

# Unison U50 직접구동 영구자석 발전기를 기반으로 한 900kW급 동기발전기 설계 및 최적화

\*김 태훈<sup>1)</sup>, 이 상우<sup>2)</sup>, 김 동언<sup>3)</sup>, 정 진화<sup>4)</sup>, 박 현철<sup>5)</sup>

## Design and optimization of 900kW class PMSG, based on Unison U50 model

\*TaeHun Kim, SangWoo Lee, DongEon Kim, Chinwha Chung, H.C.Park

**Abstract** : POSTECH Graduate School of Wind Energy is trying to upgrade the PMSG used for Unison U50 to 900 kW class. Intensive optimization efforts are carried out the reduce the axial size and total weight of the generator while increasing the rated output to 900 kW. The generator features 3.32m stator inner radius, 671mm stator length, 84 pole, 25 rated rpm and 31.6kN/m<sup>2</sup> shear force density. To reduce the gross weight, the stronger magnetic material is applied with optimal magnet size resulting lowest cogging torque. Also, instead of stator skewing the stator, the magnet position along the circumference is optimized to further reduce the cogging torque. This scheme eliminates the stator skewing procedure and may enhance the productivity. This method also reduces the total harmonic distortion. In this report, upgrade method, no-load line to line voltage and phase voltage, cogging torque, loss calculations and thermal analysis are presented.

**Key words** : Permanent Magnet (영구자석형), Synchronous Generator (동기발전기), Direct Drive (직접구동형), Optimization (최적화)

### Nomenclature

- $V_1$  : fundamental voltage
- $V_n$  : n-th order harmonic voltage
- $V(\theta)$  : phase voltage
- $V_{line}(\theta)$  : line voltage
- $\dot{\theta}$  : angular velocity of the rotor
- $L_{eff}$  : generator stator length
- $N$  : number of turns
- $h$  : heat transfer coefficient
- THD : total harmonic distortion

### 1. 서론

풍력발전기가 점차 대형화됨에 따라 무게의 경량화, 낮은 제작비용, 높은 신뢰성을 위한 직접구동 영구자석형 발전기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내에서는 Unison이 주도하여 750kW 풍력발전기에 사용 되는 800kW 영구자석 동기 발전기를 개발하여 상용화 하였다. 이 Unison U50에 사용된 영구자석 동기발전기는 gap diameter가 3,32m, stator 길이

707mm이다. 포항공과대학교 풍력특성화대학원에서 U50 발전기의 기존 형태를 유지하면서 턴수, 슬롯 깊이, 자석 길이, 자석 종류, 자석의 배치 방법 등 간단한 설계 요소 변경으로 960kW의 정격출력을 갖는 동기발전기를 설계하였다. 또한 2D FEM 해석을 통한 최적화 작업과 손실계산을 통한 열분석을 하였다. 본 보고에서는 그 절차와 결과에 대해서 요약한다.

### 2. 접근 방법

공극간극, 공극직경 등의 대부분의 Parameter 들은 기존의 값을 유지한다. 정격 출력은 960kW 이고 인버터 IGBT 정격을 고려한 정격 선간 전압

- 
- 1) 풍력특성화대학원, 포항공과대학교  
E-mail : dasar i8@postech.ac.kr  
Tel : (054)279-0583 Fax : (054)279-0589
  - 2) 풍력특성화대학원, 포항공과대학교  
E-mail : plzstopme@postech.ac.kr  
Tel : (054)279-0583 Fax : (054)279-0589
  - 3) 풍력특성화대학원, 포항공과대학교  
E-mail : dekim@postech.ac.kr  
Tel : (054)279-1811 Fax : (054)279-1799
  - 4) 풍력특성화대학원, 포항공과대학교  
E-mail : cwchung@postech.ac.kr  
Tel : (054)279-1008 Fax : (054)279-0589
  - 5) 풍력특성화대학원, 포항공과대학교  
E-mail : hcpark@postech.ac.kr  
Tel : (054)279-2167 Fax : (054)279-0589

은 660Vrms로 하였다. 기존 보다 전압이 낮아지고 출력은 높아 졌으므로 전류는 기존보다 높아야 한다. 전류에 영향을 미치는 요소로는 turn 수, 직렬연결 자극쌍의 수, 전류 밀도 등이 있다. 본 연구에서는 turn 수를 조정 하였다. 기존 한 코일당 10 가닥 5 turn에서 16가닥 4 turn으로 하였다. 이에 따라 기존의 도체보다 작은 크기의 도체(8.5mm × 2.8mm)를 사용하였으며 슬롯의 깊이를 기존 52mm에서 보다 깊은 64mm로 하였다. 또한 stator의 길이를 509mm에서 671mm로 변경하여 900kW급 shear force density를 만족하도록 하였다. 그리하여 기존의 전류 밀도와 회전 속도를 유지 하면서 원하는 전압과 전류를 달성 하였다. 또한 자석을 높은 보자력을 갖는 자석으로 교체하고 한 주기의 자석 배치를 전기각 30도 이동하여 코킹 토크와 고조파 저감을 유도하였다. 따라서 2 pole pair가 1주기가 되도록 하였으며 이에 대한 자속의 분포가 그림 1에 나타나 있다. 또 이런 설계 변경에 의한 주요 parameter가 기존 동기발전기와 비교하여 표1에 나타나 있다. 다음은 주요 설계 변경사항은 다음과 같다. (1)턴 수가 10개 도체 5turn에서 16개 도체 4turn 으로 변경, (2) Slot의 깊이가 52mm에서 64mm로 깊어짐, (3) Stator의 길이가 707mm에서 671mm로 짧아짐, (4) 보자력이 강한 자석 사용, (5)전류가 높아 짐에 따라 joule 손실 1kW 증가, (6)Stator 코일의 최고 온도가 119도로 추정

표 1 U50 영구자석 동기발전기의 기존 및 Upgrade 후의 주요 Parameter

Parameter	U50	U50H
Apparent Power (kVA)	837.6	1007
Power factor	0.963	0.954
Rated Voltage (V)	792.7	660.6
Rated Current (A)	610.1	880
Rated Power (kW)	807.3	960.6
Rated rpm	25	25
Number of Poles	84	84
Magnet model	N38UH	N40SH
Frequency (Hz)	17.5	17.5
저항 (mOhm)	35.0	17.5
Ls (mH)	3.64	2.36
최대 운전환경 온도(C)	40	40
Efficiency	94.4	94.9
직렬연결 자극쌍의 수	14	14
Turns/Coil	5	4
자극간극 (mm)	4.5	4.5
Stator 내부반경 (mm)	3320	3320
Stator 길이 (mm)	705	671
Q (슬롯수/상/극)	1	1
Slot depth (mm)	52.0	64.0
Slot width (mm)	20.7	20.7
도체 크기 (mm <sup>2</sup> )	8.5×3.6	8.5×2.8
Joule Loss (kW)	39.0	40.6
No load Loss (kW)	9.0	10.6
Shear force density (kN/m <sup>2</sup> )	25.3	36.7

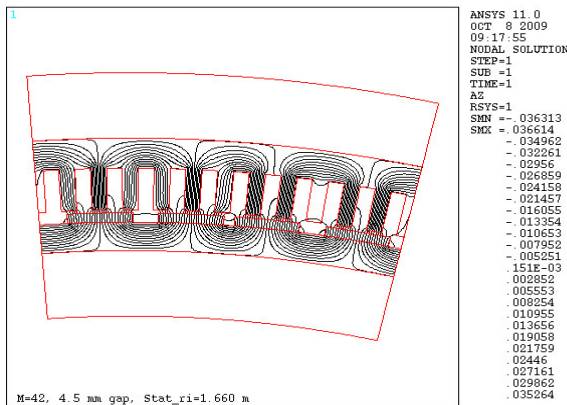


그림 1 발전기의 1주기 형상 및 자속 분포

### 3. 무부하 전압 파형 및 고조파

그림1에 나타난 model의 rotor를 회전시키면서 각 상에 linke되는 flux linkage를 계산하고 그 결과를 미분하여 phase voltage 를 다음과 같은 방식으로 계산한다.

$$V(\theta) = \frac{d\Phi}{dt} = N \frac{d\Phi'}{dt} L_{eff} \dot{\theta}$$

Line to line voltage는  $2\pi/3$  떨어진 상전압의 차이로부터 구한다. (1)

$$V_{line}(\theta) = V(\theta) - V(\theta - 2\pi/3)$$

이와 같은 절차로 계산된 상전압과 선간전압

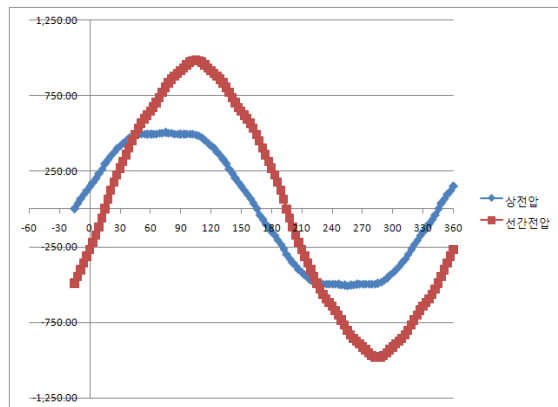


그림 2 무부하 상전압과 선간 전압 파형

의 파형이 그림2에 나타나 있다. 선간전압의 THD는 약 2.9%로 추정되었다. 그림3에는 선간전압의 고조파별 크기를 fundamental 전압 값으로 규격화 하여 나타내었다. 5차 고조파가 THD의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.

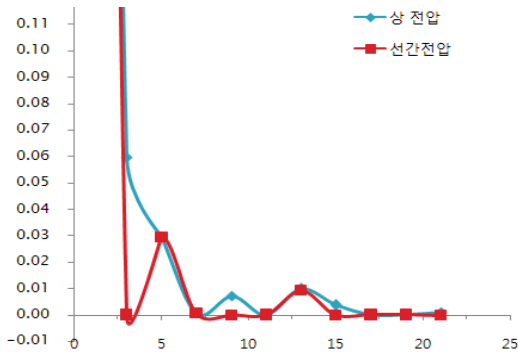


그림 3 상 전압과 선간 전압의 고조파 성분 분석

#### 4. 코깅 토크

코깅 토크(cogging torqu)는 영구자석이 안정 위치에서 벗어남으로써 안정 위치로 복귀하려는 힘을 말한다.<sup>(6)</sup> 이 코깅 토크가 크면 발전기의 기동이 어렵고 운전 중 소음과 진동 발생의 원인이 되며 발전기 성능 저하의 요인이 된다. 이를 저감하기 위한 방법은 오래전부터 연구되어져왔다. 자석의 형상을 뿔모양으로 하는 방법, 자석의 폭을 조절하는 방법, skewing을 이용하는 방법, 코어를 없애 코깅토크를 줄이는 방법, 위의 방법들을 복합적으로 이용하는 방법 등 많은 논문에서 코깅 토크를 다루었다.<sup>(2)</sup> 그 중 가장 많이 사용하는 방법이 stator의 slot을 skewing하는 방법이다. 그러나 skewing은 제작에 있어서 stacking이 어렵고, stator의 길이가 길어지며 그에 따른 공정의 어려움과 제작비 상승의 요인이 된다. 이에 본 논문에서는 한 주기의 자석의 배치를 슬롯 반 주기(전기각 30도) 이동하여 자석 주기에 변화를 줌으로써 skewing 효과를 얻고자 하였다. 한 주기의 자석이 불안정 위치에 있을 때 다른 한 주기의 자석은 안정위치에 있음으로써 코깅 토크를 줄일 수 있는 것이다. 그림 4는 자석위치에 따른 코깅토크를 비교한 것이다. 전기각 30도에서 최적이며 규격화한 코깅 토크는 정격토크의 0.79%이며 800kW 발전기의 코깅 토크 1.48%의 47% 수준이다.

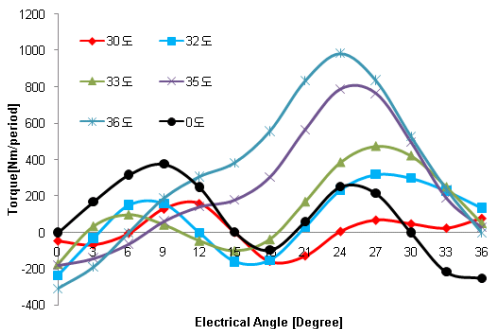


그림 4 자석 위치에 따른 코깅 토크 변화

#### 5. 열 해석

기존 800kW의 열해석과 동일한 조건하에서 분

석하였다. 도체 외에 절연물, wedge 등은 부도체의 열 전도율을 갖는다고 가정하였다. 또 외부 water channel과 stator 외경 사이의 열접촉(Thermal contact)이 불확실한 면이 있어 여기에서는 실험적으로 약 50%가 접촉하고 있다고 가정하고 모델링 하였다. 냉각수 채널에서의 열전달 계수  $h$ 는  $1000 \text{ W/m}^2/\text{K}$ 를 사용하였다. 실험적인 상관관계로는 더 효율적인 냉각이 가능한 높은 값이 나오지만 장기적인 사용으로 인한 fouling factor에 의해서 열전달 효과가 제한되는 것을 고려하였다. 이런 가정 하에서 Joule 열과 stator yoke, stator teeth에서의 발열을 고려하고, 외기온도  $40^\circ\text{C}$  기준으로 냉각수 최대온도  $56^\circ\text{C}$ 를 가정한 2D 계산결과가 그림 5에 나타나 있다. 코일에서의 최대온도는  $119^\circ\text{C}$ 로 추정되었다. 이는 기존 800kW 모델 열분석에서 최고온도  $125^\circ\text{C}$ 에 비해 약  $6^\circ\text{C}$  낮은 값이며 F class의  $145^\circ\text{C}$  아래임을 알 수 있다.<sup>(1)</sup>

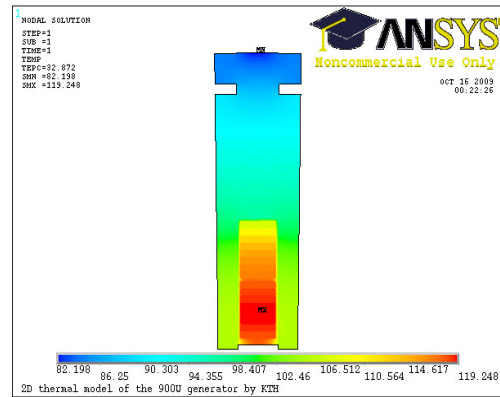


그림 5 열 분석. 최고 온도 119도

#### 6. 결론

이 논문에서는 Unison U50 모델의 800kW급 직접구동형 풍력발전기의 기본적인 parameter를 유지하면서 900kW급 동기발전기로 upgrade하였다. 최적화 설계를 통해서 길이를 707mm에서 671mm로 5% 줄이고 효율 또한 94.4%에서 94.9%로 약 0.5% 향상 시켰다. 그러나 전류가 증가하고 정격이 높아짐에 따라 joule 손실과 무부하 손실이 각 1kW 정도 더 증가하였다. 주목할 만한 것은 회전자 자석의 배치를 달리함으로써 코깅 토크와 전 고조파 왜곡에서 skewing 효과와 유사한 결과를 도출할 수 있었다는 것이다. 이 방법을 이용하여 회전자의 길이를 약 5% 줄이고 skewing작업으로 인한 제작의 난해함을 해결할 수 있다.

요약하면 최소한의 설계 변경과 최적화 및 손실 계산, 기초적인 2D 열 해석을 통하여 보다 높은 성능과 효율을 지닌 발전기를 설계 할 수 있으며 shear force density를  $36.2 \text{ kN/m}^2$ 으로 State of art 급으로 개선할 수 있었다.

## References

- [1] 김동연, 김태훈, 이상우, 정진화, 박현철, "Unison U50 직접구동 영구자석 발전기의 최적화" 한국신재생에너지학회 추계학술대회 2009.6.
- [2] E. Muljadi and J. Green, "Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator", 21st American Society of Mechanical Engineers Wind Energy Symposium Reno, Nevada January 14-17, 2002
- [3] Liyi Li, Xuzhen Huang, Baoquan Kao, Baiping Yan "Research of Core loss of Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM) in AC Servo System", ICEMS 2008. International Conference on 17-20 Oct. 2008 Page(s):602 - 607, 2008.
- [4] A. Grauers, "Design of Direct-driven Permanent magnet generator for wind turbines", Ph.D Thesis, Chalmers University of Technology, 1996.
- [5] Pia Salminen, "Fractional slot permanent magnet synchronous motors for low speed applications" Ph.D Thesis, Lappeenranta University of Technology, 2004
- [6] 고흥석, 김광준 "영구자석을 사용한 모터의 코깅토크에 관한 이론적 해석", 대한기계학회 논문집 A권 제24권 제7호, pp.1795~1800, 2000
- [7] ANSYS 11.0, <http://www.ansys.com>