

풍력터빈 제어의 첨단기술 동향과 도전

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 신효순
(0637shin@reseat.re.kr)

1. 머리말

- 전 세계 풍력터빈의 설치용량이 증가하고 미래 전망이 밝음에도 불구하고 풍력발전의 가격은 높은 초기 설비투자로 인해 단위당 생산가격이 다른 전통적 전력원에 비하여 아직도 높다.
- 해안선에서 멀리 떨어져 있는 해상 풍력터빈은 발전현장에 접근성이 안 좋기 때문에 운영 및 보수비는 물론 송전선의 고비용이 해결하여야 할 도전 과제이다. 그러나 해상풍력단지에서 적절한 제어전략과 함께 강건한 구조물의 상태관리법의 적용으로 풍력발전의 생산비는 더 감소할 수 있다.
- 고정 피치 터빈이 처음에는 덜 비싸지만 피치각의 조정 불가능으로 구조물의 부하가 더 현저한 대형 풍력터빈 영역에서는 인기가 없다. 풍력터빈은 가변 속도나 고정 속도로 운영할 수 있는데, 고정 속도 풍력터빈은 간단하고 강건하지만 메가와트 규모 터빈에서는 바람에서 에너지를 추출하는데 비효율적이고 가변풍속 영역에서 구동계통에 기계적 응력을 유도하기 때문에 인기가 없다.
- 오늘날 제조되는 메가와트 급 풍력터빈은 대부분 가변속도, 가변피치 및 수평축 터빈이고 각 블레이드를 독립적으로 제어하기 위하여 개개 블레이드 구동기구를 설치한다. 또한 이들은 여러 센서도 설치되어 있어서 본질적으로 다중 입출력(MIMO: multi-input multi-output)으로 운영되고 있다.

2. 풍력 에너지 발전의 기초

- 풍력터빈의 기본: 풍력터빈에 의한 최대 추출 가능한 전력은 가용풍력

의 59.3%에 제한된다. 이 제한은 Betz 제한이라 부르는데 이것이 풍력 터빈에서 최대 달성할 수 있는 공기역학적 효율을 나타낸다.

○ 표준 제어법과 제어 계층

- 풍력터빈 변환시스템의 제어계층은 감시제어, 가동제어 및 하위 시스템제어의 세 가지 명확한 수준을 갖는다. 고 수준 또는 감시제어는 터빈의 시작과 정지절차의 임무를 띤다. 가동 또는 터빈수준 제어는 풍력터빈 가동 중 어떻게 특정 제어목적이 실현 되는가에 관심이 있다. 하위 시스템제어는 피칭, 요잉(yawing) 및 발전기 전력전자단위와 같은 여러 구동 기구에 책임이 있다.
- 발전된 전력의 최대전력 추출과 조정의 두 가지 중요한 목적을 실현하기 위해 설치된 대부분의 풍력터빈은 비례적분, 집단적 날개피치 제어장치 및 토크 제어장치를 사용한다.
- 발전기 토크제어: 풍속이 발전 가능 속도보다 크지만 정격 값보다 낮을 때는 발전전력을 극대화하기 위해 표준 발전기 토크 제어를 사용한다. 이것은 로터를 가속 또는 감속하여 최적 전력효율 근처에서 들어오는 바람의 속도를 맞이하여 터빈을 가동하는 방법이다.
- 표준 집단적 피치제어: 주목적은 정격 값 근처에 발전된 전력을 조정하고 풍력터빈 시스템의 기계적 및 전기적 제약의 위반을 피하기 위하여 구조물의 부하를 제한하는 것이다.

○ 풍력터빈의 구조적 부하

- 풍력터빈의 크기와 정격 출력전력이 커지면서 공기역학과 중력으로 유도된 구조물 부하의 악영향이 점점 더 확연해 졌다. 구조물의 부하가 완화되지 않으면 바람직하지 않은 성능을 야기하거나 심지어 전체 풍력터빈 시스템의 초기고장을 초래할 수 있다.

○ 구조물 부하에 관련된 재료적 측면

- 해상풍력터빈은 가혹한 환경조건하에서 가동하기 때문에 특별한 관심이 주어져야한다. 해상풍력은 더 높은 속도의 바람을 받고 염분이 함유된 해양환경에 노출되어 있기 때문에 부식되기 쉽다. 그 결과 해상풍력터빈의 부품은 높은 기계적 성질, 높은 피로강도 및 높은 부식 저항을 가져야 한다.
- 블레이드와 허브로 구성된 로터는 풍력터빈 시스템에서 가장 고가의 부품이어서 총 풍력터빈 가격의 20%를 차지한다. 블레이드는 가장 일반적으로 사용되는 유리, 탄소 및 아라미드 섬유로 개선된 강도 대 중량 비 때문에 섬유강화 플라스틱(FRP)을 사용하여 제조된다.

3. 고급 제어방법

○ 전력의 속도 조정과 부하완화 문제

- 전통적 방법: 높은 조화 부하가 대형 풍력터빈에서 피로부하에 상당한 원인이 된다. 그래서 메가와트 크기의 풍력터빈에서 높은 조화 부하의 구조물 부하를 완화하는 것이 필요하다.
- 느린 다양한 로터 기울임을 완화하기 위한 주기적 블레이드 피치 제어법이 제안되었다. 여기서 피치 각이 측정된 지역적 유입각과 각각의 로터 블레이드의 상대속도에 따라 조절된다. 집단 피치 제어기와 비교하여 개개의 피치 제어기가 타워 정상에서 블레이드 기울어짐과 요 굽힘을 크게 감소시킨다.

○ 전력 최적화 제어 문제

- 풍력터빈에서 다른 중요한 목표는 저 풍속 영역 중 전력 추출 효율을 극대화 하는 것이다. 이 문제를 해결하기 위해 제어기는 풍속이 정격 값 이하일 때 최대 기계 역학적 효율을 추적하도록 설계한다.
- 이중여자유도발전기(DFIG: doubly fed induction generator)를 구비한 가변속 풍력터빈을 위한 비선형 연쇄 제어기를 사용하는데, 그 목적은 발전출력을 극대화 하는 반면 구동 계통의 강력한 부하 과도현상

의 유도를 피하는 것이다.

○ 전력 최적화와 부하감소 제어방법

- 속도와 전기전력을 조정하기 위한 다 변수 제어전략을 제안하였다. 이 두 가지 목표를 실현하기 위하여 비선형 동적상태 피드백 제어기와 선형피치 제어기를 조합하여 사용하였다. 속도조정과 전력제어 사이의 절충이 로터속도를 조정하기 위하여 전력 추적 오류 제한과 피치 제어기에 의하여 달성하였다.
- 토크 제어 응답을 개선하기 위하여 가변 피치 제어로부터 작은 섭동 신호가 사용되었다. 결과는 로터속도와 전력조정에서 개선된 성능을 보였고 허용한도 내에서 부하를 유지하였다.

○ 풍력터빈 제어에 영향을 주는 새로운 동향과 문제

- 최근에 광파 탐지 및 거리측정(LIDAR: light detection and range) 센서가 역풍이 터빈과 상호작용하기 전에 역풍속도를 측정해서, 들어오는 바람의 역학이 터빈 자체보다 빠르기 때문에 터빈이 출력신호를 제어하기 위하여 대응하는 시간을 허용할 수 있다.
- 다 변수 제어장치가 전력의 속도 조정과 구조물 부하감소에 관련된 목적들을 실현하기 위한 피드백 루프에 사용된다. 이 종류의 제어계획은 느린 반응시간 때문에 신속하게 변하는 풍속에 지배를 받는 대형 풍력터빈을 위하여 적용할 수 있다.

4. 논의 및 평가

- 풍력에너지 연구의 초점은 생산비감소, 안전과 신뢰성향상 및 생산된 전력의 품질개선인 것이 문헌조사에서 뚜렷이 나타났다. 제어 관점에서 이것은 전 가동 범위 즉 부분적 및 정격속도 영역에서 다중 목표 문제를 다룰 수 있는 제어전략을 설계함으로써 실현된다.

- 메가와트 규모 풍력터빈에서 발전된 전력의 품질을 개선하고 신뢰성을

보증하기 위해서 LIDAR 센서, 하이브리드 구동 및 후단 퍼덕거림과 같은 적극적인 공기역학 제어장치 신기술과 함께 다 변수 제어계획을 적용하는 것이 필요하다.

5. 결론

- 이 글에서 낮고 높은 풍속 영역에서 대형 풍력터빈에 사용할 수 있는 제어전략을 제시하였고, 다른 작동 양상에 관해 비교하였다. 구조물 하중감소와 관련된 제어설계에 특별한 초점을 맞추었다. 규모 경제를 활용하기 위해서 크기와 전력정격이 확대되면 풍력터빈에 의한 단위 전력생산의 가격은 감소될 수 있다. 거대한 크기를 갖는 터빈을 제작하는 것은 구조물 하중과 관련된 문제와 발전된 전력의 열등한 품질을 야기할 수 있다. 상충하는 요구를 갖는 이 같은 제어요구를 만족하기 위하여 다목적 문제를 다룰 수 있는 혁신적인 제어법이 불가피하다.
- 공기역학적 하중은 저 풍속 지역 동안 높지 않지만 최대 전력 추적은 구동 계통에 높은 변동토크를 야기해서 바람직한 제품수명의 끝에 도달하기 전에 고장의 원인이 된다. 최적 전력생산과 구동 계통의 하중감소 사이에 균형을 맞추기 위하여 대부분의 제어기가 단일 입력 및 단일 출력이기 때문에 피치와 발전기 토크를 조종할 수 있는 다변수 제어법이 더 탐구되어야 한다. 마찬가지로, 고 풍속 영역에서 전력의 속도와 구조물 하중감소가 다 변수 제어전략에 의해 실현될 수 있다.
- 고 풍속영역을 위한 대부분의 문서화된 제어 접근법은 선형법에 근거해서 설계점 근처에서만 유효한 것을 주시하는 것이 중요하다. 이 작업 설계점에서 상당한 이탈은 제어 성능저하를 야기한다. 이것은 풍속 변동에 의존해서 이득을 조정하는 변동 이득 제어기를 사용하여 피할 수 있다. 유효풍속은 터빈모델을 사용하거나 LIDAR를 사용하여 상류바람을 측정하여 추정할 수 있다.
- 들어오는 유효풍속이 터빈과 상호작용하기 전에 그에 대한 정보를 사용하여 제어기를 설계한다면 풍력터빈의 반응시간은 개선될 수 있을 것이다. 이 아이디어는 낮고 높은 풍속 동안 사용될 수 있으나 대부분 고속영역에 초점을 맞추었다. 또한 적극적인 공기역학 제어장치가 그들

의 성능을 더 개선하기 위해 제어계획을 보완하여 사용할 수 있다.

출처 : Jackson G. Njiri, Dirk Söffker, “State-of-the-art in wind turbine control: Trends and challenges”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 2016, pp.377~393



◁ 전문가 제언 ▷

- 풍력에너지는 환경에 부정적인 영향을 주지 않는 사실 때문에 가장 빠르게 성장하는 신재생 에너지원이다. 증가하는 수요를 만족하기 위해 풍력터빈은 크기와 전력정격에서 가속도를 내고 있다. 그러나 크기가 증가하면서 터빈 구조물의 부하는 더욱 지배적이어서 초기고장에 이룰 수 있는 터빈부품에 피로응력을 증가시키는 원인이 된다.
- 풍력에너지에서 집중할 분야는 다른 대체 전력원에 비해 경쟁적 우위를 갖도록 생산가격을 낮추는 것이다. 풍력에너지의 생산가격을 낮추면 제어관점에서 볼 때, 부분부하 체제 동안에는 최적 전력효율 근처에서 풍력터빈을 운전해서 피로하중을 감소하여 신뢰성을 보장하고, 고 풍속 체제에서는 그 정격 값에 발전된 전력을 조정하여 달성할 수 있다.
- 효율과 신뢰도는 서로 상충되는 목표를 가지고 있기 때문에 이들 두 가지를 보증할 수 있는 제어 알고리즘을 실현하는 것은 어렵다. 이 글은 주로 다목적 제어 계획에 초점을 둔 낮고 높은 풍속에서 풍력터빈 시스템에 사용되는 여러 제어전략을 검토하였다.
- 한국전력공사 전력연구원 박준영 선임연구원이 개발 중인 풍력터빈 원격제어 상태감시는 서남해 해상풍력 실증단지를 운영하기 위한 시스템 개발연구로 감시, 보고, 제어 및 분석 등으로 구성되어 있고 고장을 사전에 진단할 수 있는 상태감시 기능을 통합 구현한다.
- 한국 서해안 해상풍력 실증단계는 전라북도 부안과 고창해안에 총 발전용량 80MW 규모의 해상풍력단지로 건설된다. 우선 설치가 가능한 두산 중공업의 3MW급 20기 60MW를 먼저 조성하고 향후 추진과정에 따라 20MW 추가 설치를 고려할 방침이다.
- 풍력터빈은 에너지 변환과정에서 기계장치에 의한 제한들로 인해 출력파워를 적절히 제어해야한다. 이러한 출력제어는 풍력터빈의 수명을 증가시킬 뿐만 아니라 전력품질에도 많은 영향을 미친다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.