

Receding Horizon 기반 혼합정수계획(MILP)을 활용한 VPP 내 ESS 충·방전 제어 전략

윤승진*, 김병기*, 유경상*, 김찬수*, 남양현*, 최미곤*, 김대진*,

*한국에너지기술연구원 전력시스템연구실

sjyoon@kier.re.kr

Receding Horizon-Based Mixed-Integer Linear Programming Strategy for ESS control in Virtual Power Plants

Seung-Jin Yoon*, Byungki Kim*, Kyung-Sang Ryu*, Chan-Soo Kim*, Yang-Hyun Nam*, Choi Mi-gon*, and Dae-Jin Kim1*

*Electric Power System Research lab, Korea Institute of Energy Research

탄소중립과 RE100 실현을 위한 재생에너지 자원의 급속한 확산은 기존 중앙집중형 전력계통에 새로운 운영 문제를 야기하고 있다. 태양광 및 풍력과 같은 분산형 재생에너지원은 출력 간헐성과 예측 불확실성으로 인해 전압 변동, 주파수 불안정 등 계통 안정성에 부정적 영향을 미치고 있으며, 특히 비계량 소규모 자원의 확산으로 운영 가시성과 제어 가능성이 저하되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 가상발전소(VPP)는 다양한 분산자원을 통합 관리하고 시장 참여를 통해 수익성을 추구할 수 있는 솔루션으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 인센티브 기반 시장구조를 활용하여 VPP 사업자의 수익을 극대화할 수 있는 ESS 기반 운영 전략을 제안한다. 제안된 전략은 재생에너지 예측 오차를 단순히 최소화하는 대신, 토허용 바운더리 내 오차를 자원 운용 여유 공간으로 활용하여 전략적 충·방전을 수행하고, SMP(System Marginal Price)의 시간대별 변동을 이용해 수익을 최적화하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 Receding Horizon 기반 혼합정수계획(MILP) 최적화 기법을 적용하였으며, 15분 단위로 실시간 시장 조건과 자원 상태를 반영하여 최적 충·방전 스케줄을 도출한다.

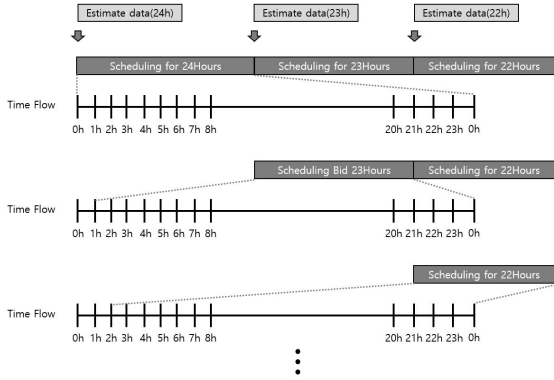
1. 서론

최근 전력 산업은 탄소중립과 RE100 실현을 목표로 태양광과 풍력과 같은 재생에너지 자원의 설치 용량이 급격히 증가하고 있다. 하지만 이러한 재생에너지 자원들은 기존 중앙 집중형 전력 계통이 아닌, 분산형 구조의 배전계통에 직접 연계되기 때문에 새로운 계통운영 문제를 야기하고 있다. 대부분의 재생에너지는 환경에 따라 출력이 급격히 변화하는 출력 간헐성과 예측 불확실성 문제를 가지고 있으며 이와 같은 특성은 현재의 수요-공급 균형 기반의 전력망 운영에 부담을 주게 되어 전압 변동, 주파수 불안정, 역전력 흐름, 예비력 부족 등의 계통안정성 문제가 발생할 수 있다. 더욱이, 현재 배전망에 연계된 다수의 중소규모 재생에너지 자원은 비계량형 자원으로 실시간 데이터 수집 및 제어가 이루어지지 않아 운영 가시성과 제어 가능성이 현저히 떨어진다. 이러한 배경에서 VPP는 분산된 에너지 자원을 하나의 통합된 전력 자원처럼 관리하고, 시장에 참여시킬 수 있는 핵심적인 솔루션으로 부상하고 있다. VPP는 재생에너지뿐 아니라 에너지저장장치(ESS), 수요반응(DR), 전기차 충전기(V2G) 등 다양한 자원들을 집합적으로 제어하고 이를 통해 개별 자원이 갖는 제약과 불확실성을 완화하여, 계통 안정화 및 시장 수익 극대화를 동시에 추구할 수 있다. 이러한 특성을 바탕으로, 최근에는 VPP 운영자가 전력시장 참여를 통해 실질적인 수익을 창출할 수 있도록

다양한 정책적 제도와 인센티브 체계가 마련되고 있다[1].

본 논문에서는 이러한 인센티브 기반의 시장구조를 활용하여, VPP 사업자의 수익을 극대화할 수 있는 ESS 기반 운영 전략을 제안한다. 제안된 연구에서는 발전량 예측 오차를 토허용 바운더리 내에서 하나의 '자원 운용 여유 공간'으로 간주하고, 해당 구간 내에서 ESS를 충·방전함으로써 수익을 창출하도록 구성한다. 특히 SMP(System Marginal Price)가 높은 시점에는 방전을, 낮은 시점에는 충전을 유도하여 시간대별 가격 차를 이용한 수익 최적화를 목표로 한다. 이를 위해 Receding Horizon 기반의 혼합정수계획(Mixed-Integer Linear Programming, MILP) 기법을 도입하였으며 제안된 알고리즘은 실시간 시장 운영 단위인 15분 간격으로 horizon을 재조정하며 반복 최적화를 수행함으로써, 동적으로 변동하는 SMP와 예측 발전량, ESS의 상태에 따라 최적의 충·방전 결정을 도출할 수 있도록 하였다. 또한, ESS의 상태(SOC) 및 충·방전 제약조건, 최종 SOC 유지 조건 등을 함께 고려하여 현실적이며 안정적인 스케줄링을 가능하도록 구성하였다.

2. 최적화 알고리즘



[그림 1] Receding Horizon 기반 MILP 최적화 구성도

본 장에서는 실시간 ESS 충·방전 스케줄링을 위해 적용된 Receding Horizon 기반 혼합정수선형화(MILP) 기법의 구조와 작동 원리를 설명한다. 제안된 알고리즘은 입찰량(bid)을 기준으로 $\pm 5\%$ 의 상·하한 바운더리를 정의하고, 해당 바운더리 내에서 ESS가 능동적으로 충전 또는 방전을 수행할 수 있도록 MILP 목적함수를 구성하고 <그림 1>과 같은 Receding Horizon 구조를 사용하여 매 스텝마다 MILP 최적화를 반복하여 실시간 최적 제어값을 도출한다. 이를 위한 MILP 목적함수는 다음과 같다.

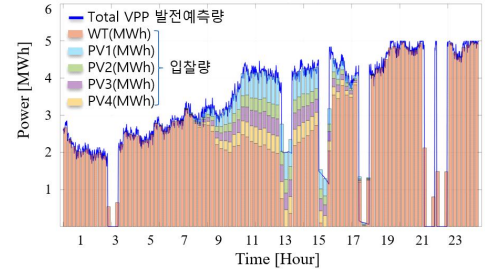
$$\max \sum_{t=1}^T (smp(t)P_d - smp(t)P_c - smp(t)B_u - smp(t)B_l) \quad (1)$$

목적함수 수식 (1)의 발전 예측량과 입찰량 간의 차이를 고려한 $\pm 5\%$ 허용 바운더리 B_u, B_l 는 입찰량 벡터 $bid(t)$ 와 발전예측량 벡터 $A(t)$ 를 사용하여 아래와 같이 구성된다.

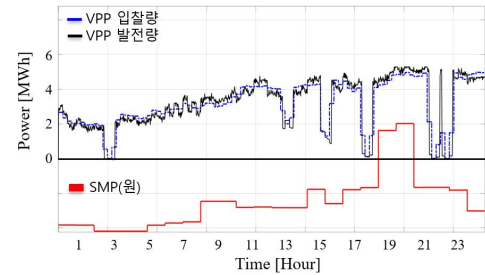
$$\begin{aligned} B_u + P_d(t) &= \max(1.05bid(t) - A(t), 0) \\ B_l + P_c(t) &= \max(A(t) - 0.95bid(t), 0) \end{aligned} \quad (2)$$

3. 시뮬레이션 결과

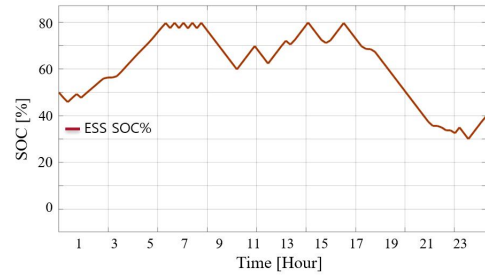
제안된 기법의 성능을 입증하기 위해 본 장에서는 하루 단위 SMP 데이터를 활용한 시뮬레이션 기반 사례 분석을 수행하였다. PV, WT1, ESS가 참여하는 VPP를 대상으로, ESS는 SOC 제약 (2080%)과 발전량 허용오차를 고려하여 실시간 시장 조건 하에서 ESS 운영을 통한 수익성 확보 및 효과를 검증한다. <그림 2>는 시뮬레이션에 사용된 발전예측량과 실시간 입찰량을 나타내며 <그림 3>은 ESS를 포함한 VPP의 실시간 발전량과 ESS의 실시간 SOC를 나타낸다. 시뮬레이션에서 확인할 수 있듯이 실시간 SMP 변화에 따라 VPP 사업자의 이득 극대화를 위해 ESS 충방전이 실시간으로 이루어지는 것을 확인할 수 있으며 ESS의 SOC 또한 제약조건인 20%~80% 사이를 유지하도록 제어되는 것을 확인할 수 있다.



[그림 2] VPP의 재생에너지 발전예측량 및 실시간 입찰량



(a) 실시간 VPP 입찰량, 발전량, SMP 가격



(b) 실시간 운영에 따른 ESS SOC 변화

[그림 3] VPP의 재생에너지 발전예측량 및 실시간 입찰량

3. 결론

본 논문에서는 ESS를 운영하는 VPP 사업자의 수익 극대화를 위해 Receding Horizon 기반 MILP 최적 알고리즘을 활용한 ESS 기반 실시간 충방전 제어 전략을 제안하였다. 제안된 방법은 $\pm 5\%$ 허용 바운더리와 SMP 변동성을 활용해 수익성을 극대화하고, SOC 제약과 발전-입찰 오차($\pm 5\%$)를 만족시키며 운전 안정성을 확보 하였다. 향후 연구에서는 다수 ESS·DR 및 복수 시장 연계를 통한 VPP 모델 확장을 추진할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 2025년도 산업통산자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20031919)
본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(C5-2421)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

참고문헌

- [1] M. Malinowski and S. Bernet, "Optimal Scheduling of Virtual Power Plant with Flexibility Margin Considering Demand Response and Uncertainties", MDPI Energies, vol. 16, pp. 5833, 2023.