이를 조작할 가능성이 있을 경우에는 효율적 배분이 쉽지 않다. 하지만 VCG 경매에서는 각 입찰자로 하여금 가치를 그대로 공개하게 하는 특성이 있기에 입찰자의 가치가 공개된 상태에서처럼 효율적인 배분이 이루어지게 할 수 있다. 따라서 VCG 경매는 판매자, 구매자로 양측으로 하여금 합리적으로 전력을 거래할 수 있게 해주며 경매에서 발생할 수있는 시장조작을 예방할 수 있기에 궁극적인 목표인 에너지 프로슈머 간 거래사업 증대에 기여할 수 있을 것이다. 스마트 그리드의 지속적 발전과 더불어 경제적인 효율성을 극대화 시킬 수 있는 시장 프레임워크는 필수적이며, 이에 따라 P2P 매칭 알고리즘 및 VCG Auction은 향후 전력거래시장에서 중요성이 더욱 증가할 것이다.

### III. 결론

본 논문에서는 프로슈머 간 전력 거래에서 이용될 수 있는 매칭 방법인

Hungarian Algorithm과 Vickrey-Clarke-Groves(VCG) 방식 경매의 특징에 대해 알아보았다. 이러한 방법은 거래 시 판매자와 구매자 간의 적절한 매칭을 보장하고 경매에서의 시장조작을 방지할 수 있다. 이는 공정한 거래 이행 및 신재생에너지 거래시장의 성장에 기여할 수 있을 것이다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국전력공사의 2020년 선정 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호 : R20X002-15).

### 참 고 문 헌

- [1] 김천석, 강현준, 이준태, 에너지 신산업 기술동향 및 전력분야 비즈니스 모델 연구. 한국전자통신학회 논문지, 11(8), 773-782, 2016.
- [2] Olamide Jogunola, Augustine Ikpehai, Kelvin Anoh, Bamidele Adebisi, Mohammad Hammoudeh, Sung-Yong Son, Georgina Harris, State-Of-The-Art and Prospects for Peer-To-Peer Transaction-Based Energy System, Energies, October, 201
- [3] Chao Long, and et al "Peer-to-peer energy trading in a community microgrid", Power & Energy Society General Meeting, pp1-5, 201
- [4] 박찬국, 김양수, "우리나라 P2P 전력거래 가능성" 연구.에너지경제연구원 수시연구보고서, pp8-14, 2016
- [5] 이상운, 할당 문제의 최적 알고리즘, 한국컴퓨터정보학회논문지, 17(9), 139-147. 2012
- [6] M. Liwang, S. Dai, Z. Gao, Y. Tang and H. Dai, "A Truthful Reverse-Auction Mechanism for Computation Offloading in Cloud-Enabled Vehicular Network," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 3, pp. 4214-4227, June 2019.
- [7] Q. Wu, M. Zhou, Q. Zhu and Y. Xia, "VCG Auction-Based Dynamic Pricing for Multigranularity Service Composition," in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 15, no. 2, pp. 796-805, April 2018.