

중축 자속형 영구자석 동기 발전기의 전자기적 구조 변경에 따른 출력특성 비교

(The Comparison of Output Characteristic by the Electro-magnetic Structure Modification of the Axial Flux Type Permanent Magnet Synchronous Generator)

정태욱* · 배병덕 · 김희천

(Tae-Uk Jung · Byung-Duk Bae · Hoe-Cheon Kim)

Abstract

Generally, the structure without the stator core Axial Field Permanent Magnet (AFPM) generator was simple and there was nearly no cogging torque. And because it had the wide driving rate area, it had been being mainly used in the small wind power generation system. However, AFPM generator with non-slotted stator can't generate high voltage at low wind speed due to long air-gap. It is the reason of output efficiency drop. Therefore, in this paper, the AFPM synchronous generator with internal rotor and dual slotted stators for the small wind turbine is studied, and deal with a cogging torque minimization through the determination of optimum pole-arc ratio.

Key Words : Axial Field Permanent Magnet(AFPM), Synchronous Generator, Wind Turbines, Cogging Torque

1. 서 론

AFPM 발전기는 단위 무게당 출력이 크고 고에너지 밀도를 갖도록 설계가 가능하며, 발전기의 효율적인 냉각 및 슬립형으로 제작이 가능해 Multi-stator로 제작이 가능하다. 또한 영구자석 재질로 Nd-Fe-B와 같은 고에너지 영구자석이 보급됨에 따라 비교적 큰 공극을 형성할 수 있게 되어 Coreless 형으로도 제작

이 가능하게 되었다.

일반적으로 고정자코어가 없는 Axial Field Permanent Magnet(Coreless AFPM) 발전기는 구조가 간단하고 코깅토크(cogging torque)가 거의 없으며, 넓은 구동속도 영역을 가지고 있어 소형 풍력 발전 시스템에서 주로 사용되어져 왔다[1-2]. 그러나 Coreless AFPM 발전기는 고정자 코어(core)가 없는 구조적인 특징으로 인해 공극간의 자기저항(reluctance)이 커져 출력전압이 상대적으로 낮은 단점이 있다. 대부분의 소형 풍력 발전 시스템은 에너지 저장 및 전력계통 연계를 위해 전력변환기를 이용하게 되는데, 낮은 출력전압은 승압용 소자의 가격상승과 효율저하의 원인이 된다.

* 주저자 : 경남대학교 공대 전기공학과 조교수
Tel : 055-249-2628, Fax : 0505-999-2161
E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr
접수일자 : 2011년 2월 23일
1차심사 : 2011년 3월 1일
심사완료 : 2011년 5월 17일

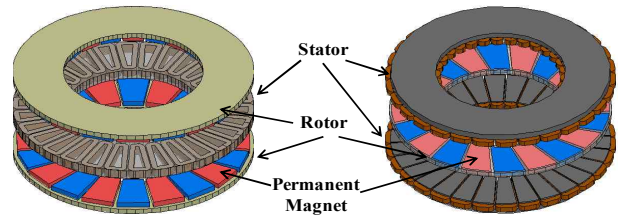
고정자 철심에 슬롯이 있는 AFPM 발전기는 Coreless AFPM 발전기에 비해서 출력밀도가 높지만, 고정자 철심 슬롯으로 인하여 기기의 전체적인 두께가 커지고 코깅토크가 높아지는 단점이 있다. 소형 풍력 터빈에서 발전기의 크기는 시스템의 제한적인 공간으로 인하여 설계 시에 중요하게 다루어지는 요소이며, 특히 코깅토크는 소형 풍력 발전기가 발전을 시작할 수 있는 바람의 최소풍속을 결정하는 요소로서 소음과 진동을 유발하므로 설계 시에 반드시 고려되어야 하는 중요한 요소이다[3-4].

소형 풍력 발전기의 동일한 출력에서 출력전압의 상승은 전류를 감소시키고, 이로 인한 동손을 감소시킴으로써 소형 풍력 발전기의 효율을 상승시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 소형 풍력 발전 시스템의 출력 효율 향상을 위하여 소형 풍력 발전용 AFPM 발전기의 출력전압 향상에 관해서 연구하였고, 출력전압을 높이기 위해서 철심 슬롯이 있는 내륜형 AFPM 발전기를 제안하였으며, 코깅토크 최소화를 위한 극호비 최적화에 관한 연구를 실시하였다. 그리고 3차원 유한 요소 해석 프로그램을 이용하여 유한 요소 해석법(Finite Element Analysis)으로 제안된 AFIR-S(Axial Field Internal Rotor-Slotted) 발전기의 설계 및 해석을 하였다.

2. AFPM 발전기의 구조 및 특성

2.1 AFPM 발전기의 구조

그림 1 (a)와 (b)는 기존의 Coreless AFPM 발전기와 제안된 AFIR-S 발전기의 구조를 각각 나타내었다. 기존의 Coreless AFPM 발전기는 고에너지 밀도의 Nd-Fe-B 영구자석이 디스크 표면에 부착된 두 개의 회전자 사이에 에폭시(epoxy)로 몰딩된 고정자가 위치한 형태의 구조를 보이며, 제안된 AFIR-S 발전기는 고정자 슬롯이 있는 두 개의 고정자 사이에 영구자석을 에폭시로 몰딩한 회전자가 위치한 형태의 구조이다. Coreless AFPM 발전기의 고정자와 AFIR-S 발전기의 회전자는 기계적 강도를 유지하기 위하여 에폭시수지로 몰딩처리하였다.



(a) Coreless AFPM (b) AFIR-S

그림 1. 기존의 Coreless AFPM 발전기와 AFIR-S 발전기의 구조비교

Fig. 1. Structure comparison of Coreless AFPM and AFIR-S generator

2.2 AFPM 기기의 토크 방정식

AFPM 기기에서, 영구자석 1극에서 발생하는 자속 밀도 곡선은 다음 식 (1)과 같다[5].

$$\Phi_{pole} = \alpha_i \pi \frac{1}{p} \frac{D_o^2(1-k_d^2)}{8} B_{mg} \quad (1)$$

여기서 α_i 는 최대 자속밀도에 대한 평균치 자속밀도의 비율, p 는 영구자석의 극수, B_{mg} 는 공극의 자속밀도의 최대값, D_o 는 영구자석 외경, k_d 는 영구자석 외경에 대한 내경의 비율이다. 전자기 토크는 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_d = \frac{1}{4} \alpha_i m_1 I_a N_1 k_w B_g D_o^2 (1-k_d^2) I_a \quad (2)$$

여기서 m_1 은 상의 수, I_a 는 선전류, N_1 은 상당 턴수, k_w 는 와인딩계수, B_g 는 공극 자속밀도이다.

k_d 는 최대토크를 결정짓는 아주 중요한 계수이므로 신중하게 결정되어야 한다. 그리고 $k_d = 1/\sqrt{3}$ 일 때 최대토크를 얻을 수 있다.

각 상에서 발생한 기전력의 RMS값 E_f 는 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_f = \sqrt{2} \pi n_s N_1 k_w B_{mg} \frac{(D_o^2 - D_i^2)}{8} \quad (3)$$

여기서 n_s 는 모터의 초당 회전속도이다.

식 (1)에서 (3)으로부터, 출력은 다음 식 (4)와 같이 얻을 수 있다.

$$P_R = \eta \frac{m}{T} \int_0^T e(t)i(t)dt = \eta m K_P E_{PK} I_{PK} \quad (4)$$

여기서 η 는 기기의 효율, E_{PK} 는 최고치 기자력, I_{PK} 는 입력전류이다.

3. 유한요소 해석

3.1 유한요소 해석의 개념

본 논문에서는 AFPM 발전기의 전자기 구조개선, 코깅토크의 분석 및 출력특성 비교를 위하여 3차원 유한 요소법을 이용하였다. 기존의 방사 자속형 회전기의 경우, 계산시간 단축 및 모델링의 간편성 등의 이점으로 2차원 해석이 주로 사용되어져 왔다. 그러나 2차원 유한 요소 해석의 경우 단면의 수직방향으로 기하학적, 물리적 양이 일정하다는 조건이 필요하고, AFPM 발전기는 수직축 방향으로 구조가 나열되어 있어 2차원 유한 요소 해석에 어려움이 존재하기 때문에 3차원 유한 요소 해석 기법이 사용되어졌다. 표 1은 모델링된 AFPM 발전기의 설계사양을 보여주고 있다.

표 1. AFPM 발전기의 설계사양
Table 1. Specification of AFPM generator

	Coreless AFPM	AFIR-S
Pole number	40	20
Number of phases	3	3
Outer diameter([mm])	211	211
Inner diameter([mm])	122	122
Thickness of magnets([mm])	5	5
Rated speed([rpm])	600	600

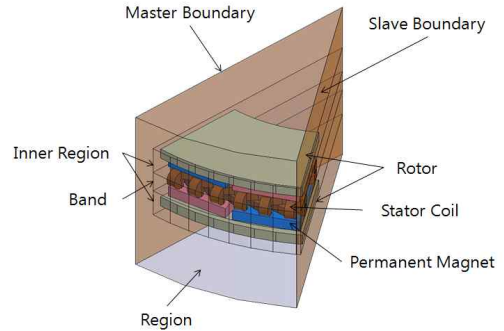


그림 2. Coreless AFPM 발전기의 3차원 유한 요소 해석 대칭 분할모델
Fig. 2. 3D FEA symmetry model of coreless AFPM generator

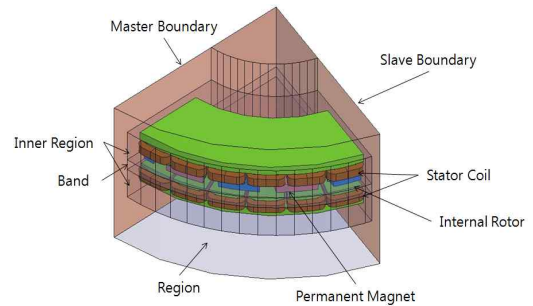


그림 3. 내륜형 AFPM 발전기의 3차원 유한 요소 해석 대칭 분할모델
Fig. 3. 3D FEA symmetry model of internal AFPM generator

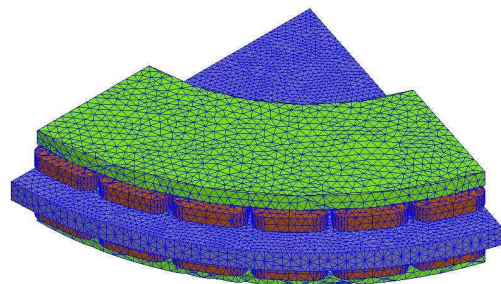


그림 4. 내륜형 AFPM 발전기의 메쉬 설정
Fig. 4. Mesh operation of internal AFPM generator

3.2 AFPM 발전기 3D 유한요소 해석

3차원 유한 요소 해석에서는 시간절약을 위해 사용되어지는 기법중 하나인 대칭 분할모델을 이용함으로써 해석시간을 더욱 단축할 수 있었다.

Coreless AFPM 발전기의 해석에는 1/10 대칭 분할 모델이 이용되어졌고, 내륜형 AFPM 발전기의 해석에서는 영구자석 극호비에 의한 코깅토크를 계산하기 위해서 1/5 대칭 분할모델을 이용하였다. 그림 4는 3차원 유한 요소 해석에 사용되어진 AFPM 발전기의 대칭 분할모델을 나타내었으며, 경계 및 밴드 설정 또한 나타내었다.

유한 요소 해석에서 코깅토크 계산은 토크, 전류 및 전압 등의 계산을 할 때에 비해서 훨씬 많은 수의 메쉬를 요구하게 된다.

따라서 전압 및 전류에 대한 해석이 필요한 코어리스 AFPM 발전기의 총 메쉬는 75,690개이며, 영구자석의 skew 및 극호비에 따른 코깅토크 계산을 위한 내륜형 AFPM 발전기의 총 메쉬는 356,933개로 설정되어졌다. 그중에서도 공극이 있는 밴드는 정확한 해석을 위해 가장 많은 80,731개의 메쉬를 설정했다.

4. 3D 유한요소 해석결과

4.1 역기전력 특성

일반적으로 고정자 철심이 없는 구조의 Coreless AFPM 발전기는 철심슬롯이 있는 AFIR-S 발전기에 비해 공극에서의 자기저항이 크다. 따라서 자기저항이 증가하여 공극 자속밀도의 감소가 일어난다.

그림 5는 Coreless AFPM 발전기와 AFIR-S 발전기의 공극 자속밀도를 비교한 것으로서 철심슬롯을 사용한 AFIR-S 발전기의 공극자속밀도가 Coreless AFPM 발전기에 비하여 최대 자속밀도가 약 52.99[%] 상승한 것을 알 수 있고, AFIR-S의 공극 자속밀도의 일그러진 부분은 철심슬롯의 삽입으로 인한 자기저항의 변화에 의해 발생된다.

그림 6은 3차원 유한 요소 해석을 통해 정격속도로 회전 하였을 때 한주기 동안의 무부하 역기전력의 해석 파형을 나타낸다. Coreless AFPM 발전기의 경우는 26.2[Vrms], AFIR-S AFPM은 69.38[Vrms]의 출력을 보이며, 식 (3)에서와 같이 공극 자속밀도의 증가로 인해 역기전력 또한 증가하게 되었다.

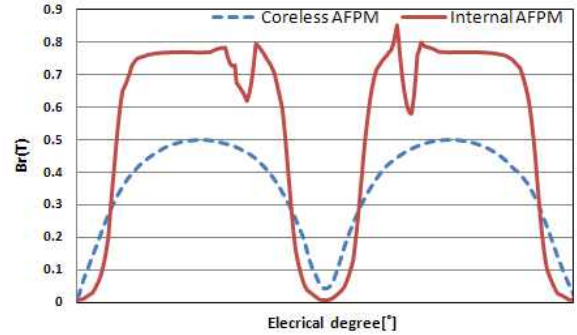


그림 5. 공극 자속밀도 비교
Fig. 5. Comparison of air-gap flux density

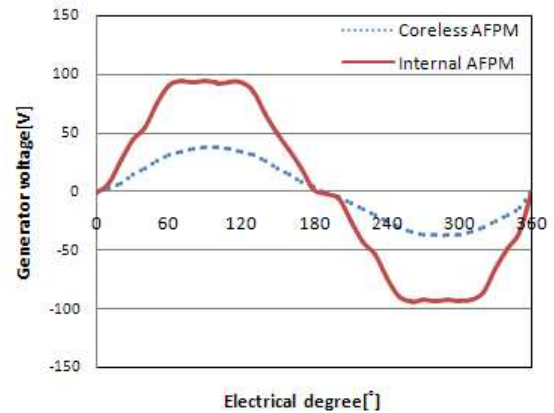


그림 6. 코어리스 AFPM 발전기와 내륜형 AFPM 발전기 무부하 출력전압 파형비교
Fig. 6. Comparison of back EMF waveform at no-load between coreless AFPM and internal AFPM generator

4.2 코깅토크 특성

코깅 토크는 회전자의 영구자석이 회전할 때 공극의 회전자와 고정자 사이의 슬롯(slot) 및 슬롯 티스(slot teeth)의 퍼미언스(permanence) 및 릴럭턴스(reluctance)의 변화에 의해 발생한다. 즉 영구자석에서 나오는 자속이 자기저항이 최소가 되는 안정위치에서 벗어나 다시 안정위치로 복귀할 때 반대방향으로 작용하는 힘에 의하여 발생하게 된다. 이것은 회전자의 회전 위치에 따른 공극에 축적된 에너지의 변화량을 계산해서 얻을 수 있으며, 코깅토크는 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{cog}(\theta_r) = -\frac{1}{2} \phi_g^2 \frac{dR}{d\theta_r} \quad (5)$$

여기서 ϕ_g 는 공극 자속, R 는 공극 릴럭턴스, θ_r 는 회전각이다.

코깅토크는 발전기의 기동에 많은 영향을 미치므로 코깅토크의 감소는 매우 중요한 부분이다. 대부분의 영구자석형 기기에 대한 코깅토크 저감 기술은 크게 고정자 형상변경과 회전자 형상변경으로 나눌 수 있으나, 회전자에 대한 형상변경은 제작의 어려움이 발생하며, 가격상승의 원인이 되므로 AFPD 발전기에서는 일반적으로 회전자 형상변경을 이용한 코깅토크 저감기술이 사용되어지고 있다[6]. 그림 7은 영구자석형 기기의 다양한 코깅토크의 저감기법을 보여준다.

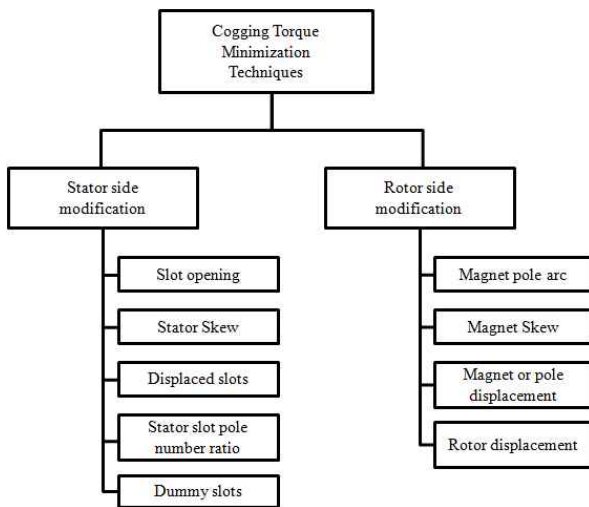


그림 7. 코깅토크 저감기법
Fig. 7. Cogging torque minimization technique

4.2 극호비 최적화 설계

영구자석 극 간격에 대한 자석 폭의 비율을 극호비라 정의하며, 그림 8은 극호(pole-arc)와 극간(pole-pitch)의 비를 이용한 최적 극호비 설계를 보여준다. 극호비는 전동기의 특성을 결정하는 중요한 파라미터이다. 일반적으로 일정한 극호비의 비율에 따라 최소 코깅토크, 단위 무게당 최대토크, 효율이 최고가 될 수 있음을 기존의 연구에 의해 알 수 있다.

코깅토크 최소화를 위한 최적 극호비 α_p 는 다음 식(6)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$\alpha_p = \frac{N-k}{N}, k = 1, 2, \dots, N-1 \quad (6)$$

여기서 $N = N_c/2p$ 이며 p 는 극쌍수, N_c 는 극수와 슬롯수, N_s 의 최소공배수이며, 만약, N_s/p 가 정수이면 $N_s = N_c$ 이다. 그러나 보통 α_p 는 누설자속의 영향으로 식(6)보다 약간 크다.

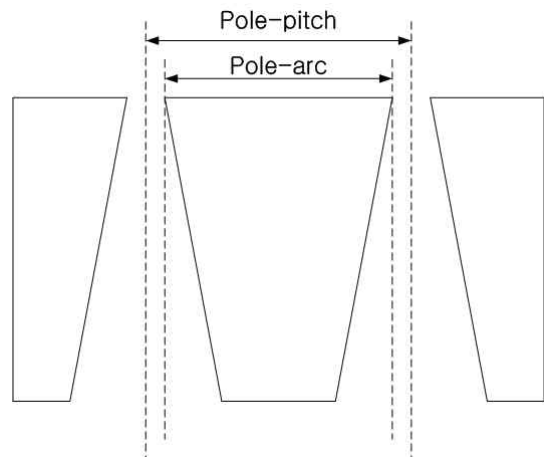


그림 8. 최적 극호비 설계
Fig. 8. Design of optimum pole-arc to pole-pitch ratio

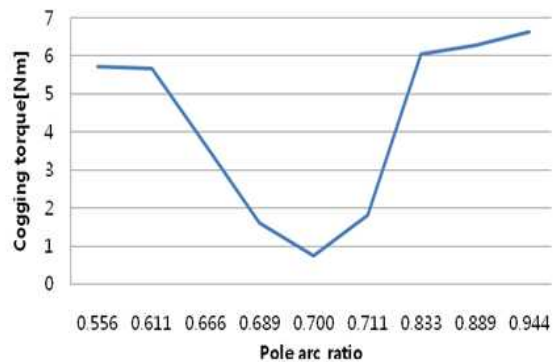


그림 9. 극호비 변화에 따른 내륜형 AFPD 발전기의 최대치 코깅토크 변화곡선
Fig. 9. Variation of peak to peak cogging torque of internal AFPD generator with magnet pole arc

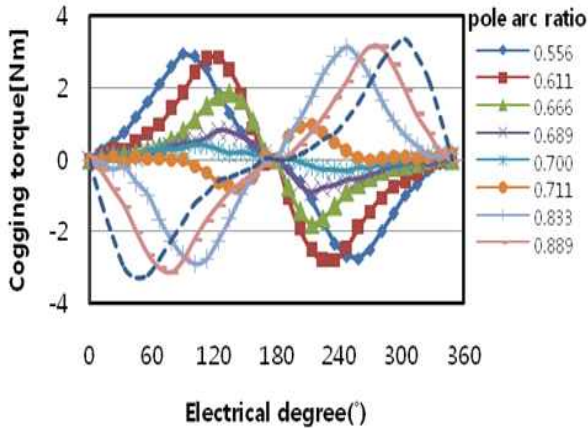


그림 10. 극호비에 따른 한주기 코깅토크 변화곡선
 Fig. 10. Variation of one cycle of cogging torque waveform with magnet pole arc

4.3 최적 극호비에 따른 코깅토크 특성

식 (6)을 이용한 내륜형 AFPM 발전기의 코깅토크 최소화화를 위한 최적 극호비 α_p 는 0.666(ele 120°) 이지만, 그림 9에서와 같이 α_p 가 0.944(ele 170°)일 때 코깅토크는 6.78[Nm]으로 최대임을 보여주고, α_p 가 0.700(ele 126°)일 때 코깅토크가 0.91[Nm]으로 최소임을 보여준다.

그림 10은 극호비 변화에 따른 한주기 코깅토크 변화곡선을 보여준다.

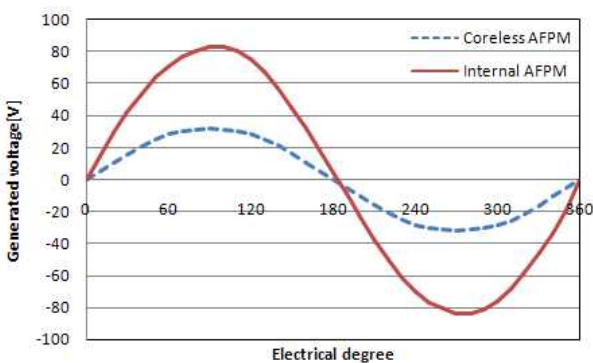


그림 11. 코어리스 AFPM 발전기와 내륜형 AFPM 발전기의 부하 출력전압 파형비교
 Fig. 11. Comparison of back EMF waveform at rated load between coreless AFPM and internal AFPM generator

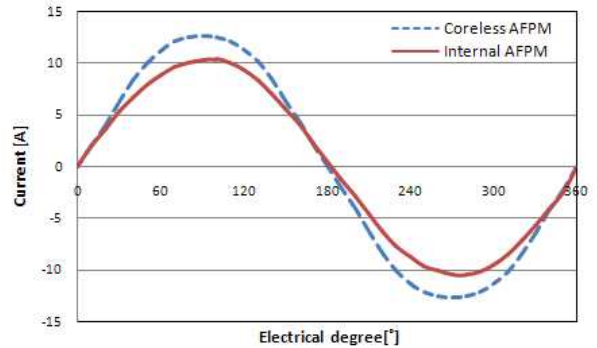


그림 12. 코어리스 AFPM 발전기와 내륜형 AFPM 발전기의 부하 출력전류 파형비교
 Fig. 12. Comparison of current waveform at rated load between coreless AFPM and internal AFPM generator

5. 결 론

본 논문에서는 기존에 소형 풍력 발전 터빈에서 사용되어진 코어리스 AFPM 발전기의 출력전압 향상을 위하여 철심슬롯이 있는 내륜형 AFPM 발전기를 설계 및 제안하였으며, AFPM 발전기의 기본이론 및 출력특성에 대한 이론적 고찰과 비교를 하였고, 특성방정식과 설계식을 유도하였다.

그리고 3차원 유한 요소 해석기법을 이용한 전자기 구조 설계와 기구설계, 코깅토크를 최소화 할 수 있는 영구자석형상 설계 및 출력특성을 계산할 수 있었다.

그림 11과 12는 최종 설계모델의 출력전압과 출력전류를 보여주며, 각각 58.32[V], 7.29[A]의 실효값을 가진다. 그리고 전압과 전류의 위상이 동상임을 알 수 있으며, 이러한 결과를 통하여 전기자 반작용 현상은 일어나지 않는 것을 보여준다.

AFIR-S 발전기는 기존의 코어리스 AFPM 발전기에 비하여 약 2.5배의 출력전압 향상을 이루었으며, 동일체적에서 정격출력 1.2[kW]를 확보한 것을 보여준다.

소형 풍력 발전기는 바람의 세기에 따라 발전량이 결정되며, 이를 위해 초기 기동토크가 작아야한다. 즉 기동토크는 코깅토크를 말하며, 코깅토크의 저감에는 여러 방법들이 존재하지만, 그 중 영구자석의 극호비 최적화를 통해 코깅토크를 감소하였다.

연구결과로서 전자기 구조설계와 극호비 변경을 통해 코깅토크 감소를 알 수 있었으며, 향후 시작품제작을 통해 코깅토크 해석을 검증할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2010년도 산학연 공동기술개발사업(No.00041133)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2011-0005694)

References

- [1] Bunby, J. R, Martin, R, "Axial-flux permanent- magnet air-cored generator for small-scale wind turbines", in Proceedings of IEEE Electric Power Applications, vol. ps-152, no.5. pp.1350-2352, sept. 2005.
- [2] Sadeghierad, M, Lesani, H, Monsef, H, Darabi, A, "Design considerations of high speed axial flux permanent magnet generator with coreless", in Proceedings of Power Engineering 2007 Conference, Singapore, Dec 2007.
- [3] Yanto, H, A, Chun-Ta Lin, Jonq-Chin Hwang, Sheam-Chyun Lin, "Modeling and control of household- size vertical axis wind turbine and electric power generation system", in Proceedings of PEDS 2009 Conference, Taipei, Nov. 2009.
- [4] Aydin, M, Zhu, Z. Q, Lipo, T. A, Howe, D, "Minimization of Cogging Torque in Axial Flux Permanent Magnet Machines Design Concepts", IEEE Transactions on Magnetics, vol. PS-43, no.9. pp.3614- 3622, Sept. 2007.
- [5] Gieras J. F, Wang R. J, M. J. Kamper, "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines" Kluwer Academic Publishers, pp. 37-41 2004.
- [6] Aydin, M, "Axial-Flux surface mounted permanent magnet disc machines for smooth torque traction drive application." PhD Thesis, University of Wisconsin-Madison, 2004.

◇ **저자소개** ◇



정태욱(鄭泰旭)

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대학교 전기공학 졸업. 1995년 부산대학교 전기공학 졸업(석사). 1999년 부산대학교 전기공학 졸업(박사). 1996~2006년 LG전자 DAC연구소 책임연구원. 2006~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년~현재 경남대학교 전기공학과 조교수.
Tel : (055)249-2628
E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr



배병덕(裴秉德)

1985년 12월 16일생. 2010년 경남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : (055)249-2628
E-mail : gompooh1216@nate.com



김희천(金會千)

1985년 4월 10일생. 2010년 경남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : (055)249-2628
E-mail : backas1000@naver.com