creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사학위논문

정보수집 투자를 고려한 신재생에너지 발전량 예측제도의 경매 설계

An auction mechanism of renewable energy prediction policy considering the investment in information acquisition

2023 년 2 월

서울대학교 대학원
산업공학과
강 규 헌

정보수집 투자를 고려한 신재생에너지 발전량 예측제도의 경매 설계

지도 교수 이덕주

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2023년 2월

서울대학교 대학원

산업공학과

강규헌

강규헌의 공학석사 학위논문을 인준함

2023년 2월

위 원 장 _____ 홍유석 _____ (인)

부위원장 _____ 이덕주 _____ (인)

위 원 _____ 장우진 _____ (인)

초 록

정부는 2030 국가 온실가스 감축 목표 선언과 함께 신재생에너지와 관련한 정책들을 수립하며 기술발전을 위한 여러 제도적 장치를 마련하였다. 그 중 “신재생에너지 발전량 예측제도”는 발전 전날에 발전사들로부터 예측 발전량을 제출 받고 실제 발전량과의 오차율을 기준으로 정산단가 적용하여 정산금을 지급한다. 이를 통해 해당 제도는 발전사들의 발전량에 대한 예측력을 제고하고자 하는 설립 취지가 있다. 하지만 고정적인 정산단가는 향후 발전 불확실실성과 시장가격을 고려하지 않았다. 또한 오차율을 제도 설립 의도와는 다른 방식으로 산정하여 발전사들은 예측력을 제고하지 않고 수익성만을 극대화하는 전략적인 발전을 할 가능성이 있다. 이에 본 연구는 현행 중인 “신재생에너지 발전량 예측제도”에서 발생할 수 있는 잠재적인 문제점들을 완화하고 발전사와 전력거래소 간의 효율적인 경매 메커니즘 재설계를 목표로 한다. 발전사들의 정보 수집을 위한 투자를 통한 예측력 제고로써 얻게 되는 효용을 설정하고 이를 예측력 제고라는 제도 수립 목적에 부합하게 메커니즘 모형을 설계하여 분석한다.

본 연구에서 제안하는 “신재생에너지 발전량 경매제도”는 기존의 제도와는 다르게 할당규칙과 정산규칙을 설계하여 기존보다 발전사들이 정보수집을 위한 투자를 제고할 수 있도록 하였다. 또한 제시하는 메커니즘을 통해 할당 효율성(allocation efficiency)와 인센티브 호환성(incentive compatibility)의 성질을 만족함을 보였다. 분석 결과, 제시하는 “신재생에너지 발전량 경매제도”는 기존보다 정보수집수준을 19.3%에서 38.52%로 증대하였고 정보수집을 위한 투자 수준은 약 2.6 배 증대하였다.

주요어: 신재생에너지, 정보수집, 메커니즘 디자인, 경매
학번: 2021-21328

목 차

초 록 iii

목 차 iv

그림 목차 v

표 목차 vi

제 1장 서 론 1

제 1 절 연구 배경 1

제 2 절 문제 정의 4

제 3 절 논문 구성 6

제 2장 선행 연구 고찰 7

제 3장 정보수집 투자를 고려한 예측제도 재설계 9

제 1 절 발전사의 정보수집을 고려한 의사결정 모형 9

제 2 절 정보수집 투자 유도를 위한 메커니즘 모형 설계 12

제 3 절 정보수집의 투자를 고려한 경매 제도 모형 18

제 4 장 사례 연구 20

제 1 절 분석 사례의 설정 20

제 2 절 분석 사례의 가정 22

제 3 절 분석 결과 26

제 5 장 결론 및 향후 연구 34

참고 문헌 36

그림 목차

그림 1. 신재생에너지 발전량 예측제도의 정산단가 산정 구조.. 2

그림 2. 신재생에너지 발전량 예측제도 프로세스..... 3

그림 3. 발전정보상태에 따른 사전확률분포 9

그림 4. 신재생에너지 발전량 경매 제도 프로세스..... 18

그림 5. 발전정보상태에 따른 효율 함수 22

그림 6. 정수수집 수준에 따른 사후확률(좌: $\alpha i = 0$, 우:$\alpha i = 1$) 23

그림 7. 발전정보상태에 따른 사후확률분포 25

그림 8. 예측력 제고를 위한 투자에 따른 오차율과 정산 기준 변화 27

그림 9. 참가자1의 투자수준에 따른 기대가치 변화..... 30

그림 10. 낙찰자의 투자수준에 다른 낙찰 발전용량 변화..... 31

그림 11. 비(非)낙찰자의 투자 수준에 낙찰 발전용량 변화..... 32

표 목차

표 1. 예측제도 정산금 기준 2

표 2. 오차율에 따른 예측제도 정산금 단가 3

표 3. 모형 공통 항목 내용 설정 20

표 4. 모형 별 차별 항목 내용 설정 21

표 5. 신재생에너지 발전량 예측제도의 분석 결과..... 26

표 6. 신재생에너지 발전량 예측제도의 최적 투자 전략..... 28

표 7. 신재생에너지 발전량 경매제도 분석 결과 29

표 8. 신재생에너지 발전량 경매제도의 최적 투자 전략..... 33

표 9. 신재생에너지 발전량 예측제도와 경매제도의 최적 투자 전략 비교 33

제 1장 서 론

제1절 연구 배경[①]

2015 년 파리협정 체결 이래, 온실가스배출 세계 7 위의 대한민국은 2030 년까지 전망치 대비 24.4%의 온실가스 감축을 목표로 하고 있으며 2050 년까지 탄소중립을 달성하겠다고 선언하였다. 이에 대한민국은 온실가스 배출 감축을 위한 여러가지 제도적 장치를 마련하였다. 정부는 신재생에너지 공급의무화 제도 (Renewable Portfolio Standard; RPS), 신재생에너지 공급인증서 (Renewable Energy Certificate; REC)발급과 탄소배출권 거래 제도 등을 도입하였다. 그 중 에너지 생산에서 친환경적 수단 활용을 적극 추진하여 신재생에너지를 통한 발전량은 모두 매입하여 재생에너지 전력 거래를 100% 보장하여 재생에너지 발전 확대를 권장하고 있다. 그러나 재생에너지발전은 기후변화에 영향을 많이 받아 발전량을 계획하기 때문에 불확실성이 따르며 다음 날의 전력수급 계획을 수립함에 있어서 불확실성이 존재한다. 이처럼 신재생에너지의 발전 불확실성을 원인으로 전력거래소에서는 전력수급불균형과 전력계통안정화의 문제가 발생하는 상황이다.

전력거래소는 신재생에너지 발전량의 변동성을 줄이고자 발전사들에게 예측 능력을 향상시킬 유인을 제공할 “신재생에너지 발전량 예측제도”를 도입하였다. 발전사는 다음 날의 발전량을 예측하여 제출하고 실제 발전량 대비 오차율을 산정한다. 산정된 오차율을 기준으로 정산금을 지급하여 재생에너지 발전에 대한 예측을 제고하고자 하는 의도이다.

발전 오차율이 6% 이내의 경우 kWh 당 4 원을, 8% 이내의 경우 kWh 당 3 원의 정산금을 지급한다. 이러한 정산금 구조는 계절별로 1 주일씩 총

① 소규모전력중개시장, 발전량예측제도 내용 참조(https://der.kmos.kr/intro/fr_intro_view10.do)

4 주의 모의평가를 통해 계산되었다. 다음 그림 1 과 같이 오차가 있는 경우와 없는 경우의 발전비용과 오차가 없는 경우의 발전비용의 차이를 통해 정산단가를 적용하였다.

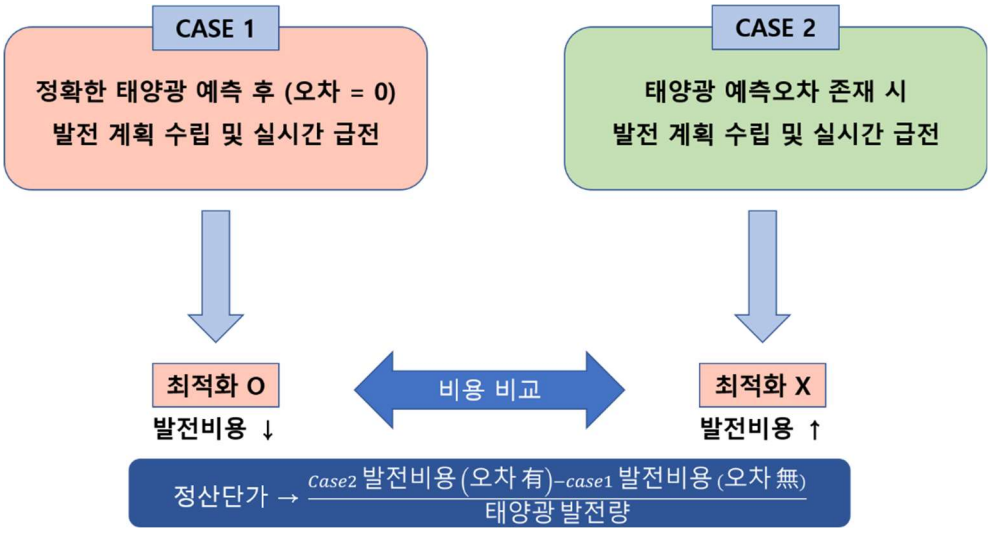

그림 1. 신재생에너지 발전량 예측제도의 정산단가 산정 구조

신재생에너지 발전량 예측제도의 정산금 단가 기준과 기준은 다음과 같다.

표 1. 예측제도 정산금 기준

수치	내용
오차율	$\frac{(\text{계량발전량} - \text{예측량})}{\text{설비용량}} \times 100$
이용률	$\frac{(\text{계량발전량} - \text{예측량})}{\text{설비용량}} \times 100$
오차율 평가	1 차 2 차 예측값의 산술 평균값을 적용
예측값 제출	1 차 제출 (10 시 이전), 2 차 제출 (17 시 이전)
정산금 산정	시간별 발전량×오차율에 따른 정산단가

표 2. 오차율에 따른 예측제도 정산금 단가

오차율	6% 이하	6%초과 ~ 8%이하
정산단가	4 원/Kwh	3 원/Kwh

표 1 과 같은 정산금 단가는 표 2 의 기준으로 발전량 예측 제도 정산금을 산정한다. 발전사는 각 시간대별로 2 회에 걸쳐 예측 발전량을 제출하고 오차율 평가에 반영되는 예측량은 두 차례의 산술 평균 값을 적용한다. 이 때, 계량 발전량은 발전사가 전력거래소에 송전하는 전력량으로서 실질 발전량과 에너지 저장장치(Energy Storage System; ESS)에서의 충방전을 포함한다.

이 제도에 참여하기 위한 조건과 등록시험이 존재한다. 참여 대상은 20MW 초과의 예측형 집합자원을 소유한 중개사업자와 20MW 초과의 주요자원 발전기를 소유한 개별사업자이다. 참여 대상은 1 개월 평균 예측 오차율이 10%이하의 조건으로 등록시험 통과해야 한다. 등록된 이후 자격기간 3 개월 동안 평균 예측 오차율이 10% 이하인 경우에는 다음 3 개월간 자격기간이 연장된다. 그렇지 않은 경우 다시 1 개월 간 자격시험을 통해 등록해야 한다. 연구의 대상이 되는 “신재생에너지 발전량 예측제도” 프로세스 모형은 다음 그림과 같다.

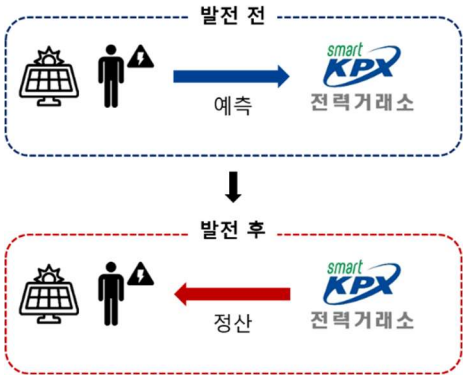

그림 2. 신재생에너지 발전량 예측제도 프로세스

제 2 절 문제 정의

“신재생에너지 발전량 예측제도”는 두가지의 잠재적인 문제점이 발생할 수 있다. 첫번째는 정산단가 산정의 문제이다. 정산단가를 결정하기 위한 계통운영비용 측면에서의 편익 분석은 1, 4, 7, 11월의 각 1주일 기간동안 진행되어 오차가 없는 경우와 오차가 존재하는 경우의 발전 비용의 차이를 반영하였다. 계통운영 비용절감의 편익을 고려한 현행의 정산금 단가는 짧은 모의평가에 의해 결정되었으므로 향후 전력시장에서의 계통한계가격(System Marginal price; SMP)의 변동성을 반영할 수 없다는 문제점이 있다. 또한 실시간 급전비용과 발전기 추가 기동 및 정지, 증감발에 의한 추가 비용을 반영할 수 없다. 이에 시장 현황 혹은 제도의 목적성을 반영한 정산단가 구조로의 개편이 필요한 상황으로 보인다.

두번째는 오차율 산정 기준에 대한 문제이다. 재생에너지 발전량 예측 제도에서 오차율을 산정하기 위한 계량 발전량은 실제 발전량과 ESS의 충전 및 방전 용량을 합한 최종 거래 용량으로 계산하고 있다. 이에 발전사는 ESS를 활용해 제도 참여 자격 유지를 위한 최소한의 최종 거래 오차율만을 만족하며 SMP가 높은 시기에 ESS방전을 통해 발전량을 송전할 수 있다. 이에 고정적인 정산단가 구조 내에서 안에서 발전사는 실제 발전량에 대한 오차율 개선보다 개인의 수익성을 위한 전략적인 발전량 입찰이 가능하다. 이는 제도의 설립 취지인 발전량에 대한 예측력을 제고할 수 없다는 문제점이 있다.

위와 같이 현행 제도는 실제 발전량이 아닌 시장과의 거래량에 초점을 두고 있다. 이에 신재생에너지의 실제 발전량 예측력 제고라는 본 제도의 목적을 달성하기 위해서는 정산금 지급 기준과 정산단가에 대한 개편이 필요하다. 본 논문은 발전량에 대한 예측을 위한 노력을 제고할 수 없다는 문제점을 경매제도로의 설계로 완화하고자 한다. 본 연구에서 제시한 경매제도는 제도적 후생을 기준으로 낙찰을 하며 발전사의 시스템 전체 효용

수준에 기여한 정도를 반영하여 정산금을 지급한다. 이로써 발생하는 추가적인 정산금 지출에 대해 기존의 제도와 비교 분석을 진행한다. 또한 정보수집을 고려한 발전사의 투자 수준과 기대효용의 변화를 비교 분석하여 발전사의 예측력을 위한 최적의 투자 수준을 유도하여 예측력을 제고하고자 한다

제 3 절 논문 구성

본 논문은 5장으로 구성된다. 제2장에서는 본 연구의 대상이 되는 “신재생에너지 발전량 예측제도”에 대한 선행 연구를 살펴보며, 제3장에서는 발전사의 정보수집을 위한 투자를 고려한 신재생에너지 발전량 조달 경매(Procurement Auction) 형태의 모형을 제시한다. 제 4장에서는 제도 참여자의 최적 전략을 도출하여 기대효용과 비용을 비교 분석하고 제 5장에서는 결론과 향후 제도연구의 방향성을 제시한다.

제 2장 선행 연구 고찰

신재생에너지 발전량 예측제도를 직접적으로 다룬 국내 연구에서는 발전사의 입장에서 제도를 활용한 수익 확대와 발전운영 기법 등을 다루었다. Jeong In et al. (2022)의 연구와 Choi et al. (2022)의 연구에서는 재생에너지 발전량 예측을 위한 기술 보유에 따른 정산금의 추가 수익을 분석하였다. 또한 Yu et al. (2022)의 연구에서는 재생 에너지 발전량을 예측하는 것이 아닌 발전사의 수익이 최대가 되도록 하는 ESS 운영을 결정하는 최적화 방법은 제시하였다. Kong et al. (2022)의 연구에서는 SMP의 가중치를 반영하고 예측 정확도가 높을수록 기존보다 높은 정산금을 지급할 수 있는 정산금 구조를 제시하였다. 또한 제시한 정산금 구조 하에서 발전사의 수익을 최대화할 수 있는 ESS 운영 알고리즘과 최적 용량을 제시하였다. 이처럼 "신재생에너지 발전량 예측제도"에 대한 선행 연구들은 발전사의 수익을 극대화하기 위해 추가 수익을 분석하거나 발전 운영 전략 등을 제시해왔다.

하지만 현재 국내의 "신재생 에너지 발전량 예측제도"에 대한 선행 연구들은 발전사의 관점에서 진행된 연구가 대다수였고 제도 설계자의 관점에서는 연구가 부족하다는 한계가 있다.[5]-[10] 이에 예측력 제고라는 제도의 목적에 부합하게 제도를 재설계할 필요가 있다.

메커니즘 디자인을 통한 전력 시장 제도 설계는 국내 뿐만 아니라 해외에서도 관련된 연구가 경매 운영자의 입장에서 여러 유형의 경매 형태를 제안하였다. Chandrashekar et al. (2007)의 연구에서는 전력시장에서의 조달 시나리오 형태를 경매로 다루어 운영자 입장에서의 조달 효율(procurement efficiency)와 조달 비용(procurement cost)을 해결하기 위한 이론적 틀을 제시하였다. 한 단위 혹은 여러 단위의 동질적인 물품을 판매하는 경매 형태인 Single-item auction, 여러 종류의 물품을 한 단위 혹은 여러 단위로 판매하는 경매 형태인 multi-item auction, 비용 뿐 아니라 유지보수계약,

물품의 질 등의 속성에도 기반하여 결정이 이루어지는 multi-attribute auction 등의 형태를 다루었다. Chen et al. (2005)의 연구는 공급망 환경에서 조달을 위한 비크리 경매(Vickery auction)를 분석하였다. Chi et al. (2020)의 연구에서는 한정된 예산 내에서 에너지 절감 효과를 극대화하기 위한 VCG메커니즘을 설계하여 에너지 효율성과 공정성을 향상시키고 기존보다 12.23% 에너지 절감을 달성할 수 있음을 보였다. 이와 같이 해외의 연구에서 제도 설계자의 관점에서 비용 효율과 에너지 절감 등의 목적을 위해 경매를 설계하는 연구를 확인하였다.

한편 국내에서의 전력시장에서의 메커니즘 디자인을 활용한 제도는 부족하며 특히 "신재생에너지 발전량 예측제도"는 메커니즘 디자인을 통해 예측력 제고라는 제도 목적에 부합할 수 있게 재설계될 필요가 있다.

정보수집(information acquisition)을 고려한 메커니즘 연구는 경제적 모델에서 정보의 수집을 통해 기대 효용의 최적화를 위해 필요한 비용을 결정하고 정보 수준을 결정한다.[14], [15] Colombo et al. (2014)의 연구는 참여자별 상호 보완성과 대체 가능성 등 여러 외부요인을 포함한 경제적 모델 하에서 여러 유형의 정보를 획득하는 것이 사회적 가치에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다. Shi (2008)의 연구는 내생적 정보 획득을 고려한 최적 경매 설계를 제시하였다. 경매 참여 전 가치 정보를 수집할 수 있는 구매자가 존재할 때 일반적인 경매 프레임워크를 개발하였다. Bergemann & Välimäki (2002)의 연구는 일반적인 메커니즘에 참여하는 참가자가 정보 수집을 통해 이루어지는 효율성과 사회적 가치를 분석하였다. 또한 VCG메커니즘을 통한 경매 방식을 구성하여 개인의 효용과 사회적 효용의 최적을 만족할 수 있음을 보였다.

이와 같이 메커니즘 디자인과 연계하여 정보수집을 통한 메커니즘 설계 연구가 진행되고 있고 이를 활용하여 "신재생 에너지 발전량 예측제도"에서 참가자의 정보수집을 고려한 경매제도를 설계하여 각 정보수집 수준에 따른 효과를 분석할 것을 기대한다.

제 3장 정보수집 투자를 고려한 예측제도 재설계

제 1 절 발전사의 정보수집을 고려한 의사결정 모형

본 논문에서 제안하는 정보수집의 투자를 고려한 예측제도는 발전사의 정보수집을 고려한 의사결정 모형으로부터 시작한다. 각 발전사는 하루 전 입찰 정보를 입찰하기 위해 날씨 수준 등을 확인하여 $-k$ 부터 0 을 포함한 k 까지, 모두 $2k+1$ 개의 발전정보상태(ω_i)를 확인한다. 정보수집을 위한 투자가 전혀 없는 경우, 각 발전정보상태 별 발생확률은 그림 3 과 같이 모두 $\frac{1}{2k+1}$로 동일하게 확인한다고 가정한다. 각 발전사i의 발전정보상태가 발생할 사전확률을 $q_i(\omega_i)$ 라 하고 발전사의 개인 기대 보상은 전력거래소와의 거래대금으로 식(3.1)와 같이 SMP와 기대 발전량의 곱으로 계산된다.

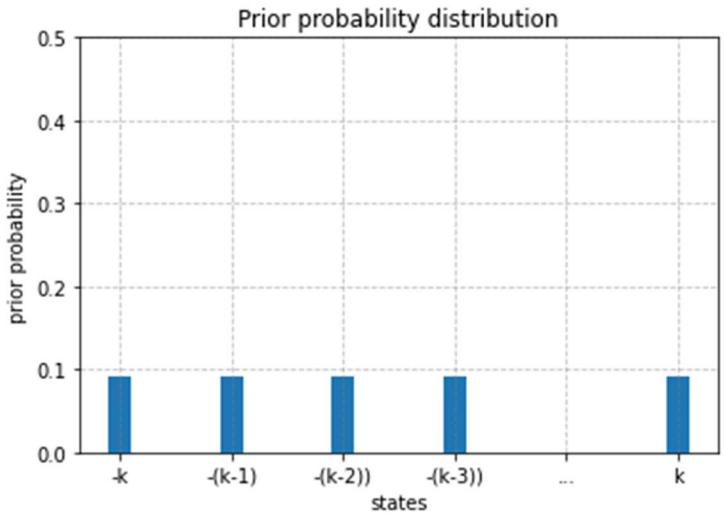

그림 3. 발전정보상태에 따른 사전확률분포

$$expected\ payoff_i = SMP \cdot x_i \cdot \sum_{j\ for\ all} y_i(\omega_i^j, k) \cdot q_i(\omega_i^j) \tag{3.1}$$

$$\omega_i = \{\omega_i^j \mid \omega_i^j = -(k-j+1), \quad (j = 1,2,3 \ldots, 2k+1) \tag{3.2}$$

이때, x_i는 발전기의 설비용량을 의미하고 각 발전정보상태 별 발전기의 발전 효율은 $y_i(\omega_i, k)$라 가정한다. Zebarjadi et al. (2012)의 연구에 따르면 발전 효율은 온도 등에 따라 위로 볼록한 우상향하는 효율함수를 고려할 수 있으며 본 연구에서는 발전정보상태가 양호할수록 발전 효율이 100%에 가깝고 불량할수록 0%에 가깝다고 가정하였다.

발전사는 가능한 최소한의 투자비용 (I_i (만원)) 을 통해 최대한의 기대 효용을 누리고자 한다. 그리고 투자비용은 예측력을 위한 비용이며 투자 비용이 증가함에 따라 식(3.3)과 같이 정보수집 수준 또한 증가한다고 가정한다.

$$\alpha_i'(I_i) > 0,\ \alpha_i''(I_i) < 0, \tag{3.3}$$

Matthews (2001)의 연구 따르면 주어지는 정보수집에 따라 사전확률(prior)에 비해 사후확률(posterior)이 더 작은 분포를 가지며 그 평균은 수집되는 정보와 사전정보의 가중치에 의해 결정됨을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 정보수집 수준(α_i)에 의한 실제 발전정보상태(ω^*)의 발생확률($p_i(\omega_i^*|\alpha_i)$)을 $\frac{2k\cdot\alpha_i+1}{2k+1}$의 값을 가지도록 하여 평균을 실제 발전정보 상태에 가깝게 갱신하는 함수를 고려할 수 있다. 그 외의 발전정보상태는 실제 발전정보상태(ω^*)를 기준으로 기하급수적으로 감소한다고 가정한다.

발전사의 투자비용에 따른 정보수준 α_i과 갱신되는 사후확률, $p_i(\omega_i|\alpha_i)$에 의해 식(3.1)은 다음과 같이 갱신할 수 있다.

$$v_i(x_i, I_i) = SMP \cdot x_i \cdot \sum_{j\ for\ all} y_i(\omega_i^j, k) \cdot p_i(\omega_i^j|\alpha_i) - I_i \tag{3.4}$$

발전사들은 주어지는 SMP정보와 발전설비용량을 확인하고 식(3.4)의 기대 효용의 최대화를 위해 최적의 기대 발전량(x_i^*)과 예측을 위한 투자(I_i)를 결정하여 전력거래소에 입찰한다. 이때 제출하는 발전사가 제출하는 기대 발전량은 다음과 같다.

$$x_i^* = x_i \cdot \sum_{j\ for\ all} y_i(\omega_i^j, k) \cdot p_i(\omega_i^j | \alpha_i) \tag{3.5}$$

이후 전력거래소는 효율적 경매 메커니즘을 통해 각 발전사들로부터 조달할 용량을 결정하고 제도의 사회적 가치에 기여한 정도를 반영하여 정산금을 지급하거나 회수할 수 있다. 정산금 결과와 발전사 i의 조달 용량 할당 결과를 각각 t_i, X_i라 하고 입찰한 내용을 θ_i라 할 때 결론적으로 발전사의 최종 기대 효용은 다음과 같다.

$$u(X_i, \theta_i) = SMP \cdot X_i(\theta_i, \theta_{-i}) - I_i + t_i \tag{3.6}$$

제 2 절 정보수집 투자 유도를 위한 메커니즘 모형 설계

발전사의 최적 의사결정에 의해 제출된 발전용량과 예측력 제고를 위한 비용을 통해 제도 설계자는 발전용량 조달과 정보수집 투자 유도의 목적을 달성하기 위한 하나의 경매 메커니즘 모형을 설계한다. 본 논문에서 제안하는 정보수집을 위한 투자를 유도하는 경매 메커니즘 모형은 할당규칙(allocation rule)과 정산규칙(payment rule)에 의해 운영된다.

본 제도의 설계자인 전력거래소는 하루 전 전력수급 계획에 따른 수요량을 결정하고 그 수요량에 따라 할당규칙을 통해 경매제도를 진행한다. 할당규칙은 입찰 내용을 반영하여 제도의 제도적 후생에 따라 진행된다. 제도적 후생(pw_i)은 투자 비용(I_i)에 따른 정보수집 수준(α_i)으로서 식 (3.7)과 같이 정의한다.

$$sw_i = \alpha_i(I_i) \tag{3.7}$$

이에 제도 설계자는 각 발전사별 조달 용량을 결정하기 위한 할당순서를 제도의 사회적 기대가치가 높은 순으로 결정한다. 제도의 사회적 기대가치가 높은 순서대로 정렬하여 순서대로 수요량을 충족할 때까지 해당 용량을 입찰한다. 마지막 낙찰자는 이전 낙찰자까지의 누적 기대 발전량을 낙찰한 후의 남은 수요량만큼 입찰하고 나머지 입찰자에 대해서 0을 할당하여 할당규칙을 마무리한다. 이에 대한 낙찰(할당) 알고리즘은 다음과 같다.

Pseudo-code 1: efficient allocation rule

1: Operator determines the procurement amount m

2: Order the agents in descending order according to social welfare, sw_i

```
Set acc(n) as accumulation of expected capacity for n agents in the order
for i in range (#of agents):
    Allocate x_i^* to n-th agent's procurement amount, X_i
    If acc(i) > m:
        Let n^* be the i
        Allocate m − acc(n^*) to i agent's procurement amount
        Allocate 0 to rest of agent procurement amount
        break
End
```

이와 같이 제도 설계자는 수요 조달 용량 m에 대해 제도의 사회적 후생이 높은 순으로 조달 용량을 할당할 수 있으며 다음과 같은 성질을 만족할 수 있다.

정의 1. 할당 효율성(Allocation efficiency)

할당 효율성(Allocation efficiency)이란 할당 규칙(allocation rule)이 메커니즘 모형에서 낙찰자들의 후생을 최대화할 수 있을 때 가지는 성질이다.

정리 1. 본 논문에서 제시하는 메커니즘의 할당규칙(allocation rule)은 제도적 후생에 대한 할당 효율성(Allocation efficiency)을 가진다.

증명:

할당규칙(allocation rule)은 제도적 후생($pw_i = \alpha_i(I_i)$)이 높은 순으로 차례대로 낙찰하여 낙찰자들의 사회적 후생의 합이 최대가 되는 할당결과, $X^*(\theta_i, \theta_{-i})$를 유도하므로 그 외의 경우에는 낙찰자들의 제도적 후생의 합이

최대가 되지 않는다. 따라서 본 논문에서 제시하는 메커니즘의 할당 규칙은 할당 효율성(allocation efficiency)을 가진다.

정리 2. 본 메커니즘에서의 할당규칙(allocation rule)이 제도적 후생(social welfare)에 대한 할당 효율성(Allocation efficiency)을 가지면 사회적 후생인 발전사의 기대 가치(expected valuation)에 대한 할당 효율성을 가진다.

증명:

발전사의 정보수집을 위한 최적의 투자비용(I_i^*) 내에서 투자비용(I_i)가 증가함에 따라 정보수집수준(α_i) 또한 함께 증가하며, 정보수집수준(α_i)이 증가함에 따라 발전사의 기대가치 (expected valuation) 또한 증가한다. 또한 발전사의 설비용량에 비례하여 최적의 투자 수준이 결정된다. 따라서 각자의 최적의 투자비용(I_i^*) 내에서 정보수집수준(α_i)이 큰 순서대로 낙찰하는 것은 사회적 후생인 발전사의 기대 가치를 큰 순서대로 낙찰하는 것이므로 기대 가치에 대한 할당효율성을 만족한다.

이후 전력거래소는 할당규칙에 의해 사회적 후생에 대한 할당 효율성이 만족되게 조달 용량을 낙찰한 이후 낙찰자에게 정산규칙(payment rule)을 통해 정산금을 지급한다. VCG(Vickrey-Clarke-Grove)메커니즘을 기반으로 하여 제도 낙찰자들의 기대가치를 기준으로 정산금을 지급한다. 낙찰자 i에 대한 정산금은 낙찰자들의 제도적 기대가치의 합에서 낙찰자 i의 기대가치를 뺀 후 다시 낙찰자 i를 제외한 임의의 효용 함수로 다음과 같은 식으로 산정한다. 이 때 β는 전력시장 상황에 따라 전력거래소가 정산금 규모를 조절할 수 있는 계수이다.

$$t_i(\theta_i) = \sum_{j \in N} v_j\big(X(\theta_i), \theta_j\big) - v_i(X(\theta_i), \theta_i) - \beta \cdot \sum_{j \neq i} v_j\big(X_{-i}(\theta_j), \theta_j\big) \qquad (3.8)$$

```
Pseudo-code 2: VCG-payment rule
Operator computes summation_1 of expected valuations according to efficient allocation.
for i in number of agents
        Del bid of agent i and allocate again to compute new allocation
        Compute summation_2 of expected valuations which excludes agent i
Set payment of i agent as (summation_1 – summation_2 – valuation of i)
End
```

이와 같이 제도 설계자는 제도의 사회적 후생을 반영하여 본인의 기대가치 수준을 제고한 정도에 따라 정산금을 계산하여 지급할 수 있다. 또한 제도 내 발전사의 기대가치에 대한 할당효율성(allocation efficiency)이 보장된 메커니즘이므로 VCG 메커니즘의 성질인 인센티브 호환성(incentive compatibility)을 만족할 수 있다.

정의 2. 인센티브 호환성(Incentive compatibility)

인센티브 호환성(incentive compatibility)란 메커니즘 참여자들이 본인의 효용을 최대화하기 위해 솔직한 전략이나 입찰을 취하게 하는 성질이다.

정리 3. 본 논문에서 제시하는 정산 규칙(payment rule)이 다음과 같은 형식으로 정의되고 기대가치에 대한 할당 효율성(allocation efficiency)을 지닐 때, 해당 메커니즘은 인센티브 호환성(Incentive compatibility)을 가진다.

$$payment(i) = t_i(\theta_i) = \sum_{j \neq i} v_j(X(\theta_j), \theta_j) + h_i(\theta_{-i}) \; \forall \, j = 1, \dots, n \tag{3.9}$$

where $h_i : \Theta_{-i} \to \mathbb{R}$ *is any arbitrary function*

증명:

θ_i^*가 참가자의 실제 본인의 효용을 최대화하는 전략이거나 입찰이라고 할 때, 인센티브 호환성을 가지는 것은 다음의 식이 성립하는 것과 같다.

$$u_i(X_i(\theta_i^*), \theta_i^*) \geq u_i(X_i(\theta_i), \theta_i) \;\; \forall \theta_i^* \in \Theta \;\; \forall \theta_i \in \Theta \tag{3.10}$$

메커니즘이 할당규칙에 의한 할당 효율성을 지니지만 인센티브 호환성을 가지지 않는 경우가 있다고 가정하자.

$$u_i(X_i(\theta_i), \theta_i) > u_i(X_i(\theta_i^*), \theta_i^*) \tag{3.11}$$

이를 풀어 쓰면 다음과 같은 부등식을 만들 수 있다.

$$v_i(X_i(\theta_i), \theta_i) + t_i(\theta_i) > \; v_i(X_i(\theta_i^*), \theta_i^*) + t_i(\theta_i^*) \tag{3.12}$$

$t_i(\theta_i)$와 $t_i(\theta_i^*)$를 위의 정산규칙(payment rule)에 의해 정리하면,

$$\begin{aligned} t_i(\theta_i) = \sum_{j \in N} & v_j\big(X(\theta_i, \theta_{-i}), \theta_j\big) - v_i(X(\theta_i, \theta_{-i}), \theta_i) \\ & - \beta \sum_{j \neq i} v_j\big(X_{-i}(\theta_j, \theta_{-j}), \theta_j\big) \end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned} t_i(\theta_i^*) = \sum_{j \in N} & v_j\big(X(\theta_i^*, \theta_{-i}), \theta_j\big) - v_i(X(\theta_i^*, \theta_{-i}), \theta_i) \\ & - \beta \sum_{j \neq i} v_j\big(X_{-i}(\theta_j, \theta_{-j}), \theta_j\big) \end{aligned} \tag{3.14}$$

정산금의 마지막 항은 소거되어 이를 다시 부등식에서 정리하면,

$$\begin{aligned} & v_i(X_i(\theta_i), \theta_i) + \sum_{j \in N} v_j\big(X(\theta_i, \theta_{-i}), \theta_j\big) - v_i(X(\theta_i, \theta_{-i}), \theta_i) \\ & > v_i(X_i(\theta_i^*), \theta_i^*) + \sum_{j \in N} v_j\big(X(\theta_i^*, \theta_{-i}), \theta_j\big) - v_i(X(\theta_i^*, \theta_{-i}), \theta_i) \end{aligned} \tag{3.15}$$

최종적으로 다음과 같은 부등식을 의미한다.

$$\sum_{j \in N} v_j\big(X(\theta_i, \theta_{-i}), \theta_j\big) > \sum_{j \in N} v_j\big(X(\theta_i^*, \theta_{-i}), \theta_j\big) \tag{3.16}$$

이는 최초에 가정한 $X(\theta_i, \theta_{-i})$ 의 할당 효율성을 위배하여 인센티브 호환성이 없다는 가정이 잘못됨을 알 수 있다. 이에 제시된 메커니즘은 제시된 정산규칙에 의해 인센티브 호환성(incentive compatibility)을 가진다.

제 3 절 정보수집의 투자를 고려한 경매 제도 모형

기존의 “신재생에너지 발전량 예측제도”는 발전사의 제출 용량을 모두 100% 거래하여 전력대금을 지급하고 오차율에 따라 정산금을 지급하는 프로세스였다.

본 연구에서의 정보수집의 투자를 고려한 “신재생에너지 발전량 경매 제도”는 기존과 다르게 발전용량과 투자금액을 입찰 받고 전력거래 대상을 제도의 사회적 기대 가치를 기준으로 결정한다. 이로써 발전사로 하여금 전력거래 대상이 되기 위해 정보수집을 위한 투자를 제고할 수 있다. 또한 VCG 메커니즘을 기반의 정산 구조를 설계하여 발전사가 제도의 총 사회적 기대 가치에 기여한 정도를 반영한 정산금을 받거나 회수금이 청구될 수 있도록 하였다. 이 모든 프로세스 모형과 프로세스가 진행된 후 발전사가 갖게 될 최종 기대 효용은 다음과 같다.

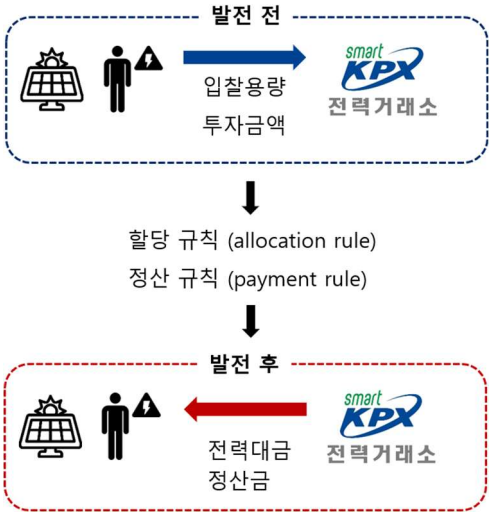

그림 4. 신재생에너지 발전량 경매 제도 프로세스

$$u_i(x_i^*, I_i^*) = SMP \cdot X_i \cdot \sum_{\omega_i} y_i(\omega_i) \cdot p_i(\omega_i|\alpha_i) - I_i + t_i(X_i, I_i) \tag{3.17}$$

이 때, SMP는 시장전력가격, X_i는 낙찰 받은 발전용량, ω는 발전정보상태, $p_i(\omega_i|\alpha_i)$는 정보수집수준에 따른 발전정보상태의 확률분포, I_i는 정보수집을 위한 발전사의 투자 그리고 t_i는 경매제도로부터 발생하는 정산금이다.

제 4 장 사례 연구

제 1 절 분석 사례의 설정

본 연구에서 제시하는 “정보수집을 고려한 신재생에너지 발전량 경매 제도”와 기존의 “신재생에너지 발전량 예측제도”는 다음과 같은 공통의 설정을 바탕으로 진행하였다.

- “정보수집을 고려한 신재생에너지 발전량 경매 제도”는 5명의 개인발전사와 1명의 제도 설계자가 있다고 설정하였다.
- 발전사들의 발전정보상태는 −10단계부터 10단계까지 총 21개의 단계로 모두 동일하게 확인된다고 설정하였다.
- 개인의 발전설비 용량은 1000, 1000, 1500, 2000, 2000(kWh)으로 가정한다.
- 본 연구에서 분석할 기존제도와 제시하는 경매제도의 모형 모두 SMP는 200원/kWh로 가정하며 $\omega_i = 8$을 실제 값으로 설정하였고 기존 제도의 오차율 산정은 실제 발전정보 상태에서의 기대 발전량을 기준으로 계산한다

표 3. 모형 공통 항목 내용 설정

항목	내용
구성원	개인발전사 5 명과 제도설계자 1 명
설비 용량(kWh)	(1000, 1000, 1500, 2000, 2000)
발전정보상태(ω)	−10, −9, ⋯, −1, 0, 1, ⋯ 9, 10

본 연구에서 제시하는 “신재생에너지 발전량 경매 제도”는 다음과 같은 설정을 바탕으로 진행하였다.

- 제시하는 “정보수집을 고려한 신재생 에너지 경매제도”는 기존의 “신재생에너지 발전량 예측 제도”와 공통으로 표3과 같은 항목을 가정한다.
- 본 연구에서 제시하는 경매제도는 할당 및 정산규칙이 존재하며 아래 표4와 같다. 또한 다음날의 전력수급계획에 따라 조달할 용량을 결정하며 본 연구에서는 5000(kWh)의 발전량을 조달한다고 가정한다.
- 할당규칙의 경우, 기존의 “신재생에너지 발전량 예측제도”에서는 제출 내용대로 모두 조달한다. 제시하는 경매제도에서는 다음 날의 수요계획에 따라 조달해야 할 총 조달 용량을 결정한 뒤 선택적으로 발전사 별 조달 용량을 결정하도록 한다.
- 정산규칙의 경우, 기존의 “신재생에너지 발전량 예측제도”에서는 다음날의 실제 발전용량에 따라 오차율을 계산하여 정산단가를 산정한다. 제시하는 경매제도에서는 VCG 메커니즘 구조로 자신이 낙찰자들의 기대 효용가치에 기여한 정도를 반영하여 정산금을 지급한다.

표 4. 모형 별 차별 항목 내용 설정

항목	신재생에너지 예측제도	신재생에너지 경매제도
할당 규칙	제출 내용대로 100% 조달	수요계획에 따라 조달
정산 규칙	오차율 6% 이내: 4 원/kWh 오차율 8% 이내: 3 원/kWh 그 외 : 0 원/kWh	제도 효용가치 기여 정도와 정확도를 반영하여 정산금 지급 (VCG payment)

제 2 절 분석 사례의 가정

해당 절에서는 본 연구에서 제시하는 “신재생에너지 발전량 경매제도”의 모형들에 대해 발전효율함수, 투자비용에 따른 정보수집수준 함수와 그에 따른 사후확률 갱신 과정을 가정한다.

- 발전정보상태 별 발전효율 함수는 위로 볼록한 우상향하는 함수로서 다음 식과 같이 가정하였고 최악의 발전정보상태에서는 0%의 효율을, 최고의 발전정보상태에서는 100%의 효율을 내며 다음 그림과 같이 나타난다.

$$\mathrm{y_i}(\omega_i^j) = \frac{\log(11 + \omega_i^j)}{\log(21)} \times 100(\%) \tag{3.18}$$

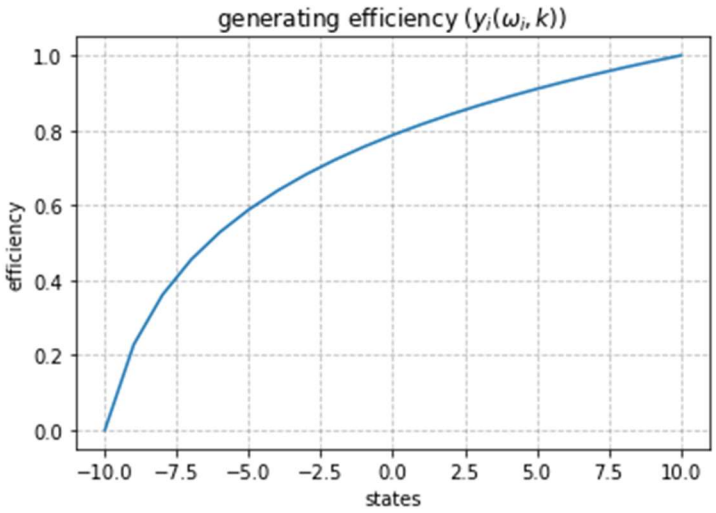

그림 5. 발전정보상태에 따른 효율 함수

- 발전사의 투자비용에 따르는 정보수집수준 α_i는 0과 1사이의 값으로 결정된다고 가정한다. 투자 비용이 증가할수록 정보수집수준(α_i)는 1에 가까워지고 투자비용이 감소할수록 0에 가까워진다. 이에 대한 식은 다음과 같다.

$$\alpha_i(I_i) = 1 - \frac{1}{1 + I_i} \tag{3.19}$$

정보수집수준(α_i)이 0과 1의 경우 그림5와 같은 확률 분포를 가정할 수 있다.

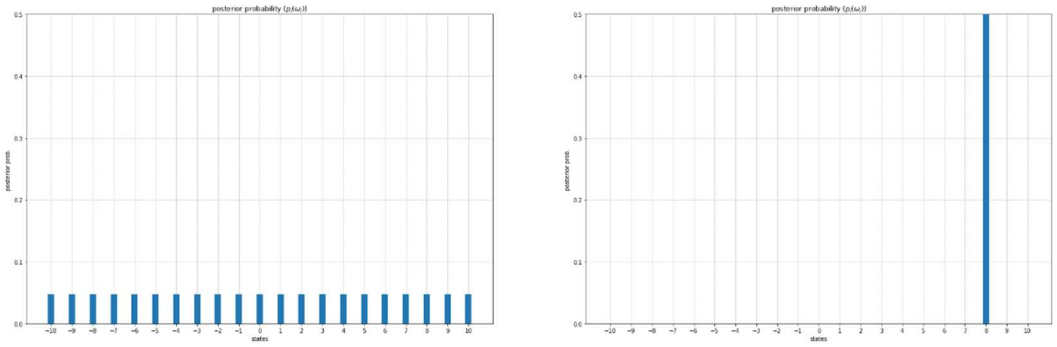

그림 6. 정수수집 수준에 따른 사후확률(좌: $\alpha_i = 0$, 우:$\alpha_i = 1$)

- 또한 갱신되는 각 발전정보상태의 사후 확률 $p_i(\omega_i^j|\alpha_i)$ 은 실제 발전정보상태(ω_i^*)를 중심으로 하는 확률분포로의 갱신을 고려할 수 있으며 $-k$ 부터 k 까지의 발전정보상태 발생확률은 다음과 같은 등식으로 갱신된다고 가정한다.

$$p(-k|\alpha_i) = p(\omega^*|\alpha_i) \cdot r^{*+k+1}$$
$$p(-k+1|\alpha_i) = p(\omega^*|\alpha_i) \cdot r^{*+k}$$
$$\cdots$$
$$p(\omega^* - 1|\alpha_i) = p(\omega^*|\alpha_i) \cdot r$$
$$p(\omega^*|\alpha_i) = \frac{2k \cdot \alpha + 1}{2k+1}$$
$$p(\omega^* + 1|\alpha_i) = \frac{k - \omega^* - 1}{k - \omega^*} \cdot p(\omega^*|\alpha_i) + \frac{1}{k - \omega^*} \cdot p(k|\alpha_i)$$
$$\cdots$$
$$p(k-1|\alpha_i) = \frac{1}{k - \omega^*} \cdot p(\omega^*|\alpha_i) + \frac{k - \omega^* - 1}{k - \omega^*} \cdot p(k|\alpha_i)$$
$$p(k|\alpha_i) = p(-k|\alpha_i) = p(\omega^K|\alpha_i) \cdot r^{*+k+1}$$

위는 실제 발전정보상태가 오른쪽에 위치할 경우의 각 발전정보상태에 대한 확률이다. 양끝의 확률은 같다고 가정하며 실제 발전정보상태가 우측에 위치할 경우, 우측은 실제발전정보의 확률과 발전정보 k 의 확률의 내분 값으로 계산하고 좌측은 공비 r 을 곱하여 작아지는 등비수열을 이룬다고 가정한다. 이 때, r 은 모든 사후 확률의 합($\sum_{j=1}^{2k+1} p(\omega^j|\alpha_i)$)이 1이 되게 하는 값을 적용한다. 예를 들어 실제 발전정보상태가 8이고 발전정보상태가 21개인 경우, 다음과 같은 그래프로 계산하여 보일 수 있다.

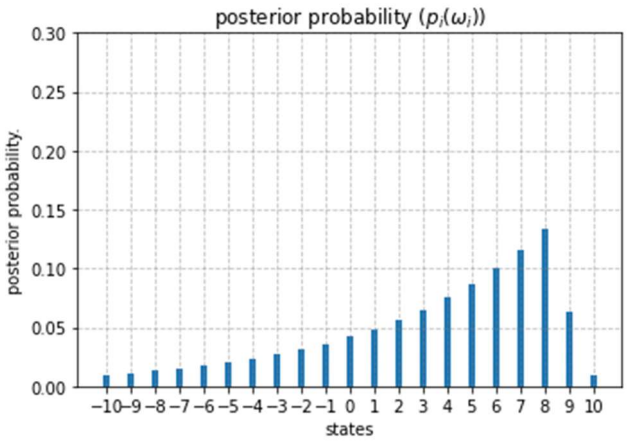

그림 7. 발전정보상태에 따른 사후확률분포

제 3 절 분석 결과

분석 사례 결과는 기존의 “신재생에너지 발전량 예측제도”와 제시하는 경매제도 하에서 참가자들의 총 효용, 정산금 그리고 투자수준과 정보수집수준의 결과를 비교 분석한다.

기존의 제도에서 5 명의 참가자들이 각각 1000, 1000, 1500, 2000, 2000 (kWh)의 설비용량을 다음 표와 같이 구비하고 각 참가자는 본인의 수익을 최대화하기 위해 최고 수준의 정산단가를 목표로 한다고 가정하였다. 분석 결과, 참가자 모두 설비용량에 상관없이 최고수준의 정산금을 맞추기 위한 최적 투자는 0.24 만원이었고 그에 따른 정보수집수준 또한 모두 19.3%로 동일한 결과가 나타났다. 그 외 전력거래대금, 정산금과 총 효용은 설비용량(혹은 기대 발전량)에 비례하여 나타났다.

표 5. 신재생에너지 발전량 예측제도의 분석 결과

구분	참가자 1	참가자 2	참가자 3	참가자 4	참가자 5
설비 용량 (kWh)	1,000	1,000	1,500	2,000	2,000
입찰 용량 (kWh)	910	910	1,365	1,820	1,820
최적 투자 (만원)	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
정보수집수준	19.3%	19.3%	19.3%	19.3%	19.3%
전력거래대금 (원)	182,079	182,079	273,119	364,159	364,159
정산금 (원)	3,641	3,641	5,462	7,283	7,283
총 효용 (원)	183,321	183,321	276,182	369,042	369,042

기존의 제도에서는 고정적인 정산단가 하에서 발전사는 오차율 6% 이내를 유지할 수 있는 정보수집수준만 달성하는 것이 최대의 정산금을 취할 수 있었다. 따라서 발전용량과 무관하게 2,400 원 수준의 투자가 이루어지면 오차율은 5.99%로써 최고 수준의 정산단가를 적용할 수 있었다. 이에 모두 동일한 수준의 투자가 이루어지고 19.3%의 정보수집수준을 보임을 확인했다. 또한 전력거래대금은 입찰용량에 비례하여 받으므로 설비용량에 따라 상이했다. 정산금은 동일한 정산단가가 적용되므로 입찰용량에 따라 정산금이 결정되었다.

다음 그림과 같이 정보수집을 위한 투자수준에 따른 오차율 변화와 적용되는 정산단가의 구간을 살펴보면, 오차율은 기하급수적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 약 0.185(만원)부터 0.235(만원)까지의 투자수준은 6~8%의 오차율을 내어 이에 적용되는 정산단가는 3 원/kWh 이었다. 또한 약 0.24(만원) 이상의 구간에서는 6%이내의 오차율을 내어 단위 발전량당 4 원이 적용되는 것을 확인할 수 있었다.

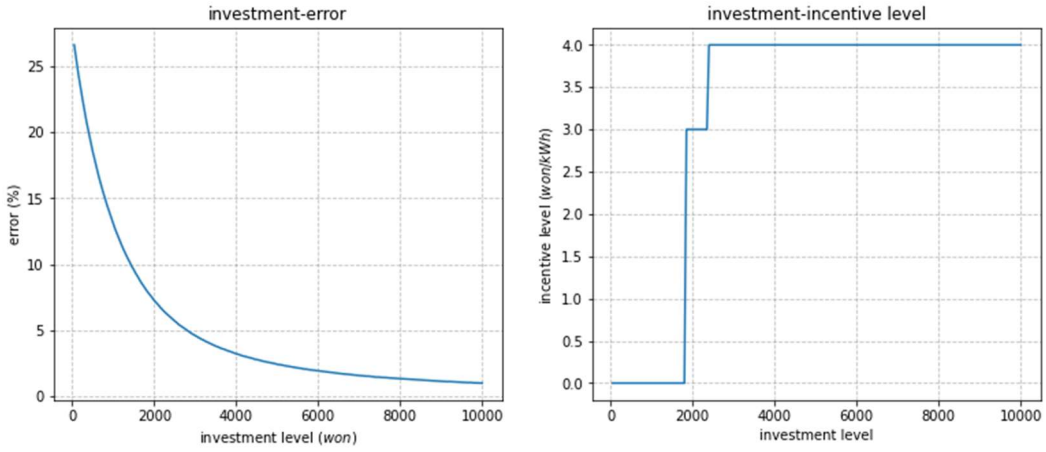

그림 8. 예측력 제고를 위한 투자에 따른 오차율과 정산 기준 변화

기존의 “신재생에너지 발전량 예측제도” 하에서 최고 정산금을 목표로 하는 발전사의 최적 투자 전략을 살펴보았다. 정보수집을 위한 투자는 설비용량과 입찰용량에 무관하게 0.24(만원) 수준을 만족시키면 되는 것으로 분석되었고 이는 고정적인 정산단가에 의해 다음과 같이 제도 참가자 전원의 최대의 추가수익을 위한 최적투자 전략으로 볼 수 있었다. 따라서 고정적인 정산단가를 통해 참가자들의 투자 수준을 제고하여 정보수집수준을 제고할 수 있는 유인은 없는 것으로 분석된다.

표 6. 신재생에너지 발전량 예측제도의 최적 투자 전략

구분	참가자 전략
투자수준 (원)	2,400
정보수집수준 (%)	19.3

한편 제시하는 신재생에너지 발전량 경매 제도에서의 분석을 살펴보자. 제시하는 경매제도는 기존의 “신재생에너지 발전량 예측제도”의 같은 조건을 가진 참가자를 가정한다. 고정적인 정산단가가 없는 경매 제도 하에서 본인의 기대 가치를 최대화하는 최적 투자 수준과 이에 따른 정보수집 수준을 분석하고자 한다. 더 나아가 최적의 투자 수준을 결정하여 기존의 제도와 총 기대효용과 입찰용량에 따른 정산금과 기대효용 변화를 분석한다.

분석 결과, $5000Kwh$의 조달 용량을 가정할 때, 참가자 3 부터 5 까지 각각의 입찰용량을 낙찰하였다. 이에 대한 각 참가자의 최적 투자 수준과 정보수집 수준은 다음 표와 같다. 참가자 모두 각 본인들의 설비 용량에 비례하는 투자 수준과 정보수집수준을 보였고 이는 모두 기존의 예측제도에 비해 현저히 높은 수치의 결과였다.

표 7. 신재생에너지 발전량 경매제도 분석 결과

구분	참가자 1	참가자 2	참가자 3	참가자 4	참가자 5
설비 용량 (kWh)	1,000	1,000	1,500	2,000	2,000
입찰 용량 (kWh)	945	945	1424	1905	1905
최적 투자 (만원)	0.529	0.529	0.628	0.735	0.735
정보수집수준	0.346	0.346	0.386	0.424	0.424
전력거래대금 (원)	0	0	237,768	381,116	381,116
정산금 (원)	0	0	151,477	9,200	9,200
총 효용 (원)	−5290	−5290	345,198	401,850	401,850

각 참가자의 설비용량에 비례하여 투자 수준이 결정되는 것은 각 참가자의 기대 가치를 최대화하는 투자 수준이 곧 설비용량과 비례했기 때문이다. 식(3.4)를 최대화하는 최적의 투자 수준은 smp와 설비용량에 의해 결정되고 다음 그림 9 와 같은 형태의 그래프로서 각각 최적의 투자 수준이 결정되었다. 각 참가자는 0.529, 0.529, 0.628, 0.735, 0.735(만원)으로 최적 투자수준이 결정되어 입찰하였다. 이에 각각의 참여자들은 34.6%, 34.6%, 38.6%, 42.4%, 42.4%의 정보수집수준을 보였다.

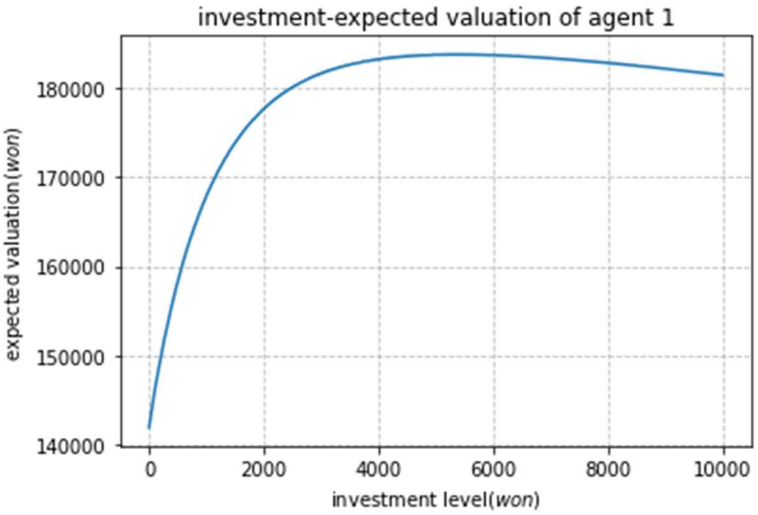

그림 9. 참가자1의 투자수준에 따른 기대가치 변화

또한 제시하는 ”신재생에너지 발전량 경매제도”는 낙찰자들의 정보수집수준에 따라 낙찰되는 용량이 달라질 수 있음을 확인했다. 낙찰되는 참가자 4 를 기준으로 정보 수집을 위한 투자 수준에 따라 낙찰 발전용량의 변화를 분석한 결과는 다음과 같이 미세하게 증가하는 그래프와 같았다. 낙찰자의 투자수준이 높아질수록 경매제도에서 낙찰될 발전용량이 본인의 실제 발생할 발전정보상태의 효율의 발전량에 가까워지는 것을 확인할 수 있었다. 0.53(만원)이전 수준의 투자는 낙찰을 받을 수 없었으며 그 이상의 투자를 통해 1670kWh 의 용량이 낙찰되기 시작하였다. 이후 이는 기존보다 더 많은 용량이 낙찰될 수 있으므로 해당 메커니즘의 할당규칙(allocation rule)이 낙찰자의 정보수집을 위한 투자 수준을 제고하는 목적을 만족한다고 볼 수 있다.

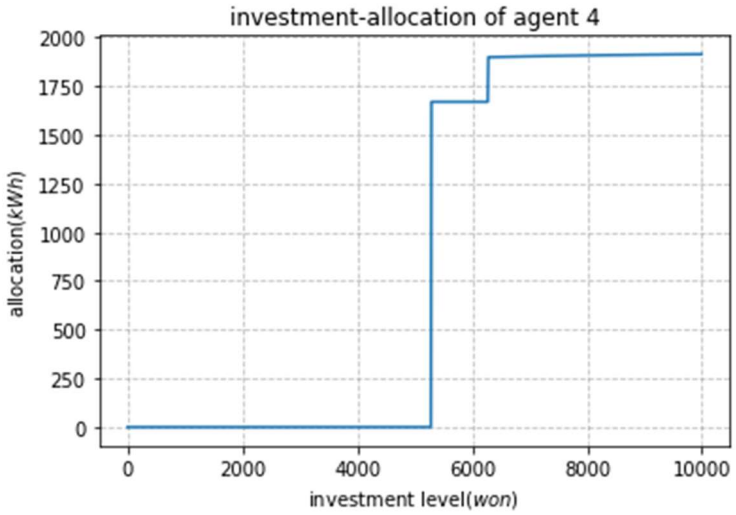

그림 10. 낙찰자의 투자수준에 다른 낙찰 발전용량 변화

한편 기존에 낙찰되지 않는 참가자 중 참가자 1 의 정보수집을 위한 투자 수준에 따른 낙찰 발전용량의 변화를 분석하였다. 그림 11 과 같이 기존 최적의 투자 수준 이상의 특정 수준의 투자가 이루어질 경우, 해당 투자에 따른 기대 발전량이 낙찰되는 것을 확인할 수 있었다. 이 또한 정보수집을 위한 투자수준을 고려한 메커니즘의 할당규칙에 의한 낙찰현상으로 보인다. 다만 각 참가자는 다른 참가자들의 투자 수준과 설비용량은 알 수 없다고 가정하기 때문에 본인의 최적 투자 수준만을 안전하게 입찰할 것이다. 무리하게 낙찰을 받고자 하는 참가자는 더 많은 투자로 낙찰을 받을 수 있는 여지가 존재한다.

또한 "신재생에너지 발전량 경매제도"에서 정산금은 낙찰자에게만 지급되었다. 제도 내에서 낙찰자들의 기대 가치의 합에 대해 기여한 정도를 반영하여 지급하였지만 투자 수준에 비례하여 정산되지 않았다.

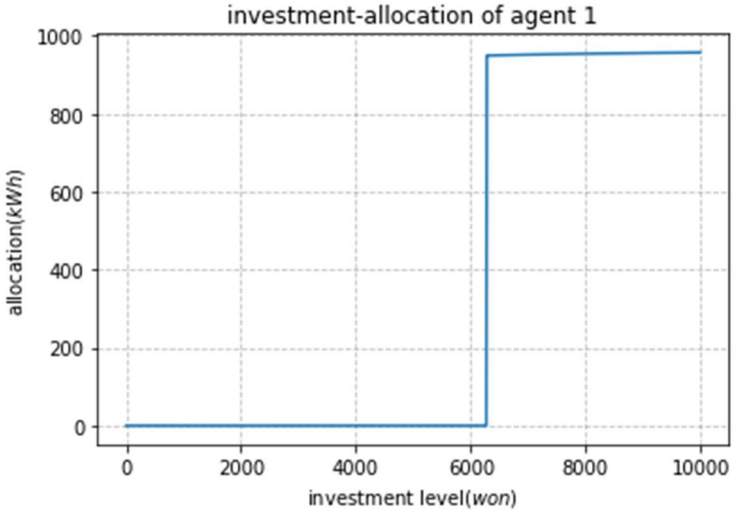

그림 11. 비(非)낙찰자의 투자 수준에 낙찰 발전용량 변화

본 연구에서 제시하는 “신재생에너지 발전량 경매제도” 하에서 최고 기대 가치를 목표로 하는 발전사의 최적 투자 전략을 살펴보았다. 정보수집을 위한 투자는 설비용량과 입찰용량에 따라 상이하였고 평균적으로 0.63(만원)의 수준을 보였다. 이에 따라 정보수집수준은 평균적으로 38.52(%)의 수준을 보였다. 이에 대한 각 참가자별 최적의 투자 전략은 표 8 과 같다.

기존의 “신재생에너지 발전량 예측제도”에 비교할 때 표 9 와 같이 참가자들의 정보수집을 위한 투자 수준은 0.24(만원)에서 0.63(만원)으로 향상한 것을 확인할 수 있고 정보수집수준 또한 19.3(%)에서 38.52(%)으로 향상한 것을 확인할 수 있었다.

표 8. 신재생에너지 발전량 경매제도의 최적 투자 전략

구분	참가자 1	참가자 2	참가자 3	참가자 4	참가자 5
설비 용량 (kWh)	1,000	1,000	1,500	2,000	2,000
최적 투자 (만원)	0.529	0.529	0.628	0.735	0.735
정보수집수준	0.346	0.346	0.386	0.424	0.424

표 9. 신재생에너지 발전량 예측제도와 경매제도의 최적 투자 전략 비교

구분	예측제도 내 참가자 전략	경매제도 내 참가자 전략(평균)
투자수준 (원)	2,400	6,312
정보수집수준 (%)	19.3	38.52

제 5 장 결론 및 향후 연구

본 연구를 통해 기존의 “신재생에너지 발전량 예측 제도”의 고정적인 정산단가 기준과 오차율 산정 방식의 문제점을 완화하고 참가자들의 예측력에 대한 투자를 제고할 수 있는 “신재생에너지 발전량 경매 제도”를 제안하였다. 기존의 제도에서는 참가자들이 제출하는 입찰용량을 그대로 낙찰하고 오차율에 따라 정산급을 지급하였다. 하지만 본 연구에서 제시하는 새로운 경매 제도는 제도의 제도적 후생을 기준으로 정렬하여 수급계획에 따라 순서대로 조달 용량을 낙찰하여 결정하였다. 제도적 후생이 높은 순서대로 조달용량을 결정하였고 이는 곧 사회적 후생의 효율성(efficiency)을 만족시키므로 해당 할당 규칙(allocation rule)은 할당 효율성(allocation efficiency)을 보장한다. 또한 제시하는 경매 제도의 정산 규칙(payment rule)은 제도의 사회적 기대가치에 대한 기여 정도를 반영하여 VCG 메커니즘 기반의 규칙으로 구성하였다. 이에 본인의 효용을 높이기 위한 제도 참가자의 솔직한 전략이나 입찰을 유도할 수 있는 인센티브 호환성(incentive compatibility)를 보장함을 확인했다.

분석 결과, 기존의 “신재생에너지 발전량 예측제도”는 입찰용량과 관계없이 일정 수준의 예측력을 위한 투자와 정보수집수준만 갖출 수 있다면 최고 수준의 정산단가를 적용할 수 있어 그 이상의 정보수집을 위한 투자 제고는 불가능한 것으로 확인하였다. 한편 본 연구에서 제시하는 “신재생에너지 발전량 경매제도”는 설비용량이나 입찰용량에 비례하여 최적의 투자수준이 결정됨을 확인할 수 있었다. 또한 정보수집을 위한 투자가 클수록 더 많은 용량을 낙찰됨을 보여 참가자들의 정보수집을 위한 투자를 제고할 수 있었다. VCG 메커니즘 기반의 정산규칙을 통해 낙찰자들은 본인이 제도에 기여한 사회적 기대가치 수준에 따라 정산금을 지급받았다. 결론적으로 참가자들의 정보수집 투자 수준 제고를 위한 효율적인 할당 규칙(allocation rule)은 기존의 제도보다

평균적으로 높은 정보수집 수준과 정보수집을 위한 투자 수준을 보였다.

다만, 해당 연구에서의 모형은 정보수집수준과 정보수집수준을 위한 투자 사이의 관계식에 대한 가정으로 인한 한계점이 있다. 또한 실제 발전정보상태에 대한 가능한 집합은 본 연구보다 많고 연속적일 것으로 예상되며 이에 대한 현실적인 모형 개발이 필요할 것으로 보인다. 따라서 향후의 연구에서는 정보수집수준과 투자 사이의 현실적인 관계를 명확히 하여 반영하고 발전정보상태의 가능한 집합을 확대하여 한계점을 보완하여 연구를 지속하고자 한다. 이를 기반으로 전력거래소가 일반 발전기와 같이 전력시장 및 전력계통에서 활용할 수 있도록 하는 재생에너지 발전량 입찰 제도의 시범 모델을 구성하는 데 기여하고자 한다.

참고 문헌

[1] Bergemann, D., & Välimäki, J. (2002). Information acquisition and efficient mechanism design. Econometrica, 70(3), 1007–1033. https://doi.org/10.1111/1468−0262.00317

[2] Chandrashekar, T. S., Narahari, Y., Rosa, C. H., Kulkarni, D. M., Tew, J. D., & Dayama, P. (2007). Auction−based mechanisms for electronic procurement. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 4(3), 297–321. https://doi.org/10.1109/TASE.2006.885126

[3] Chen, R. R., Roundy, R. O., Zhang, R. Q., & Janakiraman, G. (2005). Efficient auction mechanisms for supply chain procurement. Management Science, 51(3), 467–482. https://doi.org/10.1287/mnsc.1040.0329

[4] Chi, C., Ji, X., Merahatta, avinab, & Zhang, F. (2020). An Incentive Mechanism for Improving EnergyEfficiency of Colocation Data Centers Based onPower Prediction.

[5] Choi, K., Suh, J., Choi, Y., & Jang, Y. (2022). 합천댐 고정식 및 추적식 수상태양광 발전시스템의 발전 잠재량 평가 및 비교 분석 Comparative Analysis between the observed Power Output and the Predicted Potential from Fixed−and Tracking PV System in the Hapcheon Dam 후 기. www.dbpia.co.kr

[6] Colombo, L., Femminis, G., & Pavan, A. (2014). Information acquisition and welfare. Review of Economic Studies, 81(4), 1438–1483. https://doi.org/10.1093/restud/rdu015

[7] Cui, J., Gu, N., Zhao, T., Wu, C., & Chen, M. (2022). Forecast Competition in Energy Imbalance Market. IEEE Transactions on Power Systems, 37(3), 2397–2413. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3117967

[8] Hausch, D. B., & Li, L. (1993). A common value auction model with endogenous entry and information acquisition*. In Econ. Theory (Vol. 3).

[9] Jeong In, L., Wan Ki, P., il Woo, L., & Sang Ha, K. (2022). 분산자원 활성화를 위한 재생에너지 발전량 예측제도 적용 및 분석 Application and

Analysis of Renewable Energy Generation Prediction System to Activate Distributed Resources. https://der.
[10] Kang, M., Byun, S., Kim, J., & Lee, J. (2020). 인공신경망에 기반한 제주시 신재생 에너지 발전량 예측 모델 A forecast model of renewable energy generation based on artificial neural networks in Jeju city.
[11] Kim, C.-S., Yoo, T.-H., & Rhee, C.-H. (2017). The Profitability Analysis of BESS Installation with PV Generation under RPS. Journal of Energy Engineering, 26(4), 107-117. https://doi.org/10.5855/ENERGY.2017.26.4.107
[12] Kong, J., Oh, S., Kang, B. O., & Jung, J. (2022). Development of an incentive model for renewable energy resources using forecasting accuracy in South Korea. Energy Science and Engineering, 10(9), 3250-3266. https://doi.org/10.1002/ese3.1020
[13] Matthews, R. A. J. (2001). Methods for assessing the credibility of clinical trial outcomes. Drug Information Journal, 35(4), 1469-1478. https://doi.org/10.1177/009286150103500442
[14] Shi, X. (2008). Optimal Auctions with Information Acquisition *.
[15] Yu, H., Lee, J., & Wi, young-M. (2022). 재생에너지 발전량 예측제도를 고려한 에너지저장장치 운영 전략. 대한전기학회 하계학술대회 논문집.
[16] Yu, J.-H., Kim, S.-J., Jang, B.-H., & Woo, S.-M. (2022). Renewable Energy Prediction Market Participation Type Photovoltaics Prediction Model Development. www.dbpia.co.kr
[17] Zebarjadi, M., Esfarjani, K., Dresselhaus, M. S., Ren, Z. F., & Chen, G. (2012). Perspectives on thermoelectrics: From fundamentals to device applications. In Energy and Environmental Science (Vol. 5, Issue 1, pp. 5147-5162). https://doi.org/10.1039/c1ee02497c
[18] 김태형, 이재규, 이상엽, 함경선, & 지능융합 한국전자기술연구원. (2020). Development of Time Series Data Analysis Software for Prediction and Analysis of Renewable Energy Power Generation. www.dbpia.co.kr
[19] 박균우, & 윤성욱. (2022). 신재생 에너지 발전량을 고려한 전력수요 예측 사례연구.
[20] 하정우, & 김수덕. (2005). A Study on the Wind Power Generation and Its Economic Feasibility.

Abstract

An auction mechanism of renewable energy prediction policy considering the investment in information acquisition

Gyuhun Kang
Department of Industrial Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Along with the declaration of the 2030 national greenhouse gas reduction target, the government established policies related to renewable energy and prepared various institutional mechanisms for technological development. Among them, the "Renewable Energy Generation Prediction Policy" aims to improve power of generators' prediction by paying them incentives according to their accuracy in predicted generation based on fixed price level. However, the fixed price structure did not take into consideration of future related uncertainty and market price. And the method of calculating the error rate is likely to maximize profitability without enhancing the predictive power of power generators. This study aims to identify potential problems that may arise from the current " Renewable Energy Generation Prediction Policy " and redesign the policy through mechanism design and information theory between power

generators and government. This study sets the generators' utility from improving predictive power through investment for information acquisition and the auction mechanism is proposed and analyzed in accordance with the purpose of improving predictive power.

Unlike the existing system, the "Renewable Energy Generation Auction Policy" proposed in this study designed allocation rules and payment rules so that power generators incentivize can increase investment in information acquisition. It was also shown that the allocation efficiency and incentive compatibility was satisfied through the proposed mechanism. As a result of the analysis, the proposed "Renewable Energy Generation Auction Policy " increased the level of information acquisition from 19.3% to 38.52%, and the investment for information acquisition increased by about 2.6 times.

Keywords: Renewable energy, information acquisition, Auction, mechanism design

Student Number: 2021-26510