특집 : 풍력발전 시스템 동향

이중여자 유도형 가변속 풍력발전기 제어 기술

송 승 호*, 정 병 창**
(전북대 전자정보공학부 *교수, **박사과정)

1. 서 론

1980년대부터 본격적으로 설치된 상업용 풍력발전 시스템은 최근 10년간 매년 20% 이상의 성장률을 기록하고 있으며 2004년말 현재 전세계 풍력발전 시스템 설치 누적용량이 47,317MW에 이르렀으며 특히 독일은 16,629MW로 세계 최대의 풍력발전 보유국가이다.[1] 관련 분야의 기술이 발전하고 오랜 기간 경험이 축적되면서 풍력발전 시스템의 효율은 높이고 가격은 감소시키기 위한 노력이 있었으며, 그 노력의 결과로 풍력발전 시스템에 의한 전력 생산 단가도 꾸준히 감소하여 2004년 미국에서 풍력발전 시스템에 의한 전력 생산 원가는 약 5cent/kWh에 도달하여 기존에 사용되던 발전기의 전력 생산 원가에 근접하였다.[2]

최근에는 육상 뿐만아니라 해상풍력발전도 빠르게 확대되면서 발전기의 회전속도가 넓은 범위에서 변동할 수 있고 정격 용량이 MW이상인 대형 풍력발전 시스템이 주종을 이루게 되었다. 현재 상용화된 대형 풍력발전 시스템은 주로 2가지 방식 중에서 한 가지를 채택하고 있다. 한 가지는 극수가 수십극 이상인 동기발전기를 사용하여 발전기의 정격속도를 낮춤으로서 기어를 사용하지 않고 블레이드와 발전기를 직접 연결하는 기어리스 방식이다. 또 다른 방식은 정격속도가 높은 권선형 유도기를 발전기로 사용하고 블레이드와 발전기 사이에 기어를 사용하며 발전기 회전자측에 양방향 인버터를 사용하며 슬립 전력을 제어하는 방식이다. 두 번째 방식은 이중여자 유도형 풍력발전(Doubly-Fed Induction-type Wind Generation) 시스템이라고 하며 2003년에 세계 풍력발전 시스템 시장의 약 50%를 점유하였다.[1]

이러한 이중여자 유도형 풍력발전 시스템은 제어기(인버터) 기술이 매우 중요하며, 독일의 몇몇 선두 회사에서 90년대 중반에 시스템 메이커와 협력하여 제어기를 상품화 개발하고 설치 운영하면서 기술의 완성도를 높여왔다. 현재는 독일뿐만 아니라 프랑스, 일본 등 여러 나라의 인버터 기술을 가진 업체에서도 실제 풍력발전 시스템에 상용화 하고 있다.

정부 지원으로 국내에서 개발되고 있는 3가지 중대형 풍력발전 시스템은 모두 가변속 풍력발전 시스템으로서 두 가지 모델에서 이중여자 유도기를 채택하였다. 기존에 국내에 설치되어 운영중인 중대형 풍력발전 시스템은 모두 외국산이며 특히 대관령에 설치된 한대를 제외하고는 모두 고정속도 방식(일명 Danish concept)으로서 정격속도로 운전하며 수%정도의 슬립 속도만큼만 속도가 변동할 수 있는 방식이다. 그러나 이중여자 유도기를 채택한 대용량 가변속 방식이 조만간 도입될 예정이다.

본고에서는 이중여자 유도형 풍력발전 시스템, 특히 전력전자를 포함한 전기 시스템 분야에서 특징 및 제어 알고리즘에 대하여 살펴보았다. 또한 점점 증가하는 계통 운영자의 요구를 충족시키기 위하여 외국에서 진행되고 있는 연구방향에 대하여 살펴볼 것이다. 현재까지 개발된 제어 기술과 향후 방향을 살펴봄으로써 이중여자 유도형 풍력발전 시스템에 관심을 가진 회원들에게 도움이 되기를 희망한다.

2. 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 소개

이중여자 유도형 풍력발전 시스템은 그림 1과 같은 구조를 갖는다. 발전기는 극수가 4극 또는 6극인 권선형 유도기를 사

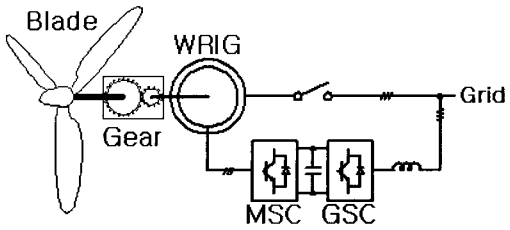


그림 1 이중여자 유도형 풍력발전 시스템

용한다. 유도기는 최소한 수백 rpm 이상에서 운전하지만 블레이드는 최대 수십 rpm으로 회전하기 때문에 기어를 사용하여 블레이드와 발전기를 연결한다. 유도기의 고정자는 블레이드에서 공급하는 기계적 에너지가 발전을 하기에 충분할 때 계통에 연결하고 부족하면 계통에서 분리된다. 고정자의 계통 연결과 분리를 담당하기 위하여 차단기를 사용한다. 유도기의 회전자는 전력변환 장치에 연결되며 전력변환 장치는 발전기를 제어하는 회전자측 컨버터(Machine Side Converter)와 전력변환 장치의 계통연계를 담당하는 계통측 컨버터(Grid Side Converter)로 구성된다.

이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 특징은 다음과 같다.

첫째 에너지 변환 효율이 높다. 이것은 블레이드의 회전속도를 가변 할 수 있기 때문에 블레이드의 에너지 변환 효율이 높은 회전속도에서 운전 할 수 있기 때문에 가능하다. 또한 발전기의 회전속도가 동기속도를 기준으로 ±30%범위에서 변동하기 때문에 회전자측 컨버터에서 변환하는 전력의 크기도 시스템 정격 용량의 30%보다 작다. 전력변환 장치의 용량이 작은 것에 비례하여 전력변환 장치에서의 손실도 감소하기 때문에 에너지 변환 효율이 더욱 증가한다.

둘째 가변속 운전을 하기 때문에 풍속 변동이 기어와 회전축 등 기계 부분과 타워와 기초 등 구조물 부분에서 기계적 스트레스가 작다. 풍력발전 시스템을 설계할 때 고려해야 하는 하중이나 스트레스가 작아지면 결국 기계구조 부분의 크기와 가격이 감소하게 된다.

셋째 회전자측 컨버터는 고정자 무효전력을, 계통측 컨버터는 자체의 무효전력을 임의로 제어할 수 있기 때문에 계통 운영자의 요구에 따라서 계통에 공급하는 전력의 역률이나 연계 지점의 전압을 제어할 수 있다.

넷째 다른 풍력발전 시스템에 비하여 제어와 발전기 보호가 복잡하다. 고정자만 전력이 입 · 출력되는 일반적인 회전기와는 다르게 고정자와 회전자 양쪽으로 전력이 입 · 출력되기 때문에 제어가 복잡하다. 또 고정자가 계통에 직접 연결되므로 계통 변화에 대응할 수 있는 알고리즘도 요구된다.

이중여자 유도형 풍력발전 시스템이 구조와 제어는 복잡하지만 시스템의 용량에 비하여 기계구조 부분의 크기와 전력변환 장치의 용량이 작아도 되기 때문에 대용량 풍력발전 시스템을 개발할 때 유리하게 작용한다. 이러한 이유 때문에 많은 풍력발전 시스템 제작업체에서 이중여자 유도형 풍력발전 시스템을 대용량 시스템의 기본 구조로 채택하였다.

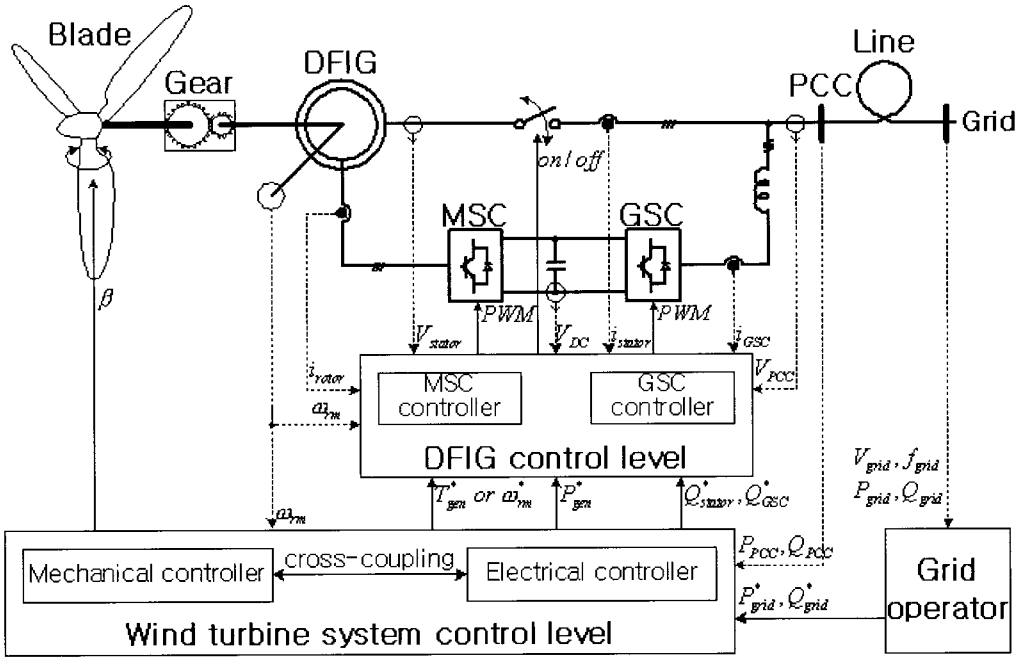


그림 2 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 제어기 구조

3. 제어기

이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 일반적인 제어기 구조는 그림 2와 같다.[3] 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 제어기는 2부분으로 구분할 수 있다.

첫 번째 부분은 발전기 제어를 담당하는 부분이다. 회전자 전류를 제어함으로써 발전기의 회전속도와 토크 등 발전량에 관련된 변수들과 고정자 무효전력을 제어할 수 있다. 계통측 컨버터도 전류를 제어하여 직류단 전압과 컨버터 자체의 무효전력을 제어할 수 있다.

두 번째 부분은 터빈의 제어를 담당하는 부분이다. 블레이드에서 발전기에 공급하는 기계적 에너지는 블레이드의 기계적 출력이라고 하며 풍속이 정격 풍속보다 높아질 때 블레이드의 기계적 출력이 시스템의 정격을 초과하지 않도록 블레이드의 피치를 제어한다. 또, 발전기에서 발전되는 유효전력과 풍력발전 시스템이 계통에 공급하는 무효전력을 제어하는 기능도 수행한다. 발전되는 유효전력은 블레이드의 기계적 출력과 회전속도에 따라서 제어방법을 결정하고 제어 기준값을 계산하여 발전기 제어기로 지령값을 출력한다. 그러나 계통 운영자가 계통 전력의 품질을 유지하기 위한 제어가 필요하다고 판단할 경우에는 계통 운영자의 요구에 대응하여 발전 시스템을 제어할 수 있는 기능도 포함한다.

3장에서는 블레이드의 피치 제어기를 제외한 각각의 제어기에 대하여 살펴볼 것이다.

3.1 발전기 제어기

발전기 제어기는 일반적인 유도기의 제어기와 유사한 구조를 갖는다. 단 고정자 전압을 제어하는 일반적인 회전기와는 다르게 고정자는 계통에 연결되고 회전자에서 회전기를 제어하는 부분이 다르다. 제어기의 구조는 그림 3과 같이 구성된다.[4~6]

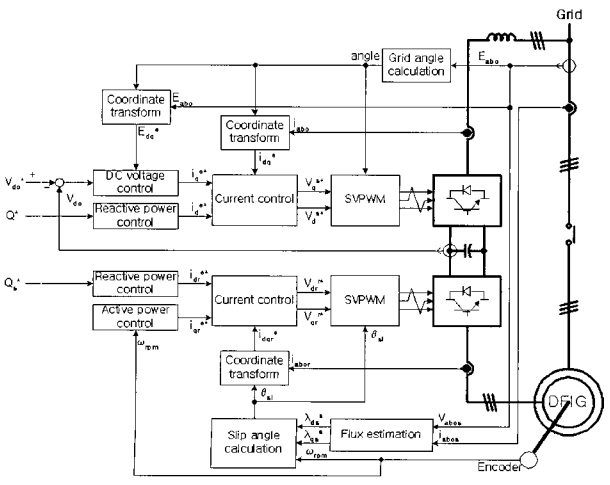


그림 3 이중여자 유도 발전기의 제어 블록도

발전기 제어기는 터빈 제어기에서 계산한 무효전력 지령값과 운전방법에 따라서 발전기를 제어한다. 터빈 제어기의 지령에 따라서 전류 기준값을 계산하고 전류를 제어한다. 최종적으로 2대의 컨버터에서 합성해야 할 전압을 계산한다. 발전기 제어기는 회전자측 컨버터 제어와 계통측 컨버터 제어로 구분할 수 있다.

회전자 컨버터 제어기는 고정자의 자속을 기준으로 발전기의 벡터를 제어한다. 고정자 자속은 직접 측정하지 않고 고정자 전압과 전류로부터 계산한다.[4] 발전기를 제어할 때 주의할 사항이 고정자 전압과 전류는 계통 전압과 동일한 주파수를 갖지만 회전자 전압과 전류는 유도기의 슬립에 비례하는 주파수를 갖기 때문에 3상과 d-q의 상호 변환에 주의해야 한다. 결국 컨버터의 출력 주파수는 슬립과 계통 주파수를 곱한 값이다.

계통측 컨버터 제어기는 계통의 전압을 기준으로 벡터 제어를 수행한다. 직류단 전압은 일정하게 제어하고 무효전력은 터빈 제어기의 지령에 따라서 제어한다. 회전자측 컨버터와는 다르게 계통측 컨버터는 계통과 동일한 주파수의 전압을 출력한다.

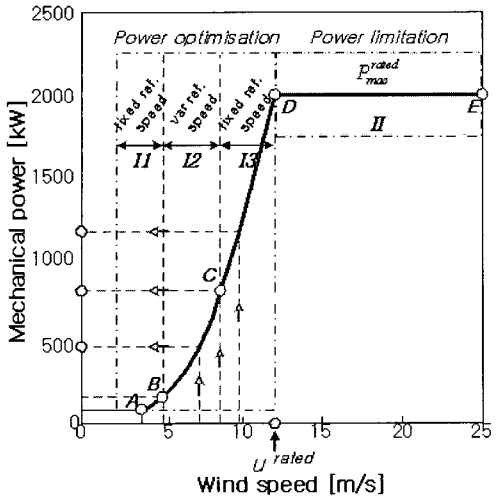
3.2 터빈 제어기

터빈 제어기는 발전기의 유효전력과 풍력발전 시스템이 계통에 공급하는 무효전력을 제어한다. 이절에서는 먼저 유효전력을 제어하기 위한 발전량 제어에 대하여 살펴보고 다음에 무효전력의 제어에 대하여 살펴 볼 것이다. 그리고 전력품질을 유지하기 위하여 계통의 요구에 대해서는 6장에서 살펴보았다.

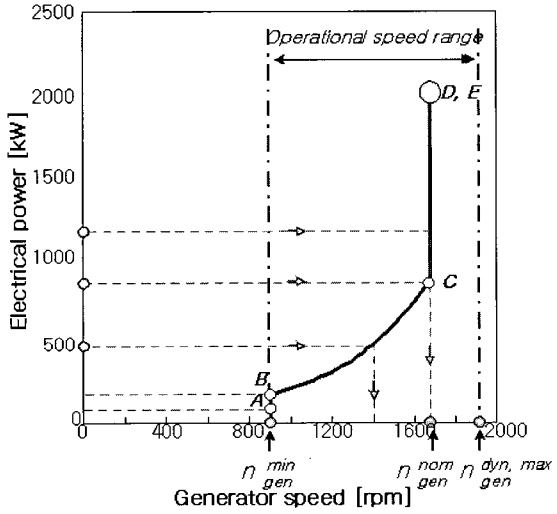
3.2.1 발전량 제어

발전량을 제어하는 방법은 제어 전략에 따라서 달라진다. 발전량 제어 방법은 크게 3가지로 나눌 수 있다.[3,4,8,9]

한 가지는 발전기의 유효전력을 회전속도의 3승에 비례하여 제어하는 방법이 있다. 이 방법을 최대 출력점 추종이라고 하며 발전기의 토크를 회전속도의 2승에 비례하여 제어하는 방법도 같은 동일한 원리에서 발생하였다. 만일 블레이드의 피치각이 일정하다면 블레이드의 기계적 출력이 최대가 되는 회전속도는 풍속에 비례한다. 그리고 회전속도와 풍속의 비율이 동일하면 블레이드의 기계적 출력은 풍속의 3승, 즉 회전속도의 3승에 비례하게 된다. 발전기의 유효전력 기준값을 회전속도의 3승에 비례하게 계산하면 최대 출력점에서 운전할 수 있다.[3,7] 발전기의 토크는 유효전력을 회전속도로 나눈 값이기 때문에 회전속도의 2승에 비례하게 제어하면 최대 출력점에서 운전할 수 있다.[4,9]



(a) 풍속-블레이드 기계적 출력



(b) 회전속도-발전기 유효전력

그림 4 제어전략에 따른 운전 곡선[3]

다른 방법은 발전기의 유효전력을 정격으로 제한하는 방법이다.[3,4] 발전기의 유효전력이 정격보다 높아지면 과부하상태가 되기 때문에 발전기의 유효전력이 정격보다 높아야 하는 경우에는 정격으로 제한한다.

마지막 방법은 회전속도가 풍력발전 시스템의 설정된 운전 범위를 벗어날 경우에 회전속도를 일정하게 제어하는 방법이다.[3,8,9] 풍속이 낮은 경우에 블레이드의 기계적 출력이 최대가 되는 회전속도가 설정한 운전 범위보다 낮아지게 된다. 그러나 경제성을 고려하여 회전자측 컨버터의 정격 전압이 제한하였기 때문에 설정한 운전 범위보다 낮은 회전속도에서는 발전기를 제어할 수 없다. 이런 경우에 발전기를 정상적으로 제어하기 위하여 발전기의 회전속도를 최저속도로 제어한다. 반대로 풍속이 높은 경우에는 빠른 회전속도로 운전해야 에너지를 최대한 얻을 수 있지만 경제성을 고려하여 컨버터의 전류 용량을 제한하였고 빠른 속도로 회전할 경우 기계구조에 스트레스가 누적되어 고장의 원인이 되기 때문에 회전속도를 최대속도로 제어한다.

그림 4에서 발전기의 유효전력의 제어 전략에 따른 운전 곡선의 한 예를 보여준다.[3] (a)는 풍속과 블레이드의 기계적 출력의 관계 곡선이다. 풍속이 A보다 낮은 경우에는 발전기를 제어하지 않으며 풍속이 A와 B사이에 있을 때는 회전속도를 최소값으로 제어한다. 그리고 풍속이 B와 C사이에 있을 때는 회전속도의 3승에 비례하도록 발전기의 유효전력을 제어하기 때문에 블레이드도 최대 출력점에서 운전된다. 풍속이 C보다 빨라지면 발전기의 회전속도를 최대값으로 제어하지만 기계적 출력은 정격보다 작기 때문에 풍속이 증가할수록 기계적 출력도 증가한다. 풍속이 D보다 빨라지면 피치제어기가 동작하여 블레이드의 기계적 출력을 정격으로 제한한다. 풍속이 E보다 빨라지면 발전기의 제어를 종료한다. (b)는 (a)와 같이 운전할 때 회전속도와 발전기 유효전력의 관계를 곡선을 보여준다. A~E는 (a)와 동일한 조건에서 표시하였다.

3.2.2 무효전력 제어

이중여자 유도형 풍력발전 시스템과 계통 사이의 무효전력은 발전기 고정자 무효전력과 계통측 컨버터 무효전력을 더한 값이다. 유도 발전기는 유도기 외부에서 여자 전류를 공급해줘야 하고 고정자 무효전력은 주로 발전기의 여자 전류에 의해서 발생하기 회전자측에서 공급하는 여자 전류의 크기에 따라서 고정자 무효전력의 크기가 달라진다. 즉, 회전자측 컨버터와 계통측 컨버터를 제어하면 풍력발전 시스템과 계통 사이의 무효전력을 제어할 수 있다.

컨버터의 정격 용량은 유효전력과 무효전력으로 구분할 수 있다. 두 대의 컨버터에서 유효전력은 발전기의 운전 전략에 따라서 정해졌기 때문에 컨버터의 정격 용량은 무효전력의 제어 전략에 따라서 달라진다. 계통측 컨버터의 경우 무효전력을 '0'으로, 회전자측 컨버터의 경우 여자 전류를 '0'으로 제어하면 컨버터의 정격 용량이 최소가 되지만 계통에서 요구하는 풍력발전 시스템의 운전 역률을 만족시킬 수 없다. 계통에서 요구하는 풍력발전 시스템의 운전 역률을 만족시키기 위해서는 계통측 컨버터의 무효전력 또는 회전자측 컨버터의 여자 전류를 제어해야 한다. 회전자측 컨버터의 여자 전류는 고정자 무효전력에 반비례한다.

계통측 컨버터와 회전자측 컨버터에서 제어할 무효전력의 비율을 조절하면 컨버터 두 대의 정격 용량을 동일하게 할 수 있으며, 그 이외의 비율에서는 두 대의 컨버터 중에서 한대의 정격 용량이 두 대의 정격 용량이 동일할 경우보다 커지게 된다. 그림 5에서 무효전력의 비율에 따른 컨버터 정격 용량의

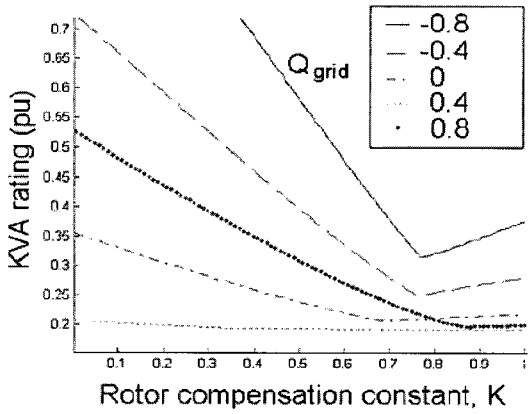


그림 5 무효전력 제어전략에 따른 컨버터 정격 용량 변동 곡선[10]

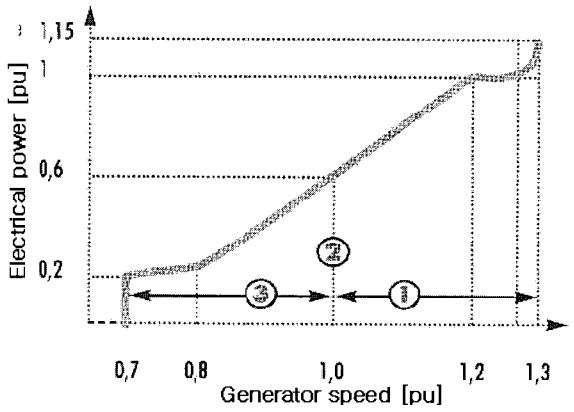


그림 7 SEG Concycle에 의한 운전 곡선

표 1 이중여자 유도형 풍력발전 시스템

제작사	모델명	블레이드 회전직경 [m]	블레이드 회전속도 [rpm]	정격용량 [kW]
Vestas	V90	90	9-19	2,000
GE	3.6	104	8.5-15.3	3,600
Gamesa	G83	83	9-19	2,000
Repower	5M	126	6.9-12.1	5,000

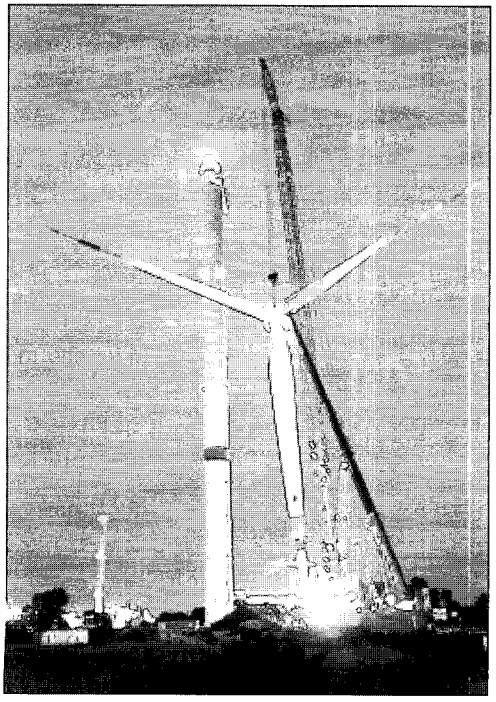


그림 6 Repower의 5MW 시스템

변화를 보여주고 있다.[10] 무효전력은 per-unit 값으로 표현하여 계통에서 유입되는 무효전력이 -0.8, -0.4, 0, 0.4, 0.8pu 인 경우를 보여주고 있다. 대략적으로 무효전력의 비율이 0.7~0.9 사이에 있을 때 컨버터의 정격 용량이 최소가 된다.

4. 개발된 시스템

세계적으로 많은 업체에서 이중여자 유도 방식의 풍력발전 시스템을 개발하였다.[11~14] 표 1에서 이중여자 유도 방식을 채택한 업체의 제품 중에서 최대 용량을 정리하였다. 최대 용량은 Repower에서 개발한 5MW급 시스템으로 블레이드의 회전단면적은 축구장 2개보다 넓다. 그림 6은 Repower의 5MW급 시스템을 설치하는 장면이다.

풍력발전 시스템 전체를 만드는 업체 이외에도 많은 업체에서 이중여자 유도 발전기를 제어하기 위한 전력변환 장치를 생산하고 있다.[15~17] SEG사의 경우 전세계적으로 2,000대 이상의 풍력발전 시스템에서 SEG에서 생산한 이중여자 유도 발전기용 전력변환 장치를 사용하고 있다. 그림 7은 SEG사가 발표한 회전속도에 따른 이중여자 유도 발전기의 발전량 변동 곡선이다. 그림 7을 그림 4 (b)에 비교하면 블레이드의 기계적 출력이 작은 경우 최저속도 제어를 하는 부분과 최대 출력점으로 제어하는 부분에서의 운전 패턴은 동일하다. 그러나 발전량이 정격에 도달하면 발전량은 정격으로 제한되지만 회전속도가 변동하는 것은 그림 4 (b)와 다르다. 그리고, 회전속도가 계속 증가하면 발전량을 증가시킴으로써 회전속도가 증가하는 속도를 느리게 한다.

그림 7과 같은 운전 곡선을 채택한 1.5MW급 이중여자 유도형 풍력발전 시스템에서 600초 동안의 운전 결과를 2000년에 발표된 논문 Muller의 논문에서 확인할 수 있다.[17]

5. 결 론

풍력발전 시스템은 최근 10여년동안 눈부신 성장을 거듭하여 가장 각광받는 신재생 에너지원으로서의 자리를 굳혔다. 유가 급등과 이산화 탄소배출량 규제 등 정치?경제적 환경 요인을 바탕으로 앞으로도 커다란 발전이 기대되는 분야이다. 특히 본고에서 살펴본 이중여자 유도형 풍력발전 시스템은 1990년대 후반에 처음 상용화된 이후에 빠른 속도로 점유율이 증가하여 현재 전세계적으로 가장 큰 시장 점유율(50%)과 최고 용량(5MW)에 적용된 신기술로서 그 가치가 매우 높다고 할 수 있다.

본 글에서는 이러한 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 구성과 특징 및 제어 알고리즘을 소개하고 특히 전력전자 기술이 풍력발전 시스템 제어에 얼마나 중요하게 응용되고 있는지 살펴보았다. 이중여자 유도형 풍력발전 시스템에 대한 기술은 PWM IGBT 인버터 기술을 기반으로 하여 기계 시스템 및 전력 시스템의 링크 역할로서 터빈의 제어 성능은 물론 운전 효율과 신뢰성을 높이는데 결정적인 역할을 담당하고 있다.

앞으로 풍력발전 시스템 단위 용량의 증가와 풍력발전 단지의 대규모화가 빠르게 진행됨에 따라 전력 계통에서 풍력발전이 차지하는 비율이 점차 확대될 것으로 예상된다. 이미 제주도 등 국내에서도 이러한 상황이 나타나고 있으며 효율적이고 안정적인 전력 계통의 운영을 위하여 전력 계통 운영자들은 풍력발전을 포함한 분산 전원 시스템들이 기존의 발전 시스템과 동일하거나 유사한 거동 특성을 보일 것을 요구하고 있는 실정이다. 이에 발맞추어 국제적으로도 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 성능 향상 및 전력 계통과 연계 운전 시 특성 검토에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.[18~23] 예를 들면 사고 등에 의해서 계통의 전압이 순간적으로 강하해도 풍력발전 시스템은 계통에 연계된 상태를 유지하도록 요구하고 있다. 또한 계통에서 풍력발전 시스템에 인접한 지역의 전압이 정상 운전 범위에서 벗어날 때 풍력발전 시스템의 무효전력을 제어하여 인접 지역의 전압을 계통에서 목표하는 운전범위로 제어하기를 요구한다. 한편 계통의 주파수가 변할 경우에도 풍력발전 시스템의 출력 유효전력을 조절하여 계통 주파수를 정상적인 값으로 유지하는데 기여할 것을 요구하기도 한다.

앞으로 이중여자 유도형 풍력발전 시스템을 연구, 개발함에 있어서 기존 시스템이 가진 제어 기능 이외에 최근 요구되고 있는 이러한 조건들을 포함하여 더욱 효율이 높고 신뢰성이 향상된 시스템을 목표로 하는 것이 필요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

[1] Frede Blaabjerg, "Various Wind Electric Arrangements," Workshop on Renewable Energy for Minnesota, 2003.

[2] John Dunlop, "U.S. Wind Market Overview," Workshop on Renewable Energy for Minnesota, 2005.

[3] Anca D. Hansen, Florin Iov, Poul Soerensen, Frede Blaabjerg, "Overall Control Strategy of Variable Speed Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbine," 2004 Nordic Wind Power Conference, March 2004.

[4] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation," IEE Proc.-Electr, Power Appl., Vol. 143, No. 3, pp. 231-241, May 1996.

[5] 김용현, 김일환, "풍력발전을 위한 이중여자 유도기의 센서리스 제어," 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No.5, 451-458, 2000.

[6] 정병창, 권태화, 송승호, 김일환, "회전자측 PWM 인버터-컨버터를 사용한 이중여자 유도형 풍력 발전기의 계통 투입 알고리즘," 전기학회 논문지 Vol. 52, No. 10, pp. 528-534, 2003.

[7] 정병창, 정세종, 송승호, "가변관성 모의기능을 가진 풍력터빈 시뮬레이터의 제어 알고리즘", 전력전자학회논문지 Vol. 8, No. 3, pp. 266-273, 2003.

[8] J. W. Park, K. W. Lee, H. J. Lee, "Control of Active Power in a Doubly-Fed Induction Generator Taking into Account the Rotor Side Apparent Power," 2004 IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 2060-2064, 2004.

[9] 정병창, 송승호, "가변 풍속시 운전모드 절환을 고려한 이중여자 유도형 풍력발전기 시뮬레이터의 구현," 2005 전력전자학회 추계학술대회, pp. 71-73, 2005.

[10] Chad Abbey, Geza Joos, "Optimal Reactive Power Allocation in a Wind Powered Doubly-Fed Induction Generator," 2004 IEEE Power Engineering General Meeting, pp. 1492-1496, June 2004.

[11] M. Kuhn, M. Becker, "Enron Wind 3.6 Offshore : Example for the Next Generation of Offshore Wind Turbines," 2002 Global Wind Power Conference, April 2002.

[12] http://www.gepower.com/home/index.htm

[13] http://www.enercon.de/

[14] http://www.repower.de/

[15] Dr. Eggert, S. Franko, "Innovative Variable Speed Drive for Doubly Fed Wind Turbine Application," 2002 Global Wind Power Conference, April 2002.
[16] http://www.newage-avkseg.com/intro.html
[17] S. Muller, 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, pp. 2249-2254, 2000.
[18] Sigrid M. Bolik, Jens Birk, Bjorn Andresen, John G. Nielsen, "Vestas handles grid requirments : advanced control strategy for wind turbines," 2003 European Wind Energy Conference and Exhibition, June 2003.
[19] J. B. Ekayanake, L. Holdsworth, N. Jenkins, "Control of Doubly Fed Induction Generator (DFIG) Wind Turbines," Manchester University, England.
[20] Torbjorn Thiringer, Andreas Peterson, Tomas Petru, "Grid Disturbance Response of Wind Turbines Equipped with Induction Generator and Doubly-Fed Induction Generator," 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1542-1547, 2003.
[21] Ted Brekken, Ned Mohan, "A Novel Doubly-fed Induction Wind Generator Control Scheme for Reactive Power Control and Torque Pulsation Compensation Under Unbalanced Grid Voltage Conditions," 2003 IEEE Power Electronics Specialist Conference, pp. 760-764, June 2003.
[22] 정병창, 송승호, "전원 전압 불평형시 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 토크 리플 저감을 위한 계통연계 인버터 제어 알고리즘," 2005 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 추계학술대회, pp. 317-319, 2005.
[23] Jouko Niiranen, "Voltage dip ride through of a doubly-fed generator equipped with an active crowbar," 2004 Nordic Wind Power Conference, March 2004.

《저 자 소 개》

송승호(宋丞鎬)

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1992년~1995년 포스콘 기술연구소 연구원. 2004년~2005년 미국 위스콘신대학교 방문교수. 2000년~현재 전북대학교 전자정보공학부 조교수.

정병창(鄭炳昌)

1976년 1월 26일생. 1998년 전북대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~2006년 2월 동 대학원 전기공학과 박사졸업(예정)