

풍력터빈 발전기용 재료의 최근 동향 및 미래 전망

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 나덕주
(djra15@reseat.re.kr)

1. 서언

- 이 논문은 풍력발전 기술의 발전을 위한 재료의 연구개발 로드맵 작성을 목적으로 연구한 내용이다. 재료 로드맵은 SET-Plan(Strategic Energy Technology Plan)에 맞추어 EU 회원국들이 재료 연구기금 조성을 위한 전략적 의사결정을 할 수 있도록 지원하고, 향후 10년 동안 에너지용 재료 분야에서 특별한 연구개발 활동의 지침을 제공하고 있다.
- 본문은 풍력터빈 발전기용 재료의 최근 동향과 향후 전망을 심도 있게 분석하고, 2020년 및 2030년에 필요로 하는 풍력발전 기술개발을 지원할 수 있는 재료의 개발활동 목표를 제시하고 있다. 이 분석은 유럽위원회 소속 합동연구센터(JRC: Joint Research Center)의 협조로 이루어졌고, TPWind(Wind Technology Platform)를 포함한 참여 주주들의 의견을 광범위하게 수렴하여 충분한 논의를 거쳐 작성하였다.
- 지난 10년 동안 풍력에너지 생산은 매년 23.5%씩 증가하였다. 2013년 한 해 동안 35GW가 설치되어 2013년 말 기준 세계 총 풍력발전 설치용량은 318GW에 도달하였다. 중국, 미국, 독일, 스페인, 인도의 5개국이 세계 설치용량의 72%를 차지하고, 유럽은 2013년 말에 117GW 설치용량을 확보하고 있다. 2000년에 세계 최대 풍력터빈은 2MW이었는데 지금은 로터직경이 171m인 8MW의 풍력터빈을 설치하고 있고, 향후 로터 직경이 180m인 10MW 풍력터빈의 출현이 예상된다.
- 유럽의 해상풍력발전단지 설비이용률(capacity factor)은 평균 22.3%이며, 더 강력하고 안정적인 바람에 의해 45%까지 도달할 수 있다. 해상 운송로, 어업, 철새 도래와 관련된 제한조건을 고려할지라도 해상풍력

프로젝트를 위해 충분한 발전가능 지역을 확보하고 있다. 그러나 해상 풍력의 설치, 운영 및 정비작업은 대단히 가혹하기 때문에 풍력발전 설비는 신뢰성이 아주 높아야 한다.

2. 재료 공급 상황 및 도전 과제

- 2010년 재료 사용량과 소모량 예측을 기준으로 재료의 공급 현황과 도전과제에 대해 분석하였다. SET-Plan 시나리오에 의하면 2030년부터 2050년까지 풍력발전이 지속적으로 증가하고, 연평균 최대 50GW씩 증가할 것으로 예측하였다. 그러나 실제로는 증가율이 점차 높아져 2020년에는 140GW가 증가할 것으로 예상되어 연평균 증가율을 100GW로 수정하고 그 중 10%가 해상풍력발전이 차지할 전망이다.
- 전자기 발전기용 자석 강재 및 구리 와이어를 제조하는데 필요한 철, 구리 및 기타 재료는 전 세계에 지리적으로 넓게 분포되어 있고 가격도 투명하고 매장량도 충분하다. 구리가 대단히 중요한 재료라고 생각되지는 않지만 시장과 사회 정치적 요인에 추가하여 에너지 탐색, 물 소비 및 토양의 활용과 같은 다른 요인 때문에 중요한 원소가 될 수 있다고 경고한다.
- 영구자석 발전기(PMG)에 필요한 희토류원소(REE: Rare Earth Element)는 금속 광물에 아주 적게 함유되어 있고, 대개 다른 금속과 동시에 생산된다. 영구자석을 위한 희토류 원소 특히 디스프로슘(Dy)은 현재 아주 적게 공급되고 있다. 따라서 방대한 R&D 투자를 통해 자석에 희토류 원소의 조성 밀도를 낮추거나 대체 재료를 찾아내어야 한다.
- 희토류 산화물(REO: Rare Earth Oxides)은 희토류 금속, 합금 및 분말을 생산하는데 사용한다. 2009년 세계 REO 생산량은 약 150,000톤이고, 그 중 89%를 중국에서 생산하고 있다. 최대 매장량은 중국에 40%, 브라질에 16%, 미국에 9% 순이다. REO 수요의 30%가 영구자석에 사용된다. 세계 자석의 75~80%가 중국에서, 또 17~25%가 일본에서, 3~5%가 유럽에서 생산된다. 초전도 발전기는 대부분 이트륨, 바륨, 구리(YBCO)로 만들어진 코팅된 전도체(CC)에 기반을 두고 있다.

3. 핵심적인 재료공급자 및 개발 진행 현황

- 풍력 발전기용 재료기술 분야에서 기초 및 응용연구는 구조 및 기능 재료에 집중하고 있다. 로터, 나셀 및 타워 부품의 제작에 사용하는 구조 재료는 중량 대비 강도 비가 낮고, 동시에 생산 비용이 낮아야 한다. 이 목적을 달성하기 위해 타워 상부 중량, 즉 로터 허브 및 블레이드, 구동계통, 기어박스, 발전기, 피치제어장치, 나셀 지지대, 요(yaw) 구동장치 및 타워의 중량을 최소로 설계하고 해상풍력터빈의 지지구조와 연결부재 중량을 감소하여야 한다.
- EU 6차 프레임워크 프로그램(FP6)인 UpWind 프로젝트는 8~10MW 풍력터빈의 설계를 수행하였고, 향후 로터 직경 256m 의 20MW 터빈을 설계할 때 직면하게 될 기술적 난제를 해결하는데 주력하였다. FP7 프로젝트(RELIWIND)는 풍력 터빈의 신뢰성과 관련 시험 절차의 개발에 집중하였다. 발전기용 전자기기기술은 이미 상당히 성숙되어 있고, 나노기술을 적용하여 전선의 전도도를 향상시키는데 노력하고 있다.
- 영구자석에 대한 연구는 주로 성능, 비용 및 재순환에 집중하고 있다. 성능에 관한 연구는 고 에너지 제품, 우수한 고온 성능, 더 높은 전기 저항성 및 강화된 기계적 성질을 포함한다. 비용에 관한 연구는 희토류 성분을 감소하거나 제거하는 방법에 의해 원재료비용과 처리 비용에 집중한다. 재순환에 관한 연구는 제조 스크랩, 스와프 및 다음 사용자를 포함하여 연구를 수행한다.
- 일본은 입자 미세화 및 나노 기술을 접목하여 영구자석에 Nd 및 Dy 함유량을 감소하기 위해 노력하고 있고, 한국은 2007년 이후 매년 10억 달러를 지원하는 연구 프로그램을 수행하고 있다. 초전도 연구는 전선 비용을 감소하기 위해 YBCO와 초전도 큐프레이트(cuprates)를 적용하는 효율적인 공정에 집중한다.

4. 2050년 필요한 재료의 요구 사양

- 풍력 에너지는 신재생 에너지 자원이기 때문에 사회적 지원 측면에서

환경에 대한 고려가 중요하고, 모든 부품이나 재료는 재순환 가능하여야 한다. 대부분의 금속 부품은 재순환 가능성에 문제가 없지만 전기 부품이나 블레이드는 아직 문제가 남아 있다. 풍력 에너지용 전기 부품의 재순환 공정 개발은 세계시장의 다른 용도에 많이 사용되고 있으므로 세계시장에서 유사 부품의 개발에 달려 있다.

- 문헌 조사, 전문가 의견, 주주들의 자문을 통해 조사한 바에 의하면 고성능 발전기는 주로 PMG와 고온초전도 발전기(HTS)의 두 종류로 나눌 수 있다. 아래에 2020/2030년에 발전기의 상업적 운전을 위해 달성하여야 할 기술적 지표와 가치에 대해 설명한다.
 - 직접구동 발전기: 12MW 직접구동 발전기의 중량은 2020년에 170톤 이하, 2030년에 130톤 이하를 달성하여야 한다. 현재 10MW PMG은 300톤인데 HTS 기술을 적용하면 120톤이 될 것으로 예측하고 있다.
 - 영구자석(상업용 자석): 현재 가장 우수한 성능을 가진 자석의 전력밀도는 $270\sim 422\text{kJ/m}^3$ 이고 2020년에 $360\sim 500\text{kJ/m}^3$, 2030년에 $460\sim 535\text{kJ/m}^3$ 까지 개선할 것이 요구된다. 영구자석의 잔류자기(remanence)와 항 자기성(coercivity) 특성 즉 고온에서 자력 대비 저항 특성은 발전기와 모터에 적용하는 영구자석의 가장 중요한 물리적 성질이다. 똑같은 자력 밀도에서 Nd 희토류 원소 함량은 현재의 30~32%로부터 2015년에 28%, 2020년에 25%, 2030년에 20%를 요구하고 있다.
 - 고온 초전도체: 초전도 전선의 가격은 현재의 300€/kA-m에서 2020년에 30~40€/kA-m, 2030년에 15€/kA-m 까지 낮추고, 상업적 운전 온도를 현재의 75K에서 2020년에 85K로 높여야 한다.
- 2050년의 목표사양은 불확실하고 예상에 불과하지만 과학적 돌파구를 제시한다는 의미에서 제시한다. 20MW 직접구동 발전기의 중량은 HTS 기술을 기반으로 200톤 이하이고 저비용 제조공정이어야 한다. 풍력터빈 발전기는 전자석이나, 영구자석 또는 고온 초전도체에 상관없이 수력, 조력, 열병합, 선박용 발전 분야와 철도차량 및 일반 산업분야를 포함한 발전기나 모터를 사용하는 다른 영역과 시너지를 이루어야 한다.

- 에너지성이 예측한 바에 따르면 2025년에 전기자동차용 네오디뮴(Nd)의 수요는 풍력터빈용 수요의 4배가 되고, 디스프로슘은 3배에 도달할 것으로 예측하였다. 또 모터의 산업적 응용, 발전영역, 추진기관 등은 풍력발전과 시너지를 이룰 전망이고, 희토류의 경쟁 분야는 촉매, NiMH 배터리, 유리, 세라믹, 합금 및 레이저 기술 등을 들 수 있다.

5. 결론

- 본문은 2020년까지 유럽 전력 시스템에 풍력에너지의 구성 비율을 높이고자 하는 정책목표를 달성하기 위해, 발전기의 특성을 향상시킬 수 있는 재료의 사양을 탐색하고, 논의하고, 최적의 재료 사양을 제안한다. 구체적으로 12MW 직접구동 발전기의 재료 중량을 2020년에 170톤 이하로 맞추고 2030년에 130톤 이하로 낮출 수 있도록 재료 밀도의 목표 사양을 제안하였다.
- 영구자석의 전력밀도를 현재의 $270\sim 422\text{kJ}/\text{m}^3$ 에서 2020년에 $360\sim 500\text{kJ}/\text{m}^3$ 그리고 2030년에 $460\sim 535\text{kJ}/\text{m}^3$ 까지 개선할 것을 제안하고, 또 이 자석의 잔류자기와 항 자기성 비율을 대폭 향상시키고 이를 위한 경험식을 제시하였다. 고온 초전도 전선의 가격을 현재 $300\text{€}/\text{kA}\cdot\text{m}$ 에서 2020년에 $30\sim 40\text{€}/\text{kA}\cdot\text{m}$, 2030년에 $15\text{€}/\text{kA}\cdot\text{m}$ 까지 낮추고, 상업적 운전 온도를 85K로 높여야 한다.
- 영구자석용 희토류 원소의 고 효율화 및 대체 재료를 위한 기초 및 응용연구는 리스크가 높고, 유럽 기업과 연구 센터가 연구비용을 분담하고 최적화할 수 있도록 허용하여야 한다. 재료의 대체를 가능하게 하는 사전 경쟁력 연구에 관한 정부 자금 지원은 국제 협조와 연계되고, 실질적 목적은 영구 자석에 사용하는 희토류 원소 함유량을 줄이고, 대체 재료의 사용을 감소하고, 재순환 설계를 축소하는 것이다.

출처 : Roberto Lacal-Arantegui, "Materials use in electricity generators in wind turbines - state-of-the-art and future specifications", Journal of Cleaner Production, 87, 2015, pp.275~283

◁ 전문가 제언 ▷

- 풍력에너지 생산은 매년 23.5%씩 증가하고, 2013년 세계 총 풍력발전 설치용량은 318GW에 도달하였다. 중국, 미국, 독일, 스페인, 인도의 5개국이 전 세계 설치용량의 72%를 차지하고, 유럽은 117GW 설치용량을 확보하고 있다. 2000년에 세계 최대 풍력터빈은 2MW이었는데 지금은 로터직경이 171m인 8MW의 풍력터빈을 설치하고 있고, 향후 로터직경이 180m인 10MW 풍력터빈의 출현이 예상된다.
- 풍력발전설비에 사용하는 자석 강재 및 동선(Cu)을 제조하는데 필요한 철, 구리 및 기타 재료는 세계적으로 매장량도 충분하고 가격도 투명하지만, 영구자석 발전기(PMG)에 필요한 희토류 원소(REE)는 금속 광물에 아주 적게 함유되어 있고, 공급량도 아주 적다. 2009년 세계 희토류 산화물(REO)생산량은 약 150,000톤이고, 그 중 89%를 중국에서 생산하고 있다. 초전도 발전기는 대부분 이트륨, 바륨, 구리(YBCO)에 코팅된 전도체(CC)에 기반을 두고 있다.
- 2030년의 기술적 지표로는 12MW 풍력발전설비의 총 중량은 130톤 이하여야 한다. 영구자석의 전력밀도는 현재 270~422kj/m³에서 2020년 360~500, 2030년 460~535kj/m³까지 개선하고, 똑같은 자력밀도에서 Nd 희토류 원소 함량은 현재의 30~32%로부터 2030년에 20%를 요구하고 있다. 고온초전도 전선의 가격은 현재의 300€/kA-m에서 2030년에 15€/kA-m까지 낮추고, 상업적 운전온도를 현재의 75K에서 85K로 높여야 한다.
- 영구자석용 희토류 원소의 고효율화 및 대체 재료를 위한 기초 및 응용연구는 리스크가 높기 때문에 국내 연구센터와 기업은 물론 해외 연구기관과 공동연구 체제를 갖추고 연구비용을 분담하고 최적화할 수 있도록 추진하여야 한다. 이를 위해 자금 지원과 국제 협조 연계를 국가가 주도하고, 실질적으로 영구자석에 사용하는 희토류 원소 함유량을 줄이고, 영구자석의 제조에 대체 재료의 사용을 줄이고, 재순환을 위한 설계를 축소하는데 연구개발을 집중할 필요가 있다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.