

750 kW gearless 풍력발전기 인버터 시험

손 윤규¹⁾, 서 재학²⁾, 권 세진³⁾, 장 성덕⁴⁾, 오 종석⁵⁾, 황 진수⁶⁾, 강 신일⁷⁾, 박 가우⁸⁾,
권 오정⁹⁾, 정 진화¹⁰⁾, 한 경섭¹¹⁾, 전 증환¹²⁾

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

Yoongyu Son, Jaehak Suh, Seijin Kwon, Sungduck Jang, Jongseok Oh, Jinsu Hwang, Sinil Kang,
Gawoo Park, Ojung Kwon, Chinhwa Chung, Kyungseop Han, Chunghwan Chun

Key words : Gearless(기어 없는), wind power inverter(풍력인버터), power conversion(전력변환)

Abstract : The 800-kW PM (permanent magnet) synchronous generator is developed as a wind power generator. The matching converter is designed to control the torque and power depending on the wind speed regime. The generator starts to generate the power at the speed of 9 rpm and the rated output is generated at the speed of 25 rpm. The rated output power of an inverter is 750 kW when the PM synchronous generator is delivering 800 kW to the inverter. The inverter is specially designed to perform the maximum power point tracking (MPPT) at the low wind speed regime that is typical wind environment in Korea. The inverter test was done with a 2 MW M-G system at KERI (Korea Electric Research Institute). The M-G set has a 2 MW motor driver and a 38:1 gear to match the speed between the motor and the PM generator. The torque simulating the wind is applied to the PM generator by a DC motor. The test results show the inverter efficiency of 94.3% at the rated power generating condition. The measured values show that the MPPT algorithm is working well. Overall reliability will be verified through the long-term site test.

Nomenclature

ω_n : nominal rotor speed, rad/s
 $\eta_{\text{인버터}}$: inverter efficiency
 $P_{\text{발전기}}$: generator power
 $P_{\text{인버터}}$: inverter power

subscript

THD : total harmonic distortion
PWM : pulse width modulation
NU, NV, NW : neutral - (u, v, w) phase,

전에 대한 관심이 증가하면서 새로운 기술 개발이나 풍력발전설비가 대형화되고 있는 추세이다. 이에 따라 국내여건에 적합한 750 kW급의 gearless type의 가변속의 저속 동기발전기를 개발하게 되었다. 제작된 발전기는 영구자석을 이용한 동기발전기이며, 발전된 전압을 계통에 연계하기 위해서는 인버터-컨버터 전력변환기를 사용하여야 한다. 이러한 목적에 따라 개발된 750 kW급 전력변환장치인 인버터 모듈의 시험을 동기발전기와 연결하여 전기연구원에서 시험하였다. 바람이 가지는 에너지를 기계적으로 변환하여

1. 서론

화석연료의 사용으로 환경오염에 대한 관심이 높아지면서 국내에서도 대체에너지에 대한 관심이 증가하고 있다. 따라서 각 지역마다 자연환경이나 주변 여건에 맞는 다양한 대체에너지 개발 방법을 연구하고 있다. 특히 그 중에서도 풍력발

1) 책임 저자의 소속 2-5, 10-12, 포함가속기연구소

E-mail : ygson@postech.ac.kr
Tel : (054)279-1148 Fax : (054)279-1199

2) 저자6의 소속 유니슨(주)

E-mail : jshwang@unison.co.kr
Tel : (041)620-3462 Fax : (041)552-7416

3) 저자7 - 9의 소속 (주)플라스포

E-mail : flap45@plaspco.co.kr
Tel : (031)909-8077 Fax : (031)909-8079

주는 블레이드를 실험설비에서 전동기가 대신하여 속도를 제어함으로써 가변속의 발전단자전압을 인버터에 입력하게 되고, 인버터의 출력 전압을 계통으로 연계하여 하는 시험을 하였다. 풍력발전기 시스템의 경우는 한번 설치되면 오랜 시간동안 고장 없이 운전되어야 하며 신뢰성이 확보되어야 한다. 본 논문에서는 설계된 값과 실제 시험결과로부터 설계파라메타를 검증하고, 전력설비가 갖추어야 할 조건과 보호회로에 대한 특성시험을 살펴보고자 한다.

2. 풍력발전기 시스템

풍력발전시스템은 블레이드 제어방법, 기어의 유무, 회전자 축의 속도, 사용 발전기의 종류, 그리고 계통연결방법에 따라 여러 가지로 구분할 수 있다. 회전자 축의 속도에 따라 분류하면, 정속운전과 가변속 운전으로 나눌 수 있다.

정속으로 운전되는 발전시스템은 구조가 간단하게 되어 제작비가 낮아지고, 계통과의 동기를 위한 별도의 장비를 필요로 하지 않으며 제어 간단하게 된다. 그러나 일반적으로 유동성을 계통에 직접 연결하기 때문에 유동성 무효전력이 계통에 공급된다. 이 무효전력을 보상하기 위해서 별도의 보상용 콘덴서가 필요하고 전기적으로는 발전기의 출력을 제어할 수 없는 단점이 있다. 또 돌풍 등 순간적인 입력토크의 변화에 따른 제어가 어렵기 때문에 순간적으로 출력이 급하게 변화되는 현상을 볼 수 있다.

가변속 운전은 돌풍이나 기타의 조건에 의한 급격한 토크변화를 회전자 속도 변화로 변환시켜 흡수할 수 있다는 장점이 있다. 또 정격보다 낮은 속도에서도 운전이 가능하기 때문에 약한 바람에서도 발전을 할 수 있다. 그리고 인버터-컨버터를 사용하여 발전기와 계통을 연결하기 때문에 계통으로 공급되는 전력의 역률을 제어할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 인버터-컨버터를 사용하기 때문에 제작에 더 많은 비용이 소요되고, 발전기 출력과 계통과의 동기를 위해서 별도의 제어회로나 컨버터가 필요하다.⁽¹⁾ 표 1은 정속과 가변속 풍력발전기의 특징을 비교한 것이다.

Table 1. Comparison of wind turbines

	정속도 Fixed speed	가변속 Variable speed
Gear	있다.	없다. 직결한다.
속도제어	Stall regulated	Pitch control
발전기 타입	유도, 동기발전기	동기, 영구자석형
발전기 극수	2극, 6극	다극

2.1 동기 발전기

2.1.1 영구자석형 발전기

동기발전기의 출력전압은 회전속도에 비례한다. 그러나 풍속과 회전속도에 따라서 블레이드의 에너지 변환효율이 다르기 때문에 발전에너지를 최대로 하기 위해서는 풍속에 따라서 블레이드의 회전속도를 제어해야 한다. 영구자석 동기기를 발전기로 사용하는 풍력발전 시스템은 2대의 전력변환 장치를 사용하여야 한다. 동기기

의 출력 전압과 주파수는 회전속도에 비례하는 특징을 갖기 때문에 가변 전압/가변 주파수의 발전기 출력을 일정 전압, 일정 주파수로 변환하여야 한다. 그러나 2대의 전력변환 장치를 사용하기 때문에 발전 전력손실이 발생하여 손실은 대략 발전기 단자에서 출력되는 전력의 3% 정도가 되는 것으로 알려져 있다.⁽²⁾ 전범위 속도 가변제어가 가능하다는 이점과 발전기 측에 설치되어있는 컨버터에 의하여 전 범위 운전이 가능하지만 시스템 효율과 보호 하드웨어적인 제약 때문에 일반적으로 발전기 정격속도의 50~120% 범위에서 운전한다. 가변속도 제어가 가능하기 때문에 돌풍과 같이 순간적인 입력증가와 회전속도의 증가를 흡수하여 시스템의 출력이 안정적으로 된다. 발전 출력에 포함된 인버터의 가변주파수로 인해 계통에 고조파가 유입된다. 고조파 제거를 위해서 인덕터와 커패시터를 조합하여 전력용 필터를 구현하여 사용하게 된다. 인덕터는 인버터 정격 출력의 10~15%로 설계하고 커패시터는 시스템과 계통의 상태에 따라서 값이 달라진다. 몇몇의 경우는 커패시터를 생략하기도 한다. 다른 시스템에 비하여 효율이 높고 영구자석 동기기를 사용하기 때문에 발전기의 여자를 위한 별도의 전력을 공급하지 않아도 된다.

Table 2. Specification of an synchronous generator

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

2.2 인버터 - 컨버터

2.2.1 인버터 사양

750 kW gearless 영구자석형 동기발전기는 2대의 전력변환장치가 사용된다. 저속의 가변속 동기발전기의 용량은 800 kW이며(표 2) 인버터의 출력용량은 750 kW이다. 발전기 자체 효율은 95% 이상이며 단자전압은 690 V이다. 인버터-컨버터 시스템은 H-bridge 방식의 3상 회로로 구성되며 발전기출력은 저주파수 전압으로 컨버터에서 2 kHz의 스위칭으로 커패시터에 직류로 에너지를 저장하게 된다. 설계된 가변속 동기발전기의 인버터-컨버터 사양은 표 3과 같다.

Table 3. Specification of an inverter - converter

Parameter	value
■ Converter side	
Input voltage	690 V _{AC,RMS}
Power rated	800 kW
Input frequency	0 ~ 40 Hz, 3 Φ
Output voltage	690 V _{RMS}
■ Inverter side	
Output power	750 kW
Output frequency	60 Hz
Modulation	Space vector PWM
Protection	OV, OC, UV, etc.
Cooling	Water cooling

3. 시험 항목

제작된 750 kW 가변속 동기발전기의 시험은 발전기와 더미부하 저항을 연결한 단독 출력시험과 발전기와 인버터 결합하여 출력을 계통으로 연계하는 전력시험으로 구분된다. 발전기 단독시험이라 함은 유도전동기축과 직결된 감속기(38 : 1)축에 시험용 발전기를 부착하고 전동기의 회전속도를 제어함으로써 발전기 단자에서 생성되는 전압을 조정하고 이때 출력 단에 부하저항을 연결하여 전력을 소비하는 방식이다. 이 때 발전기 단자 전압과 전류파형을 관측하여 발전기 설계에 대한 평가를 실시하였다. 발전기와 인버터를 결합하여 그 출력을 계통으로 연계하는 전력시험은 컨버터를 동작시켜 커패시터에 직류전압을 충전하고, 인버터를 동작시켜 상용주파수의 전압을 다시 계통으로 환원하는 시험과 토크 값을 조정하여 계통으로 출력되는 전력을 상승시키는 시험으로 구분된다. 또한, 발전기출력이 인버터에 의해 계통으로 출력되는 상태에서 계전기나 차단기를 개방하였을 때 인버터-컨버터가 이상부하로부터 인버터 자신을 보호하는 시험도 실시하였다. 인버터 보호회로 기능시험으로는 과전류보호기능, 과전압보호기능, 부족전압 검출기능 등을 수행하였다. 그 외의 시험으로는 내전압시험, 절연저항측정시험, 전류 THD측정, 온도상승시험, 재

시동 및 운전내구성시험, 시스템 효율측정을 진행하였다. 풍량의 변화에 따라서 전동기의 속도를 변화시켜 발전기 단자에서 출력되는 전압을 달리하는 발전기 운전패턴시험을 통해 토크제어 기능시험을 하였다. 발전기가 장시간 운전하면서 스위칭 손실에 의한 열 손실을 측정하고, 설계된 냉각능력과 시험에서 측정된 값을 비교 분석하였다. 그리고 부하단락시험과 개방시험, 온도상승 시험, 진동시험, 임펄스 전압인가시험 등을 실시하였다.

3.1 인버터 시험회로

대형설비가 설치되어있는 전기연구원에서 대용량의 750 kW gearless 풍력발전기 실험을 실시하였다. 바람의 기계적인 에너지를 변환시켜주는 블레이드의 역할을 수행하는 대형 유도전동기의 속도제어를 통해 가변속을 만들었다. 고압의 전원을 사용하여 대형의 유도전동기를 기동하는데 필요한 전원을 만들었으며 이 전원은 다시 유도전동기의 속도를 제어하는 인버터전원으로 입력된다. 이 인버터의 출력은 유도전동기로 입력되어 속도를 제어하도록 되어있다. 유도전동기의 기계적인 축과 직렬로 38 : 1의 감속기로 연결되고 감속기 출력축에 발전기의 회전부가 연결되어있다.

컨버터로 입력된 발전기 출력은 컨버터의 PWM 스위칭에 의해 직류전원으로 변환된 전압은 에너지 저장용 커패시터에 저장하게 되고, 인버터의 PWM 스위칭 동작으로 변압기와 직렬로 연결된 인덕터를 통해 상용 전압으로 만들어져 계통에 연결되는 변압기의 일차 측으로 입력한다. 변압기의 이차 측에서 송입된 전압은 계통의 배전전압으로 변환되어 전송된다. 발전기에 인버터를 연결하고 역으로 발전기에 전원을 투입하는 모터링 시험에서는 전압과 전류 측정값으로부터 발전기 인자(자 상의 인덕턴스와 저항 값)와 발전기의 관성을 확인하였다. 시험을 위한 전기적인 구성은 그림 1과 같고, 그림 2는 실험설비의 전경이다.

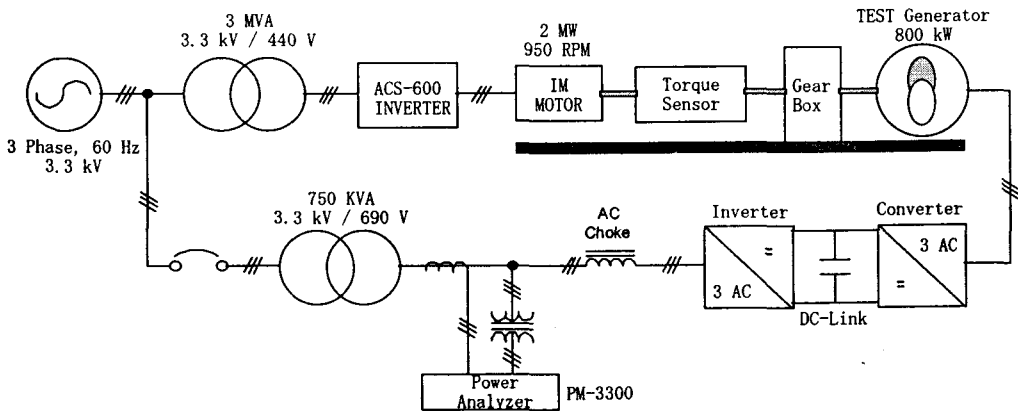


Fig. 1. Electrical circuits diagram of an inverter test system.

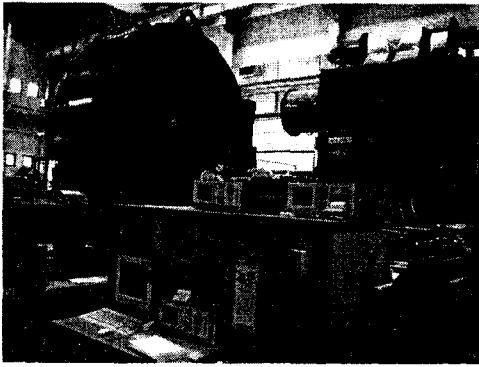


Fig. 2. Generator test jig(KERI).

3.2 전력시험

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

3.2.1 온도상승과 냉각시스템

전력을 변환하는 장치인 인버터와 컨버터의 효율이 95% 이상을 유지한다면 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 4와 같다. 정격운전 조건에서 12개 소자로 구성된 인버터와 컨버터부의 전력손실량은 총 33.6 kW이며, 강제 수냉방식에 의한 입출수의 온도차는 최대 2.0°C이고, 방열판 온도는 66°C가 된다. 그림 3은 실험결과로부터 구해진 스위칭 소자의 전력손실을 설계치와 비교하여 보여주고 있다. 초기 설계조건보다 발전기 출력전압이 더 높아서 같은 출력조건에서 손실량이 줄어들었다.

Table 4. Test results of an cooling system

	Total Switch Loss [kW]	Heatsink Temp. [°C]	Ambient Temp [°C]	Water dT [°C]	Water Flow [l/min]	Rth-hw [°C/kW]
설계치	38.4	74	40	2.5	240	4.2
실험치	33.6	66.0	40	2.0	220	4.4

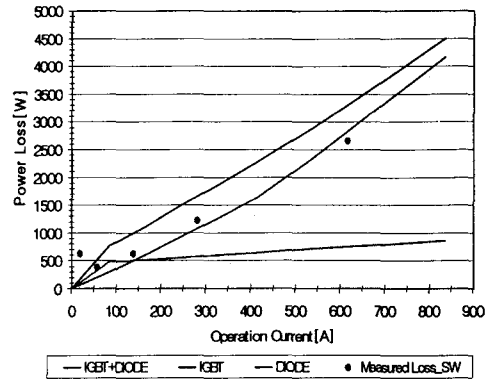


Fig. 3. Test results of switching loss.

3.2.2 풍력발전기 운전패턴시험

풍력발전기는 바람의 에너지를 기계적인 에너지로 변환하는 블레이드의 회전에 의해서 출력이 결정된다. 풍속이 일정하면 발전되는 전력의 양도 일정하게 되고, 풍속이 변하면 출력도 바로 변하게 된다. 발전출력이 일정하게 하기 위해서는 토크제어나 블레이드의 피치제어를 하여 풍속에 관계없이 일정한 출력이 되도록 제어하는 것이 중요하다. 이와 같은 실제 상황에서 블레이드의 특성은 유도전동기를 이용하여 토크를 조절하여 구현하였다. 이러한 조건에서 유도전동기의 회전수에 따른 발전기 단자전압의 변화를 인버터가 인식하고 부하인 계통에 전력을 공급하는 운전패턴시험을 하였다. 발전이 가능한 최저 회전속도인 9 RPM에서 정격 속도인 25 RPM까지 단계적으로 속도를 가변하면서 시험한 결과는 그림 4와 같다.

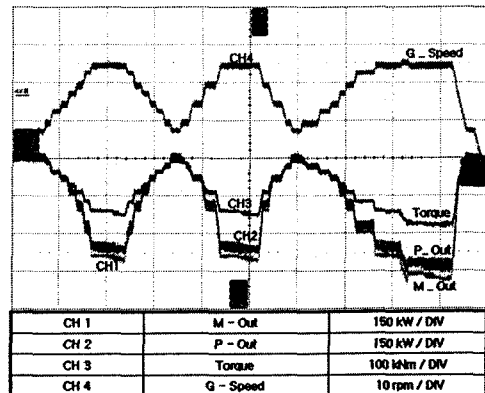


Fig. 4. Test of inverter operation pattern.

그림 5는 그림 4의 결과를 발전기 속도와 토크 값의 관계를 표시한 것이다. 블레이드의 피치 제어와 발전기 회전수에 관계는 크게 3가지 부분으로 나누어 제어영역을 생각할 수 있다.

영역 I : 낮은 풍속에서 발전기의 속도가 제어되는 영역(기준 회전속도 9rpm). 최적모드의 토크계인보다 높은 토크를 발전기가 요구하는 경우 토크는 이 값에서 제한된다. 만약 회전날개 속도가 17rpm보다 높게 되면 제어기는 영역 I에서 영역 II로 바뀌게 된다.

영역 II : 중간풍속에서 발전기 속도제어영역(기준 회전속도 25rpm). 최적모드의 토크계인보다 낮은 토크를 발전기가 요구하는 경우 토크는 이 값에서 제한된다. 회전날개 속도가 17rpm보다 낮게 되면 제어기는 영역 II에서 영역 I로 바뀌게 된다. 제어기에서 회전날개 속도가 더 높아지면, 영역 III을 제어하기 위하여 제어 영역 II로부터 바뀌게 된다.

영역 III : 회전날개가 제어 영역 III에서는 고속으로 되는 풍속(기준 회전속도 25rpm). 발전기 토크는 제어 영역 III에서 연속적으로 정격전력을 생산하도록 제어된다. 풍칭토크의 110% 이하로 발전기의 최대 토크는 제한된다. 만약 피치각도가 0°이면 제어기는 영역 II를 제어하기 위하여 제어영역 III으로부터 변화된다.

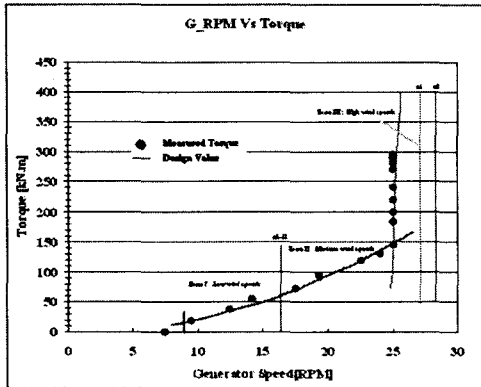


Fig. 5. Control zones of the controller.

발전기와 연결된 인버터시험에서 속도를 가변하면서 외부에 토크메타를 설치하여 토크를 측정하였으며, 발전기와 저항기를 접속한 시험에서 측정한 토크의 값은 동일한 154 kNm가 되는 것을 확인하였다. 이 값으로부터 발전기의 효율과 인버터의 효율을 다음 계산식을 이용하여 계산해 보았다.

$$\eta_{\text{인버터}} = \frac{P_{\text{인버터}}}{P_{\text{발전기}}} \times 100$$

발전기속도 25 RPM, 토크 154 kNm 조건에서 인버터 단독효율은 94.3%이며 발전기는 90.8%

로 계산되었다. 발전기 효율에는 유도전동기와 발전기 사이에 접속된 감속기 효율이 포함된 것이다.

4. 결 론

순수 국내기술로 설계되고 제작된 영구자석형 750 kW gearless 동기발전기의 시험을 전기연구원에서 실시하였다. 실험에서 발전기의 효율은 90.8%, 인버터 94.3%로 조사되었다. 또한 낮은 풍속에서도 최적의 조건을 찾아 토크제어를 하여 최대전력을 제어하는 조건을 구현하였다. 풍력발전설비는 오랜 시간동안 고장이 없어야하고 극한 상황에서도 발전기와 인버터를 보호할 수 있는 제어기술을 필요로 한다. 앞으로 실증과정을 통하여 이러한 연구개발을 수행할 예정이다.

References

- [1] 정병창, 임중연, 송승호, 김영민, 노도환, 김동용, "중·대형급 풍력발전 시스템용 에너지 변환 방식에 대한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회, 2001
- [2] 영구자석형 가변속 풍력발전기의 최대출력 제어 알고리즘 개발. 2003, 중간보고서