

풍력발전기 전력제어를 통한 계통연계형 인버터의 출력전력 리플 개선

정병창, 김병욱, 송승호
 전북대학교 전자정보공학부

Improvement of Grid Interface Inverter Power Ripple with Wind Turbine Power Control

Byoung-Chang Jeong, Byoung-Wook Kim, Seung-Ho Song
 Chonbuk National University

Abstract - 인버터-컨버터를 사용하여 발전기를 제어하는 풍력발전 시스템의 출력은 풍속에 따라서 변화하기 때문에, 풍속을 기준으로 발전기를 제어할 경우, 풍력발전 시스템이 계통에 공급하는 유효전력에는 여러 가지 성분은 풍속에 따라서 흔들리게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 발전기와 계통연계 인버터를 유효전력을 기준으로 제어하도록 하였으며, 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

1. 서 론

중·대용량 풍력발전 시스템은 시스템의 이용 효율을 높이기 위하여 계통연계 방식으로 운전하고 있다.^[1] 계통연계 방식은 계통 직결형과 인버터-컨버터를 사용하는 전력변환형으로 구분되며, 용량에 따라서 수백 kW이하에서는 계통 직결형을 MW이상 시스템에서는 전력변환형을 주로 사용한다. 계통 직결형은 발전기의 속도 변동 범위가 정격속도의 수% 이내로 거의 일정한 속도에서 운전하지만, 전력변환형은 정격속도의 50-120% 범위에서 가변속 운전한다. 이외에도 직결형과 전력변환형이 결합된 이중역자 방식의 풍력발전 시스템도 있다.

인버터-컨버터를 사용하는 전력변환형 시스템에서 전력변환장치는 각각의 기능을 갖는다. 컨버터는 발전기측에 설치되어 발전기의 유효전력 출력이 최대가 되도록 제어한다. 발전기의 최대 출력 조건을 만족하도록 제어하는 것을 최대 전력점 추종(MPPT : Maximum Power Point Tracking)이라고 하며, 대표적인 방법으로 풍속에 따라서 발전기의 회전속도를 제어하는 방법이 있다.^{[2][3]} 이때, 입력 풍속이 부정확할 경우 정확한 최대 전력점 추종이 어렵고, 풍속의 잦은 변동과 블레이드의 타워 효과에 의해서 발전된 전력에 리플이 포함되는 등의 특징을 보여준다.

인버터는 계통측에 설치되어 발전된 유효전력을 계통에 공급한다. 이때, 컨버터와 공동으로 사용하는 직류단 커패시터의 전압을 일정하게 제어하기 때문에, 계통에 공급하는 유효전력의 크기는 발전된 유효전력을 추종하며, 제어기의 특징에 의하여 직류단 전압의 작은 진동에도 출력 유효전력이 흔들리는 특성을 보여준다.

본 논문에서는 기존의 제어방식을 사용했을 때 계통에 공급하는 유효전력이 흔들리는 문제를 해결하기 위하여 유효전력을 기준으로 컨버터와 인버터를 제어하는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 발전기의 회전속도 변화에 따라 발전기의 유효전력값을 계산하며, 발전된 유효전력량을 계통연계 인버터의 출력 유효전력 값으로 설정하였다. 또, 발전된 유효전력과 출력 유효전력의 차에 의해서 직류단 전압이 변동하는 것을 보상하여 직류단 전압의 변동폭도 일정 범위 이내로 제한하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안한 알고리즘을 검증하였다.

2. 가변속 풍력발전 시스템의 제어 알고리즘

2.1 가변속 풍력발전 시스템

가변속 풍력발전 시스템은 그림 1과 같이 블레이드, 증속 기어, 발전기, 그리고 발전기를 제어하고 전력을 계통에 공급하기 위한 전력변환기로 구성된다. 이외에도 회전자측의 전력을 제어하는 방식의 가변속 풍력발전 시스템도 존재하지만, 전력변환기의 제어 알고리즘은 유사하다.

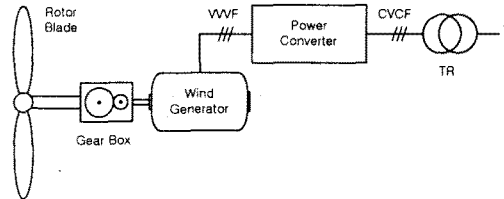


그림 1. 가변속 풍력발전 시스템

고정속도 운전 방식에 비하여 전력변환기를 사용하는 가변속 방식은 많은 장점을 갖는다. 첫째는 풍속 변동에 따른 입력 토오크의 변동을 블레이드의 회전에너지로 저장할 수 있다는 것이다. 이것은 급격한 풍속의 변동에 따른 입력 토오크의 변동이 발전시스템에 미치는 스트레스를 감소시키는 역할을 하며, 동시에 발전 시스템의 출력변동을 완만하게 억제하는 효과를 갖는다. 둘째는 계통에 공급하는 전력의 역률을 원하는 값으로 제어할 수 있는 것이다. 이것은 전력의 품질을 개선하고, 계통 선로의 사용률을 향상시키는 효과를 갖는다. 셋째는 계통에서 사고가 발생해도, 발전 시스템을 정상적으로 정지할 수 있다.

반대로 전력 변환 장치의 사용에 의하여 풍력발전 시스템의 가격이 상승하고, 계통에 고조파를 공급하는 등의 단점도 있다.

풍력발전 시스템의 블레이드에 입력되는 에너지 P_{blade} 는 식(1)과 같다.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho V_{wind}^3 C_p(\lambda) \quad [W] \quad (1)$$

A는 블레이드의 회전단면적[m²], ρ는 공기의 질량으로 약 1.25kg/m³, V_{wind}는 풍속[m/sec], C_p(λ)는 블레이드의 출력계수로 주속비의 함수이다.

2.2 기존의 제어 방법

2.2.1 발전기의 속도 제어

가변속 풍력발전 시스템에서 발전기는 유효전력 출력이 최대가 되도록 제어한다. 대표적인 방법으로 풍속에

따라 발전기의 회전속도를 제어하는 방법이 있다.^{[2][3]} 식(1)에서 살펴본바와 같이 블레이드에 입력되는 에너지는 풍속의 3승에 비례하고, 출력계수에 비례한다. 출력계수는 주속비의 함수이며, 주속비는 풍속에 대한 블레이드 끝의 회전속도 비율로 식(2)와 같다.

$$\lambda = \frac{R_{blade} \cdot \omega_{blade}}{V_{wind}} \quad (2)$$

R_{blade} 는 블레이드의 회전반경[m], ω_{blade} 는 블레이드의 회전속도[rad/sec]를 의미한다. 풍속 등 모든 조건이 동일할 경우 특정한 회전속도에서 블레이드의 출력계수가 최대가 된다. 그림 2에서 보여주고 있는 것과 같이, 주어진 풍속에서 발전기의 출력이 최대가 되는 회전속도로 발전기를 제어한다. 최대 출력계수에서의 주속비를 λ_{opt} 라고 하면 블레이드에 입력되는 에너지는 식(3)과 같다.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho A R_{blade}^3 \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \omega_{blade}^3 = K_{blade} \omega_{blade}^3 \quad [W] \quad (3)$$

C_{pmax} 는 최대 출력계수.

블레이드의 기계적 토크 T_{blade} 는

$$T_{blade} = K_{blade} \omega_{blade}^2 \quad [Nm] \quad (4)$$

기어를 사용하지 않고, 블레이드에서 발전기까지의 손실이 없다고 할 경우, 발전기는 식(4)와 같은 토크를 전기적 에너지로 변환한다.

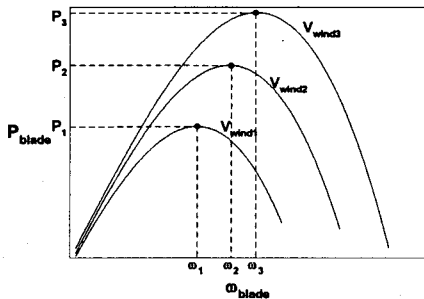


그림 2. 블레이드 회전속도-에너지 곡선

2.2 계통연계 인버터 직류단 전압 제어

계통연계 인버터는 발전된 유효전력을 계통에 공급하며, 동시에 직류단 커패시터의 전압을 일정하게 제어한다. 직류단 커패시터의 전압 V_{DC} 은 다음식과 같다.

$$C_{DC} \frac{d}{dt} V_{DC} = I_{PMSM} - I_{GRID} \quad (5)$$

C_{DC} 는 커패시터의 크기[F], I_{PMSM} 은 커패시터에서 컨버터로 흘러 나가는 전류[A], I_{GRID} 는 인버터에서 커패시터로 흘러 들어오는 전류[A]

현재 직류단 전압 제어기는 직류단 전압의 변화를 검출하여 계통과 인버터 사이의 유효전력분 전류를 제어한다.

2.3 제안한 제어 알고리즘

제안한 알고리즘은 발전기와 계통연계 인버터를 유효전력을 기준으로 제어한다.

2.3.1 발전기의 제어

식 (3)을 시간에 대해서 미분하면 양변은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{d}{dt} P_{blade} = 3K_{blade} \omega_{blade}^2 \frac{d}{dt} \omega_{blade} \quad [W] \quad (6)$$

식(6)에서 보여주고 있는 것과 같이, 블레이드에 입력되는 에너지의 변화량은 회전속도의 변화량에 비례하는 관계를 얻을 수 있다. 기어에서의 손실이 없다고 가정하면 발전기에서 변환해야 할 에너지는 블레이드에서 입력된 에너지와 동일하므로, 식 (6)을 사용하여 제어주기마다 발전기에서 변환해야 할 에너지의 변화량을 계산한다. 그리고, 블레이드에 입력된 에너지는 발전기에서 출력해야 할 에너지와 동일하기 때문에 발전기의 토크로 제어 기준값 T_{PMSM}^* 은 다음과 같다.

$$T_{PMSM}^* = \frac{P_{PMSM}}{\omega_{PMSM}} = \frac{P_{blade}}{\omega_{blade} \cdot GR} \quad [Nm] \quad (7)$$

GR 은 기어비. 발전기의 토크 기준값을 정리하면

$$T_{PMSM}^* = K_{blade} \frac{\omega_{blade}^2}{GR} \quad [Nm] \quad (8)$$

2.3.2 계통연계 인버터의 제어

계통연계 인버터는 유효전력을 기준으로 제어한다. 유효전력의 제어 기준값 P_{GRID}^* 은 다음과 같다.

$$P_{GRID}^* = P_{PMSM} \quad [W] \quad (9)$$

그러나 계통연계 인버터가 발전된 유효전력을 추종하기까지 약간의 시간이 필요하다. 또, 인버터와 컨버터 사이에 여러 가지 손실이 존재하기 때문에, 식(9)만을 사용하여 계통연계 인버터를 제어할 경우, 직류단 전압이 안정적이지 못하고 큰폭으로 변동한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 직류단 전압의 크기를 고려하여 계통연계 인버터의 유효전력 기준값을 다시 계산한다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 모델

제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림3에서 시뮬레이션 모델을 보여주고 있다. 시뮬레이션은 영구자석형 동기기를 사용한 풍력발전 시스템을 대상으로 하였으며, 크게 3부분으로 구성되어 있다.

바람에서 기계적에너지를 입력받아서 발전기에 공급하는 블레이드와 기어 모델이 그림 3의 상단에 있다. 블레이드의 피치는 고정하였고, 기어에서의 손실은 무시하였다. 또, 타워와 블레이드의 관계에 의해서 입력에너지가 달라지는 타워효과(Tower Effect)를 구현하였다.

블레이드에서 공급된 기계적 에너지는 그림의 중앙에 위치한 영구자석 동기기와 컨버터 모델에 의해서 전기적 에너지로 변환된다. 동기기에서 발생하는 손실은 저항 손실만을 고려하였다. 그리고, 블레이드 입력 토크와 발전기 토크의 차이에 따라서 회전속도를 계산하는 모델이 그림의 우측에 있다.

계통연계 인버터 모델은 그림의 하단에 위치하며, 동기기에서 발전된 전력을 계통에 공급한다. 인버터 모델에는 직류단 커패시터가 포함되어서 동기기에서 발전된 유효전력과 계통으로 공급한 유효전력의 차이에 따라서 직류단 전압을 계산하고 있다. 인버터는 발전된 유효전력을 계통에 공급하면서, 동시에 계통에 공급하는 전력의 역률도 제어하고 있다.

표 1에서 시뮬레이션 모델의 사양을 보여주고 있다.

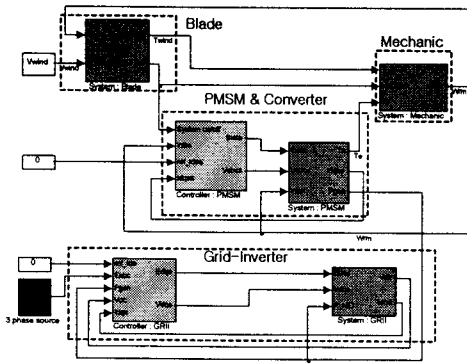


그림 3. 시뮬레이션 모델 : 유효전력 제어

표 1. 시뮬레이션 사양

구분	사양
블레이드	$R_{blade} = 2.14$ [m]
	$C_{pmax} = 0.4896$
	$GR = 4.482$
동기기	$P_{rate} = 4400$ [W]
	$I_{rate} = 30$ [A]
계통연계 인버터	$P_{rate} = 4400$ [W]
	$V_{rate} = 220$ [V]
	$C_{DC} = 4800$ [uF]

3.2 시뮬레이션 결과

그림 4-6, 그림 7-9에서 기존의 제어방식과 제안한 방식에 따른 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 시뮬레이션은 동일 모델, 동일 풍속 조건에서 제어 알고리즘만을 변경하여 수행하였다.

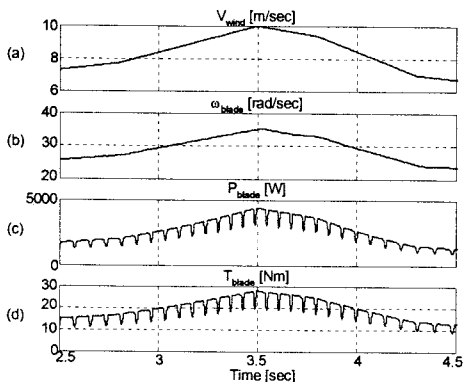


그림 4. 기존 방식 : 블레이드

그림 4에서는 상단에서부터 차례대로 기존의 제어방법을 사용했을 때, 풍속, 블레이드의 회전속도, 블레이드 입력 에너지, 그리고 블레이드의 토크를 보여주고 있다. 발전기에서 풍속에 비례하도록 회전속도를 제어하기 때문에 블레이드의 회전속도는 풍속에 비례하여 증감하고 있다. 이때, 타워 효과에 의해서 블레이드에 입력되는 에너지에 리플이 포함된 것을 볼 수 있다.

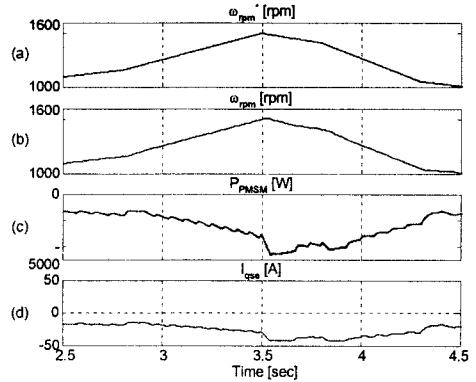


그림 5. 기존 방식 : 발전기 제어

그림 5는 블레이드에서 그림 4와 같은 에너지를 입력할 때, 발전기의 속도제어 특성을 보여주고 있다. 그림의 상단에서부터 회전속도제어 기준값, 회전속도, 유효전력, 그리고 토크분 전류를 보여준다. 발전기의 회전속도는 풍속에 비례하여 제어되고 있다. 이때, 발전된 유효전력에는 많은 리플이 포함되어 있다. 블레이드의 타워효과에 의해서 발전된 유효전력에 리플이 발생하고 있으며, 풍속 변화의 기울기가 달라질 경우에도 유효전력에 리플이 발생하여 직류단에 공급하는 에너지에 리플이 포함된다.

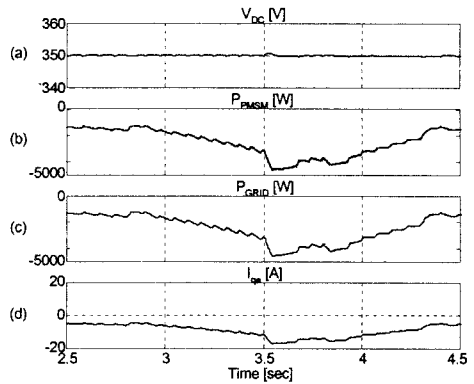


그림 6. 기존 방식 : 계통연계 인버터 제어

그림 6은 계통연계 인버터의 동작을 보여주고 있다. 그림의 상단에서부터 직류단 전압, 동기기의 유효전력, 계통연계 인버터의 유효전력, 그리고 계통연계 인버터의 유효전력분 전류를 보여주고 있다. 직류단 전압을 350V로 제어하고 있기 때문에, 동기기와 계통연계 인버터의 유효전력 파형이 동일한 것을 볼 수 있다. 즉, 풍력발전 시스템에서 계통에 공급하는 유효전력에 많은 리플이 포함되어서 계통전력의 품질에 좋지않은 영향을 미친다.

그림 7에서는 제안한 방법을 사용했을 때 블레이드의 상태를 보여주고 있다. 그림 4와 동일한 풍속조건에서 블레이드의 회전속도, 입력에너지 그리고 토크를 보여주고 있다. 발전기 제어 알고리즘의 특성에 의해서 풍속이 지속적으로 변동할 때, 풍속과 블레이드의 회전속도가 정확하게 비례하지 않는 것을 볼 수 있다.

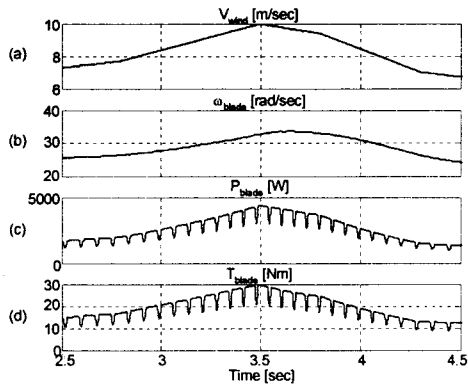


그림 7. 제안 방식 : 블레이드

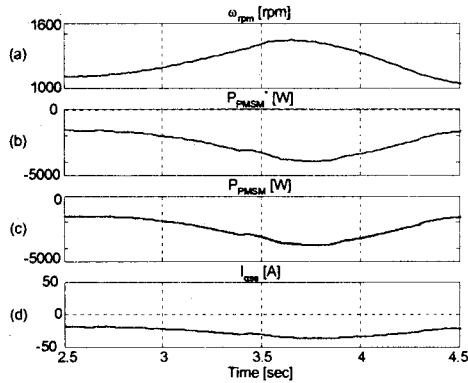


그림 8. 제안 방식 : 발전기 제어

그림 8에서는 제안한 방법을 사용했을 때 발전기의 동작특성을 보여주고 있다. 그림의 상단에서부터 회전속도, 유효전력 기준값, 유효전력 그리고 발전기의 토오크 분 전류를 보여주고 있다. 그림 5와 비교했을 때, 속도 변동에 기반하여 유효전력 기준값을 계산하였기 때문에, 타워 효과에 의한 유효전력의 리플이 제거되었으며, 풍속 또는 회전속도 변화율이 변동할 때 발생하는 유효전력의 리플도 거의 나타나지 않는 것을 볼 수 있다.

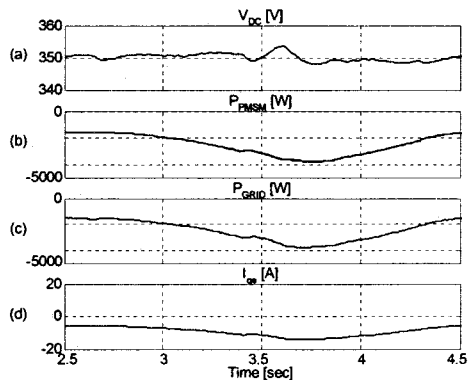


그림 9. 제안 방식 : 계통연계 인버터 제어

그림 9에서는 제안한 방법을 사용했을 때 계통연계 인버터의 출력특성을 보여주고 있다. 직류단 전압을 직접 제어하지 않기 때문에, 직류단 전압은 약간 변동하지

만, 계통에 공급하는 유효전력에는 기존의 제어방법에 비교했을 때 리플이 거의 포함되지 않은 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 가변속 풍력발전 시스템이 계통에 공급하는 유효전력의 리플을 제거하기 위하여 유효전력을 기준으로 제어를 수행하는 가변속 풍력발전 시스템 전력 제어 알고리즘을 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 동작을 확인하였다.

제안한 알고리즘은 회전속도의 변화에 따라서 발전기의 유효전력 제어 기준값을 계산하여, 타워 효과에 의한 출력 유효전력 리플을 제거하였다. 또한, 풍속과 회전속도의 변화율이 달라지는 순간에 발생하는 유효전력의 리플을 억제하여 직류단에 일정한 에너지를 공급할 수 있도록 하였다. 그리고, 계통연계 인버터는 발전된 유효전력을 기준으로 제어하였으며, 직류단 전압이 변동하는 것을 보상할 수 있도록 하여, 직류전압 제어를 사용하였을 때 발생하는 계통 공급 전력의 리플을 제거하여, 풍력발전 시스템이 더욱 안정적인 전원으로 동작하도록 하였다.

감사의 글

본 연구는 한국전력연구원 지원에 의하여 기초전력 공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] 정병창, 임종연, 송승호, 김영민, 노도한, 김동용, "중·대형급 풍력발전 시스템용 에너지 변환 방식에 대한 연구", 2001 대한전기학회 춘계학술대회논문지, pp.459-462, 2001.
- [2] 구성영, 이동춘, "풍력발전용 농형유도발전기의 최대출력 제어", 2001 대한전기학회 춘계학술대회논문지, pp.288-292, 2001.
- [3] Shibashis Bhowmik, Rene Spee, Johan H. R. Enslin, "Performance Optimization for Doubly Fed Wind Power Generation Systems", IEEE Tr. Industry Application, Vol. 35, No. 4, pp.949-958, 1999.