

열에너지 직접 변환과 저장을 이용한 새로운 풍력 발전

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 마안철
(mac44h@reseat.re.kr)

1. 서언

- 신재생 에너지의 대부분은 간헐적이기 때문에 설치된 재생에너지의 상당한 부분이 전력망에 문제점을 야기 시킨다. 전력망 문제를 해결하기 위해 본고에서는 WTES(Wind powered Thermal Energy System)로 지칭되는 새로운 아이디어를 기술하고자 한다. 미국에서 태양광이나 수력 다음으로 두 번째로 큰 에너지 저장 시스템으로 각광받은 열에너지 저장은 1,680MW-h의 용량을 가지고 있다.
- 열에너지 저장 및 가볍고 저렴한 열 발생장치가 WTES의 핵심 포인트이다. 특수한 열 형태인 WTES에서 탑의 상단은 회전에너지에서 열에너지로 직접 변환되고 시스템의 나머지는 집광형 태양광발전(CSP, Concentrated Solar Power)의 탑 형태와 유사한 구조를 가진다. 발생된 열에너지는 열매체(HTF)에 의해 베이스 유틸리티로 전송되고 필요시 터빈 발전기를 구동하기 위해 증기를 발생시킨다.

2. 현 네트워크의 분석

- 여러 국가가 이미 상당한 재생에너지를 도입하고 있으며 다양한 방법의 전력망을 유지하고 있다. 안정적인 전원 공급에 책임이 있는 정부와 조직에 의해 발행된 문서를 조사하여 아래에 설명한다.
- 스페인과 덴마크의 상황: 스페인의 전력망은 유럽 전력망으로부터 거의 독립된 상태다. 스페인의 풍력 발전 용량은 2000년에 2.4GW이고 2010년에 24.8GW로 확대되었다. 같은 기간에 가스복합발전(CCGT)은 0GW에서 25.2

GW로 증가되었다. 덴마크는 에너지의 20%가 풍력에 의해 공급받고 있다. 2010년 에너지 소비가 1980년과 동일함에도 불구하고 풍력과 열 발전은 근소하게 증가하고 있다.

- 독일의 현재 상태와 계획: 독일 에너지공사 DENA는 독일 에너지 소비가 2008년에서 2020년 까지 8% 감소하는 것으로 예측하고 있다. 또한 2020년 신재생 에너지의 비율은 전체 전기에너지의 30%를 차지하게 될 것으로 예상된다. 전체 에너지 소비가 감소된다 하더라도 이러한 조건에서 총 설비용량은 25%로 증가하게 될 것이다.
- 다른 연구에서는 풍력이 전력 네트워크에 20% 정도 도입될 때 CCGT 같은 새로운 예비 저장시스템이 필요치 않다고 주장한다. 그러나 기존의 발전소가 출력 조절이 낮을 경우 발전소의 교체가 필요하다. 일부 연구는 예비 용량의 90%가 전력 네트워크에 풍력을 도입할 필요가 있으므로 최적의 네트워크 구성이 조립 될 때 발전 전력의 20 - 30%가 축소되어야 한다고 주장한다.
- 독일의 재생에너지와 통합화 방안 : DENA는 네트워크에 재생 에너지를 통합하기 위해 수력 펌프 및 배터리와 같은 다양한 시스템을 조사하였다. 수력 펌프는 지리적 제한과 환경 규제로 적용하기 어렵고 배터리는 비용으로 인해 신재생 에너지의 출력을 안정화하기에 적합하지 않다는 평가다. 간헐적인 신재생에너지를 도입하려면 대체 열 공장 또는 에너지 저장설비가 반드시 필요하게 된다.

3. WTES 개요

- 기본 구성
 - WTES는 저렴한 축열 시스템, 가볍고 저 비용의 열 발생장치로 구성된다. 열 발생장치는 회전에너지를 열에너지로 변화하는데 이용되고 간단한 브레이크의 일종이기 때문에 가볍고 전기 발전기에 비해 저렴하다. 이것은 고장 가능성이 낮은 기어리스 시스템에 적용할 때 중요하다. 기어리스 시스템은 주로 중량의 직접구동 저속 회전기계를 필요로 하기 때문이다.

- 타워의 상단에 발생하는 열에너지는 HTF의 순환에 의해 하부 유틸리티에 전송된다. 가열은 전기 생산 요구에 따라 HTF 축열조에 저장된 증기 터빈을 사용한다. 100m 이상의 HTF 순환 기술은 최대 565°C, 140m 높이의 타워형 CSP 공장에서 이미 실용화되어있다.

○ 예상 비용 평가

- 에너지 준 균등화 비용(LCOE) 값은 에너지 개략 비용을 평가할 때 이용된다. 수명, 비용 및 효율성이 포함되지만, 금융 및 유지 보수는 제외된다. 풍력 터빈은 24시간 동안에 "a"시간 정격 속도로 지속적으로 회전한다. "a/24"은 용량 계수를 나타낸다. 풍력 발전소는 하루 종일 이 조건에서 안정적인 출력 전기를 필요로 한다.
- 에너지부(DOE)의 선샷 이니셔티브(SunShot Initiative: 2020년까지 태양광 발전 단가를 현재의 75%까지 줄인다는 목표)를 고려하여 에너지 변환소를 포함하여 실제 나트륨 황 배터리 시스템 비용은 660\$/kWh로 세팅된다. 배관을 통한 열 손실은 93%의 축열 시스템 효율에 포함되는 것으로 가정한다.

○ 예상 에너지 비용

- 예상 에너지 비용이 엔고 상태에서 계산되었기 때문에 일본 평균치보다 저렴하지만, 중국 평균치보다 더 비싸다. "풍력과 예비 열", "풍력과 배터리" 그리고 "WTES"의 각 기술은 6, 24, 48, 반복시간에서 다양한 풍력 패턴을 보여준다.
- 기존 풍력은 어떠한 에너지 저장고를 가지고 있지 않기 때문에 풍력 패턴이 변경될 때 통상 풍력의 에너지 비용은 동일하게 유지한다. 전지의 비용이 비용의 대부분을 차지하기 때문에 "풍력과 배터리"의 경우에는, 반복 시간과 밀접한 관계를 갖는다.

4. 열 발생장치

○ 열 발생장치의 예

- 회전에너지를 열에너지로 전환시키는 일반적인 방법은 고체 물질 간의 마찰, 유체 교반 그리고 전자기 유도가 있다. 고체 마찰은 빈번한 정비 및 부품 교체를 필요로 한다. 유체의 교반은 잦은 유지 보수를 필요로 하지 않지만 발생된 온도가 유체의 특성에 의해 제한된다. 이 중에서 전자 유도가 가장 최상의 방법이다.
- 전자 유도기의 원리는, 정 자기장(static magnetic field)이 도체 위에 유도되고 도체가 회전하도록 와전류가 인가되어 도체를 가열한다. 중형차량의 보조 브레이크에 널리 이용되는 리타더(retarder; 긴 언덕길이나 고속 주행 중에 브레이크를 걸 때 생기는 페이드 현상을 완화하기 위하여 기계적 에너지의 일부를 본래의 브레이크 이외의 것으로 흡수하는 장치)가 열 발생장치의 유망한 기술 중의 하나다.
- 장착된 영구 자석의 온도가 100℃ 이하로 유지되지만 리타더 온도는 600℃ 이상까지 상승된다. 또한 리타더 용량은 수백 kW급으로 2MW 풍력 터빈 용량에 가깝다. 리타더 중량은 동일한 용량의 전동기/발전기에 비해 거의 1/10 수준이다. 눈, 열, 염분 그리고 습도에 견디도록 설계되었기 때문에, 이미 충분한 견고성을 갖추고 있다.

○ 열 발생장치로부터 열전달

- 발열체의 열전달 조건에 대해 조사하기 위해 3,800mm 직경의 2MW 급 풍력발전용 영구자석 직접 구동 발전기가 선택된다. 슬롯의 권선 구성은 동일하게 유지되고 300℃의 물 열매체가 통과되고 15MPa가 전기자 권선에 인가된다.
- 총 열전달 면적을 57.7m²로 가정하면 열 유속은 38kW/m²가 된다. 반응기의 입구/출구 물의 온도 조건을 각각 293℃, 325℃로 적용할 때 필요한 물의 질량 유동은 16.4kg/s와 0.425kg/s가 된다.

○ 유도 기계의 사용 예

- 열 발전용 유도 기계: 자연에서는 유도전동기와 발전기 사이에 차이가 없는 것으로 알려져 있다. DC 전류가 권선에 인가되고 로터가 회

전하면 강한 전기 브레이크 즉 열이 발생한다. 큰 토크는 저속 회전과 작은 소음을 가능하게 한다. 450℃ 까지 견디는 캔드모터(canned motor)가 이러한 열에너지 제거에 사용된다.

- E-H 발전용 유도 기계: 양방향 AC / DC 변환기를 사용하는 경우, 유도 기계는 E-H 제너레이터로 이용될 수 있다. 정격 토크보다 몇 배 큰 최대 토크는 실속토크(stalling torque)라고 불린다. 실속토크 하에서 연속운전은 제너레이터에 상당한 열을 발생시킨다. 종래의 발전기는 이런 조건 하에서 이용될 수 없으나 E-H 제너레이터는 열전달 시스템을 갖추고 있기 때문에 이 조건에서 사용할 수 있다.
- 그리드의 잉여 에너지 흡수: 나중에 사용하기 위해 E-H 제너레이터는 그리드의 잉여 에너지를 열에너지로 변환시킬 수 있다. 다양한 측면에 영향을 미치는 관계로 경제적인 타당성 조사는 어렵다. 잉여 에너지는 또한 압축공기 에너지저장(CAES)에 의해 저장될 수 있다. CAES는 지하 동굴 여건과 천연 가스의 공급과 같은 여러 제한 사항이 있으나 WTES는 CAES에 비해 제한이 적다.
- 초전도 발열: 작동 가스의 온도가 높아질 때 터빈 발전기의 효율이 높아진다. 일반적인 강은 약 800℃인 퀴리온도 이상 올라가면 자화손실이 일어나지만 초전도 자석은 자성 물질 없이 강한 자장을 발생시킬 수 있다. 이를 이용한 알루미늄용 HTS 유도 가열기계가 상용화 될 수 있다. 효율성 향상이 시스템 비용의 증가분을 능가하여 에너지 비용 절감이 예상된다.

5. WTES 장점

- WTES 장점은, 자연 풍력 발전에서 최대 에너지 수확이 가능하고, 환경 영향이 낮으며 그리고 지역 경제에 영향을 미친다. 종래의 풍력 발전은 전력 회사 네트워크의 안정적인 출력을 유지하기 위해, 지정된 기간 즉 30분간 전력망 안전성을 유지하여야 한다.
- 경량의 열 발생장치로 인해 터빈 날개의 저속 회전이 가능해 저 소음, 저 진동으로 이끈다. 또한 열 발생장치의 적절한 비용으로 신뢰성 있는

기어리스 시스템의 실현이 가능하다.

6. 결론

- 풍력이 전력망에 연결될 때는 예비 열 플랜트나 에너지 저장시스템이 필수적으로 필요하다. 예비 열을 갖춘 풍력, 배터리 에너지 비용이 포함된 풍력, 그리고 열 발생장치와 에너지 저장시스템을 채택한 WTES의 세 시스템의 에너지 비용을 비교해보면 WTES가 가장 경제적인 시스템으로 나타난다.
- WTES를 다양하게 구성할 수 있다. 전기 및 열 발생장치는 유연성 있는 운영을 가능하게 하고 심지어 전력망의 잉여 에너지를 저장할 수도 있다. 또한 초전도 열 발생장치를 채택하여 광전 변환 효율이 높은 작동 온도를 실현할 수 있다.

출처 : Toru Okazaki, Yasuyuki Shirai, Taketsune Nakamura, "Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage", *Renewable Energy*, 83, 2015, pp.332~338

◁ 전문가 제언 ▷

- 본문은 가볍고 저렴한 열 발생장치인 WTES에 대해 기술한다. WTES 탑의 상단은 회전에너지에서 열에너지로 직접 변환되고 시스템의 나머지는 집광형 태양광발전의 탑 형태와 유사한 구조를 가지고 있다. WTES 장점은 자연 풍력발전에서 최대 에너지의 취득이 가능하고, 환경에 미치는 영향이 낮으며, 지역 경제에 미치는 영향이 매우 크다.
- 회전 에너지를 열에너지로 전환시키는 일반적인 방법은 물질 간의 마찰 응용이다. 이것은 보조 브레이크에 널리 이용되는 리타더를 응용한 전자기 유도에 의한 것으로 리타더를 이용한 WTES는 다양하게 구성할 수 있다.
- 중국 연구진은 그래핀과 세라믹으로 구성된 고전도성 복합체를 제작하여 열전달 및 열에너지 저장 소자를 개발하는데 성공했다. 전기 전도도가 매우 높은 단일층 그래핀은 상온에서 높은 열전도도를 갖는 것으로 보고됐다. 다공성 세라믹 매트릭스 속에 필러(filler)로 활용함으로써 열전도도를 향상시키고 열 관리 시스템 내의 금속 또는 그래파이트 요소를 대체할 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다.
- GE, Siemens 등은 기술력 있는 구조조정 풍력업체의 인수/합병 등을 통한 글로벌 풍력발전시장 진출을 확대하고 있다. 또한 기술 및 원가경쟁력 제고를 통한 안정적 수주확보 및 고부가가치의 대용량 풍력발전기 부품개발을 통한 수익성을 추구하고 있다.
- 일본의 경우 원전사고 이후 개인이 환경적 부담은 본인이 감수하지만 일반 전력사업자로 시장에 개입이 가능해졌다. 독일의 경우 지역 분산형 전력을 생산하고, 잉여전력을 사고파는 등의 전력 시장을 개방하였고, 독일정부는 전력매입 법 시행, 건축법 개정, 재생에너지법 시행 등의 풍력 발전 보급 위한 제도를 마련하고, 수용성이 높은 주민들을 중심으로 지자체별 풍력 규제 시스템을 완화하였다. 국내 풍력에너지 발전을 위해서 외국 사례를 거울삼아 관련제도를 개선할 필요가 있다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.