

중·대형급 풍력발전 시스템용 에너지 변환 방식에 대한 연구

장병창*, 임종연*, 송승호*, 김영민**, 노도환*, 김동용*
전북대학교 전자정보공학부*, 담양대학 초고속정보통신공학부**

Energy conversion topologies for utility-scale wind power generation system

Byoung-Chang Jeong*, Jong-Yeon Lim*, Seung-Ho Song*, Yeong-Min Kim**, Do-Hwan Rho*, Dong-Yong Kim*
Chonbuk National Univ.*, Provincial College of Damyang**

Abstract - 최근 풍력 발전 시스템이 전세계적으로 관심을 끌고 있지만 국내에서 보유하고 있는 기술은 세계적 수준과 상당히 차이가 있다. 다행히 풍력 발전 시스템의 발전 방향이 철강, 철도등의 대용량 가변속 구동 시스템 개발 방향을 뒤따르고 있어서 우리 나라도 관련 기반 기술은 상당한 수준에 있다고 할 수 있다. 본 논문에서는 풍력 발전 시스템에 대한 각 방식별 특성을 고찰하고 분석하여 향후 연구에 도움이 될 수 있도록 이를 소개하고자 한다.

전기-인버터 제어기술등은 그 동안 산업용 대용량 전동기 구동 시스템 국산화 개발 등을 통해 국내 기반 기술 수준이 크게 향상되어 있다.^[5] 또한 전력용 반도체의 신제품 개발 등에 의해서 인버터의 가격은 낮아지고 효율은 높아지는 등, 그간의 전력 변환 분야 기술 발전 또한 주목할 만 하다.
따라서 본 논문에서는 향후 풍력발전 시스템 기술 개발 및 운용에 활용될 수 있도록 풍력 발전용 에너지 변환 방식을 조사, 분류하고 각 방식의 특징 및 장단점에 대하여 비교 검토하였다.

1. 서 론

화석에너지가 점점 고갈되어 가고 환경오염에 대한 관심이 높아지면서 대체에너지에 대한 세계적 관심이 증가하고 있다. 따라서 각 나라마다 자연환경이나 주변 여건에 따라서 다양한 대체에너지 개발방법을 연구하고 있고, 특히 최근 세계 각국에서 풍력발전에 대한 관심이 증가하면서 새로운 기술 개발이나 풍력발전 설비 용량의 증설에 힘쓰고 있다.

서유럽 각국의 경우 덴마크, 독일을 중심으로 지난 70년대부터 풍력에너지에 관심을 갖고, 연구를 진행하여 1MW이상의 용량을 갖는 풍력발전 설비를 상용화했으며 최근에는 2.5MW급 풍력발전 설비를 설치하였다.^[1] 또, 풍력발전 단지를 얇은 바다에 설치하여 입지 문제에 능동적으로 대처하고 출력 증가를 꾀하고 있다.

독일은 2000년까지 총 6094.8MW의 풍력발전 설비를 보유하고 전체 전력 소비량의 2.4%에 이르는 시설 용량을 갖추고 있다. 미국, 스페인, 덴마크, 중국 등지에서도 대규모 풍력발전 단지 건설이 추진되는 등 전세계적으로 17,000MW의 설비용량을 갖추었으며(98년 2,500MW, 99년 3,900MW, 2000년에는 3,400MW 건설됨) 유럽 풍력 에너지 협회(EWEA)는 2010년까지 유럽내 풍력 발전 설치 용량 목표를 60,000MW로 잡고 있다.^{[2]~[4]}

이와 같이 풍력발전은 현재 어느 에너지원보다도 증가 속도가 가장 빠른 에너지원으로서 자리잡고 있다.

국내에서도 풍력발전에 대한 관심이 증가하면서 우리나라에 맞는 풍력발전 시스템을 개발하려는 시도가 있었다. 또한, 풍력발전시스템을 대체 에너지원으로뿐 아니라 관광자원으로 주목한 각 지방자치단체에 의해서 풍력발전 단지의 건립이 기획, 진행되고 있다. 예로 제주도, 행원에 설치된 풍력발전 단지는 성공적이라는 평가를 받아 중대형 기종의 보급 활성화에 기여하고 있다.

그러나 우리 나라가 보유하고 있는 풍력발전 관련기술이 절대적으로 부족하여 풍력단지에 사용되는 기술의 대부분은 설비와 함께 덴마크, 독일 등에서 도입되어 왔다.

다행히 국내에서 기술을 개발하여 사용하여야 한다는 인식이 확산됨에 따라서 최근에 기획되고 있는 풍력발전 단지의 경우 국내 기술을 사용하기 위한 본격적인 연구가 진행되고 있다.

특히 가변속 운전 방식의 발전 시스템에 적용되는 발

2. 풍력발전 시스템의 분류

풍력발전 시스템은 블레이드의 제어 방법, 기어의 유무, 회전자 축의 속도, 사용 발전기의 종류, 그리고 계통과의 연결 방법에 따라서 풍력발전 시스템은 여러 가지로 구분할 수 있다.

블레이드의 제어 방법이란 블레이드를 제어하여 발전기의 회전자 축에 입력되는 토크를 조절하는 방법을 말하는 것으로 대표적인 방법으로 피치 제어가 있다. 피치는 블레이드의 축과 블레이드가 이루는 각으로 정격 풍속 이하에서는 일정한 설정 값으로 놓고, 풍속이 빨라지면 블레이드와 축을 점점 평행에 가깝게 제어한다. 또 발전기의 급제동이 필요하면 블레이드를 축과 평행하게 제어하여 급정지 할 수 있다.^[6]

그리고 기어는 블레이드의 회전 속도가 낮기 때문에 블레이드와 발전기의 회전자 사이에 삽입한다. 시스템에 따라서는 기어를 사용하지 않기도 한다. 기어를 사용할 경우 발전기의 극수는 4 또는 6으로 작지만, 기어를 사용하지 않을 경우 극수가 수십 정도 된다.

먼저 회전자 축의 속도에 따라 분류하면 정속 운전과 가변속 운전으로 나눌 수 있다. 그리고 가변속 운전도 사용하는 발전기와 제어 방법에 따라서 부분 가변속과 전 영역 운전으로 나눌 수 있다.

정속으로 운전할 경우 발전 시스템의 구조가 간단하게 되어 제작비가 낮아지고, 계통과의 동기를 위한 별도의 장비를 사용하지 않아서 제어가 간단하게 된다. 그러나, 일반적으로 유도기를 계통에 직접 연결하기 때문에 유도성 무효전력이 계통에 공급된다. 이 무효전력을 보상하기 위해서 별도의 보상용 콘덴서가 필요하고, 전기적으로는 발전기의 출력을 제어할 수 없는 단점이 있다. 또, 돌풍 등 순간적인 입력 토크의 변화에 따른 제어가 어렵기 때문에 순간적으로 출력이 요동치는 현상을 볼 수 있다.

가변속 운전은 돌풍이나 기타의 조건에 의한 급격한 토크 변화를 회전자 속도 변화로 변환시켜서 흡수 할 수 있다는 장점이 있다. 또, 정격보다 낮은 속도에서도 운전이 가능하기 때문에 약한 바람에서도 발전 할 수 있다.

그리고, 인버터-컨버터를 사용하여 발전기와 계통을 연결하기 때문에 계통으로 공급되는 전력의 역류를 제어할 수 있는 장점이 있다.

그러나 인버터-컨버터를 사용하기 때문에 제작에 더 많은 비용이 소요되고, 발전기 출력과 계통과의 동기를 위해서 별도의 제어 회로나 컨버터가 필요하다.

풍력 발전 시스템에서 사용하는 발전기는 직류 발전기, 동기발전기, 그리고 유도발전기로 나눌 수 있다. 직류 발전기는 과거에 소형 시스템에서 일부 사용되었으나 현재는 거의 사용되지 않고 있다. 동기 발전기는 계자의 형태에 따라 권선 계자형과 영구자석형으로 나눌 수 있다. 유도 발전기도 회전자의 구조에 따라서 권선형과 농형으로 분류된다. 각 발전기별 계통 연계 방식에 따라서 뒤에서 각 발전기에 따라서 분류하고자 한다.^{[7]-[9]}

3. 동기 발전기

3.1 영구 자석형

최근까지 대형 영구자석형 동기기의 제작이 어려운 단점이 있어서 많이 사용되지는 않았지만, 최근에는 100KW급 영구자석형 동기기가 양산되는 등 앞으로는 더 큰 용량의 발전기도 기대되고 있다.

영구자석형 동기기를 사용할 경우 가장 큰 장점은 계자 회로를 사용하지 않기 때문에 계자 손실이 없다는 것이다. 즉, 전체적인 시스템 효율이 증가하게 된다. 또, 계자회로에 별도로 전원을 공급하지 않아도 되기 때문에 구조도 간단해진다.

그러나 발전기 자체에 의한 역률 제어가 불가능하고, 발전된 전압과 주파수는 회전자 속도에 비례해서 달라지기 때문에 계통에 직접 연결 할 수는 없다.

이러한 단점을 개선하기 위해서 그림 1에서와 같이 발전기와 계통 사이에 컨버터-인버터를 삽입한다. 인버터의 출력을 제어하여 계통에 공급하는 power의 역률을 개선하고 발전기의 출력 주파수가 달라져도 일정한 주파수로 동기를 맞출 수 있다.

그림 1의 시스템을 사용할 경우 두 컨버터의 용량을 발전기의 출력에 맞추어 설계해야 하기 때문에 시스템의 전체 효율은 컨버터-인버터의 효율에 따라 결정된다.

컨버터-인버터에서의 손실은 3~8%정도 된다.^[8] 그리고 두 컨버터 사이에 큰 DC 링크 커패시터가 필요하고, 인버터의 출력에 포함된 고조파를 제거하기 위해서 계통과 인버터 사이에 정격 임피던스의 10~15%정도 되는 인덕터를 삽입해야 한다. 이 시스템을 이용할 경우 발전은 이론적으로 전 속도영역에서 가능하지만, 경제적인 발전과 발전기 보호를 위해서 운전속도를 정격속도의 50~120%로 제한하고 있다.

컨버터-인버터 대신 AC-AC 컨버터를 사용한 시스템도 있는데, 이 시스템에서는 컨버터의 특성에 의해서 운전속도를 80~120%로 제한하고 있다.

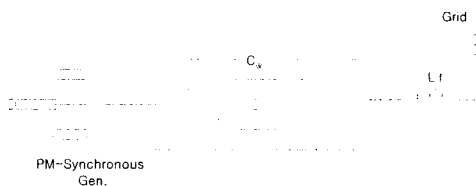


그림 1 영구자석형 동기기와 컨버터를 이용한 system

3.2 권선 계자형

권선 계자형 동기기는 크기에 관계없이 골고루 사용되며 특히 대형 발전기의 경우 기존의 발전소에서 사용되고 있다.

권선 계자형은 계자 전원을 공급해야 하기 때문에 영구자석형에 비해서 손실이 크고 구조가 복잡한 단점이 있다. 그러나, 계자 전원을 제어하여 발전기의 출력 역률을 제어 할 수 있는 장점이 있다. 또 발전기 운전 속

도의 제약이 없는 장점도 있지만 시스템에 따라서 운전속도를 정속과 가변속으로 구분한다.

정속 운전형은 그림 2에서 보인 것과 같이 발전기를 계통에 직접 연결하여 계통 전압과 주파수를 고정자에서 가하고 power를 추출하는 방법이다.

이 시스템은 구조상 정속으로 운전한다. 그리고, 발전기의 출력 역률은 계자에 입력되는 전압의 크기를 조절하여 제어 할 수 있다.

한편 풍속에 따라 발전기의 회전속도를 다르게 하고, 계통과는 컨버터-인버터를 사용하여 동기를 맞추는 방법은 그림 3과 같다.

이 시스템은 영구자석형 동기기를 이용한 시스템과 같은 특징을 보여준다.

그림 4는 컨버터에 의해서 정류된 전압을 계통 전압 이상으로 올려주는 승압 컨버터를 사용한 회로를 보여주고 있다.



그림 2. 권선형 동기기를 이용한 grid-connected generator system

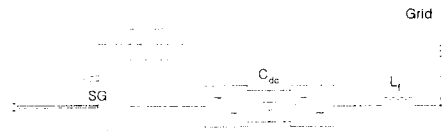


그림 3. 권선형 동기기와 컨버터를 이용한 system



그림 4. 권선형 동기기와 승압 컨버터를 이용한 system

4. 유도 발전기

4.1 농형 유도 발전기

농형 유도기는 회전자의 구조가 간단하고 튼튼하며 가격도 저렴하다. 반면에 회전자 속도와 출력의 제어가 어려운 단점이 있다.

그림 5와 6에서 농형 발전기를 사용한 시스템을 보여주고 있다. 그림 5에 나와 있는 시스템은 발전기의 회전자 속도를 제어하는 것이 불가능하다. 단 출력에 따라서 발전기의 슬립을 0에서 0.03, 최대 0.08까지 스스로 변동되어 운전 속도는 정격의 100~108% 범위 내에 있다. 단, 발전기의 역률을 제어할 수 없기 때문에 발전기에서 발생한 유도성 무효전력이 계통에 영향을 준다.

그림 6에서 보여주고 있는 시스템은 농형 발전기의 출력단에 컨버터-인버터를 연결하여 계통과 동기를 맞춰 주고 있다. 이 방법의 경우 컨버터-인버터를 사용하였기

때문에 컨버터에 의한 손실이 발생하고 큰 DC 링크 커패시터와 계통에 연결하기 위한 인덕터가 필요한 단점이 있다.

그러나 발전된 전력과 전압이 회전속도에 비례해서 증가하고, 인버터를 통하여 계통에 공급하는 무효전력을 제어할 수도 있다. 발전기의 운전 속도는 전 영역에서 가능하지만, 다른 가변속 시스템과 같은 이유 때문에 정격 속도의 50~120%까지로 제한하고 있다.



그림 5. 농형 유도기를 이용한 grid-connected system

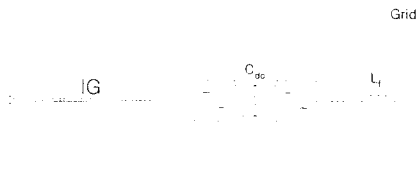


그림 6. 농형 유도기와 컨버터를 이용한 system

4.2 권선형

권선형 유도기는 농형에 비하여 무겁고, 2차측의 구조가 더 복잡한 단점이 있지만, 2차측 권선의 전압을 제어할 수 있는 장점이 있다.

권선형 유도 발전기는 발전기의 1차측을 주로 계통에 직접 연결하는 시스템을 사용한다.

그림 7에서는 보여주고 있는 시스템은 1차측을 통하여 발전된 전력을 계통에 공급하지만, 1차측 출력보다 큰 토크가 회전속도로 입력되면 발전기의 운전 속도가 증가하고 이 여분의 power는 2차측의 저항을 통해서 소비시키는 구조이다. 즉, 발전기는 평소에는 농형과 유사하게 동작하고 여분의 전력이 가능할 때 2차측을 사용한다.

이 시스템은 구조가 간단하고, 별도의 장비 없이 계통과 연결할 수 있는 장점이 있지만, 순간적인 돌풍에 따라 출력 전력이 흔들리고, 역률 제어가 불가능하다.

운전 속도는 정격 속도의 100~125%의 범위로 가변속이 가능하지만, 속도가 증가했을 때 2차 측에서도 power를 추출하는 방법에 의해서 속도를 감소시키는 것만 가능하고, 발전기의 운전속도를 증가시키는 것은 불가능하다.

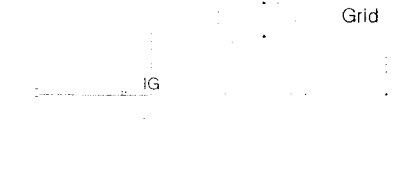


그림 7. 권선형 유도기를 이용한 grid-connected system I

최근에 주목받고 있는 권선형 유도 발전기를 이용한 회전자 전력제어 시스템을 그림 8에 나타내었다.

그림 8에서 보여주고 있는 시스템은 정격 속도의 70~130% 범위에서 동작한다. 이 시스템의 특징은 다음과 같다.

첫째, 인버터-컨버터를 사용하였지만, 2차 측에 설치하였기 때문에 인버터-컨버터의 설계 용량이 정격 출력의 25~30% 정도로 작다. 그만큼 가격과 부피가 줄어들고, 인버터-컨버터에서 소비되는 손실이 줄어들어 시스템의 전체적인 효율이 개선된다.

둘째, 인버터에 설치하는 고조파 제거용 필터의 설계 용량도 인버터의 용량에 비례하여 감소한다.

셋째, 2차 측을 제어하여 1차 측의 출력과 운전속도, 그리고 역률을 제어할 수 있다.

넷째, 1차 측으로 추출할 수 없는 여분의 전력을 2차 측으로 추출할 수 있어서 시스템의 효율을 높일 수 있다.

다섯째, 2차 측을 제어하기 위해서 3상을 2상으로 변환하는 d-q 변환을 사용하기 때문에 제어 알고리즘이 복잡해진다.

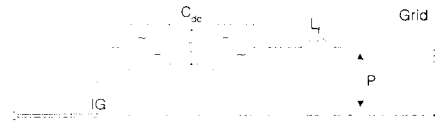


그림 8. 권선형 유도기를 이용한 grid-connected system II

5. 방식별 비교

앞에서 우리는 8가지 구조의 풍력발전 시스템의 특징을 살펴보았다.

각 시스템별 특징을 표 1에서 보여주고 있다. 그리고 서유럽 각국의 풍력발전 시스템 제작사의 주요 기종의 사양을 표 2에서 비교하고 있다.

표 1. 풍력발전 시스템별 특성 비교

발전기	발전기 구조	운전 속도	계통과 연결방법	출력대비 인버터의 용량(%)	정격대비 운전속도 범위(%)	제어 복잡성
동기	영구자석형	가변속	인버터-컨버터	100	50~120	보통
	권선형	정속	계통 직결	*	100	간단
	권선형	가변속	인버터-컨버터	100	50~120	보통
	권선형	가변속	인버터-승압-컨버터	100	50~120	보통
유도	농형	가변속	계통 직결	*	100~108	간단
	농형	가변속	인버터-컨버터	100	50~120	보통
	권선형	가변속	계통 직결	*	100~130	보통
	권선형	가변속	계통 직결	25~30	70~130	복잡

표 2. 풍력 발전 시스템 제작사별 주요 기종 사양 비교

제작사 구분	정격 전력 (KW)	회전자 직경 (m)	운전 속도	운전 풍속 (m/s)	제어 방법	계통 연결	타워 높이 (m)	넛셀무 게(회 전자 포함) (ton)
Vestas	2000	80	가 변 속	4 ~ 25	pitch	*	78	95
Nordex	2500	80	가 변 속	3.5 ~ 25	pitch	IGBT 컨버터	80	119.3
Lagerwey	750	50.5	가 변 속	*	*	컨버터	*	*

6. 결 론

본 논문에서는 발전기의 종류에 따라서 다양한 풍력발전 시스템을 구분하고, 각각의 특징을 살펴보았다.

살펴본 시스템 중에서 사용도에 따라 구분해보면, 현재는 권선형 유도기, 가변속, 직결 방식이 대용량 발전 시스템에서 가장 많이 사용되고 있다.

그리고 앞으로는 영구자석형 동기기와 회전자에 전력을 공급하거나 추출할 수 있는 권선형 유도기 시스템이 가장 널리 사용될 것으로 기대되므로 향후 이들 시스템에 대한 연구가 더욱 필요할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] S. Müller, M. Deicke, Rik W. De Doncker, "Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor", IAS 2000, Conference Record, Vol. 4, 2000, 2249 -2254
- [2] DEWI : <http://www.dewi.de/statistics.html>
- [3] AWEA, "Global Wind Energy Market Report", 2001
- [4] 한국에너지기술연구소, "전라북도 지역의 풍력발전단지 건설 타당성 조사 연구용역", 2000.12
- [5] 정대용, 석줄기, 송승호, 설승기, 권병기, 박가우, 신원창, 조용상, 이진섭, 최창호, "냉간압연용 1MVA IGBT 인버터의 개발", 대한전기학회논문지, 제47권 제9호, Sep. 1998, 1406-1411
- [6] 김철호, 공정식, 오철수, "가변속과 일정속 풍력발전 시스템의 출력제어", 한국에너지공학회지(2000), 제9권 제2호, 117-122
- [7] P. Bauer, S. W. H. de Haan, C. R. Mey, J. T. G. Pierik, "Evaluation of Electrical Systems for offshore Windfarms", IAS2000, Conference Record, Vol. 3, 2000, 1416 -1423
- [8] 김용현, 김일환, "풍력발전을 위한 이중역자 유도기의 센서리스 제어", 전력전자학회논문지, 2000, Vol. 5, No.5, 451-458
- [9] Anders Grauers, "Efficiency of three wind energy generator systems", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 11, No. 3, 1996, 650-657