

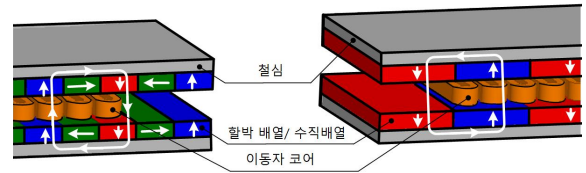
수직 및 할박자화를 갖는 영구자석 선형발전기의 역기전력 특성비교

서성원*, 구민모*, 최장영*, 김경환**
 충남대학교*, 선박해양 플랜트 연구소**

Back-EMF Characteristic Comparison of Vertical and Halbach Permanent Magnet Linear Generator

Sung-Won Seo*, Min-Mo Koo*, Jang-Young Choi*, Kyong-Hwan Kim**
 Chungnam National University*, Offshore Plant Research Division**

Abstract - This paper deals with back-EMF characteristic comparison of Vertical and Halbach array double-sided linear generator with coreless type. On the basis of a magnetic vector potential and Maxwell's equations, governing equations are obtained, and magnetic modeling is predicting characteristic analysis by using the Fourier series expansion. And then, we obtained magnetic field solutions and calculated resistance, back-EMF constant. The analytical results used by 2-D cylindrical coordinate system. The analytical method used in this paper is confirmed by comparing with finite element analysis results.



〈그림 1〉 수직 및 할박배열의 양측식 선형발전기 구조

1. 서 론

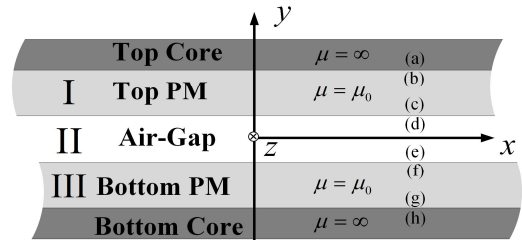
최근 에너지 산업은 높은 에너지밀도를 갖는 회도류계 자성체의 발전으로 동기발전기에 비해 영구자석 발전기의 연구가 활발히 진행되고 있다. 영구자석 발전기는 소량화가 가능하고, 높은 효율을 얻을 수 있다 [1]. 특히 영구자석 선형 발전기는 회전형 영구자석 발전기의 기계적 변환을 거치지 않고 에너지 변환의 손실을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 유지 및 보수가 적고 소형으로 고효율 전력을 공급하기 때문에 효율과 신뢰성을 높여 준다[2]. 이러한 선형 발전기는 파력에너지 변환에 이용되는 등 다양한 분야에 대한 연구가 이루어지고 있다. 영구자석 발전기의 효율을 높이기 위한 방법중 할박 배열을 이용할 수 있다. 할박 배열은 1970년 독일의 클라우스 할박에 의해 제안된 배열법으로 수직 방향으로 자화된 자석배열 보다 공극에서 자속밀도가 약 1.4배 크게 얻을 수 있고 그 과정 또한 정현적이기 때문에 영구자석 기기의 출력밀도를 높이고 발전기의 사이즈를 줄인다는 장점이 있다.

본 논문에서는 수직배열과 할박배열의 역기전력 특성 해석을 진행하고 비교하였다. 발전기의 역기전력 특성은 전자기 전달관계 이론을 이용하여 해석하였다. 전자기 전달관계 이론은 다층으로 이루어진 모델의 각 영역 지배방정식을 행렬 방정식으로 푸는 방법으로 보다 신속하고 간단하게 해결 할 수 있다. 모든 과정의 정확성과 신뢰성은 전자기 해석법의 하나인 유한요소해석법으로 검증하였다. 유한요소해석법은 우수한 정확도를 가지는 반면 많은 시간이 소요된다. 따라서 본 논문은 수직배열 및 할박배열의 선형 발전기를 전자기 전달관계이론을 이용하여 역기전력 특성 해석을 한 후 2차원 유한요소법을 이용한 검증을 실시하였다. 직각 좌표계를 이용하여 영구자석을 모델링 한 후 영구자석 영역과 공극 영역에서의 지배방정식을 유도하였다. 각 영역의 자기벡터퍼텐셜과 각 타입에 맞는 경계조건을 이용하여 해석해를 도출 한 후 역기전력을 해석하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1은 수직배열과 할박배열 구조의 선형 발전기를 보여준다. 각각의 발전기는 이동자가 코어리스 타입 구조로 되어있고 양측으로 영구자석이 위치하여 보다 높은 에너지 밀도를 얻을 수 있다. 코어리스 타입은 양측 영구자석 사이에 코어가 없으므로 권선이 물딩 처리되어야 할 필요성을 가지며 각 권선은 이동자의 진행 방향과 평행한 방향으로 집중되어 감긴다. 그림과 같이 영구자석 배열별 화살표 방향은 자속의 진행 방향을 나타내며 할박배열은 수평방향의 성분이 존재한다. 그림 2는 영구



〈그림 2〉 자계분포 해석을 위한 모델

2.2 영구자석에 의한 자계 분포 해석

그림 2는 전자기 전달관계 이론을 이용하여 자계분포 해석을 위한 모델이다. 각 영역은 배열별 같지만 할박배열에 수평방향의 자화성분이 존재한다. 또한 영구자석의 투자율은 진공중의 투자율과 같고 철심은 무한대로 가정한다. 그림의 (a)~(h)는 모든 영역의 경계면을 보인다. 이때 할박배열은 공극 방향으로 자속밀도를 모아주기 때문에 I영역과 III영역의 수평 방향 자화성분은 반대이다.

2.2.1 자화 모델링

배열별 자화모델링은 푸리에급수 전개를 이용하여 식 (1)로 나타낸다.

$$\mathbf{M} = \sum_{-\infty}^{\infty} M_{yn} \cdot e^{-jk_n x} \mathbf{i}_y \quad (1a)$$

$$\mathbf{M} = \sum_{-\infty}^{\infty} (M_{xn} \mathbf{i}_x + M_{yn} \mathbf{i}_y) e^{-jk_n x} \quad (1b)$$

식 (1a)는 수직배열, (1b)는 할박 배열 전개식을 보이며 식 (1b)의 \mathbf{i}_y 와 \mathbf{i}_x 는 x, y방향 단위벡터, n 은 n 차 공간고조파 성분이다. k_n 은 $n\pi/\tau$ 이고 τ 는 영구자석 극 간격이다. M_{xn} , M_{yn} 은 자화성분의 수평, 수직방향 푸리에계수를 나타낸다. 또한 할박배열의 상·하측은 수평방향 영구자석의 자속 방향이 반대이다.

2.2.1 영구자석에 의한 자계분포

영구자석 자속밀도는 배열별 유도과정이 같다. 영구자석의 자속밀도는 식 $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ 로 나타내고 외부 자계에 의한 자화성분은 무시하고 양변에 curl을 취하면 H항이 소거되고 식 $\nabla \times \mathbf{B} = \nabla \times \mu_0 \mathbf{M}$ 과 같이 나타낼 수 있다. μ_0 는 진공 중의 투자율값을 갖는다. 자기벡터퍼텐셜 정의 식 $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}$ 를 이용하여 자속밀도식의 양변에 curl을 취하고 쿨롱계이지와 벡터항등식을 이용하면 $\nabla \times \mathbf{B} = -\nabla^2 \mathbf{A}$ 같은 지배방정식이 유도된다. 위 식을 연립하면 식 (2)와 같이 영역별 지배방정식을 유도할 수 있다.

$$\nabla^2 \mathbf{A}^{I,III} = -\mu_0 (\nabla \times \mathbf{M}) \quad (2a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A}^{II} = 0 \quad (2b)$$

자기벡터포텐셜은 $\mathbf{A} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n(y) e^{-jk_n x} \mathbf{i}_z$ 와 같이 나타내고 z방향의 성분만을 갖는다. 자기벡터포텐셜을 앞에서 유도한 각 영역의 지배방정식에 대입하면 미분방정식을 얻을 수 있고 식 (3)로 보여준다.

$$-k_n^2 A_n^{I,III}(y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_n^{I,III}(y) = jk_n \mu_0 M_{yn} \quad (3a)$$

$$-k_n^2 A_n^{II}(y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_n^{II}(y) = 0 \quad (3b)$$

식 (3)을 이용하여 자기벡터포텐셜 해를 유도 후자기벡터포텐셜의 정의에 적용하면 영역별 x방향 자속밀도 성분 전달관계행렬식 (4)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} B_{xn}^b \\ B_{xn}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0(h_m) - D_0(h_m) \\ D_0(h_m) - C_0(h_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{zn}^b \\ A_{zn}^c \end{bmatrix} + H_p \begin{bmatrix} X_s \\ -X_s \end{bmatrix} \quad (4a)$$

$$\begin{bmatrix} B_{xn}^d \\ B_{xn}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0(2h_g) - D_0(2h_g) \\ D_0(2h_g) - C_0(2h_g) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{zn}^d \\ A_{zn}^e \end{bmatrix} \quad (4b)$$

$$\begin{bmatrix} B_{xn}^f \\ B_{xn}^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0(h_m) - D_0(h_m) \\ D_0(h_m) - C_0(h_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{zn}^f \\ A_{zn}^g \end{bmatrix} + H_p \begin{bmatrix} X_s \\ -X_s \end{bmatrix} \quad (4c)$$

함수 C_0, D_0 는 각각 $k_n \coth(k_n x)$ 와 $\frac{k_n}{\sinh(k_n x)}$, h_m 은 상측 영구자석 두께, h_g 는 공극 중앙에서 상측 영구자석 경계까지의 두께를 나타낸다. 또한 M_p 는 $-j\mu_0 M_{ym}/k_n$, X_0 는 $C_0(h_m) - S_0(h_m)$ 이다. 식 (4)와 각 영역의 경계조건을 이용하여 경계면에서의 자기벡터포텐셜 값을 구할 수 있다. 식 (5)는 일련의 과정을 통해 공극 영역 내 입의 Y에서 자기벡터포텐셜 계수를 나타낸 것이다. 각 배열별 다른 경계조건에 따라 다른 결과를 얻기 때문에 배열에 맞는 경계조건을 대입하였다. 각 배열별 영역의 경계조건은 표 1로 정리하였다.

$$A_{zn}^Y = \left\{ \frac{D_0(2h_g) - C_0(2h_a) + C_0(Y + h_a)}{D_0(Y + h_a)} \right\} A_{zn}^e \quad (5)$$

〈표 1〉 각 배열에 따른 경계조건

	수직배열	할박배열
(a) - (b)	$B_{xn}^b = 0$	$B_{xn}^b = \mu_0 M_{xn}$
(c) - (d)	$B_{xn}^c = B_{xn}^d$	$B_{xn}^c - B_{xn}^d = \mu_0 M_{xn}$
(e) - (f)	$B_{xn}^e = B_{xn}^f$	$B_{xn}^e - B_{xn}^f = -\mu_0 M_{xn}$
(g) - (h)	$B_{xn}^g = 0$	$B_{xn}^g = \mu_0 M_{xn}$

2.2 역기전력 특성해석

역기전력은 배열별 경계조건을 이용하여 얻을 수 있다. 영구자석에 의한 자계 내에서 운동하는 한 상 권선에 유기되기 때문에 쇠교자속으로 표현 된다. 식 (6)은 수직배열과 할박배열의 역기전력 식을 나타낸다.

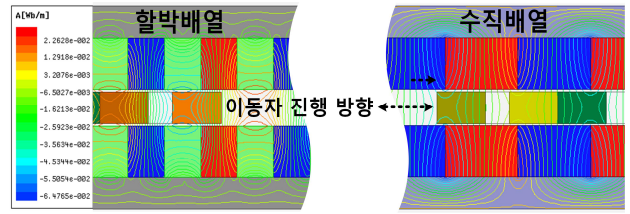
$$e = -jk_n N_t N_s K_d V_s \cdot A_{zn}^Y \cdot e^{jk_n t} (e^{-jk_n \tau_c} - 1) \quad (6a)$$

$$e = -jk_n N_t N_s K_d V_s \left\{ \begin{matrix} (jk_n + C_0(Y + h_g)) A_{zn}^Y \\ -D_0(Y + h_g) A_{zn}^e \end{matrix} \right\} e^{jk_n t} (e^{-jk_n \tau_m} - 1) \quad (6b)$$

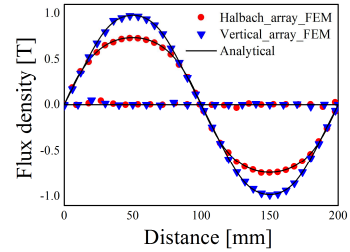
N_t 은 코일 슬롯 당 턴 수를 나타내고 K_d 는 분포 계수, N_s 는 상당 슬롯 수를 나타내고, v 는 이동자의 속도, t 는 시간, τ_c 는 코일피치, l_s 는 적층길이이고 이동자 최대속도는 1.6m/s로 하였다.

2.2 해석 결과

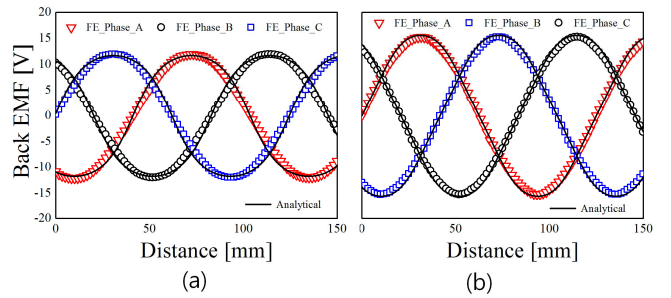
그림 3은 2D 유한요소해석모델이다. 그림 4는 배열별 공극 자속밀도를 비교한 것이고 그림 5는 역기전력 결과를 비교하였다.



〈그림 3〉 2D 유한요소해석 모델



〈그림 4〉 공극 자속밀도 비교



〈그림 5〉 역기전력 해석 결과 : (a) 수직배열 (b) 할박배열

그림에서 보듯 해석 결과는 약 1.3배의 차이를 보인다. 따라서 서론에서 언급한 것과 같이 할박배열이 수직배열에 비해 높은 밀도를 갖는 결과를 확인할 수 있다. 또한 모든 결과는 유한요소 해석과 비교하여 잘 일치함을 보인다.

3. 결 론

본 논문은 수직배열과 할박배열 양극식 영구자석 선형 발전기의 역기전력 해석 비교를 수행하였다. 전자기 전달관계 이론을 이용하여 자속밀도 전달관계 행렬을 도출하였고 공극영역에서의 자속밀도분포를 얻었다. 이동자가 일정한 속도로 이동할 때 역기전력을 해석하였고, 그 결과 할박배열이 수직배열보다 더 높은 공극 자속밀도와 역기전력을 얻을 수 있었다. 모든 결과는 유한요소해석결과와 비교하여 신뢰성을 검증하였다. 본 논문의 연구 결과로 양극식 영구자석 선형 발전기의 실제 초기 설계 시 상황에 맞는 배열을 선정하고 설계변수 민감도 해석에 참고할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2014년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(U 기반 해운물류 체계 구축을 위한 기반기술 연구)

[참고 문헌]

[1] G. R. Slemon, "On the design of high-performance surface-mounted PM motors," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 30, pp.134 - 140, 1994.
 [2] Z. Q. Zhu, David Howe, "Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnet dc Motors, Part II: Armature-Reaction Field", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.29, No. 1, pp. 136-142, 1993.