

풍력터빈 제어기술의 시너지 효과

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

1. 서언

- 지난 20년 동안 화석연료에 의한 전기 가격의 변동성과 기후변화에 관련된 지시를 포함한 국제적 정책의 변화는 기술의 진보를 자극하고 소규모 및 대규모 전 범위의 설계 및 제어 분야에서 새로운 기술과 시스템을 요구하게 되고 이를 바탕으로 풍력에너지 산업과 기술이 크게 성장하게 되었다.
- 풍력에너지 자원은 우선적인 대안으로 채택되어 세계적으로 가장 기대되는 자원이다. 본문은 에너지 생산, 설계 및 운영 최적화, 각각의 제어 분야, 단독 장치 및 전력망 연결 분야의 새로운 구도를 포함한 풍력터빈 제어기술에 관한 문헌 조사 결과를 기술하고 있다.
- 대폭적인 시장의 증대에 기인하여 육상 및 해상용 대형풍력터빈은 명백한 차이가 있다. 이 분야에 대한 연구결과는 발전장치의 건설, 운영 특성, 예측, 전기출력 및 정비비용에 이르기까지 전 단계에 걸쳐 최적의 해법을 제시하고 있다. 그러나 소형풍력터빈의 제어기술에 대한 자료는 별로 없고 대부분 수직풍력터빈에 대한 공기역학적 연구와 새로운 설계 접근방법에 집중하고 있고 아직 초기 단계로 보인다.
- 실제 소형풍력터빈(SSWT, small scale wind turbine)은 수평축 풍력터빈이 많고, 수직축 풍력터빈은 10배 이상의 전력을 생산할 때 경제적 수준이 된다고 예측하고 있다. 소형풍력터빈에 대한 정의는 아직 명백하게 되어 있지 않지만 대개 풍력터빈의 로터 직경이 100cm이하로서 50kW의 출력을 내는 풍력터빈을 말하고, 소-중형 풍력터빈은 350kW까지를 포함한다.
- 본문에 소형 및 대형 풍력터빈 제어기술을 비교하고, 소-중형 규모의

지능적 제어 알고리즘을 확보하기 위해 개발하여야 할 도전 과제를 도출하였다. 도시와 농촌에서 풍력에너지의 경쟁력 증대가 미치는 영향을 검토하고, 실현 가능한 풍력 에너지 가격 수준에 대해 기술하였다. 소형풍력터빈의 시스템 규모 도전과제를 도출하고, 대형풍력터빈(LSWT, large scale wind turbine)의 제한조건과 제어기술에 대해 설명하고 이를 소형풍력터빈에 적용하기 위한 제한 조건과 방법을 제시하였다.

2. 소형풍력터빈의 도전과제

- 도시 또는 농촌 지역에서 육상용 풍력터빈은 5m/s까지의 낮은 풍속에 적용한다. 높은 풍속에서 운전되는 대형풍력터빈과 달리 소형풍력터빈은 시간적으로 또 난류에 의한 변동성 때문에 제어방법이 대단히 복잡하다. 실제로 소형풍력터빈은 발생 전력규모가 작고 제어기술이 복잡하기 때문에 풍력에너지 산업에서 별로 매력적이지 못하다.
- 블레이드 요소 모멘텀 이론을 적용한 역설계 및 최적화 방법에 의해 제안된 새로운 모델의 소형풍력터빈은 보통 풍속에서도 효율적인 것으로 판명되었다. 예측하지 못한 바람이나 돌풍에서도 가변 회전 속도형 발전기를 채용한 소형풍력터빈은 예측 가능한 정상상태에서보다 더 많은 에너지를 생산 할 수 있다.
- 미래 스마트 시티용 전력망의 경우, 개발 중인 에너지 시장에서 소형 풍력터빈은 더욱 매력적이다. 스마트 그리드는 분산된 에너지 자원을 통합하고 동시에 근거리 소비자에게 에너지를 전송하고 분배한다. 분산된 전력자원을 적절히 조절하면 에너지 불균형을 감소하고 모든 전력망 연결자에게 유연하게 대응할 수 있다.
- 이 시스템은 아직 소규모이기 때문에 경제적으로나 환경적으로 만족할 수준이 못되고, 대안으로 하이브리드 시스템이 있는데 이는 시민들에게 적합하기는 하지만 아직 수익을 내지 못한다. 스마트 시티에서는 독점기업에게 독립성을 주고 전 지역사회가 체계적으로 연대를 이루도록 고려하고 있다.
- 소형풍력터빈은 대형풍력터빈의 반류(wake)에 의해 발생하는 소음보다

운전 중 소음이 낮다. 소형풍력터빈은 환경교란이 적고 건설 및 정비비용이 적지만 발전효율과 신뢰성이 낮다. 소형풍력터빈의 가장 중요한 문제점은 가동 풍속 범위가 도시지역에서 일반적으로 얻을 수 없는 10~13m/s 이고, 투입 비용효과가 기대에 못 미친다는 점이다. 따라서 에너지 발생 예측과 제어기술이 중요한 도전과제라 할 수 있다.

3. 풍력터빈의 제어기술 개발

- 소형풍력터빈의 제어기술은 전력 최적화, 풍속과 풍향 변화에 대응한 블레이드 피치 각도조정, 풍력터빈 부품의 안정화를 위한 발전기 토크의 3가지로 집약할 수 있다. 기계적, 공기역학적, 사회경제적 분야의 부품을 둘러싼 최근 경향은 다중 입력과 다중 출력을 제어할 수 있는 기술로서, 특히 소형풍력터빈에서는 발생 전기를 전력망에 접속하는 것이 중요한 과제이다.
- 최적제어는 몇 개의 기술적 변수들의 다양한 특성치를 최소화 또는 최대화할 수 있을 뿐 아니라 보다 우수한 예측, 신뢰성, 운전효율, 전력망의 임무와 부하, 에너지 품질과 집적을 보장하는 것이다. 일반적으로 정격속도에서 풍력터빈의 정격출력은 다목적이고, 유연하게 시스템을 제어할 수 있는 피드백 기능을 가진 여러 개의 폐쇄 루프를 포함한다. 더욱이 개방 루프 시스템은 선형성이고 풍속이 변할 때 적합한 안정성을 평가하지 않는다.
- 제어시스템은 풍력터빈의 개발, 개량 및 데이터 분석의 진보와 함께 발전하고 있다. 풍력터빈 시스템은 모두가 서로 다르기 때문에 특히 풍속이 급변하는 상태에서 전통적이고 보편적인 성능 모델을 확보하는 것은 대단히 어렵고 적당하지도 않다. 높은 난류유동 또는 풍속과 난류밀도가 급변하는 복잡한 환경에서 성능을 평가하는 것은 복잡하고 대단히 어렵다.
- 풍력터빈 제어기술은 물리적인 방법에서 변칙적인 방법에 이르기 까지 또 통제 불능 변수 방식으로부터 비매개변수적 방법에 이르기까지 광범위하게 존재한다. 수학적 및 계산적 데이터 취득 알고리즘은 통상적인 방법으로는 획득할 수 없는 최적의 해법을 제공한다. 이 방법은

궁극적으로 풍력 전기비용을 최소화하고, 에너지 출력, 환경영향, 공기역학, 경제성과 같은 단순 또는 다중 목적에 기반을 두고 있다.

4. 소형풍력터빈 제어기술의 응용

- 대형풍력터빈이 최고 수준까지 개발되면서 소형풍력터빈의 전망이 더욱 밝아지고 있다. 소규모 전력망에 연결 가능하고 또 시스템 최적화로 높은 신뢰성이 요구되는 대규모 에너지수요를 만족할 수 있을 것으로 기대된다. 스마트 그리드는 효율적인 새로운 제어기술, 데이터 처리 및 소규모전력망을 적용한 새로운 전력 시스템을 포함한다. 가변풍속조건에서 다양한 기술과 방법에 의한 최대출력 추적제어(MPPT, maximum power point tracking) 방식은 가변 풍속과 변동부하 조건하에서 고정 피치 시스템을 위한 센서 없는 제어 방법을 포함한다.
- 대형풍력터빈은 거주 지역에서 멀리 떨어지고 지상에서 수 피트 이상 높은 위치에 12~14m/s 의 높은 풍속조건에서 사용할 수 있고, 소형 풍력터빈은 건물이나 나무와 같은 장애물이 공기 유동을 취약하고 불안정하게 만드는 주거지역에서 사용된다. 이러한 조건은 주로 레이놀즈수(Re, Reynolds number)에 좌우되는 공기역학적 거동에 크게 영향을 미친다. 레이놀즈수가 낮으면 변속 구간에서 불안정하고, 난류밀도가 급상승하는 등 높은 변동성을 나타낸다.
- 반류(wake)는 소형풍력터빈의 운전에 다양한 영향을 미치고, 지표에 가까우면 난류가 심해져 그 영향은 더욱 커지게 된다. 하지만 난류밀도가 증가하면 출력이 약 4% 증가하여 소형-중형 풍력터빈의 최대 효율은 약 36%로 정의한다. 대형풍력터빈은 최대 45%의 효율을 달성할 수 있는데 비해 소형풍력터빈은 피치 각도에 따라 3.1~7.5m/s 정속 구간에서 최대 55%까지 에너지를 획득할 수 있는 것으로 알려져 있다.
- 소형풍력터빈은 공기역학, 전자설계, 피치제어, 에너지저장 및 접속장치가 크게 발전하면서 가격 경쟁력이 높아지고 있다. 소형풍력터빈은 기본적으로 전압차이에 의해 전류가 변할 때 토크가 변하는 형태의 발전기 고정전압 제어방식을 적용한다. 소형풍력터빈 제어의 가장 중요한 이슈는 운영중단 속도에 도달하여 출력이 제한되는 것과 전력망의 변

동이 심한 문제인데, 이는 피치제어, 전기적 브레이크 및 센서 없는 발전기 운영으로 제어 할 수 없다.

- 소형풍력터빈 제어의 주요 목적은 다중모드 제어전략에 의해 달성 가능한 최적의 발전 출력이다. 낮은 풍속에서는 이 제어전략을 가진 스위치 모드 정류기를 사용하고, 속도가 증가하면 위상진전(phase advance) 및 인버터 조절방식을 사용한다. MPPT는 발전기 토크 또는 출력지령으로 구성되어 있으므로 인버터제어는 회전자 위치제어를 고려하고, 위상 센서는 최대 출력을 제어하게 된다.

5. 결론

- 본문은 스마트 기술, 독특한 아이디어와 성능에 관한 소형풍력터빈의 제어 전략을 설명한다. 중요한 이슈는 전력망 연결 시 불안정성은 물론 전력효율, 품질 및 시스템 안정성 등이고, 개발 단계에서 동적성능 제어는 아직 미흡한 수준이다. 현재의 다목적 알고리즘은 소형풍력터빈에서 가장 치명적인 풍력터빈의 후류손실과 교란효과를 해석하지 못한다. 풍력단지의 비교 후류평가 기법은 효율적인 풍력터빈 출력을 저하시키는 도시의 장애물을 취급하는데 유익하게 사용될 수 있다.
- 대형풍력터빈과 소형풍력터빈의 차이에 따라 적절한 제어방법과 제어 기술을 개별화 또는 복합화하게 된다. 소형풍력터빈의 제어목적은 비용효과적 MPPT에 의해 최대 전력생산을 추구하는 것이다. 소형풍력터빈은 스마트 그리드와 소규모전력망에 매력적인 수단이지만 부하와 능동적 전력변화를 극복하고 시스템 안정성을 유지하기 위하여 포괄적인 해석과 탐구가 필요하다.

출처 : Agnė Bertašienė, Brian Azzopardi, “Synergies of Wind Turbine control techniques”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 2015, pp.336~342

◁ 전문가 제언 ▷

- 세계 103개 국가에서 가동하고 있는 풍력발전은 전 세계 전기 생산의 3.86%인 318.1GW를 생산하고 있고 향후 매년 증가할 전망이다. 지난 20년 동안 대형풍력터빈의 제어기술이 크게 발전하였고 향후 수십 년 동안 전력시장이 소단위 발전과 분산 에너지 자원으로의 전환에 따라 소형풍력터빈 시장이 더욱 성장할 것이다.
- 본문은 소형과 대형 풍력터빈의 제어기술을 비교하고, 소·중형 규모 풍력터빈의 지능적 제어 알고리즘을 포함한 공통의 도전과 개발과제를 설명한다. 도시 및 농촌 지역에서 풍력에너지의 경쟁력 증대가 어떤 영향을 미치는지 탐색하고, 실현 가능한 풍력 발전단가를 예상하였다.
- 소형풍력터빈의 제어기술은 전력 최적화, 풍속과 풍향 변화에 대응한 블레이드 피치 각도조정, 풍력터빈 부품의 안정화를 위한 발전기 토크의 3가지로 요약할 수 있다. 주요 과제는 다중 입력과 다중 출력을 제어하고, 발생 전기를 전력망에 접속하는 기술이다.
- 2015년 전 세계 소형풍력발전시스템의 시장 규모가 6억 달러를 넘어서고, 여러 산업 분야에서 경제적 시스템으로 이용이 확장되어 5~10년 내에 안정화될 전망이다. 풍력터빈의 후류손실과 교란효과의 평가기법은 효율적인 풍력터빈 출력을 저하시키는 도시의 장애물을 취급하는데 유익하게 사용될 수 있다
- 국내에서는 2014년 삼마도에 3kW 10기, 신안군 상태도에 10kW 5기를 설치하고, 최근 덕적도에 3kW 수평축 식 계통연계 형 소형풍력발전기 11대를 설치하는 등 소형풍력발전산업 시장이 활성화되고 해외수출시장까지 진출하고 있다. 향후 계통연계, 원격지에서 독립적 운전 또는 디젤발전기 등과 혼합한 하이브리드 방식 운영기술과 운전부하와 능동적 전력변화를 극복하고 시스템 안정성을 유지하기 위한 기술개발을 통해 국내 소형풍력터빈 산업의 성장을 촉구한다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.