

풍력발전에 사용되는 소형 20 kW 급 영구자석, 직접구동형 발전기의 개발

김동언, 정진화, 황진수*, 류지윤*, 김두훈*
 포항풍력에너지 연구소, 포항공대, (주) 유니슨*

Development of 20 kW class PM direct drive synchronous generator

D.E.Kim, C.W.Chung, J.S.Hwang*, J.Y.Ryu*, D.H.Kim*
 Pohang Wind Energy Research Center, POSTECH, Unison Ltd*.

Abstract - 포항풍력 에너지 연구소와 (주)유니슨은 에너지 관리공단의 지원으로 2002년부터 풍력발전기에 사용되는 직접구동형 발전기를 개발하고 있다. 개발되는 발전기의 특징으로는 증속을 위한 gearbox를 사용하지 않는 직접구동형이라는 것과, 영구자석을 사용하여 여자하는 형식이라는 것이다. 이런 특징은 풍력발전에서 요구하는 주요 요구조건인 고효율, 고신뢰성을 만족시키기 위해서 매우 중요하다. 개발된 발전기는 32극을 가지고 있으며, 157.1 rpm에서 20 kW의 정격을 가지도록 설계되었다. 이 보고에서는 이 발전기의 설계, 제작, 시험결과에 대하여 보고한다. *본 연구는 에너지 관리공단의 지원으로 수행되었음.

1. 서 론

신재생 에너지의 중요한 한 축을 담당하고 있는 풍력발전기에 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 개발하고 있다. 이 보고서에서는 그 전단계로 20 kW 급의 영구자석형 발전기의 설계, 제작 및 시험에 관해서 기술한다. 이 영구자석형 발전기는 800 kW 급 본체품과 같은 magnetic topology를 가지고 있으며 800 kW 본체품과 유사한 형태를 가지고 있으므로 이 20 kW의 개발경험은 본체품 개발에 적용될 예정이다.

2. Magnetic geometry 및 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.

고정자 외경: 발전기 관련 개발 참여업체인 (주) 보국전기에서 보유중인 외형금형을 활용하기 위해서 초기 설계치에 가장 근접한 반경 250 mm 급형을 활용하는 것으로 하였다. 여기로부터 필요 고정자 내경은 195 mm로 결정되었다. 고정자 요크의 두께는 자속이 너무 포화되지 않도록 하면서 구조적인 강도를 가질 수 있고 필요한 Ampere turn을 수용할 수 있는 수준으로 정하였다.

공극: 자석과 고정자 내경의 간격은 1 mm를 사용하였

다. 통상적으로 자극간격은 직경에 비례하며 대형의 경우 0.1%에서 소형의 경우 1%까지에 이른다. 우리의 경우 소형에 속하고 고정자내경 기준 약 0.25% (직경기준)을 사용하였다. 우리의 경우 영구자석의 투자율이 낮기 때문에 (약 1.05) 자기적인 공극은 전자석두께와 기계적 공극을 더한 값이 된다. 이것은 발전기의 성능이 기계적 공극의 오차에 크게 의존하지 않는 좋은 점이 있다.

Parametes/Feature	
형식	영구자석, 동기형
자극수	32 극
고정자 내경/외경	195/250 mm
고정자의 skew	1 slot pitch
Slots 의 수	96
고정자 코아 길이	334 mm
공극	1 mm
Pole Arc	21/30 τ
영구자석 높이	6 mm
자성물질	Neomax 33UH 또는 동등
구동 토크	1627 Nm
회전수	157.1 rpm
고정자 정격전류 (I _n)	39.6 A (rms)
Ampere turns in a slot	559.7 A (peak)
권선연결	직렬
도체직경 (코팅제외)	1.2mm
Joule 손실 (90°C 기준)	1370 W
철손과 기타손실	506 W
부하 상전압 V _L	209 V (rms)
Electrical Power at I _n	24.9 kW
무부하 상전압	231 V (rms)
저항/상	291 mΩ
동기inductance	6.31 mH
Stator frequency	41.9 Hz
단원 표면적당 발생력	20.8 kN/m ²
효율 η	~93.0 %
역율	0.958

표 1 모델 발전기의 주요 parameter들

전류밀도: 보통 fan을 이용하는 강제 공냉방식의 발전기나 모터에서는 6~8 A/mm² 정도의 전류밀도를 사용하는 것으로 알려져 있으나 우리의 경우는 보호등급 IP54의 완전밀폐형 발전기를 고려하고 있으므로 냉각능력이 강제 공냉방식 보다 떨어지므로 사용 전류밀도가 낮아야 한다. 열분석과 효율을 생각할 때 3.5 A/mm²가 적절한 것으로 판단되어 이 전류밀도를 참고치로 사용한다.

Magnet의 두께, 폭: Magnet의 두께는 고정자 표면의 force density 와 관계가 있다. force density는 공극에서의 자속밀도, 선형전류밀도에 비례하므로 높은 force density (즉 작고 torque가 큰 회전기)를 위해서는 두꺼운 자석을 사용하여야 한다. 그러나 회로류 영구자석의 가격이 매우 비싸므로 경제적인 면과 서로 절충되어야 한다. 우리는 70 °C 온도상승 기준으로 6 mm 두께의 자석을 사용하였으며 기준이 되는 공극자속밀도는 약 0.86 Tesla 정도이다. 한편 영구자석이 너무 얇게 되면 실질적인 자기 공극이 작아지고 따라서 발전기 단락 사고시에 발생하는 역자장으로 인해서 영구자석이 탈자(demagnetization)이 되는 사고가 발생할 수 있다. 두께를 정할 때는 이런 점도 함께 고려하여 단락사고 시에도 유지되는 고정자전류에 의해서 영구자석이 탈자되지 않도록 영구자석의 두께와 권선수를 결정하였다. 단락사고 시에도 탈자되지 않기 위한 조건은 참고문헌 [5]에 상세히 기술되어 있다. 한편 영구자석의 폭은 arc fraction τ (magnet width/pole pitch)으로 부르는데, 자석의 폭에 따라서 torque ripple이 심하게 변한다. 우리의 경우 $\tau = 21/30$ 일때 torque ripple이 약 $\pm 5.0\%$ 로써 최소 값을 보였고 이때의 영구자석 폭을 사용하였다. 이때의 2차원 FEM 해석의 결과가 그림 1과 2에 나타나 있다. 그림1에서는 자속의 흐름을 보여주고 그림2에서는 고정자 및 회전자에서의 자속밀도 크기의 분포를 보여준다.

권선수: Slot당 감은 수는 100filament을 10turn으로 묶어서 사용하였으며 모든 pole들을 series로 연결하였다. 그 이유는 적절한 open loop voltage와 부하에 따른 부하전압 감소를 고려하고 앞에서 말한 단락전류에 의한 역자장이 영구자석을 탈자 시키지 않는 조건을 충족시키도록 하였다.

Skewing: Slot의 형상을 폐쇄형으로 함으로써 torque ripple을 $\pm 5.0\%$ 까지 줄일 수 있었다. 그러나 torque ripple을 더더욱 줄이고 유도전압에서의 고조파를 감소시키기 위하여 full skewing을 사용하였다. full skewing의 결과로 평균적인 torque는 17% 감소하였지만 torque ripple을 $\pm 1.0\%$ 내로 줄일 수 있었으며 가장 큰 3차 고조파를 3%이하로 억제할 수 있었다. Skewing하기전과 하기전의 위상에 따른 torque가 그림3에 나타나 있다. Skewing의 결과로 torque ripple이 크게 줄었음을 볼 수 있다.

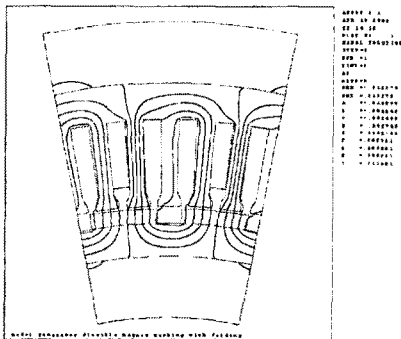


그림 1 Model의 전형적인 flux plot (1주기).

손실들: 우리 모델과 같은 저속형 발전기에서는 대부분의 손실이 권선에서의 Ohm 손실, 고정자에서의 Hysteresis loss와 와전류 손실이다. Ohm 손실은 권선의 I^2R 로 쉽게 계산되고 고정자에서의 철손은 참고문헌 [1]을 참고하였다. 고정자는 S18을 사용하였으며 S18의 50Hz, 1.5T에서의 철손은 약 3.3W/kg 정도이다. 정격에

서의 Ohm 손실은 약 1370 W정도로 계산되었으며 철손과 기타손실을 합하여 약 506 W정도의 손실이 있을 것으로 추정되었다. 이로부터 정격에서의 효율은 약 93.0%임을 알 수 있었다.

온도상승: 냉각방식은 Stator housing을 공기로 냉각하는 것을 가정하였고 그때의 Stator housing 표면에서의 열전달 계수는 약 $h=60 \text{ W/K/m}^2$ 로 보았다[1]. 코일 내부의 수직/수평 방향의 열전달 계수, slot 내부의 insulation에 의한 열저항 등을 [1]에서의 parameter를 기초로 lumped model로 계산하였다. 그럴 경우 최대 코일의 온도상승은 stator housing표면에서 약 50 K, stator core에서 약 4.5 K, 절연물에서 약 4.5 K, 코일내부에서 최대 약 10 K, 코일 끝부분에서의 온도상승 1 K 정도로 최대온도상승은 약 75 K로 계산되었다. 2D FEM 결과도 비슷한 결과를 나타내었다. 그러나 열계산은 실험적인 열전달 상수를 정확히 아는 것이 최대온도 상승을 추정하는데 결정적인 역할을 하므로 실제상황에 맞는 실험적인 열전달 상수들을 아는 것이 필요하다.

최종 자기구조: FEM계산과 실제의 자기구조가 조금 차이가 나는 점이 몇 가지 있다. 첫째로 magnet사이에 wedge구조와 bolt를 사용하는 고정법을 채택함으로써 block의 옆면이 경사져 있다. 따라서 block의 크기는 전체 단면적이 계산치와 같도록 변경되었다. 둘째로는 영구자석을 rotor표면에 위치시키기 위해서는 참고위치가 필요하므로 rotor표면에서 영구자석이 들어갈 위치를 깊이 2 mm로 평면 가공하였다. 따라서 영구자석의 두께가 항상 6 mm가 아니고 가운데 부분이 약간 더 두꺼운 구조가 되었다. 그에 따른 두께의 증가는 0.46 mm 정도이다. 또 stator와 rotor사이의 alignment error와 fringe field에 의한 효과를 감소시키기 위해서 rotor의 길이를 한쪽으로 3 mm 씩 길도록 설계하였다. 이런 차이가 실제치에 미치는 영향은 충분히 작을 것으로 추정한다. 자석의 고정구를 포함하는 구조가 그림4에 나타나 있고 최종적인 발전기의 parameter들이 표1에 요약되어 있다.

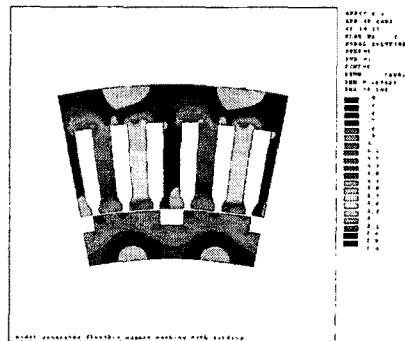


그림 2 Model의 전형적인 |B| plot. (1주기)

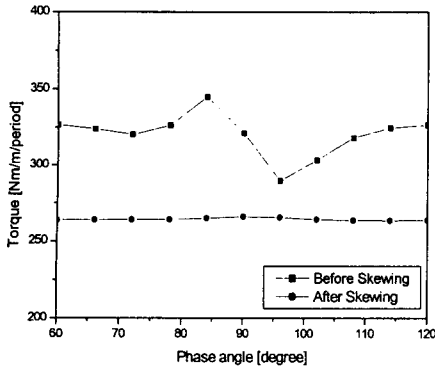


그림 3 모델의 단위길이, 단위주기당의 torque와 skewing후의 위상에 따른 torque profile.

3. 시험결과 및 결론

제작된 발전기는 (주) 보국전기에서 자체 시험절차에 따라서 시험되었다. 고정자 전류에 따른 부하전압의 변화를 측정할 것이 그림5에 나타나 있다. 100% 회전수 일 때와 70% 회전수 일 때에 측정하였는데 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 계산치와 측정치의 차이는 2% 내에서 서로 잘 맞고 있다. 계산치와의 차이는 실제적인 magnetic geometry와 실제 구조의 작은 차이와 end 부분의 한 기여를 계산하는데 발생하는 부정확성 등으로 설명될 수 있을 것이다. 효율은 정격전류에서 약 92.7%를 나타내었다 이것은 93.0%의 설계치와 잘 일치한다. 또 정격전류에서 장시간 운전하였을 경우에 저항법으로 측정된 고정자 권선의 온도상승은 약 88 K를 나타내었고 이것은 계산에 의한 추정값 75 K와 비교된다. 냉각계산은 실험적인 수치들이 많이 들어가기 때문에 정밀도가 떨어지는 것을 이해할 수 있다. 특히 표면냉각에서 convection 열전달 계수를 $60 \text{ W/mm}^2/\text{K}$ 를 사용하였는데 이것은 풍속이 충분한 (약 15m/sec) 강제 냉각일 때의 추정값이다. 시험 중에는 그런 풍속이 없었으므로 그에 따라서 열전달이 충분히 일어나지 않았고 따라서 온도상승이 추정값보다 조금 높게 나왔다고 생각할 수 있다.

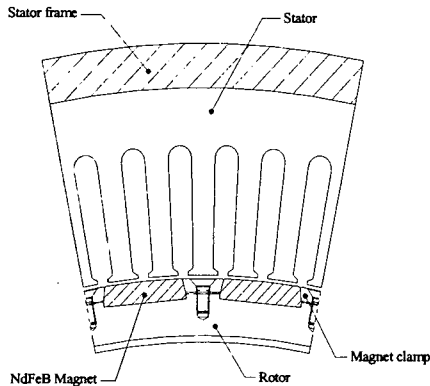


그림 4 최종적인 model의 stator, rotor, magnet 및 고정부 (1주기)

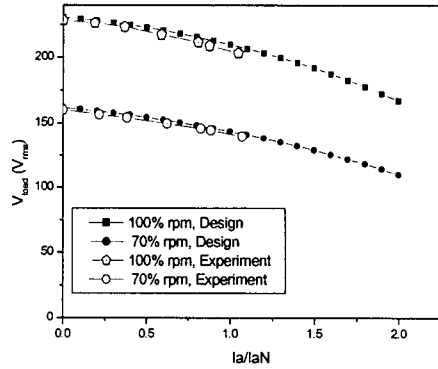


그림 5 고정자 전류에 따른 부하 전압의 변화.

모델 발전기는 설계된 대부분의 특성을 보여주었고 따라서 동일한 설계절차가 800 kW 본제품에도 사용될 수 있음을 보여주었다고 할 수 있다. Thermal modelling을 더 다듬어서 이런 형태뿐만 아니라 범용의 발전기/회전기에 사용할 수 있도록 발전시킬 필요가 있음을 알 수 있었다.

4. 감사의글

이 연구는 에너지관리공단과 (주)유니슨의 위탁연구용역에 의해서 수행되었음을 밝힙니다. 또 발전기의 제작 및 시험에 정성을 다해준 (주) 보국전기의 관계자들에게 감사사를 드립니다.

[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 전자계해석", 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.

Remark: 발표자들은 대부분 전공이 전기가 아닙니다. 김동연(물리), 정진화, 류지윤, 김두훈(기계)입니다. 황진수만 전기공학이고 회원등록을 하였을 것입니다. 저번에 통화한 아가씨가 비전공임을 밝혀달라고 하여서 여기에 적습니다. (보시고 지워주세요)