풍력터빈 발전 시스템의 미래 연구방향

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

1. 서언

○ 지난 10년 동안 미국과 유럽에서 풍력발전은 매년 20~30% 성장하였다. 미국은 2030년에 총 전기의 20%를 풍력에서 조달할 계획이고, 유럽은 2030년까지 400GW의 풍력전력을 생산할 예정이다. 풍력에너지 변환시스템(WECS: Wind Energy Conversion System)에 있어서, 이중여자 유도발전기(DFIG: Double Fed Induction Generator)와 영구자석 동기발전기(PMSG: Permanent Magnet Synchronous Generator)는 더 많은 에너지를 흡수할 수 있는 장점 때문에 점차 사용이 확대되고 있다.

○ 전력전자의 진보에 의해 풍력발전 전기의 품질을 보장할 수 있고, 또한 풍력발전의 신뢰성과 안정성을 보장하기 위해서는 에너지 저장시스템이 절대적으로 필요하다. 본문에 풍력발전 시스템의 동향과 스마트 풍력발전 시스템의 미래 연구방향에 대해 기술하고, 풍력발전 시스템의 기계적 및 전기적 두 가지 측면의 중요성에 대해 설명한다.

2. 바람으로부터 에너지 추출

○ 풍력터빈에는 수평축 풍력터빈(HAWT: Horizontal Axis Wind Turbine)과 수직축 풍력터빈(VAWT: Vertical Axis Wind Turbine)의 두 종류가 있다. 풍력터빈은 대부분 수평축 풍력터빈이고, 2 블레이드보다 약 50% 더 비싼 3개의 블레이드를 적용한다. HAWT는 대형 타워 위에 나셀과 회전 블레이드를 지지하는 구조로 되어 있고, 나셀에는 기어박스, 발전기, 전력 전자장치, 요 메커니즘 등을 포함한다.

○ 풍력터빈은 약 4m/s 풍속에서 전력생산을 시작하고, 약 12m/s 풍속에서 정격전력을 생산하고, 25m/s에서 전력생산을 중단한다. HAWT의 경우

구조적 및 재정적 관점에서 100~120m 이상의 높이에 터빈을 설치하는 것이 어렵다. 스마트 풍력터빈에서는 풍속이 일정 속도 이하로 낮아지면 블레이드 길이를 길게 하여 스위프(sweep) 면적을 크게 해 준다.

○ 풍력단지의 풍력발전량을 예측할 때, 장기 예측방법에는 수치적 기후예측(NWP: Numerical Weather Prediction) 모델을 적용하고, 단기 예측방법으로는 Box-Jenkins 모델, 신경망 기반모델(neural network-based model), 퍼지논리모델(fuzzy logic models)이 있고, 장-단기 예측 방법은 물리적 및 통계적 모델을 결합하여 적용한다.

○ WECS는 변속모드에서 풍력터빈을 가동하여야 최적의 풍력에너지를 얻을 수 있다. 최대 출력 점 추적(MPPT: Maximum Power Point Tracking) 알고리즘에 의해 터빈 각속도를 조절함으로써 출력변환 효율을 증가시킬 수 있다. MPPT 알고리즘은 선단 속도비(TSR: Tip Speed Ratio)제어, 교란 및 관찰(P&O: Perturb and Observe)제어, 최적 관계 기반(ORB: Optimum Relationship-Based)제어의 3가지 종류가 있다.

○ 풍력단지의 투자비용은 대부분 풍력터빈과 타워 설치에 관련되므로 타워 상부에 얹히는 중량의 감소와 스마트 터빈의 설계가 미래의 연구개발 방향이 될 것이다. VAWT은 요 메커니즘이 필요 없고, 악 천후에서도 작동 가능하고, 정비 소요가 적은 장점 때문에 대형 풍력발전에 적용하기 위한 연구개발이 강력하게 추진될 것으로 예상된다.

3. 풍력 발전기의 선정

○ 풍력에너지 변환시스템에는 고정속도 및 가변속도 운전시스템의 2종류가 있다. WECS에서는 풍력터빈과 발전기를 기어박스로 연결하는데 이 기어박스는 가격도 비싸고, 진동과 소음을 발생하여 비틀림 진동을 야기 시키고 전력 품질을 왜곡시킨다. DC발전기는 낮은 정격에 비해 정비와 비용이 많이 소요되므로 풍력에너지 변환시스템에 부적합하다. AC발전기에는 동기발전기와 비동기발전기 2종류가 있다.

○ PMSG는 슬립 링을 사용하지 않는 구조이므로 정비가 필요 없고 효율

이 높으며, 무효전력 제어능력이 있기 때문에 비동기 발전기보다 더 안정적이고 중량이 가볍다. 기어 없는 PMSG는 많은 극(pole)을 사용하므로 낮은 회전속도에서 전기 생산이 가능하고, 가볍고 기어 없이 운전이 가능하기 때문에 타워 위에 설치하는데 적합하다.

○ 유도발전기는 견고하고 브러시를 사용하지 않는 농형(squirrel cage)구조로 가격이 싸므로 WECS에 널리 사용된다. 유도발전기를 사용하는 고정속도 WECS는 전력망에 직접 연결하고, 무효전력을 보상하기 위해 커패시터 뱅크(capacitor bank)를 채택하고, 유도발전기의 시동 시 돌입전류(inrush current)를 최소화하기 위해 전류제한기를 사용한다.

○ 대규모 전력변환기를 가진 가변속도 유도발전기는 고정속도 발전시스템에 비해 축과 기어에 작용하는 응력이 적다. DFIG는 효율이 높고 정격이 낮은 전력변환기를 가지고 있기 때문에 풍력에너지 시장에서 50%를 점하고 있고, DFIG에 사용되는 전력변환기는 일반적으로 정격 전력시스템의 25~30%를 차지하고 있다.

○ 향후 개선된 풍력발전기는 정비가 필요 없고, 중량이 가볍고, 계통연계 기준 능력을 갖추어야 한다. 가격은 수요에 따라 변하지만, 높은 정격 발전기의 비용 절감은 앞으로 중대한 이슈가 될 것이므로, 이 요구를 만족하기 위해 PMSG 또는 DFIG는 물론 다른 형상의 발전기를 개발하는데 집중하여야 한다.

4. 전력전자 기술 개발

○ 전력전자의 발전에 의해 풍력발전 시스템의 신뢰성과 전기 품질이 높아지고, 효과적인 제어로 풍력 전력의 생산성을 증대시킬 수 있다. 가변속도 WECS에서는 전력전자 변환기가 가장 중요하다. 전력전자장치를 추가하면 가격이 높아지지만 기계적 응력을 흡수하기 위한 구조의 비용을 줄일 수 있고, 기어박스를 사용하지 않아도 된다.

○ WECS에서 완전 전력전자 변환 방식의 풍력발전이 가장 매력적인 해법이다. 동기발전기를 사용하는 시스템은 유도발전기를 사용하는 시스템에 비해 전력전자에 의해 더 많은 결함을 발생시킨다. 풍력터빈 고장

의 절반은 전기 부품과 제어시스템의 결함 때문에 발생한다. PMSG는 미래 풍력산업에서 무한한 가능성을 가지고 있으므로 효율적이고 신뢰성 있는 저가의 전력전자 설계는 미래의 중요한 연구 과제이다.

5. WECS의 과도 안전성 및 계통연계기준 향상

○ 단독 발전 시스템의 경우와 마찬가지로 WECS는 송전라인에 발생하는 단락현상과 같은 심한 장애가 발생할 때 동기화 유지기능을 갖추어야 한다. 풍력발전기는 정격 전압보다 낮아지거나 높아지게 될 때 전력망에 연결이 유지되는 기능 즉 저전압 및 고전압 계통연계 기능(fault ride through capability)을 가지고 있어야 한다. WECS에서 직렬 및 분권 보상 FACTS(Flexible AC Transmission System) 장치에 의해 계통연계를 유지할 수 있도록 지원한다.

○ 무효전력의 보상에 사용할 수 있는 FACTS 장비는 STATCOM(Static Synchronous Compensator), SVC(Static VAR Compensator), TCR(Thyristor Controlled Reactor), TSR(Thyristor Switched Reactor), TSC(Thyrister Switched Capacitor) 등이 있다. 예로 STATCOM은 전압 안정성과 전력품질을 향상시킬 뿐 아니라 풍력터빈의 동력전달 계통에 기계적 응력을 감소시키는 기능을 가지고 있다.

6. WECS에서 에너지 저장시스템의 필요성

○ 에너지 저장장치(ESS: Energy Storage System)는 과다 생산한 에너지를 저장했다가 전력생산이 부족할 경우 수요자에게 에너지를 공급해 준다. 풍량과 풍속의 간헐적 특성에 기인하여 풍력 전기의 생산이 일정하지 않기 때문에 WECS의 신뢰성을 확보하기 위해서는 ESS가 반드시 필요하다. 현재 가용한 ESS에는 BES(Battery Energy Storage), SMES(Superconductive Magnet Energy Storage), CES(Capacitor Energy Storage), 양수 에너지 저장장치, 플라이휠 에너지 저장장치, 수소에너지 저장장치 및 복합 에너지 저장장치 등이 있다.

○ 미래의 풍력발전 시스템은 바람의 특성이 어떻게 바뀌어도 신뢰성 있고 지속적인 전력을 공급할 수 있도록 설계하여야 한다. 이는 전력망

에 연결된 풍력발전기를 에너지 저장장치와 결합함으로써 가능하다. 단독 풍력발전 시스템을 신뢰성 있게 운영하려면, 정상상태에서는 전력의 5~18%, 극심한 조건에서는 비축 전력의 80%를 필요로 한다. 풍력 발전에 적합한 ESS를 선정하기 위해서는 ESS의 비용, 수명은 물론 적절한 크기와 스마트 제어 기법에 대한 연구가 수반되어야 한다.

7. WECS의 전력 품질 향상

○ 풍속이 가진 간헐적 특성이 풍력발전의 출력, 주파수 및 연결 전압에 크게 영향을 미치기 때문에, 풍력발전 시스템에서는 이 간헐성에 대응하는 것이 중요한 도전이다. WECS에서는 에너지 저장장치를 포함한 전력전자장치에 의해 전력품질을 향상시킬 수 있고, 피치 제어장치에 의해 풍력발전 전기를 완만하게 조절할 수 있다.

○ 전력품질을 보장하기 위해서 WECS는 일정한 전압과 주파수를 유지하여야 할 뿐 아니라 어떤 형태의 결함도 제어할 수 있는 능력을 갖추어야 한다. 이는 무효전력 보상장치를 가진 에너지 저장시스템과 같은 하이브리드 시스템을 사용하여 달성할 수 있으며, 이 분야에 관한 많은 새로운 연구개발이 필요하다.

8. 스마트 풍력터빈 발전기 시스템

○ 가변 스위프(sweep) 영역 기능을 가진 터빈, 복합 다중터빈 또는 효율적인 단일 터빈은 기어박스가 없는 다극 발전기에 연결한다. 에너지 저장 시스템을 가진 완전 전력전자 변환은 전체 시스템을 효율적으로 가동하는데 도움을 준다. 스마트 풍력 단지 또는 풍력발전기 시스템 전체를 지속적으로 운전하고 모니터하기 위해서는 신뢰할만한 풍력 예측기구를 구비한 중앙 감시 제어가 절대적으로 필요하다.

○ 풍속은 지역에 따라 다르므로 분산된 풍력발전기 시스템은 에너지 저장시스템과 중앙 전력관리 장치를 구비한 개별 전력망에 연결하고, 또 풍력발전의 신뢰성과 지속성을 강화하기 위해서는 전력망에 연결하여야 한다. 송전 케이블 손실을 줄이고 무효전력을 감소할 수 있는 해상 DC 전력망의 개발이 촉진되고 있으므로 DC전력 전달장치를 가진 개

별 전력망을 사용하는 것이 적절하다.

9. 결언

○ 본문에 신뢰성 있는 스마트 풍력터빈 발전기시스템을 설계하기 위해 미래 풍력터빈의 공기역학, 발전기 형상, 향상된 전력전자 제어 및 저가 에너지 저장시스템에 관한 여러 가지 새로운 방향에 대해 설명하였다. 향후 풍력에너지 시스템의 가장 도전적인 과제는 전체 시스템을 신뢰성 있게 운전하는데 필요한 총 비용을 최소로 줄이는 것이다.

○ 또한 크기와 중량을 감소할 수 있는 풍력터빈 설계기술에 집중적인 연구가 필요하고, 또 강하지 않은 바람에서도 풍력발전을 할 수 있는 기술의 향상에 도전하여야 한다. 미래의 전기발전기는 계통연계 기준의 유지 능력을 향상시키고, 정비가 별로 필요 없고, 중량의 감소가 절대적으로 필요하다. 앞에 설명한 요구를 만족하기 위해서는 PMSG 또는 DFIG 외에 새로운 형태의 발전기가 필요하게 될 것이다.

○ 스마트 그리드 기술에서는 임의 변수의 숫자가 더욱 증가하게 되어 제어 알고리즘의 수학적 계산과 전체 시스템의 신뢰성 인덱스가 더욱 복잡해지게 된다. 한편 스마트 그리드에는 여러 종류의 발전자원이 관련되므로 신뢰성, 안정성 및 지속가능성의 평가 지수를 찾아내는 것도 흥미 있는 연구 분야 중 하나이다.

○ 세계 전력수요를 만족하기 위해, 본문에 신뢰성 있는 스마트 풍력에너지 변환시스템을 설계하는데 필요한 요구조건과 범위에 대해 기술하였다. 향후에는 전력망 운영 관점에서 풍력단지와 에너지 저장장치를 운영할 수 있는 풍력단지 최적 감시제어를 개발하는 것이 미래 희망적인 연구 분야로 예상된다.

출처 : Md Maruf Hossain, Mohd. Hasan Ali, “Future research directions for the wind turbine generator system”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 2015, pp.481~489

◁ 전문가 제언 ▷

○ 2013년 세계 풍력발전 설치용량은 318GW이고, 상반기에 1,080MW가 설치되는 등 풍력에너지가 가장 성숙된 신재생 에너지기술로 인식되고 있다. 지난 10년 동안 미국과 유럽에서 풍력발전은 매년 20~30% 성장하였고, 향후 미국은 2030년에 총 전기의 20%를 풍력에서 조달할 계획이고, 유럽은 2030년까지 400GW의 풍력전력을 생산할 예정이다.

○ 풍력터빈은 약 4m/s풍속에서 전력을 생산하기 시작하여 약 12m/s 풍속에서 정격전력을 생산하고 25m/s에서 전력생산을 중단한다. 많은 국가의 경우 지상 10m 높이에서 평균 5m/s의 풍속을 나타낸다. 풍력터빈은 구조적 및 재정적 관점에서 볼 때, 100~120m 이상의 높이에 터빈을 설치하는 것이 대단히 어렵다.

○ 향후 풍력발전기의 크기와 중량을 감소할 수 있는 풍력터빈 설계기술, 또한 강하지 않은 바람에서도 풍력발전을 할 수 있는 기술의 향상에 도전하여야 한다. 또 전체 시스템을 효율적으로 가동하기 위해 에너지 저장시스템을 가진 완전 전력전자 변환장치의 개발이 요구된다. 미래의 풍력발전기는 계통연계 기준의 유지 능력이 향상되고, 정비가 별로 필요 없고, 중량의 감소가 절대적으로 필요하다.

○ 최근 미국의 Altaeros사는 지표가 아닌 상공에서 부는 바람을 이용하여 전기를 생산하는 기술을 발표하였다. 이는 회전자(Rotor) 주위를 둘러싼 도넛 모양의 헬륨 풍선을 300미터 상공까지 띄워 전기를 생산하는 기술로 전통적인 타워 형식의 풍력발전에 비해 시간당 2~3배 높은 전기의 생산이 가능할 것이다.

○ 정부는 2020년까지 서해에 2.5GW의 해상풍력 발전단지를 건설하여 세계 3대 해상풍력 강국으로 도약할 계획이다. 이 목표를 달성하기 위해서는 풍력터빈 공기역학, 기계적 모델링, 자연풍으로부터 연속적인 전력을 생산하기 위한 구조설계의 개발에 관한 엔지니어링은 물론 전력망 운영 관점에서 풍력단지와 에너지 저장장치를 운영할 수 있는 풍력단지 최적 감시제어 등의 개발에 집중할 필요가 있다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.