

## 가변속 풍력발전 시스템의 계통연계 인버터 출력전류 리플 개선에 관한 연구

강신일, 송승호, 김동용  
전북대학교 차세대 풍력발전 연구센터

### Improvement of Output Current Ripple In Grid Connected PWM Inverter for Variable Speed Wind Turbine System

Shin-il Kang, Seung-Ho Song, Dong-Yong Kim  
Advanced Wind Power System Research Center of Chonbuk National University

**Abstract** - 풍력발전 시스템은 계통에 전력을 공급하는 분산형 전원형태가 대부분이어서 어느 분산형 전원보다 계통연계시 선로에 미치는 영향이 큰 발전설비이다. 특히 가변속 시스템인 경우 풍속이 낮은 영역에서도 운전이 가능하다는 장점이 있지만 저풍속 영역에서 풍속변동시 터빈 회전자 출력력의 리플이 직류단 전압을 변동하게 만든다. 기존의 직류단 전압 일정제어기를 사용하는 경우 인버터 출력전류는 정현파가 아닌 고조파 리플을 포함하는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자 직류단 전압에 저역통과 필터를 사용하여 인버터 출력전류의 리플 개선을 하였다.

## 1. 서 론

현재 지구상의 상황은 시시각각 변화하는 불안한 국제정세에 따라 국제유가의 변동시기 및 폭을 예측할 수 없는 상황에 이르렀고 향후 화석연료 고갈에 대비한 에너지원의 다변화와 국제 기후변화 협약등 국제적인 환경규제에 능동적으로 대처하기 위한 미래 에너지원의 개발에 심혈을 쏟고 있는 상황이다. 따라서 화석에너지의 고갈문제와 환경문제에 대한 핵심 해결방안이라는 점에서 선진각국은 정부 주도하에 대체에너지 산업 육성을 위한 과감한 연구개발 및 보급 정책들을 추진해오고 있다.

이러한 활발한 연구결과 및 기술 보급으로 최근에는 MW용량의 대형 풍력발전 시스템이 상용화 단계에 있는 실정이다. 2001년 말에는 세계적으로 약 24,900MW 설비용량이 설치되어 연간 54.5Wh/년 이상의 전력을 생산하고 있다. 이는 전세계 전력수요의 0.35%를 분담하는 비율로 최근 5년간의 연평균 기술규모 성장률이 39.5%에 이르고 있다.

한편 풍력발전 시스템은 계통에 전력을 공급하는 분산형 전원형태가 대부분이어서 어느 분산형 전원보다 계통연계시 선로에 미치는 영향이 큰 발전설비이다. 특히 풍력발전기의 출력변동으로 인한 전압의 Flicker 현상이나 인버터 사용에 따른 계통에 공급되는 전력에 고조파를 함유하는 문제 등은 계통 입장에서는 불필요한 요소들이다. 따라서 풍력발전시스템 운용시 예상되는 발생문제점을 검토 및 분석하여 계통연계시의 대책에 대한 연구가 활발히 이루어져야 할 것이다.

본 논문은 부안 해창에 설치되어 운용중인 30kW급 수직/수평축 통합형 풍력발전시스템에서 발견된 문제점을 가지고 연구를 수행하였다. 기존에도 존재했었던 인버터 출력전류의 리플을 본 논문에서 제시함으로써 리플의 원인을 고찰하고 리플 개선을 위한 제안된 방법을 실험을 통해서 검증하였다.

## 2. 풍력발전 시스템

### 2.1 가변속 시스템

그림 1은 일반적인 가변속 풍력발전 시스템의 구성도를 보여주고 있다. 이 시스템은 크게 블레이드, 발전기, 컨버터, 계통연계형 인버터로 구성되어 있다.

발전기는 시스템에 따라 영구자석형 동기기, 권선형 동기기 그리고 농형 유도기 등을 사용한다.

가변속 시스템은 정격보다 낮은 속도에서도 운전이 가능하기 때문에 저풍속 영역에서도 발전할 수 있으며 돌풍이나 기타의 조건에 의한 급격한 토크 변화를 회전자 속도 변화로 변환시켜서 흡수할 수 있다는 장점이 있다.

발전기와 계통을 연결하는 컨버터-인버터는 계통으로 공급되는 전력을 임의의 역률로 제어할 수 있다. 가변속 시스템은 정격보다 낮은 속도에서도 운전이 가능하기 때문에 저풍속 영역에서도 발전할 수 있으며 돌풍이나 기타의 조건에 의한 급격한 토크 변화를 회전자 속도 변화로 변환시켜서 흡수할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 컨버터-인버터를 사용하기 때문에 제작시 더 많은 비용이 소모되며 발전기 출력과 계통과의 동기를 위해서 별도의 제어 회로나 컨버터가 필요하다는 단점이 있다.

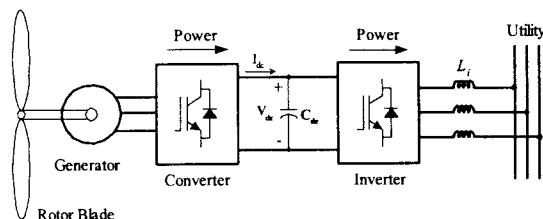


그림 1. 가변속 풍력발전시스템 구성도

### 2.2. 계통연계형 인버터

가변속 풍력발전 시스템에서 사용하는 계통연계형 인버터의 제어기 구성도는 그림 2와 같다.

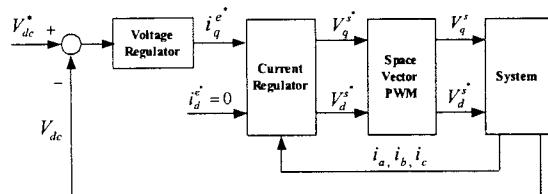


그림 2. 인버터 전압제어기 블럭도

전원측에서 공급되는 입력전력이 부하에서 소비하는 출력전력보다 클 경우에는 직류링크 전압이 증가하고, 반대의 경우에는 직류링크의 전압이 감소하므로 입력전력을 제어함으로써 직류링크 전압을 제어할 수 있다. 이는 곧 유효분 전류를 제어함으로써 직류링크 전압을 제어하는 것과 동일하다. 그림 3.처럼 케환제어기로써 IP전압 제어기를 사용하였다. 이때 사용된 식은 다음과 같다.

$$i_{qe}^* = -K_p V_{dc} + K_i \int (V_{dc}^* - V_{dc}) \quad (2)$$

$$\frac{C}{2} \frac{dV_{dc}^2}{dt} = P_{in} - P_{out} \quad (3)$$

여기서, C는 직류링크 커패시턴스이다.

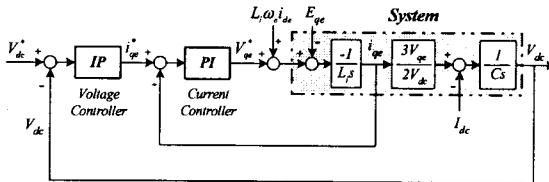


그림 3. 기존의 직류단 전압제어기 구성도

역기전력 보상을 위한 전향성분은 부하의 역기전력성분을 추정하여 보상한다. 일반적으로 PI 제어기의 특성은 폐루프의 주파수 대역에 의해 결정된다. 이 주파수 대역은 전류제어기의 제어주기 혹은 샘플링 시간과 PWM의 스위칭 주파수에 의하여 제한된다.

계통연계형 인버터의 합성 전압을  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ 라고 할 때 인버터의 출력 전압과 계통 전압 사이의 관계를 d-q축 동기 좌표계로 변환하면 다음과식과 같다.

$$E_{de} = L_i \frac{d}{dt} i_{de} - \omega_e L_i i_{qe} + V_{de} \quad (4)$$

$$E_{qe} = L_i \frac{d}{dt} i_{qe} - \omega_e L_i i_{de} + V_{qe} \quad (5)$$

한편 계통 전압을  $E_{de} = 0$ ,  $E_{qe} = E_{mag}$ 로 위상각 기준을 잡기 때문에 계통측에서 컨버터로 공급하는 유효전력과 무효 전력은 다음과 같다.

$$P = \frac{3}{2} E_{qe} i_{qe} \quad (6)$$

$$Q = \frac{3}{2} E_{qe} i_{de} \quad (7)$$

위 식으로부터 계통측에서 공급되는 입력전력은 동기좌표계 q축 전류이며 동기좌표계 d축 전류와는 관계가 없음을 알 수 있다. 그러므로 동기좌표계 q축 전류를 '유효전력분 전류'라고 할 수 있다. 한편 전원전압과 전류가 정현파인 경우에 역률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$pf = \frac{e_{dqe} \cdot i_{dqe}}{|e_{dqe}| |i_{dqe}|} = \frac{i_{qe}}{\sqrt{i_{de}^2 + i_{qe}^2}} \quad (8)$$

그러므로, d축 전류는 유효전력과는 무관하며 무효전력과 관련이 있으므로 '무효전력분 전류'라고 할 수 있고 식(8)에서처럼 역률을 제어할 수 있는 전류임을 알 수 있다. 일반적으로 역률 제어시 역률 1 운전을 위해서(본 논문에서도 시스템의 역률을 1로 제어) 무효전력분 전류  $I_{de}$ 의 기준값을 '0'으로 제어하기 때문에 유효전력분

전류  $I_{qe}$ 의 크기가 인버터 출력전류의 형태를 결정하게 된다. 따라서  $I_{qe}$ 에 고조파 성분의 리플이 포함되면 이는 곧 출력 전류에 리플을 발생함을 그림 4.에서 보여주고 있다. 한편 그림 4.는 부안 해창에 설치 운용중인 30kW급 풍력발전시스템을 대상으로 한 실험 과정으로 터빈 운전시 발생하는 q축 전류의 주기적인 리플을 보여주고 있다. 이로 인해 계통의 상전류  $I_a$ 는 원만한 사인파 형태가 아닌 찌그러진 형태로 계통으로 공급되는 것을 볼 수가 있다. 상전류  $I_a$ 는 계통측에서 들어오는 전류의 방향을 양의 방향으로 잡고 있다.

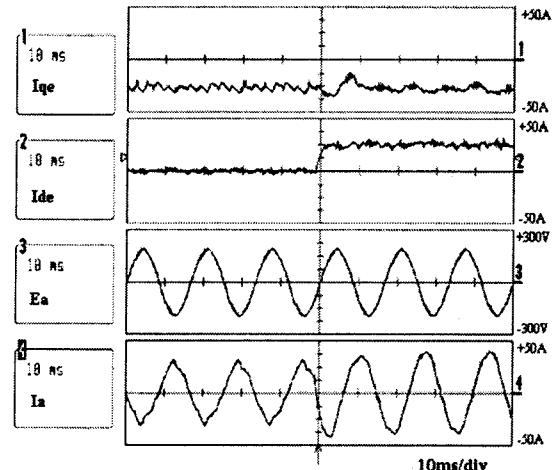


그림 4. Iqe 리플에 의한 인버터 출력전류의 특성

한편  $I_{qe}$ 의 리플에는 크게 두 가지로 구분할 수 있겠다. 전압제어기에서 만든  $I_{qe}$ 의 기준값으로 전류제어가 잘 되지 않아서 발생하는 리플과 직류단 전압이 흔들림으로써  $I_{qe}$ 의 전류 기준값 자체가 흔들려서 발생하는 리플로 들 수 있다. 전자의 경우에는 PWM 스위칭 리플과 전류제어기 및 플랜트의 비선형 등이 원인일 수 있다. 그리고 후자의 경우에는 바람의 변동에 따른 터빈 회전자 출력의 리플이 직류단을 통해 들어오기 때문에 발생하는 문제일 수 있다. 즉, 터빈 및 발전기의 회전수 변화에 따른 여러 가지 주기적인 리플 토오크가 발생함에 따라  $I_{qe}$ 에도 리플이 발생함을 알 수 있다.

본 연구는  $I_{qe}$  리플의 원인이 터빈 회전자 출력의 리플이 직류단을 통해 들어온으로써 발생하는 문제라고 가정하고 가변속 풍력발전시스템의 운영시  $I_{qe}$ 에 발생하는 리플을 최소하기 위한 방법을 다음절에서 제안하였고 그에 따른 실험을 통하여 출력전류의 리플이 개선됨을 검증하였다.

### 2.3. 제안한 전압제어기의 구성

기존의 직류단 전압제어기는 직류단 전압의 측정 및 피드백 제어기로써의 역할을 수행하였다. 즉, 직류단의 순간적인 power balance를 유지하기 위하여 컨버터에서 직류단으로 입력되는 전력만큼의 양을 직류단에서 인버터쪽으로 내보내는 형태의 제어를 수행하였다. 그러나 기존 선형 제어기는 잊은 직류단 전압 변동에도  $I_{qe}$ 의 기준값을 계속적으로 변화시켜 결국 인버터 출력 전류에 리플을 일으키는 문제점이 있었다.

따라서 제안된 방식은 직류전압 입력단에 저역통과 필터를 사용하여 직류단의 잊은 전압 변동에도  $I_{qe}$ 의 기준값이 좋아서 변동하지 않도록 하였다. 그림 6.은 제안된 방식의 직류단 전압제어기 블록도를 보여주고 있다.

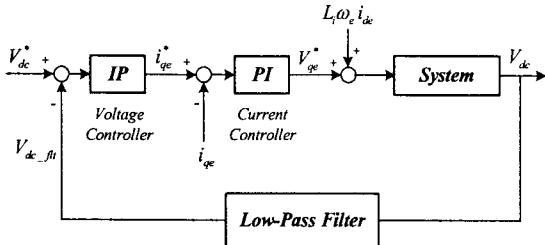


그림 5. 제안된 직류단 전압제어기

하지만 필터를 사용함으로써 다음과 같은 사항을 고려해야 한다. 그것은 시스템의 안정성 문제로 돌풍과 같은 바람의 급격한 변동시 필터 사용으로 제어기의 동특성이 순간적으로 느리게 반응해 직류단 전압의 오버슈트나 언더슈트를 발생시킬 수 있다. 이러한 문제 가능성 때문에 필터 사용시 적절한 cut-off 주파수의 선정과 직류단 오버슈트에 대해서 커페시티의 용량이나 정격 내압 한계를 얼마나 해야할지는 추후 연구되어야 할 부분이다.

### 3. 실험 및 결과

본 실험에서는 일반적인 가변속 풍력발전 시스템을 모의할 수 있는 장치로 풍력 시뮬레이터를 사용하였다. 시뮬레이터는 직류기와 유도기를 축으로 연결한 형태로 크게 직류전동기와 컨버터, 유도발전기와 컨버터, 그리고 계통연계형 인버터로 구성되어 있다. 직류전동기와 컨버터는 회전자 블레이드에 의한 토오크 입력을 모의하기 위해 사용하였다. 직류전동기를 제어하기 위한 컨버터는 역병렬 사이리스터 듀얼 컨버터를 사용하여 전동기의 전류를 정·역방향으로 제어가 가능하다. 그리고 농형 유도발전기를 사용하여 가변속 운전이 가능하고 계통연계형 인버터는 발전된 전력을 임의의 역률로 계통에 공급할 수 있도록 해준다.

풍력 시뮬레이터의 사양은 표 1.과 같다.

표 1. 시뮬레이터의 사양

Parameters	
직류 전동기	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 정격 용량 : 5.5kW</li> <li>- 정격 전압 : 220V</li> <li>- 정격 속도 : 1750rpm</li> </ul>
유도발전기	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 정격 용량 : 3kW</li> <li>- 고정자           <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 정격 전압 : 220V</li> <li>▪ 정격 전류 : 14.7A</li> </ul> </li> <li>- 정격 속도 : 1800rpm</li> </ul>

실험에서 전압제어기 직류단 전압의 찾은 변동에 따른 리플 특성을 관찰하기 위하여 인버터의 전류제어기의 이득은 높게 설정하였으며 부하조건은 발전되는 최대 출력 정격의 50%로 하였다.

실험 방법은 발전기 출력전력의 주기적인 변동을 모의하기 위하여 유도발전기의 회전속도 패턴을 그림 6.의 (a)와 같이 동작시킴으로써 회전자 블레이드의 출력 토오크분 전류(iqse)에 리플이 발생하였다. 한편 (a)와 같은 풍속 패턴은 유도기 제어 알고리즘 상에 몇 가지 풍속 패턴을 프로그램화하여 모드별 지정에 따라 구현이 가능하다. 또한 풍속의 변동 주기와 풍속의 크기도 임의대로 조정 가능하다. 리플이 포함된 회전자 블레이드의

토오크분 전류(b)는 직류단 전압에 (c)처럼 리플을 만들게 되고 직류단 전압의 리플은 (d)처럼 Iqe에 고조파 성분을 포함하는 리플을 발생하게 한다.

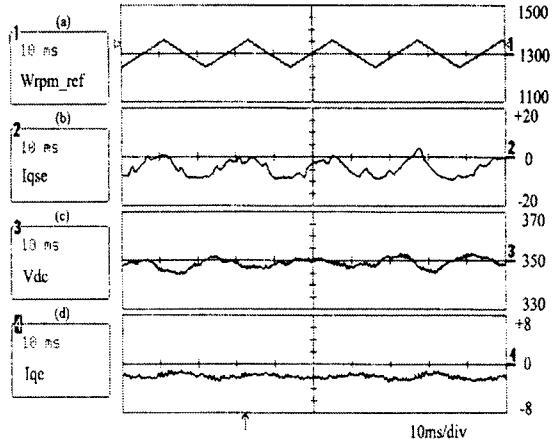


그림 6. 주기적인 리플을 갖는 발전량 변동에 따른  
직류단 전압 변화 특성

(a)발전기의 풍속패턴 (b)블레이드에 의한 토오크분 전류  
(c)직류단 전압 (d)인버터 유효전력분 전류

그림 7.은 그림 6.과 같은 조건에서 직류전압 입력단에 저역통과 필터를 사용하지 않았을 때의 직류단 전압과 인버터 유효전력분 전류 및 계통 상전류의 리플을 보여주고 있다.

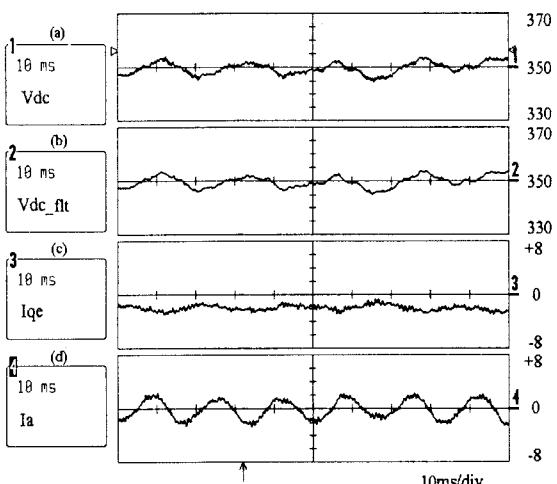


그림 7. 저역통과 필터를 사용하지 않을 때  
인버터 전압제어기 특성

(a)A/D 샘플된 직류단 전압 (b)직류단 전압  
(c)인버터 유효전력분 전류 (d)계통 상전류

그림 8.은 그림 6.과 같은 조건에서 직류전압 입력단에 저역통과 필터를 사용하였을 때의 직류단 전압과 인버터 유효전력분 전류 및 계통 상전류 파형을 보여주고 있다.

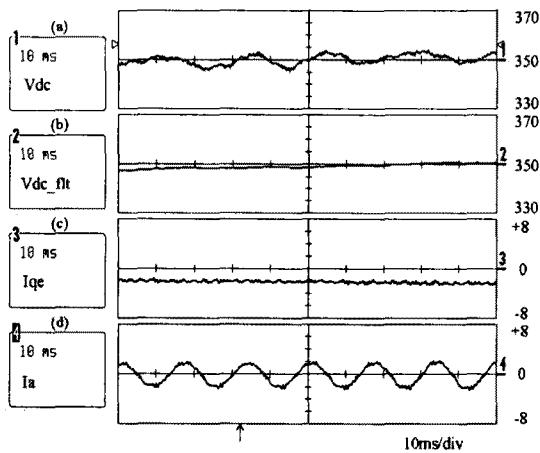


그림 8. 저역통과 필터 사용시

- (a)A/D 샘플된 직류단 전압      (b)직류단 전압  
 (c)인버터 유효전력분 전류      (d)계통 상전류

#### 4. 결 론

본 논문에서는 가변속 풍력발전시스템의 바람 변동시 회전자 블레이드의 출력 토오크 리플이 직류전압 입력으로 들어감에 따라 발생하는 인버터 출력단 리플을 직류전압 입력단에 필터를 사용함으로써 출력전류의 리플이 개선됨을 볼 수 있었다.

이와 관련하여 앞으로 풍력터빈의 여러 동작 조건에서 운전시 터빈 회전자의 리플특성을 실제 운전데이터 등을 바탕으로 조사, 분석하고 그 결과를 활용하여 넓은 운전 영역에서 더욱 개선된 출력 전력의 품질을 얻을 수 있도록 연구할 예정이다.

#### [참 고 문 헌]

- (1) Siegfried Heier, "Grid Intergration of wind Energy Conversion Systems", John wiley & Sons Ltd. 1998
- (2) 함년근, 강승우, 김용주, 한경희, 안규복, 송승호, 김동용, 노도환, 오영진, "30kW급 발전시스템의 계통연계형 인버터 개발", 2002 대한전기학회 하계학술대회 논문지, pp.990-992, 2002
- (3) 정병창, 임종연, 송승호, 김영민, 노도환, 김동용, "중·대형급 풍력발전 시스템용 에너지 변환 방식에 대한 연구", 2001 대한전기학회 춘계학술대회 논문지, pp.459-462, 2001
- (4) 정병창, 송승호, 노도환, 김동용, "풍력 터빈 모의 실험을 위한 가변 토오크 입력형 시뮬레이터", 2002 대한전기학회 논문지, pp.467-474, 2002.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제임.