

외전형 영구자석형 전동/발전기의 성능해석

장석명, 고종운, 윤인기, 이성호, 정상섭  
충남대학교

Performance Analysis of External Rotor Type Permanent Magnet Motor/Generator

S.M. Jang, J.W. Go, I.K. Yoon, S.H. Lee, S.S. Jeong  
Chungnam National University

**Abstract** - Synchronous generator needs slip-ring and brush for supplying current to rotor with external source. but slip-ring and brush have some problems to supply DC power to field winding with friction and high power loss due to brush voltage drop at high field current. Thus synchronous generator have been designed to brushless machine. Brushless synchronous machines of using permanent halbach array can composed without back core and coreloss. In this paper, analyse on the characteristics of external rotor type permanent magnet brushless with halbach array .

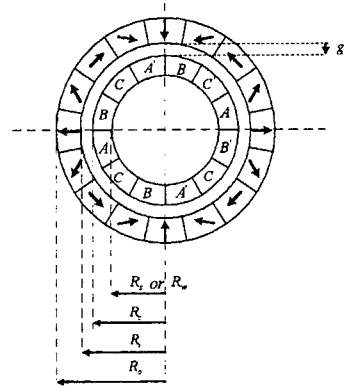


그림 1. 3상 4극 영구자석형 동기기

외전형 영구자석형 동기기의 자속밀도를 극좌표에 의해서 해석하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \mu_0 \mu_r \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \\ \vec{M} &= M \cos(p\theta) e_R + M \sin(p\theta) e_\theta \end{aligned} \quad (1)$$

극수에 따른 회전자 표면과 공극에서의 자속은 식(2), 식(3), 식(4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} R_s \leq r \leq R_r \text{ 일 때} \\ P \neq 1 \\ B_r = \frac{B_0 p}{(1-p)} (R_0^{(1-p)} - R_i^{(1-p)}) \\ \times (r^{(p-1)} + R_s^{2p} r^{-(p-1)}) \cos(p\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

$$B_\theta = \frac{B_0 p}{(1-p)} (R_0^{(1-p)} - R_i^{(1-p)}) \\ \times (-r^{(p-1)} + R_s^{2p} r^{-(p-1)}) \sin(p\theta)$$

$$\begin{aligned} P = 1 \\ B_r = B_0 \ln \left( \frac{R_0}{R_i} \right) \left( 1 + \frac{R_s^2}{r^2} \right) \cos(\theta) \end{aligned} \quad (3)$$

$$B_\theta = B_0 \ln \left( \frac{R_0}{R_i} \right) \left( -1 + \frac{R_s^2}{r^2} \right) \sin(\theta)$$

$$\begin{aligned} r \geq R_0 \text{ 일 때} \\ P \neq 1 \\ B_r = \frac{B_0 p}{(1-p)} (R_0^{(1-p)} - R_i^{(1-p)}) \\ \times R_s^{2p} r^{-(p-1)} \cos(p\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

$$B_\theta = \frac{B_0 p}{(1-p)} (R_0^{(1-p)} - R_i^{(1-p)}) \\ \times R_s^{2p} r^{-(p-1)} \sin(p\theta)$$

1. 서 론

브러시리스 모터는 그 특징상 치-슬롯과 영구자석간 표면의 불균일한 분포로 인하여 코깅토크, 회전자 철심에 생기는 히스테리시스손과 와류손, 또는 기생토크 등의 여러 가지 손실에 대한 문제점을 안고 있다. 이러한 손실을 저감시키기 위하여 슬롯리스형 전기자를 사용하거나 공심형기기를 사용하여 코깅토크를 저감시킬 수도 있고, 영구자석의 Halbach 배열을 이용함으로써 영구자석의 일반배열시에 폐자로를 형성해 주기 위해서 반드시 있는 backcore에서의 철손문제를 해결하기도 한다.

본 논문에서는 영구자석의 halbach 배열을 이용한 외전형 브러시리스 전동발전기의 특성을 Howe 교수의 방법을 적용하여 해석하였다. 그런데 halbach배열은 자화벡터 방향을 축에 따라 연속적으로 회전시키는 형태로 연속자화를 시키므로써, 폐자로를 이루기 위한 backcore가 없이도 필요한 형태의 자계 분포를 얻는 것이다. 즉 자화벡터가 영구자석의 배열을 따라 연속적으로 회전하게 되면, 정현적인 파형의 자속밀도 분포를 얻을 수가 있어서 별도의 backcore로 자로를 형성시켜줄 필요가 없다. 그러나 자화벡터를 연속적으로 회전시키는 형태의 자화 및 영구자석의 자극배치는 불가능하기 때문에 실제 전기기기의 응용에서는 영구자석을 몇 개의 영구자석편으로 나누어 각각의 방향으로 자화시킨다음 이 조각들을 회전하도록 조립하여 배열하게 된다.

halbach 배열에 의하여 자기회로를 구성하는 경우 기존방법에 의한 자기 회로 구성법에 비해 일반배열법에 비해 약1.4배정도 강하고, 더 정현적인 파형을 얻을 수 있으며 철심 없이 자로를 구성할 수 있어서 철심내에 발생하던 철손을 줄일 수 있다. 특히 고속용 기기에서는 히스테리시스손은 주파수에 비례하고 와류손은 주파수 제곱에 비례하므로 철손을 줄이는 halbach배열의 이점을 더욱 살릴수 있다.

2. 특성 해석

2.1 halbach배열의 자계분포

$$P=1$$

$$B_r = B_0 \ln \left( \frac{R_0}{R_i} \right) \frac{R_s^2}{r^2} \cos(\theta) \quad (5)$$

$$B_\theta = B_0 \ln \left( \frac{R_0}{R_i} \right) \frac{R_s^2}{r^2} \sin(\theta)$$

식(5)까지의 수식들은 극쌍수가 다를 때 공극에서의 자속밀도와 회전자 외부에서의 자속밀도를 반경방향과 수직방향으로 나누어서 해석한 것이다. 여기서  $B_0$ 는 잔류자속밀도,  $J_{rms}$ 를 고정자 실효치 전류밀도,  $P$ 는 극쌍수이다.

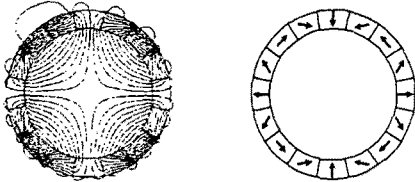
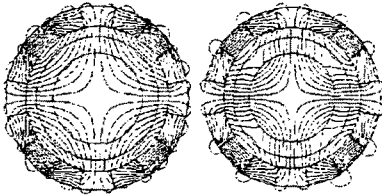


그림 2. 4극 halfbach회전자의 자계분포 및 배열

그림 2와 같이 구성된 4극 halfbach 배열의 회전자 자속밀도를 유한요소법으로 해석할 때의 자속분포를 볼 수가 있다. 그림 2, 그림 3에서 영구자석에 별도의 backcore가 없어도 자속의 차폐가 이루어져 폐회로가 이루어짐을 알 수가 있다.



(a) 공심형 (b) 철심형

그림 3. 자계분포특성

그림 3은 고정자 안쪽에 공심형축과 철심형축을 사용했을 때의 유한요소 해석결과이다. halfbach 배열을 사용하는 경우에는 고정자축을 공심형과 철심형으로 각각 구성하는 경우에 자속밀도의 분포가 크게 다르지 않음을 알 수가 있다. 또한 외전형 동기기에 halfbach 배열을 사용하는 경우에는 영구자석회로 자체적으로 정현적인 자속분포를 발생시킬 수가 있기 때문에 별도의 철심이 필요없어져 철심에 발생하는 철손을 없앨 수가 있다.

그러나 halfbach 배열은 여러 조각의 영구자석편을 각각 착자시킨 후에 접착시켜 자기회로를 구성하므로 영구자석편수가 적으면 자속밀도가 보다 균일하게 분포될수 없다. 따라서 8개의 영구자석편보다는 16개의 영구자석편을 쓰는게 더욱 자속밀도가 균일하게 분포될수 있다. 식(6)은 4극 원통 halfbach 배열의 자속밀도이다.

$$B(z_0) = \frac{z_0}{r_i} B_0 \left( 1 - \frac{r_i}{r_o} \right) K_2 \quad (6)$$

$K_2$ 는 영구자석의 배열의 수 및 기하학적인 구조와 관계되는 상수로서 배열의 수가 많아질수록 이상적인 halfbach 배열과 같게 되므로 1에 가까워진다. 만일  $\epsilon = \mu_0$  공간고조파의 기본파만 고려하면 다음과 같이 구해진다.

$$K_2 = \cos^2(\pi/M) \frac{\sin 2\pi/M}{2\pi/M} \quad (7)$$

영구자석의 배열수가 많아질수록 이상적인 halfbach 배열이 나타나는 것은 다음의 그래프에서 알 수가 있다.

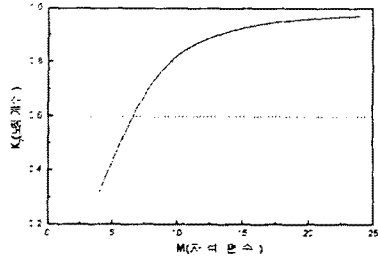


그림 4. 자석편수에 따른 보정계수

그림 5는 공극의 크기가 변화되는 경우, 공심형과 철심형에 따른 공극자속밀도의 값을 유한요소법으로 계산한 것이다. 고정자 권선을 변화시키며 고정자축으로부터 영구자석 내경을 비율적으로 늘려서 공극을 조정한 값이다. 공극비에 따른 철심형과 공심형의 자속밀도는 공심형일 경우가 작게 나타나지만 영구자석의 방사형 착자시 보다 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

또한 그림 6은 영구자석의 내경을 기준으로 외경을 비율적으로 늘려가며 공극의 자속밀도를 유한요소법으로 해석한 것이다. 이러한 경우에도 역시 공심형 자속밀도가 철심형에 비하여 약간 작게 됨을 알 수가 있다.

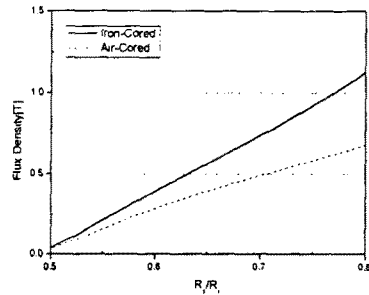


그림 5. 공극의 크기와 철심형, 공심형에 따른 최대 공극자속밀도 변화

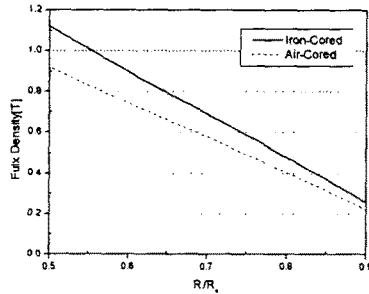


그림 6. 영구자석의 두께와 철심형, 공심형에 따른 최대 공극자속밀도 변화

## 2.2 토크 특성

회전자의 극수를 변화시켜가며 공심형과 철심형 축에 따른 토크를 계산해보면 식(8)과 식(9)와 같이 표현된다.

고정전류밀도  $J_{rms}$ 이 인가되고 권선비율을 변화시킬 때 공심형과 철심형에 여러 가지 요소 변화율을 유한요소법으로 해석한 결과는 그림 7과 같다.

$$P \neq 1 \text{ or } 2$$

$$T = \frac{2\sqrt{2}ap}{(1-\beta)} J_{rms} B_0 l_e (R_0^{(1-\beta)} - R_i^{(1-\beta)}) \times \left( \frac{(R_c^{(2-\beta)} - R_u^{(2-\beta)})}{(2+\beta)} + R_s^{2\beta} \right) \times \frac{(R_c^{(2-\beta)} - R_s^{(2-\beta)})}{(2-\beta)} \sin\left(\frac{\pi}{2q}\right) \sin(\delta) \quad (8)$$

$$P = 2$$

$$T = -4\sqrt{2}q J_{rms} B_0 l_e (R_0^{-1} - R_i^{-1}) \times \left( \frac{(R_c^4 - R_u^4)}{4} + R_s^4 \ln\left(\frac{R_c}{R_s}\right) \right) \sin\left(\frac{\pi}{2q}\right) \sin(\delta) \quad (9)$$

단  $l_e$ 는 축방향 길이이고  $\delta$ 는 부하 각이다.

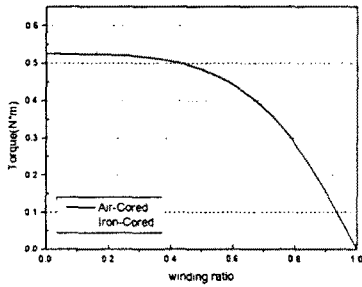


그림 7. 권선 비율에 따른 최대 토크 변화

그림7의 그래프는 영구자석과 공극의 크기를 일정히 유지하면서 고정자 권선의 비율을 변화시키고, 고정자측의 재질을 철심과 공심으로 하는 각 경우의 토크 특성을 유한요소법으로 해석하였다. 그 결과 철심형인 경우의 토크가 크게 발생함을 정량적으로 확인할 수가 있다.

### 2.3 발전기특성

발전기모드로 동작하는 경우의 특성식을 구해 보면 식(10)과 같다. 즉 원통내부에 반경방향 자속밀도는 다음과 같이 표현된다.

$$B(t) = B_0 \cos(\omega t) \quad (10)$$

이 경우  $B_0$ 는 내부자속밀도이다.

발전기 모드에서 코일에 쇠교하는 코일의 단면적을  $A[m^2]$ 라고 하고 턴수를  $N$ 이라고 하면 기하학적 보정계수  $K$ 를 고려하면 유기되는 전압은 다음과 같이 표현된다.

$$E(t) = -N \frac{d\phi}{dt} = KB_0 AN \omega \sin(\omega t) \quad (11)$$

기하학적 보정계수  $K$ 란 원형으로 구성되어 있는 전기자를 직선적인 값으로 환산해주는 보정계수인데 계자에 의해 발생하는 자속과 수직으로 쇠교되는 전기자는 원형으로 구성되어 있기 때문에 이를 직선적인 값으로 보정해 줘야한다.

보정계수는 전기자 권선을 직선 값으로 환산해주어야 하는데 호의길이를  $y$  현의 길이를  $x$  부채꼴의 각을  $\alpha$ 를 할 때 다음과 같이 표현된다.

$$K = \frac{x}{y} = \frac{2\sin(\alpha/2)}{\alpha} \quad (12)$$

영구자석편수에 따른 보정계수  $C_n$ 을 고려해 주어야 하고 또한 이는 감자특성을 고려하지 않고 기율기  $\mu_r$ 을 1로 가정하여 도출한 식이므로 감자속선의 실제 기율기를 고려한  $1/\mu$ 을 식에다 보정해 주어야 한다. 전동기

모드에서 단자전압을 인가하면 토크가 발생하여 계자가 회전하게 되는데, 이에 따라 전기자에도 역기전력이 유기된다. 이 역기전력은 단자전압  $V_L$ 에서 전기자 임피던스  $Z_a$ 에 의한 전압 강하치를 고려해 주어야 한다. 전기자 임피던스  $Z_a$ 를 계산하면 식(13)과 같이 표현된다.

$$\text{권선의 전체길이를 고려한 전기자권선의 1상당 저항은}$$

$$R_a = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{2 \times (2L + 2r) \times N}{S_{Litz}} [\Omega] \quad (13)$$

여기서  $r$ 은 권선과 전기자의 평균반경  $r = (r_a + r_i)/2$ 이 되고, 전기자 축의 길이  $L_a$ 는 쇠교 단면적  $A$ 와 전기자 평균반경  $r$ 로부터  $L_a = A/2r$ 이다.  $S_{Litz}$ 는 전기자 권선의 면적으로  $S_{Litz} = \text{소선당 단면적} \times \text{소선의갯수} [m^2]$ 이 된다. 누설계수  $\theta$ 를 고려한 단위길이당 인덕턴스  $L$ 은 식(14)와 같이 표현된다.

$$\lambda = NBS = 2\mu Nn IL_a r_s = LI \quad (14)$$

$$L = 2\mu L_a r_s nN\theta = 2\mu L_a r_s \frac{N^2}{L_u} \theta [H]$$

여기서  $n$ 은 단위길이에 대한 권선수,  $I$ 는 전기자 전류이다. 따라서 식(14)로부터 1상당 발생전압  $E_G$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$E_G(t) = KANB_0 \omega \sin(\omega t) - IZ_a \quad (15)$$

이로부터 Halbach배열의 외전형 전동발전기의 발전모드에서의 유기기전력 특성을 알 수가 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 외전형 전동발전기에 halbach 배열을 이용하였을 경우의 특성을 해석하였다. 브러시리스형 전동발전기의 슬롯-치에 의하여 생기는 코깅토크는 슬롯리스형으로하면 감소시킬 수가 있다. 또한 Halbach 배열을 이용한 회전자는 정현적인 자속을 만들어줄 뿐만 아니라 회전자와 고정자에 스스로 폐자로를 만들기 때문에 별도의 철심이 필요하지 않음을 확인할 수가 있다. 이로써 부피는 물론 철손을 줄일 수가 있어서 효율적이다. 다만 halbach 배열을 사용하는 경우는 제작이 어렵고, 영구자석의 접촉면에서 자석상호간의 간섭에 의한 영향이 나타날 수도 있다. 따라서 전기자와의 상호작용으로 전압파형이 왜형될 수도 있다. 그러나 Halbach 배열을 이용하는 경우는 자속을 크게 발생시킬 수가 있으므로 공극을 약간 크게하여 자속의 왜형을 저감시켜 정현적인 자계가 발생하도록 할 수가 있다. 본 논문에서는 이들 특성을 Howe 교수의 방법과 유한요소법에 의하여 특성을 정량적으로 해석하는 사례를 다루므로써 향후 Halbach 배열을 이용한 전동발전기의 실제 응용에 참고하고자 한다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] K Atallah et al. "Design and Analysis of Multi-pole Halbach Cylinder Brushless Permanent Magnet Machine". EMD97, 1-3september, no444, 1997
- [2] Seok-Myeong Jang et al. "Design and Analysis of High Speed Slotless PM Machine with Halbach Array". IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, vol 37 no4, July 2001
- [3] Seok-Myeong Jang et al. "Comparison on the Airgap Flux Density of High-Speed Slotless Machines with Radial Magnetization and Halbach Array PM rotor". Trans KIEE, Vol 50B No 7, July 2001
- [4] Keld F.Rasmussen et al. "Analysis Prediction of Magnetic Field from Surface Mounted Permanent Magnet Motor". IEEE