

3MW 풍력발전기 구조설계 및 회전자의 동특성 해석

*이 흥기¹⁾, 김 동연²⁾, 정 영규³⁾, 한 흥식, 서 형석, 정 진화

Mechanical Design and Dynamic Analysis of 3MW Rotor for Wind Energy Conversion System

*H.G.Lee, D.E.Kim, Y.G.Jung, H.S.Han, H.S.Suh, C.W.Chung

Key words : 로터의 동특성, 풍력발전기, 모드해석

Abstract : 3MW 풍력발전기용 발전기의 구조적 특성을 소개하고 회전자의 동특성 해석을 수행하였다. 이 발전기는 증속기를 사용하였으며 정격속도는 1459 rpm 이며 30% over speed trip 조건을 적용하여 설계되었다. 회전자 pole에 전원 공급 없이 자기장을 만드는 영구자석을 사용하는 형태로 구조는 간단하다. 발전기의 냉각방법은 공극을 냉각하기 위하여 팬을 이용하여 공기를 순환하며 고정자 외형에는 냉각채널을 부착하여 냉각수를 순환한다. 회전기계의 설계 시에는 반드시 진동을 고려하여 가능하면 진동을 줄이는 방향으로 설계가 되어야 하며 회전축 계의 설계에 있어서는 계의 강도, 위험속도, 불평형 진동응답 및 안정성 등을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 물리설계를 기본으로 하여 설계된 발전기의 형상을 간단하게 설명하고, 발전기의 회전자를 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 해석을 수행하였다. 해석절차는 정적 해석을 수행하고 다음으로 모드해석을 수행 하였다. 모드형상에 따른 주파수를 표기하고 해석 결과를 나타내었다.

1. 서론

풍력발전기에 사용되는 발전기는 크게 나누어 증속기를 사용하는 동기발전기형과 증속기를 사용하지 않는 직접 구동형이 있다. 두 방법 모두 각자의 장점이 있으며 증속기를 사용하는 형이 현재 시장에서의 주도적 위치를 차지하고 있다.¹⁾ 3MW 발전기는 증속기를 사용하는 형이며 정격 회전수가 1459rpm 이며 30% over speed trip 조건으로 설계되었다. 회전기계의 운전시에는 많은 적든 필히 진동이 발생한다. 따라서 회전기계의 설계 시에는 반드시 진동을 고려하여 가능하면 진동을 줄이는 방향으로 설계가 되어야 한다. 또한, 회전축 계의 설계에 있어서는 계의 강도, 위험속도, 불평형 진동응답 및 안정성 등을 고려하여야 한다. 회전축 계의 동적 해석은 자유진동해석과 강제진동해석으로 나눈다. 외부에서의 어떤 작용 없이 진동하는 것을 자유진동이라 하고 한편 외부에서 주기적으로 작용하는 힘을 받아 진동하는 것을 강제진동이라 한다.²⁾

회전체의 질량 중심이 회전중심으로부터 편심되어 있거나, 불균형 질량이 존재하면 회전체는 불평형 상태에 있게 된다. 이러한 회전체의 회전속도가 증가할수록, 질량 편심에 의해 더 큰 불평형 원심력이 발생하며 이 원심력은 베어링과 지지부에 전달되어 구조물 진동의 원인이 된다. 특히 축의 직경이 가늘어지고 회전속도가 고속화될수록

불균형 질량에 의한 진동의 영향이 더욱 두드러지게 나타난다. 따라서 회전체의 진동을 감소시킴으로써 기계의 수명을 증가시키고 기계의 성능을 향상시키며 작업자의 안전을 보장해주며 작업환경을 개선시킬 수 있는 방법이 요구된다.

포항풍력에너지 연구소는 (주)두산이 주관사업자로 개발 중인 3 MW WECS에 사용될 영구자석 동기발전기를 설계하였다. 새로이 개발되는 발전기는 가변속도형식으로 영구자석을 사용하여 여자하는 발전기이다. 이 논문에서는 발전기의 물리설계에서 얻어진 사양을 기준으로 설계된 구조형상 및 냉각시스템을 간단히 기술한다. 또한, 회전자의 정적해석을 수행하고 진동의 형태를 알아보기 위하여 동특성 해석수행을 기초설계를 기본으로 하여 보국전기(주)에서 설계된 회전자를 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하였다.

-
- 1) 포항가속기연구소, 포스텍
E-mail : lhg@postech.ac.kr
Tel : (054)279-1817 Fax : (054)279-1399
 - 2) 포항가속기연구소, 포스텍
E-mail : dekim@postech.ac.kr
Tel : (054)279-1811 Fax : (054)279-1399
 - 3) 포항가속기연구소, 포스텍
E-mail : jyg@postech.ac.kr
Tel : (054)279-1827 Fax : (054)279-1399

2. 발전기의 주요 구성요소

발전기 설계에서 주요형상을 결정하기 위해서는 많은 변수들이 있다.³⁾ 발전기 물리설계에서 결정된 주요사양을 이용하여 구조 설계에 적용하였으며 제작성을 고려하여 최적의 설계를 하였다. 표 1에는 발전기 구조설계에 필요한 주요 사양을 기술하였으며 그림 1에는 3차원으로 모델링된 외형도를 나타내고 그림 2에는 발전기의 단면 형상을 나타낸다. 발전기의 주요 구성요소는 회전자, 고정자, 수 냉각 시스템 및 공기 냉각 시스템으로 구성되어 있다. 발전기에서 출력을 결정하는 주요 요소는 허용되는 온도상승이다. 도체와 stator, rotor에서의 온도상승을 추정하기 위하여 상용 FEM code를 사용하여 열분석을 수행하였다. 해석 결과 냉각효과를 최대로 하기위하여 고정자 외경에 water jacket을 설치하여 냉각수가 흐르도록 하였다. 고정자 외경과 바깥의 water jacket 사이의 열 저항을 최소화하기 위해서 접촉면적을 최대화하여야 한다. 고정자 외경과 water jacket 사이에 조그만 공극이라도 있을 경우에는 온도상승은 허용한계를 쉽게 넘을 수 있다. 여기에서는 고정자 외경에 water jacket을 열 박음으로 하여 완벽한 접촉이 이루어지도록 한다.

표 1. 발전기 구조의 주요 사양

Parameter	
Number of Poles	8
Frequency	97.3 Hz
Rotor 반경	310 mm
Stator 내부반경	313 mm
Stator 길이	1164 mm
Stator thickness	150mm
Stator 외부 반경	413 mm
Air gap	3 mm
Stator 내부반경	313 mm

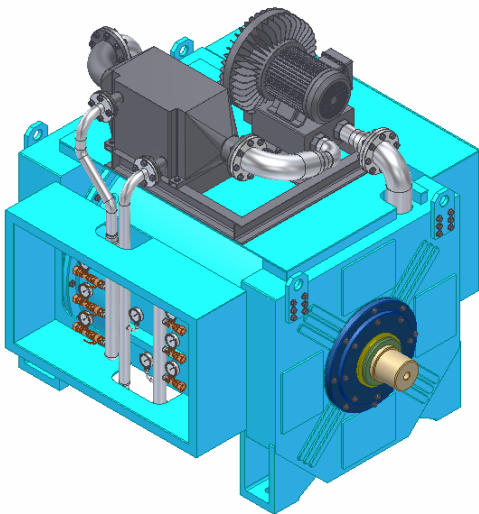


그림 1. 모델링된 3MW 발전기의 형상

유량이 150 l/min 을 기준으로 하여 냉각 채널을 설계하였으며 온도 상승으로 인하여 rotor 표면에 부착된 영구자석의 효율이 저하 되는 것을 방지 하기위하여 rotor 와 stator 사이의 공극의 온도상승을 줄이기 위하여 공기 냉각 시스템을 적용하였다.

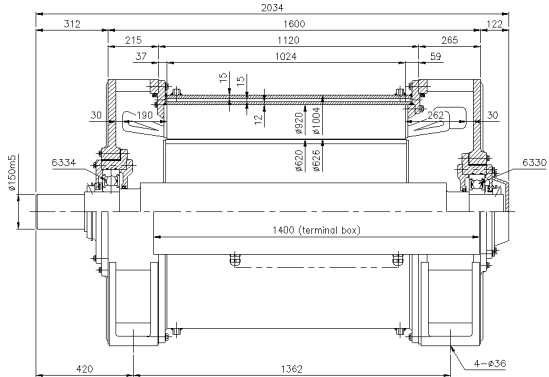


그림 2. 발전기의 단면형상

3. Rotor 해석

3.1 Rotor의 동특성 이해

자유진동 해석 및 강제진동 해석을 수행하였다. 먼저 외력이 작용하지 않은 상태에서 모드해석(Modal Analysis)을 수행한 후 다음으로 외력인 회전수를 적용하여 해석을 진행하였다. 강제진동 해석에서는 1차로 정적 해석을 수행하여 로터의 변위 및 응력을 확인한 후 다음으로 모드해석을 수행하여 결과 값을 비교하였다.

모드해석은 구조물의 고유진동수 해석으로 구조물이나 기계 부품의 고유 주파수, 모드 형상 등의 진동 특성을 구하는 것을 말한다. 이러한 모드 해석은 더 상세한 구조 동적 해석을 위해 조화 응답 해석(Harmonic Response Analysis), 과도 동적 해석(Transient Dynamic Analysis), 스펙트럼 해석(Spectrum Analysis) 등의 시작 단계가 되며, 고유 주파수와 모드 형상은 동적 하중 조건 하에 있는 구조물을 설계하는데 매우 중요한 인자가 된다. 하모닉 해석(Harmonic Analysis)은 가진력에 대한 변위 해석으로 주어진 하중에 대한 응답을 얻을 수 있다. 즉, 설계 완료된 구조물이 하중에 견딜 수 있는지 알아보게 된다. 회전기계는 일정하게 반복하중을 발생하므로 이들 하중은 회전속도에 따라 각기 다른 변위와 응력 값을 발생한다. 하모닉 해석에서는 하중과 응답을 모두 하모닉(sign형태)으로 가정하게 되며 하중이 시간의 함수가 아닌 주파수 함수로 바뀌게 되고 결과는 크기 및 위상각의 형태로 볼 수 있다.⁴⁾

3.2 Rotor의 정적해석

Rotor의 구성은 주축, 메인프레임 및 영구자석으로 구성되어 있다. 영구자석은 NEOMAX-35EH 급으로 정했다. 이렇게 설계된 발전기는 외부 냉각 장치까지 포함해서 지름이 약 1.0 m이고 축 방향 길이가 약 2.0 m의 크기이다. 제작성을 고려한 설

계 도면을 기본으로 하여 해석을 하였다. 해석의 진행 방법은 정적해석 및 모드해석을 순차적으로 수행하였으며 모델링은 단순화 하였다(그림 3). Rotor부의 해석을 수행하기 위하여 사용한 소재는 SM45C를 사용하였으며 사용한 소재의 특성은 아래와 같으며, element type은 "SOLID185, COMBI214 및 MASS21"을 사용하여 해석을 수행하였다.

Rotor material : SM45C
 E-module : $E = 210000 \text{ N/mm}^2$
 Poisson's ratio : $\mu = 0.3$
 Density : $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
 Tensile strength : $\sigma_t = 569 \text{ N/mm}^2$
 Yield strength : $\sigma_y = 343 \text{ N/mm}^2$
 Thermal expansion : $T_e = 11.2 \mu\text{m/m}^\circ\text{C}$

해석수행의 전단계인 경계조건을 부가하여야 한다. 유한요소 해석에서 경계조건에 따라 해석의 결과가 완전히 다르게 나오기 때문에 회전체의 상황을 잘 이해하고 경계조건을 적용하여야 한다. 다음으로 해석 수행 단계로 해석 방법은 외력이 작용하지 않은 자유상태의 모드 및 외력이 작용한 상태의 모드를 알아보기 위한 조건이다. 해석수행 후 모드의 형상에 따라 진동이 발생하는 방향을 알 수 있으며 동적 해석의 기초가 된다. Rotor에 작용하는 주 외력은 회전속도이며 stator의 자중에 의하여 베어링에 미치는 외력을 고려할 수 있으며, 또한 stator 및 rotor의 조립 시 편심에 의해 발생하는 자기력 등을 고려할 수 있다. 여기서 적용된 외력은 회전속도 및 stator의 자중을 고려하여 해석을 수행하였으며 회전속도는 5단계의 회전수를 고려하여 단계별로 해석을 수행하였다. 외력이 적용된 상태에서 먼저 구조물의 정적 해석을 수행하여 변위 및 상당응력을 확인 후 다음 단계로 모드 해석을 수행하였다.

ANSYS classic 에서 해석한 결과를 아래에 나타내었다. 먼저 정적인 해석을 수행하여 로터의 변위 및 상당응력을 알아본다.

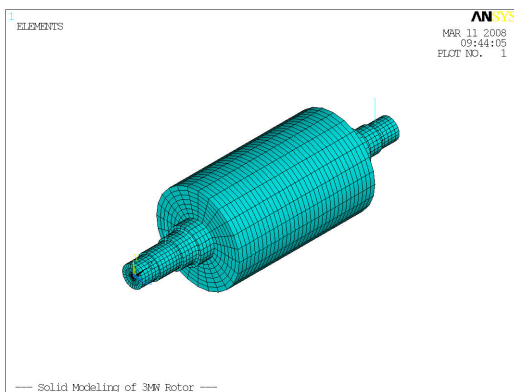


그림 3. rotor 의 모델링 된 상태

정적해석 수행 방법은 회전수 및 온도상승을 주요 부하로 적용하였다. 발전기 테스트 NEMA 규정상 발전기의 회전수가 1800 rpm 이하일 경우 125%의 회전수, 1800 rpm 이상일 경우 120%의 회전수를 오버스피드로 정하는 규정이 있으나 여기에서는 오버스피드 트립 조건을 130%로 적용하여

rotor의 해석을 수행하였다. 해석순서는 정격속도 1459 rpm 및 30% 오버스피드 트립 조건인 1896.7 rpm 으로 나누어서 하중조건에 따라서 단계별로 해석하였다. 첫 번째 하중 조건은 rpm 으로 하고 다음조건은 중력이 작용하는 상태, 기준 온도가 25°C 에서 70°C 로 상승하는 상태 마지막으로 90°C 로 상승하는 단계로 나누어서 해석을 수행하였다. 해석수행 결과는 표 2에 나타낸다. 해석결과 온도상승에 따른 변위는 상당히 크게 나타난다. 이 값은 축 방향으로 늘어나는 값으로 실질적으로 rotor 와 stator 사이의 간극에 미치는 값은 1459rpm 일 경우 온도 70°C 일 경우 168 μm (그림 4)이고 135MPa(그림 5)의 응력이 발생한다.

표 2. 정적해석 결과

Static analysis at 1459 rpm		
	Deformation(μm)	Von-Mises Stress(MPa)
Omega(152.7 rad/s)	17.0	5.72
Omega, Temp(70°C)	847.0	135.0
Omega, Temp(90°C)	1230.0	194.0
Static analysis at 1896.7 rpm		
Omega(198.6 rad/s)	28.7	9.68
Omega, Temp(70°C)	835.0	135.0
Omega, Temp(90°C)	1219.0	194.0

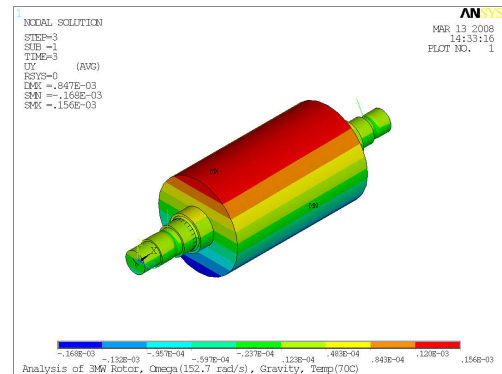


그림 4. 1459 rpm 에서 온도 70°C 로 상승 할 경우 반경방향으로의 변위, 이때의 최대변위는 168 μm 이다.

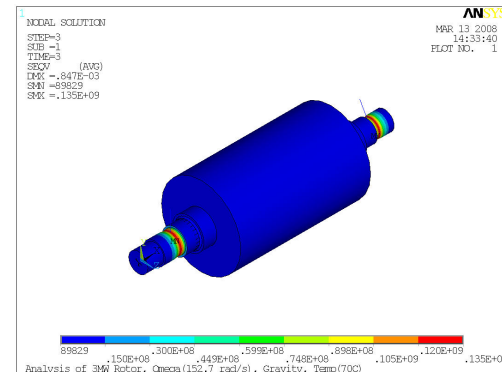


그림 5. 1459 rpm 에서 온도 70°C 로 상승 할 경우의 상당응력으로 베어링 부착 위치에 135MPa 의 힘이 작용한다.

3.3 Rotor의 모드해석

회전체의 질량 중심이 회전중심으로부터 편심되어 있거나, 불균형 질량이 존재하면 회전체는 불평형 상태에 있게 된다. 이러한 회전체의 회전속도가 증가할수록, 질량 편심에 의해 더 큰 불평형 원심력이 발생하며 이 원심력은 베어링과 지지부에 전달되어 구조물 진동의 원인이 된다. 따라서 회전체의 진동을 감소시킴으로써 기계의 수명을 증가시키고 기계의 성능을 향상시킨다. 회전수의 변화에 따라 모드해석을 수행하였다. 표 3에는 회전수 1459 rpm 일 경우 모드형상에 따른 주파수의 변화를 나타내며 그림 6-8에는 모드에 따른 주파수 형상을 나타낸다.

표 3. 회전수 1459 rpm 일 경우의 모드해석

First 8 Natural Frequencies		
Name	Mode	Frequency(Hz)
1st Frequency Mode	1	144.22
2nd Frequency Mode	2	250.01
3rd Frequency Mode	3	250.1
4th Frequency Mode	4	543.59
5th Frequency Mode	5	546.97
6th Frequency Mode	6	639.33
7th Frequency Mode	7	1295.7
8th Frequency Mode	8	1298.7

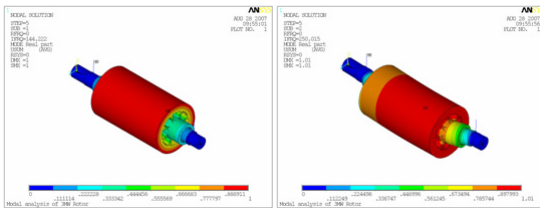


그림 6. 1st 및 2nd Frequency mode

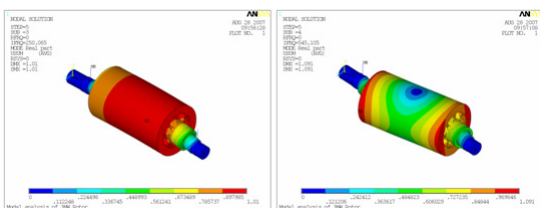


그림 7. 3rd 및 4th Frequency mode

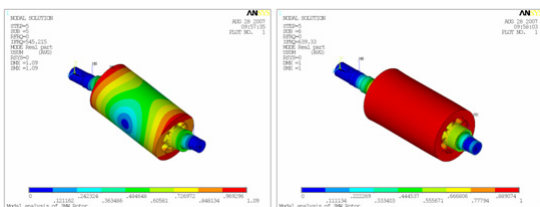


그림 8. 5th 및 6th Frequency mode

회전 기계류 설계에 사용되는 도표로 공진을 방지하기 위하여 여러 개의 공진 주파수에 대해서 축의 회전속도와 어떤 다른 가능한 가진 주파수들

을 선택하고 점검하기 위하여 Campbell Diagram을 구하였다. X축은 여러 가지 가진 주파수들 즉 회전속도(1X)를 Y축은 고유진동수들을 나타낸다. 해석수행은 오버스피드 트립 조건의 10배의 회전수를 적용하여 해석을 수행하였으며 해석 결과는 그림 9에 나타내었으며 critical speed는 발전기 사용 회전수를 훨씬 넘어서 발생함을 알 수 있다.

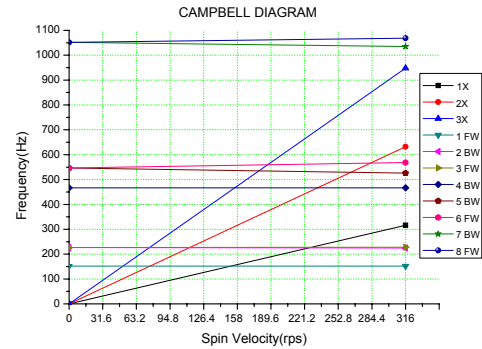


그림 9. Campbell Diagram

4. 결론

Rotor 구조해석은 정적 및 모드로 나누어 해석이 수행되었다. 일반적인 모드해석에서는 감쇠는 무시되지만 rotor dynamic에서는 자이로스코프 영향이 중요하다. 또한 베어링의 구속조건에 따라 모드 형상이 다르게 나타나므로 해석 시 충분히 구속조건을 검토하여야 한다. 본 논문에서는 로터의 동특성 해석을 알아보기 위한 초기단계의 해석을 수행하였다.

후기

본 연구는 (주)두산이 주관사이며 보국전기(주)는 참여기업으로 에너지관리공단의 지원을 받아 수행한 것이다.

References

- [1] 김동연 외, "800 kW 급 영구자석형 동기발전기의 개념설계", 포항풍력에너지 연구소, 포항공대, 2003.11
- [2] 양보석 "회전기계의 저진동 설계" 한국 소음진동 공학회 일반 기계분과 세미나 강연자료, 2001,4,27
- [3] 김동연, 이흥기, 한홍식, 정영규, 서형석, 정진화, 오만수, 광승근, 임민수, 최준혁 "3 MW 영구자석형 동기발전기의 공학설계" 2007년 한국풍력에너지학회 추계 학술대회 논문집, pp.117-122
- [4] K.N.Srinivas, R.Arumugam, "Static and Dynamic Vibration Analyses of Switched Reluctance Motors Including Bearings, Housing, Rotor Dynamics, and Applied Loads", IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, VOL.40, NO.4, JULY 2004