

**KBP-750D 풍력 발전기에 사용되는 800 kW 급 영구자석, 직접구동형 발전기의 개발**

김동언, 이흥기, 서형석, 한홍식, 정영규, 정진화, 포항풍력에너지연구소, 포항공과대학교  
 황성근, 임민수, 오만수. (주)보국전기

**Development of 800 kW class PM Direct Drive Synchronous Generator for KBP-750D WECS**

D.E.Kim, H.G.Lee, H.S.Suh, H.S.Han, Y.G.Jung, C.W.Chung, PoWER, POSTECH  
 S.K.Kwak, M.S.Lim, M.S.Oh, Bokuk Electric Ind. Co.

**Abstract** - 포항풍력에너지연구소와 (주)보국전기는 에너지 관리공단의 지원으로 2002년부터 직접구동형 풍력 터빈 KBP-750D에 사용될 발전기를 개발해 오고 있다. KBP-750D에 사용되는 발전기는 증속을 위한 gearbox를 사용하지 않는 직접 구동형 이라는 것과, 영구자석을 사용하여 여자하는 형식이라는 것이다. 이런 특징은 풍력발전에서 요구하는 주요 요구조건인 고효율, 고신뢰성을 만족시키기 위해서 매우 중요하다. 개발된 발전기는 25 rpm 정격에서 800 kW의 정격을 가지도록 설계되었다. 공극 직경은 3,320 mm이며, stator의 길이는 705 mm, 4.5 mm의 공극, 84극을 가지고 있으며, 전체중량은 약 20 ton이다. 이 보고에서는 이 발전기의 물리설계 공학설계 등에 관해서 논의한다.

**1. 서 론**

신재생 에너지의 중요한 한 축을 담당하고 있는 풍력 발전기에 사용되는 발전기는 크게 나누어 증속기를 사용하는 비동기형 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 국외[1][2]에서 있었고, 국내에서도 전기연구소를 중심으로 [3][4][5] 관련 연구가 있어왔다.

포항풍력에너지 연구소는 (주) 유니슨에서 주관사업자로 개발 중인 직접구동형 750 kW 풍력발전기에 사용될 800 kW급 직접구동형, 영구자석 동기발전기를 (주) 보국전기와 함께 개발하고 있다. 이와 관련하여 2003년에는 본 제품과 같은 형의 20kW 급 모델발전기 제작을 수행한 바 있다[6]. 이 보고에서는 800 kW 본제품 발전기의 설계에 대해서 논의한다.

**2. Magnetic Geometry 와 주요 Parameter들**

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.

공극직경: 공극직경은 전체 발전기크기와 연결되어 있다. 일반적으로 같은 토크에서는 Active material의 소재비용은 직경이 크고 길이가 짧아질수록 작아진다. 한편 내경이 커짐으로써 그에 따른 구조물의 제작비용이 커지게 되고 국내도로 상황에서의 운송문제가 있을 수 있다. 이와 같은 배경을 감안하여 필요 고정자 내경을 3,320 mm로 결정되었다. 고정자 요크의 두께는 자속이 너무 포화되지 않도록 하면서 구조적인 강도를 가질 수 있고 필요한 Ampere turn을 수용할 수 있는 수준으로 정하였다.

파라미터들	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 순간전압	779.9 V <sub>rms</sub>
정격출력 I <sub>n</sub>	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>

표 1 800 kW 본제품 발전기의 주요 parameter들

공극: 자석과 고정자 내경의 간격은 4.5 mm를 사용하였다. 통상적으로 자극간격은 직경에 비례하며 대형의 경우 0.1%에서 소형의 경우 1%까지에 이른다. 공극의 크기를 결정하는 근거는 운전시의 회전자, 고정자사이의 온도차에 의한 열팽창의 차이, 베어링의 유격, 고정자의 기계적 가공/조립 오차 등이 고려되었다. 영구자석의 투자율이 낮기 때문에 (약 1.05) 자기적인 공극은 자석두께와 기계적 공극을 더한 값이 된다. 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 사용하는 것으로 알려져 있으나 우리의 경우는 보호등급 IP54의 완전밀폐형 발전기를 고려하고 있으므로 냉각능력이 강제 공냉방식 보다 떨어지므로 사용 전류밀도가 낮아야 한다. 열분석과 냉각능력을 생각할 때 3.5 A/mm<sup>2</sup>가 적절한 것으로 판단되어 이 전류밀도를 사용한다.

Magnet의 두께, 폭, Grade: 영구자석의 치수는 필요한 자속밀도, 단락사고시의 여자장에 의한 탈자 방지, torque ripple의 최적화 등에 의해서 결정되었다. 자석두께 14mm 일 때 기준이 되는 공극자속밀도는 약 0.87 Tesla 정도이다. 단락사고 시에도 탈자 되지 않기 위한 조건은 참고문헌 [5]에 상세히 기술되어 있다. 한편 영구자석의 폭에 따라서 토크의 ripple의 크게 변한다. 토크리플은 불필요한 진동, 소음, 피로를 발생시키므로 토

크 리플을 최소화시키기 위하여 자석의 폭을 최적화 하였고 stator slot을 1 slot pitch 만큼 skewing 하였다. Skewing에 의한 효과는 다음에 따로 상술되어 있다. NdFeB 자석의 grade는 반복된 온도상승 의한 성능 열화의 위험을 최소화하기 위하여 연속사용 가능온도가 160°C 인 NEOMAX 33UH를 가정하였다.

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

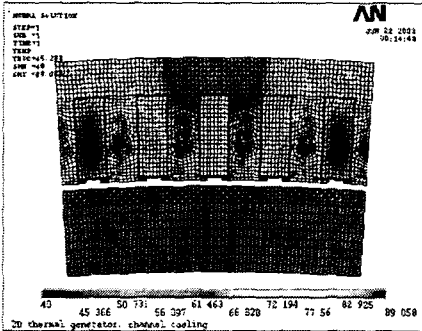


그림 1 Slot에서의 온도상승 분포. 냉각수 온도는 40 °C 기준이고 최대 온도상승은 약 50 °C이다.

열분석 : 도체와 stator, rotor에서의 온도상승을 추정하기 위하여 상용 FEM code를[7] 사용하는 2D열분석을 수행하였다. Ohmic 손실은 stator slot에 균일하게 분포시켰으며 철손과 기타 손실은 고정자 teeth 와 yoke 부분에 각각의 기여분에 따라서 분포시켰다. 철손을 분포시키는 방법에 따른 최대온도 상승의 변화가 1°C 이하로 둔감하여 철손의 분포를 개략적으로 하여도 최종결과에는 크게 차이가 없었다. 슬롯단면에서 도체수직방향으로의 열전달율은 순수구리의 1/222 로 계산하였다[2]. 이것은 슬롯이 절연물을 포함하는 도체로 이루어진 것을 고려한 것이다. 고정자 외경부분에 매 5 슬롯 거리마다 냉각채널을 설치하여 수냉 하는 방법을 택하였다. 2차원 FEM 열분석 결과가 그림1에 나타나 있다. 냉각수량이 충분한 경우에 냉각수의 온도상승은 약 17°C이었고 고정자 도체부분에서의 최대 온도상승은 약 50 °C로 계산되었다. 따라서 최대운전가능 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.

최종 자기 Geometry 및 부하곡선: 실제 자기구조는 분석된 구조와 조금 차이가 있으나 그 차이는 미세한 것으로 계산 되었다. 최종적인 회전자, 고정자의 한 주기가 냉각 채널과 함께 개략적으로 그림2에 나타나 있다. 최종적인 발전기의 주요 parameter들은 표1에 나타나 있고 부하 전류에 따른 부하전압이 순수저항 부하일 때의 경우와 역률이 인버터에 의해서 능동적으로 제어될 경우에 대해서 그림3에 나타나 있다.

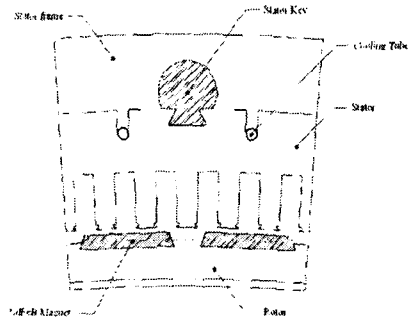


그림 2 Stator와 rotor, cooling channel, Stator key의 개략적인 그림.

### 3. Skewing에 의한 효과분석

Skewing을 통한 torque ripple 감소.

회전자의 각도에 따라서 토크가 변하는 torque ripple은 진동 과 소음을 발생시킬 수 있고, 피로를 가중시켜 발전기 수명에 영향을 줄 수 있기 때문에 가능하면 최소화 되어야 한다. 또 무부하 상태의 torque ripple은 발전이 가능한 시동토크에 영향을 주고 따라서 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 역할을 하고 있음을 기억하여야 한다. 따라서 skewing은 torque ripple 감소라는 목적은 위하여 평균 torque를 어느 정도 낮추는 절충이라고 말할 수 있다. 보통 torque ripple을 계산하기 위해서는 발전기를 여러 부분으로 나누어서 계산하거나 번거로운 3차원 계산이 필요하다. 여기에서는 간략한 2차원적인 방법과 semi-analytic 한 방법으로 skewing의 효과를 추정하는 방법을 보인다. 저자들의 문헌지식으로는 아직까지 다른 곳에서 이런 방법으로 skewing의 효과를 추정하는 방법을 찾지 못하였고 따라서 여기에서 소개하는 방법은 skewing의 효과를 해석적으로 밝히는 새로운 방법이라고 여겨진다.

먼저 필요한 자료는 회전자와 고정자의 위상각이 0일 때 회전자 각도에 따른 torque값이다. 이것은 기존의 여러 상용 FEM 코드[7] 등을 사용하여 쉽게 계산된다. 또 고정된 각도에서 회전자와 고정자 사이의 위상차가 있을 때의 torque 값이 필요한데 이것은 다음과 같은 해석적 공식으로 쉽게 나타낼 수 있다.

$$r'(\theta, \phi) = r'(\theta) \cos(\phi) \quad (1)$$

여기서  $r'$  은 발전기 단위길이 당의 torque이고,  $\theta$  는 회전자의 각도,  $\phi$  는 회전자의 위치와 고정자전류의 위상차이다.  $r'(\theta)$  는 회전자 위치와 고정자 전류의 위상차가 0 일 때의 단위 길이 당 torque 밀도이다. 발전기 길이방향  $z$  에서의 skewing 거리를 위상각으로 환산하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\xi = \frac{s}{L} \cdot \frac{2\pi z}{\lambda} \quad (2)$$

여기서  $s$  는 최대 skewing 거리이고  $\lambda$  는 회전자의 장주기,  $L$  은 고정자의 길이이다. 우리의 경우  $s$  가 1 슬롯피치 이고 한주기당 6개의 슬롯피치 인 경우 고정자 끝에서의 위상각은  $\xi_{max} = \pi/3$  임을 쉽게 알 수 있다. skewing에 의한 각도변화를 고려하면 발전기의 길이 방향  $dz$  길이에 의한 torque는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$dr = r'(\theta - \xi, \xi) dz = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{L}{s} r'(\theta - \xi, \xi) d\xi \quad (3)$$

따라서 skewing angle에 따라서 평균된 torque의 profile

은

$$T(\theta) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{L}{s} \int_0^{\xi_{\max}} T'(\theta - \xi, \xi) d\xi = L \langle T'(\theta) \rangle \quad (4)$$

로 구할 수 있다. 여기서

$$\langle T'(\theta) \rangle = \frac{1}{\xi_{\max}} \int_0^{\xi_{\max}} T'(\theta - \xi, \xi) d\xi \quad (5)$$

로 주어지고 skewing을 고려한 단위길이당의 평균 torque이다. 여기로부터 주어진  $T(\theta, \phi)$ 와 skewing의 크기  $s$ 가 주어지면 skewing까지 고려된 torque의 profile을 구할 수 있다. torque가 균일할 경우 (이 경우는 skewing할 필요가 없지만) skewing의 효과를 계산하게 되면  $T'$ 이 상수이므로

$$\langle T'(\theta) \rangle = \frac{\sin(\xi_{\max})}{\xi_{\max}} \quad (6)$$

임을 쉽게 알 수 있다.  $\xi_{\max} = \frac{\pi}{3}$  일 경우 이것은 약 0.827이고 skewing에 의한 average torque의 감소는 17.3%임을 알 수 있다. 일반적으로 torque의 ripple 때문에  $T'$ 가 상수는 아니지만 (6)식은 1차적인 estimate로

서 효과가 있다.  $\xi_{\max} = \frac{\pi}{3}$  일 경우 full skewing이라고 하고 이것은 torque의 한주기  $60^\circ$ 만큼의 magnetic phase를 평균한 것이고 더 이상의 skewing은 무의미하다. 이것은 3상 회전기일 경우 최대 skewing 거리가 Q slot임을 말한다.  $\xi_{\max}$ 가  $\pi/3$ 보다 작을 때에는 partial skewing이고 그때에는 평균 torque의 감소가 full skewing보다 작지만 ripple의 감소가 제한적이다. 따라서 skewing은 torque ripple의 감소와 평균 torque의 감소를 균형을 맞추어서 절충하여 사용하여야 한다.

#### Skewing을 고려한 open loop flux (voltage) 계산

Skewing에 의해서 open loop 전압도 감소하게 된다. 여기에서는 무부하 상태에서 계산하게 되므로 다음과 같이 쓸 수 있다. 발전기 dz길이에 의한 flux는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d\Phi = \Phi'(\theta - \xi) dz = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{L}{s} \Phi'(\theta - \xi) d\xi \quad (7)$$

여기서  $\Phi'(\theta)$ 는 회전자 각도가  $\theta$ 일 때의 단위 길이당 권선을 통과하는 자속이다. (7)식에서 발전기 전체에 의한 기여는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi(\theta) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{L}{s} \int_0^{\xi_{\max}} \Phi'(\theta - \xi) d\xi = L \langle \Phi'(\theta) \rangle \quad (8)$$

이다. 여기서

$$\langle \Phi'(\theta) \rangle = \frac{1}{\xi_{\max}} \int_0^{\xi_{\max}} \Phi'(\theta - \xi) d\xi \quad (9)$$

이고 이것은 skewing을 고려한 단위길이당의 평균 flux이다. Torque ripple이 skewing의 효과로 평균화 되듯이 flux (또는 유도전압)도 skewing의 효과로 flux wave가 많이 부드러워지고 따라서 higher harmonic의 함량도 줄어든다. 한편 skewing의 효과로 peak전압이 averaging 효과에 의해서 줄어들게 되는데 그것은 flux wave의 모양이 sinusoidal할 경우 다음과 같이 계산된다. flux가 최대인 각도는 skewing하기 전과  $\frac{\xi_{\max}}{2}$ 의 차이가 있고 그때의 skewing된 flux의 최대값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\langle \Phi'(\frac{\xi_{\max}}{2}) \rangle = \frac{1}{\xi_{\max}} \int_{-\frac{\xi_{\max}}{2}}^{\frac{\xi_{\max}}{2}} \Phi'(\xi) d\xi \quad (10)$$

이 표현은  $\Phi'(\xi) = \Phi'_0 \cos(\xi)$ 와 같이 flux wave의 모양이 sinusoidal 모양인 경우에는 다음과 같이 간략화 된다.

$$\langle \Phi'(\frac{\xi_{\max}}{2}) \rangle = \Phi'_0 \frac{\sin(\xi_{\max}/2)}{\xi_{\max}/2} \quad (11)$$

$\xi_{\max} = \frac{\pi}{3}$ 인 full skewing에 대해서는 약 4.5%의 flux 감소가 있음을 알 수 있다. 물론 이 근사는 flux wave의 모양이 sinusoidal할 경우이고 일반적인 flux wave는

sinusoidal 하지 않으므로 FEM 결과를 바탕으로 계산되어야 하지만 1차적인 근사로는 의미가 있다.

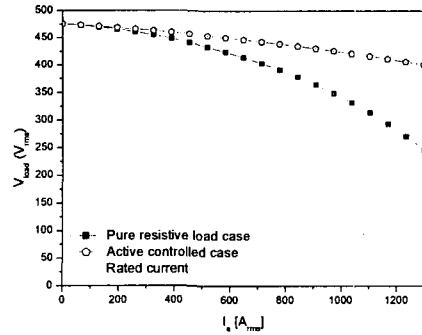


그림 3 Load 전류에 따른 부하전압의 변화. 열린 원은 역률이 인버터에 의해서 능동적으로 제어될 때이고, 검은 사각형은 능동적 역률 제어 없이 순 저항 부하일 경우임.

#### 4. 결 론

이 논문에서는 에너지 관리공단의 지원으로 (주) 유니슨이 주관하여 개발 중인 750kW 직접구동형 풍력발전기 (KBP-750D)에 사용되는 영구자석형 RFPM 발전기의 설계에 대해서 기술하였다. 지면의 제약으로 여기에 모든 것을 다 기술하지는 못하였지만 FEM tool들을 사용하여 자기, 열, 구조분석을 행하였으며 실현가능하고 효율적인 발전기를 설계하였다. 더 상세한 내용은 참고 문헌 [9]에 기술되어 있다. 이 논문에서는 특히 Skewing의 효과를 semi-analytic 하게 해석한 것은 의미 있는 일이라 볼 수 있다. (식 5와 9). 이 발전기는 지금 제작 중이며 금년 내에 제작완료 되어 인버터와 함께 시험되고 최종 조립될 예정이다

#### 5. 감사의 글

이 연구는 에너지관리공단과 (주)보국전기의 위탁연구용역에 의해서 수행되었음을 밝힙니다.

#### [참 고 문 헌]

- [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., "황자석형 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 개념 설계", 포항풍력에너지 연구소, 포항공대, 2003.11