

# 다양한 종류의 참여자 수용을 위한 P2P 시장 플랫폼 모델 개발

최윤정, Nadya Noorfatima, 정재성\*

아주대학교, \*아주대학교

athran23@ajou.ac.kr, nadyanrf@ajou.ac.kr, \*jjung@ajou.ac.kr

## The development of P2P market platform to accommodate various types of participants

Choi Yun Jung, Nadya Noorfatima, Jeong Jae Sung\*

Ajou Univ., \*Ajou Univ.

### 요약

본 논문은 P2P 시장 플랫폼 개발을 위한 참여자의 수용성 증대를 위한 입찰 방식 재설계 연구를 수행하였다. 또한 계통 안정성을 간접적으로 확보하는 방안으로써 계통의 혼잡 구간에 NUC(Network Usage Cost)를 높이 부과하여 P2P 거래를 제한하는 방식을 채택하고, 기존의 입찰 방식의 장단점을 수용한 혼합된 가격 결정 및 매칭 알고리즘을 제안하였다.

### I. 서론

본 논문에서는 참여자의 수용성 증대를 위한 P2P 시장 플랫폼 모델에 대해 연구하였다. 이를 위해 기존의 입찰 메커니즘(단일가격, 차별가격)을 검토하고 적절하게 혼합하여 상호 장단점을 보완할 수 있는 방안을 제안하였다. 단일가격 메커니즘에서는 가우스 혼합 모델(Gaussian Mixture Model)을 이용한 클러스터링과 Stackelberg 게임이론을 적용한 가격 산정을 수행하였으며, 차별가격 메커니즘을 적용, ADMM(Alternating Direction Method of Multipliers)을 이용하여 각 참여자들의 수익 최적화 문제를 해결하였다. 또한 P2P 거래가 기존 계통의 혼잡을 유발하지 않도록 하기 위해 혼잡 구간에 NUC를 높이 부과하여 P2P 거래를 제한하는 방식[1]을 채택하였다. 이후, 제안된 모델을 적용한 시뮬레이션을 수행하였다.

### II. 본론

#### 1. 2stage P2P 시장 플랫폼 모델

본 논문에서는 P2P 참여자들이 전문지식 부족으로 인한 참여 기피, 수익성 저조로 인한 부정적 인식을 개선하기 위해, 시장 운영자가 참여자의 발전/부하 예측부터 입찰, 매칭, 거래를 수행하는 시장 플랫폼 모델을 제안한다. 또한, 단일가격 메커니즘과 차별가격 메커니즘을 혼합하여 다양한 참여자가 안정성 있는 거래를 할 수 있는 시장 환경을 조성하였다. 본 논문에서 제안하는 2stage P2P 시장 플랫폼은 아래의 그림1과 같다.

##### 1.1. 1<sup>st</sup> stage : Uniform Pricing

본 절에서는 판매자 클러스터와 구매자 클러스터의 입찰 정보를 토대로 Stackelberg 게임 이론을 적용한 단일가격을 산정하였다. 본 연구에서는 판매자가 먼저 시장에 판매할 수 있는 판매 가능 용량을 제시함으로써 시작된다. 판매 가격은 클러스터 내부 판매자들에게 정보가 업데이트 되고 판매 가격과 용량이 동일해지면 이 정보를 구매자에게 전달하게 된다. 이때 판매자가 판매 가격과 용량을 결정하기 위한 전략을 수립하게 된다. 판매자와 구매자 전략을 토대로 Stackelberg 게임 이론을 적용하여 에너지 거래 모델을 구성하면 아래와 같은 목적함수로 표현될 수 있다.

$$OF : f(P_m^t, P_n^t) := \max P_{i,j}^t \cdot \lambda_{i,j}^t - \left( \sum_{m \in i} P_m^t \cdot \lambda_m^t + \sum_{n \in j} P_n^t \cdot \lambda_n^t \right)$$

여기서  $\lambda_m^t$ ,  $\lambda_n^t$ 은 각각 판매자와 구매자의 거래 희망 가격으로 NUC가 포함되어 있는 가격이다. 이때 제약조건은 판매자와 구매자가 자신의 판매 능력 또는 구매 능력 이상으로 거래를 할 수 없도록 하였다.

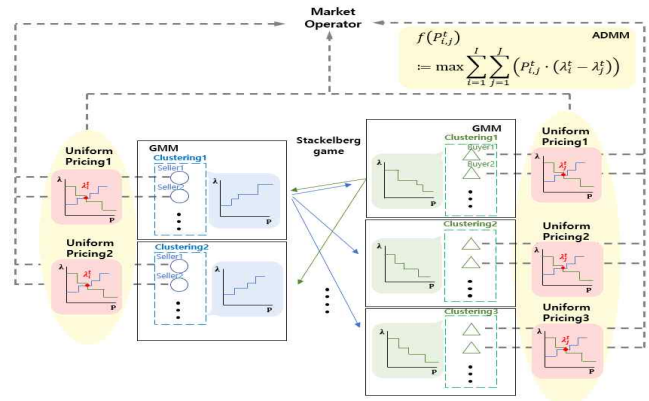


그림 1 2stage P2P 시장 플랫폼 개요도

##### 1.2. 2<sup>nd</sup> stage : Discriminatory Pricing

차별가격 메커니즘에서는 클러스터의 단일가격 간의 차와 거래 용량의 곱이 최대화가 되게 하는 전역 목적함수를 최적화함으로써 참여자의 수익 최대화를 극대화하도록 계산한다. 이때, 전역 목적함수는 복합적인 형태를 지닐 수 있게 되므로 문제를 해결하지 못하거나 계산시간이 오래 걸릴 수 있다. 이에 본 논문에서는 이중변수를 업데이트하는 ADMM 최적화 알고리즘을 적용하여 차별가격 메커니즘을 수행하였다. 본 논문에서 계산한 ADMM 최적화 알고리즘의 전역 목적함수는 아래의 수식으로 나타낼 수 있다.

$$OF : f(P_{i,j}^t) := \max \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (P_{i,j}^t \cdot (\lambda_i^t - \lambda_j^t)) \right\}$$

여기서  $P_{i,j}^t$ 는 클러스터  $i, j$  간의 거래 용량을 의미하고,  $\lambda_i^t$ ,  $\lambda_j^t$ 는 각 클러스터의 단일가격을 의미한다.

ADMM 최적화 알고리즘은 위의 목적함수를 계산하기 위해 이중변수의 개념을 가진 증강된 라그랑지안(augmented Lagrangian) 방법을 적용하여 최적화 프로세스의 수렴을 가속화한다[2]. 본 논문에서 이중변수는  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$ 로 나타내었으며  $y$ ,  $z$ 는 제약조건을 가진 목적함수를 증강된 라그랑지안 방법으로 확장시켜 정의한 함수이다. 또한,  $\phi$ 는  $y$ 와  $z$ 에 대한 이중잔차를 평가하기 위한 이중변수 업데이트식으로 정의되며  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  업데이트 공식은 아래와 같이 수식화된다.

$$y^{k+1} \in \operatorname{argmin} \left\{ f(y) + g(z^k) + \langle \phi^k, y - z^k \rangle + \frac{1}{2} \|y^{k+1} - z\|^2 \right\}$$

$$z^{k+1} \in \operatorname{argmin} \left\{ f(y^{k+1}) + g(z) + \langle \phi^k, y^{k+1} - z \rangle + \frac{1}{2} \|y^{k+1} - z\|^2 \right\}$$

$$\phi^{k+1} = \phi^k + (y^{k+1} - z^{k+1})$$

여기서  $k$ 는 ADMM의 반복횟수를 의미하며,  $f(y) \triangleq f(P_{i,j}^t)$ 는 전역 최적화 함수를,  $g(z^k) \triangleq f(P_m^t, P_n^t)$ 는 단일가격 목적함수를 의미한다.

## 2. Kirschen Tracing을 적용한 2stage P2P 시뮬레이션

본 절에서는 시뮬레이션을 위해 IEEE 69bus를 채택하였으며 13명의 프로슈머와 30명의 단순 소비 고객을 상정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위해 사용된 데이터는 NREL의 PVWattCalculation과 전력 거래소 오픈 데이터를 사용하였다. 테스트 계통 내 참여자의 상세분포도는 아래의 표와 같다.

표 1 테스트 계통 내 참여자 상세분포

	구매자 : bus 위치	프로슈머 : bus 위치
주거용	#13-14 : bus 13-14, #16-17 : bus 16-17 #20-27 : bus 20-27	#52, #55 : bus 52, bus 55 #42-46 : bus 42-46 #67, #69 : bus 67, bus 69
	#28-33 : bus 28-33 #47-53 : bus 47-53 #66-69 : bus 66-69	#26 : bus 26 #35 : bus 35
	#54 : bus 54	#27, #64 : bus 27, bus 64

### 2.1. 시뮬레이션

[1]에서 Kirschen Tracing 방법이 적합하게 혼합 계통에서 높은 NUC를 부과하고 있음을 보였다. 이에 본 논문에서는 Kirschen Tracing을 적용한 2stage P2P 매칭 시뮬레이션을 진행, 국내의 주택 참여자의 요금제에 따라 각기 진행하였으며 거래 용량, 거래 가격, 참여자 수익을 계산하여 이를 비교하였다. 아래의 표는 주택용 참여자의 요금제별 2stage P2P 매칭 결과이다.

표 2 주택 요금제별 참여자 수익

#bus	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19
TOU	0	0	59,714	59,722	0	59,718	59,714	0	0
BRP	0	0	86,688	86,965	0	86,739	86,701	0	0
#20	#21	#22	#23	#24	#25	#26	#27	#28	#29
59,717	59,708	59,714	59,727	59,723	59,709	937	48,337	63,982	64,844
86,848	86,712	86,963	86,847	86,834	86,724	398	4,896	149,143	149,217
#30	#31	#32	#33	#34	#35	#36	#37	#38	#39
64,842	72,917	74,962	74,988	5,985	736	18,461	17,670	16,781	5,767
149,212	163,025	163,274	163,677	337	336	16,383	15,573	14,343	184
#40	#41	#42	#43	#44	#45	#46	#47	#48	#49
5,516	6,517	3	4	3	3	4	64,846	153,587	64,914
175	197	6,294	9,530	6,294	6,294	9,530	149,203	283,129	149,129

#50	#51	#52	#53	#54	#55	#56	#57	#58	#59
153,032	64,797	4	75,699	3,418	3	59,307	59,303	59,303	59,308
283,105	149,124	9,530	163,961	7,465	4,174	87,180	86,999	87,220	87,085
#60	#61	#62	#63	#64	#65	#66	#67	#68	#69
59,306	59,450	59,460	59,455	53,369	59,462	152,159	3	145,986	3
86,882	87,152	87,632	111,901	4,764	87,252	283,074	6,294	283,055	6,294

위의 표에서 주택용 단순 구매자는 TOU 요금제를 적용받는 것이 더 높은 수익을 보임을 알 수 있다. 반면, 주택용 프로슈머의 경우, 누진요금제를 적용받는 것이 더 높은 수익을 보이고 있다. 한편, 주택 고객이 누진요금제를 적용받을 경우, 산업 및 상업용 단순 구매자의 수익이 더 높게 책정되는 것으로 나타났으며, 프로슈머는 주택 고객이 TOU를 적용받을 경우, 더 높은 수익이 책정되는 것으로 나타났다. 그러나 전체 수익으로는 주택 참여자가 누진요금제를 적용받는 것이 훨씬 높은 수익률을 보이고 있는 것이 확인되었다. 아래의 표는, 한 달의 총 거래 용량, 평균 거래 가격, 참여자 총 수익을 나타낸 표이다.

표 3 NUC 산정방안별 매칭 용량

	TOU 적용	BRP 적용
Matching Amount	44,276	55,401
Mean Price	1,091	812
Total Benefits	2,606,315	4,487,925

## III. 결론

본 논문에서는 기존 전력 거래 입찰 방식을 혼합한 2stage P2P 시장 플랫폼 모델을 제안하였다. 또한 [1]에서 제안한 Kirschen Tracing 기법을 채택하여 NUC를 차등 부과함으로써 계통 혼합에 거래를 간접적으로 제한하게 하였다. 제안된 P2P 시장 모델은 Stackelberg 게임 이론 기반의 단일가격 메커니즘을 선행한 후, 이를 차별가격 메커니즘에 적용하여 참여자들의 수익 최대화를 위한 최적화 문제를 해결하였다.

다음으로, 제안된 모델을 바탕으로 IEEE 69bus에 대한 참여자 매칭 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 주택 참여자의 요금제별로 각각 수행하여 각 참여자에게 유리한 요금제 선택 및 시장 환경에 대해 알아보았다. 그결과, 주택용 단순 구매자의 경우, TOU 요금제를 선택하는 것이 유리하고, 주택용 프로슈머의 경우, 누진요금제를 선택하는 것이 유리한 것으로 나타났다. 또한, 산업용 및 상업용 단순 구매자는 주택용 참여자가 누진요금제를 채택할 때, 더 많은 수익을 얻을 수 있고, 산업용 및 상업용 프로슈머의 경우, TOU 요금제를 선택할 때, 수익적으로 유리한 것으로 조사되었다.

## ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20191210301820)

## 참 고 문 헌

- [1] Nadya Noorfatima, Yejin Yang, Jaesung Jung\*, and Jun-Sung Kim "Congestion Management by Allocating Network Use Cost for the Small-Scale DER Aggregator Market in South Korea", Energies, Vol. 14, pp. 1~18, Jun. 2021
- [2] D. H. Nguyen, "Optimal Solution Analysis and Decentralized Mechanisms for Peer-to-Peer Energy Markets," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, (2), pp. 1470-1481, 2021.