

대용량 PV 연계 배전시스템의 혼잡 완화를 위한 MISOCP 기반 ESS 및 PV 인버터 협조 제어 방안

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

*한국에너지기술연구원 전력시스템연구실

chl333mg@naver.com

Coordinated Control Strategy of ESS and PV Inverters Based on MISOCP for Congestion Mitigation in Distribution Networks with Large-Scale PV Integration

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

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

최근 대규모 태양광 (Photovoltaic, PV) 발전원의 배전시스템 연계가 급격히 증가함에 따라, 전압 초과, 열적 과부하 등의 다양한 계통 혼잡 문제가 발생하고 있다. 본 논문에서는 이러한 혼잡 문제를 효과적으로 완화하기 위해 에너지 저장 장치 (Energy Storage System, ESS)의 충/방전과 PV 인버터의 협조 운영을 위한 최적화 모델을 제시한다. 제안하는 방법은 혼합정수 원뿔 계획 (Mixed-Integer Second-Order Cone Programming, MISOCP) 기반의 조류계산 제약조건과 ESS 운영과 PV 인버터 무효전력 제어의 제약조건을 기반으로 협조를 위한 결과를 도출한다. ESS의 충/방전 제어와 PV 인버터의 무효전력 제어를 동시에 최적화하여, 배전시스템의 열적 및 전압 제약을 만족시키는 것이다. 수정된 IEEE 33버스 테스트 시스템을 통해 제안 방법의 유효성을 검증하였다. 시뮬레이션 결과, 제안하는 협조 방안은 PV 인버터에서 전압 문제를 최대한 완화하면서, ESS는 선로 열적 용량의 완화에 최대한 활용되는 결과를 확인하였다.

1. 서론

전 세계적으로 기후 변화 대응과 에너지 전환을 위한 정책이 강화되면서, 재생에너지 설비의 보급이 빠르게 확산되고 있다. 특히 태양광 (Photovoltaic, PV) 발전은 상대적으로 낮은 설치 비용과 짧은 건설 기간 등 다양한 장점으로 인해 재생에너지 중 가장 높은 비중으로 연계가 이루어지고 있다. 이에 따라 대규모 PV 발전원이 배전시스템에 집중적으로 연계되는 사례가 급증하고 있다. 그러나 배전시스템은 전통적으로 부하 중심 설계에 기반하고 있으며, 긴 선로 길이와 제한된 용량 특성으로 인해 대규모 PV 연계 시 다양한 계통 운영 문제가 발생할 수 있다. 특히, PV 발전량의 시간대별 출력 변동성과 지역 집중성으로 인해, 전압 혼잡 및 선로 용량 초과 등의 문제가 발생하고 있다. 이러한 문제는 주로 선로 길이가 길고 부하 밀도가 낮은 지역에서 두드러지게 나타나며, 계통 안정성과 전력 품질에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

이에 따라, 스마트 인버터를 활용하여 무효전력(Var)을 조정함으로써 계통 전압을 실시간으로 완화시키는 역할로, 에너지 저장 시스템 (Energy Storage System, ESS)은 PV 출력에 의한 역조류를 제어하여 선로 용량 증설을 지연시키는 역할로 주목받고 있다.

본 연구는 혼합 정수 원뿔 계획법 (Mixed-Integer Second Order Cone Programming, MISOCP) 기반의 조류 최적화 [1] 문제를 기반으로 스마트 인버터의 Volt/Var 제어 [2] 제약조건과 ESS 운영 제약조건을 통합하여 최적화 문제를 구성한다. 이를 통해 PV의 스마트 인버터에서는 무효전력 제어를 통한 전압 혼잡 완화를, ESS에서는 충/방전을 활용한 선로용량 완화를 유도한다. 이 최적화 모델을 검증하기 위해 수정된 IEEE 33bus 테스트 계통을 기반으로 PV의 대용량 연계를 가정하여 협조 제어 결과를 분석한다.

2. 최적화 모델

참고논문 [2]에서 정의한 최적 조류계산 모델은 $v = V^2$, $l = I^2$ 으로 전압과 전류의 제곱 term을 하나의 변수로 선형화하여 다음과 같은 최적화 모델을 구성한다. 목적함수는 Eq. (1)과 같이 선로 손실의 최소화를 목적으로 한다.

$$\min C_{loss} r_{ij} \sum_{t \in T} \sum_{ij \in B} l_{ij,t} \quad (1)$$

여기서, C_{loss} 는 선로손실 비용, r_{ij} 는 선로 ij의 저항, $l_{ij,t}$ 는 시간 t에서 선로 ij에 흐르는 전류의 제곱이다.

Eq. (2), (3)은 각각 유/무효전력에 대한 조류를 i-j-k 순서의 버스 위치에서 j노드를 중심으로 정리한 것이다.

$$P_{j,t}^g - P_{j,t}^c + P_{j,t}^{PV} + P_{j,t}^{dis} - P_{j,t}^{ch} \quad (2)$$

$$= \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk,t} - \sum_{i:i \rightarrow j} (P_{ij,t} - r_{ij} l_{ij,t})$$

$$Q_{j,t}^g - Q_{j,t}^c + Q_{j,t}^{PV} \quad (3)$$

$$= \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk,t} - \sum_{i:i \rightarrow j} (Q_{ij,t} - x_{ij} l_{ij,t})$$

여기서, $P_{j,t}$ 는 시간 t에서 j 노드로 공급되거나 소모되는 유효 전력, $P_{ij,t}$ 는 시간 t에서 선로 ij에 흐르는 유효전력, x_{ij} 는 선로 ij의 리액턴스, 그리고 Q 는 무효전력으로 정의는 유효전력과 동일하다.

Eq. (4)는 전압 변동을 나타내는 식이다.

$$v_{j,t} = v_{i,t} - 2(r_{ij}P_{ij,t} + x_{ij}Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)l_{ij,t} \quad (4)$$

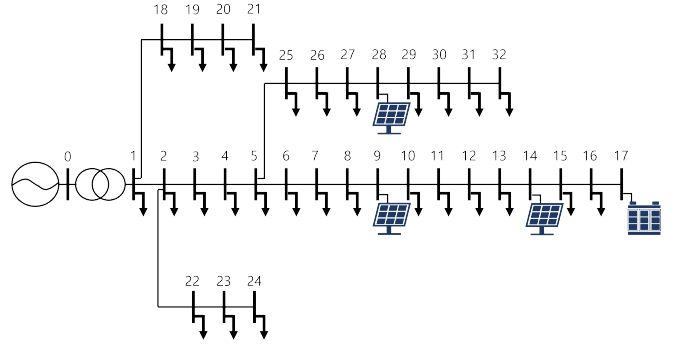
여기서, $v_{i,t}$ 는 시간 t에서 i 버스의 전압의 제곱을 나타낸다.

Eq. (5)는 조류계산의 피상전력 수식 중 lv term이 비선형이기 때문에 원뿔 형태를 이용해 완화하여 convex 형태로 변환한 것이다.

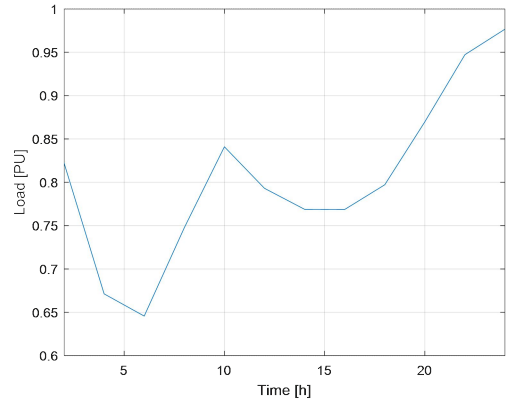
$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ l_{ij,t} - v_{i,t} \end{matrix} \right\|_2 \leq l_{ij,t} + v_{i,t} \quad (5)$$

스마트인버터의 Volt/Var 제어의 제약조건은 참고문헌 [1]을 기반으로 정의한다. Volt/Var 제약조건은 전압의 운영범위에 따라 정수 변수로 구분되며, 이 과정에서 생성되는 bilinear term을 완화시키는 방식으로 제약조건을 선형화시킨다. 다음으로, 선형화를 위해 제곱으로 선형화시킨 v term을 이용해 V값을 도출하기 위해 V값의 근사화를 위한 제약조건을 추가시킨다. 또한 ESS의 운영 제약조건은 일반적인 제약조건을 활용하였다.

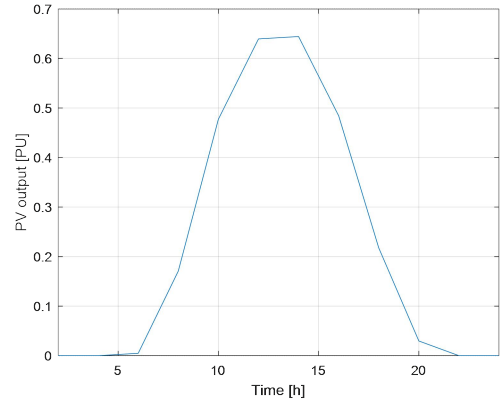
그림 1과 같이 IEEE 33bus 테스트 시스템에서 표시된 PV 위치에 각 7MW의 연계를 가정하였다. 또한 스마트 인버터 기능을 가진 PV는 14번 노드로 가정하였다. 마지막으로 ESS의 용량은 7MWh, 최대 출력은 1MW로 설정하였다. 부하 및 PV의 프로파일은 그림 2 및 3과 같이 가정하였다.



[그림 1] IEEE 33bus 테스트 계통



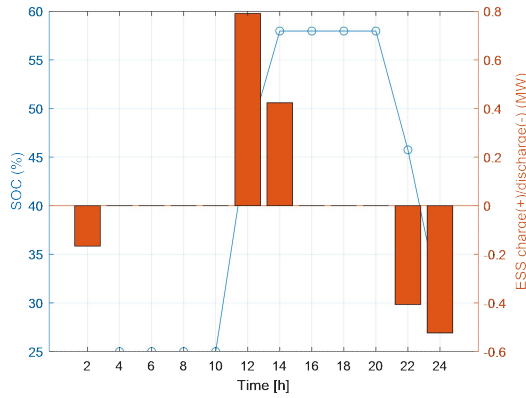
[그림 2] 부하 프로파일



[그림 3] PV 프로파일

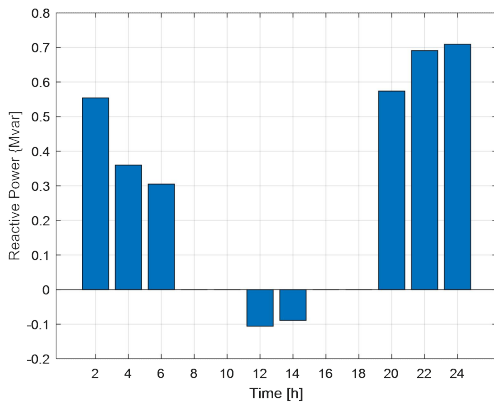
또한 각 선로의 용량은 10MVA, 그리고 전압의 최소/최대값은 0.96/1.02로 가정하였다. 또한 Volt/Var 제어를 위한 각 구간별 전압은 [0.9, 0.94, 0.98, 1.01, 1.06, 1.1]과 같이 설정하였다.

그림 4는 ESS의 최적 스케줄링 결과를 나타낸다. 초기 및 최종 SOC는 30%로 설정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 PV의 출력에 의해 역조류가 선로에 최대로 흐르는 10~14시 사이에 충전을 수행하였고, 최종 SOC를 맞추기 위해 다시 방전을 수행한 것을 볼 수 있다.



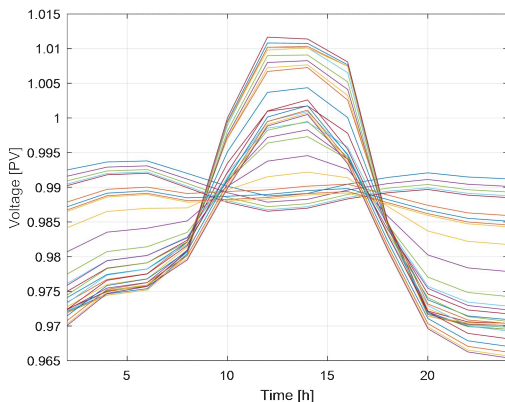
[그림 4] ESS 운영 결과

그림 5는 14번 버스 PV의 무효전력 제어 결과를 나타낸 것이다. PV의 출력이 최대가 되는 구간인 10~14시 사이에는 전압 상승의 완화를 위하여 무효전력을 흡수하였고, 나머지 구간은 전압 강하가 심하여 전압을 공급하였다.



[그림 5] PV 스마트인버터 무효전력 출력 결과 (14번)

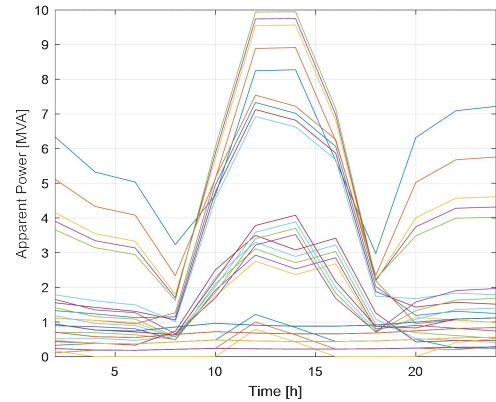
그림 6은 모든 시간대에 대해 모든 구간의 전압 결과를 나타낸 것이다. 모든 전압의 결과가 운영범위인 0.96~1.02 사이에 있는 것을 확인할 수 있다.



[그림 6] 모든 노드의 전압 결과

그림 7은 모든 시간대에 대해 모든 선로의 피상전력을 나타낸

것이다. 피상전력 값 또한 PV의 출력이 10~14시에 최대치인 10MVA 이하인 것을 확인할 수 있다.



[그림 7] 모든 선로의 피상전력

그림 4번과 그림 5번의 ESS의 동작과 PV의 무효전력 공급량을 볼 때, ESS는 선로용량 완화를 위해, PV는 전압 혼잡의 완화를 위해 동작한 것을 확인할 수 있다. 이는 많은량이 연계되어 있는 PV의 스마트인버터에 의한 전압 보상 효과를 고려해야만 ESS가 선로용량 완화만을 목적으로 동작하도록 유도할 수 있다고 분석할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 MISOCP 기반 최적화 모형 기반으로 대용량의 PV 연계 환경 계통에서 스마트인버터의 Volt/Var 제어와 ESS의 충/방전의 협조 제어 시뮬레이션을 진행하였다. 결과적으로 스마트인버터의 Volt/Var 제어에 의한 전압 혼잡 완화 효과가 고려되었을 때, ESS 충/방전 동작이 선로용량 완화에 집중될 수 있음을 확인하였다. 하지만 PV 출력의 불확실성을 고려하지 못했고, Volt/Var 제어의 제약조건 구조상 많은 정수변수의 도입으로 매우 느린 솔루션 도출 속도가 확인되어, 이 문제점을 해결해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(C5-2421)을 지원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

참고문헌

- [1] C. Coffrin, D. Gordon, P. Scott, and R. Bent, "Distribution Grid Optimal Power Flow Integrating Volt-Var Drop of Smart Inverters," IEEE PES General Meeting, vol. 2018, no. 1, pp. 1-5, Aug., 2018.
- [2] S. H. Low, "Branch Flow Model: Relaxations and Convexification—Part I," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 3, pp. 2554-2564, Aug., 2013.