

## 풍력발전기용 800 kW급 직접구동형 발전기 개발

이 흥기<sup>1)</sup>, 김 동연<sup>2)</sup>, 서 형석<sup>3)</sup>, 한 흥식, 정 영규, 이 월우, 박 기현, 정 진화,

임 민수\*, 오 만수\*

포항풍력에너지연구소 포항공과대학교, (주)보국전기\*

### Development of 800 kW class Direct Drive Synchronous Generator for WECS

H.G Lee<sup>1)</sup>, D.E Kim<sup>2)</sup>, H.S Suh<sup>3)</sup>, H.S Han, Y.G Jung, W.W Lee, K.H Park,

C.W Chung, M.S Lim\*, M.S Oh\*

POWER-C POSTECH, BoKuk Electric Ind. Co.\*

Key words : Direct Drive(직접구동), Permanent Magnet(영구자석), Air Gap(공극)

**Abstract :** 포항풍력에너지연구소와 (주)보국전기는 에너지 관리공단의 지원으로 2002년부터 직접구동형 풍력터빈(KBP-750D)에 사용될 발전기 개발을 시작하여 2005년 3월 개발을 완료하였다. KBP-750D에 사용되는 발전기는 증속을 위한 gearbox를 사용하지 않는 직접 구동형이고, 영구자석을 사용하여 여자하는 형식이다. 이런 특징은 풍력발전에서 요구하는 주요 요구조건인 고 효율, 고 신뢰성을 만족시키기 위해서 매우 중요하다. 개발된 발전기는 25 rpm에서 800 kW의 정격을 가지도록 설계되었다. 공극 직경은 3,320 mm이며, stator의 길이는 705 mm, 공극은 4.5 mm 이고, 극수는 84이다. 또한 전체 중량은 약 22 ton이다. 이 논문에서는 발전기의 물리설계, 공학설계, 제작 및 시험결과에 관해서 기술한다.

#### subscript

WECS : wind energy conversion system

FEM : finite element method

RFPM : radial flux permanent magnet

델발전기를 제작하여 그 특성을 측정, 분석하였다 [6]. 이 논문에서는 800 kW 본제품 발전기의 물리 설계, 기계설계, 제작 및 시험결과에 대해서 기술한다.

### 1. 서론

신재생 에너지의 중요한 한 축을 담당하고 있는 풍력발전기에 사용되는 발전기는 크게 나누어 증속기를 사용하는 비동기 유도발전기형과 증속기를 사용하지 않는 직접구동형이 있다. 두 방법 모두 각자의 장점이 있으며 증속기를 사용하는 형이 시장에서의 주도적 위치를 차지하여 왔으나 점점 증속기를 사용하지 않는 직접구동형 풍력발전기도 시장점유율을 높여 가고 있다. 이와 관련하여 직접구동형 발전기에 관해서 그동안 많은 진전이 국외에서 있었고[1-2], 국내에서도 전기연구소를 중심으로 관련 연구가 있어왔다[3-5].

포항풍력에너지 연구소는 (주)유니슨이 주관사업자로 개발 중인 직접구동형 750 kW 풍력발전기에 사용될 800 kW급 직접구동형, 영구자석 동기발전기를 (주)보국전기와 개발하였다. 이와 관련하여 2003년에는 본 제품과 같은 형의 20 kW 급 모

### 2. Magnetic Geometry 와 주요 Parameters

특정 용도의 최적화된 발전기를 설계하는 것은 많은 변수들이 개입되어 있으므로 그 parameter space 가 매우 넓다. 여기에서는 발전기의 주요 parameter를 결정하는 각각의 근거에 대해서 논의하고 최종적인 magnetic geometry와 parameter에 대해서 기술한다.

- 
- 1) 포항풍력에너지연구소 포항공과대학교  
E-mail : lhg@postech.ac.kr  
Tel : (054)279-1817 Fax : (054)279-1399
  - 2) 포항풍력에너지연구소 포항공과대학교  
E-mail : dekim@postech.ac.kr  
Tel : (054)279-1811 Fax : (054)279-1399
  - 3) 포항풍력에너지연구소 포항공과대학교  
E-mail : suhhs@postech.ac.kr  
Tel : (054)279-1819 Fax : (054)279-1399

공극직경: 공극직경은 전체 발전기크기와 연결되어 있다. 일반적으로 같은 토크에서는 Active material의 소재비용은 직경이 크고 길이가 짧아질수록 작아진다. 한편 내경이 커짐으로써 그에 따른 구조물의 제작비용이 커지고 국내 도로 상황에서 운송에 문제가 있다. 이와 같은 배경을 감안하여 필요 고정자 내경을 3,320 mm로 결정되었다. 고정자 요크의 두께는 자속이 포화되지 않도록 하면서 구조적인 강도를 가질 수 있고 필요한 Ampere turn을 수용할 수 있도록 정하였다.

공극: 자석과 고정자 내경의 간격은 4.5 mm를 사용하였다. 통상적으로 자극간격은 직경에 비례하며 대형의 경우 0.1 %에서 소형의 경우 1 %까지 허용한다. 공극의 크기를 결정하는 근거는 운전시의 회전자, 고정자사이의 온도차에 의한 열팽창의 차이, 베어링의 유격, 고정자의 기계적 가공/조립 오차 등이다. 영구자석의 투자율이 낮기 때문에 (약 1.05) 자기적인 공극은 자석두께와 기계적 공극을 더한 값이다. 이것은 발전기의 성능이 기계적 공극의 오차에 크게 의존하지 않는 좋은 점이 있다.

전류밀도: 보통 fan을 이용하는 강제 공냉방식의 발전기나 모터에서는 6-8 A/mm<sup>2</sup> 정도의 전류밀도를 사용하지만, KBP-750D의 경우는 보호등급 IP54 의 완전 밀폐형을 고려함으로 냉각능력이 강제 공냉방식 보다 떨어져, 사용 전류밀도가 낮다. KBP-750D는 열분석과 냉각능력을 생각할 때 3.5 A/mm<sup>2</sup> 로 설계하였다.

Magnet의 두께, 폭, Grade: 영구자석의 치수는 필요한 자속밀도, 단락사고시의 역자장에 의한 탈자 방지, torque ripple의 최적화 등에 의해서 결정되었다. 자석두께 14 mm 일 때 기준이 되는 공극자속밀도는 약 0.87 Tesla 정도이다. 단락사고시에도 탈자 되지 않기 위한 조건은 참고문헌에 기술되어 있다[5]. 한편 영구자석의 폭에 따라서 torque ripple이 크게 변한다. Torque ripple은 불필요한 진동, 소음, 피로를 발생시키므로 torque ripple을 최소화시키기 위하여 자석의 폭을 최적화 하였고 stator slot을 1 slot pitch 만큼 skewing 하였다. Skewing에 의한 효과는 뒷부분에 따로 기술되어 있다. NdFeB 자석의 grade는 반복된 온도상승 의한 성능 열화의 위험을 최소화하기 위하여 연속사용 가능온도가 160 °C 인 NEOMAX 33UH 급을 선정하였다.

권선수: 한 slot에는 20개의 도체가 들어가며 2개의 도체가 한 turn을 이룬다. 14개의 pole pair가 직렬로 연결되어 있으며 3개의 직렬단위는 병렬로 묶여있다. 이런 조합은 후단의 인버터에 적절한 전압을 공급하고 각동선을 사용하여 제작에서의 품질제어 수준을 높이기 위함이다.

열분석 :도체와 stator, rotor에서의 온도상승을 추정하기 위하여 상용 FEM code를 사용하는 2D 열분석을 수행하였다[7]. Ohmic 손실은 stator slot에 균일하게 분포시켰으며 철손과 기타 손실은 고정자 teeth 와 yoke 부분에 각각의 기여분에 따라서 분포시켰다. 철손을 분포시키는 방법에 따른 분석결과의 민감도를 조사하였으나 분포방법에 따른 최대온도 상승의 변화가 1 °C 이하로 둔감하여 철손의 분포를 개략적으로 하여도 최종결과표

표 1 800 kW 본제품 발전기의 주요 parameters

Parameters	Power Factor
	Controlled Case
구동 토크	324.5 kNm
정격 rpm	25 rpm
권선수	10
고정자 상전류	199.3 A <sub>rms</sub>
단락전류비 (I <sub>sc</sub> /I <sub>n</sub> )	2.748
Ampere's Turn	2818 A <sub>peak</sub>
권선손실 (90°C 기준)	31.5 kW ~ 37.9 kW
철손과 기타손실	4.96 kW
정격부하시 선간전압	779.9 V <sub>rms</sub>
정격출력	807.6 kW
고정자 전류밀도	3.323 A <sub>rms</sub> /mm <sup>2</sup>
저항/상/시리얼 단위	88.2 mΩ
상 인덕턴스/동기 인덕턴스	6.30 mH/ 7.84 mH
주파수	17.5 Hz
효율	94.5 % ~ 95.6 %
위상각/역률	~ 10.5°/0.983
정격전류	597.9 A <sub>rms</sub>

에는 크게 차이가 없었다. 슬롯단면에서 도체수직 방향으로의 열전달율은 순수구리의 1/222 로 계산하였다[2]. 이것은 슬롯이 절연물을 포함하는 도체로 이루어진 것을 고려한 것이다. 고정자 외경 부분에 매 5 슬롯마다 냉각채널을 설치하였다. 2차원 FEM 열분석 결과가 그림 1에 나타나 있다. 냉각수량이 충분한 경우에 냉각수의 온도상승은 약 17 °C이었고 고정자 도체부분에서의 최대 온도상승은 약 50 °C로 계산되었다. 따라서 최대운전 가능 대기온도를 40 °C로 가정하면 권선의 최대온도는 약 107 °C임을 알 수 있다. 107 °C의 권선온도는 예상되는 0.3 ~ 0.4 power factor에서 F급 절연 등급에서 20년 수명을 보장하기 충분하다. 냉각수의 냉각은 Oiltech 사의 LAC-112-8-A 방열기를 사용하여 외부에서 냉각한다[8]. 이런 수냉식을 택함으로써 발전기내부를 보다 완벽한 IP54등급으로 보호할 수 있다.

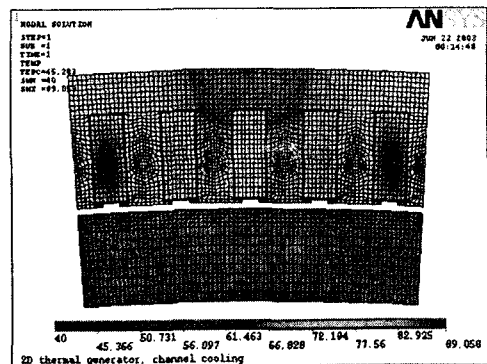


그림 1 Slot에서의 온도상승 분포. 냉각수 온도는 40 °C 기준이고 최대 온도상승은 약 50 °C이다.

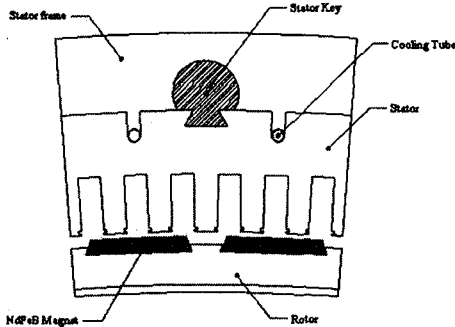


그림 2 Stator와 rotor의 부분 단면도.

최종 자기 Geometry 및 부하곡선: 실제 자기구조는 분석된 구조와 조금 차이가 있으나 그 차이는 미미한 것으로 계산 되었다. 최종적인 회전자, 고정자의 한 주기가 냉각 채널과 함께 개략적으로 그림 2에 나타나 있다. 최종적인 발전기의 주요 parameter들은 표1과 같고 부하 전류에 따른 부하 전압이 순수저항 부하일 때의 경우와 역률이 인버터에 의해서 능동적으로 제어될 경우에 대해서는 그림 5에 나타나 있다.

Skewing을 통한 torque ripple 감소: 회전자의 각도에 따라서 torque가 변하는 torque ripple은 진동과 소음을 발생시킬 수 있고, 피로를 가중시켜 발전기 수명에 영향을 줄 수 있기 때문에 가능하면 최소화되어야 한다. 또 무부하 상태의 torque ripple은 발전이 가능한 시동 torque에 영향을 주며, 낮은 torque ripple은 풍력발전기의 시동 풍속을 낮추는데 도움이 된다. Skewing은 stator와 rotor에 인위적인 위상차를 주어서 각도에 따른 torque 변화를 평균화하여 torque ripple을 줄이는 효과가 있다. 한편 이런 skewing은 고정자 전류와 회전자의 위상차를 증가시켜 전체적으로 torque를 낮추는 부정적인 측면도 있다. 따라서 skewing은 torque ripple 감소라는 목적을 위하여 평균 torque를 어느 정도 낮추는 절충이라고 말할 수 있다. 보통 torque ripple을 계산하기 위해서는 발전기를 여러 부분으로 나누어서 계산하거나 번거로운 3차원 계산이 필요하다.

### 3. 구조해석 및 제작검사

구조해석: 발전기의 구조해석은 rotor 및 stator부를 구분하여 해석을 수행하였으며, 각부의 최적설계를 위하여 ANSYS 프로그램을 이용하여 각 중요부의 두께 변경 및 rib를 부착하여 해석을 수행하였다. 무게를 줄이기 위하여 rotor 및 stator의 변경 가능한 부분의 치수를 변경하면서 해석을 수행하여 최적화 하였다. Static analysis 및 modal analysis를 수행한 다음, stator의 skew bar를 고정하고 end-shield bracket 두께를 변경하면서 해석하여 최적의 두께를 결정함으로써 무게를 최소화하였다.

Rotor부의 해석을 수행한 소재는 SM45C를 사용하였으며 해석 시 사용한 element type은

"SOLID95 3-D 20-Node Structural Solid"를 사용하여 해석을 수행하였으며, 해석시 경계조건은 베어링 부착지점에 구속하였으며 하중은 자중상태 및 편심이 생겼을 경우 자기력이 작용하는 것을 가정하여 해석하였다. 해석결과 자중상태에서의 rotor의 변위는 6.4  $\mu\text{m}$  이며, 편심이 발생하였다고 가정할 경우 최대변위는 33.5  $\mu\text{m}$ 이고 최대응력은 5 MPa 이다. 아래 그림 3은 rotor의 최대변위를 나타낸다. Stator부의 해석을 수행한 소재는 SS400을 사용하였으며, 해석시 경계조건은 베어링 부착지점에 구속하고 torque lever 부착지점에 회전을 구속하였다. 하중은 자중상태, 토크가 1000 kNm가 작용할 경우 및 편심이 생겼을 경우 자기력이 작용하는 것을 가정하여 해석하였으며, 해석결과 stator의 자중상태의 변위는 89  $\mu\text{m}$ 이며 토크가 1000 kNm가 작용할 경우는 424  $\mu\text{m}$ 이며 토크 및 자석의 편심이 발생할 경우의 최대변위는 422  $\mu\text{m}$  이고(그림 4) 최대응력은 128 MPa 이다.

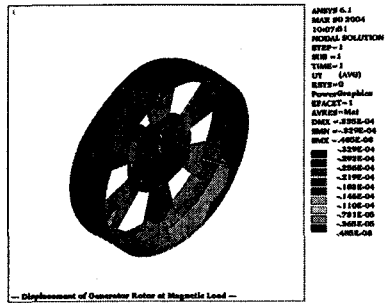


그림 3 Rotor의 변위. 편심이 발생할 경우 최대변위는 33.5  $\mu\text{m}$ 이다.

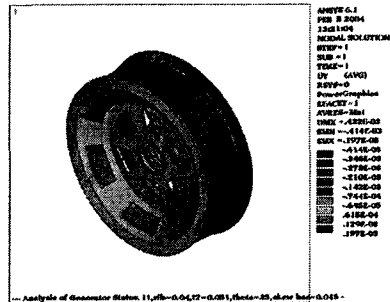


그림 4 Stator의 변위. 토크작용 및 자석의 편심이 발생할 경우 최대변위는 422  $\mu\text{m}$ 이다.

발전기 제작검사: 발전기 제작 검사는 공정검사 및 성능시험으로 분류하여 검사를 수행하며, 공정검사는 부품검사, 조립검사를 구분하여 수행하였다. 수행한 공정별 중간검사로는 stator와 rotor의 구성부품과 부분조립품 및 최종조립품 등에 대하여 설계기준에 부합하는지의 여부와 제조공정 자체의 적합성 등을 측정, 검사 및 시험을 하였다. Stator는 적층된 stator core의 검사를 통해 각각의 core간의 손상 여부, 간격여부, skew pitch 확인, 동심도 등을 측정 하였다. Rotor는 영구자석을 고정하여 회전체로서의 중요역할을 하

는 부분으로, 베어링 조립부 및 shrink disk 조립부로 정밀공차를 적용하였다. 다음은 전기적인 검사로 권선저항 측정법, 절연저항 측정법, 내압시험 및 극성시험으로 나누어서 전기적인 특성을 수행하였다. 권선저항 측정의 경우 전체 3병렬 회로의 각 회로별 선간 저항측정 및 중성점과 각 상과의 권선저항을 측정하였다. 일반적으로 발전기 제작 시 각 저항값이 평균값의 5%이내에 들어올 경우 양호한 것으로 판단한다. 절연 저항 측정은 rotor를 삽입하기 전 stator상태에서 발전기의 출력단자와 frame간을 절연 저항계를 접속하여 측정하였다. 측정값은 2 GΩ으로 규정보다 6배 이상 양호하였다. 내압 시험의 경우 일반 발전기에서 정격전압의 2배+1000V의 60 Hz AC 전압을 출력 단자와 frame에 1분간 인가하여 누설전류가 100 mA 이내일 경우 양호한 것으로 본다. 극성 시험은 권선을 stator 코어에 삽입 후 권선에 흐르는 전류 방향이 설계대로 삽입되었는지를 확인하였다. 이를 위해 발전기 출력단자의 각 상과 중성선 사이에 DC 6 V를 인가하여 stator를 여자한 후, 나침반으로 모든 권선의 전류 방향을 측정하였다.

#### 4. 발전기시험

25 rpm일 때의 측정 부하전류와 전압을 CDR의 설계치와 비교하면 표 2와 같다. 측정치에서는 3상을 평균한 값을 사용하였다. 여기서 전압은 선간전압이 아니라 상전압을 나타낸다.

표 2 전압의 측정치와 설계치 비교

I (Arms)	V (측정치)	V (CDR)	V (측정치) / V (CDR)
116.3	488.5	470.5	1.038
255.0	479.5	461.1	1.040
378.8	468.0	449.7	1.041
499.37	453.7	435.8	1.041

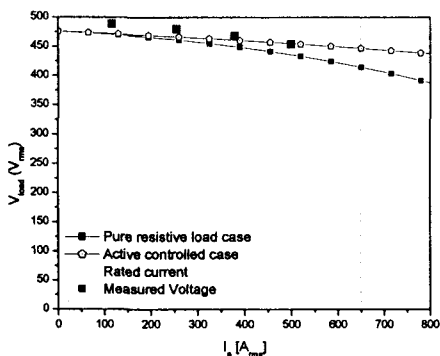


그림 5 Load 전류에 따른 부하전압의 변화. 열린 원은 역률이 인버터에 의해서 능동적으로 제어될 때이고, 검은 사각형은 능동적 역률 제어 없이 순 저항부하일 경우이고, 사각점은 측정된 전압입니다.

설계치와 측정치를 동시에 비교한 그래프가 그림 5에 나타나 있다. 측정치는 순저항 부하폭선과 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 inverter를 연결해서 실험할 때 active power factor control을 하지 않았다는 것을 의미한다.

설계치와 비교하면 측정치가 약 4%정도 높은 전압을 보여주고 있다. 그것은 설계가 영구자석 온도상승 약 70 °C를 가정하였기 때문이다. 상온에서의 영구자석은 약 7.5% 특성이 좋아지고 따라서 6-7% 정도의 전압이 올라가게 된다. 따라서 지금의 측정치는 오히려 설계치에 비해서 약 2% 정도 적은 것이라고 말할 수 있다. 그 이유는 자기적인 특성이 설계와 조금 차이가 있거나 자석을 고정하기 위한 wedge 모양이 설계에 반영되지 않은 결과 일 수 있다. 이 정도의 차이는 stator정격 전류를 조정하여 출력을 조절할 수 있다.

#### 4. 결론

이 논문에서는 에너지 관리공단의 지원으로 (주) 유니슨이 주관하여 개발한 750 kW 직접구동형 풍력발전기에 사용되는 영구자석형 RFPM 발전기의 설계에 대해서 기술하였다. FEM tool들을 사용하여 자기, 열, 구조분석을 행하였으며 실현가능하고 효율적인 발전기를 설계하였다. 더 상세한 내용은 참고문헌에 기술되어 있다[9]. 이 발전기는 제작 및 시험이 완료되어 설치대기 중에 있다.

#### (참고 문헌)

- [1] A. Grauers, "Design of Direct-driven Permanent magnet Generators for Wind Turbines", Phd Thesis, Chalmers University of Technology, 1996.
- [2] Petri Lampola, "Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications", Phd Thesis, Helsinki University of Technology, 2000.
- [3] 황돈하 et al., "영구자석형 풍력발전기 설계 및 정상상태 전자기해석", 대한전기학회 전기기기 및 에너지 변환시스템 학회 춘계학술대회 논문집, pp. 6-8, 2002.4
- [4] 황돈하 et al., "횡자석형 영구자석 발전기 설계 및 특성해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 949-951, 2002.7
- [5] D.H.Kang, P.Curiac, Ju Lee, "An Axial Flux Interior PM Synchronous Machine", ICEM 2000 Vol 3, 2000.
- [6] 김동연 et al., "소형 20kW 급 영구자석, 직접구동형 발전기의 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1398-1400, 2003.7
- [7] ANSYS, <http://www.ansys.com>
- [8] Oiltech, <http://www.oiltech.se>
- [9] 김동연 et al., "800 kW 급 영구자석형 동기발전기의 개념설계", 포항풍력에너지 연구소, 포항공대, 2003.11