

## 2MW급 DFIG 최적 설계 및 성능 평가에 관한 연구

조 성호<sup>1)</sup>, 오 영진<sup>2)</sup>, 문 병선<sup>3)</sup>, 이 승구<sup>4)</sup>

### The Performance Evaluation and the Optimal Design of 2MW DFIG

SungHo Cho, YoungJin Oh, ByeongSun Moon, SeungKuh Lee

**Key words** : Wind turbine(풍력발전), DFIG(이중 여자 유도발전기), Design of Experiment(실험계획법), Optimization(최적화), M/G set(모터/발전기 시험장치)

**Abstract** : The optimal design and characteristic analysis of Double Fed Induction Generator(DFIG) was performed. The purpose of the paper is to verify the accuracy of design and the reliability of DFIG by experiment. A grid connection experiment is performed to confirm generating performance in wide operating range. In this experiment, 2.7MW M/G set is used. The finite element method is applied to calculate parameters and characteristic analysis of DFIG. And in order to reduce design time and efforts, Design of Experiment(DOE) is used. The experimental results are compared with the optimum design results.

#### subscrip

DFIG : Double fed induction generator

FEM : Finite element method

DOE : Design of experiment

PCS : Power control system

ETD : Embedded temperature detector

#### 1. 서 론

세계 각국은 무공해 청정에너지를 이용한 대체 에너지 개발에 많은 관심을 가지고 있으며 이미 세계 선진국에서는 태양광, 연료전지, 풍력, 수력 등 다양한 방법을 이용한 연구가 활발히 진행되어 특정부분은 이미 실용화 단계로 접어든 상태에 있다. 특히 1997년 12월 교토에서 체결된 의정서에 의해 지구 온난화의 주범인 온실가스에 대한 배출 규제가 구체화 되어 국내외적으로 대체에너지 개발에 더욱 박차를 가하고 있는 실정이다.<sup>1)5)</sup> 이에 풍력 발전 시스템이 경제성 및 실용화에 근접한 방안으로 인식되고 있으며 기술개발과 보급기반 조성에 많은 노력이 요구된다.

풍력발전시스템의 운전 특성상 열악한 사용 환경, 20년 이상의 운전 수명, 고효율 시스템 구성, 풍속에 따른 가변부하 특성으로 구성품의 신뢰성을 검증할 수 있는 특성 시험이 반드시 필요하다. 이를 위해선 블레이드와 동력 전달부의 특성을 모의할 수 있는 실험 장치가 필수적이다. 그러나 대용량의 풍력발전시스템의 경우 넓은 시험 공간, 시제품의 크기, 많은 비용 등의 제약이 있어 일반적으로 축소형 모델을 제작하여 설계, 제

작, 특성시험을 실시하는게 현재의 국내 실정이다.<sup>3)4)</sup> 이는 실제 계통 연계시 개발품의 특성 검증 및 시스템 구성품간의 연계시 문제점을 정확히 예측하기 어려운 단점이 있다.<sup>4)5)</sup>

본 논문은 2MW급 DFIG를 설계 및 특성해석, 시험을 실시하였다. DFIG설계는 등가회로법을 이용한 기본설계와 유한요소법을 이용한 상세설계로 실시되었으며, 실험계획법을 적용하여 높은 효율을 갖는 모델로 최적 설계하였다. 그리고 풍력시스템의 주요 특성인 풍속에 따른 출력 특성 해석을 유한요소법을 이용하여 실시하였다. 논문에서 제시된 DFIG의 설계 기법과 특성해석의 타당성을 검증하기 위해 2MW급 DFIG의 시제품을 국제기준에 맞춰 제작하였고 기존 축소형 모델을 이용한 시험 방법과 달리 실제 용량의 시제품으로 특성 시험을 실시하였다. 이를 위해 2.7MW급 계통 연계형 부하 시험 장치를 구성하였다. 실험 결과 비교를 통해 설계 및 특성해석의 타당성 검증과 제품 신뢰성 확보를 통해 실용화 가능성을 제시하였다.

- 1) 조성호, (주)효성 중공업연구소  
E-mail : motor21@hyosung.com  
Tel : (055)268-9924 Fax : (055)268-9928
- 2) 오영진, (주)효성 중공업연구소  
E-mail : audican@hyosung.com  
Tel : (055)268-9923 Fax : (055)268-9928
- 3) 문병선, (주)효성 중공업연구소  
E-mail : koohapark@hyosung.com  
Tel : (055)268-9924 Fax : (055)268-9928
- 4) 이승구, (주)효성 중공업연구소  
E-mail : sklee1@hyosung.com  
Tel : (031)596-1701 Fax : (031)596-1697

## 2. DFIG의 설계 및 특성해석

권선형 회전자를 통해 여자 제어를 할 수 있는 시스템을 갖는 발전기를 DFIG라 한다. DFIG 제어 시스템은 벡터 제어 기법을 회전자 여자제어에 적용하여 유효전력과 무효전력을 독립적으로 제어한다.<sup>2)6)</sup> 이는 동기속도 이외의 영역에서 발전기 속도, 출력, 역률의 제어가 이루어지는 것을 말한다. 따라서 DFIG 설계는 이러한 특징을 고려하여 이루어져야 한다. 본 논문에서는 등가 회로법과 유한요소법을 이용한 기본 설계와 실험계 획법을 활용한 최적화 설계가 이루어졌으며 풍력 시스템 특징인 속도에 따른 가변부하 특성해석을 유한요소법으로 진행하였다.

### 2.1 DFIG 설계

#### 2.1.1 요구사항

본 연구에서 설계 목표로 하는 2MW급 DFIG를 설계하기 위해서는 우선, 전기 설계 사양이 확정되어야 한다. 전기적 기본사양은 Table 1과 같다.

Table 1 발전기 기본 사양

Rated power	Approx. 2000[kW]
Rated voltage	690[V]
Frequency	60[Hz]
Synchronous speed	1800[RPM]
Rated speed	1980[RPM]
Speed range	1350~2250[RPM]
Insulation class	F
Operating temperature	-10~40[°C]

#### 2.1.2 설계과정

2MW급 DFIG 설계는 등가회로법을 이용하여 Stator/Rotor Core size, 권선설계, 점적율, 절연 계산, 저항, 인덕턴스 등을 계산하고, 그 외 등가회로법으로 해석 불가능한 국부적인 자속포화 밀도 및 회전자 여자에 따른 정상상태 특성해석 등의 설계는 상용 전자장 해석틀인 Flux2D를 이용하였다. Fig.1은 DFIG의 설계 프로세스를 도식화한 것이다.

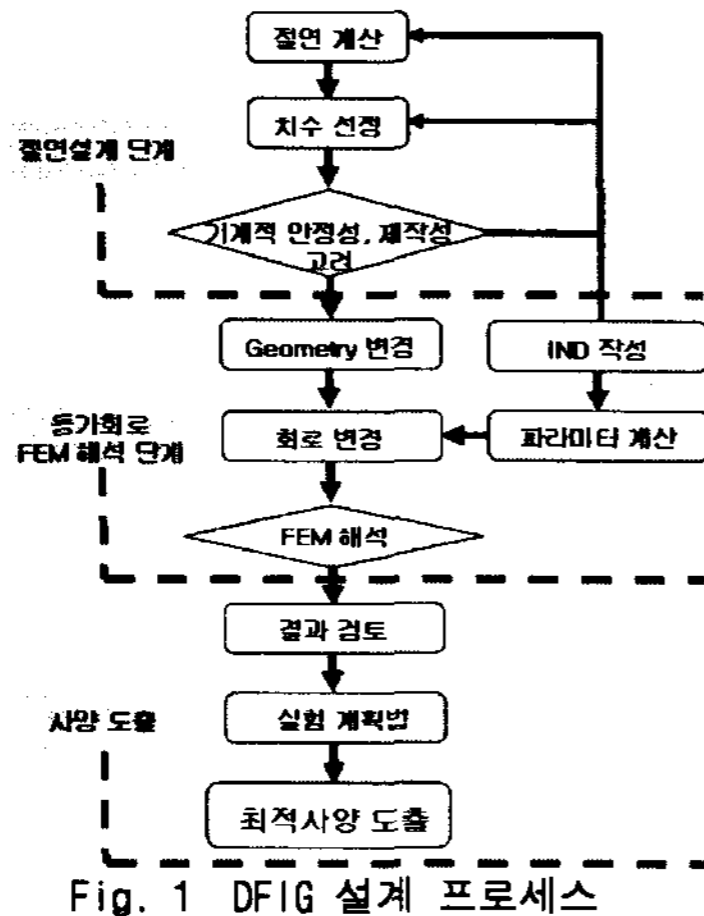


Fig. 1 DFIG 설계 프로세스

#### 2.1.3 특성해석

DFIG의 운전특성 해석은 풍력시스템의 일반적인 부하 profile을 근거로 회전자 속도별 출력을 해석하였다. Fig.2는 Flux2D 회로 구성도이다. 여기서, 부하는 저항부하(Fig.2의 점선부분)로 하였으며 회전축 전압원 해석을 실시하였다. 정격 출력에서 해석 결과는 고정자(1차측) 상전압은 400[V], 고정자 부하전류 1525[A], 회전자 상전압 105[V], 회전자 전류 680[A]로 해석되었다.

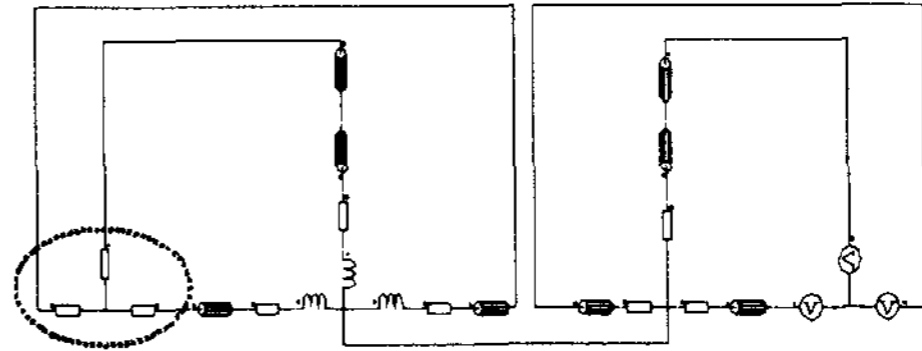


Fig. 2 Flux2D 회로도

국부적인 자속포화 현상은 고정자와 회전자의 치부, 요크부에서의 자속 밀도 포화여부를 확인하였다. 그 결과 Core의 모든 부분에서 1.8[T]이하의 자속 밀도를 가짐으로써 양호한 특성을 확인하였다. Fig.3은 풍력발전기의 정격인 1980[RPM]에서 2[MW]의 출력을 가질 때 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 고정자 치 1.52[T], 고정자 요크는 1.72[T], 회전자 치는 1.76[T] 회전자 요크는 1.72[T]로 양호한 특성을 보였다.

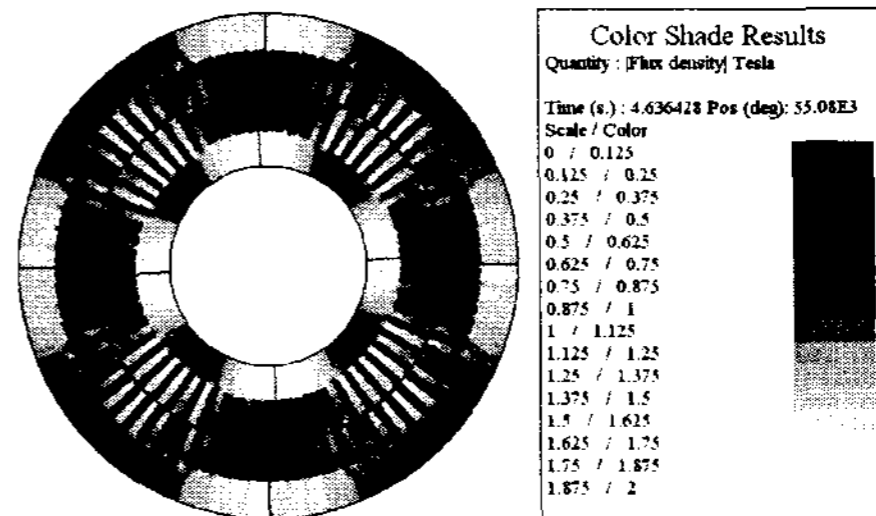
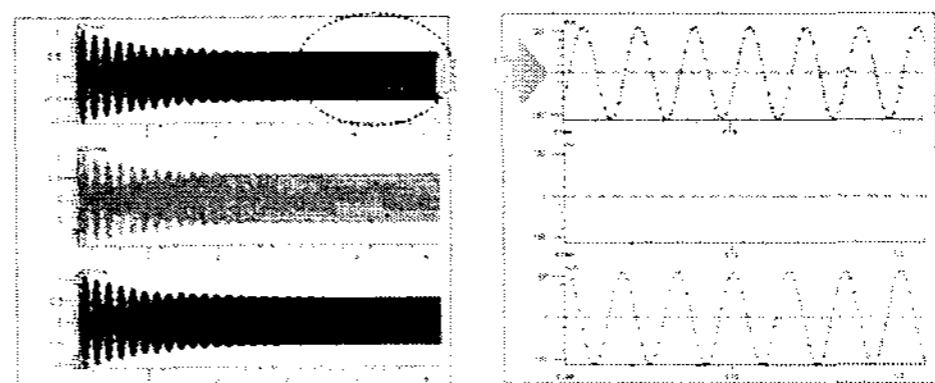
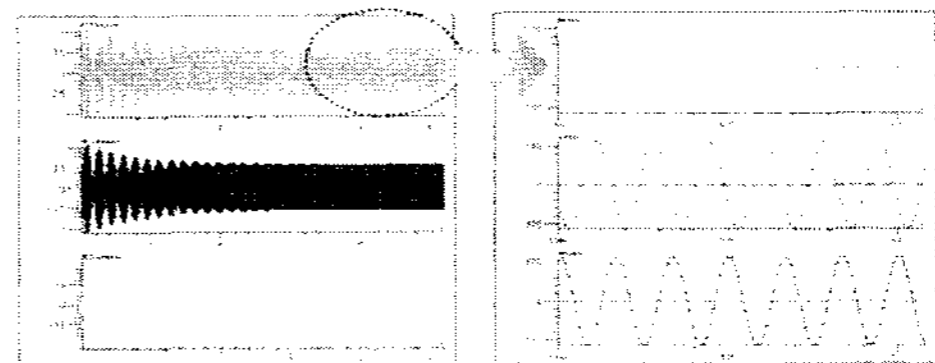


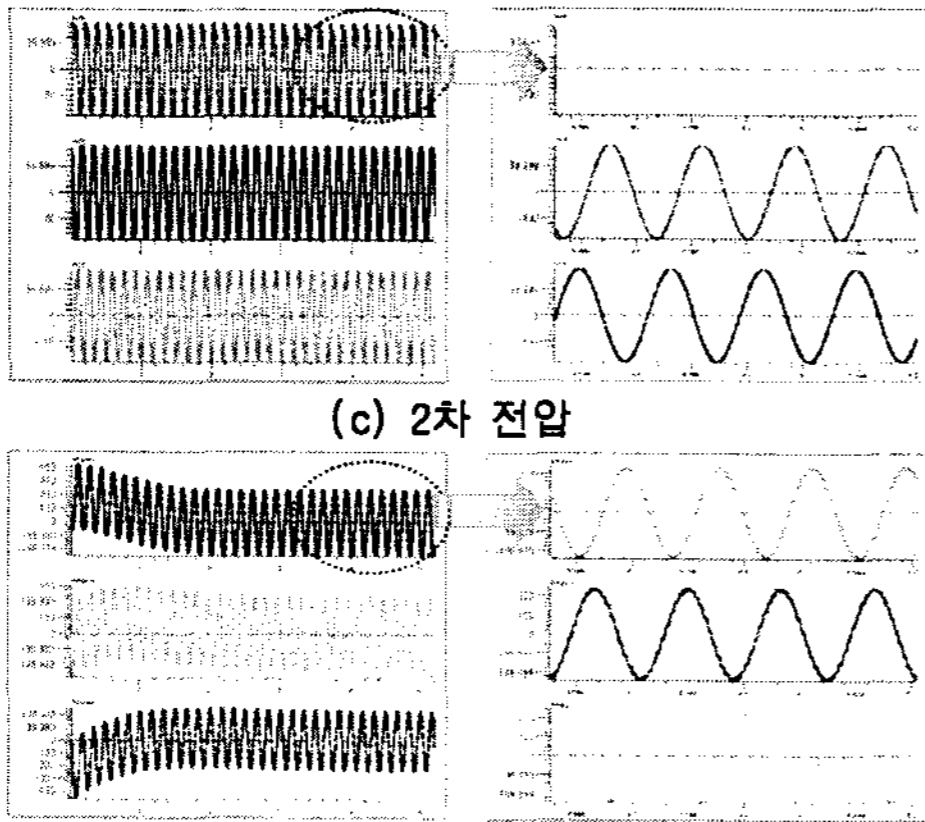
Fig. 3 자속밀도 분포도



(a) 1차 전류



(b) 1차 전류



(c) 2차 전압  
(d) 2차 전류  
Fig. 4 DFIG 출력 파형

## 2.2 DFIG 제작

풍력 발전기의 경우 운전수명이 기본적으로 20년 이상으로 매우 길며 운전 환경 또한 극한 조건으로 열악한 상태이다. 이런 조건을 만족하기 위해선 주요 구성품의 적절한 선택과 보호등급을 기본적으로 IP54 이상으로 설계되어야 한다. IP54 보호등급에서는 발전기 내부와 외부의 밀폐로 인해 발전기 냉각 성능에 취약한 구조가 된다. 발전기 발열은 권선 절연물, 베어링 등의 주요 구성품을 열화시켜 수명에 악영향을 준다. 따라서 제작에 있어서 효과적인 냉각을 고려한 설계가 필수적으로 이루어져야 한다.

## 3. 시험

### 3.1 단품시험

실시된 모든 단독시험은 국제규격인 IEC, IEEE 규격에 명시된 방법에 의해 실시하였다. 단독시험 결과 모든 국제기준에 합당한 결과를 보였다. 발전기 온도 상승 시험은 ETD법으로 시험하였다. 발전기 내부 온도 상승치는 F중 온도 상승치 105[F]이하를 만족함을 확인하였다.

### 3.2 계통연계 시험

#### 3.2.1 DFIG 계통연계 시험장치 구성

풍력발전 시스템은 에너지 변환 흐름에 따라 블레이드, 동력 전달장치인 증속기, 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 발전기, 발전 전력을 제어하는 PCS로 크게 구분이 가능하다. 이와 같이 발전기를 비롯한 PCS의 특성을 파악하고 고효율 발전기를 개발하기 위해서는 이를 모의한 시험장치가 필요하게 된다.<sup>6)7)</sup>

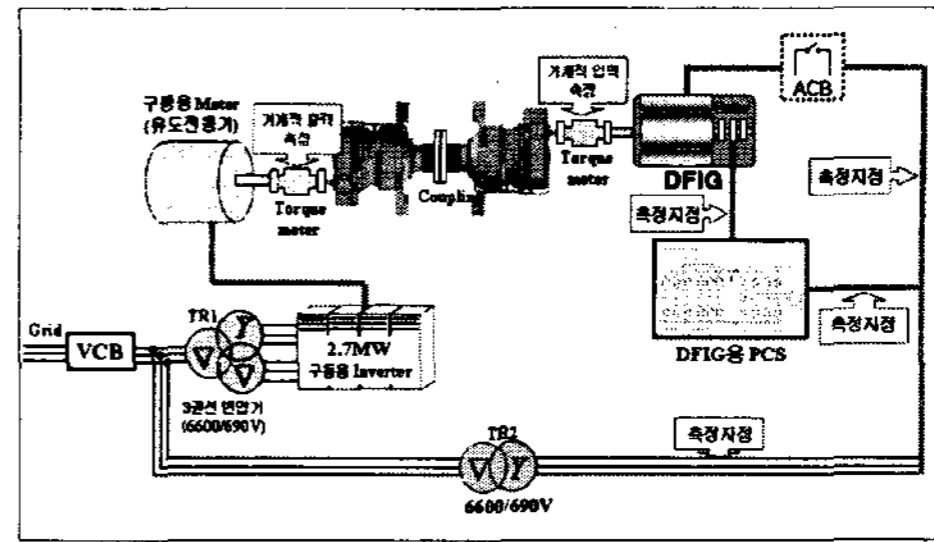


Fig. 5 풍력시스템 계통연계 시험 구성도

Table 2 주요 계측 장비

측정 장비	모델명	내용	수량
Power analyzer	DT1600	전력측정	1[EA]
Oscilloscope	TDS3000	전력측정	1[EA]
Torque meter	MCRT28000	토크측정	1[EA]
DAQ	Aligent	데이터 저장	1[EA]
온도센서	K-type Thermocouple	발전기 내부 온도측정	2[EA]
	RTD(PT-100)		1[EA]
적외선 온도계	Fluke	표면온도측정	1[EA]

Fig.5 는 풍력발전 시스템의 계통연계 및 부하 특성 시험을 하기 위한 시험 구성도이다. 블레이드를 대신하여 발전기에 토크를 공급하는 2.7MW 유도전동기와 전동기의 토크 및 속도를 제어하기 위한 구동용 인버터, 발전된 전력을 계통으로 송전하기 위한 승압용 변압기, 계통연계 및 차단을 위한 VCB, ACB로 구성되어 있다. 발전기 기계적 입력은 RPM meter 및 Torque meter로 측정하였고 각 부분별 전기적 출력은 Power analyzer 및 Oscilloscope, PCS와 연계된 센서(전압, 전류센서)로 측정하였다. Table 2는 시험에 사용된 주요 측정 장비이다.

#### 3.2.2 DFIG 부하시험

일반적인 풍력 발전기 Load-profile 중 임의의 특정구간을 선정(11개 ★표시구간)하여 시험을 실시하였다. Fig.6는 속도에 따른 발전기 부하특성 구간을 그래프로 나타낸 것이다.

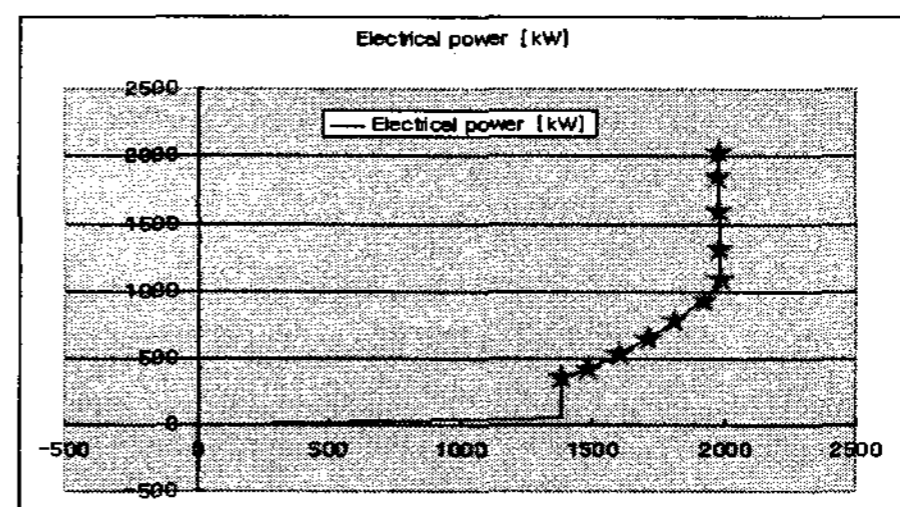


Fig. 6 풍력발전기 시험 구간

Fig.7은 특정 부하구간에서 발전되는 출력 상 전압 및 상전류를 측정된 실제 파형이다. 시험 결과 및 해석치를 비교한 그래프는 Fig.8와 같고 설계시 예상된 해석 결과와 유사한 결과를 나타내었다. 해석치와 시험치를 비교한 결과 속도별 모든 구간에서 해석결과의 발전기 효율이 다소 높으며, 이는 DFIG용 PCS의 구조 특성상 Rotor side inverter와 Grid side inverter로 구성되며 이들에서의 손실과 Grid side inverter에 장착된 LCS-filter의 손실을 특성 해석시 해석의 편의를 위해 반영하지 않고 실시하였기 때문으로 사료된다.

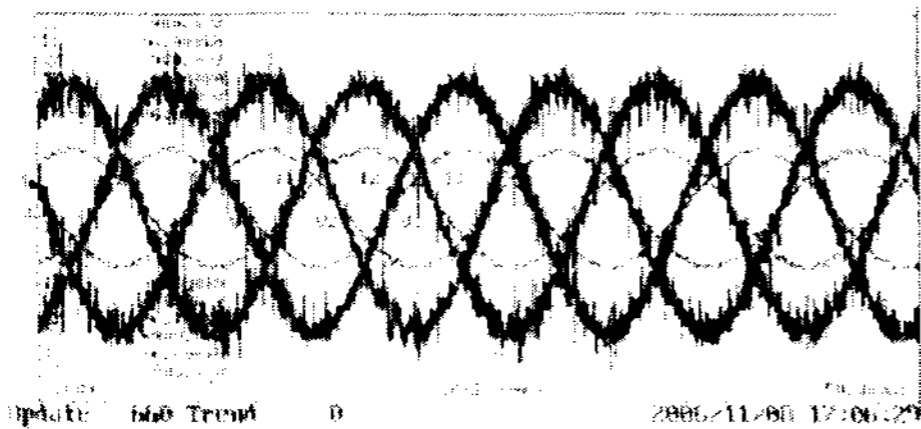
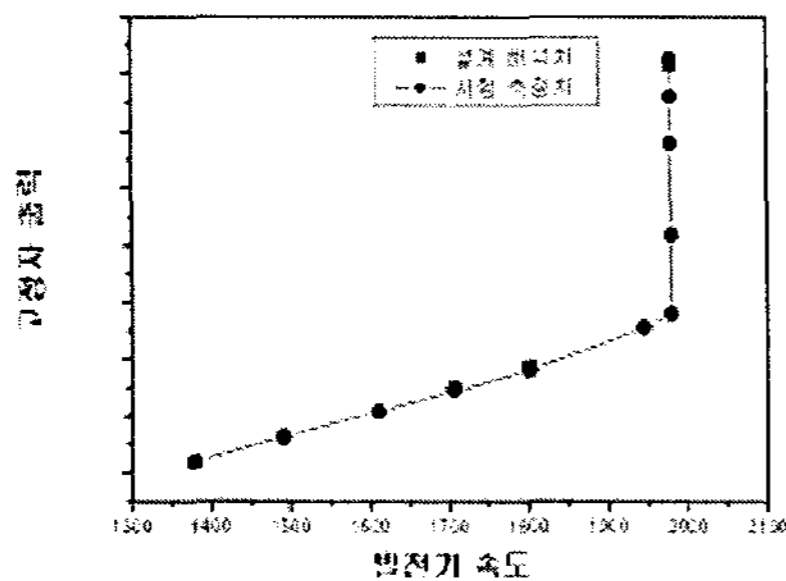
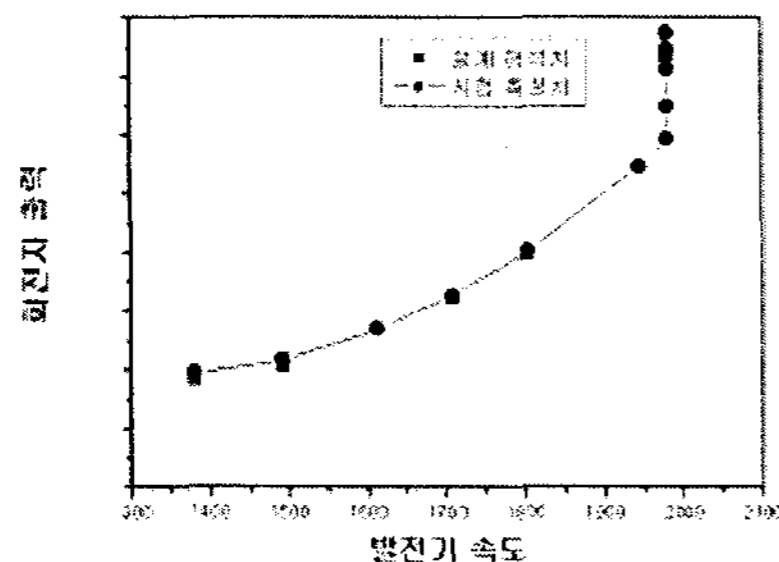


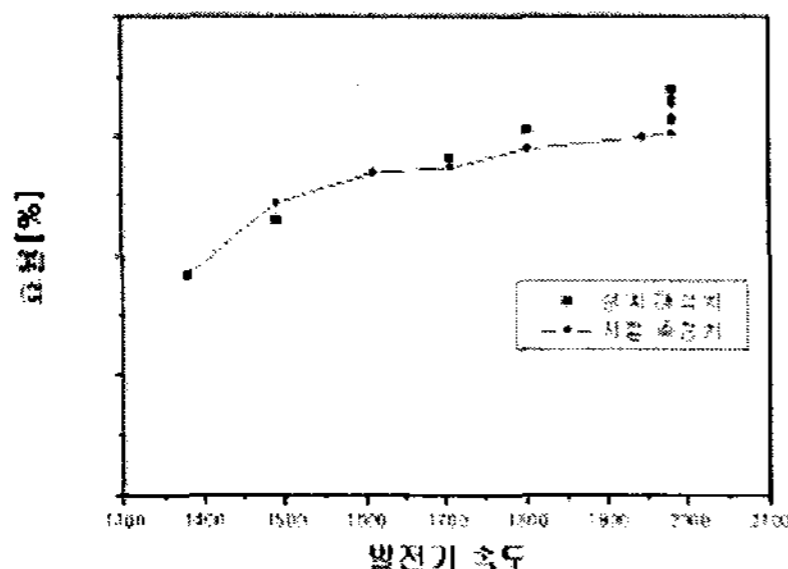
Fig. 7 실제 출력 전압/전류 파형



(a) 고정자속 출력 특성



(b) 회전자속 출력 특성



(c) 발전기 추력별 효율 특성  
Fig. 8 DFIG 속도별 특성 그래프

#### 4. 결론

본 논문은 계통 연계형 가변속 풍력발전 방식에 적용되는 DFIG의 설계 프로세스를 제시하였고 실험계획법을 활용한 최적화 기법을 적용하여 최적 설계 사양을 도출함으로써 설계 및 해석에 소요되는 인력 및 시간을 저감하였다. 최적 설계된 2MW급 DFIG의 시제품을 국제기준에 맞춰 제작하였고 풍력 발전 시스템을 모의할 수 있는 2.7MW급 발전기-증속기-PCS 계통연계 부하시험 장치를 구축하였다. 이를 활용한 실험의 결과를 통해 설계방법 및 특성해석의 타당성을 증명하였다. 그리고 풍력시스템의 실제 운전 조건으로 모의 시험이 가능하여 발전기의 제품 신뢰성 및 구성품 연계시 문제점을 최소화 할 수 있었다. 이를 통해 2MW급 DFIG의 설계, 제작 기술 확보 및 시험을 통해 실용화 가능성을 제시하였다.

#### References

- [1] 조성호 외 4명, "2MW급 DFIG 설계 제작 및 성능 평가에 관한 연구," KWEC 춘계국제학술대회 논문집 pp. 131-136, 2007.
- [2] Z. Chen, E. Spooner, "Grid Power Quality with Variable Speed Wind Turbines," IEEE Trans on energy conversion Vol. 16, pp148~154, 2001.
- [3] 이상호 외 5명, "실험계획법을 이용한 IPM BLDC 전동기의 토크리플 저감 설계," 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp.1111, 2005.07
- [4] 이우석, 오철수, "풍력발전용 권선형 유도발전기의 회전자 여자주파수를 이용한 속도와 출력 제어," 대한전기학회, 48B-7-1 pp. 349-356, 1999.
- [5] 정병찬, 송승호, 노도환, 김동용, "풍력 터빈 모의실험을 위한 가변토크 입력형 시뮬레이터," 대한전기학회, 51B-8-7 pp. 467-474,
- [6] K. Rreis, C. Mabele, and O. Biro, "FEM and Evoluton Strategies in the Optimal Design of Electromagnetic Devices," IEEE Trans on Magnetics, Vol26 pp. 2181-2183, 1990.05.
- [7] 조성호 외 4명, "실험계획법을 이용한 DFIG최적설계," KWEC 추계학술대회 pp. 123-126, 2006.