

풍력발전 전력망 연계를 위한 ESS 운용 전략

송 화 창 | 서울과학기술대학교
이 장 호 | 군산대학교



I. 서 론

최근 심각한 기후 변화의 문제는 인류의 화석연료 사용의 증대에 따른 온실가스 배출의 증가로 인한 것으로 온실가스 배출을 통제하지 않으면 안된다는 세계적인 공감대

2030년 온실가스 감축목표

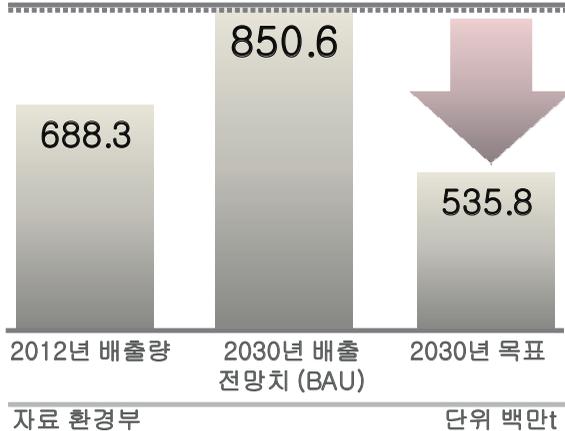


그림 1. 2030년 온실가스 감축목표

가 형성되어, 2015년 제21차 유엔기후변화협약 당사국총회 (COP21)에서 신기후변화체제가 최종타결되었다. 이 파리협약에 참여한 우리나라는 2030년까지 온실가스 배출전망치¹⁾ (BAU) 37% 감축²⁾을 목표로 삼고 있다. 이러한 온실가스 목표를 지키기 위한 수요관리, 전원믹스개선, 연료전환 등 다각적인 대책방안 수립이 필요하나, 기본적으로 화석연료 사용을 줄이고 신재생에너지원의 투입을 획기적으로 증대시킬 필요가 있다.

이와 관련하여 향후 5년간 신재생에너지 설비 투입을 포함한 에너지신산업이 더욱 활성화될 것으로 예상되고 있으며 신재생에너지공급의무화제도 (RPS, renewable portfolio standard) 상의 에너지공급의무 비율이 상향조정되었다. 또한 1MW이하 소규모 신재생에너지원의 무제한 계통접속이 가능해짐에 따라 신재생에너지원의 계통 수용률의 증대시킬 수 있는 방안에 대한 기술적 연구개발이 필수적으로 요구된다. 본고에서는 여러 가지 이용가능한 신재생에너지원 중 바람 에너지를 이용한 풍력 발전의 전력망 연계 시 적용될 수 있는 에너지 저장 시스템 (ESS, energy storage systems)의 운영전략에 대해서 주로 설명한다.

1) BAU (Business As Usual): 온실가스 감축을 위해 아무런 노력을 하지 않았을 경우 예상되는 온실가스 배출량

2) 실제 25.7%만이 순수 감축이며, 11.3%는 국제탄소시장 이용 계획

II. 풍력발전 연계를 위한 ESS 운용 전략

기존에 신재생에너지원의 수용률 및 발전력을 제한하는 가장 중요한 이유는 전력계통 신뢰도 (power system reliability) 유지 때문이다. 풍력발전설비 투입에 대한 의사결정 시 필요한 정보는 투입 개소에서의 바람에너지 자원에 해당하며, 그 이유는 바람에너지 자원이 투자비용 회수 기간을 결정하는 중요한 요소이기 때문이다. 따라서 바람에너지 자원이 풍부한 지역의 풍력설비 투입의 요구가 많을 수 밖에 없으며, 풍력발전 용량 증대 및 이에 따른 출력 변동성이 지역적인 관점에서 계통 신뢰도 위반을 야기할 수 있다. 기 알려진 바와 같이 [1], 실제 풍력 발전량으로부터 산출된 풍력 출력의 시간당 값에서 관찰된 양과 음의 변화 빈도를 살펴보면, 단일 풍력발전기의 경우 용량의 60%까지 시간단위의 변동성을 나타내며 풍력발전단지

20% 정도의 변동성을 보인다. 이러한 공통모션 효과 (common bus effect)에도 불구하고 UK 전력망의 경우 [2], 풍력설비 투입이 증대될수록 전체 시스템 측면에서의 신뢰도를 유지하기 위한 추가적인 대책에 따른 운영 비용의 페널티가 요구된다고 보고되었다. 이를 표 1에서 설명하고 있다.

따라서 향후 풍력발전을 포함한 신재생에너지원의 전력망 투입이 증대되는 상황에서 ESS는 계통 신뢰도 유지 측면에서 큰 역할을 감당할 것으로 예상되고 있다. EPRI 보고서 [3]에서 전력망 연계 풍력발전을 위한 ESS 적용 방안에 대하여 설명하고 있으며, i) 송전 curtailment 완화, ii) 에너지 시간 이동, iii) 풍력 예측 hedging, iv) 전력망 주파수 보조, v) 변동성 억제 등을 포함하고 있다.

전력망의 유효전력 균형을 유지하기 위해서는 다음과 같은 물리적인 제약이 고려되어야 한다. 그것은 i) 부하 matching,

- ii) 열용량 제약 위반 억제,
- iii) 다른 발전설비가 얼마나 빠르게 투입될 수 있는 지에 대한 것이다. 이와 같은 물리적 제약을 만족시킨 후 경제 급전과 함께 기존 발전기보다 신재생에너지원의 우선권 부여 등의 급전 원칙을 고려할 필요가 있다. 미국의 경우 풍력발전 제약의 가장 큰 이유는 대규모 풍력발전단지로부터 제한적인 송전선로 열용량에 해당한다.

표 1. 풍력설비 투입 증대에 따른 대책방안 및 운영 페널티

구간	풍력 투입 비율	대책방안	운영 페널티
구간1	0 - 5%	필요 없음	무시
구간2	5 - 10%	풍력에너지 저감이 요구되는 경우 발생; 화력발전소의 부분 부하 운전 상황 발생	0.1 - 0.2p/kWh
구간3	10 - 20%	구간 2에서 추가적으로, 풍력 balance를 위해 양수 또는 수력 발전의 더 많은 사용 필요	0.2 - 0.8p/kWh
구간4	20 - 50%	비용에 의존적으로 더 많은 에너지 저장 설비, 피크 대응 발전소 설치 또는 노후 발전설비 유지 (추가적인 에너지 저장 설비는 시스템 운영에 이익이 됨)	> 0.8p/kWh

단위: UK pence

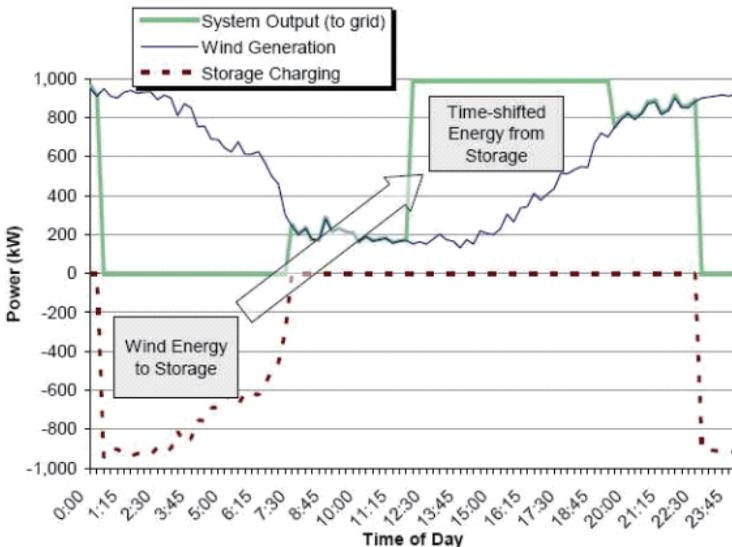


그림 2. 풍력발전의 time-shifting 모델 [5]

부터 제한적인 송전선로 열용량에 해당한다. 대규모의 풍력발전단지는 부하집중지역에서 원거리에 위치해 있으므로 발전설비용량이 크고 송전용량이 이보다 낮은 경우가 발생될 수 있다. 송전용량 제약의 완화를 위해 ESS가 적용될 수 있다. 발전력이 높을 경우 ESS의 SoC (state of charge) 수준을 낮게 유지시키며 보다 경제적인 방전이 될 수 있도록 운용한다.

일일 부하에서 낮은 부하수준에서 충전하고 높은 부하수준에서 방전하는 형태로 운영하는 방식을 에너지 시간 이동 가능하며, ESS의 용량을 최대한으로 활용하는 방식이

다. 경부하 상황에서 풍력발전이 ESS를 충전하는 데 충분하지 않을 경우 외부 전력망으로부터 전력을 구입할 수도 있다. 아래 그림은 풍력발전의 시간 이동 모델 (time-shifting model)을 설명하고 있다. 낮은 부하수준에 해당하는 새벽시간대에서 최대 출력을 나타내는 풍력 에너지원은 신재생에너지원 중 시간 이동 방식으로 ESS와 융합할 수 있는 좋은 에너지 원으로 볼 수 있다.

풍력 예측 hedging (FH, forecast hedging)은 전력시장 모델과 밀접한 관련이 있는 운영기능이다. 풍속저하로 풍력발전 단지가 발전력 입찰량을 맞추지 못하는 경우 페널티 완화를 위한 것이다. 만약 delivery 시점의 몇 시간 전에 해당 시점에서의 출력량을 입찰하는 방식의 시장에서 간헐적이며 변동성을 가지고 있는 풍력은 단기 변화에 의한 위험 (risk)이 존재한다. 이러한 상황에서 ESS는 중요한 역할을 할 수 있으며 심각한 페널티가 가해지는 시장환경에서 ESS의 가치는 더욱 커질 수 밖에 없다.

최근의 신재생에너지원을 위한 ESS 기능 중에 하나에 해당하는 capacity firming (CF)이 FH 운영기능과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. CF의 목적은 신재생에너지원과 ESS의 출력의 합이 일정하도록 유지하는 것이다. 신재생에너지원의 "firmed capacity"는 과발전에 따른 송전선로 투입의 의사결정에 활용될 수 있다. 신재생에너지와 ESS를 연계할 경우 단지 출력이 일정하게 되어 건설비용이 필요한 변압기, 발전기

등에 대한 투자 필요성을 줄이거나 상쇄시킬 수 있다.

전력망 주파수 보조 (GFX, grid frequency support)는 주파수 편차 억제 기능과 유사하며, 발전과 부하의 심각한 불균형이 발생하는 고장 발생 시 정상범위로 주파수를 유지시키는 기능에 해당한다. 풍력발전설비 용량이 높은 계통의 경우 급격한 풍속의 저감은 계통 주파수를 저감시키는 심각한 동요 중의 하나로 고려되어야 한다. 일반적으로 풍력발전설비 투입이 많은 계통의 경우 동일한 수준의 발전력 탈락에 따른 주파수 편차가 커지는 것으로 알려져 있으며, 이것은 기존 발전력을 풍력이 대체할 경우 시스템 등가 관성 정수 (inertia constant)가 감소될 수 있기 때문이다. 빠른 응답속도를 갖는 ESS를 적용할 경우 기존의 발전기보다 빠른 응답을 제공할 수 있으며, 고장 초기의 주파수 저감비를 줄일 수 있는 장점이 있다. 풍력발전단지 제어에 관한 최근의 연구 중 심각한 주파수 저감 상황에서 풍력발전단지가 가지고 있는 회전 운동에너지를 계통에 주입하여 전력망 주파수 보조 기능을 수행하는 내용의 연구가 수행되고 있다.

변동성 억제 (FS, fluctuation suppression) 기능은 풍력발전단지 출력의 빠른 변화를 ESS의 충방전으로 억제시켜 안정화시키는 것을 목적으로 한다. 본 기능은 계통 운영자 (system operator)에 의하여 제시되는 기준을 만족시켜야 하며 높은 cycle life을 갖는 ESS를 적용하는 것이 적절하다. [3]에서는 이 기능의 예로 12MW 정도의 평균 출력을 갖는 풍력발전단

지의 경우 약 ± 2 MW 충방전 전력을 갖으며 단기간 충방전 주기는 40초 정도로 설명하고 있다. 또한 FS 기능은 에너지 시간 이동 (TS) 기능과 융합 운용이 검토될 수 있다.

다음은 풍력발전단지 연계 기준을 만족시키기 위해 요구될 수 있는 ramp-rate 제어 기능이다. 풍력발전력은 어느 정도 예측할 수 있으나, 최단기적으로 그 출력은 심각한 변동성을 가지고 있다. 따라서 풍력발전의 출력은 제어가 어려운 특성을 가지고 있으며, 이러한 특성으로 전력망 연계 시 출력 변동성 완화가 요구된다. 풍력의 ramp-rate 완화를 위한 해결 방법으로 ESS의 투입이 고려될 수 있으며, 배

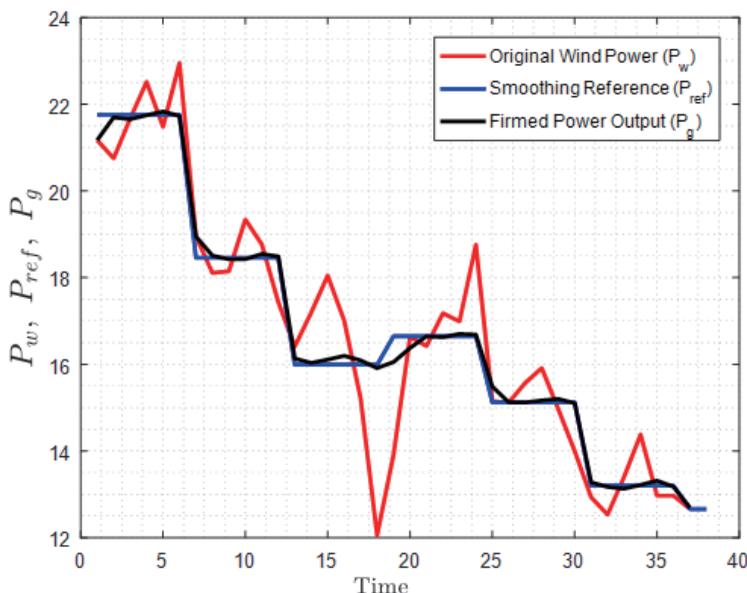


그림 3. 풍력발전 - ESS 연계 운영 시 capacity firming 제어의 예

터리 용량 (MWh)보다 출력 (MW)에 보다는 의존적이다.

순동 예비력 (spinning reserve)은 계통 운영자의 의사결정으로 투입될 수 있는 사용되지 않고 있는 발전용량을 의미하며 계통에 투입되어 있는 발전기를 대상으로 한다. 풍력발전력이 순동 예비력으로 활용되기 위해서는 약 30분 동안 발전단지 출력을 유지시켜 주어야 하며, 이를 위해 capacity firming 제어 전략이 동시에 적용될 필요가 있다. 특히 작은 규모의 독립 계통에서 안정적인 운영을 위해 운영 예비력을 아주 중요하며, 이를 위해 BESS가 많이 검토되고 있다.

이 밖에 추가적으로 검토되고 있는 풍력발전-ESS 하이브리드 시스템의 운용전략은 전압 제어 보조 (voltage control support), 피크 저감 (peak shaving), 부하 추종 (load following), 진동 댐핑 (oscillation damping), LVRT (low voltage ride through) 협조 등이다. 이 중 진동 댐핑 기능은 계통 상태에서 발생한 진동의 문제가 풍력발전력 저감의 요인으로 작용할 수 있는 상황에서 검토될 수 있다. 향후 계통 접속 규정에서 유효전력 총방전을 통해 이를 억제할 수 있도록 하는 제어를 설치할 권장할 경우 ESS를 통한 댐핑 향상이 가능하도록 하는 기능에 해당한다. LVRT 협조도 직접적인 계통 보조 응용이 아니라 외부 고장 시 풍력발전단지의 대규모 탈락을 방지하기 위한 것으로 가변속 발전기의 BTB 컨버터의 DC 링크의 과전압을 억제하기 위한 것으로 적용될 수 있는 보조적인 것에 해당한다.

III. 독립계통 연계를 위한 ESS 구성 전략[6]

섬과 같은 독립계통에서의 풍력발전 적용은 그림 4와 같은 형태로 구성되는 ESS의 도입으로 크게 확대될 수 있다. 이와 같은 구성에서 풍력발전의 출력은 전력은 ESS에 저장되고, 계통에서는 ESS에 저장된 안정된 전력이 공급됨으로써 풍력

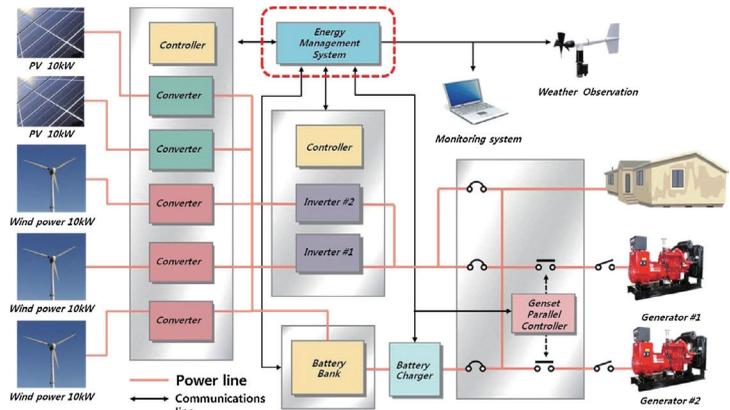


그림 4. 풍력발전-ESS-태양광 하이브리드 시스템의 구성 예 [6]

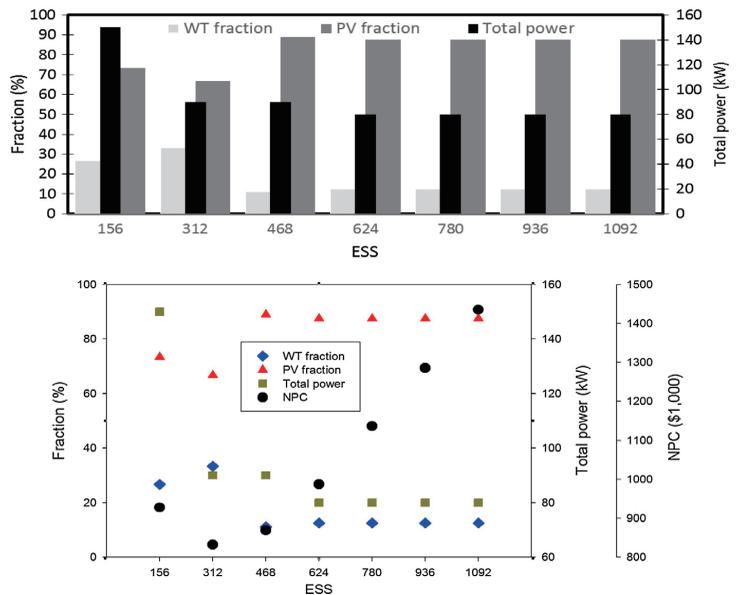


그림 5. 안정된 계통을 운영을 전제로 한 풍력발전-ESS-태양광 구성 비율에 대한 해석사례

발전의 적용이 크게 확대될 수 있는 것이다. 바람변화에 따라 같이 변동하는 풍력 전원의 시변화 특성은 더 이상 계통 안정의 문제가 되지 않으며 오히려 태양전지 출력처럼 낮과 밤으로 최대와 최저를 오가는 전력에 더 관심을 가져야 적절한 용량의 ESS가 합리적으로 결정되는 상황이 발생된다. 그림의 예와 같이 ESS와 태양광, 그리고 풍력이 조합을 이룰 경우, 이들의 조합비율을 가장 큰 관심사가 된다.

남해의 한 섬을 대상으로 한 연구 사례에서 보면, ESS의 용량이 커지면 발전원의 용량을 줄일 수 있는 것으로 나타났으며, ESS 용량이 아무리 커지더라도 준비되어져야 될 기본 발전 용량이 존재하는 것으로 밝혀졌으며, ESS가 적을 경우, 크

고 충분히 여유 있는 발전원이 구성되어야 계통 전원이 안정되게 관리되는 것으로 나타났다 (그림5 참조). 이와 같은 해석은 어느 지역과 바람자원과 태양광 자원, 그리고 전력부하의 특성이 알려져 있으면, 간단한 수치모의를 통해 산출될 수 있는 것이다.

이 연구에 의하면 풍력발전은 전체발전의 30% 일 경우 가장 경제성이 우수한 것으로 나타났으며, ESS의 크기가 아무리 증가하더라도 최소 10% 이상의 풍력발전이 사용되어야 하는 것으로 나타났다 (그림 5 참조), 이 경우 나머지 발전원은 태양광으로 구성된다. 이 연구결과에서 주목해야할 부분은 풍력과 태양광의 적절한 비율이 ESS의 적절한 용량과 함께 존재한다는 것이다. 향후, ESS가 도입되는 구성시스템에서 반드시 검토해야 할 부분으로 쓸데없이 큰 용량의 ESS가 도입되거나, 전체발전원의 용량을 증가시키는 방식으로 오히려 구성비용이 증가되게 만드는 부족한 용량의 ESS가 도입되는 일이 없도록 해야 될 것이다. 한편, 경제성을 기준으로 하는 조합비율은 ESS와 발전원의 단가에 따라 달라지므로 이를 위해 관련 분야의 최신 정보가 반영되어야 할 것이다.

IV. 결 론

COP21 체제에서 온실가스 배출 저감을 위한 신재생에너지원의 전력망 투입은 점차 증가될 수 밖에 없으며 현재까지 전력망 신뢰도 유지를 위해 고려되었던 신재생에너지원 투입 제한은 더 이상 적용되기 어려운 상황에 있다. 변동성 및 간헐성의 특성을 갖는 신재생에너지원 설비 투입 증대된 계통에서 운전의 안전성을 확보하기 위해서 스마트그리드 기술의 적용, 마이크로그리드에 의한 단위 에너지공급체계 수립, AC 허브 변전소, 대용량 캐패시터를 포함하는 DC 시스템 연계 운용 등이 중점적으로 고려될 수 있으며 이 중 핵심적인 요소는 에너지저장시스템 (ESS)의 적용이라 할 수 있다. 현재까지의 ESS의 T&D (transmission and distribution) 적용성은 주로 현재의 각 나라의 전력시장 환경에 맞추어 비즈니스 모델을 확보할 수 있는 범위 내에서 이루어져 왔으나, 온실가스 농도 증가에 의한 지구 기후변화를 억제하기 위해 필요한 신재생에너지원의 확대 투입을 고려하여 현재 상황을 타개할 수 있는 향상된 기술개발 연구의 적극적인 추진이 필요하다. 

참고문헌

- [1] F. Van Hulle, *Large scale integration of wind energy in the European power supply: analysis, issues and recommendations*, EWEA Report, 2005.
- [2] L. Freris, D. Infield, *Renewable Energy in Power Systems*, Wiley, 2008, pp. 80.
- [3] *Energy Storage for Grid Connected Wind Generation Applications*, EPRI Report, 2004.
- [4] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gornis-Bellmunt, R. Villafila-Robles, "A review of energy storage technologies for wind power applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, 2012.
- [5] *Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide*, Sandia Report, Sandia Report, 2010.
- [6] Amir Ahadi, Sang-Kyun Kang, Jang-Ho Lee, "A novel approach for optimal combinations of wind, PV, and energy storage system in diesel-free isolated communities", *Applied Energy*, vol. 170, 101-115, 2016.