

풍력발전용 터빈 기술과 풍력발전단지 개발 현황

김호민
제주대학교 전기공학과

1. 서 론

인류가 풍력을 여러 형태로 활용해 오고 있다는 사실은 여러 문헌을 통해 확인되고 있다. 수천 년에 걸쳐 해양을 항해하기 위한 수단으로 범선을 이용해 왔으며, 알 마스우디(Al-Masudi)의 문헌에 의하면 10세기에 동 페르시아 시스탄 지역에서 양수풍차가 사용되었다고 기록되어 있다. 한편, 아라비아의 탐험가인 알 이스타크리(Al-Istakhri)는 950년경 지금의 아프가니스탄과 이란의 국경 부근에서 곡물을 제분하기 위해 수직축 풍차를 사용했다고 기록하고 있다. 비슷한 시기에 이집트에서는 관개 목적으로 풍차를 이용하였다고 한다. 풍차는 수차와 더불어 인류가 사용해오고 있는 가장 오래된 동력 기기라고 할 수 있다.

이 글에서는 19세기부터 자연의 바람을 이용하여 전력을 생산하는 풍력발전 기술의 역사와 현재의 풍력발전용 터빈 기술을 살펴보고, 전 세계 풍력발전 단지건설 동향과 제주 풍력발전단지 개발현황을 기술하고자 한다.

2. 풍력발전의 역사

전력생산용 풍력발전기의 개척자는 덴마크의 P. 라쿠르(Poul la Cour)교수라는 것이 정설이다. 그는 1891년 덴마크의 아스코우에 풍력발전연구소를 설립하고 풍력발전의 기초를 정립하였다. 그러나 영국의 문헌에는 1887년에 클래스고의 J. 브라이스가 수직축 풍차를 이용하여 3 kW의 발전을 시작하였고, 생산된 전력을 축전지에 저장한 후 조명에 사용하였다는 기록이 있다[1]. 미국의 문헌에는 1888년 클리블랜드 광장에 C. F. 브러시가 직경 17 m의 거대한 블레이드 144조각으로 구성된 다익 풍차를 건설하여 12 kW의 풍력 발전을 통해 350개의 백열전등을 밝히고, 1908년까지 20년간 사용했다는 기록이 있다. 이들 풍력발

전기는 모두 항력을 이용한 저속, 고토크의 풍차로 발전기를 가동하는 고전적 풍차를 개량한 형태였다.

이에 비하여 덴마크의 P. 라쿠르는 풍력 발전을 위한 고속 회전형 풍차를 개발하였다. 그는 1891년 덴마크 정부로부터 보조금을 받아 아스코우 지역에 그림 1과 같은 4개의 블레이드로 구성된 반경 5.8 m의 세계 최초로 풍력 발전을 목적으로 하는 시험용 풍차를 설치하였다.

덴마크에서는 디젤발전과 병용하는 소규모의 풍력발전회사가 다수 설립되었는데, 1908년에는 10~20 kW급의 풍력발전기가 72기에 이르렀고, 1918년에는 120기가 넘는 풍력발전기가 상업운전을 했다. 하지만 제1차 세계대전 중전 후 교류 발전을 통해 전력을 생산하는 대규모 화력발전회사가 설립되면서 풍력발전 사업은 규모가 줄어들었다.

19세기 말부터 20세기 초에 걸쳐 풍력발전이 실현되었지만, 모든 풍력터빈은 소형 직류발전기를 사용하였다.

P. 라쿠르의 제자인 J. 율(J. Juul)은 전력회사 SEAS의 기사로 있으면서 풍력터빈의 대형화를 가능하게 하였고 전력망에 접속하는 계통 연계 방식을 제안하였다.



그림 1. P. 라쿠르의 시험용 풍력발전기.

J. 울이 고안한 풍력터빈은 고정 피치 블레이드 방식으로 제작되었고, 실증시험을 통해 대형화 가능성을 입증하였다. 이 성과를 기반으로 1957년에 직경 24 m, 정격 출력 200 kW급의 게슬(Gedser)풍력터빈이 건설되어 1967년까지 10년 동안 가동되었는데 연간 평균 35만kWh의 전력을 생산하였다[2].

풍력발전의 유용성이 실증되면서 더 많은 바람 에너지를 활용하여 전력을 얻고자 풍차를 대형화하는 움직임이 여러 나라에서 구체화되었다. 대형 풍차의 제1호는 1931년 흑해 연안의 러시아 도시 바라크라와에 건설된 100 kW급 풍력터빈이다. 이 풍력터빈의 연간 발생 전력은 28만kWh 정도로, 생산된 전력은 35 km 떨어진 2만kW급의 화력발전소로 보내지고 있었다.

세계 최초의 MW급 풍력터빈은 1941년 미국 버몬트주의 그랜드파산 정상에 설치된 스미스 패트넘 풍력터빈(그림 2)이다.

출력 1,250 kW인 풍력터빈은 직경 53 m, 중량 8 ton의 스테인리스로 제작된 2개의 블레이드를 가지고 있는 구조이다. 시험 운전 후 1945년 3월부터 상업운전을 시작하였지만 1개월 만에 블레이드 설치부가 파손되고 제2차 세계대전으로 인해 재료 확보에 어려움을 겪으면서 개발이 중단되었다.

풍력발전용 터빈은 1980년대 이후 급속히 보급되기 시작하였고 이후 경제성을 확보하기 위해 발전기의 대형화가 추진되었다. 1990년대 말에 이르러 현재와 같은 풍력발전 터빈 방식의 MW급 터빈 제조가 시작되었다.



그림 2. 세계 최초의 MW급 풍력터빈.

전력생산을 목적으로 하는 풍력터빈 기술의 급격한 발전은 유럽인 경우 제2차 세계대전 기간 동안 독일군의 해상봉쇄로 인해 중동으로 부터의 원유수입이 어려움을 겪으면서 시작되었고, 미국인 경우 1970년대의 두 번에 걸친 석유파동 이후 국가 안보와 안정적인 에너지 공급의 필요성이 높아지면서 시작되었다. 하지만 현재에는 화석연료의 고갈문제가 대두되고 화석 연료의 대량 소비로 인해 지구 온난화나 산성비, 생태계가 파괴되는 등 환경문제가 점차 커지면서 많은 국가에서 적극적으로 보급을 늘리고 있는 추세에 있다[2].

3. 풍력발전용 터빈 시스템 기술

풍력발전용 터빈의 기술발전은 크게 3가지에 집중해 있다: 1) 타워의 높이, 2) 블레이드(날개)의 길이, 그리고 3) 실제적 발전량을 나타내는 설비이용률(capacity factor)를 증가시키는 것이다. 비록 타워의 높이와 로터(rotor)의 지름길이를 증가시키는 기술에 비해 큰 진전을 보이지는 못했지만 설비이용률의 증가로 인한 비출력(比出力)의 감소는 동일한 풍속(자연풍) 하에 발전의 효율성을 올리는 데에 기여했다. 자연 풍속에 따라 불안정한 풍력발전 공급을 개선하기 위해 낮은 풍속에서도 최대한의 풍력을 생산할 수 있도록 로터 디자인 부분에 있어서도 지속적인 연구개발이 실행되고 있다. 기본원리는 발전기(generator) 대비 풍력발전기의 타워를 더 높이고, 블레이드는 더 길게 설계함으로써 바람 풍속이 낮은 지역에서도 평균 설비이용률을 향상시키는 것이다.

기존 해상풍력 발전단지의 경우, 해상이라고는 하지만 해안가의 해저수심이 낮은 곳에 풍력터빈을 설치하는 고정식 해상풍력발전이 2000년대부터 유럽을 중심으로 건설되기 시작하였다. 영국이나 덴마크의 경우 이미 대규모 고정식 해상풍력 발전기를 집중적으로 배치한 해상풍력 발전단지(wind farm)이 어느 정도 상용화 되어있다. 이런 모델의 해상풍력 발전은 사실상 육상풍력발전과 크게 상이하지 않으며 육상풍력발전의 핵심기술을 약간 응용하여 운영된다. 최근 들어 주목을 받고 있는, 보다 진화된 모델의 해상풍력발전은 부유식 해상풍력발전이다. 이는 50m 이상의 깊은

수심의 해역에 설치 가능하도록 부유체 위에 발전기를 설치하는 구조이다[3].

현대의 풍력 터빈은 수평축 풍력터빈, HAWTs(the horizontal axis wind turbines)과 수직축 풍력터빈, VAWTs(the vertical axis wind turbines)(그림3) 두 가지로 분류할 수 있다.

현재 대부분의 풍력발전용 대형 터빈은 효율과 출력이 우수한 수평축 방식을 사용하고 있다.



(a) VAWT

(b) HAWT

그림 3. 풍력터빈의 종류.

수평축 방식의 대용량 풍력발전 터빈을 구성하는 주요 핵심부품은 로터(블레이드, 허브 및 피치 시스템), 나셀(로터 샤프트, 베어링, 기어박스/발전기, 기계식 브레이크 및 요 시스템), 타워, 기초구조물 및 전기(전원 공급 케이블, 낙뢰 보호기, 전력 변환기, 변압기) 및 제어 시스템(센서, 액추에이터, 시스템)하드웨어 및 소프트웨어로 구성된다.

바람으로부터 블레이드를 구동하는 기계적인 회전력을 전기에너지로 변환하기 위한 방식은 간접 구동방식과 직접 구동방식의 두 가지가 있다.

간접 구동방식 터빈시스템은 발전기의 회전자 구동축의 회전 속도를 증가시키기 위해 증속기를 사용한다.

간접 구동방식의 풍력터빈용 발전기로는 비동기식 농형 유도 발전기(SCIG), 권선형 회전자 유도 발전기(WRIG) 또는 이중 여자 유도 발전기(DFIG)를 사용하는 경우가 많다.

직접 구동형 풍력터빈은 다극형 자여자 동기 발전기(EESG) 또는 영구자석형 동기발전기(PMSG)에 장착된 풀스케일 전력변환장치가 있기 때문에 증속기를 사용하지 않는다.

또한 증속기를 풀스케일 전력변환장치와 함께 사용하는 터빈의 구성도 가능하기 때문에 대형 고가의 발전기가 불필요하다.

이러한 간접 구동형 풍력터빈은 권선형 회전자 동기발전기(WRSG), 영구자석형 동기발전기(PMSG), 농형 유도발전기(SCIG)와 같은 소형 발전기를 사용한다.

자여자 동기발전기를 사용하는 풍력터빈은 신뢰성이 가장 높고 대용량이며 비용이 많이 드는 구성이다.

이중여자 유도발전기를 사용하는 풍력터빈은 주요 시스템사가 가장 많이 채택하는 방식 중 하나이나 대형 풍력터빈에서는 점차 적용이 감소하는 추세이다.

최근 대형 풍력터빈의 기술개발 동향은 다극 회전자를 갖는 영구자석형 동기발전기(PMSG)와 Back-to-Back 전력변환장치로 구성되는 시스템 방식으로 전환되는 추세이다. 이러한 방식은 손실을 줄이고, 자기여자 동기발전기를 사용하는 방식보다 가볍기 때문이다[6].

센서와 신호 처리 장비의 조합으로 구성된 상태 모니터링 시스템은 주요 구성 장치의 운전 상태를 모니터링 하는데 사용된다.

풍력터빈의 감시진단 시스템은 온라인(따라서 조건의 즉각적인 피드백을 제공한다)과 오프라인(이 데이터는 풍력 터빈에 통합되지 않은 측정 시스템을 사용하여 정기적으로 수집된다)방식으로 모니터링되고 있다.

풍력 터빈 상태 모니터링 시스템의 자세한 사항은 일반적으로 풍력 터빈 데이터(풍속, 유효전력 및 무효전력, 요 각도 등 및 명령, 작동 및 고장 상태), 전기 및 기계 데이터, 기상 데이터, 그리드 데이터, 통계 데이터를 나 타낸다. 구성 요소의 손상이나 고장을 방지하기 위해 풍력 터빈에서 서로 다른 모니터링 기법을 사용한다. 가장 일반적인 조건 모니터링 기법은 프로세스 파라미터, 성능 모니터링, 진동 분석, 음향 방출, 초음파 테스트, 오일 분석, 변형률 측정, 전기 효과, 충격 펄스 방법, 방사선 검사 및 열 촬영이다[7].

4. 전 세계 풍력발전 개발 동향

GWEC(Global Wind Energy Council)의 2019년 풍력발전 통계분석 자료에 의하면, 2018년 한 해 동안 육상풍력 발전단지 신규건설 용량은 그림 4에서 보여주고 있으며 46.6 GW이 설치되었고 이중 중국이 약 45% 차지하였다. 또한 해상풍력 발전단지 신규건설 용량은 그림 5에 나타낸바와 같이 4.5 GW가 건설되었다. 해상풍력 발전단지의 신규 건설용량도 그 동안 해상풍력 시장을 주도했던 영국을 제치고 중국이 40%로 전 세계 풍력발전 시장을 주도하고 있다[4].

2018년까지 건설된 전 세계의 육상풍력 발전단지의 총 누적용량은 568 GW(그림 6)이며 중국이 36%로 전 세계에서 가장 많은 육상풍력 발전단지를 운영하고 있다.

전 세계 해상풍력 발전단지의 총 누적 건설용량(그림7)은 2018년까지 23.1 GW로 영국이 34%를 건설하였으며 독일이 28%, 중국이 20%로 3개국의 총 단지용량을 합하면 전 세계 해상풍력 발전량의 82%를 차지한다.

해상풍력 발전단지의 건설용량은 육상풍력 발전에 비해 규모가 작지만 그 성장률은 매우 크다. 해상풍력 발전단지는 단지용량이 100 ~ 200 MW 규모 이상의 큰 단위로 설치되고 있다[5].

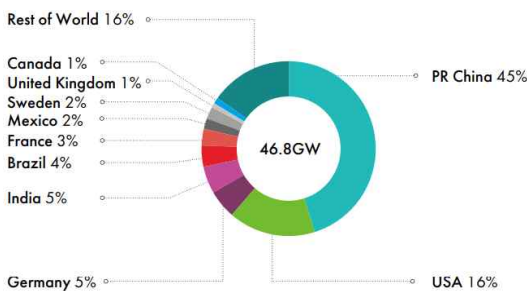


그림 4. 2018년 육상풍력발전 신규건설 용량.



그림 5. 2018년 해상풍력발전 신규건설 용량.

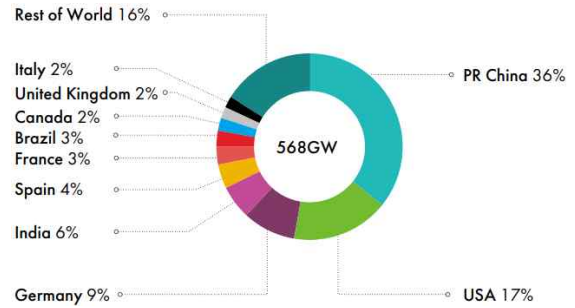


그림 6. 육상풍력발전 총 건설용량(~2018년).

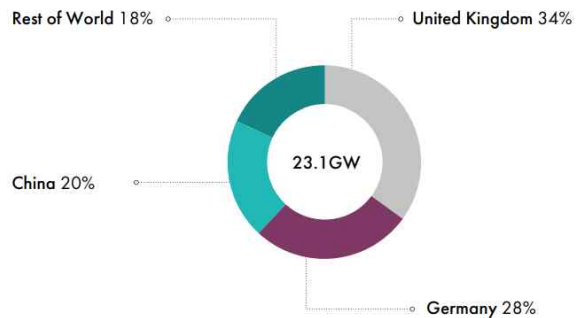


그림 7. 해상풍력발전 총 건설용량(~2018년).

전력망과 연계(Grid connected system)된 풍력발전단지 중 세계적으로 대규모 단지를 표 1에 나타내었다.

표 1. 세계 대형 풍력발전 프로젝트.

Project	Capacity in MW	Country
Alta Wind Energy Center [128]	1548	United States
Jaisalmer Wind Park [129]	1064	India
Shepherds Flat Wind Farm [130]	845	United States
London Array [131]	630	UK
Greater Gabbard Wind Farm [132]	504	UK
Anholt Offshore Wind Farm [133]	400	Denmark

5. 제주 풍력발전 개발 현황

제주도의 풍력발전 설비 도입은 우리나라 풍력발전 역사의 시작이라 할 수 있다.

국내 최초의 풍력발전기 보급은 1975년 2월 27일 제주도 조천읍 교래리에 위치한 한진그룹 소유의 제동목장 내에 그림8에 보여준 3 kW급 소규모 풍력발전기로부터 출발한다. 이후 1975년 8월부터 1978년 1월까지 KIST는 제주도 중산간 지대의 전화 및 지하수 양수용 전력을 공급하기 위해 풍력발전기 개발 연구를 시작하였다. 이를 위해 제주도 안덕면 상천리에 호주에서 도입한 2 kW급

풍력발전기 1기를 설치하였으며, KIST가 자체 개발한 2 kW급 풍력발전기 4대를 건설하여 풍력발전 계통에 관한 개선 및 설계연구를 수행하였다.



그림 8. 1975년 제주신문 풍력발전 자료.

1980년대로 접어들면서 정부의 적극적인 풍력발전 기술개발 연구지원이 본격적으로 시작되었으며, 1981년 4월 동력자원부는 제주도를 풍력에너지개발 시범도로 지정하게 된다. 1981년 9월에는 과학기술처에서 제주도를 한국-독일 태양광-풍력 복합시스템 개발 시범도로 지정하였다. 1982년 9월에는 KAIST에서 조천읍 신촌리에 5 kW급 풍력발전기를 설치하여 운영하였다. 이후 지속적인 풍력발전기 보급은 지속되었으며 1996년 5월 풍력발전 실용화보급사업 추진으로 225 kW급 풍력발전기 1기를 조천읍 교래리에 설치하였다. 1997년 3월에는 600 kW급 풍력발전기 2대를 구좌읍 행원리에 설치하여 우리나라 최초로 한국전력공사에 풍력발전을 통해 생산된 전력을 판매하였다. 1998년부터 2013년 사이에 구좌읍 행원리 마을주변에 우리나라 최초의 단지형으로 개발된 11.45 MW 규모의 상업용 풍력발전단지가 건설되었다.

한국남부발전(주)은 2003년부터 2007년까지 우리나라 최초의 MW급 풍력발전 터빈을 도입한 21 MW급 한경풍력발전단지를 건설하여 현재 상업운전 중이다.

2012년에는 조천읍 가시리에 전국에서 처음으로 공모를 거쳐 선정된 주민참여형 국산화 풍력발전단지가 15 MW 규모로 준공되어

유니슨, 효성, 한진산업에서 개발한 국산화 풍력터빈이 설치되었다.

표 2에는 2018년 기준 제주도 풍력발전 설비현황을 나타내었다. 제주지역에서 상업운전 중인 풍력터빈은 총 116기로 19개 풍력발전단지에서 운전 중이며, 총 설비용량은 266.49 MW에 이른다.

표 2. 제주 풍력발전 설비 현황.

풍력발전 사업자	풍력발전소명(위치)	풍력설비용량(MW)	발전기(기)
합 계(19개소)			
		266.49	116
제주에너지공사	평경풍력(충무)	9.38	1
	신정풍력(서부)	1.7	2
	김녕 국산화풍력(동부)	0.75	1
	가시리 국산화풍력(서부)	15	13
한국남부발전	동력·복합 육상풍력발전(동부)	30	15
	한경풍력(서부)	21	9
한국에너지연구원	장성풍력(동부)	20	10
	월성풍력발전(중부)	1.5	1
한신에너지(주)	삼남풍력발전(중부)	33	11
STX에너지(주)	월성 STX풍력발전(서부)	2	1
제주대학교	영원풍력발전단지(동부)	0.66	1
영원풍력에너지	영원대음풍력(동부)	2	1
제주특별자치도	행원연인풍력(동부)	3	1
	김녕해상풍력(서부)	10.5	2
SK D&D	가시리 풍력발전수(중부)	30	10
월성마을회	월성마을 풍력발전소(중부)	3	1
제주김녕풍력발전	김녕 육상풍력발전(동부)	30	10
한국풍력발전	신항풍력발전(서부)	21	7
당리해상풍력	당리해상풍력발전(서부 해상)	30	10
동쪽마을교회	동쪽마을풍력	2	1

그림 9에는 2018년말 기준, 제주도 전역에 건설 완료된 육상풍력 발전단지 19개소와 해상풍력 발전단지 1개소를 자세하게 나타내었으며, 지구지정이 완료되어 풍력발전 단지 건설 절차가 이행 중인 9개소 지역도 표기하였다.



그림 9. 제주 풍력발전단지 분포현황.

그림 10에는 서귀포시 표선면 가시리 마을 공동목장 안 2만9466㎡에 1500 kW급 풍력터빈 7기와 750 kW급 풍력터빈 6기로 구성된 15 MW급 풍력발전단지 모습을 보여주고 있다. 가시리 풍력발전단지 건설사업에는 국비 255억원, 도비 181억원 등 건설비로 총 436억원이 투자되어 연간 4500가구가 사용할 수 있는 3만9420MWh의 전력을 생산하고 있다.



그림 10. 가시리 풍력발전 단지.

그림 11은 SK D&D가 운영 중인 가시리 풍력발전단지를 보여주고 있다. 2015년 30 MW 규모로 준공된 가시리풍력발전단지는 독일 지멘스사의 3 MW급 풍력터빈 10기가 설치되어 상업운전 중인데, 연간 7만8000MW의 전력을 생산해 2만여 가구가 충분히 사용할 수 있는 친환경 전력을 제주 지역에 제공하고 있다.



그림 11. SK D&D 풍력발전 단지.

그림 12에는 우리나라 최초의 해상풍력 발전단지인 탐라해상 풍력발전단지의 모습을 보여주고 있다. 한국남동발전과 두산중공업이 공동 출자하여 제주시 한경면 두모리에서 금등리 주변 해역에 건설한 해상풍력발전단지로서 두산중공업이 개발한 3MW 급 풍력발전기 10기를 설치하여 30 MW 규모로 상업운전 중인 해상풍력발전 단지이다.



그림 12. 탐라해상풍력 발전단지.

참고문헌

- [1] Izumi Ushiyama, et al, *Furyoku Enerugy Dokubon*, Ohmsha, Ltd, (2005)
- [2] 손충렬, 이강수, 김만웅, 김건훈, 황병선, 이근호, 신용집, *해상풍력발전*, 아진, (2010)
- [3] 이지현, 육상풍력발전과 해상풍력발전 비교분석, 한국환경산업기술원, (2015)
- [4] Morten Dyrholm, "Golbal Wind Report 2018," GWEC, April (2019)
- [5] John Twidell, Gaetano Gaudiosi, *Offshore Wind Power*, Multi-Science Publishing Co., Ltd., (2009)
- [6] Perez J.M.P., Marquez F.P.G., Tobias A. and Papaelias M., Wind turbine reliability analysis *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Elsevier) 23, 463-472, (2013)
- [7] Márquez F.P.G., Tobias A., Pérez J.M.P. and Papaelias M. Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods *Renewable Energy* (Elsevier) 46, 169-178 (2012)

저자이력



김호민(金鎬民)

1995년 제주대학교 전기공학과 공학사, 1998년 연세대학교 전기공학과 공학석사, 2002년 연세대학교 전기전자공학과 공학박사, 2002-2004년, 미국 MIT (Post Doc.), 2004-2006, LS산전(주) 전력연구소 선임연구원, 2006-2011, 한국전기연구원 선임연구원, 2011-현재 제주대학교 전기공학과 교수