

Open source 계통해석 도구를 이용한 해상풍력단지 무효전력 보상설비 용량산정에 관한 연구

양재영*, 김남규*, 권영진*
(주)효성 중공업연구소*

A Study on Capacity Sizing of Reactive Power Compensation Equipment for Offshore Wind Farms Using Open-Source Power System Analysis Tools

Jae-Young Yang*, Nam-Kyu Kim*, Young-Jin Kwon*
Hyosung Power & Industrial Systems R&D Center

Abstract - 본 논문은 신재생 발전단지의 무효전력 공급능력 평가 방법을 제시하고, Python 기반 오픈소스 계통해석 도구(PyPSA)를 활용하여 이를 검증하였다. 다양한 운전 조건에서 조류해석을 수행하여 연계점 기준 무효전력 공급능력을 산정하고, 단지 내부 전압 제약을 동시에 고려하였다. 300MW급 해상풍력단지 사례연구를 통해 보상설비 용량을 산정하였으며, PSS/E와의 비교를 통해 해석 신뢰성을 확인하였다.

1. 서 론

최근 신재생에너지 발전원의 대규모 확대와 함께 전력계통의 운영 특성은 빠르게 변화하고 있으며, 특히 풍력 및 태양광과 같은 신재생 전원의 비중 증가는 계통의 전압 안정도와 무효전력 관리의 중요성을 증가시키고 있다. 전통적인 동기발전기 중심의 전력계통과 달리, 신재생 발전원은 동기발전기보다 무효전력 공급능력이 제한되어 계통 운영자의 관점에서 안정적인 전압 유지와 계통 신뢰도 확보를 위해 정량적 평가가 요구된다.

국내 전력계통에서도 이러한 변화에 대응하기 위하여 신재생 발전기의 계통 연계 시 충족해야 할 다양한 기술기준을 제시하고 있으며, 그중 무효전력 공급능력은 계통 전압 유지 및 안정도 확보에 핵심적인 요소로 평가된다. 무효전력 공급능력은 계약용량 대비 일정 비율 이상의 무효전력 공급을 요구하는 규정으로 신재생 발전단지 설계 및 운영에 중요한 제약조건으로 작용한다.

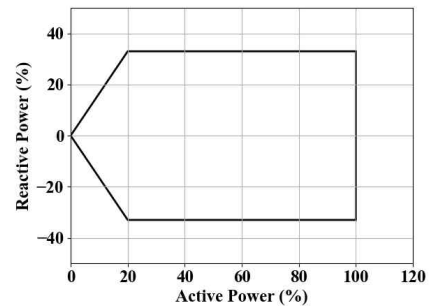
무효전력 공급능력의 평가는 각 운전점에서 연계점 기준의 무효전력 공급 가능 최대치를 산정하는 과정이 포함된다. 또한 단지 내부 설비의 무효전력 출력이 내부 계통 전압에 미치는 영향을 동시에 고려해야 하므로, 조류해석 기반의 정밀한 계통해석 접근이 요구되며, 정밀한 해석을 위해 PSS/E, PowerFactory 등 상용 소프트웨어를 활용한 해석이 활발히 수행되었다[1].

상용 소프트웨어의 높은 라이선스 비용 등으로 인해 계통해석 도구를 이용하기 어려운 조건에서도 Python 기반의 오픈소스 source 전력계통 해석 도구를 활용하여 계통해석을 수행할 수 있으므로[2] 본 논문에서는 Python 기반 오픈소스 계통해석 라이브러리인 PyPSA를 활용하여 신재생 발전단지의 무효전력 공급능력을 평가하고, 해상풍력단지를 대상으로 한 사례연구를 통해 그 적용 가능성을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 국내 무효전력 공급 능력 규정

신재생 발전기가 전력계통에 연계되기 위해서는 계통에서 요구하는 기술기준을 만족해야 한다. 국내 전력계통에서는 신재생 발전기 송전계통 연계 기술기준에서 계통연계유지, 무효전력 공급능력, 유효전력 제어능력, 무효전력 제어능력, 발전단지 제어능력, 통신, 감시 및 계량설비, 설비 특성자료에 대한 규정을 제시하고 있다. 이 중 무효전력 공급능력은 발전기 또는 발전단지가 정상 운전 전압범위에서 유효전력 출력에 따라 일정 수준 이상의 무효전력을 계통에 공급할 수 있는 능력을 평가하는 항목으로 신재생 발전기 또는 발전단지는 이에 따라 무효전력 공급능력을 그림 1의 기준에 따라 확보해야 한다[3].



〈그림 1〉 국내 무효전력 공급능력 규정

무효전력 공급능력 규정에 따르면, 연계점을 기준으로 계약된 유효전력의 20% 이상 출력 시에는 계약용량의 33% 이상의 무효전력을 출력할 수 있는 능력을 요구하며, 20% 이하의 유효전력 출력에는 무효전력 공급능력 요구치가 선형적으로 감소하는 형태이다. 신재생발전기가 인버터 용량 및 제어방식 등의 사유로 자체적으로 그림 1에서 정한 무효전력을 공급하기 어려운 경우 순동 무효전력 보상장치(STATCOM 또는 SVC)를 구비하여 무효전력을 공급하여야 할 것을 명시하고 있다.

단지형 전력 설비에서는 계통 연계점이 발전기로부터 원거리 에 위치하기 때문에 발전기와 연계점 간 송전선로의 유도성 리액턴스 성분으로 인한 무효전력 손실이 발생하거나, 해상풍력단지의 경우에 장거리 해저케이블의 높은 용량성 리액턴스 성분으로 인해 과도한 무효전력 공급이 발생할 수 있다. 따라서 발전단지 규모의 전력계통 해석을 통해 이를 사전에 분석할 필요가 있다.

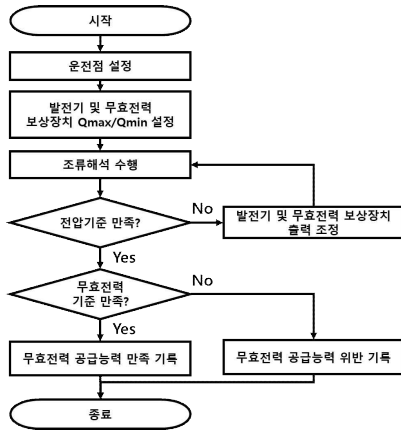
2.2 계통 해석 프로그램을 이용한 검토 절차

전력계통 해석을 수행하기 위한 도구로써 PSS/E, PowerFactory, PSCAD와 같은 다양한 상용 소프트웨어가 존재한다. 하지만, 무효전력 공급능력 검토는 조류해석을 기반으로 수행되기 때문에 본 논문에서는 Python기반 오픈소스 라이브러리인 PyPSA를 이용하여 조류해석을 수행하였다.

무효전력 공급능력 평가는 표 1의 조건을 조합한 운전점에서 이루어지며[3], 각 운전점에서 연계점 기준의 최대 무효전력 공급량을 평가한다. 단지 내 각 설비의 무효전력 출력 수준에 따라 단지 내 계통의 전압이 허용 가능한 수준을 벗어날 수 있으므로, 각 설비의 무효전력 공급은 단지 내 계통의 전압을 벗어나지 않는 수준에서 검토해야 한다. 따라서 본 연구에서 각 운전점의 신재생 발전단지의 무효전력 공급능력 평가는 그림 2와 같은 절차로 수행하였다.

〈표 1〉 국내 무효전력 공급능력 평가 시험 조건

P _{POM}	초기 Q _{POM}	초기 V _{POM}	초기 f _{POM}
0~100% (5%단위)	Q _{MAX} , Q _{MIN}	0.9~1.1pu (0.05pu단위)	60Hz



〈그림 2〉 운전점별 무효전력 공급능력 검토 절차

2.3 사례연구

본 연구에서는 해상풍력 단지를 대상으로 무효전력 공급능력 평가를 수행하였다. 해상 풍력단지는 장거리 해저케이블로 인해 대용량의 리액터와 STATCOM 등 다양한 무효전력 보상설비를 고려한 해석이 요구된다.

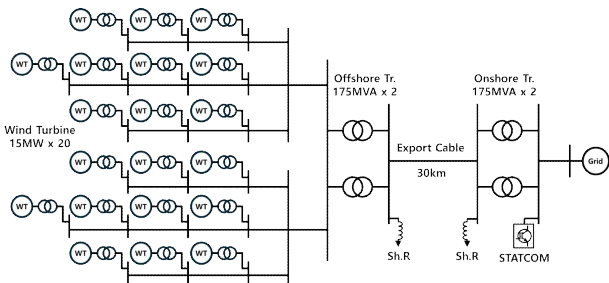
Python 기반의 계통해석 라이브러리를 이용하여 무효전력 공급능력 평가를 원활히 수행하기 위해 그림 3과 같은 인터페이스를 구성하였다. 해상풍력단지를 구성하는 요소로써 풍력발전기, 육상변전소, 해상변전소, 내부망 구조 등을 입력하여 계통을 생성하고 무효전력 공급능력 검토를 수행한다.



〈그림 3〉 무효전력 공급능력 검토 입력 창

2.3.1 조류해석 검토

무효전력 공급능력 검토를 위해 임의의 해상풍력 단지 계통을 구성하였다. 발전기 용량은 단위가 15MW로 총합 300MW이며, 해상변전소에서 육상변전소로 이어지는 인출 케이블의 길이는 30km로 설정하였다. 장거리 인출 케이블의 커패시턴스 성분을 상쇄하기 위해 양단에 분로 리액터를 설치하였고, 연계점에서 무효전력 공급을 위한 STATCOM을 설치하였다.



〈그림 4〉 해상 풍력발전단지 구성

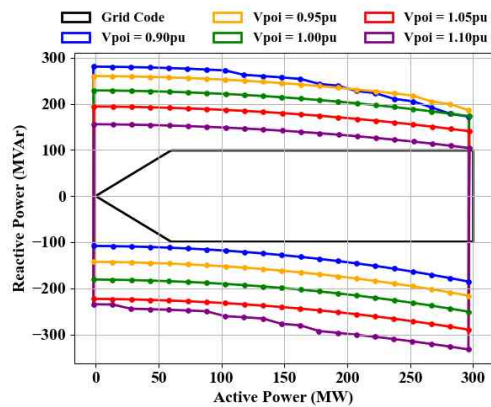
오픈소스 계통해석 도구와 상용 계통해석 소프트웨어인 PSS/E를 이용하여 그림 4와 같이 계통을 구성하고 각각 조류해석을 수행하여 오픈소스 계통해석 도구의 해석 정확도를 검증하였다. 주요 선로의 조류해석 결과를 표 2로 요약하였다.

〈표 2〉 오픈소스 계통해석 도구 해석 정확도 검증 결과

위치	유효전력 (MW)			무효전력 (MVar)		
	Open source	PSS/E	오차율	Open source	PSS/E	오차율
POM	296.78	296.78	0.000%	-136.80	-136.80	0.000%
인출선로	298.57	298.57	0.000%	-62.96	-62.96	0.000%
콜렉터1	149.89	149.89	0.000%	6.40	6.40	0.001%
콜렉터2	149.89	149.89	0.000%	6.39	6.40	0.002%

2.3.2 무효전력 보상설비 용량산정

그림 5는 그림 4의 계통에서 그리드 코드를 만족하도록 무효전력 보상설비의 용량을 변경하여 무효전력 공급능력을 검토한 결과이다. 단지 내 계통의 전압을 함께 검토하여, 과·저전압이 발생하는 경우에 전압 개선에 효과적이고 연계점의 무효전력에 영향이 적은 방향으로 발전기의 출력 및 보상 장치의 용량을 조정하였으며 POI 전압 0.9pu, 0.95pu, 1.1pu에서 전압에 따른 무효전력 출력 제한이 발생하여 출력 조정이 수행되었다. 검토 결과, 리액터를 해상과 육상 측 각각 50MVar, STATCOM을 130MVar 만큼 추가하였을 때, 국내 그리드 코드에서 제시하는 기준을 만족함을 확인하였다.



〈그림 5〉 무효전력 공급능력 검토 결과

3. 결 론

본 논문에서는 오픈소스 계통해석 도구인 PyPSA를 이용하여 국내 그리드 코드에서 제시하는 무효전력 공급능력 시험을 수행하고 기준을 만족하는 무효전력 보상설비의 용량을 산정하였다. 사용된 오픈소스 계통해석 도구는 상용 계통해석 소프트웨어인 PSS/E와 비교하여 동일한 수준의 해석 결과를 보였으며, 높은 라이선스 비용 또는 프로그램 운용 난이도로 인해 전문 계통해석 프로그램을 사용할 수 없는 조건에서 무효전력 공급능력을 평가할 때 사용할 수 있을 것으로 판단한다.

해상풍력단지의 무효전력 공급능력 기준을 만족하기 위한 무효전력 보상설비 용량산정 시에는 연계점 기준의 공급용량뿐만 아니라 단지 계통의 전압에 한 고려가 필수적이며, 그에 따라 계통해석 결과에 따른 적절한 설치 위치 선정 및 용량산정을 수행해야 한다. 단지 내 전압과 연계점의 무효전력 공급능력을 만족하는 보상설비 조합은 다양하게 도출될 수 있으므로, 비용을 최소화할 수 있는 최적화 기법이 요구될 수 있다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] 최진호, 정재엽, 문승일, 이규섭, “신재생발전기 송전계통연계 기술기준에 따른 무효전력 보상량 산정에 관한 연구”, 전기학회 논문지, vol. 74 no. 2, pp. 238~243, 2025
- [2] Brown, T., Hörsch, J. and Schlachtberger, D. “PyPSA: Python for Power System Analysis”, Journal of Open Research Software, 6(1), p. 4., 2018
- [3] 한국전력공사, “신재생발전기 송전계통 연계 기술기준”, 2024