

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.4.147>  
JIIBC 2024-4-22

## 블레이드리스 풍력발전기의 토폴로지에 관한 비교·분석

# Comparison and Analysis for the Topology of Bladeless Wind Power Generator

민준혁\*, 정성인\*\*

Junhyuk Min\*, Sungin Jeong\*\*

**요약** 본 연구는 기존 풍력 터빈의 한계와 문제점을 극복하기 위해 블레이드리스 풍력 발전을 위한 선형 발전기의 모델링 및 해석에 중점을 두고 있다. 블레이드리스 풍력 발전 시스템은 블레이드 풍력 발전 터빈에 비해 설치 및 유지관리에 필요한 토지 요구량이 낮다는 장점이 있다. 그러나 블레이드리스 풍력 발전을 위한 발전기에 관한 종합적인 연구는 아직까지 부족한 실정이다. 특히, 발전기의 토폴로지에 관한 질문의 답변이 만족스럽지 않다. 연구의 목표는 원통형 블레이드리스 풍력발전기의 수평 및 수직 구조에 대해 비교 분석하는 것이다. 제안된 토폴로지는 자기력을 이용해 2차원 등가 자기회로 네트워크 방식으로 해석한 후 유한요소법으로 비교 평가하였다. 최종적으로, 본 연구의 결과는 풍력 발전 시스템을 위한 새로운 발전기 구조에 대한 상세한 정보와 블레이드리스 풍력 발전 특성에 대한 통찰을 제공할 것이다.

**Abstract** This study focuses on the modeling and analysis of the linear generator for a bladeless wind power generation to overcome the limitations and drawbacks of conventional wind turbines. A bladeless wind power generation system has the advantages of low land requirement for installation and maintenance cost compared to a blade wind power turbine. Nevertheless, question concerning the generator topology are not satisfying answered. The goal of the research is to compare and analyze the characteristics of horizontal and vertical structures of linear generator for bladeless wind power systems. The proposed topology will be analyzed using magnetic energy by equivalent magnetic circuit method, and then it has been compared and evaluated by finite element method. The results of this project will give elaborate information about new generator structures for wind power system and provide insights into the characteristics of bladeless wind power generation.

**Key Words** : Bladeless wind power generation, Linear generator, Micro grid, Resonance, Vortex Induced Vibration

\*학생회원, 한양대학교 전기공학과

\*\*정회원, 광주대학교 전기공학과

접수일자 2024년 6월 1일, 수정완료 2024년 7월 1일

게재확정일자 2024년 8월 9일

Received: 1 June, 2024 / Revised: 1 July, 2024 /

Accepted: 9 August, 2024

\*Corresponding Author: si.jeong@gwangju.ac.kr

Dept. of Electrical Eng., Gwangju University, Gwangju, Korea

## I. 서 론

2016년 파리협정은 기존의 교토의정서를 대치하고, 전세계적으로 탄소중립 및 NDC(Nationally Determined Contribution, 국가 온실가스 감축목표)를 제출하여 온실가스 배출량 감축을 목표로하였다. 이에 따라 온실가스 배출량이 적은 태양광발전과 풍력 발전이 기술적·경제적으로 가장 경쟁력 있는 재생에너지로 개발되고 있다. 특히 풍력발전시스템은 태양광발전시스템과 비교하였을 때, 투자 비용 및 설치 면적에 따라 높은 발전 용량을 생산한다<sup>[1]</sup>. 현재 일반적으로 상용화되고 있는 풍력발전기는 대형화된 수평축 풍력발전기의 형태이며 블레이드, 허브시스템, 회전축, 증속기, 요잉, 피치 시스템 및 브레이크로 구성되어 구조가 복잡하고 초기 투자 비용이 높으며, 블레이드 면적 및 발전 경제성을 고려한 연평균 풍속에 따라 설치 장소 선정에 어려움이 따른다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고, 공간 효율성 극대화 및 소규모 독립형 전력망(Micro Grid) 적용을 위하여 기존 풍력발전기에서 블레이드를 제거한 실린더 형태의 블레이드리스 풍력발전기 개발을 진행하였다. 블레이드리스 풍력발전기의 동특성과 비선형을 고려한 수평형 및 수직형 발전기 개발을 통해 풍력발전기의 설계 규칙과 특성을 제공한다.

## II. 블레이드리스 풍력발전시스템

블레이드리스 풍력발전시스템은 블레이드를 제거하고, 대류 현상에 의한 공기의 흐름에 따라 발생하는 운동 에너지를 이용하여 전기를 생산하는 신재생에너지 발전 방식이다. 원형 기둥과 공기 흐름의 상호작용으로 구조물에 진동을 발생시키는 플러터에 의해 진동하는 수직축의 운동에너지를 전기에너지로 변환한다.

그림 1은 블레이드리스 풍력발전시스템을 나타내며, 상부의 발전기가 진동하는 원형 기둥과 이를 지지하기 위하여 지면에 고정된 하부의 기둥의 두 부분으로 기둥 주변으로 와류(Vortex)가 발생하여 탄성 막대에 수직으로 부착된 경량의 실린더가 진동한다. 진동하는 실린더와 연결된 발전기의 영구자석과 전자석 링(Ring)이 서로 밀어내면서 진동을 증폭하고, 발생된 진동에너지를 전기 에너지로 변환하여 전기를 생성하게 된다. 전후좌우 어느 방향이든지 풍향과 상관없이 바람의 수직 방향으로 진동하여 풍향 변화에도 빠르게 적용할 수 있다. 블레이드리스 풍력발전시스템은 원형 기둥 주위에 바람이 일으

키는 와류(Vortex)가 에너지원이 되는 원리를 이용한다. 본 시스템에 적용되는 발전기는 실린더 형태의 본체에 유체가 지나며 발생하는 VIV(Vortex Induced Vibration) 현상을 이용해 진동에너지를 전기에너지로 변환하는 발전기이다.

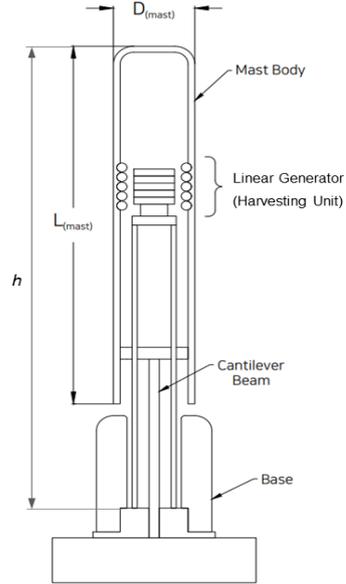


그림 1. 블레이드리스 풍력발전시스템  
Fig. 1. Bladeless Wind Power Generation System

### 1. VIV(Vortex Induced Vibration)

그림 2는 VIV 현상의 도식을 나타낸다.

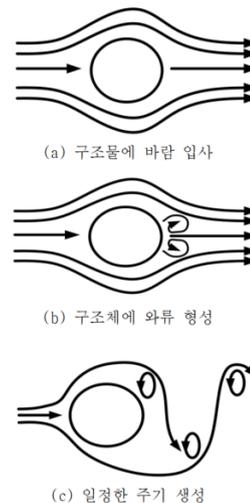


그림 2. VIV 현상  
Fig. 2. The Phenomenon of Vortex Induced Vibration

그림 2(a)와 같이 실린더 형태의 원형 기둥에 바람이 지나가게 되면 그림 2(b)와 같이 원형 기둥을 기준으로 전방과 후방의 압력 차이가 발생하고, 이를 통하여 와류가 형성된다. 실린더를 가르는 유체의 흐름에서 형성된 와류는 대칭적으로 발생하지 않고, 유체의 방향과 수직으로 양력(Lift Force)이 발생하여 비대칭 와류가 반복된다. 그림 2(c)에는 이러한 비대칭 와류가 일정한 주기를 가지며 규칙적으로 진동 형태로 발생하는 경우의 VIV 현상을 나타낸다<sup>[2, 3]</sup>.

## 2. 공진(Resonance)

공진현상은 고유진동수(주파수)를 지닌 물체가 같은 진동수를 가진 외력을 주기적으로 받을 때 진폭과 에너지 증가하는 현상이다. 본 연구에서 다루는 블레이드리스 풍력발전시스템은 VIV 현상으로 생성된 와류와 원형 기둥 사이의 주파수를 동일한 크기로 형성하여 공진현상을 발생시킨다.

$$h = D + \alpha \cdot X \quad (1)$$

원형 기둥의 진폭인  $X$ , 레이놀즈수  $\alpha$  및 원형 기둥의 지름인  $D$ 를 이용하여 원형 기둥의 특성 길이  $h$ 를 표현할 수 있다.

$$\alpha = \frac{\nu_{air} \cdot h}{\nu_{vis}} \quad (2)$$

여기서, 무차원수(Dimensionless Number)인 레이놀즈수는 점성률( $\nu_{vis}$ )과 관성의 비율로 측정되며, 원형 기둥 표면을 지나가는 공기의 상대 속도( $\nu_{air}$ )로 정의된다.

$$f_{vor} = \frac{k \cdot \nu_{air}}{h} \quad (3)$$

VIV 현상에 의해 형성된 와류의 주파수는 (3)을 통해 구할 수 있다. 원형 기둥을 지나가는 공기의 속도  $\nu_{air}$ 와 비례 상수인  $k$ 를 통해 표현할 수 있다.

$$f_{VIV} = \frac{k \cdot \nu_{air}}{h + \alpha \cdot X} \quad (4)$$

식 (4)는 원형 기둥의 주파수를 나타내며, (3)과 (4)를 통해 VIV 현상에 의한 와류 주파수  $f_{vor}$ 와 원형 기둥 주

파수  $f_{vor}$ 를 구조적으로 동일하게 형성하여 공진현상을 발생시켜 진동에너지를 생성한다<sup>[4]</sup>.

## 3. 발전 시스템

본 연구에서는 실린더 형태의 블레이드리스 풍력발전시스템의 VIV 현상에 의한 와류 주파수( $f_{vor}$ )와 원형 기둥 주파수( $f_{vor}$ )를 동일하게 하여 공진현상을 발생시킨다. 블레이드리스 풍력 발전용 발전기는 발전시스템의 핵심기술로 고효율의 발전을 위한 요소 기술이며, 기존 회전형 발전기에 비해 구조가 간단하며, 저비용 및 유지 보수 비용 절감의 효과가 크다<sup>[5]</sup>.

## III. 블레이드리스 풍력발전기

블레이드리스 풍력발전시스템을 위한 발전기는 직선형 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 원통형 리니어 발전기(Cylindrical Linear Generator)를 적용한다. 리니어 발전기는 기존 로터리 방식 모션(Motion)의 단점인 구동 로드와 크랭크 기어 등의 부가적인 마찰, 중량, 부피와 이에 따른 소모성에 의한 효율 감소를 회피할 수 있으며, 기계적인 소모 감소, 크기의 소형화, 무게의 경량화와 셋업을 가능하게 한다<sup>[6]</sup>.

원통형 리니어 발전기는 코일과 영구자석의 위치에 따라 수평형과 수직형으로 나뉜다. 원형 기둥에 코일이 있는 경우 고정자에는 영구자석이 배치되며, 원형 기둥의 코일이 진동하여 영구자석을 기준으로 수평 방향으로 진동하게 된다. 반면에 원형 기둥에 영구자석이 있는 경우 고정자의 코일을 기준으로 영구자석이 수직 방향으로 진동하며 전자기 유도현상을 발생시켜 전기에너지로 변환하게 된다.

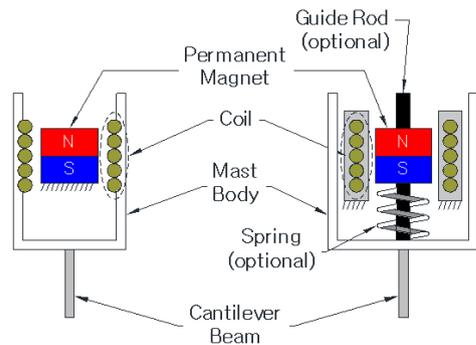


그림 3. 블레이드리스 풍력발전기  
 Fig. 3. Wind Power Generator for Bladeless

그림 3은 블레이드리스 풍력발전시스템을 위한 원통형 리니어 발전기의 한 주기의 개념도이다. 중앙에는 영구자석을 배치하고, 원형 기둥에는 전기를 배치하여 전자기 유도현상에 의해 발전하는 원리이다. 영구자석/코일의 배치와 이동 모션에 따라 수평형 및 수직형 원통형 리니어 발전기로 구분하여 특성을 분석하였다.

### 1. 수평형 발전기

수평형 리니어 발전기의 외측 코일이 진동하는 위치에 따른 변위가 그림 4에 나타내었다. 그림 4(a)는 공진현상이 발생하지 않은 영구자석과 원형 기둥 모두 움직이지 않는 초기 상태의 모델이다. 영구자석을 둘러싸고 있는 원형 기둥이 공기의 흐름에 따라 진동하며, 원형 기둥 내측에 코일이 위치하여 고정자인 영구자석과의 상호유도 작용으로 발전하는 구조이다. 그림 4(b)는 원형 기둥이 우측으로 진동하게 되면 우측 코일은 영구자석과 멀어지게 되며, 좌측 코일은 영구자석을 쇄도하게 되는 구조이다. 이때 영구자석과 코일 사이의 진폭 변화에 따라 전자기유도 법칙에 따라 전기에너지를 생산하는 리니어 발전기의 시스템이다. 그림 5(c)의 경우는 그림 5(b)와 반대로 원형 기둥이 좌측으로 진동하였을 때의 코일과 영구자석의 움직임을 보여주고 있다.

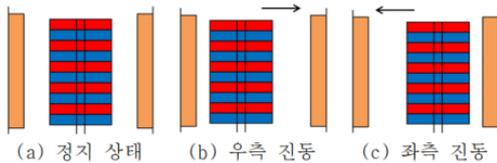


그림 4. 수평형 리니어 발전기  
Fig. 4. Horizontal Linear Generator

### 2. 수직형 발전기

그림 5는 수직형 발전기가 진동하는 위치에 따른 코일과 영구자석의 변위를 나타낸다. 수직형 발전기는 수평형 발전기와 반대로 공진현상에 의해 영구자석이 진동하는 구조이다. 수평형 발전기와 반대로 코일이 위치한 원형 기둥은 고정되어 있으며, 코일과 영구자석의 상호유도 현상에 의해 중앙에 있는 영구자석이 상하 직선 운동을 함으로써 전기에너지를 생산한다. 그림 6(a)은 공진현상이 발생하지 않은 원형 기둥이 정지된 초기 상태의 발전기의 모습을 나타낸다. 그림 5(b)과 (c)는 원형 기둥이 진동하여 움직이게 되면 발생된 기전력이 영구자석에 유도 작용을 발생시켜 상하 직선 운동을 하는 그림을 나타낸다.

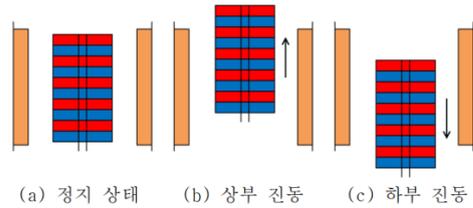


그림 5. 수직형 리니어 발전기  
Fig. 5. Vertical Linear Generator

### 3. 리니어 발전기 모델링

수평형 발전기와 수직형 발전기는 코일과 영구자석을 이용한 전자기 유도현상을 이용하여 전기에너지를 생산한다. 공진현상에 의해 진동하는 코일 또는 영구자석의 변위에 따라 수평형과 수직형 리니어 발전기로 구분하여 각각 코일과 영구자석의 진동에 의한 발전 시스템을 분석하였다. 이를 통해 블레이드리스 풍력발전기 수평형 및 수직형의 특성을 비교·분석하고자 한다. 역학적인 측면에서의 힘 발생은 공기 흐름에 따른 원형 기둥의 속도, 진폭, 코일 또는 영구자석의 중량 등에 따라 다양하게 나타난다.

$$F = \frac{1}{2} \cdot A \cdot [\omega(f)] \cdot M \tag{5}$$

A는 진폭,  $\omega$ 와  $f$ 는 각각 각속도와 주파수, M은 진동하는 코일 또는 영구자석의 중량을 나타낸다.

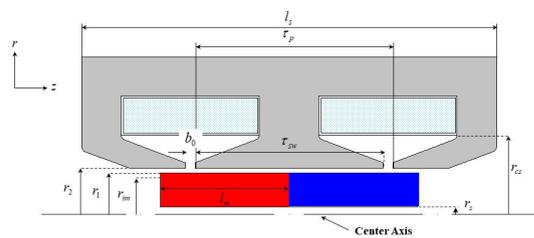


그림 6. 한 주기의 리니어 발전기  
Fig. 6. Linear Generator of One Cycle

블레이드리스 풍력발전시스템을 위한 원통형 리니어 발전기 모델링의 전자기계 분석은 등가자회로망법을 이용한 수학적 방법과 유한요소법을 이용한 수치분석을 통해 설계와 그 타당성을 입증할 수 있다.

$$\theta_a = N_c \cdot I \tag{6}$$

$$\theta_m = \frac{B_r \cdot (r_1 - r_2)}{\mu_0 \cdot \mu_r} \tag{7}$$

$$R_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\delta}{2\pi \cdot (r_2 - r_1) \cdot \tau_{sw}} \quad (8)$$

$$R_m = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \frac{r_1 - r_{im}}{2\pi \cdot (r_1 - r_{im}) \cdot l_m} \quad (9)$$

$\Theta_a$ 와  $\Theta_m$ 은 각각 코일과 영구자석에 의한 기자력을 나타내고,  $R_{\delta}$ 와  $R_m$ 는 각각 공극과 영구자석에 의한 릴럭턴스를 나타낸다. 여기서,  $N_c$ ,  $I$ 와  $B_r$ 은 각각 코일의 턴 수, 전류 및 잔류자속밀도를 의미한다. 최대 및 최소 자기에너지를 이용한 힘과 힘 밀도는 누설 릴럭턴스를 이용하여 구할 수 있다.

$$R_{\sigma 1} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\delta}{2\pi \cdot (r_2 - r_1) \cdot (l_m - \frac{\tau_{sw}}{2})} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\pi}{9} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot (r_2 - r_1)} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{l_m - \frac{\tau_{sw}}{2}}{\delta}\right)} \quad (10)$$

$$R_{\sigma 2} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\delta}{2\pi \cdot (r_2 - r_1) \cdot (r_{im} - r_s)} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot (r_2 - r_1)} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{r_{im} - r_s}{r_1 - r_{im}}\right)} \quad (11)$$

$$P_b = \frac{1}{R_b} \sum \frac{2\pi \cdot (r_{cs} - r_2) dx}{b_0 + \pi \cdot x} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\mu_0 \cdot 2\pi \cdot (r_{cs} - r_2)}{b_0 + \pi \cdot x} dx = \frac{\mu_0 \cdot 2\pi \cdot (r_{cs} - r_2)}{\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot (r_{cs} - r_1)}{b_0}\right) \quad (12)$$

식 (10)부터 (12)는 최대 자기에너지를 나타내는 비정렬 위치에서의 릴럭턴스이다.  $R_{\sigma 1}$ ,  $R_{\sigma 2}$  및  $R_b$ 는 각각 왼편 바깥쪽, 오른편 바깥쪽 및 슬롯 오프닝(Opening)의 누설 릴럭턴스를 나타낸다.

$$R_{\sigma 3} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\delta}{2\pi \cdot (r_2 - r_1) \cdot \left(\frac{l_s}{2} - l_m\right)} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{9}\right) \cdot \frac{1}{2\pi \cdot (r_2 - r_1)} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{r_{im} - r_s}{r_1 - r_{im}}\right)} \quad (13)$$

$$P_{ns} = \frac{1}{R_{ns}} = \sum \frac{\mu \cdot 2\pi \cdot (r_{cs} - r_2) dx}{\lim_{y \rightarrow \infty} \frac{1}{y} + \pi \cdot x} = \int_0^{\delta} \frac{\mu_0 \cdot 2\pi \cdot (r_2 - r_1)}{\lim_{y \rightarrow \infty} \frac{1}{y} + \pi \cdot x} dx = \frac{\mu_0 \cdot 2\pi \cdot (r_2 - r_1)}{\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot \delta}{\lim_{y \rightarrow \infty} \frac{1}{y}}\right) \quad (14)$$

식 (13)과 (14)는 최소 자기에너지를 나타내는 정렬 위치에서의 릴럭턴스이다.  $R_{\sigma 3}$ 와  $R_{ns}$ 는 각각 대칭인 왼편/오른편 누설 릴럭턴스와 N극/S극 중앙의 공극에서 발생하는 누설 릴럭턴스를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\sigma 1} & -R_{\sigma 1} & 0 & 0 & 0 \\ -R_{\sigma 1} & R_{\sigma 1} + R_b & -R_b & 0 & 0 \\ 0 & -R_b & R_b + R_{\sigma} & -R_{\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & -R_{\sigma} & R_{\sigma} + R_{\sigma 2} & -R_{\sigma 2} \\ 0 & 0 & 0 & -R_{\sigma 2} & R_{\sigma 2} + R_m \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Theta_a \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Theta_m \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_6 \\ \phi_7 \\ \phi_8 \\ \phi_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\sigma 2} & -R_{\sigma 2} & 0 & 0 \\ -R_{\sigma 2} & R_{\sigma 2} + R_{ns} & -R_{ns} & 0 \\ 0 & -R_{ns} & R_{ns} + R_{\sigma} & -R_{\sigma} \\ 0 & 0 & -R_{\sigma} & R_{\sigma} + R_m \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Theta_a \\ 0 \\ 0 \\ \Theta_m \end{bmatrix} \quad (16)$$

등가자기회로방법을 이용한 원통형 리니어 발전기의 모델링에서 최대 및 최소 자기에너지 계산을 통한 힘 특성은 각각 식 (15)와 (16)과 같이 자속, 릴럭턴스 및 기자력 상호 간의 행렬식을 통해 표현할 수 있다.

$$\Delta W = W_{\max} - W_{\min} = \left(\frac{1}{2} \cdot \phi^2 \cdot R_{\max}\right) - \left(\frac{1}{2} \cdot \phi^2 \cdot R_{\min}\right) = \frac{1}{2} \cdot [(\phi^2 \cdot R_{\max} - \phi^2 \cdot R_{\min})] \quad (17)$$

$$F_{ave} = \frac{\Delta W}{\tau_p} \quad (18)$$

기하학적 파라미터에 의한 원통형 리니어 발전기의 전자기 힘은 식(18)과 같이 최대와 최소 자기에너지의 차이를 한 주기의 이동 변위로 나눈 값으로 구할 수 있다.

#### IV. 리니어 발전기 수치분석 모델링

수평형과 수직형 발전기의 기하학적 형상을 바탕으로 등가자기회로방법의 수학적 모델링과 유한요소법을 통한 수치분석을 비교 검증하였다. 이동자인 영구자석과 고정자인 전기자 철심은 모두 10극의 원통형 구조이며, 블레이드리스 풍력발전기에서 발생하는 기전력의 크기를 증가시키고자 직렬 연결하였다.

그림 7은 원통형 리니어 발전기의 유한요소분석을 위하여 모델링한 수평형 및 수직형 발전기를 나타낸다. 중앙에는 총 10극의 영구자석이 위치하고, 영구자석은 수직형 발전기에 비해 큰 공극을 두고 10극의 전기자 철심에 단상의 직렬 연결된 코일이 배치되었다. 그림 7(a)는 영구자석이 고정자 코일을 향하여 수평의 방사(Radial) 방향으로 이동하며 수평형 발전기를 나타내고, 그림 7(b)는 이동자인 영구자석의 변위가 수직의 상하 변위로 진동하는 수직형 발전기를 보여주고 있다. 이는 수평형 발전기와 동일한 전기자 철심과 코일 구조와 영구자석의 극 수도 10으로 같으며, 수평형 발전기와 달리 공극의 길이를 짧게 할 수 있어 효율을 증대시킬 수 있다.

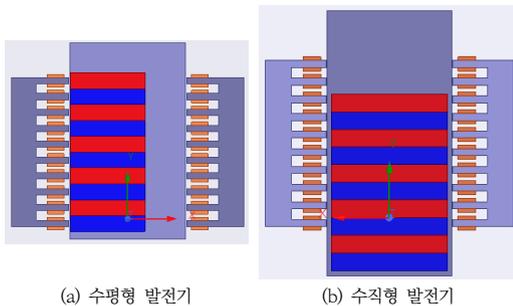


그림 7. 발전기 분석 모델  
Fig. 7. Configuration of Horizontal and Vertical Generator

#### V. 수치분석 결과

본 연구에서 제안한 블레이드리스 풍력발전기를 위한 수평형 및 수직형 리니어 발전기의 전자기 현상을 자속 밀도, 출력 및 이동자인 원형 기둥의 속도에 따른 특성을 고찰한다.

##### 1. 자속 특성

그림 8은 수평형 및 수직형 발전기의 변위에 따른 자속밀도 특성을 나타낸다. 수직형 발전기는 약 1.1[T]의

최대 자속밀도 값을 나타냄으로써, 본 연구에서 적용된 철심(Steel\_1008)의 B-H 특성 곡선에서 포화 전 비례적으로 상승하는 구간에 존재한다. 수평형 발전기의 경우, 최대 자속밀도는 약 1.6[T]으로써 철심의 자기포화 현상을 고려하여 국부적인 포화 현상을 보여준다. 그 결과, 수평형 발전기의 자속밀도가 상대적으로 약 27% 높은 수치를 보여주고 있다. 이는 수직형 발전기가 수평형 발전기에 비해 공극의 짧고, 일정한 간격으로 상하 직선 운동하는 반면, 수평형 발전기는 전기자의 변위가 이동함에 따라 공극이 불균일하여 그에 따른 자속 분포가 비대칭 특성을 나타내기 때문이다.

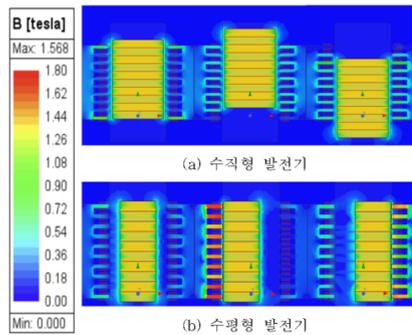
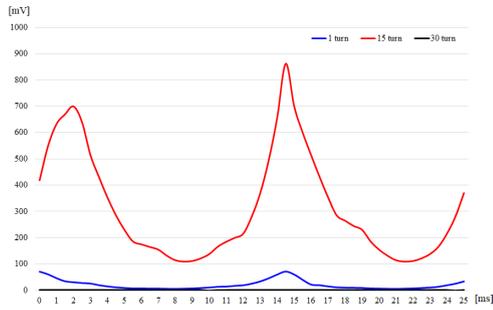


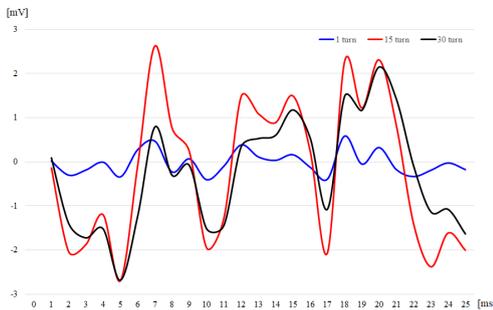
그림 8. 자속밀도 특성  
Fig. 8. Characteristics of Flux Density

##### 2. 유기 기전력 특성

그림 9는 수평형 및 수직형 리니어 발전기의 유기 기전력의 특성을 나타낸다. 리니어 발전기의 전기자코일 턴 수를 각각 1-turn, 15-turn 및 30-turn으로 하였을 때 발생한 기전력의 특성 곡선이다. 수평형 발전기의 경우, 중앙에 고정된 영구자석과 변위하는 전기자코일의 공극이 작을수록 유기된 기전력의 발생이 증가함을 보여준다. 또한, 전기자코일의 턴 수를 1-turn으로 하였을 때 발생한 기전력은 0~80[mV] 범위이고, 15-turn으로 증가하였을 때, 발생된 기전력은 100~850[mV]으로 약 10배 증가한다. 30-turn으로 증가시키면, 자속 포화로 인하여 기전력의 발생은 현저히 감소하여 거의 제로에 가깝게 된다. 수직형 발전기는 전기자코일의 턴 수를 1-turn과 15-turn으로 증가함에 따라 유기 기전력도 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나, 30-turn으로 증가시켰을 때 발생된 기전력은 자기포화 현상으로 인하여 15-turn보다 낮은 특성을 나타낸다. 수직형 발전기는 공극이 일정한 상태에서 영구자석이 상하 수직 이동함에 따라 수평형 발전기보다 발생 기전력이 상대적으로 높다.



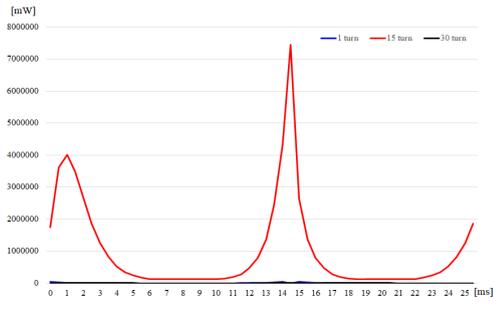
(a) 수평형 발전기의 유기 기전력



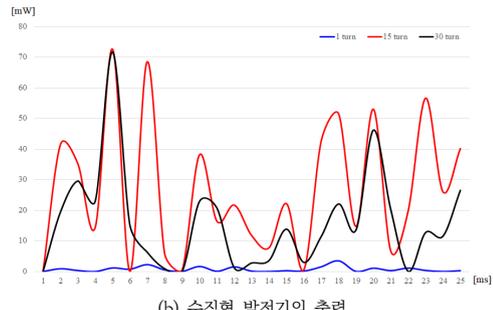
(b) 수직형 발전기의 유기 기전력

그림 9. 유기 기전력 특성  
 Fig. 9. Characteristics of EMF

### 3. 출력 특성



(a) 수평형 발전기의 출력



(b) 수직형 발전기의 출력

그림 10. 출력 특성  
 Fig. 10. Characteristics of Output

리니어 발전기의 출력 특성은 유기 기전력의 출력 파형과 거의 유사한 형태의 특성을 나타낸다. 앞서 기전력 특성에서 살펴본 바와 같이, 그림 10(a)의 수평형 발전기의 15-turn과 비교하면 1-turn과 30-turn에서의 발생된 기전력이 거의 제로이므로 출력 또한 거의 제로이다. 단, 수직형 발전기에서는 출력 특성 곡선이 유기 기전력의 파형과 반대 특성을 보여준다. 즉, 동일한 시간 위치에서의 유기 기전력과 출력 특성 곡선이 반비례의 양상을 보인다. 이는 전류와 유기 기전력 곱의 형태로 표현되는 수식에서 유기 기전력의 출력값은 이와 반대의 특성을 나타내기 때문이다. 수평형과 수직형 발전기의 출력은 동일한 조건에서 수평형 발전기의 출력이 수직형 발전기에 비해 상당히 크음을 알 수 있다.

## VI. 결 론

전 세계적으로 탈(脫)탄소 전략과 정책 일환으로 신재생에너지에 관한 관심과 친환경 에너지 기술에 관한 수요가 급증하고 있다. 특히 풍력 발전은 태양광발전과 함께 기술적·경제적으로 가장 경쟁력 있는 신재생에너지 기술로 주목받고 있다. 종래의 회전형 풍력발전기가 지닌 구조적 단점을 극복하고, 초기 및 유지 보수 비용을 절감하기 위해 블레이드리스의 원통형 수직형 및 수평형 발전기의 특성을 비교·분석하였다. 진동에너지를 발생시키는 원형 기둥의 기하학적 파라미터에 의한 동작 원리를 통해 블레이드리스 풍력 발전의 구조와 시스템을 이해하고, 전자계 이론을 바탕으로 등가자기회로방법에 의한 발전기 설계와 그 타당성을 검증하기 위한 유한요소법을 통한 수치분석은 자속, 유기 기전력과 출력 측면에서 검토하였다. 공극이 균일한 수직형 발전기는 유기 기전력과 출력 특성이 수평형 발전기와 비교하여 대칭적이지만, 수치 측면에서는 수평형 발전기보다 낮은 결과를 나타내었다. 변위 과정의 비선형을 고려한 원통형 리니어 발전기의 설계 및 시뮬레이션은 설계 규칙과 블레이드리스 풍력발전기의 특성을 제공한다.

## References

[1] Hong, Kyungjin, "Development of Operation Control and AC/DC Conversion Integrated Device for DC Power Application of Small Wind Power Generation System", The Journal of the Institute of Internet,

Broadcasting and Communication, Vol. 19, No. 3, pp. 179-184, 2019.

DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.3.179>

- [2] C.C. Feng, "The Measurement of Vortex-Induced Effects in a Flow Past Stationary and Oscillating Circular and D-Section Cylinders," MSc Thesis, University of British Columbia, Vancouver, 1968.
- [3] M. Dehghan Manshadi, M. Ghassemi, S.M. Mousavi, A.H. Mosavi, L. Kovacs, "Predicting the Parameters of Vortex Bladeless Wind Turbine Using Deep Learning Method of Long Short-Term Memory," Energies, Vol. 14, pp. 4867, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/en14164867>
- [4] D.J. Yáñez, "VIV Resonant Wind Generators," 2018.  
<https://vortexbladeless.com>
- [5] Hyun-Su Kim, Sung-In Jeong, "A Study on the Safety by Thermal Characteristics of Tubular Linear Generator for Bladeless Wind Power Generation System", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 19, pp. 1965-1972, 2023.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s42835-023-01726-2>
- [6] Sung In Jeong, "Comparative Study of Linear Oscillating Generators", Cuvillier Verlag, 9783736991170, 2015.

#### 저 자 소 개

##### 민 준 혁(학생회원)



- 광주대학교 IT자동차학과 (공학사)
- 현재 : 한양대학교 전기공학과 (석사 과정)
- 주관심분야 : 차량제어, 전기모터 설계 및 제어

##### 정 성 인(정회원)



- Technical University Braunschweig 전기정보물리공학과 (공학박사)
- 삼성중공업, 삼성전자, 대우일렉트로닉스, 대림자동차 책임연구원
- 현재 : 광주대학교 전기공학과 교수
- 주관심분야 : 전기구동 e-모빌리티 구동 부품 및 시스템

※ 이 연구는 2024년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.