

**특집 : 신재생에너지의 계통연계기술**

# 풍력발전 계통연계 기술

박 정 우

(한국전기연구원 산업전기연구단 책임연구원)

## 1. 서론

풍력발전 시스템은 블레이드와, 증속기, 발전기, 타워, 계통 보호장치, 감시 및 운용장치, 그리고 에너지 변환장치로 구성되어 있다. 블레이드를 통해 풍속이 갖는 운동에너지를 기계적인 에너지로 변환할 수 있고, 발전기를 이용하여 전압과 전류 형태를 갖는 저품질 전기 에너지로 다시 변환할 수 있다. 발전기에서 생성된 저품질의 전기에너지는 에너지변환장치라는 에너지 정제장치를 거쳐 고품질 전기로 변환할 수 있고, 계통망에 직접 연계시키는 역할과 계통 상황에 따른 협조 운전 의무도 에너지변환장치 역할이다.

이러한 배경에서 에너지변환장치에 대한 최근 기술 동향을 토폴로지 중심으로 소개하고자 한다.

## 2. 풍력발전 시스템 제어용 에너지변환장치

### 2.1 에너지변환장치 토폴로지

#### 2.1.1 권선형유도발전기를 갖는 풍력발전 시스템

권선형유도발전기를 갖는 풍력발전 시스템에 가장 많이 적용되어 있는 에너지 변환장치 토폴로지를 그림 1에 나타내었다. 국내 설치되어 있는 거의 100%에서 이와 같은 구조를 갖고 있다. 회전자 전류를 양방향으로 제어할 수 있으며 가격이 저렴한 특성을 갖고 있지만 회전자를 통해 회생되는 에너지를 회수할 수 없으며, 저풍속 조건에서 고정자측 역률이 매우 나빠지는 특성을 가지며, 고정자측 전압과 계통측 전압이 동기화된 다음 연결하지 않고 강제적으로 연결시키는 방식이어서 동기화 방식이 거칠고 비용이 많이 들어가는 방식이라는 단점

이 있다.

그림 2는 회전자측으로 회생되는 에너지를 회수하여 계통으로 전달할 수 있어서 그림 1 토폴로지 보다 15% 내외의 에너지를 더 생산할 수 있으며 캐패시터 없이도 풍속과 관계없이 역률을 임의로 제어할 수 있으며, 계통 동기화를 위해 전압

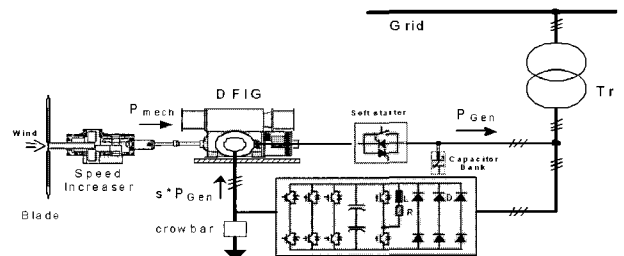


그림 1 회생에너지를 이용할 수 없는 권선형유도발전기 제어용 에너지 변환장치

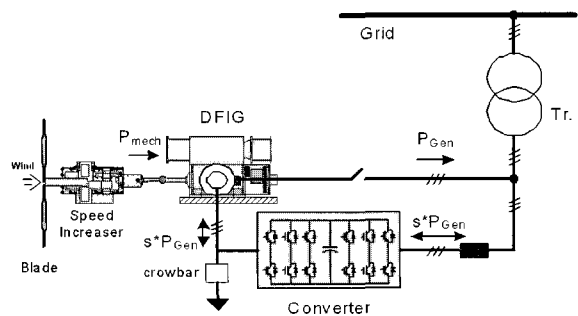
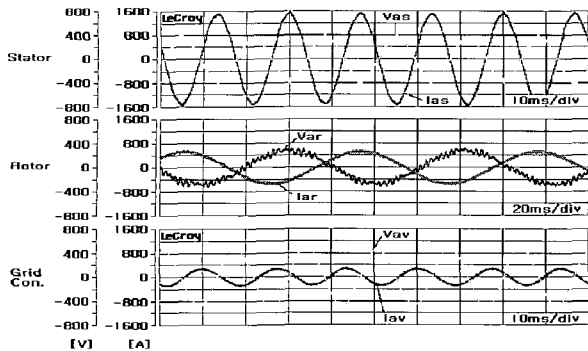


그림 2 회생 에너지를 이용할 수 없는 권선형유도발전기 제어용 에너지 변환장치



(a) 고정자 권선에서의 전압과 전류, 회전자 권선에서의 전압과 전류, 그리고 계통측 컨버터 출력단에서의 전압과 전류 제어 특성

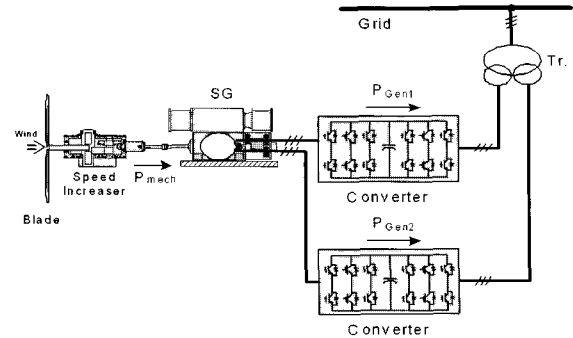
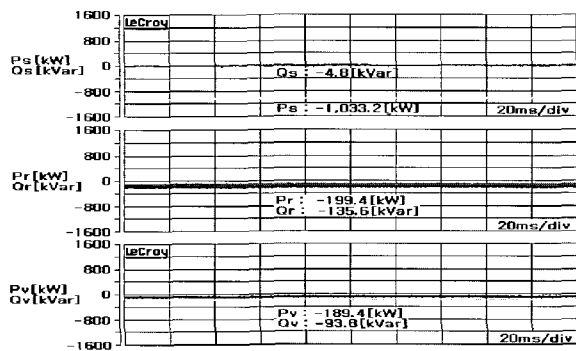


그림 5 고정자 권선을 3상 2조로 제작한 동기발전기 제어용 에너지 변환장치



(b) 고정자 권선에서의 유효전력과 무효전력, 회전자 권선에서의 유효전력과 무효전력, 그리고 계통측 컨버터에서의 유효전력과 무효전력 제어 특성

그림 3 권선형유도발전기 제어용 컨버터 제어 특성  
( $P_s^* = 1.2MW$  1.5MW DFIG, 1440 rpm)

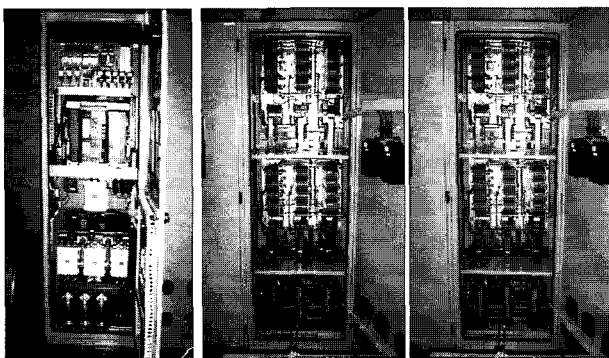
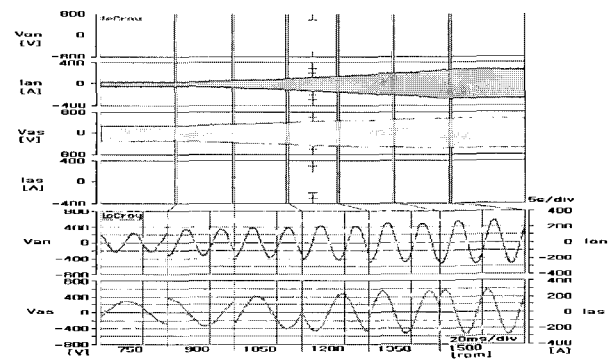
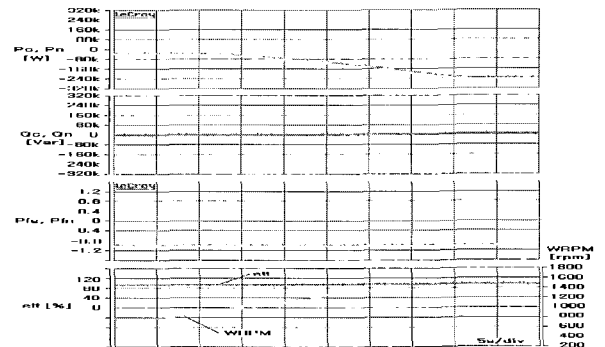


그림 4 1.5MW 권선형유도발전기 제어용 에너지변환장치 (전기연)

위상과 크기를 직접 제어한 후 연계시키므로 계통 과정에서 발생될 수 있는 돌입 전류 문제를 근본적으로 개선할 수 있는



(a) 발전기측 전류 ( $I_{as}$ ), 발전기측 전압 ( $V_{as}$ ), 계통측 전류 ( $I_{an}$ ), 그리고 계통측 전압 ( $V_{an}$ ) 제어 특성



(b) 발전기측 유효전력 ( $P_s$ ), 발전기측 무효전력 ( $Q_s$ ), 발전기측 역률 ( $pf_s$ ), 계통측 유효전력 ( $P_n$ ), 계통측 무효전력 ( $Q_n$ ), 그리고 계통측 역률 ( $pf_n$ ) 제어 특성

그림 6 동기발전기 제어용 에너지 변환장치 제어 특성  
(500kW SG, 800-1500 rpm)

토폴로지이다. 그림 2의 토폴로지를 갖는 1.5MW 권선형유도발전기 제어용 에너지변환장치 제어특성과 시제품 예를 그림 3과 그림 4에 제시하였다<sup>(1)</sup>.

### 2.1.2 동기발전기를 갖는 풍력발전 시스템

동기발전기를 갖는 풍력발전 시스템에서 가장 많이 사용하는 에너지변환장치 토폴로지를 그림 5에 나타내었다. 동기발전기를 제어하기 위한 에너지변환장치는 동기발전기에서 발전한 에너지 100%를 직접 처리해야하므로 발전기 용량과 같은 에너지변환장치 용량이 되도록 설계를 해야 하는 부담이 있다. 그런데 발전 단가를 낮추기 위하여 풍력발전 시스템에 대한 단위기 용량이 계속 증대되고 있는 현황이다. 이러한 문제를 토폴로지에서 해결하기 위하여 발전되는 에너지를 2개로 분배하고 에너지변환장치를 2개로 대응하여 병렬 운전하는 구조를 내놓게 되었다.

고정자 권선을 3상 2조로 제작한 동기발전기 제어용 에너지변환장치 토폴로지로서 그림 5를 사용하였을 때 제어 특성과 시제품 예를 그림 6에 제시하였다<sup>[2]</sup>.

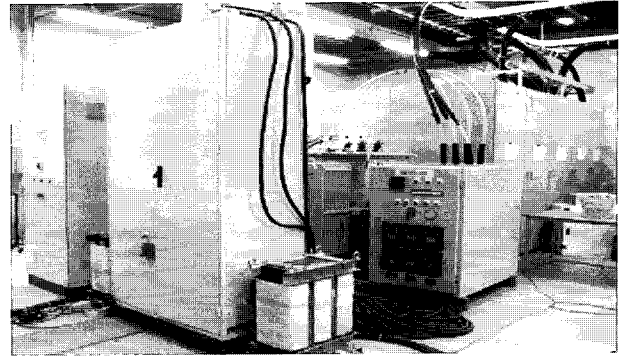


그림 7 750kW 동기발전기 제어용 에너지변환장치 시제품 (전기연)

### 2.2 에너지변환장치 태동 토폴로지

풍력발전 시스템을 제어하는 에너지변환 품질을 개선하고 사용 영역을 확대할 수 있도록 새롭게 주목받는 몇몇 토폴로지를 소개하고자 한다.

권선형유도발전기를 풍력발전 시스템은 필요조건으로 계통망이 반드시 있어야 한다는 것이었다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 보조 발전기(동기발전기)를 추가로 가지며 에너지변환장치가 초기 기동 과정에서 요구하는 에너지를 보급할 수 있도록 충전기를 추가적으로 더 갖는 권선형유도발전기 제어용 에너지변환장치 토폴로지를 그림 8에 제시하였다<sup>[3]</sup>.

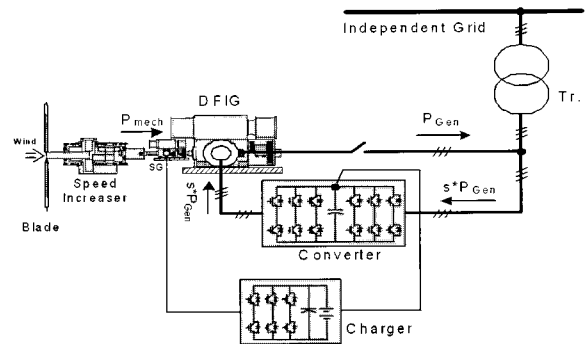


그림 8 독립 계통 환경에서 이용 가능한 권선형유도발전기 제어용 에너지 변환장치

멀티레벨 전압 신호를 생성할 수 있다면 전력품질을 개선할 수 있게 되며, 계통 전압 크기와 같도록 출력 전압 크기를 고전압으로 올릴 수 있다면 에너지변환장치를 계통에 연계하기 위하여 요구되었던 승압변압기를 제거할 수 있는 장점을 얻게 된다. 그리고 멀티레벨 컨버터에서 요구하는 복수개의 저전압 DC 전압원은 발전기 구조를 에너지변환장치의 토폴로지에 맞도록 설계함으로써 해결할 수 있다. 이에 대한 대안으로 평가할 수 있는 토폴로지를 그림 9에 제시하였다<sup>[4]</sup>.

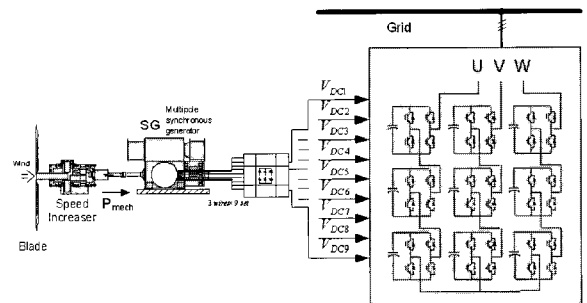


그림 9 고정자 권선을 3상 9조를 갖는 발전기 제어용 멀티레벨 에너지 변환장치

풍력발전 시스템을 통한 에너지 생산은 풍황 조건에 영향을 받게 되어 있기 때문에 단속적인 에너지 공급원이라는 한계를 갖고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 엔진발전과 복합으로 운전하여 해결하고자 하는 시도가 있어왔다. 최근에는 해안선에서 멀리 떨어진 해상풍력이 주목을 받게 되면서 에너지 수송관점에서 새로운 대안으로 주목받고 있는 것이 풍력발전과 연료전지 시스템의 복합 운영 시스템이다. 이러한 신규 시스템을 개발하기 위한 복합 구조의 에너지변환장치 구성 예를 그림 10에 나타내었다<sup>[5]</sup>.

기여너지를 생산한 후, 기존의 전력망에 공급할 수 있는 역할을 담당해야 한다. 전력망을 공유하게 되면서 전력계통 운전체제와 협조운전을 해야 하는 의무를 갖는다. 그리고 연계할 수 있는 전기 품질<sup>[6]</sup>에 대한 사양과 계통접속에 대한 규정, 그리고 계통 동기화에 대한 사양을 포함하여 풍력발전 시스템을 계통에 연계시킬 때 지켜야하는 기술기준을 표1에 나타내었다<sup>[7]</sup>.

### 2.3 계통연계 기술기준

풍력발전 시스템 내에서 에너지변환장치는 근본적으로 전

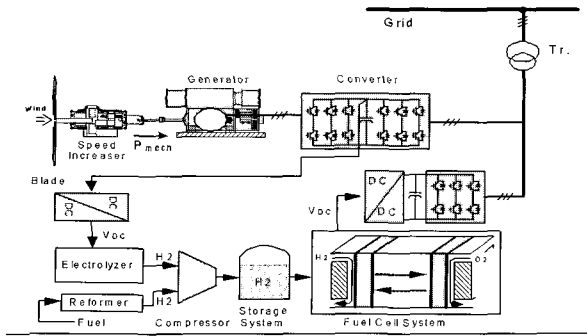


그림 10 연료전지 시스템을 갖는 풍력발전 시스템

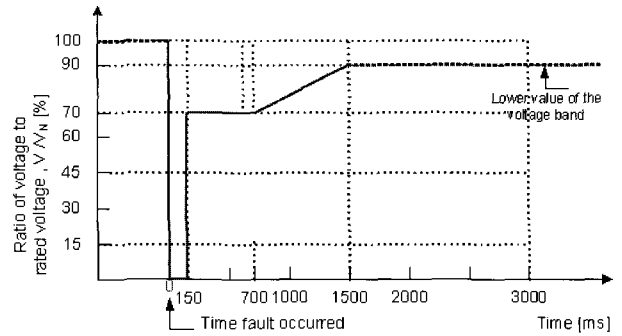


그림 11 계통 오류에 대한 전압 제한선

표 1 계통연계 기술기준(한국전력공사, 2005)

항 목		계통연계 기술 기준		
계통 접속	저압 접속	20kW 이하 : 저압배전선 20kW 초과 : 전용선 출력용량 : 100kW 이하		
	특고압 접속	3MW 이하 : 특고압 배전선 3MW 초과 : 전용선 출력용량 : 10MW 이하		
전력 품질	직류 전류	0.5 % 이내		
	역률	90% 이상 유지 (@ PCC point)		
	플리커	Epsti : 0.35 이하/단시간(10분) Eplti : 0.25 이하/장시간(2시간)		
		전압 변동	저압	상시(10분 평균값) : 3% 이내 순시(2초 이하) : 4% 이하
		특고압	상시(10분 평균값) : 2% 이내 순시(2초 이하) : 2% 이하	
전류 고조파	차수 비율 (%)	h < 11	11 ≤ h ≤ 7	17 ≤ h ≤ 23
		4.0	2.0	1.5
		23 ≤ h ≤ 35	35 ≤ h	TDD
		0.6	0.3	5.0
협조 운전	$V < V_{50\%}$		고정제거시간 ≤ 0.16s	
	$V_{50\%} \leq V \leq V_{88\%}$		고정제거시간 ≤ 2.0s	
	$V_{110\%} \leq V \leq V_{120\%}$		고정제거시간 ≤ 2.0s	
	$V \geq V_{120\%}$		고정제거시간 ≤ 0.16s	
	단독운전 방지	단독운전시 계통 분리 : 0.5s 이내		
	계통 재연결			
	차단 후 5분 후			
주입	발전용량 (kVA)	주파수 차 ( $\Delta f$ , Hz)	전압 차 ( $\Delta V$ , %)	위상각 차 ( $\Delta \phi$ , °)
	0~500	0.3	10	20
	500~1,500	0.2	5	15
	1,500~10,000	0.1	3	10

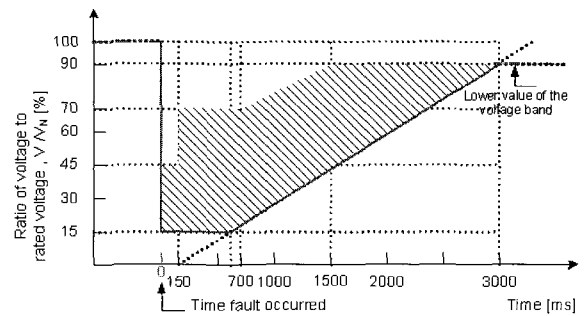


그림 12 약 계통 전압 조건에서의 Instability or Isolation 발생 억제 방안

현재에는 계통 전압이 변동되는 경우에는 에너지변환장치가 일정 시간 내에 정지하도록 하는 규정이 중심을 이루고 있지만, 신재생에너지원 용량이 계통에서 차지하는 비율이 증가하는 증가할 향후에는 계통 전압이 변동되거나 순간정전(8,그림11)이 되면 풍력발전시스템을 정지시키는데 주력하지 않고 풍력발전시스템이 적극적으로 계통전압을 안정화시킬 수 있도록 무효전력을 공급할 의무를 요구하는 경향으로 발전될 것으로 예상되고 있다(8,그림12). 그리고 재폐로 차단기(Recloser)와 구분 개폐기(Sectionalizer) 동작과 에너지변환장치가 협조 운전해야하는 구체적인 협조체계가 도입될 것으로 예상된다.

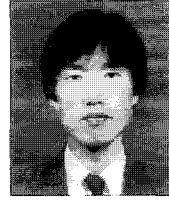
### 3. 결론

풍력발전 시스템 제어용 에너지변환장치에 대한 최근의 기술 동향을 소개하기 위하여 토폴로지에 대한 소개와 연구 개발 사례, 그리고 제어 특성 예를 제시하였다. 그리고 새로 주목받고 있는 시스템 구조와 계통연계 기술기준을 소개하였다. 이러한 기술 방향이 풍력발전 시스템에 대한 발전 방향을 미리 보는데 도움이 되었으면 한다.

참고문헌

- [1] J.W. Park, K.W. Lee, and D.W. Kim, "Control Method of a Doubly-fed Induction Generator with Automatic Grid Synchronization", IEEE IECON, pp.4254-4259, 2006.
- [2] 박정우외, "동기발전기를 갖는 풍력발전 시스템용 계통 연계형 전력변환장치", 한국풍력에너지학회, pp.402-406, 2006.
- [3] 박정우외, "Electric Power Converting Device and Power Converting Method", 미국특허출원, 2006.
- [4] J.M. Carrasco, E. Galvan, R. Portillo and L.G.Franquelo etc, "Power Electronic System for the Grid Integration of Wind Turbines", IEEE IECON, pp.4182-4188, 2006.
- [5] Kaushik Rajashekara, "Hybrid Fuel-Cell Strategies for Clean Power Generation", IEEE Trans. IA, pp.682-689, 2005.
- [6] IEEE 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, 2003.
- [7] 한국전력공사, 분산형 전원 배전계통 연계 기술기준, 2005.
- [8] E.ON Netz GmbH, Grid Code - High and extra high voltage, 2003.

〈 저 자 소 개 〉



**박정우(朴正雨)**

1963년 2월 5일생. 1986년 충남대 전자공학과 졸업. 1988년 동 대학원 졸업(석사). 2000년 경북대 전기공학과 졸업(공학박). 1988년~현재 한국 전기연구원 책임연구원.