

풍력발전 기술의 현황과 미래



1

글 전 중 환 / 포항공과대학교 기계공학과, 교수
e-mail plume@postech.ac.kr

풍력발전기 시드웨어 핵심요소 기술의 현황과 미래 / 전 중 환 / 포항공과대학교 기계공학과, 교수

2002년 현재 세계의 풍력발전 총 설치용량은 30,400MW로 대략 30개의 원자력 발전소의 설치 용량에 해당하는 수준이며, 약 1,700만 가구에 공급할 수 있는 전력을 생산할 수 있는 규모이다. 이러한 급성장은 지난 25년 사이에 이루어졌다.

1980년도 초반에 미국 캘리포니아 주의 '윈드 러시(wind rush)'의 시작 당시의 풍력발전기는 55kW급으로 로터의 직경이 15m로 작은 크기였으나, 현재 세계시장의 주력기종 군을 형성하는 750~2,000kW급, 로터의 직경이 50~80m로 급격한 대형화로 발전할 수 있었던 것은 그 동안의 수많은 시행착오를 거친 풍력발전기의 핵심요소 기술의 연구개발 성과가 뒷받침한 결과라 하겠다. 상용 풍력발전 기술과 상용화의 변천 과정은 크게 다음 몇 개의 단계로 나누어 볼 수 있다.

1) 제1단계(1980~1985년)

제1단계는 1970년도의 두 번에 걸친 중동 석유 파동으로 유발된 에너지 의존도의 감소를 위한 세제혜택 제도가 미국 캘리포니아 주에서 실시되면서, 대형 풍력단지 개발 붐이 일면서 시작된다. 제1단계 동안에 풍력발전기의 평균출력이 55kW에서 100kW로 증가하였으며, 여러 기술적인 문제들이 속속 들어났는데, 몇 가지 예로서, 블레이드와 축의 연결부위 피로파괴, 블레이드 표면의 오염으로 인한 출력감소, 난류성 바람에 의한 동력 전달장치의 조기 파손 등을 들 수 있다. 이런 문제들을 극복하는 과정에서 풍력기술이 큰 발전을

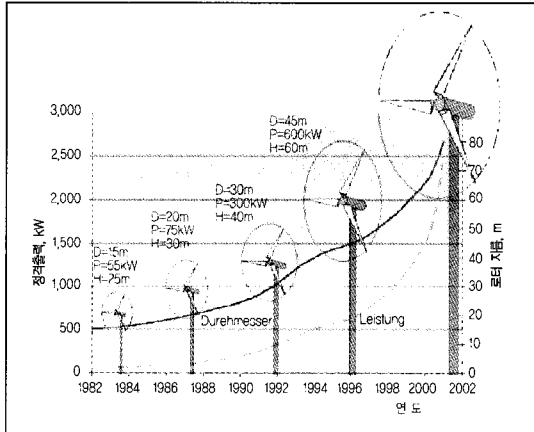
이루게 된다. 캘리포니아 풍력 단지들의 약 60%를 공급했던 덴마크의 제작회사들은 이 과정에서 기술의 우위를 점하게 되는 절호의 기회를 맞게 된다. 기술적 측면에서 보면 초기의 다양한 풍력발전기의 유형과 형식의 경쟁 중에서 소위 '데니스 컨셉(danish concept)'이라고 부르는, 수평축, 앞바람형(upwind type), 세 개의 블레이드, 정속회전(constant speed), 능동요잉(active yawing), 그리고 스톨제어(stall control)을 특징으로 하는 풍력발전기 유형이 세계시장에서 살아남은 기술로 부각하게 된다.

2) 제2단계(1986~1990년)

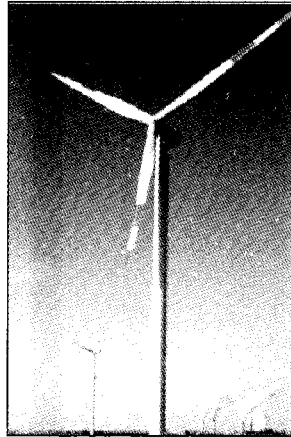
제2단계에서는 1985년 총 세금혜택이 50%에서 15%로의 감소로 인하여 미국 캘리포니아의 거대한 풍력단지(총 약 15,000기, 1,700MW 설치용량) 시장이 쇠퇴함에 따라 가격경쟁력 제고를 위해 데니스 컨셉 스톨제어형 발전기 출력이 250kW급으로 증가되었고, 로터의 직경이 30m로 증가되었다. 그리고 풍력 에너지 변환의 고효율화를 위하여 피치제어 기술이 상용화됨으로써 스톨제어 방식과 더불어 제어기술의 쌍벽을 이루게 된다. 제2단계에서 세계 풍력발전 기술의 주류는 수평축, 세 개의 블레이드, 앞바람형, 능동요잉 형식으로 정착되며, 다른 유형의 풍력발전기 형식은 상용 시장에서 사라지게 된다.

3) 제3단계(1991~1997년)

제3단계에서는 CO₂에 의한 지구온난화 문제와 연계하여, 지속 가능한 재생에너지 활용이란 명제가 제기되면서, 유럽을 중심으로, 특히 독일에서 풍력전력 계통연계 투입범이 1991년에 발효됨



로터의 크기와 정격출력 증가



Nordex사의 2.5MW 풍력발전기 (로터지름 80m, 높이 80m)

라서 다양한 크기의 설치용량 수요가 있는 육상 풍력 발전기 시장이 형성되어 있다. 특히 대용량 메가와트급 발전기는 향후 큰 시장잠재력이 기대되는 해상 풍력단지용으로 세계의 우수한 풍력발전기 제작회사들이 다투어 개발 또는 이미 상용화하고 있다. 곧 시제품이 선보일 4.5MW 독일 프라이드러사의 해상풍력발전기는 로터의 직

경을 120m로 현재로서는 최대의 풍력발전기가 될 전망이다. 대형화로 가면서 가변속 회전과 피치제어 방식이 선호되는 추세는 분명해지는데 이는 발전단가 경쟁력을 위해서 높은 에너지변환 효율이 절대적으로 중요해지기 때문이다. 대형화의 한계는 주로 블레이드를 비롯한 구조물의 경량화 기술에 의해 결정된다.

을 시발점으로 준대형급 250~750kW, 로터의 직경 30~50m 기종의 기술개발과 시장형성이 급격히 진행된다. 1992년에서 1997년 사이에 유럽에서 연평균 약 38%의 설치용량 성장률을 달성하면서 전 세계 풍력 설치용량의 약 80%를 유럽이 차지하게 된다. 기술적으로는 성숙 안정 단계에 진입하여, 에너지 변환효율의 증가, 풍력발전기의 신뢰도 제고로 높은 기술가용도(technical availability)의 달성, 즉 60%에서 96%로 개선, 그리고 대형화에 따른 운영관리비 절감 등에 힘입어, 발전 단가가 1980년도 초반의 1kWh 당 미화 약 9센트에서 1997경에 약 4센트로 떨어지면서 화석연료 발전 단가와 경쟁이 가능한 수준까지 이르게 된다. 이 단계에서 스톱제어와 피치제어 방식의 발전기가 각각 대략 반반으로 시장을 점유하게 된다. 새로운 기술로는 증속기가 필요 없는 직접구동형 발전기와 가변속형 회전 발전기의 출현을 보게 된다.

4) 제4단계(1997~현재)

현재 진행 중인 제4단계에는 메가와트급 대형화의 진입 추세가 뚜렷하며, 세계적으로 600kW 급부터 2,500kW급까지 시장의 여건과 용도에 따

라서 다양한 크기의 설치용량 수요가 있는 육상 풍력 발전기 시장이 형성되어 있다. 특히 대용량 메가와트급 발전기는 향후 큰 시장잠재력이 기대되는 해상 풍력단지용으로 세계의 우수한 풍력발전기 제작회사들이 다투어 개발 또는 이미 상용화하고 있다. 곧 시제품이 선보일 4.5MW 독일 프라이드러사의 해상풍력발전기는 로터의 직

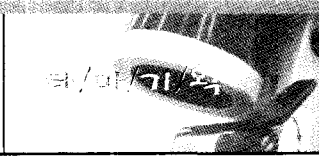
경이 120m로 현재로서는 최대의 풍력발전기가 될 전망이다. 대형화로 가면서 가변속 회전과 피치제어 방식이 선호되는 추세는 분명해지는데 이는 발전단가 경쟁력을 위해서 높은 에너지변환 효율이 절대적으로 중요해지기 때문이다.

대형화의 한계는 주로 블레이드를 비롯한 구조물의 경량화 기술에 의해 결정된다.

회전축 형식 : 수평과 수직

수직 회전축 형식의 설계로는 잘 알려진 다리우스(Darrieus)식, H-자 형의 수직 직선 블레이드식, 사보니우스(Savonius)로터식 등이 있다. 이들 수직축 형식의 설계의 가장 큰 장점은 수평축 형식 설계에서는 반드시 필요한 요잉운동 장치가 필요 없다는 것이다.

그러나 수직축 설계형식은 수평축 형식에 비해 에너지 변환 효율이 현저히 떨어지는 것이 결정적인 약점이다. 또한 수직형 로터 구조물의 진동 문제도 수직형 설계가 선호되지 않는 이유 중 하나이다. 위의 이유로 현재 세계 시장에서 상용



화된 중대형 풍력발전기는 대부분 수평형식 설계를 채택하고 있다. 아래의 서술에서 수평축 설계 형식만 고려하기로 한다.

로터 : 블레이드 수

풍속과 로터 회전수와 로터 회전시 차지하는 면적(swept area)이 주어지면 공기역학적으로 최적의 전체 블레이드 면적이 결정된다. 블레이드 익단 손실을 고려하지 않는다면, 전체 블레이드 면적이 동일한 경우 사용되는 블레이드 수는 임의로 결정할 수 있다. 그러나 익단 손실은 블레이드 숫자가 많으면 많을수록 감소한다. 한 개 블레이드 로터에서는 세 개 블레이드 로터에 비해 약 10%의 더 큰 익단 손실이 발생하며, 두 개 블레이드일 때는 세 개 블레이드에 비해 그 손실이 약 4%이다. 그러나 많은 숫자의 블레이드를 사용할 때에는 제작비용이 증가하므로 실제 설계에서 블레이드 숫자를 제한해야만 한다. 한 개 또는 두 개 블레이드 로터는 매우 높은 주기적 부하를 피하기 위하여 로터-회전축 연결이 힌지 형식의 설계로 되어야 하지만 이부분이 피로파괴에 취약한 문제를 야기하므로, 동역학적으로 보다 더 안정적인 세 개 블레이드 로터 형식을 채택하게 되어, 상용화된 중대형급 로터는 오늘날 대부분 세 개 블레이드 형식을 채택하고 있다. 한편, 최적 전체 블레이드 면적은 회전수에 반비례하므로, 높은 설계 회전수를 채택하면 면적이 작으므로 가벼운 블레이드를 사용할 수 있어 제작비용을 절감할 수 있다. 그러나 익단에서 발생하는 소음을 제한하기 위해서는 실제 설계에서 육상용 풍력 발전기의 익단 원주 속도가 약 65m/s를 초과하지 않도록 제한되어야 하므로 블레이드의 최대회전수는 이 소음 제한 조건에 의해 결정된다.

로터 회전수 : 정속과 가변속

'80년대 이후 시장을 석권하게 되는 중대형 풍

력발전기의 회전수는, 저렴하고 견고한 유도발전기를 통상적으로 사용하여 전력계통에 직접 연계하는 방식을 채택하므로, 그 계통의 고정 주파수에 의해, 수시로 변하는 풍속에 상관없이, 일정한 회전속도를 항상 유지하게 된다. 로터의 회전수는 이 경우에 발전기와 로터의 서로 다른 회전수 때문에 사용되는 증속기어의 증속 비율에 의해 결정된다. 대략 로터 직경 20m에 출력이 100kW 이면 로터 정속 회전수가 약 50rpm 정도이고, 로터 직경이 50m에 출력이 750kW 정도이면 정속 회전수가 약 25rpm 근처가 되도록 통상적으로 설계된다. 정속 회전과 아래에서 설명할 스톱제어식 설계 형식은 세 개 블레이드형 로터와 더불어 간단하며 견고한 데니시 컨셉 풍력 발전기의 가장 중요한 기술 구성 요소이다. 정속회전은 회전수 제어가 필요 없다는 장점이 있는 대신, 설계 풍속을 벗어나는 다른 풍속에서 에너지변환 효율이 항상 낮은 것이 큰 약점이다. 이 약점을 극복하기 위하여 '익단속도비(tip speed ratio)'를, 즉 블레이드 끝단의 원주 속도를 풍속으로 나눈 값이 항상 일정한 최적 설계값을 유지하도록 해야 한다. 이를 위하여 풍속이 증가하면 로터의 회전수가 이에 정비례하여 같이 증가하도록 회전수를 제어하여야 한다. 주어진 풍속에서 로터의 공력토크와 발전기의 부하 토크가 평형을 이루는 동시에 익단속도비가 일정하도록 로터의 회전수를 제어하는 방식을 연속가변속 회전 형식이라 한다. 근래에 메가와트급으로 대형화가 되면서 최신 설계에서는 연속가변속 제어방식이 전반적으로 선호되고, 정속방식은 메가와트 이하의 작은 용량의 오래된 설계에서 주로 볼 수 있다.

출력 제어 방식 : 스톱과 피치 제어

한번 선택된 발전기의 정격출력이 주어지면, 주어진 크기의 로터의 공력출력이 정격출력에 도달하는 정격풍속이 있다. 풍속이 정격풍속 이상이 되면 공력출력을 제한하여 더 높은 풍속에서

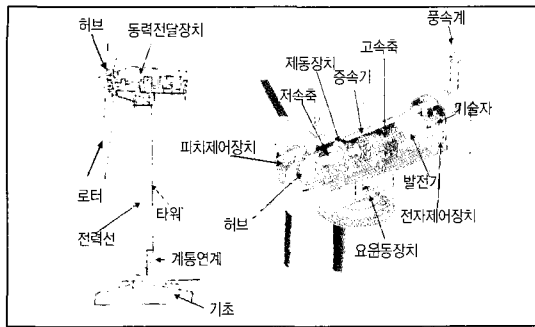


도 정격출력에 해당하는 일정한 공력출력이 로터에서 발생하도록 제어하여야 발전기의 과부하를 방지할 수 있다. 이 공력출력 제어에 이용되는 대표적인 두 가지 방식 중 하나가 스톨(stall)제어이고 다른 하나가 피치(pitch)제어이다. 스톨제어는 주로 정속회전 방식과 연계하여 사용하는 방법으로서 회전축에 고정되어 있는 블레이드에 풍속이 정격풍속을 넘어서면서, 블레이드가 받는 상대적 바람의 받음각이 증가하여 블레이드 저압 표면 쪽에서 유동이 박리하므로 양력이 감소되는 스톨현상을 이용하여 공력출력을 제어하는 방식이다. 이 방법은 블레이드가 회전축에 단순히 직접 고정되므로 구조역학적으로 매우 간단하고 견고하다는 장점 외에도 출력제어가 풍속의 변화에 따라 자동적으로 이루어지므로 기술적인 측면에서 매우 절묘한 우수한 방법이라 할 수 있다. 그러나 스톨 특성이 아직 유체역학적 이론으로 예측하기가 상당히 어려운 부분이 있기 때문에 블레이드의 공력설계에 많은 경험이 필요하다. 특히 블레이드의 익형 단면 형상이 스톨 특성을 결정하므로 적절한 단면형상의 선택이 매우 중요하다. 그 외에도 스톨의 특성 때문에 정격풍속 근처 풍속에서 공력출력이 정격출력을 부분적으로 초과하는 풍속 범위가 있기 때문에 발전기의 정격출력 용량을 로터의 정격 공력출력보다 더 크게 선택해야 하므로 발전기 무게와 단가가 필요 이상으로 높아지는 단점도 있다. 스톨제어의 경우에 로터의 안전제동 장치가 별도로 필요하게 된다. 피치제어에서는 블레이드가 받는 상대적 바람의 받음각을 풍속의 증가에 따라 감소하도록 블레이드를 길이방향(로터의 반지름 방향) 축을 중심으로 회전한다. 이를 피치운동이라 부른다. 정격풍속 이상의 모든 풍속에서 받음각을 지속하여 점진적으로 낮추어 발전기의 정격출력에 정확히 맞추도록 능동 제어가 가능할 뿐만 아니라, 정격풍속보다 낮은 풍속범위에서는 공력출력이 최대가 되도록 피치각을 조정할 수 있다. 피치운

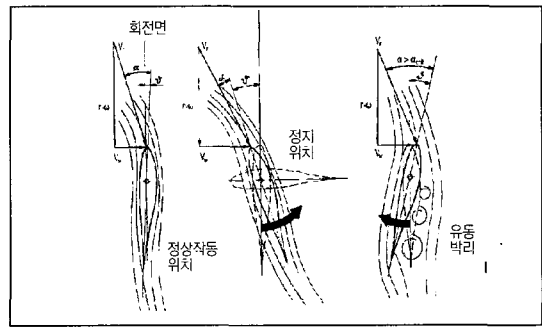
동은 출력제어에뿐만 아니라, 로터의 공기역학적 안전제동 장치의 수단으로 매우 중요한 역할을 한다. 블레이드의 주 코드(chord)방향이 회전축 방향, 즉 바람 방향과 평행하도록 피치각을 90도로 회전하면 로터의 회전방향으로 최대의 공력저항이 발생하여 매우 효과적인 로터 안전제동을 별도의 다른 제동장치 없이 실현할 수 있다. 정격풍속 이상에서 피치제어는 출력의 제어뿐만 아니라, 회전축에 걸리는 공력에 의한 회전축방향 공력하중을 스톨제어의 경우와 비교하여 현저히 감소시키므로 축 베어링 설계에도 매우 큰 영향을 미친다. 피치 장치와 같은 구조로 구성된 능동스톨(active stall)이라 부르는 출력제어방식에서는 출력을 제어하기 위하여 피치각을 스톨이 발생하는 큰 받음각 쪽으로 돌려 스톨 범위 안에서 출력을 능동제어하게 된다.

동력전달 : 직접구동형(무 증속기)과 간접구동형(증속기 부착)

중대형 용량의 풍력발전기의 전통적인 형식은 비교적 높은 회전속도(1,800rpm 또는 1,500rpm)의 유도발전기와 낮은 회전수(30rpm)의 로터를 증속기로 연결하여 비교적 가볍고, 작은 부피의 발전기를 사용하는 대신에 비교적 무겁고, 큰 부피의 증속기를 풍력발전기 동력전달의 중요 구성요소로 채택하고 있다. 1980년 중후반 부터는 중대형 풍력발전기에 증속기가 없이 로터에서 동력이 직접 발전기에 전달되는 새로운 형식이 시장에서 상용화되기 시작하였다. 증속기가 없는 직접구동형 장치의 개발의 동기로서는 첫째로 증속기의 제거로 보다 저렴한 가격, 둘째로 타워 상부 나셀부분 총 무게 및 길이의 감소, 셋째로 증속기 손실을 배제하므로 기대되는 효율 향상 등을 꼽는다. 한편으로는 새로운 대형, 고출력, 저속, 고토크의 다극형 발전기를 개발해야 하는 부담이 따른다. 직접구동형은 통상적으로 가변속형식과 교류/직류/교류 전력변환 형식을 택



풍력발전기의 내부 구조



블레이드의 피치제어 및 능동스톨제어

하여 전력계통에 연계된다.

대한 공탄성 해석기법, 넷째로 기초연구로서의 에어포일 설계, 공력소음 예측, 해상풍력터빈의 설계를 위한 하중 가정치 연구 등이 향후 설계 전산모델의 개선에 기여할 것이다.

설계 전산수치해석 모델

풍력발전기의 거동을 완벽히 모사하려는 수치 해석 모델 정립을 위한 연구개발이 지난 20여 년 동안 유럽과 미국 등 풍력 관련 전문 연구기관과 기업체 등에서 꾸준히 진행되었다.

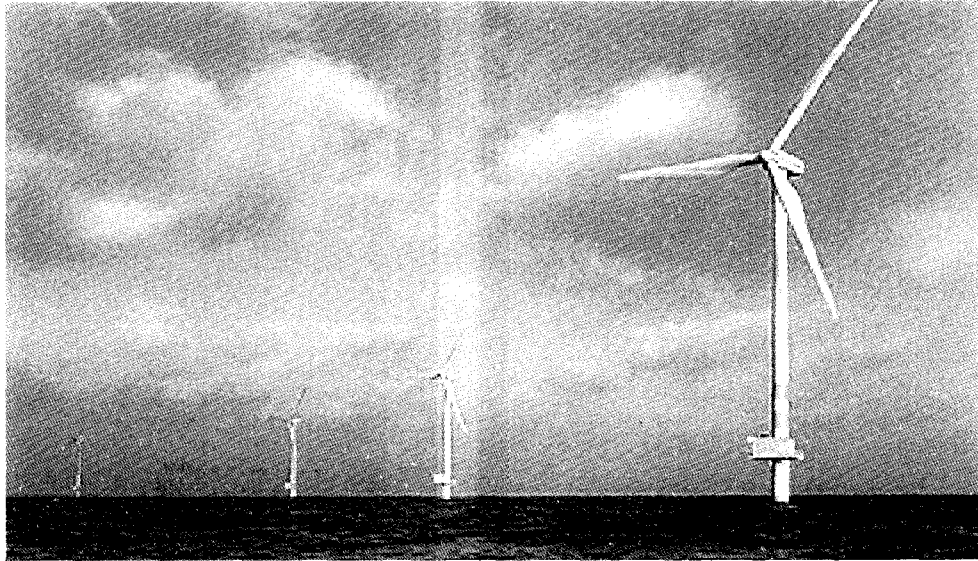
그 결과로 오늘날 실용성이 검증된 몇 개의 설계용 전산해석 프로그램이 상용화되어 시제품 개발과 인증서 발급을 위한 설계평가 등에 통상적으로 사용되고 있다. 그 중에 제작사나 인증기관에서 흔히 사용하는 대표적인 전산프로그램으로는 블레이드(BLADED), 플렉스5(FLEX5), 아담스 더블유티(ADAMS WT) 등이 있다. 어떤 전산프로그램에서든지 풍력터빈의 거동, 즉 터빈의 제어와 성능, 하중과 각 부위의 응력을 정확히 모사하기 위해서는 다음의 세부분야에 대한 심도있는 연구가 앞으로도 계속 필요하다. 첫째 풍력단지 내의 후류유동장의 정확한 모델, 복잡한 지형의 유동장 모사, 불안정한 대기층에서의 풍속모사 등 풍속 유동장에 대한 신빙성 있는 예측모델 도출, 둘째로 회전하는 로터의 스톨현상의 정상 및 비정상 동적거동과 에어포일 형상과의 상호관계 연구, 셋째로 전산유체해석을 병용한 유연구조에

새로운 설계개념 도입

향후 메가와트급 특히 해상풍력발전기 대형화의 기술적 한계는 구조물 자체의 무게하중에 의해 주어진다. 따라서 구조물의 경량화가 풍력발전기 대형화의 절대적 관건이다. 경량화를 달성하기 위해 향후 연구개발 방향은 가볍고 강한 새로운 스마트소재(탄소섬유 등)의 개발 및 사용이며, 이와 동시에 구조물의 유연 변형의 한계를 현저히 큰 값으로 허용하여 구조물의 무게를 줄이는 새로운 설계개념을 도입하는 연구가 추진되어야 할 것이다. 또 다른 새로운 설계개념은 높은 평균풍속과 낮은 평균풍속에 특별히 적합한 로터의 최적설계에 관한 것이다. 여기에는 에어포일의 설계, 블레이드의 형상, 수량, 익단속도비, 트위스트각도, 제작비용 등 여러 상호관련 인자들이 같이 고려되어야 할 것이다.

로터 성능 개선

첫째로, 에어포일의 성능 개선은 높은 양항비와 블레이드 표면거칠기에 대한 민감도 감소에 초점이 맞추어져 있으며, 특히 블레이드 구조의



스웨덴의 Utgrunden에 설치된 10.5MW 해상풍력발전단지
(스웨덴 남동쪽 해안에서 12km 떨어진 발틱해에 1.MW급 풍력발전기를 총 7개를 설치함)

경량화를 위해 두꺼운 에어포일의 공력성능 향상이 향후 새로운 에어포일 설계의 지향하는 방향이 되어야 할 것이다. 지난 25여 년 동안의 많은 연구의 노력으로 오늘날 풍력발전기용 에어포일의 성능은 이미 매우 높은 수준에 도달하였으므로 앞으로는 어떤 획기적인 개선보다는 작은 점진적인 개선이 기대된다. 예로서 넓은 범위의 레이놀즈수에 대한 공력성능 예측, 스톨 거동에 대한 정확한 이해와 예측기법 등이다. 둘째로, 블레이드의 재료특성의 개선이다. 즉 여러 새로운 복합재료의 물성 개선과 물성치 데이터 확보가 필요하며, 섬유 방향성을 고려한 블레이드의 최적 구조설계가 경량 대형 블레이드 성능개선에 결정적 역할을 할 것이다. 셋째로, 블레이드의 유동제어를 통한 성능개선이다. 예로서 블럭스 제너레이터를 사용한 스톨제어 성능개선, 또는 부분 스패의 피치제어에 의한 출력전력의 품질 개선, 또는 소음 감소를 위한 블레이드 익단의 형상 최적화 등이다.

해상풍력 발전과 멀티 메가와트 설계

현재 4.5MW급 해상풍력발전기 시제품이 완성 단계에 있으며, 향후 5~10MW급의 초대형 풍력발전기가 현실화될 것인지는 더 지켜봐야 할 것이다. 설계기술적인 측면에서 우선 해상풍력발전기 블레이드의 익단속도를 통상 육상용의 65m/s에서 100m/s까지 올려 가능한 한 로터의 직경과 무게를 줄이고, 동시에 직접구동형은 아니지만, 적은 극수의 비교적으로 경량인 다극 발전기와 낮은 증속비의 가벼운 증속기를 사용하면 나셀 속의 전체 구조물의 무게를 줄일 수 있을 것이다. 해상 풍력발전기의 대형화는 해상풍력발전지의 운영관리 및 전력계통 연계 설비비용의 최소화에 기여하므로 발전단가의 절감을 위한 매우 중요한 기술적 요소이다.

이상으로 최근 풍력발전기술의 변천과 핵심요소기술의 현황 그리고 향후 연구개발의 동향을 알아보았다.