

영구자석의 Halbach 배열에 의한 자기회로 특성과 초고속전동발전기에의 응용

장석명*, 서진호*, 박찬일**, 최상규**
*충남대학교 전기공학과 **한국기계연구원

The magnetic circuit characteristics by Halbach array of permanent magnet and the application to the high speed motor-generator

S.M. Jang*, J.H. Seo*, C.I. Park**, S.K. Choi**
* Chungnam Nat'l University ** KIMM

ABSTRACT

Klaus Halbach has suggested the novel permanent magnet array using advanced analytical approaches in 1979. We utilize this Halbach array to compose the field system of high speed motor-generator. The ferro-magnetic materials of the electric machines cause the fatal energy loses in high frequency. But Halbach array enables to make the various field distribution without ferro-magnetic materials. Therefore, the energy loses can be reduced. This paper presents the magnetic characteristics of Halbach array and the application to the motor-generator.

이 없이 자로를 구성하기 때문에 가능한 한 높은 잔류자속밀도를 갖는 영구자석을 사용해야 한다.

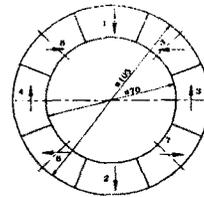


그림 1. Halbach 배열을 이용한 계자

1. 서론

현재 초고속 및 일반속도용 전동발전기의 응용분야는 유도비행체용 고주파발전기, 초고속 발전기, EMB(Electro-Mechanical Battery)용 발전기/모터, 일반용 전원발전기, 회전 및 속도계용 발전기, 신호 또는 검출용 발전기 등으로 매우 다양하며 앞으로 더욱 광범위해 질 것이다.

그런데, 일반적인 전기기기 구조로 초고속 전동발전기를 제작할 경우 주파수 및 회전수가 매우 높으므로 그로 인한 철손 등의 에너지 손실이 상당히 수반된다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 1979년 Klaus Halbach에 의해 제안된 Halbach 배열이란 영구자석편만으로 자로를 구성하여 요구되는 자계분포를 발생시킬 수 있는 새로운 영구자석의 배열방법을 말한다. 본 논문에서는 Halbach 배열에 대한 자기적인 특성을 고찰하였으며, 초고속 전동발전기에의 실제적인 응용에 대해 연구하였다.

2. 영구자석의 Halbach 배열

2.1 기본개념 및 특징

Halbach 배열의 기본개념은 그림 1과 같이 자화벡터 방향이 다른 영구자석편들을 조합함으로써 요구되는 자계분포를 얻을 수 있다는 것이다. 즉 그림 1은 자화방향을 적절히 조정한 8개의 영구자석조각을 배열하여 계자를 만든 것이다. back iron이 필요없기 때문에 철손 등의 에너지 손실이 없고 알루미늄이나 세라믹등 비자성체에 직접 연결시킬 수 있다. 그러나, back iron

2.2 영구자석의 자기적인 특성

실제 제작에 사용할 영구자석의 재료는 다음과 같은 B-H 특성을 갖는다.

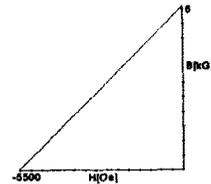


그림 2. 영구자석의 B-H 특성

2.3 배열방법 및 실제 제작도

Halbach 배열은 배열방법에 따라 다른 형태의 자계분포를 나타낸다. 그림 3은 여러가지 Halbach 배열의 형태에 따른 자계분포를 나타낸 것이며, 여기서 배열내의 화살표방향은 각 배열의 자화방향이다.

본 논문에서는 이 Halbach 배열을 전동기발전기에 응용하기 위해 8개의 영구자석편을 사용하여 2극의 자계분포를 갖도록 계자를 구성하였다. 그림 4는 그림 1의 Halbach 배열을 이용한 계자 및 전기자의 실제제작도이다. 그림 4에서 화살표 표시가 되어 있는 부분이 영구자석이며, 영구자석의 외부는 비자성체이다. 그리고 전기자는 Litz wire를 사용하여 제작하였다.

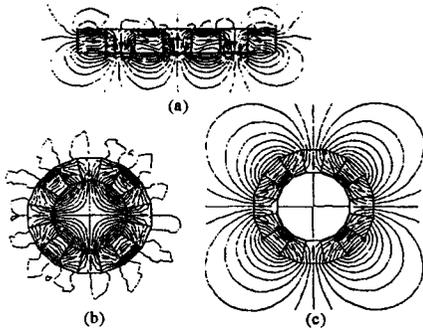
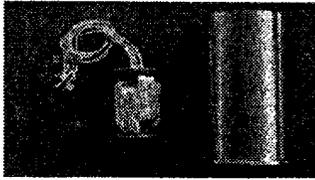


그림 3. Halbach 배열에 따른 자기분포
 (a) Cartesian Halbach Array
 (b) Interior Halbach quadrupole
 (c) Exterior Halbach quadrupole



(a)



(b)

그림 4. Halbach 배열을 이용한 제자(右) 및 전기자(左)의 실제제작도 (a) 정면도; (b) 측면도

3. 전자기장을 적용한 FEM 해석

3.1 해석모델

영구자석을 포함하는 정자계 시스템의 지배방정식을 도출하기 위한 일반적인 기본방정식은 다음과 같다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \mu_0 \vec{H} + \vec{M} && \text{; 영구자석내부} \\ &= \mu_0 \mu_r \vec{H} && \text{; 자성체} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, \vec{M} ; 자화

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_0 + \vec{J}_m \quad (3)$$

$$\vec{J}_m = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{M}) \quad (4)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0} (\vec{B} - \vec{M}) = \vec{J}_0 \quad (5)$$

따라서, 영구자석을 포함하는 정자계 시스템의 지배방정식은 식 (6)과 같다.

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{A} - \vec{M}) \right] = \vec{J}_0 \quad (6)$$

그림 5은 그림 1의 모델에 대한 등포텐셜분포도를 FEM 해석한 결과이다.

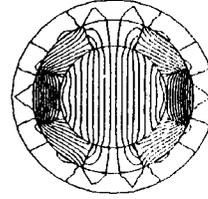


그림 5. 그림 1의 모델에 대한 등포텐셜분포도

3.2 Halbach 자기회로 내부의 자속밀도의 해석치와 계측치

내부자속밀도는 식(7)에 의해 주어지며, 그 값은 내부표면을 제외하고 균등하게 분포한다.[1]

$$B_0 = B_r C_N \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (7)$$

여기서, B_0 ; 내부자속밀도

B_r ; 잔류자속밀도

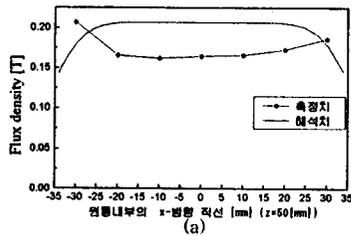
r_1 ; 영구자석의 안쪽 반지름

r_2 ; 영구자석의 바깥쪽반지름

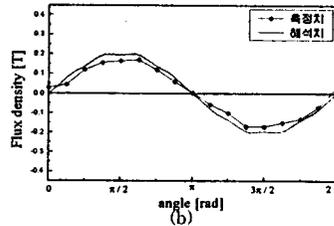
$$C_N = \frac{\sin(2\pi/M)}{(2\pi/M)} \quad (8)$$

여기서, M ; 영구자석편의 수

그림 6은 제자내부의 자속밀도를 FEM에 의한 해석치와 측정치를 비교하여 도시한 것이다. 식(7)에 의한 이론적인 값 ($B=0.24[T]$)과 FEM에 의한 해석치 ($B=0.2[T]$), 그리고 계측치 (약 $0.18[T]$)는 약간의 차이를 보였다. 실제 계측치와의 차이는 FEM에 해석에 요구되는 B-H 특성과 실제 영구자석의 착자상태에 따른 자화특성의 상이함, 제작시의 가공과정, 계측오차등에 의해 발생한 것으로 추정된다.



(a)



(b)

그림 6. 내부자속밀도의 FEM에 의한 해석치와 측정치 비교
 (a) y-방향 자속밀도; (b) r-방향 자속밀도

4. 외전형 초고속전동발전기 설계 및 특성해석

4.1 기본사항

설계하고자 하는 진동발전기는 에너지저장시스템에 응용되며, 플라이휠에 의해 에너지를 저장하기 때문에 관성모멘트의 값이 커야하므로 외전형의 형태가 된다. 그리고, 초고속진동발전기의 입력 전원은 고주파수이기 때문에 표피효과로 인한 도체 내부의 저항성분이 증가하여 전류가 도체표면에 집중되므로 전류밀도가 높아지게 된다. 이런 표피효과를 감소시키기 위해서 본 논문에서는 Litz wire를 이용하여 전기자를 구성하였다[그림 3],[4]

4.2 설계

초고속진동발전기의 설계과정은 관련 특성방정식을 바탕으로 하여 요구정격에 적합하도록 결정해야 한다. 본 논문에서는 발전기모드 및 전동기 모드에서의 기본적인 특성식을 유도한다. 원통내부의 반경방향 자속밀도는 다음 식 (9)와 같이 주어진다.

$$B(t) = B_0 \cos(\omega t) \tag{9}$$

여기서, B_0 ; 내부자속밀도

발전기 모드에서 자속을 쇄교하는 코일의 단면적을 A 라고 할때 1코일당 유기되는 전압은 시간당 쇄교자속의 변화율로 주어지므로

$$E(t) = -\frac{d\phi}{dt} = B_0 A \omega \sin(\omega t) \tag{10}$$

가 되며 여기에 전체 턴수를 고려하면 유기전압은 다음과 같다.

$$E(t) = K A N B_0 \omega \sin(\omega t) \tag{11}$$

여기서, K ; 기하학적 상수(≈ 1)

N ; 턴수

또한, 전동기 모드에서 발생하는 힘은 로렌쯔법칙에 의해

$$\vec{F} = 2I(\vec{L} \times \vec{B}) \tag{12}$$

으로 주어지며, 따라서 토크는 식(13)과 같다.

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F} = 2rLI B_0 K N \tag{13}$$

여기서, r ; 전기자 반지름

L ; 전기자의 축방향 길이

I ; 인가전류

4.3 특성해석

4.2절에서 유도된 특성식과 실제제작한 Halbach 배열에 의한 개자와 전기자의 치수를 고려하여 개략적인 특성을 해석한다. 표 1은 특성해석을 위한 기본자료이며, 그림 9는 발전기모드에서의 주파수에 따른 1상당 유기전압과 전동기모드에서의 입력전류에 따른 토크를 나타낸 것이다.

표 1. 특성 해석을 위한 기본자료

항목	치수	항목	치수
내부자속밀도(B_0)	0.24 [T]	쇄교단면적(A)	$5.1E-3$ [m ²]
전기자 반경(r)	0.0255 [m]	턴수(상당)(N)	21
전기자 축방향 길이(L)	0.1 [m]	상수(K)	0.989

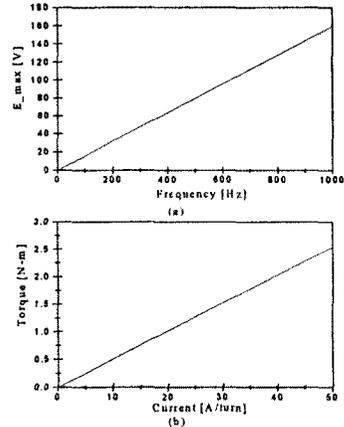


그림 9 (a) 주파수-유기전압 특성
(b) 인가전류-토크 특성

5. 결론

Halbach 배열은 자성체를 사용하지 않고 영구자석편만으로 자로를 구성하기 때문에 기존의 자석배치 방법을 응용하는 경우에 비해 철손 등의 손실이 매우 감소되고, 기기의 구조가 간단하며 무게가 가벼워지는 잇점을 얻을 수 있다

본 연구에서는 Halbach 배열을 이용하여 초고속발전전동기의 개자를 구성하여 전자장이론을 적용한 FEM 해석치와 개측치를 비교 검토하였으며, Klaus Halbach가 제안한 대로 원통내부에 균등한 자계가 분포함을 확인할 수 있었다. 앞으로 진동발전기의 구동 드라이버 등의 제작을 완료하여 전동기 및 발전기 모드별 제반특성을 구명할 것이다.

참고 문헌

[1] K. Halbach, "Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material", Nuclear Instruments and Methods, 169,1980(pp.1-10)
 [2] B.T. Merritt, R.F. Post, G.R. Dreifuers, D.A. Bender, "Halbach Array Motor/Generators-A Novel Generalized Electric Machine",
 [3] David L. Trumper, Mark E. Williams, "Halbach Arrays in Precision Motoin Control"
 [4] G.A. Toombs, "Eddy Current", ILIFFE BOOKS LTD, 1966