

횡자속형 2중 공극 영구자석 동기발전기의 마그네트 형상설계

최경호*, 김경식*, 진명철*, 황돈하**, 배성우***, 김동희***, 노채균***

경북전문대학*, 한국전기연구원**, 영남대학교***

Design of Magnet Shape for Axial-Flux Type Permanent-Magnet Synchronous Generator with Dual Air-Gap

K.H. Choi*, K.S. Kim*, M.C. Jin*, D.H. Hwang**, S.W. Bae***, D.H. Kim***, C.G. Ro***
Kyungbuk College*, Korea Electrotechnology Research Institute**, Yeungnam Univ.***

ABSTRACT

This paper presents a novel design technique and characteristic analysis of Magnet for dual air-gap axial-flux type permanent-magnet synchronous generator. The process of magnet design is applied to the motor design and steady state analysis considering output voltage waveforms and magnetic flux waveforms.

Design and construction of an axial-flux permanent-magnet generator with power output at 60 [Hz], 300 [r/min] is introduced. Finite-element (FE) method is applied to analyze magnet shape characteristics. The results of FE analysis show generator is feasible for use with dual air-gap axial-flux permanent-magnet synchronous generator.

1. 서론

오늘날까지 산업현장이나 가정에 사용되는 발전기나 전동기 구조는 대부분 전동기의 회전축을 기준으로 직자속형(radial) 방향의 구조를 사용하였다. 직자속형 구조는 회전기기의 출현이후에 수많은 연구자들에 의해 연구와 실용을 거쳐 최근에는 거의 안정화된 기술로 자리잡고 있다. 특히, 제작 및 해석 기술의 보편화로 인해 세계적으로 회전기의 성능 향상이 일반화되었다. 그러나 산업구조의 다양화에 따른 전기분야 회전기의 구조도 다양성을 요구하고 있다. 함축된 구조, 중량저감, 제한적 공간적용, 성능가변, 소재의 활용성 향상, 고효율, 경비저감 등의 요구가 커지고 있다. 이러한 시대적 요구에 따라 새로운 구조와 성능을 지닌 회전기기가 기존의 이론중심에서 벗어나 일반 산업현장에

적용되고 있다. 특히 영구자석을 활용한 발전기 분야가 대표적인 크게 발전하고 있다[1][2].

영구자석 여자 발전기는 최근까지 Radial 방향의 자속구조를 갖는 형식으로 대부분 제작되어 사용되어 왔으나, 최근에는 고정자의 제작은 다소 어렵지만, 축 방향 길이가 제한적인 곳, 2중 구조의 고정자로 자석의 활용도를 높게 하기 위한 구조, 중량을 줄이기 위한 구조에서는 Axial 방향의 자속구조가 사용되며, 또한 설치비용은 비교적 많이 들고, 자계구조가 복잡하지만, 설치공간에는 비교적 제한이 없는 구조인 Radial type과 Radial 자속구조에 비해 비교적 Pole Pitch가 적으며, 또한 동손이 적은 장점을 가진 Transversal type으로 제작되어 사용되어 지고 있다[1][2][3][4][5].

본 논문에서는 최근 다양한 면에서 장점을 가지고 풍력 및 수력발전기, 전기자동차 및 경량전철, 잠수정 및 함정 추진체계 등에서 응용되고 있는 2중 공극형의 Axial-flux (횡자속)형 영구자석 동기발전기의 성능에 큰 영향을 미치는 영구자석의 형상 설계 및 해석기법을 제안한다. 해석에 사용된 영구자석 동기 발전기는 10 [kVA], 300 [rpm]급이며, 영구자석 형상 분석을 위하여 2차원 등가모델을 활용한 유한요소 해석을 통하여 무부하, 부하에서 속도가변에 따른 유기전력 파형과 쇄교자속의 변화를 분석하여 적절한 영구자석 형상 설계를 수행하였다.

2. 2중 공극형 영구자석 발전기

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 발산효율이 높고, 고정자의 권선 작업이 평면상에서 이루어지기 때문에 쉽게 할 수 있다. 회전자 측면에서도 2개의 고정자로 인한 힘의 균형으로 영구자석의 부착작업이 간편하며, 영구자석의 양면 모두 활용함으로써 회전자 계철이 필요하지 않다. 그림 1은 2중 공극형 횡자속형 영구자석 동기발전기의 구조를 보여주고 있다.

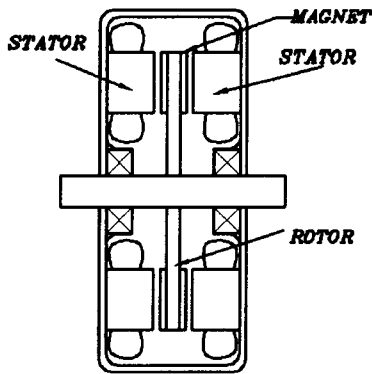


그림 1. 2중 공극 Axial-flux형 영구자석 발전기의 구조
Fig. 1. Structure of axial-flux type permanent magnet generator with dual air-gap

영구자석은 형상에 따라 발전기의 성능과 밀접한 관계가 있으며, 또한 고정자 슬롯의 형상이나 권선의 형상에 따라 설계된다. 특히 Axial-flux type의 발전기에서는 고정자의 형상이 내부와 외부의 반경이 다른 부채꼴 모양의 구조를 갖기 때문에 영구자석의 형상설계는 고정자 슬롯의 형상에 따라 크게 달라질 수 있다. 그림 2는 고정자 슬롯의 형상과 권선형상을 나타내고 있다. 본 논문에 적용된 발전기는 3상 구조로 72개의 고정자 슬롯을 가지며 매극 매상당 슬롯수가 1인 구조를 갖는다.

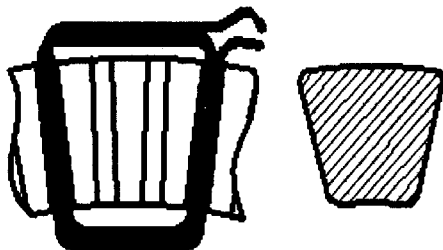


그림 2. 권선과 코어 구조
Fig. 2. Geometry of winding and core

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[3][4][5].

3. 영구자석 형상설계

2중 공극형 횡자속형 영구자석 동기 발전기에서, 고정자는 부채꼴 형상이므로 고정자의 형상에 따른 영구자석의 형상에 따라 유기기전력의 크기와 파형이 크게 달라질 수 있다. 본 논문에서는 영구자석의 형상을 우선 자기회로법에 의해 설계하였다. 2개의 공극과 고정자를 가지는 형상의 동기발전기를 등가 자기회로와 간략화시킨 회로로 나타내면 그림 3과 같다. 자기 등가회로에서 고정자 계철의 리럭턴스를 무시하고, 간이화된 자기회로도 대칭적인 영구자석 부분을 고려하고, 영구자석의 퍼미언스와 영구자석 누설 퍼미언스의 합을 등가 퍼미언스 \bar{P}_m 로 그림 3 (b)와 같이 간략화된다. 여기서 영구자석의 퍼미언스는 $\bar{P}_m = P_m + 2P_{m_l}$ 의 값을 가진다.

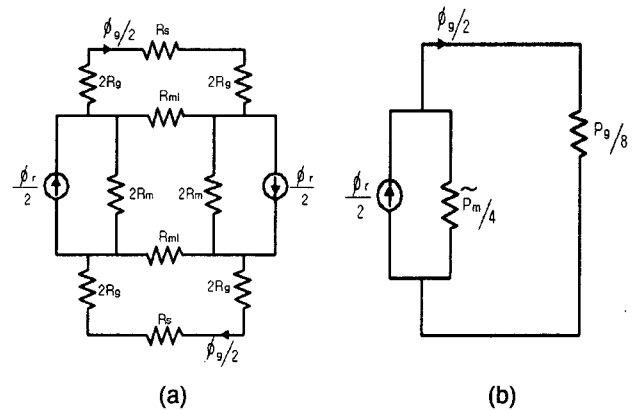


그림 3. 자기 등가회로의 간략화
(a) 자기 등가회로 (b) 간이 등가회로
Fig. 3. Simplifications of the magnetic equivalent circuit
(a) Magnetic equivalent circuit (b) Simple equivalent circuit

2개의 고정자에 의한 자속분할로, 공극에서의 자속은 퍼미언스 \bar{P}_m 에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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.

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

식 (3)에서 A_m 은 영구자석 단면적을 나타낸다.

본 연구에서 설계한 영구자석 형상은 자기회로법에 의한 계산으로 72개의 고정자 슬롯에 매상 매극당 1개의 슬롯을 가지는 동기 발전기의 구조로 총 자석의 갯수는 24개가 소요된다. 그림 4는 설계 결과값을 보여주고 있다.

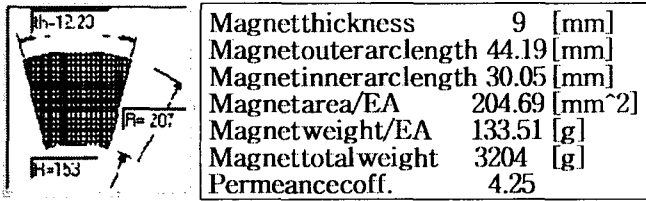


그림 4. 영구자석 구조
Fig. 4. Geometry of permanent magnet

4. Finite-Element Method (FEM) 해석

4.1 등가 해석모델

본 연구에서 제시한 영구자석 풍력발전기의 구조는 Axial-flux type으로 2개의 고정자 사이에 1개의 회전자 위치하고 있으므로 정확한 해석을 위해서는 3차원 과도상태 해석이 필요하지만, 시간의 절약을 위하여 그림 5와 같이 2차원으로 등가모델을 개발하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석모델의 간략화를 위해 24극 중에서 2극을 모델화하여 상하 24개의 Slot 사이를 움직이게 하여 동특성을 분석하였다.

FEM 해석을 위한 계의 지배방정식은 Axial-flux type 영구자석 발전기의 경우 다음 식과 같이 나타낼 수 있다[4][5][6].

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

여기서,

- \mathbf{A} : Magnetic vector potential
- ν : Magnetic reluctivity
- \mathbf{B}_r : Permanent magnetic flux density

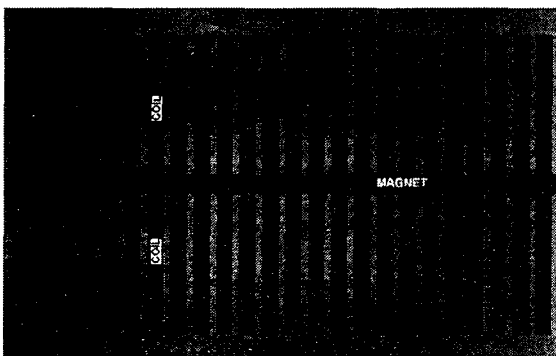


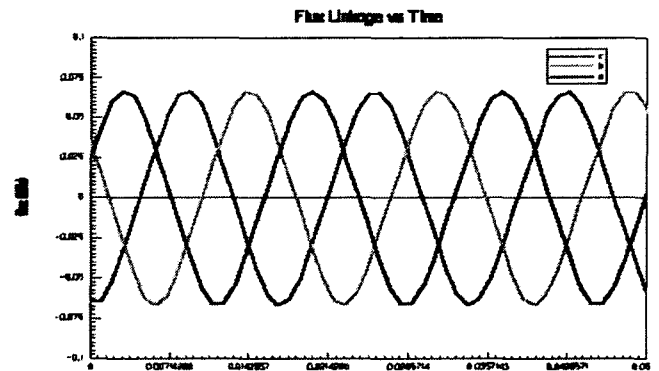
그림 5. 특성해석을 위한 등가모델
Fig. 5. Equivalent model for characteristics analysis

영구자석 형상해석은 각각 부채꼴 모양의 영구자석을 Radial 방향의 반경을 5개 부분으로 나누어서 영구자석의 형상과 고정자의 형상을 고려하여 개수별로 해석 모델을 사용하였다. 기존의 영구자석 형상해석은 외경과 내경의 평균치를 이용하여 중간값으로 처리하였으나, 고정자의 형상에 따른 영구자석의 형상이 다르게 사용될 때는 큰 오차를 가져올 수 있다. 유한요소 해석은 상용 전자계 해석 프로그램인 Maxwell을 사용하였다. 외부회로를 연결하여 역기전력의 형상과 크기 및 쇄교자속의 형상과 크기를 비교하였다.

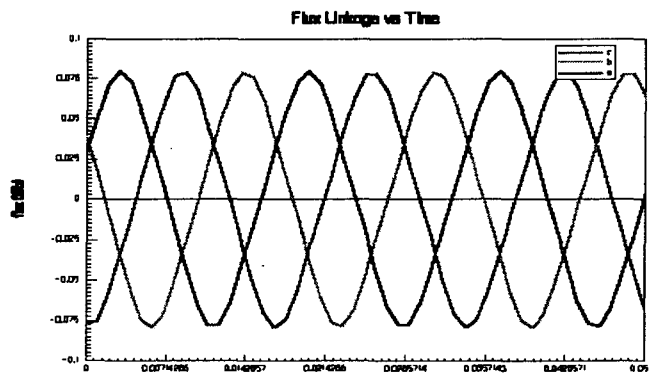
4.2 유한요소 해석결과

영구자석 형상에 따른 유기전압과 쇄교자속 해석은 무부하에서 수행하였다. 부채꼴 형상의 영구자석의 내경을 Case1로 하고 외경을 Case5로 하여 각각의 경우에서 해석한 결과, Case1과 Case5와의 차이는 두 극에서 유기되는 역기전력의 경우 6.51 [V]의 오차가 발생했으며, 쇄교자속의 경우는 같은 조건에서 0.0243 [Wb]의 오차가 발생하였다. 그림 6은 Case1, Case3, Case5의 경우 해석한 쇄교자속 파형을 보여주고 있다.

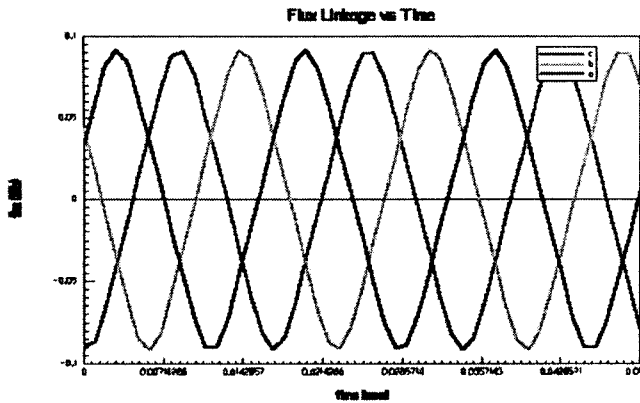
표 1은 무부하 정격속도인 300 [rpm]에서 각 Case별로 해석한 두 개의 극에서 역기전력의 실효값을 나타낸다. 이때 해석파형이 고르지 않아서 평균값을 구하여 역기전력의 실효값을 계산하였다.



(a) Case 1



(b) Case 3



(c) Case 5

그림 6. 쇄교자속
Fig. 6. Flux linkage vs time

표 1. 역기전력
Table 1. Back EMF

Case	Back EMF
1	16.20
2	17.68
3	19.22
4	20.73
5	22.21

그림 7은 각 case에서 평균값으로 하였을 경우의 해석한 전압파형을 나타내고, 그림 8은 전압변동률을 10 [%]로 계산했을 경우의 자기회로법에 의해서 계산된 2극에서의 전압파형을 보여준다. 그림 7과 그림 8에서 평균값은 각각 17.32 [V]와 17.26 [V]로서 거의 유사함을 알 수 있다.

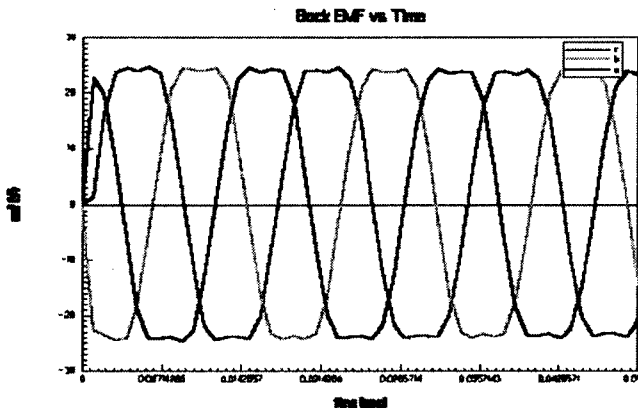


그림 7. 역기전력 파형
Fig. 7. Back EMF

5. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 다양한 장점을 가지고 풍력 및 수력 발전기, 전기자동차 및 경량전철, 잠수정 및 합정 추진체계 등에 응용이 확대되고 있는 2중 공극을 가지는 Axial-flux (횡자속)형 영구자석 동기발

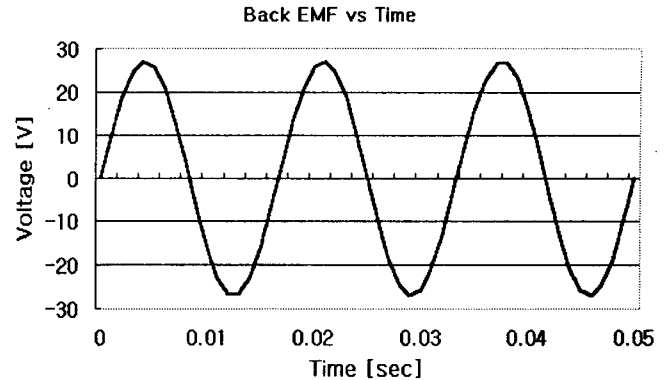


그림 8. 계산된 역기전력 파형
Fig. 8. Calculated back EMF

전기의 성능을 좌우하는 영구자석의 형상 설계결과와 형상에 따른 특성을 분석하였다.

본 논문에서 사용된 영구자석 여자 동기 발전기는 10 [kVA], 300 [rpm]급이며, 영구자석 형상 분석을 위하여 2차원 등가모델을 활용한 유한요소 해석을 통하여 무부하 속도가변에 따른 유기전력 파형 및 쇄교자속의 변화를 분석하여 적절한 영구자석 형상 설계를 수행하였다. 2중 공극형 영구자석 발전기의 경우 영구자석이 부채꼴 형상을 하고 있고, 또한 고정자 외경 부분의 누설자속으로 인한 역기전력의 추정은 오차가 많이 발생할 수 있음을 확인하였다. 따라서 영구자석의 형상설계는 해석 모델링에 크게 좌우됨을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] E. Spooner and A. Williamson, "Modular, Permanent-Magnet Wind-Turbine Generators", Conf. Record of IEEE IAS Annual Meeting, San Diego, CA, Vol. 1, pp. 497-502, Oct. 6-10, 1996.
- [3] B.J. Chalmers, W. Wu, and E. Spooner, "An Axial-Flux Permanent-Magnet Generator for a Gearless Wind Energy System", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, pp. 251-257, June 1999.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 황돈하, 강도현, 김용주, 최경호, 배성우, 김동희, "횡자속형 영구자석 풍력발전기의 정상 및 과도상태 특성해석", 2002년도 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp. 78~81, 2002. 11. 16.