

2중 공극형 횡자속 영구자석 동기발전기 설계 및 특성분석

배성우^{*}·황돈하^{**}·강도현^{**}·김용주^{**}·최경호^{***}·김동희^{*}
^{*}영남대학교 전자정보공학부, ^{**}한국전기연구원 산업전기연구단, ^{***}경북전문대학 디지털전기과

Design and Characteristics Analysis of Dual Air-Gap Axial-Flux type Permanent-Magnet Synchronous Generator

Sung-Woo Bae^{*}, Don-Ha Hwang^{**}, Do-Hyun Kang^{**}, Yong-Joo Kim^{**}, Kyeong-Ho Choi^{***}, Dong-Hee Kim^{*}
 Yeungnam University^{*}, Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)^{**}, Kyungbuk College^{***}

Abstract - This paper presents the design and characteristics analysis of axial-flux permanent-magnet (PM) synchronous generator of two air-gap. Dual axial-flux type PM synchronous generator commonly appears in applications where the generator axial dimension is more limited than the radial dimension. The strengths of dual axial-flux generator include ; (1) by employing two air-gaps, the rotor-stator attractive forces are balanced and no net axial or thrust load appears on the generator bearings ; (2) heat produced by the stator windings appears on the outside of the generator, making it relatively easy to remove, and so on. In this paper, the simple magnetic equivalent circuit approach is used for initial design iteration, and the finite-element method is applied to analyze the detailed characteristics. The test results of driving characteristics are presented as well. The results are very similar to predicted performance of design.

특성실험에 앞서 운전특성 분석을 위해 2차원 등가모델을 활용한 유한요소 해석을 통하여 무부하 및 가변부하 조건하에서 동특성을 구하였다. 무부하시 해석에서는 회전자 속도에 따라 유기기전력 및 전압파형을 분석하였고, 저항(R) 및 인덕턴스(L) 부하를 변화시켜 수행한 운전특성 해석에서는 속도변화에 따른 전압 및 전류 파형을 구하였다. 또한, 실제 발전기의 운전상태에서 저항부하를 연결하여 무부하 및 정격부하에서의 특성실험을 수행하여 설계 및 해석치와 비교하였다.

2. 영구자석 동기발전기 설계

2.1 발전기 형상 및 설계

2중 공극형 횡자속 영구자석 발전기는 그림 1과 그림 2에서와 같이 2개의 공극을 가지며 회전자를 중심으로 2개의 고정자가 위치하고 있다. 영구자석은 부채꼴 형상을 가지고, 자속은 양측의 고정자에 수직으로 향하는 횡자속의 형태를 이룬다. 특히, 고정자의 구조는 일반적인 전자기기에서 사용되는 일반 적층구조가 아니고, 와전류 손실을 줄이기 위해 코어롤 Roll 형식으로 채택하였고, 고정자의 권선은 방사형의 구조를 가지고 있다. 본 연구에서 설계 및 제작한 영구자석 동기발전기는 3상 60 [Hz] 10 [kVA]급으로서, 고정자 코어의 재질은 S-18, 두께 0.5 [mm]의 규소강판을 사용하였고, 회전자는 코어없이 24극으로 극당 1개씩의 영구자석을 포함하고 있다. 영구자석을 지지하는 회전자 구조는 비자성체인 스테인레스를 사용하여 누설되는 자속을 최대한 줄이는 구조로 설계하였다. 영구자석의 외부 형상은 누설자속을 줄이기 위해 부채꼴 모양으로 하였고, 150 [°C]까지 탈자현상이 발생하지 않는 NdFeB 계열의 영구자석을 사용하였다. 또한, 유기기전압 파형이 정현파 형상이 되도록 극과 극 사이에 약간의 간격을 두어 설계하였다. 권선방식은 End-winding의 부피를 줄이기 위하여 Single-layer Lap Winding으로 하였고, 총 슬롯수를 72개로 하여 매상 매극당 도체수를 1로 하였다.

1. 서론

최근 영구자석 소재의 발전과 전기기기 분야의 설계, 해석기술의 향상으로 영구자석을 활용한 전동기, 발전기 등의 개발이 활발히 이루어지고 있고, 특히, 발전기 분야에서는 수 MW급까지 개발되고 있다. 영구자석 회전기의 형상은 대부분 Radial-flux 형태로 제작되어 왔으나, 최근에는 제작, 구조상의 장점과 함께 적용상의 장점이 있는 2중 공극형의 Axial-flux (횡자속) 형태로 많이 설계되고 있다. 이러한 횡자속형 발전기와 전동기는 풍력 및 수력발전기, 전기자동차 및 경량전철, 잠수정 및 잠정 추진체계 등으로 응용범위가 크게 확대되고 있다[1-3].

본 논문에서는 대체에너지원으로서 각광을 받고 있는 직축 구동형 풍력발전기에 적용할 수 있는 2개의 공극을 가진 Axial-flux형의 영구자석 동기발전기를 제안한다. 2중 공극형 횡자속 영구자석 동기발전기는 2개의 공극을 가짐으로서 영구자석이 부착된 회전자와 고정자 사이의 상호간에 작용하는 힘이 평행을 이루므로 베어링의 손상을 방지하며 고정자에 감겨진 권선의 구조상 열 발생효율이 높고, 고정자의 권선작업이 평면상에서 이루어지기 때문에 쉽게 할 수 있다. 회전자 측면에서도 2개의 고정자 인한 힘의 균형으로 영구자석의 부착작업이 간편하며, 영구자석의 양면 모두 활용함으로써 회전자 제작이 필요하지 않다. 또한, 영구자석은 과거에는 에너지 밀도가 낮은 페라이트 영구자석이 많이 사용되어 부피가 커지는 단점이 있었으나, 최근에는 온도특성이 향상되고 에너지 밀도가 크게 높아진 NdFeB가 대부분의 영구자석 여자 동기발전기에 적용됨으로써 부피 및 중량을 감소시키면서도 고성능의 발전기 개발이 가능하게 되었다[2-5].

본 논문에서 제안한 2중 공극형 횡자속 영구자석 동기발전기의 주요사양은 3상, 10 [kVA], 300 [rpm]급이고,

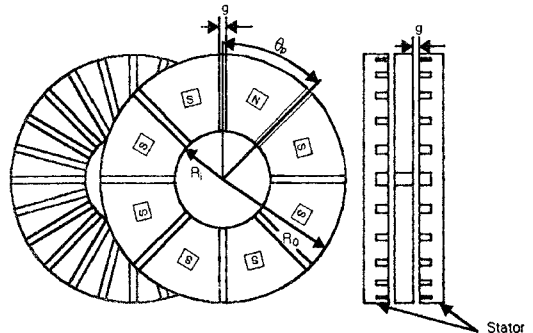


그림 1. 횡자속형 영구자석 발전기의 전체 형상

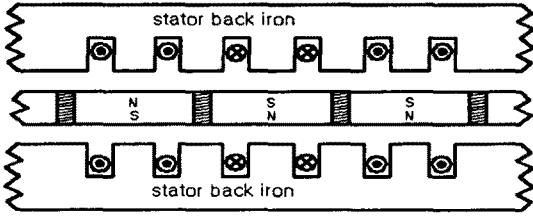
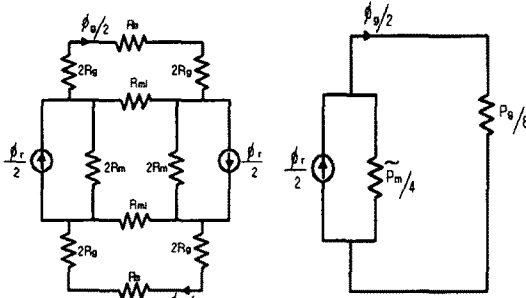


그림 2. 횡자속 영구자석 동기발전기의 단면도

2.2 Magnetic Circuit Analysis

2개의 공극과 고정자를 가지는 형상의 동기발전기를 등가 자기회로와 간략화시킨 회로로 나타내면 그림 3과 같다. 자기 등가회로에서 고정자 철계의 리턴턴스를 무시하고, 간이화된 자기회로도 대칭적인 영구자석 부분을 고려하고, 영구자석의 퍼미언스와 영구자석 누설 퍼미언스의 합을 등가 퍼미언스 P_m 로 그림 3 (b)와 같이 간략화된다. 여기서 영구자석의 퍼미언스는 $P_m = P_m + 2P_{ml}$ 의 값을 가진다.



(a) 자기 등가회로 (b) 간이 등가회로
그림 3. 자기 등가회로 및 간략화 회로

2개의 고정자에 의한 자속분할로, 공극에서의 자속은 퍼미언스 P_m 에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_g/2 = \frac{P_g/8}{P_g/8 + P_m/4} \phi_r/2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\phi_g = \frac{1}{1 + 2P_m/P_g} \phi_r \quad \dots \dots \dots (2)$$

식 (1)과 식 (2)는 하나의 공극을 갖는 경우의 공극에서 자속과 유사한 식으로 표현됨을 알 수 있다. 즉, 하나의 공극을 갖는 발전기의 자기회로의 경우보다는 2개의 공극을 갖는 2중 공극인 경우에는 공극의 길이가 2배가 되므로 공극에서의 퍼미언스는 $P_g/2$ 가 된다.

2중 공극형 횡자속 발전기에서 영구자석 퍼미언스는 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$P_m = \frac{\mu_r \mu_0 A_m}{l_m} \quad \dots \dots \dots (3)$$

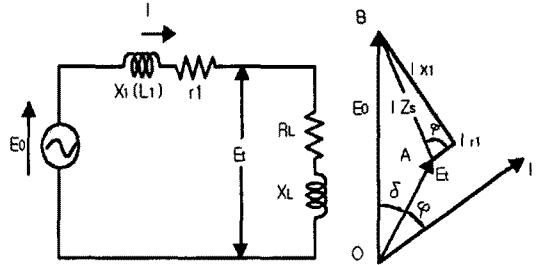
식 (3)에서 영구자석의 단면적 A_m 은 다음과 같다.

$$A_m = \frac{\pi}{N_m} (R_o^2 - R_i^2) - \tau(r_o - R_i) = \alpha_m \frac{\pi}{N_m} (R_o^2 - R_i^2)$$

여기서, α_m 은 영구자석의 형상에 따른 비율이다.

2.3 Electrical Magnetic Circuit Analysis

다상기에서 1상의 등가회로는 정현파의 기전력원과 동기 임피던스로 구성되는 직렬회로가 되며, 그림 4 (a)는 1상의 단자에 평형부하가 접속된 등가회로이고, 정현파 기전력을 가정하여 그림 4 (b)에 벡터도를 함께 나타내었다. 부하는 저항분과 유도성으로 이루어지는 지상 역률 부하가 일반적이다.



(a) 1상의 전기회로 (b) 벡터도
그림 4. 발전기 1상의 전기회로 및 벡터도

그림 1에서 E_0 는 무부하 유도기전력, E_t 는 단자전압, I 는 전기자전류, r_1 는 전기자저항, X_s 은 동기리액턴스, Z_s 는 동기임피던스, ϕ_0 는 내부상차각, δ 는 부하각, ϕ 는 역률각, R_L 는 부하저항, X_L 은 부하 리액턴스 각각 나타낸다. 그림 4 (b)의 벡터도에서 삼각형 OAB에 정현법칙을 적용하면 다음의 식 (4)가 성립한다.

$$\frac{IZ_s}{\sin \delta} = \frac{E_0}{\sin(\phi_0 - \phi)} = \frac{E_t}{\sin(\phi_0 - \phi - \delta)} \quad \dots \dots (4)$$

식 (4)는 발전기 특성에 관한 식으로서, 전압, 전류, 출력, 및 입력 등의 특성계산식이 도출된다.

발전기의 유기전압은 발전기 구조와 회전수 및 자속과 관련이 있다. 횡자속형의 발전기 구조에서는 부채꼴 모양의 자석에서 발생하는 쇄교자속과 발전기의 속도와 관련되는 데, 이것을 수식적으로 표현하면 무부하시 유기전압은 식 (5)와 같다.

$$E_0 = N_m k_d k_p k_s B_g N_{sp} n_s (R_o^2 - R_i^2) \omega_m \quad \dots \dots (5)$$

여기서, N_m 는 마그네트 극수, k_d , k_p , k_s 는 권선계수, B_{max} 는 코어최대 자속밀도, N_{sp} 는 상당 슬롯당 극수이고, R_o , R_i 는 회전자 외경과 내경을 나타내며, ω_m 은 기계적 속도를 나타낸다.

2.4 설계 결과치

본 연구에서 설계 및 제작한 2중 공극형 횡자속 영구자석 동기발전기는 3상 60 [Hz], 380 [V], 10 [kVA]급으로서 수치적인 설계 결과는 표 1과 같다.

그림 1. 영구자석 동기발전기의 설계 결과치

No. of turns	56
EMF	226 [V]
Phase current	15.53 [A]
Max. current density	4 [A/mm ²]
Conductor packing factor	0.65
Conductor diameter	3.5 [mm]
No. of slots/pole/phase	1
No. of slots/pole	3
Carter-coff.	1.007
Air-gap flux density	0.446
Air-gap flux [kG]	0.752
Air-gap length	1.5 [mm]

3. 유한요소법에 의한 특성해석

3.1 등가 해석모델

본 연구에서 설계한 영구자석 동기발전기의 구조는 횡자속형으로서, 2개의 고정자 사이에 1개의 회전자가 놓여지게 구성되어 있으므로 정확한 해석을 위해서는 3차원 과도상태 해석이 필요하다.

그러나, 본 논문에서는 시간절약을 위하여 그림 5와 같이 2차원 등가모델을 개발하여 유한요소 해석을 수행하였다. 등가모델의 치수는 평균값을 구하여 선정되었고, 해석모델의 간략화를 위해 24극 중에서 2극을 모델화하여 상하 24개 Slot 사이를 움직이게 하여 동특성을 분석하였다. 횡자속형 영구자석 동기발전기의 유한요소법(Finite-Element Method ; FEM)에 의한 운전특성 해석을 위한 Magnetic Field 방정식은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다[6-8].

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla \times (\nu \mathbf{B}_r) = 0 \quad \dots \dots \dots (6)$$

여기서,

\mathbf{A} : Magnetic vector potential

ν : Magnetic reluctivity

\mathbf{B}_r : Permanent magnetic flux density

해석모델에 적용한 영구자석의 Radial 방향 길이는 평균하여 계산하고, 해석은 상용 전자계 해석 프로그램인 Maxwell을 사용하였다. 고정자 코일에 유기되는 역기전력을 구하기 위해서 무부하시와 부하시 외부회로를 구성하여 각각의 전압을 구하였다.



그림 5. 영구자석 발전기의 등가 해석모델

3.2 유한요소 해석결과

그림 5의 등가모델을 이용한 유한요소 해석으로부터 구한 공극에서의 자속밀도를 그림 6에 나타내었고, 공극에서 실효치로 0.51T(설계치 0.446T)의 자속밀도가 나타남을 확인하였다.

그림 7은 공극 자속밀도의 고조파 스펙트럼 분포를 나타낸 것으로서 기본파를 기준시 3, 5, 7고조파가 각각 22, 11, 18 [%]로 나타남을 알 수 있다.

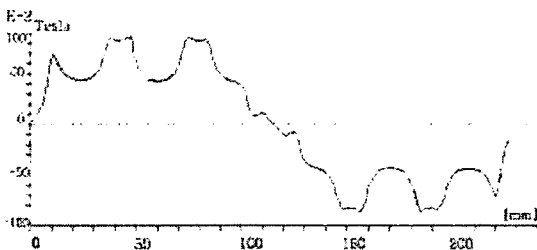


그림 6. 공극 자속밀도

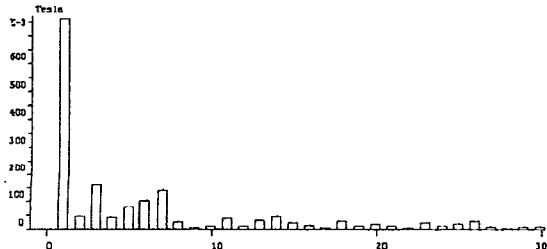


그림 7. 공극 자속밀도의 고조파 스펙트럼

발전기 동특성 해석을 위해서 외부회로를 연결하여 무부하시 뿐만 아니라 R 및 R-L 부하를 인가하여 유한요소 해석을 수행하였다. 무부하시 유기되는 전압은 외부회로에 초기저항을 크게 하여 양단에 걸리는 전압으로 구하였다. 부하측의 전동기 역률을 0.7로 보았을 때, 저항값과 인덕턴스 값을 산출하여 정격 전류와 전압을 산출하였다. 그림 8은 외부에 정격 저항부하(R)가 연결될 때의 24극에서 2극을 모델링하여 구한 3상 전류파형으로서, 대체적으로 양호한 정현파가 나타남을 볼 수 있다. 발전기의 총 72개 슬롯 중에서 6개 슬롯에 삽입된 코일에 흐르는 전류이므로 직렬 연결된 총 슬롯을 고려해서 12배하여 실효치로 환산하면 정격전류인 15.5 [A]에 근접하는 것을 알 수 있다.

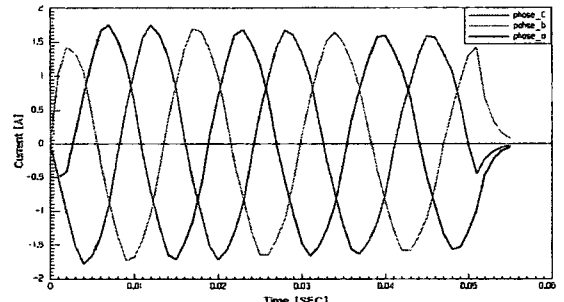


그림 8. 저항부하시 전류파형

그림 9는 해석모델에서 구한 3상 무부하 전압과 R 및 R-L 부하시의 속도에 따른 전압을 나타내고 있다. 속도변화에 따라 전압은 비례하여 증가함을 볼 수 있고, 정격속도에서 한 상에 유기된 전압의 실효값은 254 [V]로서 계산된 값을 기준으로 9 [%] 정도 높게 나타났다.

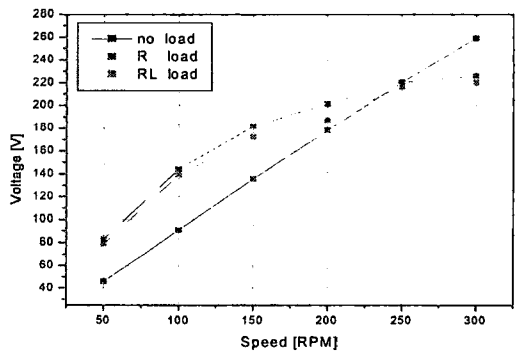


그림 9. 속도에 따른 전압특성

4. 발전기 제작 및 실험결과

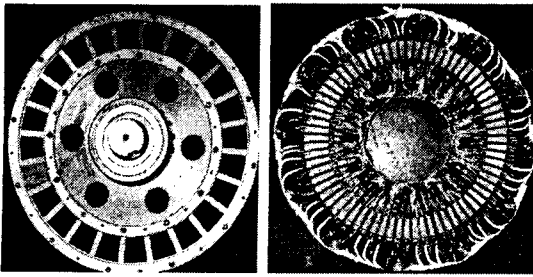
4.1 발전기 제작

그림 10은 본 연구에서 실제 제작한 10 [kVA]급 2중 공극형 횡자속 영구자석 동기발전기의 고정자 및 회전자 의 형상을 나타낸 것으로서, 고정자 권선은 Roll 형태의 적층코어에 방사형으로 감겨져 있고, 회전자는 비자성체에 홈을 내어 영구자석을 삽입하였으며, 회전자 영구자석의 이탈을 방지하기 위하여 링을 외부에 설치하였다.

그림 11은 회전자 및 고정자 조립후 발전기의 실제 사진을 보여주고 있고, 축방향 길이가 Radial-type의 발전기에 비해 상당히 작게 됨을 알 수 있다.

4.2 발전기 특성실험 결과

발전기의 특성실험을 위해 가변속 인버터-유도전동기 시스템을 사용하여 속도변화에 따른 특성을 측정하였다.



(a) 회전자 형상 (b) 고정자 1개의 형상
 그림 10. 영구자석 동기발전기의 고정자 및 회전자 형상

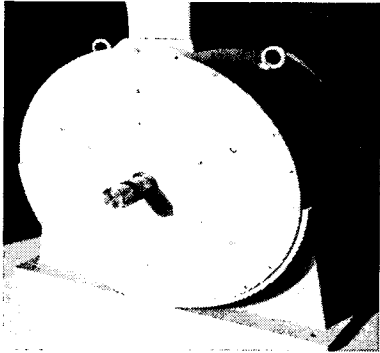


그림 11. 영구자석 동기발전기의 제작사진

또한, 저항가변이 가능한 부하를 연결하여 부하가변에 따른 발전기의 특성을 분석하였다.

그림 12는 무부하시 회전수에 따른 전압 변화를 나타낸 것으로서, 300 [rpm]에서 399.16 [V]로 설계치 및 해석결과와 유사하게 나타남을 알 수 있다.

그림 13은 부하전류에 따른 선간전압(Vrms)을 보여주고 있고, 정격전류 15.5 [A]에서 약 340 [V]로 정격전압과 유사함을 확인하였다.

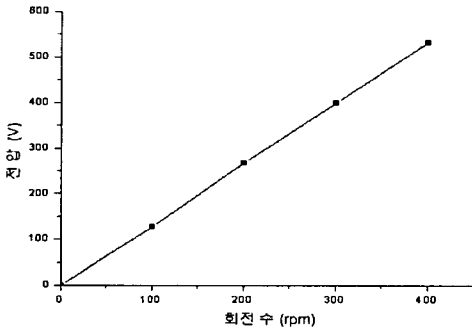


그림 12. 무부하시 회전수에 따른 출력전압

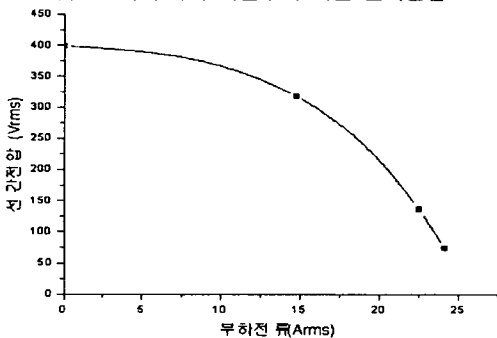


그림 13. 부하전류에 따른 선간전압

그림 14는 무부하 정격속도 운전시 각상의 역기전력을 측정된 파형을 나타낸 것으로서, 대체적으로 양호한 정현파형이 나타남을 볼 수 있다.

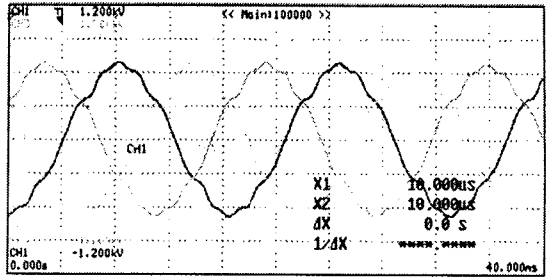


그림 14. 무부하 정격속도에서 역기전력 파형

5. 결론

본 논문에서는 응용분야가 크게 확대되고 있는 영구자석 여자 회전자로서, 직축 구동 Gearless형 풍력발전기에 적용할 목적으로 10 [kVA]급 2중 공극형 횡자속 동기발전기를 제안하였다. 제안한 영구자석 발전기의 자기 및 전자계 회로 해석을 통하여 상세한 설계기법을 도출하였고, 자기회로를 이용한 공극의 자속 및 고조파 분석, 그리고 역기전력을 활용한 특성비교와 부하 및 속도 변화에 따른 동특성을 분석하였다. 또한, 실제 발전기의 무부하 및 정격부하 시험에 의한 특성실험을 수행하여 설계 및 해석치와 비교하였다. 공극 자속밀도 비교에서는 설계치 대비 해석값이 14 [%]의 상승을 보였으며, 무부하 유기전압은 해석치가 설계치와 비교하여 4 [%]의 오차가 있음을 알 수 있었다. 또한, 수치적인 설계치, 유한요소 해석결과 및 실험결과가 거의 유사함을 확인할 수 있었다. 그러므로 향후 2중 공극형 횡자속 영구자석 동기발전기의 설계, 해석 및 실험 등에 있어서 유용한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] F. Caricchi, F. Crecimbin, O. Honorati, G.L. Bianco, and E. Santini, "Performance of Coreless-Winding Axial-Flux Permanent-Magnet Generator with Power Output at 400 Hz, 3000 r/min", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 6, pp. 1263-1269, Nov. 1998.
- [2] W.S. Leung and J.C.C. Chan, "A New Design Approach for Axial-Field Electrical Machines", IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-99, pp. 1679-1685, July/Aug. 1980.
- [3] 황돈하, 박도영, 강도현, 배성우, 최경호, 김동희, "영구자석형 풍력발전기 설계 및 정상상태 전자계 해석", 2002년도 대한전기학회 (전기기기 및 에너지변환시스템학회) 춘계학술대회 논문집, pp. 6~8, 2002. 4. 26.
- [4] B.J. Chalmers, W. Wu, and E. Spooner, "An Axial-Flux Permanent-Magnet Generator for a Gearless Wind Energy System", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, pp. 251-257, June 1999.
- [5] A. E Fitzgerald, C. Kingley, and S. Umans, *Electric Machinery*. New York, McGraw-Hill, pp. 523-524, 1990.
- [6] V. Cingoski, M. Mikami and H. Yamashita, "Computer Simulation of a Three-phase Brushless Self-Excited Synchronous Generator", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 3, pp. 1251-1254, May 1999.
- [7] J. Chen, C.V. Nayar, and L. Xu, "Design and Finite-Element Analysis of an Outer-Rotor Permanent-Magnet Generator for Directly Coupled Wind Turbines", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, No. 5, pp. 3802-3809, Sep. 2000.
- [8] 황돈하, 강도현, 김동우, 배성우, 최경호, 김동희, "횡자속형 영구자석 풍력발전기 설계 및 특성해석", 2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp. 949~951, 2002. 7.