풍력발전 통합 지원을 위한 에너지 저장 시스템

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 신효순
(0637shin@reseat.re.kr)

1. 머리말

○ 풍력의 간헐성 때문에 풍력발전을 전력망에 통합하는 것은 고유한 변동성과 불확실성을 가져온다. 풍력 통합의 시스템 안정성과 신뢰성에 미치는 영향은 침투 수준에 달렸다. 신뢰성 관점에서, 비교적 낮은 침투 수준에서는 순 부하 변동은 현존하는 부하 변동에 비교할 만하고 열이나 수력 발전소 같은 전통적 발전기(CG: Conventional Generator)가 추가 운영 유보의 필요 없이 충분한 부하 추적 능력을 가진다.

○ 풍력 침투 수준이 증가하면서 풍력 생산의 급작스러운 큰 변화, 무작위 실패 및 돌풍으로 인한 부하 변동 기간 동안 전념하는 CG의 반응 시간은 충분히 짧아야 하고 더 많은 운영 유보가 필요하다. 에너지 저장 시스템(ESS: Energy Storage System)은 유연한 충전과 방전 능력을 갖는다. ESS는 전력 발전의 부하를 맞추기 위해 사용될 수 있고, 보조 서비스를 통해 전체 전력망의 평형을 위해 사용될 수 있다.

2. 에너지 저장 기술

○ 양수 수력 저장(PHS: Pumped Hydro Storage)

- PHS는 이용 가능한 가장 성숙된 에너지 저장기술이다. 120GW를 넘는 용량으로 전 세계에 설치된 전기 저장 용량의 거의 95%를 차지한다. 전통적 PHS는 두 개의 저수지로 구성된다. 비교적 높은 고지대의 수체(water body)가 위치 에너지를 나타낸다. 최대 부하가 아닌 시간에 낮은 저수지에서 높은 저수지로 물을 끌어 올려서 충전 과정이 되고, 방전 과정에서는 위의 저수지로부터 물이 수력 터빈을 통해

흘러내려 발전기에 연결되어 전기에너지를 생산한다.

- 풍력 발전 통합의 주 응용은 시간차, 주파수 제어, 비회전 예비 공급을 통한 에너지 관리이다. 느린 응답 때문에 PHS는 풍력 변동을 억제하기에는 부적당하다.

○ 압축 공기 에너지 저장(CAES: Compressed Air Energy Storage): 전기 컴프레서가 공기를 압축하여 지하 구조물(소금 동굴, 폐광, 암반 구조물)이나 압력 용기나 파이프의 지상 시스템에 저장된다. 필요할 때에 압축 공기가 방출되고 천연 가스와 혼합하여 개조된 가스 터빈에서 팽창한다. 고동력과 에너지 용량률 때문에 PHS와 유사하게 에너지 관리를 위하여 풍력 단지에 사용된다.

○ 플라이휠 저장 에너지(FES: Flywheel Energy Storage): 회전 에너지가 대규모 회전 실린더인 가속된 로터에 저장된다. 에너지가 회전체를 일정 속도로 유지하여 프라이 휠에 저장된다. 방전 과정 중 플라이휠은 에너지를 방출하고 기계를 발전기로 돌린다. 플라이휠의 주 장점은 특출한 사이클 안정성, 완전 충전 방전 사이클을 제공하는 긴 수명, 작은 유지비, 고전력 밀도 및 고효율이다.

○ 배터리 에너지 저장 시스템(BESS: Battery Energy Storage System): 배터리는 두 전극에 적용된 전위 아래서 내부적 화학 반응에 의하여 충전된다. 반응은 가역적이고 배터리가 방전을 위해 흡수된 에너지를 전달한다. 높은 전력 및 에너지 밀도 때문에 BESS 건설은 짧은 소요 시간과 기술 모듈성에 의하여 촉진된다. 유동 배터리가 MW급으로 건조되었고 미래에 대규모 응용을 위하여 더 중요한 역할을 할 수 있다.

○ 초전도 자기 에너지 저장(SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage): SMES는 매우 신속히 반응한다. 요구된 전력은 거의 순간적으로 이용 가능하다. SMES는 부하 평준화와 전력 안정 장치를 위한 전력 저장 시스템으로 매우 유망하다. SMES는 다중 DC 연결로 결합될 수 있다. 이 경우 다중 시스템은 SMES 코일을 위한 전력 조절 시스템으로 사용된다.

○ 슈퍼 커패시터(SC: Super Capacitor): SC는 비상하게 낮은 내부 저항 때문에 거의 무한한 사이클 안정성과 매우 높은 전력 밀도, 신속한 충·방전 능력을 가지고 있다. 다른 장점은 넓은 온도 범위와 다양한 환경에서 내구성, 고 신뢰성, 무보수 및 긴 수명과 운영이다. 효율은 약 90%이고 방전 시간은 수 초에서 수 시간 범위이다.

3. 풍력 통합 지원을 위한 ESS 응용

○ 풍력발전 통합에 관련된 ESS 응용은 그것이 다른 이해 관계자인 풍력 단지 소유주, 전력망 운영자 및 에너지 소비자를 위한 역할 측면에서 요약할 수 있다.

○ ESS의 발전 측 역할: 풍력 발전 통합의 주 도전은 전력 간헐성, 경사율 및 풍력 단지 출력의 제한이다. ESS의 발전 측 역할은 ESS가 전통적 발전소같이 제어될 수 있는 것처럼 풍력 에너지를 보내기 위한 풍력 단지의 전력망 친절성을 개선하는 것이 목적이다.

○ 시간 이동: 바람의 확률론적 특성 때문에 풍력 전력 생산은 보낼 수 없는 자원이고 어떤 때는 반 첨두 특성, 즉 비 첨두 수요 기간에 고풍력 전력이나, 첨두 수요 동안 저 풍력 전력을 나타낸다. 시간 이동은 저수요 기간에 여분의 풍력에너지를 저장하고, 고수요 기간에 전력망에 에너지를 보낼 준비가 되어 있다.

○ 출력 평준화: 풍력 전력의 고유의 변동성이 주파수와 전압의 변동을 야기할 수 있다. ESS가 시스템 안정성을 유지하기 위하여 이들 변동성을 없앨 수 있다. 따라서 ESS의 출력 전력은 출력이 삐죽삐죽한 동안 초과 에너지를 흡수하고, 출력 하강 동안 에너지를 방출하기 위하여 신속히 조절될 필요가 있다.

○ 송전 이용 효율: 풍부한 풍력 자원이 현존 고용량 송전선에서 멀리 떨어진 시골 지역에 흔히 위치하고 있다. 송전 제약 때문에 생산된 에너지가 부하에 전달되지 않을 수가 있다. 추가 ESS가 송전 혼잡을 완화하고 송전과 분포 격상을 연기하거나 피할 수 있다.

4. 에너지 저장 시스템 계획

○ ESS 종류 선택

- 여러 시간 크기에서 풍력 변동 밀도가 특정 응용 목적을 달성하기 위한 ESS 선택의 핵심 요소이다. 수분에서 수 시간까지 범위의 저주파 변동은 전력 시스템의 총 예비전력과 에너지 송전에 관계가 있는 반면, 수분에서 수초 범위의 고주파 변동은 전력 시스템 변동 제어에 영향을 준다. 지역 풍력 데이터에 근거해서 해당 전력 스펙트럼 밀도(PSD: Power Spectrum Density)가 만들어진다. PSD 분석을 통해 충·방전 기간 범위, 전력과 에너지 밀도 급을 포함한 ESS의 기술적 요구가 결정될 수 있다.

- 현대 풍력 단지의 정격 용량은 수 백 MW에 달할 수 있다. 에너지 관리 목적을 위해 BESS, PHS 및 CAES와 같은 대규모 저장 매체가 적용되어야 한다. PHS와 CAES는 지형학적 제약 때문에 제한되므로 BESS가 고전력과 에너지 밀도 때문에 대규모 ESS 응용을 위한 더 경쟁적 선택으로 고려된다.

○ ESS 크기: 풍력 변동을 평활하게 하기위해 1년간의 운전 데이터가 분석되고 주어진 풍력 단지의 20% 정격 전력을 ESS를 위한 정격 전력으로 4시간 충·방전을 선택하기로 결론을 내렸다. 다른 응용에서는 지난 몇 년 동안의 댐핑 제어 설계의 축적된 경험에 따라 시스템 용량의 대략 25%가 일반적 선택이다.

○ 에너지 저장 부지 선정

- 단계적 절차가 네트워크 제한에 재생 에너지 변동의 영향을 완화 할 수 있는 최소 수의 저장 노드 및 전체 네트워크 저장을 추구하기 위해 도입되었다. 풍력 투입 노드 대신에, 중요한 송전선의 끝 또는 중간에 있는 다른 노드가 혼잡 제어의 높은 수준을 가지고 있었다.

- 최고의 풍력 침투를 허용하는 최적 저장 위치가 여러 위치 시나리오의 계산에 근거해서 선택되었다. 시뮬레이션 결과는 최적의 저장 분포가 송

전 용량을 효과적으로 이용하고, 송신 확장이 불필요한 것을 입증했다.

5. 에너지 저장 시스템 운영 및 제어

○ 풍력 예보 오류는 확률 변수로 고려된다. ESS는 풍력 단지와 ESS의 최대 이득을 추구하면서 확률적 프로그래밍에 근거해서 시간대로 조정된다. 온라인 운영 전략의 목적은 가능한 한 주어진 발전 스케줄을 따르는 것이다.

○ 통계적 접근이 풍력과 BESS 하이브리드 시스템의 전력 출력을 결정하기 위해 제안되었다. 새로 개발된 송전 전략은 BESS가 에너지 저장 가능성을 최대화 하기위해 완전한 충·방전 사이클을 통하는 것을 보증한다.

6. 맺음말

○ ESS는 대규모 풍력 통합을 갖는 미래 전력 시스템의 신뢰성과 안정성 도전을 다루기 위한 효율적인 해법으로 고려된다. 다른 기술적 특징을 가진 다양한 ESS들이 시장에서 이용 가능하다. ESS들은 특정 풍력단지, 전력망 운영자 또는 고객이 요구하는 응용들을 위하여 사용될 수 있다.

○ 발전 측면에서 ESS는 풍력단지가 전통적 발전소가 제어될 수 있는 것 같이 풍력에너지를 보내기 위하여 풍력단지의 전력망에 친절을 개선하기위한 목적일 수 있다. ESS의 전력망 측 임무로 그것이 전체 전력망의 변동성과 불확실성을 경감시키기 위한 보조서비스를 제공할 수 있다. 수요자 측 역할로 집합체적인 EVPP(Electric Vehicle Virtual Power Plant)가 차량 소유자와 전력망 운영자 모두의 요구를 충족할 수 있다.

○ ESS 계획을 위해서는, ESS 종류를 적절히 선택하고 ESS의 크기와 장소를 결정하는 것이 중요하다. 전력과 에너지 용량을 포함한 ESS의 크기는 역사적 풍속 분포, 풍력 예측 오류에 근거한 확률적 방법을 포함한 여러 방법론에 의하여 결정될 수 있다.

○ 크기 문제는 다른 비용 함수를 가진 최적화 문제로 공식화 될 수 있다. 지형학적 제한이 없는 ESS의 장소는 고제어 가능성을 달성하기 위해 현지나 다른 장소에 설치될 수 있다. 중대한 송전선의 끝이나 가운데 노드는 혼잡 관리에 높은 영향을 준다.

○ ESS 운영과 제어의 최근 연구는 풍력 단지와 ESS의 일일 송전 계획과 변동 경감에 중점을 둔다. 풍력 예보 오류, 기술적 제약, 시장 규칙, 에너지 가격을 포함한 다른 요소들이 단일 또는 다중 ESS를 위한 최적 운영 전략을 결정하기 위하여 고려된다.

○ 출력의 평탄한 목적을 위하여 고주파 성분은 ESS에 의하여 여과되고 보정된다. 시간 상수가 평탄한 효과, 요구되는 ESS 전력 및 용량률 가운데 균형을 유지하기 위한 핵심 요소이다.

출처 : Haoran Zhao, Qiuwei Wu, Shuju Hu, Honghua Xu, Claus Nygaard Rasmussen, “Review of energy storage system for wind power integration support”, *Applied Energy*, 137, 2015, pp.545~553

◁ 전문가 제언 ▷

○ 풍력에너지 개발의 급격한 성장과 풍력발전 침투 수준의 증가로 풍력에 내재하는 변동성과 불확실성 때문에 안전하고 신뢰성 있게 고풍력 침투 전력시스템을 운영하는 것은 큰 도전이다. 유연한 충·방전 특성으로 인해 에너지저장 시스템(ESS: Energy Storage System)은 특정 풍력 단지 뿐 아니라 전체 전력망에도 유연성과 제어 가능성을 향상시키기 위한 효율적 도구로 고려된다.

○ 이 글은 다른 측면에서 풍력 통합 지원을 위한 최첨단 기술을 검토한다. 첫째, 현대적 ESS 기술과 풍력 통합 지원을 위한 가능한 응용이 소개되었다. 둘째, ESS의 종류, 최적 크기 및 장소의 선택을 포함한 풍력 통합을 위한 ESS 응용에 관계되는 계획 문제가 검토되었다.

○ 한국 에너지 기술원의 전창수 등은 전극, 이온 교환막 등 전지의 성능에 중요한 역할을 하는 레독스 흐름전지의 구성 요소로 이 소재들의 전기화학적 특성에 대한 연구를 수행하였으며 단셀 제조와 특성 평가를 통해 1kW급 바나듐 레독스 흐름전지 스택을 설계 및 개발하였다.

○ 영국 에너지 시장에서 바나듐 산화·환원 반응 유동배터리가 50MW 풍력발전단지에 적용되었다. ESS가 주파수 응답을 제공하는 풍력발전 단지 운영자에 수익성이 있는 것을 제안했다. ESS가 풍력발전 단지의 최대 사용 에너지에 가까운 발전을 할 수 있는 전력 예비율을 제공한다.

○ 배터리 저장시스템은 풍력발전과 태양광 전지의 변동을 평탄화 할 수 있다. 이 시스템은 풍력발전과 태양광 전지의 전형적인 간헐성 에너지 발전을 저장하는 메커니즘을 제공하여 사용자에게 일관된 전력을 제공한다. 신속한 응답 능력이 재생에너지 발전의 격변 교체를 완화시키고 송전 중 주파수 조정 역할을 한다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.