

공간고조파법을 이용한 영구자석 선형 발전기의 특성 해석

서성원¹, 최장영¹, 김일중^{2*}
¹충남대학교 전기공학과, ²호서대학교 기계공학전공

Characteristic Analysis of Permanent Magnet Linear Generator by using Space Harmonic Method

Seong-Won Seo¹, Jang-Young Choi¹, Il-Jung Kim^{2*}

¹Dept. of Electrical Eng., Chungnam National University

²Division of Mechanical Eng., Hoseo University

요약 본 논문은 파력 에너지 수집 장치에 사용할 수 있는 영구자석 선형 동기발전기의 특성 해석에 관한 것이다. 파력 에너지는 요요시스템과 같은 기구로 부터 얻어진다. 영구자석을 이용한 선형 발전기는 영구자석의 자력을 통해 별도의 전원 공급이 필요 없고 유지 보수가 간단한 장점을 가지고 있다. 또한 높은 에너지 밀도를 갖는 희토류의 사용으로 영구자석 기기는 소형화 및 경량화가 가능하며 보다 높은 에너지 변환 효율을 얻을 수 있다. 영구자석 선형 동기발전기 특성 해석을 위해 2차원 극 좌표계 및 자기 벡터 포텐셜에 근거하여 영구자석과 전기자 반작용 자계해석을 수행 하였다. 해석 해를 이용하여 정현적인 속도입력에 의해 유도되는 유기기전력의 특성 식을 유도하고, 동일한 방법으로 역기전력 상수, 저항, 자기인덕턴스와 상호인덕턴스와 같은 전기적 파라미터를 얻었다. 본 논문에서 사용한 공간고조파법의 결과는 2차원 유한요소해석법 결과와 비교하여 잘 일치하는 것을 확인하였다. 이 결과는 영구자석 형 선형 발전기의 특성을 이해하는 것과 해석방법의 비교연구, 설계 최적화, 그리고 기기의 동적 모델링에 기여할 수 있다.

Abstract This paper deals with characteristics analysis of a permanent magnet (PM) linear generator using analytical methods for wave energy harvesting. The wave energy is carried out from the movement of a yo-yo system. A linear generator using permanent magnets to generate a magnetic force itself does not require a separate power supply and has the advantage of simple maintenance. In addition to the use of a rare earth, a permanent magnet having a high-energy density can be miniaturized and lightweight, and can obtain high energy-conversion efficiency. We derived magnetic field solutions produced by the permanent magnet and armature reaction based on 2D polar coordinates and magnetic vector potential. Induced voltage is obtained via arbitrary sinusoidal input. In addition, electrical parameters are obtained, such as back-EMF constant, resistance, and self- and mutual-winding inductances. The space harmonic method used in this paper is confirmed by comparing it with finite element method (FEM) results. These facilitate the characterization of the PM-type linear generator and provide a basis for comparative studies, design optimization, and machine dynamic modeling.

Keywords : Armature Reaction, Energy Harvesting, FEM, Linear Generator, Permanent Magnet, Space Harmonic Method

1. 서 론

최근 현대 산업은 화석 에너지 고갈로 인해 다양한 신

재생에너지와 버려지는 에너지 활용을 위한 에너지 하베스팅 기술에 대한 개발과 연구가 진행되고 있다[1-2]. 이에 따라 발전기를 통해 운동 에너지를 전기에너지로 변

본 논문은 호서대학교 연구과제로 수행되었음.(과제번호 : 20150335)

*Corresponding Author : Il-Jung Kim (Hoseo Univ.)

Tel: +82-41-541-5805 email: ijkim@hoseo.edu

Received September 29, 2016

Revised (1st November 14, 2016, 2nd December 8, 2016, 3rd December 13, 2016)

Accepted January 6, 2017

Published January 31, 2017

환하는 연구가 증가하였고 이 중 영구자석을 이용한 발전기는 영구자석의 자력을 통해 별도의 전원공급이 필요 없고 유지 보수가 간단한 장점을 가지고 있다. 또한 높은 에너지 밀도를 갖는 회토틀류의 사용으로 영구자석 기기는 소형화 및 경량화가 가능하며 높은 에너지 변환 효율을 얻을 수 있게 되었다[3]. 이러한 장점으로 인해 영구자석 기기는 신재생 에너지 관련 기기뿐만 아니라, 하이브리드 자동차의 피스톤 에너지 컨버터, 저용량 에너지 저장 장치 등 고속, 고효율, 고출력을 필요로 하는 초소형 기기는 물론 대형 기기들에 까지 광범위하게 사용된다.

영구자석 발전기는 크게 회전형과 선형 발전기가 있다. 회전형 발전기는 회전운동을 통한 에너지를 전기에너지로 변환하는 원리로 일반적으로 풍력 발전기에 사용된다. 회전형 발전기는 전기에너지 생산에 효과적이지만 병진운동을 회전운동으로 변환하는 동력전달기구가 필요하다. 반면 선형 발전기는 일반적으로 파력 발전기로 사용되며 회전형 발전기와 달리 동력전달 장치를 거치지 않고 발전이 가능하기 때문에 유지보수에 드는 비용 절감 및 높은 에너지 변환 효율과 신뢰 수준을 제고할 수 있다[4].

영구자석 발전기의 특성 해석에는 유한요소 해석법과 공간고조파법이 있다. 수치해석에 기반을 둔 유한요소해석법은 높은 신뢰성을 보여주며 상용 프로그램의 성능이 향상되어 널리 사용되지만, 사용의 편의성은 있으나 초기 설계시 다양한 설계 변수에 따른 결과를 해석하는데 번거로움과 해석 소요 시간이 길다는 단점이 있다. 반면, 공간고조파법은 높은 정확도를 가지고 수초의 해석시간으로 해석이 가능하고 다양한 변수를 고려한 설계를 변경하여 해석이 가능하다[5].

본 논문에서는 공간고조파법을 이용하여 영구자석 선형 발전기의 특성 해석을 수행하였고 이때의 방법은 2차원 직각좌표계 및 푸리에급수를 이용하여 영구자석의 자화를 수학적으로 표현하였다. 또한 해석 모델의 각 영역별 지배방정식을 유도하고 각 영역의 자기벡터퍼텐셜과 경계조건을 사용하여 자속밀도 해석 해를 도출할 수 있다[6-9]. 이 과정에 전자기 전달관계 해석법을 사용하였는데, 이 방법은 해석영역의 일반해에 경계조건을 적용하고 복잡한 연립방정식을 행렬방정식으로 변환하여 간략화 할 수 있는 방법을 말한다[10]. 또한, 전자기 전달 관계 해석법은 각 영역에 대한 지배방정식의 해를 구할 때 2개 이상의 영역을 갖는 해석모델에 매우 편리한 장

점을 갖는다[11-12]. 이 같은 과정을 통해 얻은 해석 해를 이용하여 정현적인 속도입력으로 유도되는 유기기전력 특성식을 도출하고, 같은 방법으로 권선에 의한 전기자 반작용 자계 분포 해석 그리고 회로정수를 얻었다. 얻어진 결과는 유한요소해석법과 비교한 후 공간고조파법의 정확성과 신뢰성을 검증하였다.

2. 자계 특성 해석

2.1 해석모델

영구자석 선형 발전기의 구조는 일반적으로 슬롯티드 타입과 슬롯리스 타입이 있다. 본 논문에서는 Fig. 1과 같이 슬롯티드 타입을 선정하여 해석하였다. 이동자는 양측식 구조이며 수직배열을 사용하였다. 고정자는 집중 권 권선이고, 고정자 철심은 적층되어 결합되었다. 이동자의 운전 범위는 고정자를 중심으로 양측의 이동자가 고정자를 벗어나지 않도록 고려되었다. 또한, 본 논문의 해석 모델의 경우 중앙의 고정자 철심 중심으로부터 상하의 대칭적인 구조를 가지고 있기 때문에 고정자의 중심으로부터 상측 영역만 해석하여 간이화 될 수 있지만 유기기전력 특성해석 시 하측 영역을 고려하기 위해 두 배 해야만 정확한 결과를 얻을 수 있다.

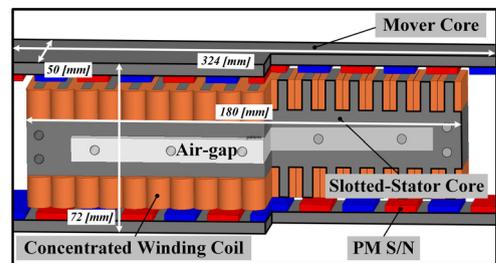


Fig. 1. Structure of small scale linear generator

2.2 자계 분포 특성 해석

2.2.1 영구자석 자화 모델링

해석 모델 Fig. 2의 각 영역은 상측의 영구자석 (I) 영역과 공극의 (II)영역으로 구분하였다. 고정자 철심의 중심을 영점으로 하고 상측 철심 표면까지의 각 영역 경계 거리를 각각 m, g, c 로 나타내고 있다. 그리고 자석의 투자율은 공기와 같고 고정자 철심과 상측 철심은 무한대로 가정하였다. Fig. 2의 고정자는 슬롯티드 타입이지만

공간고조파법을 이용한 해석 모델에서 슬롯과 슬롯 사이의 길이가 작기 때문에 다음과 같이 간이화 하였고, 유한 요소해석법의 영구자석에 의한 자속밀도 해석 결과와 잘 일치함을 결과 그래프로 확인 할 수 있다. 고정자 철심은 상측 이동자 철심과 동일한 재질이다. 수직 배열 영구자석의 자화모델링을 위해 푸리에급수 전개를 이용한다. 이때의 수직 배열 자화모델링 수식은 식 (1)과 같고 푸리에급수 전개과정을 통해 식 (2)를 도출 할 수 있다[13].

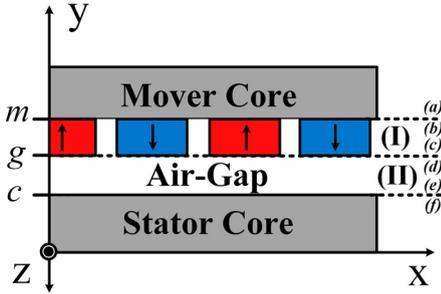


Fig. 2. Magnetic field analytical model by permanent magnets

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

$$M_{yn} = \frac{2jM_0}{n\pi} \sinh(jn\pi) \quad (2)$$

여기서 M_{yn} 은 자화성분의 y방향 푸리에계수를 나타낸다. 또한 \mathbf{i}_y 는 y방향의 단위벡터, n은 n차 공간고조파 성분이고 k_n 은 $n\pi/\tau$, 이때의 τ 는 영구자석의 극 간격을 나타낸다.

2.2.2 무부하 자계 해석

수직 배열 영구자석의 자계 해석을 위해 맥스웰 방정식을 이용한다. 이때의 영구자석 자속밀도 $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ 로 나타내며 외부에서 생기는 자계에 의한 유도자화성분은 무시한다. 양변에 curl을 취하면 $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{0}$ 에 의해 \mathbf{H} 항이 소거되어 식 (3)이 얻어진다. 이때 μ_0 는 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m이다.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \nabla \times \mu_0 \mathbf{M} \quad (3)$$

자기벡터포텐셜 \mathbf{A} 의 정의를 이용하여 자속밀도 \mathbf{B} 식

의 양 변에 curl을 취하고 컬롱게이지와 벡터 항등식을 적용하면 지배방정식 $\nabla \times \mathbf{B} = -\nabla^2 \mathbf{A}$ 를 유도할 수 있다. 앞의 식들을 연립하면 다음 식(4)와 같은 (I), (II)영역의 지배방정식을 얻을 수 있다[11].

$$\nabla^2 \mathbf{A}^I = -\mu_0 (\nabla \times \mathbf{M}) \quad (4.1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A}^{II} = 0 \quad (4.2)$$

식 (4)의 자기벡터포텐셜 \mathbf{A} 는 전류와 방향이 같고 z 방향의 성분만 갖기 때문에 식 (5.1)과 같이 나타낼 수 있고, 식 (4)에 대입하면 식 (5.2)와 (5.3)과 같은 미분방정식이 얻어진다. 이 미분방정식을 이용하여 자기벡터포텐셜의 해를 구할 수 있다.

$$\mathbf{A} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n(y) e^{-jk_n x} \mathbf{i}_z \quad (5.1)$$

$$-k_n^2 A_{zn}^I(y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_{zn}^I(y) = jk_n \mu_0 M_{yn} \quad (5.2)$$

$$-k_n^2 A_{zn}^{II}(y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_{zn}^{II}(y) = 0 \quad (5.3)$$

도출된 자기벡터포텐셜 해를 자기벡터포텐셜의 정의에 적용하면 영구자석 영역과 공극 영역 간의 x방향 자속밀도 성분의 관계를 나타내는 식 (6)의 전달관계행렬로 표현된다[10].

$$\begin{bmatrix} B_{xn}^b \\ B_{xn}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0(h_m) - S_0(h_m) \\ S_0(h_m) - C_0(h_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{zn}^b \\ A_{zn}^c \end{bmatrix} + H_p \begin{bmatrix} X_s \\ -X_s \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

$$\begin{bmatrix} B_{xn}^d \\ B_{xn}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0(h_a) - S_0(h_a) \\ S_0(h_a) - C_0(h_a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{zn}^d \\ A_{zn}^e \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

식 (6.1)과 (6.2)의 함수 C_0, S_0 는 각각 $k_n \coth(k_n x)$ 와 $\frac{k_n}{\sinh(k_n x)}$ 이며, h_m 은 $m - g$ 이고 h_a 는 $g - c$ 이다. H_p 는 $-j\mu_0 M_{yn}/k_n$, X_s 는 $C_0(h_m) - S_0(h_m)$ 이다.

이렇게 도출된 전자기 전달관계 행렬식과 적절한 경계조건을 이용하여 각각의 경계면에서 자기벡터포텐셜 값을 구할 수 있고 이때의 경계조건은 다음 식 (7)과 같다[14].

$$y=m, \tag{7.1}$$

$$H_{xn}^b - H_{xn}^a = 0$$

$$\frac{B_{xn}^b}{\mu_0} - \frac{B_{xn}^a}{\mu_0} = 0$$

$$\therefore B_{xn}^b = 0$$

$$y=g, \tag{7.2}$$

$$H_{xn}^c - H_{xn}^d = 0$$

$$\frac{B_{xn}^c}{\mu_0} - \frac{B_{xn}^d}{\mu_0} = 0$$

$$\therefore B_{xn}^c = B_{xn}^d$$

$$y=c, \tag{7.3}$$

$$H_{xn}^e - H_{xn}^f = 0$$

$$\frac{B_{xn}^e}{\mu_0} - \frac{B_{xn}^f}{\mu_0} = 0$$

$$\therefore B_{xn}^g = 0$$

식 (7)의 윗첨자 b, c, d, e는 각 영역간의 경계면을 표현한 기호이며, 식 (6)과 (7)을 이용하여 정리하면 공극 내의 임의의 지점을 일반화한 임의 Y경계면에서의 자기 벡터포텐셜을 구할 수 있다.

2.2.3 고정자 권선 전류 모델링

영구자석 기기에서 전기자 반작용에 의한 자계 특성 계산은 발전기의 진동, 소음 그리고 인덕턴스 예측에 매우 중요하다. 양축식 슬롯타입 영구자석 선형 발전기의 전기자 반작용 해석모델은 Fig. 3과 같다. 앞에서 언급한 것과 같이 슬롯타입은 치와 치 사이에 권선이 배치되어 있다. 영구자석에 의한 자계 해석 모델과 같이 전기자 반작용 자계 해석을 위한 해석모델은 고정자 중심을 기준으로 상측만 해석할 수 있다.

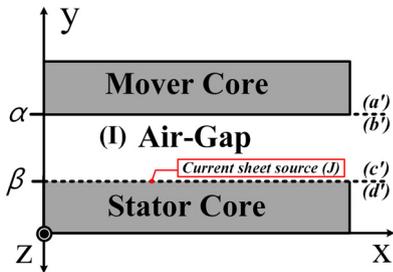


Fig. 3. Analytical model for armature reaction field distribution

여기서, Fig. 3에 표시된 면전류밀도(Current sheet source)는 슬롯팅을 고려하지 않고 전기자 전류가 고정자 표면에 분포한다고 가정한 것을 나타낸다. 따라서 전기자 반작용 자계 해석은 공극인 I영역으로 한정되고 소스 전기자 전류 밀도는 경계조건에서 고려된다.

그러므로 자계 특성식은 권선 영역에서 존재하지 않으며 면전류밀도 \mathbf{J} 가 존재한다고 할 때, 영구자석에 의한 자계 해석과 마찬가지로 맥스웰 방정식에 의해 구할 수 있다. 따라서 영구자석에 의한 자계를 구할 때와 동일한 방법으로 유도할 수 있고, 전기자 반작용 해석 모델의 공극 영역에 전류가 없고 자기벡터포텐셜의 정의와 쿨롱계이치를 적용하여 공극 영역에서의 지배방정식 (8)을 유도하였다[6].

$$\nabla^2 \mathbf{A}^I = 0 \tag{8}$$

다음 식 (9.1)은 A상 전류밀도의 푸리에 급수식이며, 식 (9.2)는 전류 벡터 \mathbf{J}_z 를 나타내고 이는 3상 전류밀도를 모두 더한 것이므로 이를 이용하여 전류밀도 모델링이 가능하다.

$$\mathbf{J}_a = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_{n,a} e^{-jk_x x} \mathbf{i}_a \tag{9.1}$$

$$\mathbf{J}_z = \mathbf{J}_a + \mathbf{J}_b + \mathbf{J}_c \tag{9.2}$$

2.2.4 전기자 반작용 자계 해석

식 (8)과 자기벡터포텐셜 $\mathbf{A} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{zn}(y) e^{-jk_x x} \mathbf{i}_z$ 를 이용하여 다음과 같은 미분방정식을 도출 할 수 있다.

$$-k_n^2 A_{zn}^I(y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_{zn}^I(y) = 0 \tag{10}$$

식 (10)은 공극 영역에서의 x방향 전기자 반작용 성분을 나타내는 전자기 전달관계 행렬식 도출에 이용된다. 이때의 전자기 전달관계 행렬식은 식 (11)과 같고 식 (12)는 전기자 반작용 자계 해석을 위한 경계조건이다 [10],[14].

$$\begin{bmatrix} B_{xn}^b \\ B_{xn}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{01}(h_b) - S_{01}(h_b) \\ S_{01}(h_b) - C_{01}(h_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{zn}^b \\ A_{zn}^c \end{bmatrix} \tag{11}$$

여기서, C_{01} 은 $k_n \coth(k_n x)$ 이고, S_{01} 은 $k_n / \sinh(k_n x)$ 그리고 h_b 은 $\alpha - \beta$ 이다.

$$\begin{aligned}
 y &= \alpha, & (12.1) \\
 H_{xn}^b - H_{xn}^a &= 0 \\
 \frac{B_{xn}^b}{\mu_0} - \frac{B_{xn}^a}{\mu_0} &= 0 \\
 \therefore B_{xn}^b &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y &= \beta, & (12.2) \\
 H_{xn}^c - H_{xn}^d &= 0 \\
 \frac{B_{xn}^c}{\mu_0} - \frac{B_{xn}^d}{\mu_0} &= 0 \\
 \therefore B_{xn}^c &= -\mu_0 J
 \end{aligned}$$

2.3 회로정수 도출

2.3.1 역기전력 상수

역기전력 특성식은 영구자석의 자속밀도 특성식을 이용하여 도출한다. 따라서 영구자석에 의해 유기되는 유도기전력은 식 (13)과 같다.

$$E_{cmf} = \frac{d\psi}{dt} = N_t K_d N_{spp} \frac{d\phi}{dt} \quad (13)$$

여기서, N_t 는 슬롯당 턴 수, K_d 는 분포 계수, N_{spp} 는 상당 슬롯 수, 그리고 ϕ 는 코일 1턴 당 쇄교자속을 나타내고, ϕ 는 $\int_s B ds$ 이다. 일련의 과정을 통하여 식 (14)를 도출할 수 있고 역기전력 상수 K_e 는 식 (15)로 나타낸다[9].

$$E_{cmf} = -2N_t N_{spp} K_d v_p l_{stk} A_n^Y(y) jk_n (e^{-jk_n \tau_m} - 1) \quad (14)$$

$$K_e = \max(E_{cmf} / V) \quad (15)$$

식 (14)의 l_{stk} 는 적층길이로서 실제 해석에서는 임의의 정현파를 가정하여 속도 $V = v_p \sin(\omega t)$ 로 하며 이때 v_p 는 최대속도, t 는 시간, τ_m 은 코일피치이다.

2.3.2 인덕턴스

각 상의 인덕턴스는 자기 인덕턴스, 상호 인덕턴스,

누설 인덕턴스 성분의 합이다. 누설 인덕턴스와 자기인덕턴스에 포함되는 엔드부 인덕턴스는 매우 작은 값으로 본 논문에서는 무시한다. 한 상에 쇄교되는 자속 $\lambda_a = L_{self} i_a$ 와 같다. 이때 λ_a 는 전기자 반작용에 의한 a 상 권선의 쇄교자속, L_{self} 와 i_a 는 각각 자기인덕턴스와 전류이다. 3상 권선을 가지는 기기의 상호인덕턴스 M 은 식 (15)와 같다. 따라서 한 상 코일에 쇄교되는 총 자속 λ 는 식 (16)과 같이 구할 수 있다.

$$M = -\frac{1}{2} L_{self} \quad (15)$$

$$\lambda = L_{self} i_a + M i_b + M i_c = \frac{3}{2} L_{self} i_a = L_s i_a \quad (16)$$

2.3.3 저항

일반적인 해석 모델의 발전특성 및 성능 해석에서는 내부 권선에 의한 저항을 계산하는 것이 필요하다. 권선에서 발생하는 저항손과 전압강하 등 손실의 주요 원인이 되기 때문이다.

따라서 발전기 효율 및 성능 예측과 발전특성 해석을 위한 권선 저항 R_{phase} 는 식 (17)과 같이 나타낸다. 온도에 따른 저항 값의 변화는 무시하고, ρ_0 는 권선으로 사용되는 구리의 상온에서 저항률 $1.724 \times 10^{-8} [\Omega \cdot m]$ 이다. 또 A_c 는 코일의 단면적, l_w 는 권선의 총 길이를 나타낸다. 코일의 단면적과 총 길이는 식 (18)과 (19)로 나타낼 수 있다. 이때 s_f 는 점적률로 0.35의 값을 갖고 h 는 공극 중앙으로부터 코일의 y방향 높이 그리고 τ_c 는 코일피치이다.

$$R_{phase} = \rho_0 \frac{l_w}{A_c} \quad (17)$$

$$A_c = \frac{cl \cdot h_c \cdot s_f}{N_t} \quad (18)$$

$$l_w = N_t N_{spp} (2l_{stk} + \pi \tau_c) \quad (19)$$

2.4 해석 결과

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 공극자속밀도 해석 결과와 전기자 반작용 자계 해석 결과이다.

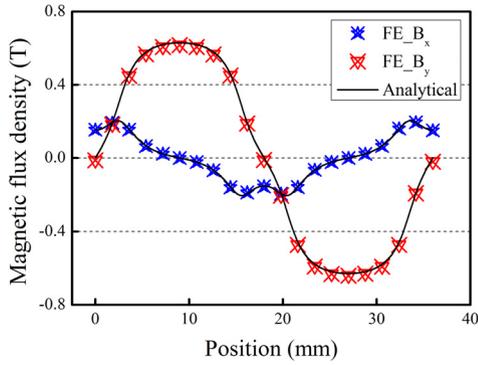


Fig. 4. Analysis results of the magnetic flux density at air-gap

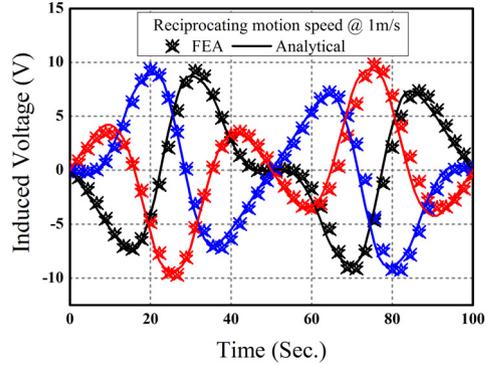


Fig. 7. Analysis results of the induced voltage

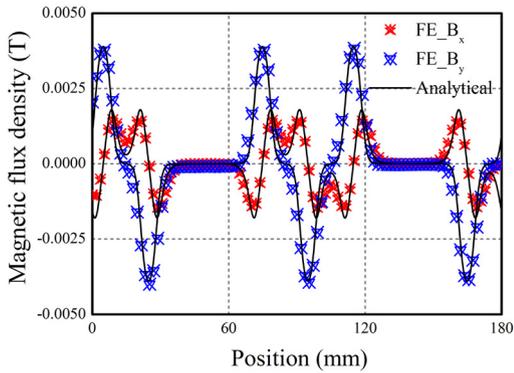


Fig. 5. Armature reaction density analysis results

Fig. 6은 정격 입력 속도이며 이때의 최대 속도는 1m/s이다. Fig. 7은 유도기전력 해석결과, Fig. 8은 2차원 유한요소해석법에 사용된 모델이다. 또한 Table 1과 Table 2는 각각 회로정수 해석의 비교와 본 논문에서 사용한 영구자석 선형 발전기의 사양이다.

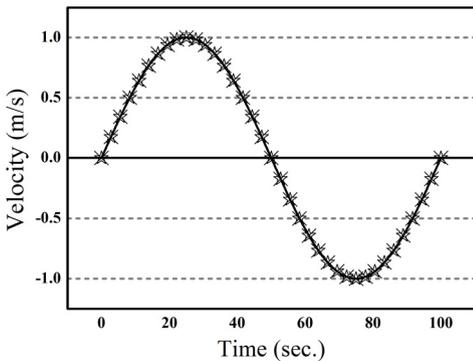


Fig. 6. Rated input wave velocity

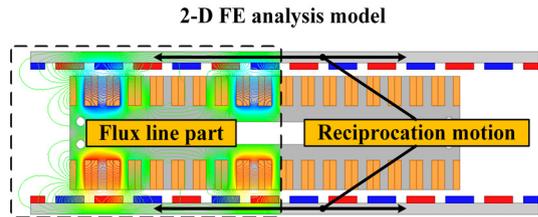


Fig. 8. 2D Finite elements analysis model

Table 1. Circuit parameters

Circuit parameters	Analytical	FEM
E_{emf}	4.91 [Vrms]	4.97 [Vrms]
L_{self}	0.98 [mH]	0.95 [mH]
R_{phase}	0.78 [ohm]	0.8 [ohm]

Table 2. Spec. of double-sided PM linear generator

layer length	324 [mm]	laminated length	50 [mm]
PM thickness	3 [mm]	pole pitch	18 [mm]
air-gap	3 [mm]	coil pitch	3 [mm]
turns	20	slot length	4 [mm]
stator length	180 [mm]	total height	72 [mm]

3. 결론

본 논문에서는 양측식 선형 영구자석 발전기의 특성 해석을 수행하였다. 먼저 영구자석에 의한 자계분포특성

해석 및 권선에 의한 전기자 반작용 자계 해석을 바탕으로 회로정수를 도출하였다. 공간구조파법을 이용한 모든 해석 결과는 2차원 유한요소해석법 결과와 비교하였고, 매우 잘 일치하는 것을 확인하였다.

따라서 공간구조파법을 이용한 영구자석 선형 발전기의 특성 해석은 모든 결과를 기반으로 신뢰성과 타당성이 검증되었고, 본 논문에서의 연구결과는 양측식 및 편측식 등 영구자석 선형 발전기의 초기 설계 및 성능 평가에 참고할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] H. J. Shin, J. Y. Choi, I. J. Kim, and Y. S. Choi, "Electromagnetic Analysis and Experimental Testing of a Light Switch with a Permanent Magnet Generator for Energy Harvesting based on Three Dimensional Finite Element Model," *Journal of Applied Physics*, vol. 115, 17E703, Jan. 2014.
DOI: <http://doi.org/10.1063/1.4857915>
- [2] K. H. Sim, J. S. Park, and S. J. Jang, "Electro-Mechanical Modeling and Performance Analysis of Floating Wave Energy Converters Utilizing Yo-Yo Vibrating System." *Trans. of the Korean Soc. of Mech. Eng. A*, vol. 39, pp. 79-87, 2015.
DOI: <http://doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.1.079>
- [3] H. Polinder, F. F. A. van der Pijl, G. J. de Vilder, and P. J. Tavner, "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, pp. 725-733, Sep. 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.875476>
- [4] Y. Amara, J. B. Wang, and D. Howe, "Analytical prediction of eddy-current loss in modular tubular permanent-magnet machines," *IEEE Trans. on Energy Conv.*, vol. 20, pp. 761-770, Dec. 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2005.853732>
- [5] J. B. Wang, G. W. Jewell, and D. Howe, "A general framework for the analysis and design of tubular linear permanent magnet machines," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, pp. 1986 - 2000, May 1999.
DOI: <https://doi.org/10.1109/20.764898>
- [6] Zhu Z.Q., Howe D., Bolte E., and Ackermann B., "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors. I. Open-circuit field," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 29, pp. 124-135, Jan. 1993.
DOI: <https://doi.org/10.1109/20.195559>
- [7] Z.Q.Zhu, D.Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, Part II:Armature -reaction field," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 29, pp. 136-142, Jan. 1993.
DOI: <https://doi.org/10.1109/20.195559>
- [8] Z. Q. Zhu, D. Howe, E. Bolte, B. Ackermann, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, Part III:Effect of stator slotting," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 29, 143-151, Jan. 1993.
DOI: <https://doi.org/10.1109/20.195559>
- [9] Z.Q.Zhu, D.Howe, E. Bolte, B. Ackermann, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, Part IV:Magnetic field on load," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 29, pp. 152-158, Jan. 1993.
DOI: <https://doi.org/10.1109/20.195559>
- [10] J. R. Melcher, "Continuum Electromechanics," Cambridge, MA: MIT Press, 1981.
- [11] D. L. Trumper, W. J. Kim, and M. E. Williams, "Design and analysts framework for linear permanent-magnet machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, pp. 371-379, Mar-Apr 1996.
DOI: <https://doi.org/10.1109/28.491486>
- [12] Kent R. Davey, "Analytic analysis of single -and three phase induction motors," *IEEE Transactions, Mag.* vol. 34, Sep. 1998.
DOI: <https://doi.org/10.1109/20.718534>
- [13] J. Y. Choi, S. H. Lee, K. J. Ko, and S. M. Jang, "Improved Analytical Model for Electromagnetic Analysis of Axial Flux Machines With Double-Sided Permanent Magnet Rotor and Coreless Stator Windings," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, pp. 2760 - 2763, Oct. 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2151840>
- [14] J. Y. Choi, H. J. Shin, S. M. Jang, and S. H. Lee, "Torque Analysis and Measurements of Cylindrical Air-Gap Synchronous Permanent Magnet Couplings Based on Analytical Magnetic Field Calculations," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 7, pp. 3921-3924, Jul. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2239265>

서 성 원(Sung-Won Seo)

[정회원]



- 2014년 2월 : 호서대학교 공과대학 전기공학과(공학사)
- 2016년 2월 : 충남대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 대학원 전기공학과 박사과정

<관심분야>
스마트 전기기기

최 장 영(Jang-Young Choi)

[정회원]



- 2003년 2월 : 충남대학교 전기공학과(공학사)
- 2005년 2월 : 충남대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 2009년 2월 : 충남대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 2009년 1월 ~ 2009년 8월 : (주) 한라공조 기술연구소

- 2009년 9월 ~ 현재 : 충남대학교 전기공학과 부교수

<관심분야>

스마트 전기기기, 에너지하베스팅

김 일 중(Il-Jung Kim)

[정회원]



- 1980년 2월 : 충남대학교 전기공학과(공학사)
- 1995년 2월 : 충남대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1992년 3월 ~ 2005년 8월 : 주성대학 전기과 교수
- 2006년 3월 ~ 2007년 2월 : (주) 일신엔지니어링 기술연구소장

- 2007년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 기계공학전공 교수

<관심분야>

전기기기, 메카트로닉스, 에너지하베스팅