

750kW Gearless PM 동기발전기 로터프레임 경량화

*홍 혁수¹⁾, 박 진일, 류 지윤

Structural optimization for rotor frame of 750kW gearless type PMSG

*Hyeoksoo Hong, Jinil Park, Jiyune Ryu

Key words : direct drive, generator rotor frame, Taguchi method, sensitivity analysis, response surface method, parameter optimization, numerical singularity

Abstract : Mass of generator is one of the most important characteristic value especially direct drive type wind turbine. This paper introduce how to decrease mass of generator rotor frame without declining generator performance. To obtain optimal design of rotor frame, sensitivity analysis using Taguchi method and RSM(response surface method) are have been performed.

Nomenclature

- t : thickness, mm
- D : rotor diameter, m
- σ_y : yield strength, MPa
- n : rotor rotational speed
- N_t : number of tooth of stator core
- f_r : rotational frequency
- f_n : rotor eigenfrequency

subscrip

- DOE : design of experiment
- RSM : response surface method
- CCD : central composition design
- MPC : multi-point constraints

1. 서론

탄소 배출량 규제와 고유가의 이중고를 겪고 있는 에너지 산업에서 신 재생에너지에 대한 관심은 더욱 높아지고 있다. 이 중 풍력 발전은 가격대비 발전량이 가장 뛰어난 신 재생에너지로 최근 발전 산업에서 그 비중이 급속히 증가 하고 있다. 세계 전력 시장에서 풍력발전은 2010년까지 연간 25%의 성장이 기대 되고 있으며 이후에도 20%이상의 성장을 지속하여 2040년경에는 전체 전력 시장의 약 23%를 차지하게 될 것으로 기대되고 있다.¹⁾

풍력발전기는 구동방식에 따라 크게 기어형(geared type)과 직접구동형(direct drive type)으로 구분된다. 현 시장에서는 기어형의 발전기가 주류를 이루고 있으나, 증속기의 빈번한 파손에 의한 유지보수 부담에 대안으로서, 또한 동력 전달 장치를 간소화할 수 있다는 장점으로 인하여 직접구동형의 발전기 역시 최근 그 비중이 높아지고 있는 추세이다. 이러한 직접구동형의 풍력발전기는 기어형의 발전기에 비하여 저속의 고투크로 발전하게 되고 따라서 발전기의 직경이 크고 또한 무겁게 설계된다. 따라서 전체 풍력발전기에서 발전기가 차지하는 비중이 보다 크며 이에 따라 발전기의 구조설계 역시 더욱 큰 비중을 가지게 된다.

본 연구에서는 직접구동형 발전기 로터(rotor) 부분의 경량화를 위하여 개념 설계 및 각 부분의 치수 최적화를 수행하였다.

2. PM 동기 발전기 구조 특성

본 연구에서는 유니슨(주)에서 개발한 U50 PM 동기 발전기를 대상 모델로 최적화를 수행하였다. 초기 PM 동기 발전기의 특성은 table 1과 같다.

2.1 구조 특성

본 연구에서는 발전기 로터 부분 경량화를 위

1) 유니슨 풍력연구소
E-mail : hshong@unison.co.kr
Tel : (042)360-1123 Fax : (042)360-1119

하여 기존 설계시²⁾ 고려되었던 자중에 의한 정적 변위, 편심에 의한 자기력 균형이 맞지 않을 때의 변위 외에 토크에 대한 강성, 잠재적 진동원인 로터-자석 접합 rim의 local mode등을 고려하였다.

Table 1 Specification of PM Synchronous Generator

Rated power	807.6kW
Rated torque	324.5kNm
Maximum torque	1,000kNm
Rated rotational speed	25RPM
Rotational speed range	9-28RPM
Air gap diameter	3,320mm
Air gap size	4.5mm
Original rotor mass	4,194kg

자중에 의한 변위가 클 경우 air-gap의 크기를 변화 시키게 되어 자기력을 불균일하게 하는 문제가 발생한다. 또한 가공 및 조립공차 등에 의해 발생하는 편심에 의하여 자기력이 발생하게 되는데 이에 대한 강성이 충분치 않을 경우 더 큰 편심을 야기하게 되어 자기력의 불균일을 더욱 크게 만들 소지가 있다.

로터의 회전수는 9~28RPM으로 매우 저주파대역의 가진력을 가지므로 로터의 전체적인 거동에 의한 고유진동은 큰 문제가 되지 않는다. 하지만 slot opening에 의하여 자기장 ripple이 발생하게 되며 이에 따른 가진 주파수는 로터의 회전수와 stator core tooth의 개수의 곱으로 나타난다. 또한 이 가진력은 skew angle에 의하여 상대적으로 취약한 로터 rim의 local bending mode를 야기하는 형태의 나타나게 된다. 따라서 운전 영역에서 local mode가 가진되지 않도록 고유진동수 설계가 이루어져야 한다.

$$f_n \geq 1.05f_r = 1.05 \frac{n}{60} \times N_t \quad (1)$$

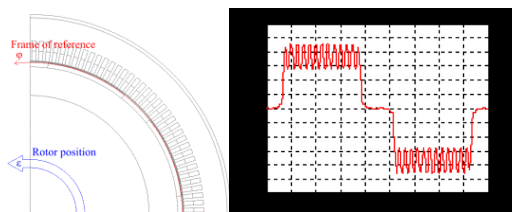


Fig. 1 Magnetic field ripple

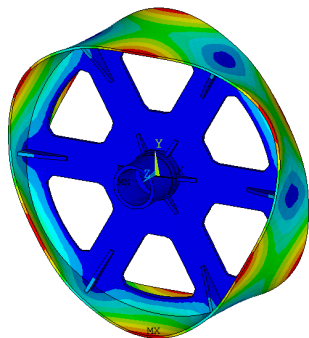


Fig. 2 Local mode shape of rotor rim

구조 해석을 위하여 상용 FEM 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였으며 로터 모델을 위해 2차원 형상함수(shape function)를 가지는 SOLID186 요소를 사용하였다. 또한 자석의 무게는 Young's modulus를 충분히 작게 하여 membrane 특성을 가지는 shell141 요소로 적용하였다. 해석 시 경계 조건은 로터 베어링 접합부를 자유도를 구속하였으며 자중은 가속도를 이용하여 적용하였다. 로터의 편심에 의한 자기력은 자기해석을 통하여 계산 후 가변 분포 하중으로 적용하였다(Fig.1). 구동 토크에 대해서는 MPC184 요소를 이용하여 축 중심으로부터 자석 접합 rim에 하중을 전달하였다.

Modal 해석시 로터 회전방향을 제외한 축방향과 방사방향의 변위만을 구속하여 해석을 수행하였다.

2.2 개념 설계

초기 모델 해석 결과 자석 접합 rim부의 국부 강성이 상대적으로 취약하여 air-gap의 국부 변위가 크게 나타나고 국부 모드 역시 운전 영역 대역에서 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 기존의 자중, 편심에 의한 자기력, 토크에 대한 강성을 유지하며 rim의 국부 강성을 높이는 방향으로 개념 설계를 수행하였다.

신규 설계는 베어링 지지부인 로터샤프트와 자기회로 역할을 하는 rim부분을 제외한 구조물에 대하여 이루어졌다.

용접심 개수 및 자재 손실등을 고려하여 생산성을 평가하고 구조 특성과 비교하여 초기 개념 모델을 선정하였다.

3. 최적화 설계

3.1 민감도 해석

초기 개념 모델로부터 Taguchi method³⁾를 이용하여 질량의 변화율, local mode의 고유진동수 변화율, 자기력 편심에 대한 강성, 구동 토크에 대한 강성에 대하여 민감도 해석을 수행하였다. 민감도 분석을 위하여 판의 두께, stiffner의 두께, 로터 rim 보강재의 두께, 개구부의 형상 변수 등 총 6개의 설계 변수에 대한 level 3의 L16 orthogonal array를 구성하였다. Fig. 3은 질량에 대한 민감도를 나타내며 table 2는 질량 변화율에 대하여 normalize된 민감도해석 결과를 나타낸다.

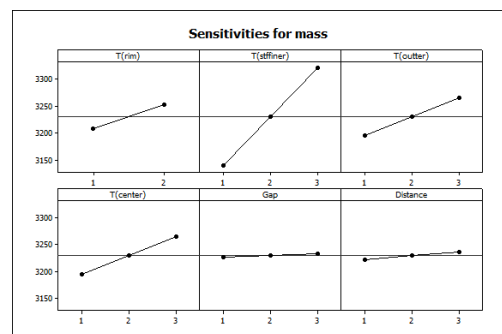


Fig. 3 Sensitivity for mass

Fig.3과 table 2의 결과를 토대로 개구부 디자인 변수의 민감도는 질량 대해서는 작지만 강성에는 비교적 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 rim 보강재의 두께는 고유진동수와 radial stiffness에 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Sensitivity rank

	Eigenfrequency	Torsional stiffness	Radial stiffness
T(rim stffiner)	1	6	1
T(stffiner)	2	5	4
T(shell outer)	6	3	5
T(shell inner)	5	4	6
Hole(gap)	3	1	2
Hole(dist.)	4	2	3

3.2 반응 표면법(RSM)

기존 로터프레임의 질량을 최소화하는 최적화 설계를 위하여 반응 표면법을 이용하여 근사함수를 도출하였다. 민감도 해석 결과로부터 설계변수를 줄이기 위하여 질량 변화에 둔감한 구멍의 형상을 강성을 최대화 하는 방향으로 고정하였다. 그리고 rim 보강재의 두께, stffiner의 두께, 안쪽과 바깥쪽 판의 두께 등 4개의 설계 변수에 대하여 31 run의 CCD를 구성하였다. 각 변수의 1차항과 제곱항, 그리고 각 변수 끼리의 곱의 함수로 RSM 근사 결과 고유 진동수에 대하여 99.99%, 비틀림 강성에 대하여 99.37%, 그리고 방사 방향의 강성에 대해서는 95.64%의 root mean square 오차를 보여 신뢰할만한 근사 결과를 얻을 수 있었다. 또한 질량에 대한 함수는 표면적으로부터 직접 유도하였다.

근사 함수를 토대로 식 (2)와 같은 변수 최적화를 수행하였다. 이 때 고유진동수에 대한 구속 조건은 식(1)을 이용하여 계산하였고, 비틀림 강성 및 방사방향의 강성은 기존 설계의 값과의 비율을 통하여 선정하였다. 또한 각 변수의 설계 범위는 제품의 크기 및 용접성등을 고려하여 선정하였다.

Table 3 Optimization result

Design characteristics	Original	Optimal	Improvement
Mass	4,194kg	3,297kg	21.4%
7th frequency	64.7Hz	115.4Hz	76%
torsional(ratio)	1	0.65	-35%
radial(ratio)	1	1.14	14%

제작성을 고려하여 최적화 결과를 정수단위로 반올림하여 재선정한 결과 table 3과 같은 설계 개선효과를 얻을 수 있었다. 최적화 결과 검증에 위해 최적 설계결과 모델을 FEM 해석하여 예측결과와 비교해 보았다. Table 4는 예측결과와 해석 결과의 오차가 약 1.3%로 근사화가 잘 되었음을 나타낸다.

$$\text{Objective function: } \min(\text{mass}) \quad (2)$$

$$\text{mass} = f(a, b, c, d)$$

$$\text{Constraints: } 7^{\text{th}} \text{ eigenfrequency} > C_1$$

$$\text{torsional stiffness} > C_2$$

$$\text{radial stiffness} > C_3$$

$$-1 \leq a, b, c, d \leq 1$$

Table 4 Prediction verification

Design characteristics	Prediction	FEM	Error
Mass	3,297kg	3,293kg	1.2%
7th frequency	115.4Hz	115.1Hz	0.3%
torsional stiffness(ratio)	0.65	0.64	1.3%
radial stiffness(ratio)	1.14	1.14	0.0%

4. 설계 결과

4.1 정하중 해석

3장에서 설계한 결과를 토대로 실제 로터에 적용하는 최대 하중 및 중력을 적용하여 변형 및 강도 평가를 수행하였다. 편심에 의한 최대 자기 하중 편차는 2ton이 작용하며³⁾ 자기력 분포는 편심에 발생한 방향으로 벡터 projection하여 (Fig.5) 적용하였다. 또한 발전기 short-circuit이 발생하였을 경우에 대하여 shrink disc slip torque인 1000kNm를 적용하였다. Table 5는 구조 해석 결과를 나타낸다.

Table 5 Result of coarse FE model

	Magnetic imbalance	Short-circuit
Air gap displacement(μm)	21.6 μm	156 μm
von Mises	10.5MPa	299MPa
von Mises w/o hot spot	-	125MPa
1st Principal	12.5MPa	361MPa
1st Principal w/o hot spot	-	119MPa

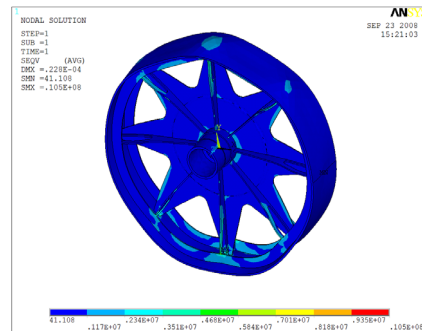


Fig. 4 Stress due to magnetic imbalance

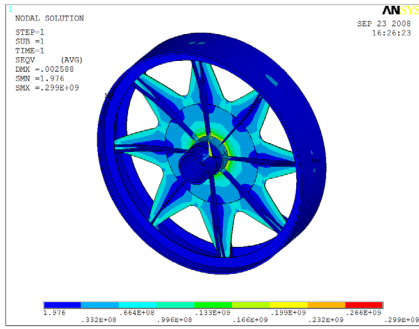


Fig. 5 Stress due to short-circuit

구조 해석 결과 편심자기력에 의한 변위와 하중은 구조적으로 문제가 되지 않음을 확인 할 수 있었다. 하지만 short-circuit 토크에 의한 응력 값은 용접심 접합부에서 von Mises 응력 299MPa, 첫 번째 주응력 361MPa로 매우 큰 값이 나타났다. 하지만 이는 numerical singularity와 메쉬 질이 낮음으로 인하여 발생하는 비현실적인 값이다. 따라서 sub model과 외삽법을 통하여 타당한 응력 값을 계산하였다.

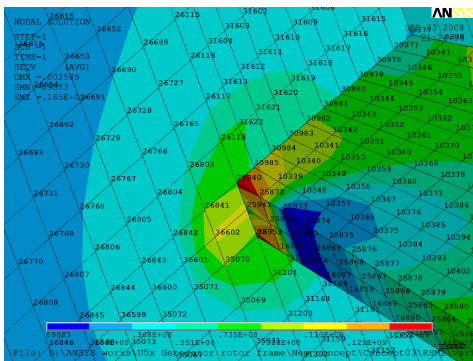


Fig. 6 Stress result of sub model

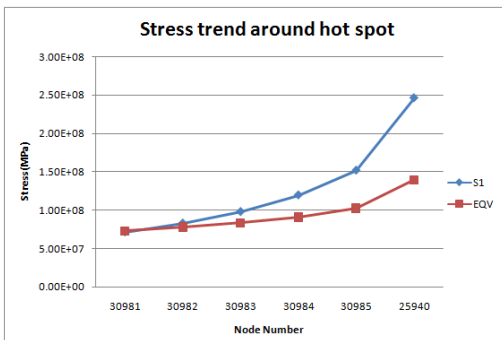


Fig. 7 Stress trend around hot spot

Table 6 Adjusted hot spot stress

	FEM	Extrapolation
von Mises(MPa)	139	115
1st Principal(MPa)	246	184

Fig.7은 hot spot 부근의 응력의 경향을 나타내는 것으로 numerical singularity에 의한 응력 증가가 있음을 확인 할 수 있다. Hot spot에서부

터 관 두께의 0.5t, 1t, 1.5t 떨어진 곳에서의 해석 결과로부터 2차 함수로 근사하여 외삽하면 table 6의 결과를 얻을 수 있다. Hot spot stress의 해석 결과로부터 안전율은 식(3)과 같다.

$$S = \frac{\sigma_y}{\gamma_m \sigma_{p1}} = \frac{234}{1.1 \cdot 184} = 1.16 \quad (3)$$

4.2 피로 해석

로터부에 작용하는 하중은 중력 및 편심에 의한 자기력 그리고 구동 토크로 구분된다. 이 때 중력 및 편심에 의한 응력은 10MPa로 피로파괴에 거의 영향을 미치지 못한다. 따라서 발전기의 피로 해석은 구동 토크의 uni-axial 문제로 해석 할 수 있다. Load time history를 FLEX5를 이용하여 계산 후 rainflow count를 이용하여 stress range data를 생성하였다. Weld seam의 S-N curve는 참고문헌[7]에 따라 D-curve로 선정하였고 재질 안전계수($\gamma_m = 1.15$) 및 두께 효과를 적용하여 계산하였다.

$$\log N = 12.164 - 3 \log \left[\gamma_m \Delta \sigma \left(\frac{t}{25} \right)^{0.2} \right] \quad (N < 1e7) \quad (4)$$

$$15.606 - 5 \log \left[\gamma_m \Delta \sigma \left(\frac{t}{25} \right)^{0.2} \right] \quad (N \geq 1e7)$$

식(5)는 피로 강도해석 결과를 나타낸다.

$$D = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{n_i}{N_i} = 0.074 \quad (5)$$

$$S = (1/D)^{1/5} = 1.68$$

5. 결론

750kW급 발전기 로터 프레임에 대하여 민감도 해석과 RSM을 이용하여 최적화를 수행하여 약 900kg의 질량 감소와 76%의 고유 진동수 상승 효과를 얻었다. 또한 sub model을 이용하여 정하중 및 피로 강도해석을 수행하고 구조 안전성을 검증하였다.

References

- [1] WIND FORCE 12, June 2005, EWEA and Greenpeace
- [2] 이흥기, 2005, "풍력발전기용 800 kW급 직접 구동형 발전기 개발", 한국신재생에너지학회 2005년도 춘계학술대회 논문집, pp. 76~79
- [3] Onwubiko, "Introduce to Engineering Design Optimization", Prentice Hall.
- [4] Myers, R. and Montgomery, D. C., 1995, "Response Surface Methodology-Process an Product Optimization Using Designed Experiments," John Wiley & SOns, Inc.
- [5] Tomas Frese, 2000, "Fatigue analysis of bolted and welded joints", NAFEM seminar
- [6] "Guideline for Design of Wind Turbines" 2nd Edition, 2002, DNV/Riso
- [7] "Fatigue design of offshore steel structure", 2008, DNV