

중국의 풍력터빈 결합 분석

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

1. 서언

- 풍력에너지는 제한된 석유자원의 고갈과 기후문제에 기인한 신재생 에너지의 수요 증가와 풍력에너지 기술의 발전에 의해 세계에서 가장 빠르게 성장하고 있는 신재생 에너지 자원 중 하나이다. 세계 103개 국가에서 가동하고 있는 풍력발전은 세계 전기 생산의 3.86%인 318.1GW를 생산하고 있고 향후에도 매년 증가할 것으로 예상된다.
- 최근 중국은 에너지 위기와 환경오염의 증가 때문에 신재생 에너지 자원의 개발과 활용이 정부와 사회 각 분야의 관심이 높아지고 에너지 개발 전략의 중요 이슈가 되어 급속한 성장을 바탕으로 화력 및 수력에 이어 제3의 에너지 자원으로 부상하였다. 2005년에서 2010년 사이에 신규로 설치된 풍력터빈이 매년 2배씩 증가하여 2010에는 신규 설치용량이 18GW가 되고 총 설치용량은 44.7GW에 도달하였다.
- 양적 팽창에 따라 사고도 많이 발생하고 있다. 2010년 80건의 단전사고 중 14건에서 약 100~500MWh의 전력 손실, 그리고 2011년 초기 8개월 간 193건의 단전사고 중 54건 사고에서 약 100~500MWh의 전력이 손실되었다. 한편 내몽고, Liaoning, Gansu, Jilin 지역에서 나셀 화재, 타워 붕괴와 같은 풍력터빈의 고장이 뒤따르고 있어 품질에 관한 관심이 고조되고 있다.
- 2009년부터 2012년까지 4년 동안 37건의 고장 사고가 발생하였는데 그 중 34건은 터빈고장, 나머지 3건은 부품 고장이고, 34건은 터빈의 붕괴 또는 화재로 소실된 사고로 이제 품질이 최우선 과제로 부각되었다. 2013년에 신규 설치용량이 16GW로 약간 감소하였지만 풍력발전은 중국 신재생 에너지정책의 가장 가능성 있는 대안으로 간주되고 있다.

2. 중국 풍력터빈의 현재 상황

- 중국의 최초 풍력터빈은 1970년대 Sijiao 전력망에 연결된 18kW급 풍력터빈이다. 현재 대부분의 풍력터빈은 1.5~3MW 풍력터빈이고, 2013년에 6MW 해상풍력터빈이 상용발전을 시작하였고 12MW급 터빈이 개발 중에 있다. 현재 중국에서 고정피치 풍력터빈은 생산하지 않고 있으며, 3종류의 피치 제어 풍력터빈이 사용되고 있다.
- 이중여자 유도발전기(DFIG, Dual Fed Induction Generator) 방식 풍력터빈(A 타입)은 블레이드, 다단 기어박스, DFIG, 주파수 변환기, 제어장치로 구성된다. 블레이드는 기어박스를 구동하고, 발전기를 돌려 전기를 생산한다. DFIG의 고정자는 전력망에 직접 연결되어 있고, 회전자 회로는 주파수, 위상, 진폭 및 상순(phase sequence)을 조절한다.
- 직접구동 영구자석 동기발전기(PMSG, Permanent Magnet Synchronous Generator)방식 풍력터빈(B 타입)은 블레이드, 직접구동 PMSG, 전력컨버터 및 제어장치로 구성되어 있고, 그 특징은 기어가 없는 동력전달계로 블레이드가 발전기를 직접 구동한다. 극수는 대략 100개이고, 실제 크기의 전력 컨버터를 채용하여 PMSG의 속도를 제어한다.
- 단일/이단 기어박스 PMSG 방식 풍력터빈(C타입)은 앞에 설명한 두 가지 방식을 합성한 형태로 블레이드, 기어박스, 발전기, 전력 컨버터 및 제어장치로 구성되어 있으며, 기어박스는 단일 또는 이단 기어박스이고, 발전기는 직접구동 PMSG보다 극수가 적은 저속 PMSG 방식이다.
- A 타입은 중국 시장의 약 70%를 차지하고, B 타입은 Goldwind, XEMC사가 주로 생산하고 시장의 약 20%를 차지하고 있다. 최초의 복합형 풍력터빈인 C 타입은 2009년 Hafei사가 제조하여 전력생산에 착수하였고, Goldwind의 3MW, China Creative Wind Energy사의 3.6MW 풍력터빈에 이어 최근 Dongfang 전기가 복합형 모델 개발에 참여하였다.
- 중국의 풍력터빈은 2008년 중국 선급협회가 발표한 풍력터빈 규격에 근거하여 설계한다. 이 규격에는 풍력터빈의 수명을 20년 이상으로 또

연간 가용성을 97%로 규정하고 있다. 중국 풍력에너지협회가 보고한 2010년, 2011년 및 2012년의 가용성이 각각 0.9599, 0.9664 및 0.9766으로 나타났다. 이처럼 가용성이 매년 증가하고 있지만 외국 제조사의 풍력터빈에 아직 못 미치고 있다.

- 풍력터빈의 고장은 육조 곡선으로 나타내며, 고장이 개시하는 시작단계, 고장 강도가 유지하는 단계, 고장 강도의 확산 단계의 3단계로 표시한다. 중국에서 2008~2009년에 개발된 풍력터빈은 설계기간이 짧아 조기 고장과 높은 고장률을 보이고 있다. 가동율은 C 타입이 A와 B 타입의 장점을 수용한 덕분에 가장 우수한 것으로 나타났다.

3. 풍력터빈의 일반적 고장 유형

- 중국 풍력에너지협회가 47개 풍력터빈 제조자, 부품 공급자 및 개발자를 통해 조사한 바에 의하면, 풍력터빈 고장은 대부분 주파수 변환기, 발전기, 기어박스, 피치 시스템, 요 시스템, 블레이드 및 브레이크 시스템에 기인하여 발생한다.
- 직접구동 및 DFIG 풍력터빈의 발전기 고정자는 주파수 변환기를 거쳐 전력망에 연결된다. 주파수 변환기의 고장이 해소되지 않으면 전력공급 품질이 감소되고, 전체 발전시스템과 전력망이 위험하게 된다. 2012년 Mongolia 풍력단지에서 발생한 1.5MW 풍력터빈의 나셀 화재도 주파수 변환기의 고장 때문에 발생하였다.
- 주파수 변환기는 저항기, 커패시터 및 전력 스위치의 단락 또는 개방 회로에 기인하여 고장이 발생하고, 일반적으로 절연 게이트 양극성 트랜지스터(IGBT, Insulated Gate Bipolar Transister)가 전력 스위치로 사용된다. 전압이 너무 높고, 작동 전력이 작동 온도에서 최대 방출 전력을 초과하면 높은 온도 때문에 전력 스위치가 파손되거나 타버린다.
- 발전기 고장은 기계적 고장, 전기적 고장 및 냉각시스템 고장의 형태로 나타난다. 기계적 고장은 주로 회전자 고장과 베어링 고장이다. 회전자 고장은 주로 회전자의 불균형, 회전자 파손 및 소켓의 이완을 포함하며, 베어링 고장은 피로 파괴와 오일 막의 불안정에 기인한다. 회로 단

락의 원인은 절연 손상, 분리 스위치의 작동, 케이블의 노후 및 바람, 비, 눈과 같은 자연 현상 등 여러 가지 요인이 있다.

- 기어박스 고장은 증속 기어박스를 가지고 있는 DFIG 풍력터빈에서 발생하며 주로 기어 치면 피팅, 치면 결함, 기어 파손의 3가지 형태로 나타난다. 기어 치면 피팅은 접촉응력과 마찰이 변하면서 치면에 미세한 금이 생겨 점차 피팅 형태로 성장하며, 피팅은 강한 진동과 소음을 유발시키고 마침내 풍력터빈의 이상 작동을 일으키게 된다.
- 이빨 측면이 큰 응력과 높은 미끄럼 속도에 노출되면 윤활이 나빠지고 높은 온도에 도달하게 되어 결국 치면 결함이 형성된다. 이빨 측면에 굽힘이 생기고 최악의 경우 떨어져나가게 된다. 기어 파손은 피로파괴와 과부하 파괴의 두 가지 형태로 나타난다. 풍속이 불안정하면 기어에 충격 하중이 가해져 이뿌리에 충격 굽힘 응력이 발생하게 된다.
- 베어링 파손은 과도한 마모, 눌림 자국 및 불 부식 형태로 베어링 볼과 레이스에 발생한다. 이는 불충분한 윤활과 과부하 때문에 발생하며 또한 부적절한 윤활제가 화학반응에 의해 부식을 일으키기도 한다. 블레이드 결함은 블레이드 파단과 표면 균열(crack)로 대별된다. 블레이드 표면 균열은 발견되기 전에 블레이드 파단으로 진전하는 경우가 많다.
- 중국의 블레이드 결함은 대부분 제조 오류, 장기간 사용에 의한 변형 및 블레이드 진동에 기인한 블레이드 파단으로 나타나고 있으며, 또한 낙뢰에 의한 블레이드 폭발에 따라 블레이드 구조에 충격 손상을 일으키기도 한다. 블레이드의 운반 또는 설치 중 블레이드에 굽힘과 같은 손상이 생길 경우 잠재적 결함을 내포할 수도 있다.

4. 풍력터빈의 고장 분석

- 풍력터빈은 기계적, 전기적 및 제어시스템이 복합적으로 구성되기 때문에 부품 수도 많고 결함도 다양한 형태로 발생한다. 중국은 기술도입 생산, 공동 생산 및 외국 회사와 합작회사 형태로 풍력터빈 제조기술을 확보하였기 때문에 핵심기술과 독자적인 혁신능력이 부족하다. 또한 2010년에 70개의 풍력터빈 제조회사와 300개 이상의 부품 공급업체가

격 경쟁을 하는 동안 품질과 신뢰성에 관심을 소홀히 하고 있다.

- 중국의 풍력터빈 설계 표준은 2008년 중국 선급협회가 발표한 풍력터빈 규격이고, IEC61400-1(2005)와 독일 Lloyd 풍력터빈 인증 지침에 근거를 두고 있다. IEC표준은 유럽의 기후조건에 맞추어져 있으나, 중국의 위도, 극한 온도, 습도 및 환경 요인이 다르므로 모든 변수들이 서로 다르다.
- 중국의 난류 강도는 58~156% 더 높고, 중국 남부 해안지역에는 매년 태풍이 발생한다. 또 중국은 동일한 위도에서 겨울철 온도가 가장 낮아 특히 1월에 중국 북동 지역의 온도는 동일한 위도 지역보다 25~20°만큼 더 낮고 남부 지역은 5° 더 낮다. 반면에 여름철 7월에 중국 북동 지역은 4°만큼 온도가 더 높고 남부 중국은 1.5~2° 정도 더 높다.
- 2011년에 중국 국가 에너지성은 “풍력터빈 발전기시스템의 전기 피치 시스템 기술표준“과 ”이중여자 풍력터빈 발전기시스템의 제어시스템 기술표준“이라는 2개의 산업표준을 발행하였다. 중국의 풍력터빈 인증은 의무조항이 아니고 자의적이다. 따라서 품질 시험을 거치지 않고 사용하는 풍력터빈도 있고, 때로는 IEC 재료 시험평가 모델링도 하지 않고 타당성 입증만을 수행하는 풍력터빈의 경우도 있다.

5. 신뢰성 향상을 위한 관리방법

- 풍력터빈의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 설계, 제조 및 정비 단계에 걸쳐 기술은 물론 신뢰성 관리를 철저히 실시하여야 한다. 먼저 전력수요와 풍력발전단지의 기후조건을 기반으로 풍력터빈 설계 목적을 설정하고, 이어서 부품의 신뢰성 데이터를 근거로 FMEA와 FTA를 사용하여 신뢰성 설계를 수행하고, 마지막으로 설계, 제조, 운반 및 정비 엔지니어를 모아 체계적이고 철저한 평가를 수행하여 초기 단계에 결함을 탐지하고 손실을 최소화한다.
- 설계는 신뢰성의 기초를 만들고 제조는 신뢰성을 구현한다. 기술적 신뢰성 관리, 운영요원 관리, 기기의 신뢰성 관리 및 제품 품질검사 관리를 포함한 제조 단계의 신뢰성 관리는 기술 요구조건을 만족시킨다. 제

품 품질검사 목적으로 제조자 및 전문기관에 의한 성능시험을 위해, 2013년 국가 풍력발전기술 및 시험센터를 설립하고, Zhangbei 시험 기지에 전력망 교란 시뮬레이션 장치와 전압강하발전기를 포함한 30개의 고정형 시험기와 21대의 필드시험 장비를 구축하였다.

- 정비단계의 신뢰성 관리는 정비방법, 여분의 정비용 장비 및 정비 데이터의 수집과 분석을 의미한다. 설계 및 제조 신뢰성을 확보하기 위해 데이터의 수집과 분석이 대단히 중요하고, 결함률을 줄이기 위한 설계 및 제조기술의 향상을 도와준다. 풍력터빈 제조자, 부품 공급자 및 풍력단지 운영자 사이에 정비 데이터 분석결과의 소통과 공유는 풍력터빈의 신뢰성 향상에 크게 기여한다.

6. 결론

- 본문에 중국의 풍력발전의 개발 현황을 분석하였다. 중국의 풍력터빈 설치용량은 급속도로 증가하고 있으나, 대부분의 풍력터빈은 조기 고장 문제에 직면하고 있기 때문에 높은 고장률을 보이고 있다.
- 주파수 변환기, 발전기, 기어박스, 피칭 시스템, 요잉 시스템, 블레이드, 브레이크 시스템 및 차동기공진기(SSR, Sub Synchronous Resonance)의 고장 유형과 고장 원인에 대해 분석하였다. 그 결과 핵심기술의 결여, 가격경쟁에 기인한 열악한 품질 수준, 설계표준과 풍력단지 기후의 차이, 풍력단지 건설, 전력망 및 정비와 같은 의무적 품질인증이 없다는 점 등 4가지 요인이 있다.
- 중국 에너지 성은 각 지역의 풍력에너지 특성을 고려한 산업 표준의 개발과 풍력발전 산업을 조절하는데 깊은 관심을 보이고 있다. 풍력터빈의 신뢰성을 위해 기술은 물론 관리방법도 중요하다. 풍력터빈의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 설계, 제조 및 정비 단계에서 신뢰성 관리 방법을 제안하고 있다.

출처 : Yonggang Lin, Le Tu, Hongwei Liu, Wei Li, "Fault analysis of wind turbines in China", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 2016, pp.482~490

◁ 전문가 제언 ▷

- 세계 103개 국가에서 가동하고 있는 풍력발전은 전 세계 전기 생산의 3.86%인 318.1GW를 생산하고 있고 향후 매년 증가할 전망이다. 중국의 풍력에너지 용량은 2012년에 설치된 13GW를 포함하여 수년간 누계로 91GW가 되었고, 2014년에 15~18GW의 풍력터빈이 설치되면서 이제 중국 풍력에너지 산업은 양보다 질의 시대로 접어들고 있다.
- 양적 팽창에 따라 사고도 많이 발생하고 있다. 2011년에 193건의 단전 사고 중 54건 사고에서 약 100~500MWh의 전력이 손실되었다. 2009년부터 2012년까지 4년 동안 37건의 고장 사고가 발생하였는데 그 중 34건은 터빈고장, 나머지 3건은 부품고장이고, 34건은 터빈의 붕괴 또는 화재로 소실된 사고로 이제 품질이 최우선 과제로 부각되고 있다.
- 중국의 풍력터빈 제조기술은 주로 기술도입 생산에 의존하여 핵심기술과 독립적인 기술혁신 능력이 부족하다. 중국의 풍력터빈 설계표준은 2008년 중국 선급협회가 발표한 풍력터빈 규격과 IEC61400-1(2005)에 근거하고 있다. 또한 풍력터빈 인증제도는 의무조항이 아니고 자의적이므로 부품 공급자를 임의로 변경하거나 타당성 입증만을 수행한다.
- 풍력발전기는 폭풍이나 화재, 번개, 얼음과 같은 고도의 위험에 노출되기 때문에 바람의 세기 앞에서는 금이 가거나 결함이 생기기 마련이다. 유럽에서는 2년에 한 번씩 풍력설비의 기계적·구조적 안정성을 정기적으로 점검하도록 의무화하고 있고, 덴마크 정부는 볼트에 대한 정기적인 체크 등 풍력발전기에 대한 점검을 의무화해 사고에 대비하고 있다.
- 2015년 김녕에서 발생한 화재는 풍력발전기 터빈과 날개 일부를 태우고 진화됐다. 2016년 태백에서 가동 중인 풍력발전기 7호기는 타워의 접합 부분이 느슨해지면서 날개를 포함한 상단 부분이 바닥으로 추락하는 사고가 발생했다. 국내 전기사업법에 전기안전 관련 규정이 있지만, 인명피해가 상존하는 지역에 설치된 구조물인 만큼 설비의 구조적 안전성을 정기적으로 점검하는 등 완벽한 대비가 필요하다고 제안한다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.