

풍력발전기의 설계 동향

차종희

1. 풍력발전의 현황

- 최근 세계적으로 풍력발전이 활발하게 개발되고 있다. 2002년 말을 시점으로 세계 풍력발전 시설용량은 약 26,660MWe에 달하고 있으며, 그 중 독일의 시설용량은 약 12,000MWe로 세계의 45%에 달하고 있다. 그 다음이 스페인이고, 제3위가 미국이다.
- 이것은 세계적으로 풍력발전의 도입이 활발히 추진되면서 대량생산과 기술진보에 따라 가격이 떨어지고 있어, 풍력발전이 재생가능에너지 중에서는 비교적 발전단가가 싼 전원이기 때문이다. 또한 보조금 등을 고려해 경제성이 성립된 것도 주요 원인이다.
- 풍력발전은 출력변동이 심한 것 등 기존의 전원과는 크게 다른 특성을 가지고 있다. 그래서 풍력발전은 전력계통에 영향이 최소가 되도록 풍차의 특성과 발전기의 특성을 고려하여 적절히 설계하여야 한다. 여기에서는 최근의 풍력발전기의 설계 경향을 소개한다.

2. 풍력발전기의 개요

- 풍력발전장치는 풍차 날개로 바람이 가진 에너지를 변환하여 변속기어 등을 거쳐 발전기에 전달하여, 얻은 발전전력을 전력계통에 송전하는 것이 기본적 구성이다.
- 풍력은 풍속의 3승에 비례하여 증가하기 때문에 풍속이 높은 경우는 풍차에서 그 에너지를 빼돌릴 필요가 있다. 즉 발전출력이 정격출력에 도달하는 풍속 이상에서는 출력을 억제하는 장치가 필요하다. 출력억제

의 방식으로 피치(pitch)제어와 스텔(stall)제어 2종류가 있다.

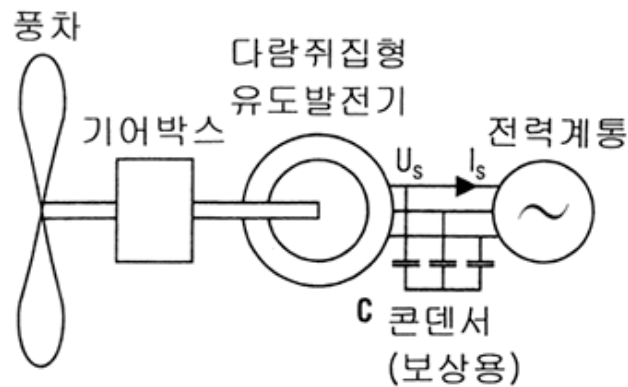
- 피치제어는 높은 풍속 시 날개의 바람맞이각을 작게 하여 바람이 가진 에너지를 빼돌리는 것이다. 한편 스텔제어는 날개의 실속(失速) 특성을 이용하여 고풍속 시 출력이 증가하는 것을 억제한다. 스텔제어는 날개 특성을 이용하기 때문에 피치제어와 같은 가동부(可動部)가 필요 없다는 이점이 있다. 최근 대형기에서는 제어 특성의 향상을 위하여 바람맞이각을 대략적으로 변화시키는 액티브 스텔(active stall)제어가 개발되고 있다.
- 종래의 풍력발전기는 구조가 단순한 유도발전기를 사용하여 이것을 계통에 직결하는 것이 일반적이었다. 유도발전기를 전력계통에 직결하는 경우 그 회전수는 계통 주파수에 대응하는 회전수가 되는데, 최근에는 발전기부분을 변경함으로써 풍차 회전수를 가변(可變)으로 하는 방식이 널리 사용되고 있다.

3. 풍력발전기의 설계 동향

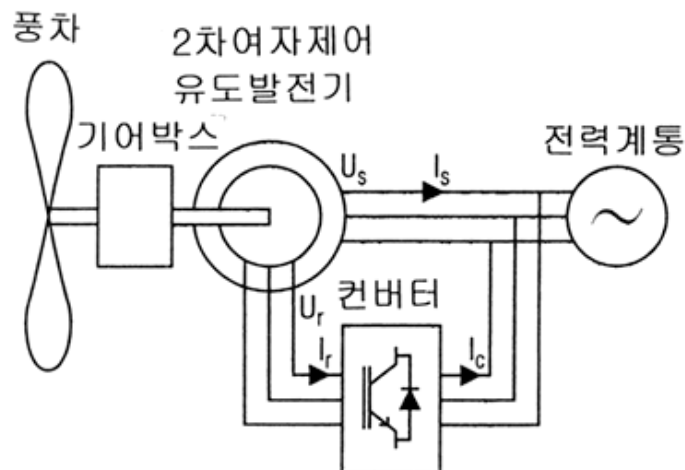
- 풍력발전기는 동기(同期)발전기를 사용하는 기존의 발전기와는 다르며, 이 차이 때문에 풍력발전은 전력계통에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 풍력발전기 설계에서 중요한 것은 풍력발전을 전력계통과 일체화시키는 것이다. 오늘날 풍력발전기의 설계는 다음의 세 가지 형식으로 수렴되고 있다.
 - 고정속(固定速) 풍차를 다람쥐집형 유도발전기와 결합하여 전력계통에 직결하는 방식
 - 가변속(可變速) 풍차를 2차여자제어(doubly fed) 유도발전기와 결합하여 컨버터를 거쳐 전력계통에 연결하는 방식

- 가변속 풍차를 동기발전기와 직결하여 전력계통에 컨버터를 거쳐 연결하는 방식
- 고정속 풍력발전기는 풍차와 다람쥐집형 유도발전기가 기어박스를 거쳐 연결되어 있으며, 발전기의 고정자(stator) 권선(卷線)이 전력계통에 연결되어 있다. 발전기에는 1~2% 정도의 슬립이 있기 때문에 엄격한 의미에서 고정속은 아니나 일반적으로 고정속 발전기라고 부른다. 다람쥐집형 발전기는 계통으로부터 반동력을 받기 때문에 이를 콘덴서를 써서 보상해 준다.
- 가변속 풍력발전기는 최근 현저히 발달되었다. 가변속 운전은 회전체의 기계적 주파수와 전력계통의 전기적 주파수가 분리되어 있기 때문에 최신 제어계통과 결합한 AC-DC-AC 컨버터를 사용한다. 2차 여자제어 유도발전기를 가진 가변속 풍력발전기에서 컨버터는 발전기의 회전자 권선에 연결되며, 고정자 권선은 전력계통에 직접 연결된다. 회전자의 전기적 주파수는 컨버터에 의해 변화할 수 있기 때문에 기계적 주파수와 전기적 주파수는 분리된 채로 가변속 운전이 가능하다.
- 직접구동 동기발전기와 연결된 가변속 풍력발전기는 컨버터에 의해 완전히 발전기와 전력계통이 분리되어 있으며, 가변속 운전이 가능하다.
- <그림 1>은 위의 풍력발전기 설계방식을 보여 준 것이고, <표 1>은 최근의 주요 풍력발전기 제작회사의 설계내용이다.

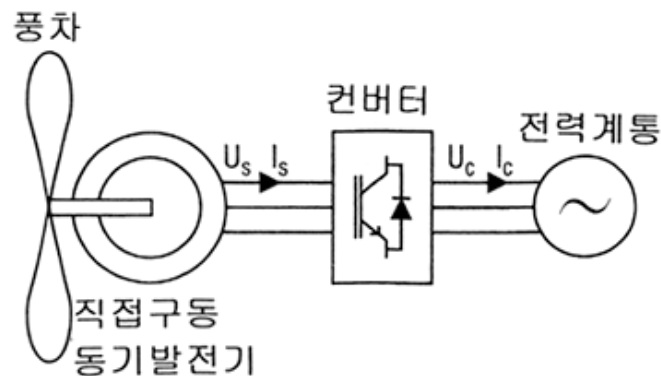
<그림 1> 세 가지 풍력발전기 설계



a. 고정속 풍차와 다람쥐집형 유도발전기



b. 가변속 풍차와 2차여자제어 유도발전기



c. 가변속 풍차와 직접구동 동기발전기

<표 1> 주요 풍력발전기 제작회사의 설계내용

제작회사명(국명)	설계내용	출력범위
Bonus(덴마크)	FS/S, FS/AS	600kW, 1~2.3MW
DeWind(영국/독일)	VSDI	600kW~2MW
Enercon(독일)	VSDD	300kW~4.5MW
GE Wind Energy(미국/독일)	FS/S, VSDI	600kW, 900kW~3.6MW
Lagerwey(네덜란드)	VSPS, VSDD	250kW, 750kW~2MW
Jeumont Industrie(프랑스)	VSDD	750kW~1.5MW
MADE(스페인)	FS/S, VSPS	660kW~1.3MW, 2MW
NEG Micon(덴마크)	FS/S, FS/AS, VSDI	600kW~1.5MW 1.5~2MW, 2,75MW
Nordex(독일)	FS/S, VSDI	600kW~1.3MW 1.5~2.5MW
REpower System(독일)	FS/S, FS/PDA, VSDI	600~750kW, 1050kW 1.5~2MW
Vestas(덴마크)	SVSPOS, VSDI	660kW~2.75MW 850kW~3MW

FS/S: Fixed Speed, Stall Control

FS/AS: Fixed Speed, Active Stall Control

VSDI: Variable Speed, Doubly Fed Induction Generator

VSDD: Variable Speed, Direct Drive Synchronous Generator

VSPS: Variable Speed, Pitch Control with Synchronous Generator

VSPA: Variable Speed Pitch Control with Asynchronous Generator

FS/PDA: Fixed Speed, Pitch Control with Direct Asynchronous Generator

SVSPOS: Semi-variable Speed, Pitch Control with Optislip

□ 세 풍력발전기 설계의 장단점

- 고정속 풍력발전기는 높은 구조적 부하가 걸리기 때문에, 다른 설계에 비해 기계적으로 견고히 만들어야 한다. 회전자의 속도를 변화시킬 수 없기 때문에 풍속의 변동은 직접 구동장치의 회전력 변동으로 전달된다. 전력계통에 연결되어 있으므로 풍력의 변동은 전력계통 전압에 변동을 가져올 수 있다.

- 가변속 풍력발전기의 이점은 주어진 풍속범위에서 더 많은 에너지를 변환시킬 수 있으며, 발생전력을 쉽게 제어할 수 있다는 것이다. 또한 기계적 응력이 적으며, 회전자가 플라이휠의 역할을 하기 때문에 급속한 동력변동을 완화시킨다. 일반적으로 가변속 풍력발전기에서 전압변동문제는 없으며, 가변속 풍력발전기는 전력계통 전압에 일치시킬 수 있다. 가변속 풍력발전의 결점은 전자적 컨버터가 과실이나, 스위칭 등으로 인한 전압변동에 민감한 것이다.
- 두 가변속 풍력발전기를 비교하면, 2차여자제어 유도발전기는 표준화가 되어 있고, 컨버터는 소형이기 때문에 저렴하다. 2차여자제어 발전기는 직접구동 가변속 풍력발전기에 비해 구동장치인 기어박스의 보수유지가 필요하며, 신뢰성이 낮다.
- 직접 구동방식의 결점은 부피와 무게가 크고, 발전기가 복잡하며, 컨버터는 100%의 전력을 통과시켜야 하기 때문에 전력의 1/3만을 통과시키는 2차여자제어식보다 크기가 커진다.

□ 풍속과 관련한 설계상의 고려사항

- 풍력발전기의 출력은 풍속에 따라 변화하나, 출력이 풍속의 3승으로 증가하기 때문에 비례하지는 않는다. 1~3m/s 정도의 낮은 풍속에서 풍력발전기는 정지되어 있으며, 풍속이 2.5~5m/s 정도가 되어야 시동된다(<그림 2> 참조). 정격출력에 도달할 때의 풍속을 정격풍속이라 하며, 보통 12~15m/s의 범위에 있다. 정확한 값은 풍차의 표면적에 대한 발전용량과의 비에 따라 정해진다.
- 정격풍속 이하에서는 최대의 풍차효율을 목표로 한다. 풍차효율은 풍차 블레이드 선단속도(tip speed)와 풍속의 비에 따르며, 이것을 “선단속도비”라고 부른다. 고정속 풍력발전기의 선단속도비는 풍차의 속도가 고정되어 있기 때문에 제어할 수 없다. 그러나 선단속도비는

풍속에 따라 변하며, 하나의 풍속에서 최적치에 도달한다.

- 가변속 풍력발전기에서 선단속도비는 풍속과 풍차의 속도에 따라 변한다. 최대 풍차효율은 풍속과 풍차의 속도에 따라 변한다. 최대 풍차효율을 얻기 위해서는 선단속도비를 언제나 최적 풍차효율(보통 6~8)에 상당하는 값으로 유지해야 하며, 이것은 풍차속도를 제어하여 달성할 수 있다. 높은 공기역학적 효율은 같은 풍속 범위에서 가변속 풍력발전기에서 달성할 수 있다.

□ 효율감소의 필요성

- 정격풍속 이하에서는 가능한 한 효율적으로 바람으로부터 에너지를 얻는 것이 목적이거나, 정격 풍속 이상에서 그렇게 하면 발전기와 컨버터에 과부하가 생긴다. 따라서 정격 풍속 이상에서는 바람으로부터 기계적 동력의 추출이 일정하게 유지되어야 한다. 이를 달성하기 위해서는 공기역학적 풍차의 효율을 풍속이 증가할 때 감소시켜야 한다.
- 이를 위해 두 가지 방법이 있는데, 스텔제어에 의한 출력제한과 피치 제어이다. 스텔제어에서는 풍차효율이 높은 풍속에서 효율이 폭락하도록 설계된다. 블레이드 설계로 이 거동은 본질적으로 일어나며, 효율감소를 위한 별도의 제어장치는 요구되지 않는다.
- 피치제어에서 블레이드는 바람맞이각을 변화하여 바람이 점차적으로 빠져 나가 효율을 감소하도록 설계되어야 한다. 이 경우 수압식이나 전기식 구동장치로 능동적으로 제어되어야 한다. 피치제어에서 입력 변수는 풍차의 속도이다. 높은 풍차속도에서 블레이드는 더 많은 바람이 빠져 나가도록 해야 한다. 블레이드는 풍차의 속도가 떨어지면 바람을 되돌린다. 일반적으로 고정속 풍차는 스텔제어를 하고, 가변속 풍차는 피치제어를 한다.

- 최근 액티브 스텔제어 개념이 도입되고 있다. 이 개념은 스텔제어와 유사하나, 전체 블레이드를 보다 나은 풍차제어를 위해 정격속도 범위에서 3~5도 뒤로 회전(피치제어시의 반대방향)할 수 있는 것이 다르다. 이 방법은 정격풍속과 차단(遮斷)풍속(cut-out wind speed) 사이의 모든 풍속에 대해 일정한 값을 유지하여 출력곡선을 수평으로 만들어 준다.
- 풍차는 차단속도를 가지며, 구조물의 과부하를 막기 위해 풍차를 정지시키는 속도로 보통 25m/s 근처의 속도이다. 낮은 풍속에서 최대 출력을 내는 풍력발전기에서 이 속도는 17~20m/s의 범위이다. 풍속의 10분간 평균이 이 설계치를 초과하면 풍력발전기는 정지된다.

4. 맺음말

- 풍력발전기 설계의 진보는 특히 MW급 발전기에서 볼 수 있다. 최근 MW급(>1.5 MW) 풍력발전기 설계는 2차여자제어 유도발전기를 가진 가변속, 피치제어방식과 직접 구동방식의 두 가지 경향이 있다. 전자는 기어박스를 가진 풍력발전기를 선택한 거의 모든 주요 제작회사가 속한다. 후자는 Enercon사가 300kW~4.5MW 범위에서 독점하고 있으며, 그 외에 Lagerwey사 및 Windmaster사가 750kW급의 직접구동 풍력발전기 제작에 성공하고 있다.
- 현재 900kW급 이하에서는 스텔제어가 일반적이나, 장기적으로는 MW급 이하에서도 가변속, 피치제어, 기어박스가 있는(또는 없는) 풍력발전기의 선택이 기대되고 있다. 기어박스를 가지고 컨버터를 거쳐 전력계통에 연결된 동기발전기에서 가변속장치가 큰 역할을 할 것인지는 아직 말하기 어렵다. 이것은 장차 다수의 2차여자제어 유도발전기에 근거한 풍력발전기를 가진 전력계통에서 단락이 일어날 때 일어나는 안정성문제의 해결에 달려 있다.

5. 참고문헌

1. Han Slootweg and Eize de Vries, Inside Wind Turbines, Renewable Energy World, January–February, 2003
2. J. G. Slootweg and W. L. Kling, Modelling and Analysing Impacts of Wind Power on Transient Stability of Power Systems, Wind Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 3–20, 2002