

## 750kW 풍력발전 시스템 전력변환장치의 시험

권세진, 손윤규, 장성덕, 서재학, 오종석, 강신일\*, 황진수\*\*  
포항가속기연구소, 포항공과대학교, '(주)플라스포, "유니슨(주)

### Test results of an inverter system for 750kW gearless wind turbine

S. J. Kwon, Y. G. Son, S. D. Jang, J. H. Suh, J. S. Oh, \*S. I. Shin, \*\*J. S. Hwang.  
PAL, POSTECH, \*PLASPO, \*\*UNISUN

**Abstract** - 가변속 직접 구동형 영구자석 동기발전기와 감속기(38:1)를 2 MW의 유도전동기축에 직결로 결합하여 유도전동기의 속도제어 통하여 발전기 단자전압을 인버터의 출력으로 계통에 전력을 전송하는 시험을 전기연구원에서 수행하였다. 인버터 출력 60 Hz의 상용전원으로 계통과 연계되는 동기발전기의 정격출력은 800 kW이며, 손실분을 제외한 인버터의 정격출력은 750 kW이다. 동기발전기는 속도 9 rpm에서 발전을 시작하여 정격 속도인 25 rpm에서 정상적인 출력을 내도록 되어있다. 시험은 유도전동기 속도를 가변으로 각각의 속도에서 발전기 단자전압과 토오크를 측정하고, 정격속도에서 토오크 제어를 통한 최대전력을 측정하였다. 본 논문에서는 시험결과 분석 및 계통사고, 발전기 단락사고와 같은 급한 상황에서 전력변환 장치를 보호하기 위한 보호시스템에 대한 국내 규정에 준하는 시험에 대한 결과를 보이고자 한다.

### 1. 서 론

현재 화석연료의 사용으로 환경오염에 대한 관심이 높아지면서 국내에서도 환경오염을 줄일 수 있는 대체에너지에 대한 관심이 증가되고 있다. 따라서 각 지역의 특성에 맞는 다양한 대체에너지 개발대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 그 중에서도 풍력발전에 대한 관심이 증가하면서 새로운 기술 개발이나 풍력발전설비가 대형화되고 있는 추세이다. 이에 따라 국내여건에 적합한 한국형 750 kW급 직접구동형 풍력발전기를 개발하게 되었다. 제작된 풍력발전기는 영구자석을 이용한 동기발전기이며, 발전된 전압을 계통으로 연계하기 위하여 인버터-컨버터 전력변환기를 사용하여야 한다. 이러한 목적에 따라 개발된 750 kW급 전력변환장치인 인버터 모듈의 시험을 동기발전기와 연결하여 전기연구원에서 시험하였다.

바람이 가지는 에너지를 기계적으로 변환하여주는 블레이드를 실험설비에서 전동기가 대신하여 속도를 제어함으로서 가변속의 발전단자전압을 인버터에 입력하게 되고, 인버터의 출력 전압을 계통으로 연계하여 하는 시험을 하였다. 풍력발전기 시스템의 경우는 한번 설치되면 오랜 시간동안 고장 없이 운전되어야 하는 높은 신뢰성이 요구된다. 본 논문에서는 설계된 값과 실제 시험결과로부터 설계인자들에 대한 검증과 전력설비가 갖추어야 할 조건 및 보호회로에 대한 특성시험 결과를 살펴보자 한다.

### 2. 풍력발전 시스템

풍력발전 시스템은 블레이드의 제어방법, 기어의 유무, 회전자 축의 속도, 사용 발전기의 종류, 그리고 세동의 연계방법에 따라 여러 가지로 구분할 수 있다. 회전자 축의 속도에 따라 분류하면, 정속운전과 가변속 운전

으로 나눌 수 있다.

정속운전을 하는 풍력발전 시스템은 구조가 간단하게 되어 제작비가 낮아지고, 계통과의 동기를 위한 별도의 장비를 필요로 하지 않아 제어가 간단하다. 그러나 일반적으로 유도기를 계통에 직접 연결하기 때문에 유동성 무효전력이 계통에 공급된다. 이 무효전력을 보상하기 위해서 별도의 보상용 컨덴서가 필요하고 전기적으로는 발전기 출력을 제어할 수 없는 단점이 있다. 또한 돌풍 등의 순간적인 입력 토오크의 변화에 따른 제어가 어렵기 때문에 출력이 급격하게 변화되는 현상이 나타난다. 가변속 운전은 돌풍이나 기타의 조건에 의한 급격한 토오크 변화를 회전자 속도 변화로 변환시켜 흡수할 수 있다는 장점이 있으며, 정격보다 낮은 속도에서도 운전이 가능하기 때문에 약한 바람에서도 발전을 할 수 있다. 그리고 인버터-컨버터를 사용하여 발전기와 계통을 연계하기 때문에 계통으로 공급되는 전력의 역률을 제어할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 인버터-컨버터의 사용으로 제작에 더 많은 비용이 소요되고, 발전기 출력과 계통과의 동기를 위해서 별도의 제어회로나 컨버터가 필요하다.<sup>[1]</sup>

#### 2.1 영구자석형 동기발전기

동기발전기의 출력전압은 회전자 블레이드의 회전속도에 비례한다. 그러나 풍속과 회전속도에 따라 블레이드의 에너지 변환효율이 다르기 때문에 발전에너지자를 최대로 하기 위해서는 풍속에 따른 블레이드의 회전속도를 제어할 필요성이 있다. 영구자석 동기기를 발전기로 사용하는 풍력발전 시스템은 2대의 전력변환 장치가 사용된다. 동기기의 출력 전압 및 주파수는 회전속도에 비례하는 특징을 가지기 때문에 가변 전압/주파수의 발전기 출력을 일정 전압/주파수로 변환되어야 한다. 2대의 전력변환 장치의 사용으로 발전 전력손실이 발생한다. 이 손실은 대략 발전기 단자에서 출력되는 전력의 3 % 정도가 되는 것으로 알려져 있다.<sup>[2]</sup> 동기 발전기는 전 범위 가변 속도제어가 가능하다. 것과 발전기 축에 설치되어있는 컨버터에 의하여 전 범위 운전이 가능하다는 이점이 있지만 시스템 효율과 보호를 위한 하드웨어적 제약 때문에 일반적으로 발전기 정격속도의 50~120% 범위에서 운전된다. 가변 속도제어가 가능하므로 돌풍과 같은 순간적인 입력증가에 따른 회전속도의 증가를 흡수하여 안정적인 시스템의 출력을 얻을 수 있다. 또한 동기 발전기는 발전 출력에 포함된 인버터의 가변주파수로 인해 계통에 고조파가 유입된다. 이러한 고조파 제거를 위해 인더터와 커페시터를 조합한 전력용 필터를 구현하여 사용한다. 인더터는 인버터 정격출력의 10~15%로 설계하고 커페시터는 시스템과 계통의 상태에 따라 그 값이 달라진다. 몇몇의 경우는 커페시터를 생략하기도 한다. 동기 발전기는 다른 시스템에 비하여 효율이 높고 영구자석 동기기를 사용하기 때문에 발전기의 여자를 위 한 별도의 전력을 공급하지 않아도 된다.

## 2.2 인버터 - 컨버터

750 kW 직접구동형 영구자석 동기발전기는 2대의 전력변환장치가 사용된다. 표 1에 나타낸 바와 같이 저속의 가변속 동기발전기 용량은 800 kW이며, 인버터의 출력용량은 750 kW이다. 발전기 자체 효율은 95% 이상, 단자전압은 690 V이다.<sup>[3]</sup>

표 1. 동기발전기의 사양

Parameters/Feature	Value
Driving torque, kNm	324.5
Nominal rated speed, rpm	25
Number of conductors per slot	20
Ampere turns in a slot, A	2818 (peak)
Connection of pole pairs	14 pole pairs in series
Load voltage VL (NU,NW,NV), V <sub>rms</sub>	450.3
Load voltage line to line, V <sub>rms</sub>	779.9
Electrical power at In, kW	807.6
Stator current density, A/mm <sup>2</sup> V <sub>rms</sub>	3.323
Open loop phase voltage, V <sub>rms</sub>	475.8
Open loop voltage(line to line), V <sub>rms</sub>	824.1
Ohmic resistance/phase/serial unit, m	88.2
Phase inductance, mH / synchronous inductance, mH	6.30 / 7.84
Stator frequency, Hz	17.5
Efficiency, %	94.5 ~ 95.6
Nominal phase current, A <sub>rms</sub>	597.9

인버터-컨버터시스템은 H-bridge 방식의 3상 회로로 구성되며, 발전기출력은 저주파수 전압으로 컨버터에서 2 kHz의 스위칭으로 커페시터에 직류로 에너지를 저장하게 된다. 설계된 가변속 동기발전기의 인버터-컨버터 사양은 표 2과 같다.

표 2. 인버터-컨버터의 사양

Parameter	Value
Converter	
Input voltage, VAC <sub>rms</sub>	690
Power rated, kW	800
Input frequency, Hz	0 ~ 40, 3φ
Output voltage, V <sub>rms</sub>	690
Inverter	
Output power, kW	750
Output frequency, Hz	60
Modulation	Space vector PWM
Protections	OV, OC, UV, OT, etc
Cooling	Forced water cooling

## 3. 시험 항목

제작된 750 kW 가변속 동기발전기에 대한 시험은 발전기와 더미부하 저항을 연결한 단독 출력시험과 발전기를 인버터 결합하여 출력을 계통으로 연계하는 전력시험으로 구분된다. 발전기 단독시험은 유도전동기축과 직결된 감속기(38 : 1)축에 시험용 발전기를 연결하여 전동기의 회전속도를 제어함으로서 발전기 단자에서 생성되는 전압을 조정하고, 출력 단에 부하저항을 연결하여 전력을 소비하는 방법이다. 이때 발전기 단자 전압과 전류파형을 관측하여 발전기 설계에 대한 평가를 실시하였다. 그리고 발전기와 인버터를 결합하여 그 출력을 계통으로 연계하는 전력시험은 컨버터를 동작시켜 커페시터에 직류전압을 충전하고, 인버터를 동작시켜 상용주파수의 전압을 다시 계통으로 환원하는 시험과 토오크 값을 조정하여 계통으로 출력되는 전력을 상승시키는 시험으로 구분된다. 또한, 발전기출력이 인버터에 의해 계통으로 출력되는 상태에서 계전기나 차단기를 개방하였을 때, 인버터-컨버터가 이상부하로부터 인버터 자신을 보

호하는 시험도 실시하였다. 인버터 보호회로 기능시험으로는 과전류 보호기능, 과전압 보호기능, 부족전압 검출기능 등을 수행하였다. 그 외의 시험으로는 내전압시험, 절연저항 측정시험, 전류 THD측정, 온도상승시험, 재시동 및 운전 내구성시험, 시스템 효율측정을 진행하였다. 풍속 변화에 따라 전동기의 속도를 변화시켜 발전기 단자에서 출력되는 전압을 달리하는 발전기 운전패턴시험을 통해 토오크제어 기능시험을 하였다. 발전기가 장시간 운전되면서 스위칭 손실에 의한 열 손실을 측정하고, 설계된 냉각능력과 시험에서 측정된 값을 비교 분석하였다. 그리고 부하단락시험과 개방시험, 진동시험, 임펄스 전압 인가시험 등을 실시하였다.<sup>[4][5]</sup>

## 3.1 인버터 시험회로

풍력발전 시스템의 회전자 블레이드 역할을 수행하는 대형 유도전동기 속도제어를 통해 가변속 운전을 실시하였다. 고압의 전원을 사용하여 대형 유도전동기를 기동하는데 필요한 전원을 만들었으며, 이 전원은 다시 유도전동기의 속도를 제어하는 인버터의 전원으로 입력된다. 이 인버터의 출력은 유도전동기로 입력이 되어 속도를 제어하도록 되어있다. 유도전동기 축과 직렬로 38 : 1의 감속기를 연결하고 감속기 출력축에 발전기의 회전부가 연결이 되어있다.

발전기의 출력은 컨버터의 PWM 스위칭에 의해 직류전원으로 변환되어 에너지 저장용 캐패시터에 저장하고, 인버터의 PWM 스위칭 동작으로 변압기와 직렬로 연결된 인터터를 통해 상용 전압으로 만들어져 계통에 연결되는 변압기의 일차측으로 입력된다. 변압기의 이차측에서 승압된 전압은 계통의 배전전압으로 변환되어 전송된다. 역으로 인터터를 통한 발전기에 전원을 투입하는 모터링 시험에서는 전압과 전류 측정값으로부터 발전기 인자(각 상의 인덕턴스와 저항값)와 발전기의 관성을 확인하였다. 그럼 1은 시험을 위한 실험 설비이며, 그럼 2는 전기적인 구성을 나타내었다.

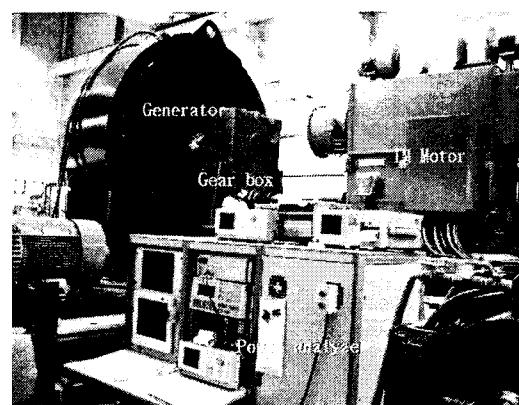


그림 1. 발전기 시험 지그(전기연구원)

## 3.2 전력 시험

가변속 풍력발전기의 인버터는 정격속도 이하의 저속에서 가능한 한 최대의 전력을 생산하도록 제어하는 것이 궁극적인 목적이다. 또한 장시간 가혹한 환경에서 높은 신뢰성의 안정적인 운전이 되어야 하며, 단락사고나 혼촉 사고로부터 시스템을 보호하여야 한다. 제작된 발전기가 정격속도에서 출력 전압과 전류치가 설계 값과 일치하는지를 비교하고, 전력변환 장치인 인버터의 제어 알고리즘, 토크제어, 냉각시스템에 대한 평가를 수행하였다.

### 3.2.1 온도상승과 냉각시스템

전력을 변환하는 장치인 인버터와 컨버터의 효율이

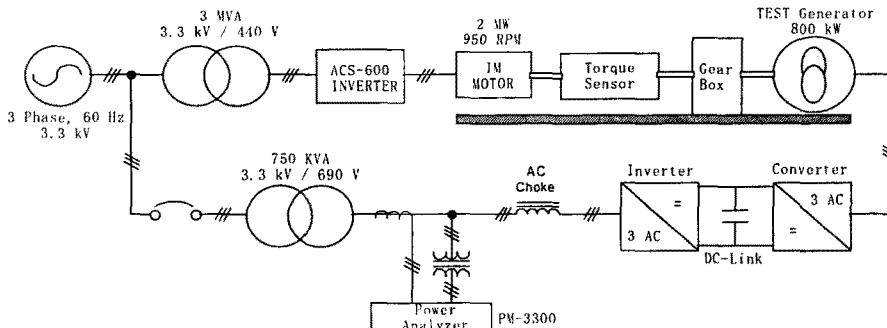


그림 2. 인버터 시험을 위한 전기적 구성도

95% 이상을 유지하다면 출력으로 변환되지 않은 전력은 인버터와 컨버터를 구성하는 스위칭 소자의 스위칭 손실분에 해당된다. 실제로 이 값은 수십 킬로와트 정도이며 장시간 운전을 할 때에는 냉각을 필요로 한다. 이를 위해 본 시스템에서 사용한 냉각장치의 설계사양과 실험결과를 살펴보면 표 3과 같다. 정격운전 조건에서 12개 소자로 구성된 인버터와 컨버터부의 전력손실량은 총 33.6 kW이며, 강제 수냉방식에 의한 입출수의 온도 차는 최대 2.0°C이고, 방열판 온도는 66°C이다. 그럼 3은 실험결과로부터 구해진 스위칭 소자의 전력손실을 설계치와 비교하여 보여주고 있다. 초기 설계조건과 시험 후 측정된 전력을 비교해 본 결과 양호한 결과를 얻었다.

표 3. 냉각시스템의 시험 결과

	Total switch loss [kW]	Heatsink temp. [°C]	Ambient temp. [°C]	Water temp. ΔT [°C]	Water flow [l/m]	Rth-hw [°C/kW]
설계값	38.4	74	40	2.5	240	4.2
실험값	33.6	66.0	40	2.0	220	4.4

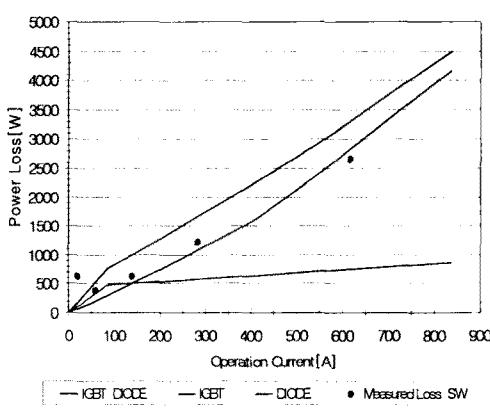


그림 3. 스위칭 손실에 대한 시험 결과

### 3.2.2 풍력발전기의 운전패턴 시험

풍력발전기는 회전자 블레이드의 회전속도에 의해서 출력이 결정된다. 풍속이 일정하면 발전되는 전력의 양도 일정하게 되고, 풍속이 변하면 출력도 따라서 변하게 된다. 발전출력을 일정하게 하기 위해서는 토크제어나 블레이드의 피치제어를 통하여 풍속에 관계없이 일정한 출력이 되도록 제어하는 것이 중요하다. 시험에서 실제 상황과 같은 회전자 블레이드 특성을 유도 전동기의 노오크를 제어함으로서 구현하였다. 이러한 조건에서 유도 전동기의 회전수에 따른 발전기 단자전압의 변화를 인버

터가 인식하고 부하인 계통에 전력을 공급하는 운전패턴 시험을 실시하였다. 발전이 가능한 최저 회전속도인 9 rpm에서 정격 속도인 25 rpm까지 단계적으로 속도를 가변하면서 시험한 결과는 그림 4와 같다.

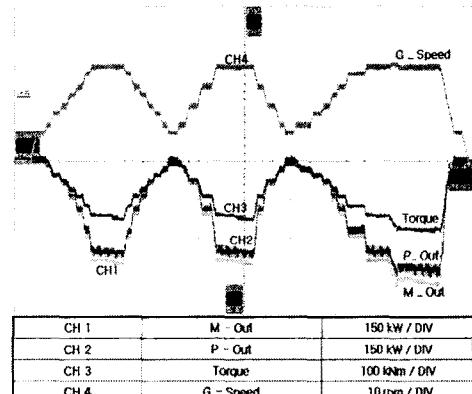


그림 4. 인버터 운전 패턴 시험 결과

그림 5는 그림 4의 결과를 발전기 속도와 토크 값의 관계를 표시한 것이다. 발전기 속도에 대한 토크제어는 크게 3가지 제어영역으로 구분할 수 있다.

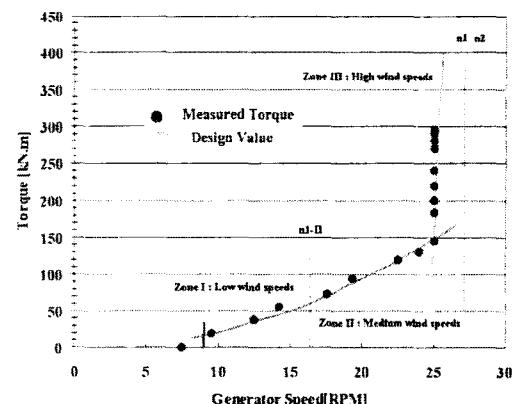


그림 5. 제어기의 제어영역별 시험결과

영역 I : 저풍속에서 발전기의 속도가 세어되는 영역 (회전자 속도: 9 ~ 17 rpm). 최적모드의 노오크 이득보

다 높은 토오크를 발전기가 요구하는 경우 토오크는 이 값에서 제한 된다. 만약 회전자 블레이드의 속도가 17 rpm 보다 크게 되면 제어기는 영역 I에서 영역 II로 바뀌게 된다.

영역 II : 중간풍속에서 발전기의 속도가 제어되는 영역(회전자 기준속도: 25 rpm). 최적모드의 토오크 이득보다 낮은 토오크를 발전기가 요구하는 경우, 토오크는 이 값에 제한된다. 회전자 블레이드 속도가 17 rpm 보다 낮게 되면 제어기는 영역 II에서 영역 I로 바뀌게 되며, 회전자 블레이드 속도가 더 높아지면, 영역 II에서 영역 III으로 바뀌게 된다.

영역 III : 고풍속 영역(회전자 기준속도: 25 rpm)으로 발전기 토오크는 이 영역에서 연속적으로 정격전력을 생산하도록 제어된다. 최대 토오크는 정격 토오크의 110% 이하로 제한된다. 만약 이 영역에서 페치각이  $0^\circ$  가 되면 제어기는 영역 II로 바뀌게 된다.

발전기와 연결된 인버터 시험에서 속도를 가변시켜 외부에 연결된 토오크 메타에서 토오크를 측정하였으며, 발전기와 저항기를 접소한 시험에서 측정된 토오크 값은 동일한 154 kNm인 것을 확인하였다. 측정된 값으로부터 발전기의 효율과 인버터의 효율을 다음 계산식을 이용하여 계산해 보았다.

$$\eta_{inverter} = \frac{P_{inverter}}{P_{generator}} \times 100$$

발전기의 속도 25 rpm, 토오크 154 kNm의 조건에서 인버터 단독 효율과 발전기의 효율은 각각 94.3%와 90.8%로 계산되었다. 발전기의 효율에는 유도 전동기와 발전기 사이에 접속된 감속기의 효율이 포함된 결과이다.

#### 4. 결 론

국내 순수기술로 설계 및 제작된 한국형 750kW 직접 구동형 영구자석 동기발전기의 시험을 전기연구원에서 실시하였다. 이 실험에서 발전기의 효율은 90.8%, 인버터의 효율은 94.3%의 결과를 얻었다. 또한 낮은 풍속에서도 최적의 조건을 찾아 토오크 제어를 수행함으로써 최대 전력을 제어하는 조건을 구현하였다. 풍력 발전설비는 오랜 시간동안 고장이 없어야 하고 극한 상황에서도 발전기와 인버터를 보호할 수 있는 제어기술이 요구된다. 이 실험의 결과를 토대로 앞으로의 실증과정을 통해 이러한 연구개발을 수행할 것이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 정병창, 임종연, 송승호, 김영민, 노도환, 김동영, “중·대형 급 풍력발전 시스템용 에너지 변환 방식에 대한 연구”, 대한전기학회 춘계학술대회, 2001
- [2] 영구자석형 가변속 풍력발전기의 최대출력제어 알고리즘 개발, KBP-750D 중간보고서, 2003
- [3] 750kW급 Gearless형 풍력발전기 개발, 중간 연구결과, 2003
- [4] 손윤규, 서재학, 권세진, 장성덕, 오종석, 황진수, 장신일, 박가우, 권오정, 정진화, 한경섭, 전중환, “750 kW gearless 풍력발전기 인버터 시험”, 한국신재생에너지학회 춘계학술대회, 2005
- [5] 권세진, 손윤규, 서재학, 이월우, 장성덕, 오종석, 황진수, 강신일, 권오정, 정진화, 한경섭, 전중환, “750-kW 풍력발전기 개발을 위한 모의시험 장치의 시험”, 한국신재생에너지학회 춘계학술대회, 2005