

2MW급 풍력발전시스템용 이중여자 발전기 설계

조동혁¹⁾, 황상연²⁾, 조성호³⁾, 이인우⁴⁾, 이승구⁵⁾

The Design of Doubly-fed Induction Generator for 2MW wind power system

D.H. Cho, S.Y. Hwang, S.H. Cho, I.W. Lee, and S.K. Lee

Key words : Wind Power Generator(풍력발전기), DFIG(이중여자유도발전기)

Abstract : This paper presents a design approach for wind power generator. Among several different generator systems, doubly-fed induction generator(DFIG) is selected for Hyosung 2MW wind turbine system from the view of cost and weight. The time step finite element method is applied to analyze the performance of DFIG, and design of experiment(DOE) is used as an optimization method.

subscript

WTGS : wind turbine generator system
PMG : permanent magnet generator
DFIG : doubly-fed induction generator

1. 서론

1997년 12월 교토에서 체결된 의정서에 의해, 지구 온난화의 주범인 온실가스에 대한 배출규제가 구체화 되어, 선진국에서는 대체 에너지 개발에 더욱 박차를 가하고 있는 실정이다. 우리나라도 1998년 9월 교토 의정서에 서명하여 2018년도부터는 협약을 이행하여야 하는 상황이며 온실가스 방지 정책 및 기술개발에 대한 노력이 절실하다. 이에 풍력발전시스템이 경제성 및 실용화에 근접한 방안으로 인식되고 있으며 기술개발과 보급기반 조성에 많은 노력이 요구되어 진다.¹⁾²⁾

1990년대 후반까지는 대부분의 풍력 시스템은 다단 기어를 채용하고 농형 유도발전기를 채용하여 계통에 직접 연결되는 1.5MW 이하의 고정속 시스템이었다. 이후 소음, 전력 품질, 에너지 생산량 등을 고려하여 DFIG와 PMG를 채용하는 가변속 시스템의 채용이 늘어가고 있다.

풍력발전시스템은 동력전달장치의 구조에 따

라 Geared type과 Gearless type으로 나누어진 다. Gearless type은 기어박스 없이 발전기와 로터를 직접 연결하는 구조로, 저속에서 발전기가 고효율을 발생시켜야 한다. 따라서 에너지밀도가 높은 영구자석을 적용한 동기발전기를 사용하게 된다. 이러한 타입은 계통이 요구하는 대로 발전기 출력을 제어해야 하는데 이를 위해선 발전기 출력 용량만큼의 전력변환장치가 설치되어야 한다. 이런 타입은 발전기의 중량이 증가되고 전력 변환장치가 고가인 단점이 있다. 이에 반해 Geared type은 슬립링을 가진 권선형 유도발전기를 사용하며, 이로 인해 유지보수가 필수적으로 요구되지만 발전기 및 전력변환장치의 가격이 상대적으로 낮고 제작사의 보급모델이 다양하고 운전경험이 풍부한 장점으로 현재 국내외적으로 많이 보급되고 있다.¹⁾ 발전기 용량으로서는 세계적으로 2MW급 풍력발전시스템이 주류를 이루고 있으며 풍력발전시스템 특성상 발전기의 고효율화, 경량

-
- 1) (주)효성 중공업연구소 풍력발전기술팀
E-mail : cdr@hyosung.com
 - 2) (주)효성 중공업연구소 풍력발전기술팀
E-mail : snowball@hyosung.com
 - 3) (주)효성 중공업연구소 회전기팀
E-mail : motor21@hyosung.com
 - 4) (주)효성 중공업연구소 회전기팀
E-mail : inlee@hyosung.com
 - 5) (주)효성 중공업연구소 풍력발전기술팀
E-mail : sklee1@hyosung.com

화, Down-sizing에 대한 연구가 앞으로도 더 이루어져야 한다.

본 논문에서는 2MW급 Geared type에 적용되고 있는 Doubly-Fed Induction Generator(이하 : DFIG)를 설계 대상으로 하였다. 설계는 등가회로 법과 유한요소법을 이용하였으며 실험 계획법을 이용하여 높은 효율을 갖는 모델로 최적화 설계를 실시하였다.

2. DFIG 시스템 소개

권선형 유도발전기는 회전자를 통해 여자를 할 수 있고 이러한 시스템을 갖는 발전기를 이중 여자형 유도발전기(DFIG)라 한다. DFIG는 벡터 제어 기법을 발전기의 회전자 여자제어에 적용하여 유효전력과 무효전력의 독립적 제어를 할 수 있다.³⁾ 동기속도 이외의 영역에서 회전자의 여자주파수와 여자전압을 제어하여 풍력발전기의 속도, 출력, 역률의 제어가 이루어질 수 있다.

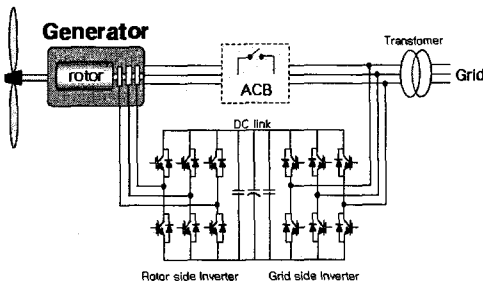


Fig. 1 DFIG system 구성도

Fig. 1은 DFIG 시스템의 구성도이다. 이는 2가지 모드를 동시에 동작되며 회전자에 여자전류 인가될 경우, 계통에 연결된 변압기를 통해 Grid side inverter를 Active하여 정류기로 작동하고 Rotor side inverter를 제어하고 동기속도 이상에서는 회전자 측에서 발전된 전력을 Grid side inverter로 제어하여 계통에 송전한다.

3. DFIG 설계

3.1 기본 사양

본 연구에서 설계 목표로 하는 2MW급 DFIG를 설계하기 위해서는 우선 전기 설계 사양이 확정되어야 하며 전기적 기본 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 발전기 기본사양

Rated power	Approx. 2,100[kW]
Rated voltage	690[V]
Frequency	60[Hz]
Synchronous speed	1,800[rpm]
Rated speed	1,980[rpm]
Speed range	1,350~2,250[rpm]
Insulation class	F
Operating temperature	-10~40[°C]

3.2 설계 프로세스

Fig. 2는 DFIG의 설계 프로세스를 도식화한 것이다. 당사가 보유한 등가 회로법에 기반한 유도발전기 설계 프로그램을 이용하여 권선 설계, 접적율, 절연 계산, 저항, 인덕턴스 등을 계산하였다. 설계 프로그램으로 해석 불가능한 회전자측 여자에 따른 DFIG 정상상태 해석 및 국부적인 자속 포화밀도 등의 정밀한 설계는 상용 해석툴인 Flux2D를 이용한 유한요소 해석을 실시하였다.

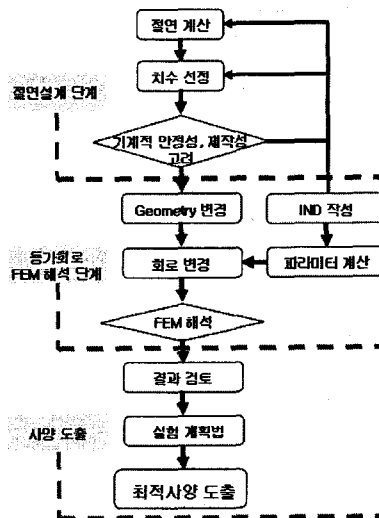


Fig. 2 DFIG 설계 프로세스

3.3 유한요소 해석

기기의 복잡화와 컴퓨터 기술의 발달로 인해 전기기기의 설계는 많은 부분 유한요소 해석에 의존하게 되었다. 해석을 위해서 먼저 당사가 보

유한 등가 회로법에 기반한 유도발전기 설계 프로그램을 이용하여 권선 설계, 점적율, 절연 계산, 저항, 인덕턴스 등을 계산하고, 이를 유한요소 해석 툴인 Flux2D의 입력 파라미터로 하여 회전자측 여자에 따른 DFIG 정상상태 해석 및 국부적인 자속 포화밀도 등의 정밀한 설계를 실시하였다.

Fig. 3은 Flux2D 해석을 위한 외부 회로를 나타내고 있으며, Fig. 4는 자속 선도를 보여주고 있다. 4극 발전기이므로 반주기 조건을 이용하여 전체의 1/4을 해석 대상으로 하였다.

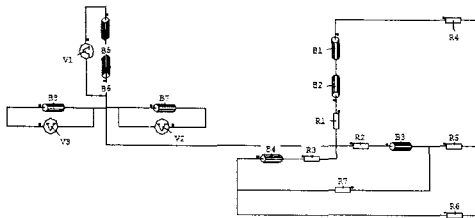


Fig. 3 유한요소 해석을 위한 외부 회로

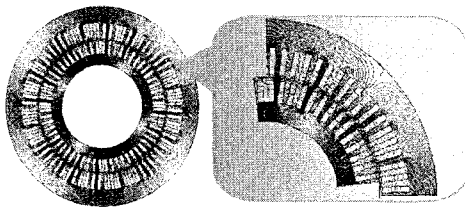


Fig. 4 DFIG의 자속선도

위의 Fig. 3에서 전압원이 연결된 부분이 회전자이며 저항이 연결된 부분이 고정자 부분이다. 고정자 부분의 저항(R4-R7)에 아주 큰 값을 주면 회전자 전압원에 의한 고정자 유기 전압을 해석할 수가 있다.

고정자 계통 접속 전압을 690V로 선정하였으므로 권선비와 슬립을 이용하여 회전자 입력 전압을 선정하였다. Fig. 5는 슬립이 1/6, 즉 회전자가 1,500rpm으로 회전하고 회전자 주파수가 10Hz일 때의 회전자 입력 전압과 해석결과인 회전자 전류를 나타내고 있다. 무부하이므로 전압과 전류는 거의 90도의 전기각을 보인다.

Fig. 6은 고정자 전압을 나타내고 있다. 기계적 속도와 회전자 전압 주파수의 합으로 고정자 전압의 주파수는 60Hz를 나타내고 있으며 슬립비와 권선비의 영향으로 실효전압이 690V이다.

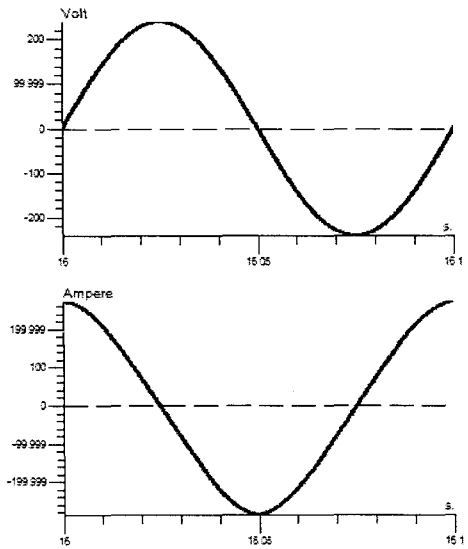


Fig. 5 회전자 입력 전압과 전류

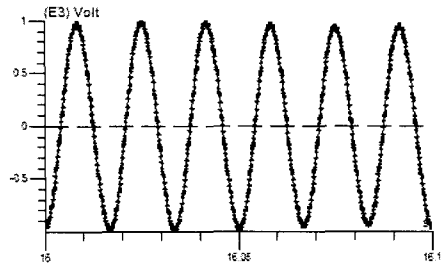


Fig. 6 고정자 출력 전압

Fig. 5와 6은 회전자의 입력 전압이 이상적인 sine파형일 때를 해석한 것이나 실제로 회전자에는 PWM 파형이 입력되므로 Fig. 7과 같이 나타난다.

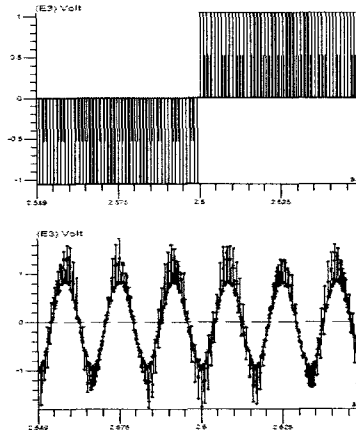


Fig. 7 PWM 파형을 고려한 DFIG 해석

3.4 DOE를 이용한 설계

특성에 영향을 미치는 중요 인자들을 선정하고 이들의 관계를 몇 가지 조합으로 모델화시켜 FEM을 이용한 특성해석을 실시하였다. 그 결과를 바탕으로 발전기가 최소손실을 갖는 최적조건을 찾는 최적화를 실시하였다. 그 기법으로 실험 계획법(Design of Experiments : DOE)을 적용하였다. FEM 해석의 목적과 시간 등을 고려하여 실험 계획법의 종류를 선택해야 하며 그 종류에는 일부-완전 요인 실험, 반응 표면 실험법 등이 있다. 실험계획법은 MINITAB 프로그램을 이용하여 실시하였다. 부분요인 실험 분석 결과로 주효과 곡선을 도출하였다. 목적 함수로는 출력당 손실량을 선정하였다. Fig. 8은 본 논문에서 사용한 설계 변수를 나타내고 있다.

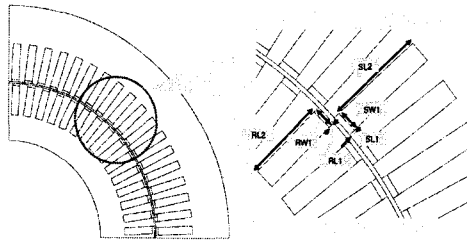


Fig. 8 슬롯-치 변수 정의

위의 설계 변수는 아래의 4개의 인자로서 나타낼 수 있다.

- S_{YS} : 고정자 요크폭/슬롯높이 비
- S_{TS} : 고정자 치폭/슬롯폭 비
- R_{YS} : 회전자 요크폭/슬롯높이 비
- R_{TS} : 회전자 치폭/슬롯폭 비

Fig. 9는 설계인자가 목적함수에 미치는 주효과를 분석한 그림이며 P-value 5%에서 유의한 인자임을 알 수 있다.

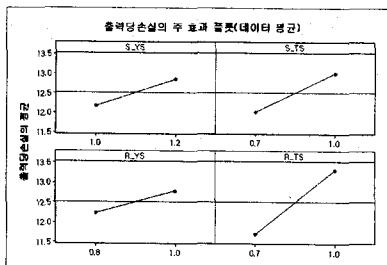


Fig. 9 설계 인자의 주효과 분석

Table 2 DFIG 최적설계 사양에 의한 특성치

구분		특성값	구분		특성값
1차 상전압 [V]	U	395.5	2차 상전압 [V]	U	127.3
	V	393.0		V	127.3
	W	401.3		W	127.3
1차 상전류 [A]	U	1,586	2차 상전류 [A]	U	664
	V	1,576		V	663
	W	1,609		W	665
1차출력 [kW]		1,892	2차출력 [kW]		254

반응 표면법을 이용하여 최적 설계된 DFIG의 특성치는 Table 2와 같다.

4. 결론

본 논문에서는 효성에서 개발하고 있는 2MW 시스템의 발전기를 설계하였다. 여러 발전기 형식 중에서 경제성 등을 고려하여 가장 적합한 이중여자유도발전기(DFIG)를 선정하였으며 유한요소법을 이용한 특성해석을 하였고, 실험계획법을 이용하여 설계를 진행하였다. 설계된 발전기는 현재 제작이 완료되어 시험 중에 있으며 발표시에 그 결과를 함께 제시할 예정이다.

후기

본 연구는 산업자원의부 전력산업연구개발사업의 지원으로 수행중인 “국제기술재휴 및 협력에 의한 2MW급 풍력발전시스템 상용화 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] M. Godoy Simoes, Felix A.Farret.(2004), "RENEWABLE ENERGY SYSTEMS" CRC Press.
- [2] Z. Chen, E. Spooner,(2001) "Grid Power Quality With Variable Speed Wind Turbines." IEEE Transactions on energy conversion Vol. 16. pp.148~154
- [3] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher,"A Double Fed Induction Generator using Back-to-back PWM Converters Supplying an Isolated Load form a Variable Speed Wind Turbine" IEEE Process-Electric Power Application, vol. 143, no 5, pp.380~387.