

## 파력발전용 선형발전시스템의 벡터제어

박준성<sup>1,2,\*</sup> · 현병조<sup>1</sup> · 윤준보<sup>2</sup> · 이주<sup>2</sup> · 최장영<sup>3</sup> · 최종수<sup>4</sup> · 홍기용<sup>4</sup><sup>1</sup>전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터<sup>2</sup>한양대학교 전기공학과<sup>3</sup>충남대학교 전기공학과<sup>4</sup>한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소, 해양플랜트연구부

## Vector Control for Wave Power Generation System using Permanent Magnet Linear Synchronous Generator

Joon Sung Park<sup>1,2,\*</sup>, Byong Jo Hyon<sup>1</sup>, Junbo Yun<sup>2</sup>, Ju Lee<sup>2</sup>, Jang-Young Choi<sup>3</sup>,  
Jong-Su Choi<sup>4</sup>, and Keyyong Hong<sup>4</sup><sup>1</sup>Intelligent Mechatronics Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Bucheon 420-733, Korea<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea<sup>3</sup>Department of Electrical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea<sup>4</sup>Offshore Plant Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

## 요 약

파력발전은 파도의 위치에너지와 운동에너지를 이용한 발전방식으로 본 논문에서는 선형동기발전기를 이용한 파력발전시스템에 대하여 연구를 진행하였다. 파력 발전시스템을 분석하기 위해서는 부이의 운동과 부이와 연결과 발전기의 운동을 모델링하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 발전시스템의 분석을 위하여 선형발전기와 컨버터 시스템의 모델링을 진행하였다. 선형발전기와 컨버터 시스템의 전압 방정식 및 부이의 운동방정식을 이용하여 2상 회전좌표계에서의 벡터제어기법을 적용하여 댐핑기반의 제어기 구성을 제안한다. 파도 에너지로부터 전기에너지를 추출하기 위해서 파력발전기의 전류제어를 통해 댐핑을 적절히 조절할 수 있는 벡터제어기법 구성에 대해 제안한다. 최종적으로 제안된 제어기의 검증을 위하여 MATLAB/Simulink를 이용한 2상 회전좌표계에서의 벡터제어기의 시뮬레이션을 수행하였으며 선형 발전기 축소모델과 PCS 축소모델을 통한 실험을 수행하였다.

**Abstract** – This paper describes power generation from sea waves by using linear permanent magnet generator. A buoy is placed on the ocean surface and connected to the generator. The wave energy is carried out from the movement of a buoy. An electrical conversion system is needed between the generator and the grid. For an analysis of the power system, the modeling of the linear generator and converter system was proceeded. This paper proposes vector control method for wave power generation system using linear generator. In order to verify the proposed method, simulation and experiment performed and the results support the validity of the control scheme.

**Keywords:** Permanent Magnet Linear Synchronous Generator(선형동기발전기), Power Conversion System(전력변환장치), Sea Wave Generation(파력발전), Heave Motion(수직운동), Wave Energy Converter(파력발전기)

## 1. 서 론

오늘날 화석에너지의 고갈 및 환경 문제와 맞물려 화석연료를 이용한 발전방식에 대체하기 위한 새로운 발전방식에 대한 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있다. 다양한 에너지자원 중에서 지구의 3/

4를 점유하고 있는 해양은 높은 관심에 비하여 아직까지 개발이 더디게 진행되고 있다. 해양에너지원 중 파도에너지는 에너지 밀도가 큰 에너지 자원으로 바다와 인접한 한국의 경우 반도의 특성으로 해상에서 폭넓게 활용이 가능하다. 이러한 파력발전은 일반적으로 해상풍력 발전과 개발 대상 적지가 일치하여, 해상풍력과 통합하여 활용이 가능하다. 또한 소규모로 개발이 가능하며 방파제로 활용할 수 있어 실용성이 매우 크다(Ivanova *et al.*[2005], Kimoulakis *et*

\*Corresponding author: parkjs@keti.re.kr

al.[2008], Colli *et al.*[2006]). 파력발전의 제어방안에 대하여 많은 연구자들이 제안하였다(Falnes and Budal[1978], Hong *et al.*[2014], Valerio *et al.*[2007]). Hals *et al.*[2011]에서는 8개의 제어기법들을 비교하였고 그 중 래칭 제어기법이 가장 효과적임을 제시하였다. 래칭 제어는 부이의 속도가 낮아질 때 부이를 일정시간동안 구속하고 일정시간 이후 구속을 푸는 제어기법으로 제어적으로 비교적 간단하다. 그러나 구속 시간의 산정이 어려우며, 구속의 방법에 따라 추가적인 구속 장치가 필요하여 래칭제어를 구현하기 어렵다. 구속 시간을 산정하기 위해서는 파도의 움직임을 예측해야하지만 실제 시스템을 구현함에 있어서 causal system으로 구성되므로 정확한 파도의 포스를 예측할 수 없다는 문제로 인해 정확한 구속 시간을 산정하는데 어려움이 따른다. 또한 Valerio *et al.*[2007]에서는 피드백 선형화 방식을 제안하였다. 피드백 선형화 방식은 발전기의 추력을 이용하여 비선형적인 요소를 상쇄하여 제어하는 방식으로 속도와 추력을 동위상으로 제어한다. 하지만 발전기의 응답속도가 제어응답에 비교하여 비교적 느리며, 비선형 성분을 완전히 상쇄할 수 없다. 이와 같이 파력발전에 대한 대부분의 연구내용이 입사파와 공진조건을 이용한 기계적인 제어방식들을 제시하였으며, 이를 전력 변환장치의 제어기 구현에 적용하기에는 어려움이 뒤따른다.

본 논문에서는 선형동기발전기(PMLSG: Permanent Magnet Linear Synchronous Generator)와 전력변환장치의 모델링을 진행하였으며, 보다 단순하고 구현가능한 제어기 설계를 위하여 2상 회전표준계에서의 백터제어기법을 적용한 댐핑기반의 제어기 구성을 제안한다. 부이와 연결된 선형동기발전기의 제어를 통해서 파워를 추출하기 위해 백터제어기법을 활용하여 구성하였다. 2상 회전 표준계에서의 d축, q축 전류 제어를 통해서 선형발전기의 댐핑을 적절히 조절할 수 있으며 이를 통해서 파도의 에너지를 추출할 수 있다. 이러한 제어 기법은 부가적인 기계장치들이 필요하지 않으며, 선형발전기를 직접 제어하므로 빠른 응답성과 높은 효율을 가진다. 최종적으로 제안된 제어기의 검증에 위하여 MATLAB/Simulink를 이용한 2상 회전표준계에서의 백터제어기의 시뮬레이션을 수행하였으며 선형 발전기 축소모델과 PCS 축소모델을 통한 실험을 수행하였다.

## 2. 시스템 구성 및 제어기 설계

### 2.1 선형동기발전기의 모델링

Fig. 1은 선형동기발전기를 이용한 파력발전시스템이다. 부이는 원통형으로 파랑 중 부이의 운동에너지는 부이 상부에 위치한 선형 발전기에 의해 전기에너지로 변환된다. 선형운동방정식은 Cho and Kweon [2011]과 Cho [2015]를 참조하여 가속도, 속도, 그리고 위치에 대한 추력으로 식 (1)과 같이 정의된다.

$$F_{exc} = F_{acc} + F_{vel} + F_{pos} \quad (1)$$

여기서  $F_{acc}$ 는 가속도,  $F_{vel}$ 은 속도, 그리고  $F_{pos}$ 는 위치에 비례하는 추력이다. 식 (1)은 식 (2)와 같이 표현 할 수 있다.

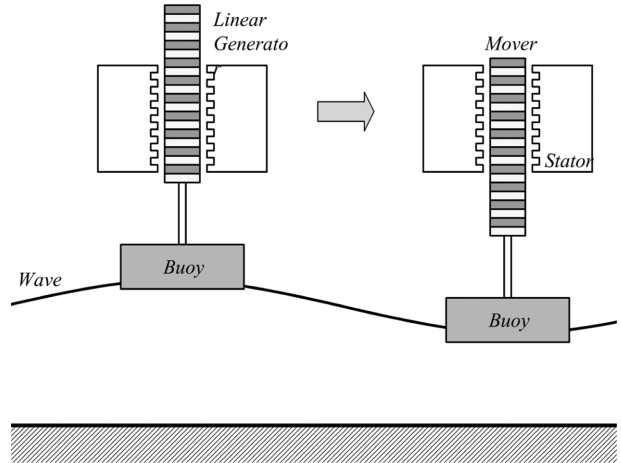


Fig. 1. Wave generator model.

$$F_{exc} = A \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + B \frac{dy(t)}{dt} + Cy(t) \quad (2)$$

여기에서  $y(t)$ 는 부이의 변위이며, A는 부이질량 및 부가질량, B는 점성감쇠계수 및 방사감쇠계수, C는 복원력계수이다. 식 (2)에서 부가질량과 방사감쇠계수는 Cho and Kweon [2011]에서 선형포텐셜이론을 이용하여 고유함수전개법으로 회절과 방사문제를 풀어 도출하였으나, 그 과정이 복잡하게 전개되어 Fig. 2와 같이 파도의 속도를 기반으로하는 전기적인 모델링으로 전개하였다. 선형동기발전기는 역기전력, 인덕턴스 및 저항성분의 시변 계수를 갖는 미분방정식으로 식 (3)-(5)와 같이 표현할 수 있으며, 파워추출장치(PTO: power take-off)는 전압원으로 표현이 가능하다.

$$V_A = e_A + L_s \frac{di_A}{dt} + R_s i_A \quad (3)$$

$$V_B = e_B + L_s \frac{di_B}{dt} + R_s i_B \quad (4)$$

$$V_C = e_C + L_s \frac{di_C}{dt} + R_s i_C \quad (5)$$

Fig. 2는 전압방정식 (3)에 대한 선형동기발전기 및 파워추출장치의 등가회로이다. 여기서  $e_A, e_B, e_C$ 는 역기전력이며,  $L_s$ 는 모터의 상인덕턴스,  $R_s$ 는 모터의 상저항,  $V_A, V_B, V_C$ 는 전력변환장치에서 출력되는 전압이다.

식 (3)-(5)는 시변 계수를 갖는 미분 방정식으로써 해석이 어려워

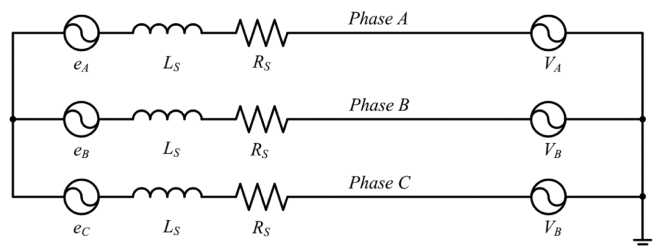


Fig. 2. Equivalent circuit of PMLSG and converter.

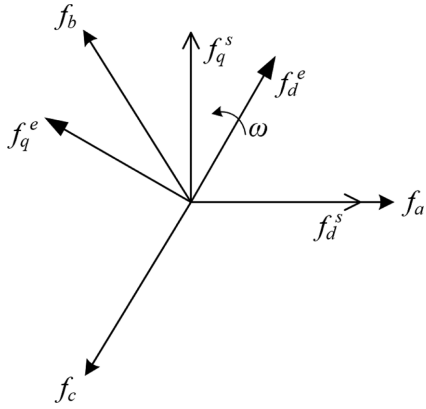


Fig. 3. Transformation from abc to dq frame.

전력변환장치의 제어기 설계가 더욱 까다로워지게 된다. 제어기 설계를 보다 단순하게 하기 위하여 좌표변환 기법을 이용하여 해석을 보다 쉽고 간단하게 하도록 하였다. 이는 시변 미분 방정식인 교류 전동기 모델에 d-q축 변환이라고 하는 좌표 변환 기법을 적용하는 경우 시변 계수가 제거되어 일정한 계수를 갖는 시불변 미분 방정식으로 전환되기 때문이다(Nam [2011]). Fig. 3은 abc 축과 dq 축의 좌표변환을 나타내고 있다. 3상의 좌표축은 정지좌표계 및 임의의 속도  $\omega$ 로 회전하는 동기좌표계 d, q축으로 나타낼 수 있다. 이와 같은 좌표축 변환을 고려하여 3상의 변수를  $\omega$ 로 회전하는 동기좌표계로의 변환은 식 (6), (7)과 같다.

$$X_{dq}^e = T(\theta)X_{abc} = (f_{dqs \rightarrow dqe})(f_{abc \rightarrow dqs})X_{abc} \quad (6)$$

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

식 (7)은 3상의 변수를 정지좌표계 d, q축 변수로 변환 후 다시 동기좌표계로 변환하는 2단계의 과정을 포함하고 있다. 회전하는 동기기기에서의 축변환으로 동기축이 회전자축에 고정되고 축의 회전 속도는 회전자의 회전속도와 일치된다. 그러나 선형 동기기기에서는 동기좌표계가 translator에 고정되고 회전하는 대신 왕복하는 움직임으로 동기되게 된다. 따라서 선형 동기발전기에서의 축변환은 식 (8), (9)와 같이 정리된다.

$$X_{dq}^e = T(\alpha)X_{abc} = (f_{dqs \rightarrow dqe})(f_{abc \rightarrow dqs})X_{abc} \quad \alpha = \frac{2\pi}{\beta}x \quad (8)$$

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\alpha & \cos\left(\alpha - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\alpha + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin\alpha & -\sin\left(\alpha - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\alpha + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

## 2.2 선형동기발전기의 제어기 구성

선형발전기에서의 좌표변환인 식 (8), (9)를 참고하여 abc축의 전압방정식인 식 (3)-(5)를 동기좌표계에서 선형발전기의 전압방정식으로 변환하면 식 (10)-(11)과 같이 표현이 되며 추력은 식 (12)와 같이 표현된다. 여기에서  $v_t$ 는 이동자의 속도,  $\tau_p$ 는 이동자의 극간 거리이다.

$$v_d = -Ri_d - \frac{d}{dt}(L_d i_d - \Psi_{PM}) + v_t \frac{\pi}{\tau_p} L_q i_q \quad (10)$$

$$v_q = -Ri_q - \frac{d}{dt}(L_q i_q) - v_t \frac{\pi}{\tau_p} (L_d i_d - \Psi_{PM}) \quad (11)$$

$$F_{plo} = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau_p} [i_d i_q (L_d - L_q) - \Psi_{PM} i_q] \quad (12)$$

Fig. 4는 본 논문에서 적용하고자하는 선형동기발전기이다. 2m의 고정자 길이와 9m의 전체길이를 가지는 선형발전기이다. 이와 같은 표면부착형 동기발전기의 경우 식 (12)에서  $L_d$ 와  $L_q$ 가 동일하기 때

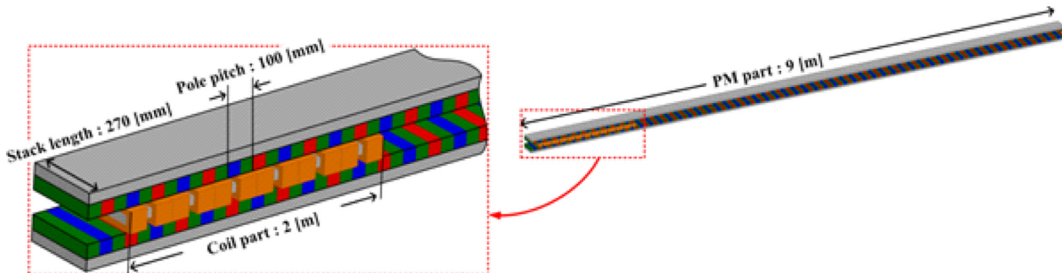


Fig. 4. Structure of linear generator.

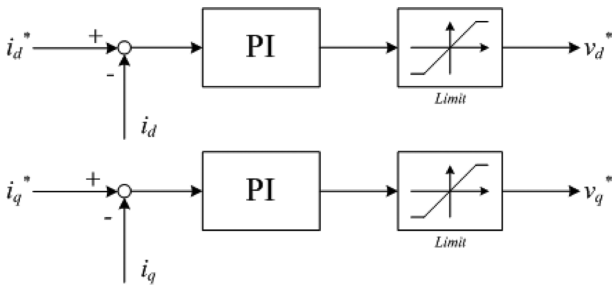


Fig. 5. Current controller.

문에  $(L_d - L_q)$ 항목은 0이되며, 추력은 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{plo} = -\frac{3\pi}{2\tau_p} \Psi_{PM} i_q \quad (13)$$

식 (13)과 같이 선형발전기의 추력과 q상 전류는 비례하므로 d상 전류 및 q상전류 지령치는 식 (14), (15)와 같이 정리할 수 있다.

$$i_d^* = 0 \quad (14)$$

$$i_q^* = -\frac{F}{\frac{3\pi}{2\tau_p} \Psi_{PM}} \quad (15)$$

선형발전기는 식 (14), (15)와 같이 d상 및 q상 전류 지령치를 만들어 추력을 발생한다. 이와 같은 추력을 발생시키기 위해서는 실제 전류가 전류지령치를 추종하도록하는 제어가 필수적이며, Fig. 5와 같이 PI제어를 이용한 전류제어기를 구성하였다.

Fig. 5와 같이 d, q상 전류지령치는 전류센서로부터 얻어지는 실제전류를 이용하여 PI제어기를 구성하였으며, 이를 통하여 d, q상 지령전압이 결정되게 된다. 발생한 d, q상 지령전압은 동기좌표계 상에서의 전압으로써 이를 정지좌표계로 변환하고 변환된 정지 d, q 좌표계는 다시 3상 전압으로 출력되게 된다. 변환된 삼상전압으로 전력변환기의 최종 지령 duty값을 계산하여 게이트드라이브의 게이트신호로 인가하게 된다. 이러한 PWM신호를 이용하여 최종적으로 상전압  $V_a, V_b, V_c$ 가 발생하게 된다. Fig. 6은 이와 같이 구성된 선형발전기 측의 컨버터 블록다이어그램이다. 선형발전기와 전력변환장치 및 제어부로 구성되어 있다. 제어부는 선형발전기의 속도 및 위치를 센서로 측정하여 계산하게 되고 계산된 위치를 이용하여 2상 회전좌표계로 축변환을 하여 3상 전류를 2상전류로 변환한다. 발전기의 포스지령치에 따라서 전류 지령치를 발생시키고 이를 Fig. 5의 전류 제어기로 제어하는 과정을 거치게 된다.

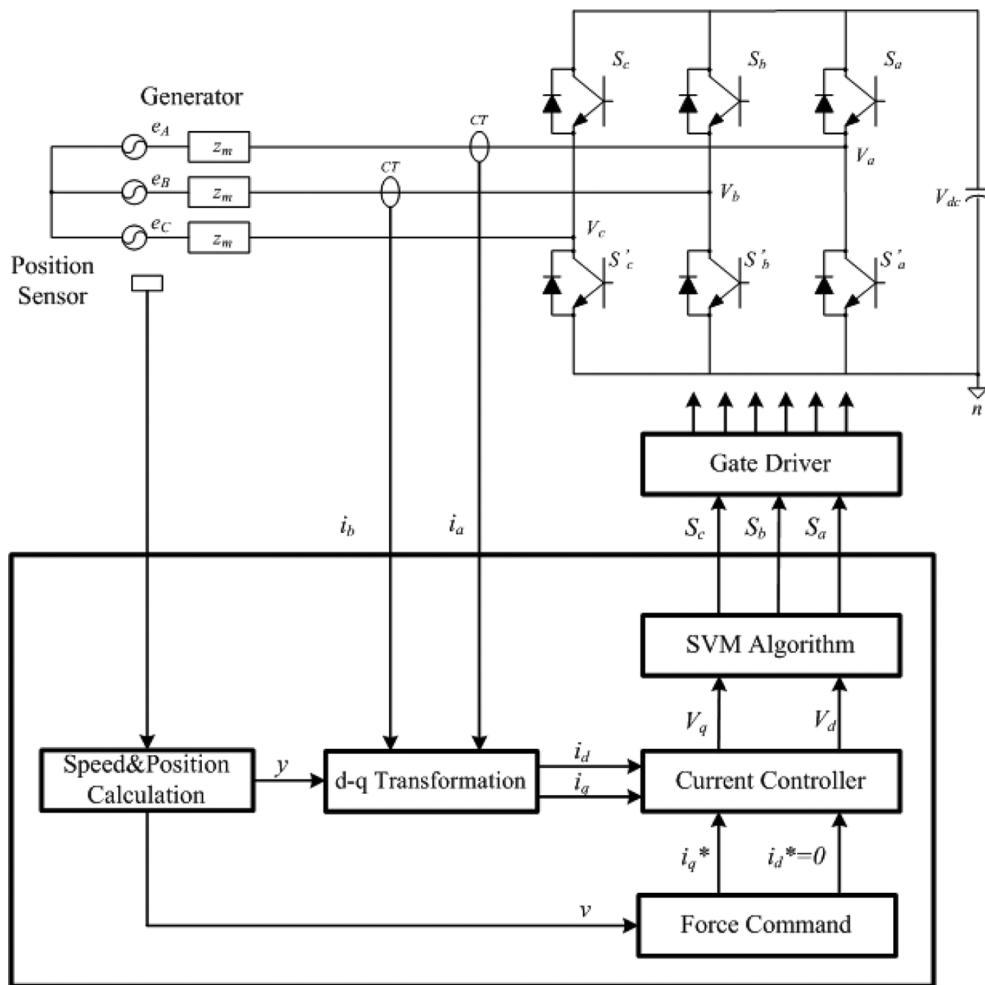


Fig. 6. Control block-diagram.

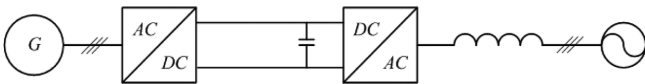
### 3. 시뮬레이션 결과

Table 1은 시뮬레이션에서 사용된 발전기의 주요파라미터이며, Fig. 7은 선형발전기에 대한 운전 구성이다. 선형발전기는 컨버터와 연결되어 있으며 컨버터는 계통과 연결되어 있다. 이 컨버터는 AC/DC 컨버터와 DC/AC 컨버터로 구성되어 있다. 전자는 발전기 제어 컨버터이며 후자는 계통 연계컨버터로 구성되어 있다. 발전기 제어 컨버터는 선형발전기의 백터제어를 담당하여 계통 컨버터는 DC 링크전압 제어 및 계통연계를 담당한다.

파도의 경우 불규칙적인 속도파형이 나올 수 있으며, 속도가 0이

**Table 1.** Specification of linear generator

Parameter	Unit	Specification
Phase resistance	$\Omega$	0.645
Phase inductance	mH	2.8
Back EMF constant	V/m/s	178.74
Pole pitch	m	0.1
Generator length	m	9
Stator length	m	2



**Fig. 7.** Configuration of linear generator operation.

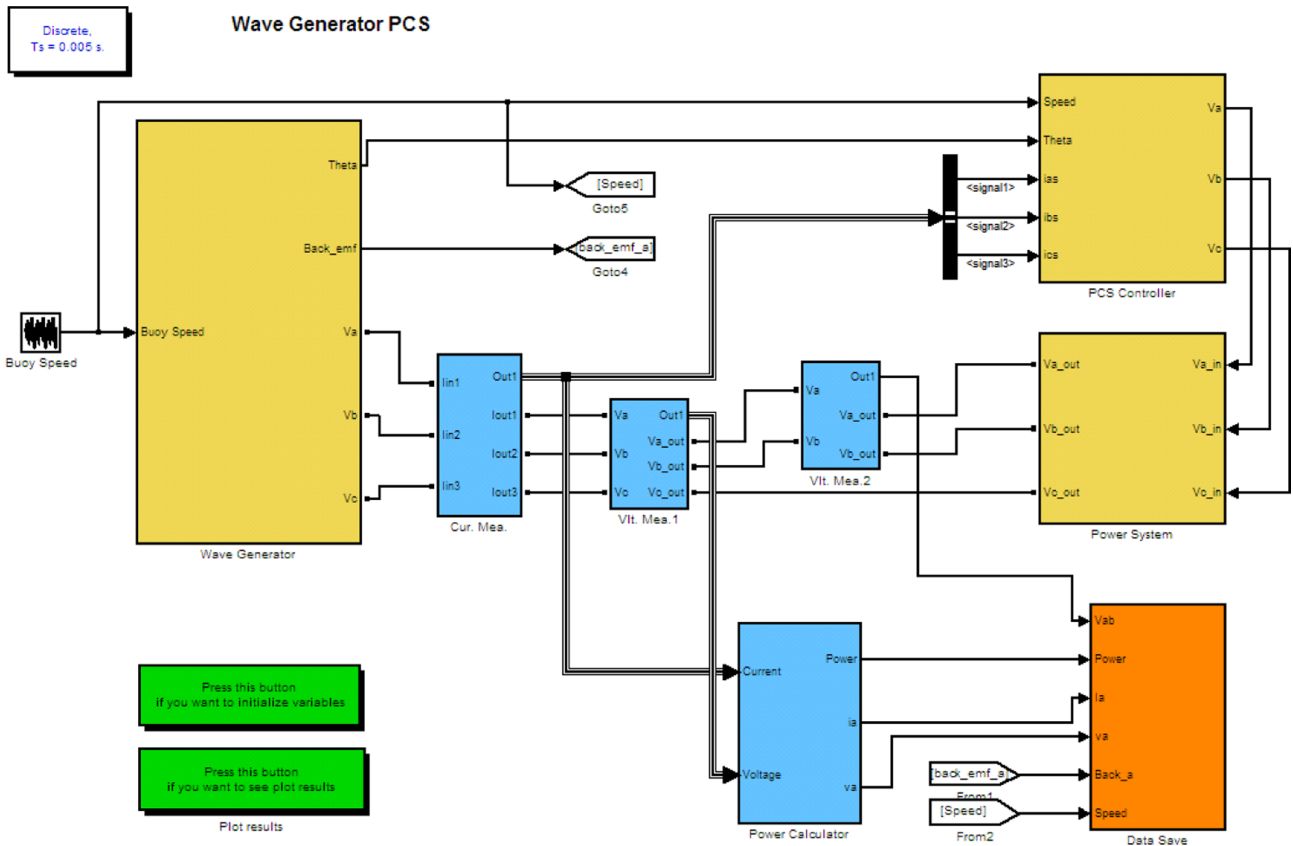
아닌 모든 구간에서 발전이 되므로 발전기의 출력은 파도주파수 2 배의 리플을 가지게 된다. 시뮬레이션은 불규칙적인 파도속도와 규칙적인 최대파도속도에서 진행하였다.

Matlab Simulink를 이용하여 Fig. 8과 같이 발전기 및 전력변환기를 구성하였으며, 불규칙 속도파형과 최대속도파형이 선택적으로 입력되도록 하였다.

Fig. 9(a)는 최대속도에서 출력되는 시뮬레이션 결과이며, Fig. 9 (b)는 불규칙속도에서 출력되는 시뮬레이션 결과이다. 두 결과 모두 발전기 이동자의 속도에 따라 출력이 변화하며, 최대속도 3.8m/s에서 상전류의 최대값은 150A, 상전압의 최대값은 600 V로 전력변환기의 운전영역내에서 원활하게 동작하였다. Fig. 9(c)는 발전기의 상전류와 상전압 파형이며, 본 논문에서 제안한 d축을 0으로 제어하고 q 축으로 추력을 발생하도록 하여 상전류와 상전압이 동위상으로 출력됨을 확인할 수 있다.

### 4. 실험 결과

앞서 구성된 발전기 측의 제어기를 이용하여 시험을 진행할 경우 지속적인 발전에 따라 직류링크커패시터가 충전되게 된다. 직류링크 커패시터에 충전된 전력은 소비하거나 계통 측에 송전하지 않을 경우 커패시터의 한계전압을 초과하게 되는 상황이 발생한다. 이를 방지하고 발전, 충전된 전력을 계통에 연계하기 위해 계통 컨버터를



**Fig. 8.** Simulation block-diagram.

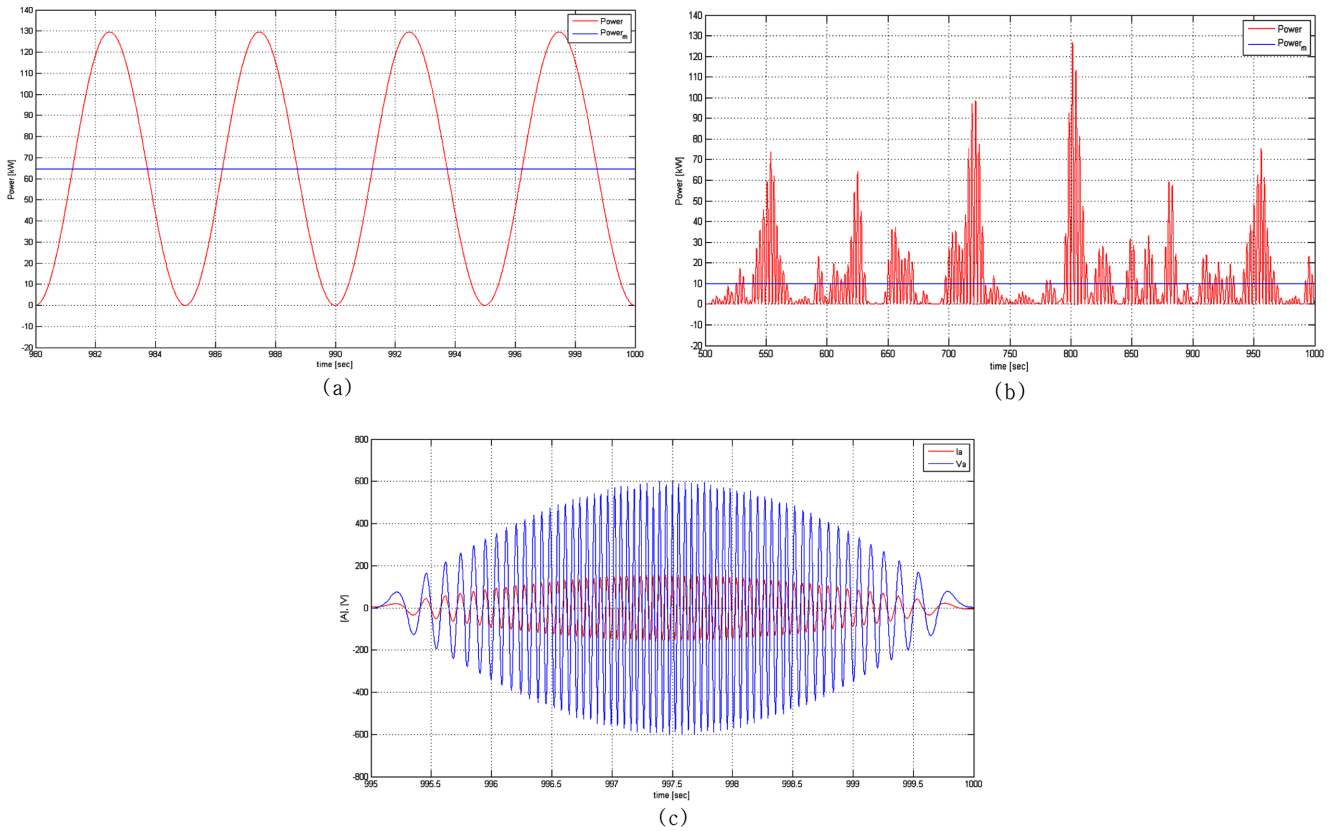


Fig. 9. Simulation results (a) output power at regular maximum buoy speed, (b) output power at irregular buoy speed (c) phase current and phase voltage.

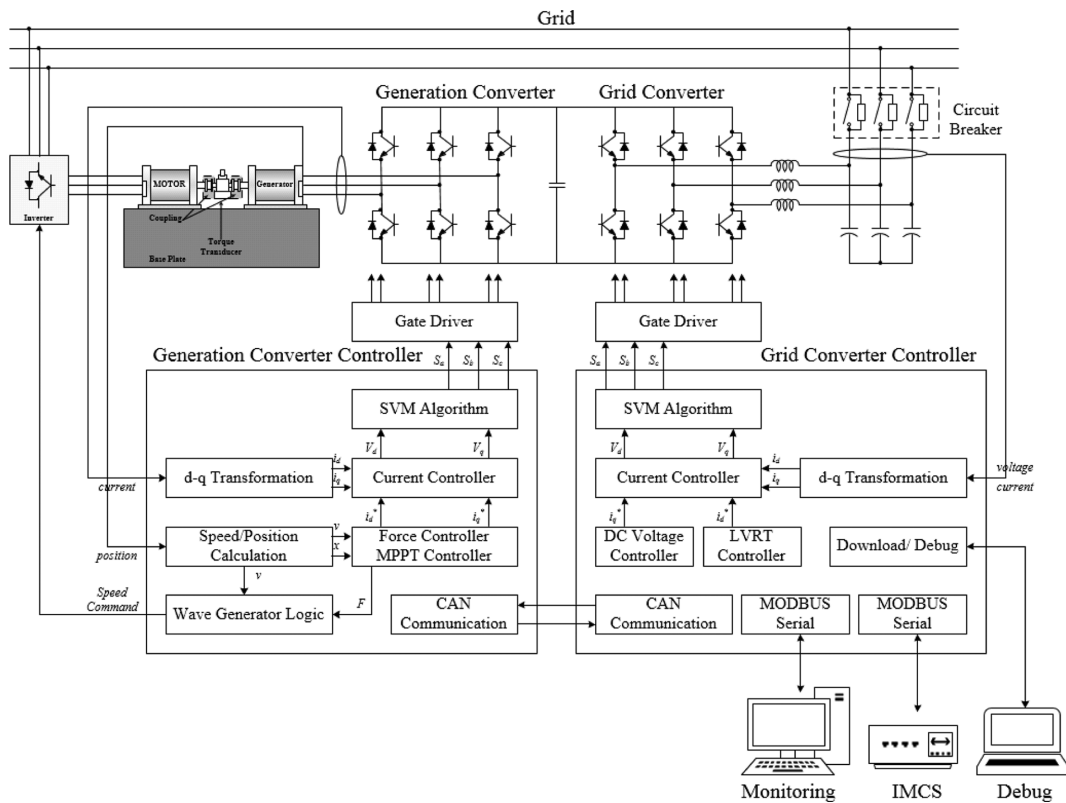


Fig. 10. Configuration of Generation and Grid Converter.

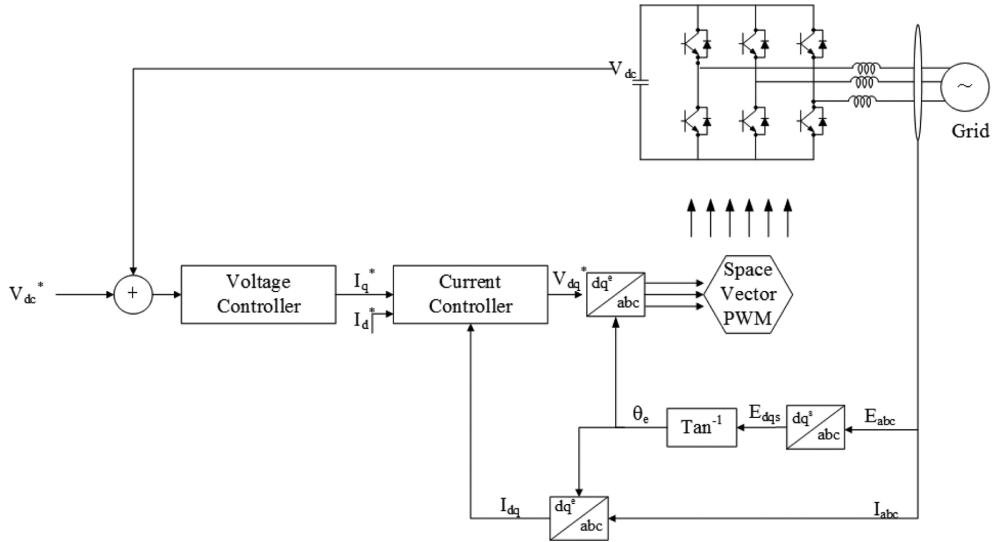


Fig. 11. Block diagram of DC voltage control.



Fig. 12. Experimental Set up.

이용한다. 아래 Fig. 10은 앞서 구성된 발전기 측 제어기와 계통측 제어기의 구성도를 나타낸다. Fig. 10은 계통 컨버터 및 발전기 컨버터, 라인필터, 발전기-모터 세트 및 제어부에 대해 나타내고 있다. 발전기 컨버터는 발전기의 벡터제어를 담당하고 있으며 발전기의 위치를 센서를 통해 측정하여 2상 회전좌표계로 축변환을 수행한다. 이를 통해 3상 전류를 d,q축 전류로 변환하여 포지셔닝에 맞추어 전류제어를 수행하고 이에따른 PWM신호를 생성하여 발전기컨버터의 스위칭소자에 인가되어 상전압을 형성하여 발전기를 제어한다. 계통 컨버터는 DC 링크 전압을 일정하게 제어하며 계통 연계를 위한 상전압의 주파수 및 크기를 제어한다.

계통 측 제어기의 제어 블록도는 아래 Fig. 11과 같다. 직류링크 전압을 모니터링하여 직류링크전압의 지령값으로 수렴하도록 전압 제어기를 통해 제어되며 전류제어기의 q상 전류 지령값으로 출력된다. 전류 제어기 및 적절한 위상제어를 위해서 계통 상전압을 측정하여 위상 제어기를 구성하였다. 전류제어기를 거쳐 공간벡터 PWM 방식으로 스위칭 신호를 생성하여 계통 컨버터의 스위치 6개에 인가하며 이를 통해 AC 전압으로 변환되어 계통으로 연계된다.

Table 2. Specification of linear generator proto type

Parameter	Unit	Value
Generator length	mm	1600
Displacement	mm	± 400
Velocity	m/s	1.6
Stator length	mm	2400
Number of poles	pole	40
PM flux density	T	1.3
Pole pitch	mm	40
Phase resistor	Ω	0.3
Phase inductance	mH	0.37

계통 컨버터를 이용하여 앞서 구성한 선형발전기의 벡터제어를 검증하기 위한 실험세트를 아래 그림과 같이 구성하였다. 선형발전기 축소모델과 이를 구동하는 부하용 선형전동기, 선형발전기 축소모델을 제어하는 전력변환장치 및 측정장비 등으로 구성되었다.

선형발전기 축소모델의 주요 사양은 아래 표와 같다. 전력변환장치 축소모델은 TI사의 TMS320F28335 MCU를 사용하였으며 스위

칭 주파수는 5[kHz]로 설정하였다. 발전기의 출력 파워 및 상전류, 상전압은 오실로스코프를 이용하여 측정하였다.

아래 Fig. 13은 선형발전기 축소모델을 0.5 m/s 속도의 규칙파로 구동 시, q축 전류로 부하를 조절하여 파워를 추출할때 상전압, 상전류의 측정 파형이다. 위 파형은 상전압을 나타내고 아래는 상전류를 나타낸다.

Fig. 14는 선형발전기 축소모델을 0.5 m/s 속도의 규칙파로 구동 시 파워를 추출했을 때의 파형이다. Fig. 14(a)는 선형발전기의 속도(m/s)와 3상 상전류를 나타내고, (b)는 발전되는 파워와 3상 상전류를 나타낸다.

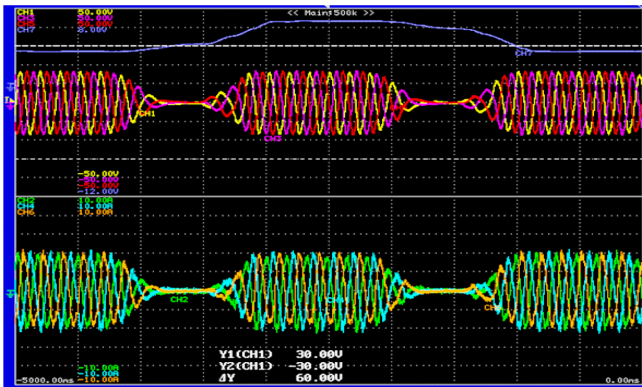
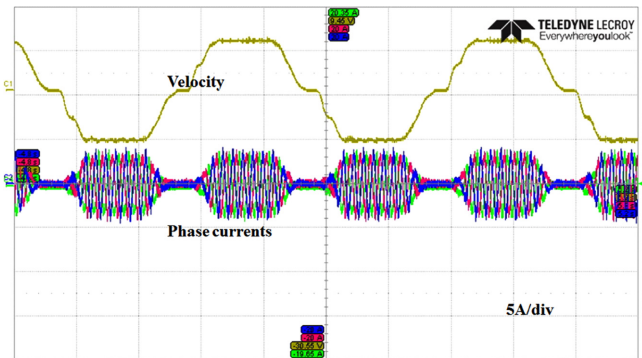
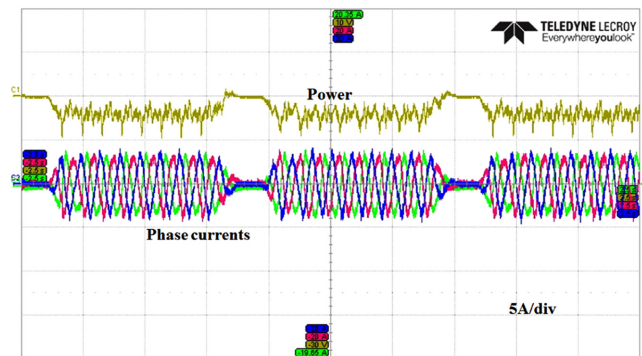


Fig. 13. Experimental Results at  $v=0.5$  [m/s] (Phase currents and voltages).



(a)



(b)

Fig. 14. Experimental Results at  $v=0.5$  [m/s]. (a) velocity, phase currents, (b) power, phase currents.

류를 나타낸다. 벡터 제어를 통해서 약 300 W의 파워를 추출하고 있음을 확인 할 수 있다. 추출된 파워는 계통 컨버터를 통해 계통측으로 전송된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 선형동기발전기(PMLSG: Permanent Magnet Linear Synchronous Generator)와 전력변환장치의 모델링을 통해 2상 회전좌표계에서의 벡터제어기법을 적용한 댐핑기반의 제어를 제안하였다. 2상 회전좌표계에서는 3상전류 대신 dq 전류를 통해 선형발전기를 제어할 수 있다. 선형 발전기의 추력에 연관된 전류는 q축 전류이므로 q축 전류를 제어하여 선형발전기의 부하를 조절하여 전력을 추출해 낼 수 있다. 선형동기발전기와 전력변환장치의 모델을 이용하여 시뮬레이션을 통해 제어기를 구성하였고 q축 전류 제어를 통해 발전량을 조절 할 수 있음을 확인 하였다. 또한 선형발전기 및 전력변환장치의 축소모델을 이용하여 실험을 통해 파력 발전 시스템의 벡터제어에 대해 검증하였다. 추후 고속영역 및 불규칙 파에 대해서도 벡터제어를 통한 파워 추출에 대해 실험 및 검증을 진행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 “10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 개발 및 인프라 구축”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- [1] Cho, I.H., 2015, “Latching Control Technology for Improvement of Extracted Power from Wave Energy Converter”, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, Vol. 18, No. 4, 282-290.
- [2] Cho, I.H. and Kweon, H.M., 2011, “Extraction of Wave Energy Using the Coupled Heaving Motion of a Circular Cylinder and Linear Electric Generator”, J. Ocean Eng. Technol., Vol. 25, No. 6, 9-16.
- [3] Colli, V.D., Cancelliere, P., Marignetti, F., Stefano, R.D. and Scarano M., 2006, “A Tubular-Generator Drive for Wave Energy Generation”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 53, No. 4, 1152-1159.
- [4] Falnes, J. and Budal, K., 1978, “Wave-power Conversion by Power Absorbers”, Norwegian Maritime Research, Vol. 6, 2-11.
- [5] Hals, J., Falnes, J. and Moan, T., 2011, “A Comparison of Selected Strategies for Adaptive Control of Wave Energy Converters”, J. Offshore Mech. Arct. Eng., Vol. 133, 1-12.
- [6] Hong, Y., Waters, R., Bostrom, C., Eriksson, M., Engstrom, J. and Leijon, M., 2014, “Review on Electrical Control Strategies for Wave Energy Converting Systems”, Renewable Sustainable Energy Rev., Vol. 31, 329-342.



- [7] Ivanova, I.A., Ågren, O., Bernhoff, H. and Leijon, M., 2005, "Simulation of Wave-Energy Converter with Octagonal Linear Generator", IEEE J. Ocean. Eng., Vol. 30, No. 3, 619-629.
- [8] Kimoulakis, N., Kladas, A. and Tegopoulos, J., 2008, "Power Generation Optimization From Sea Waves by Using a Permanent Magnet Linear Generator Drive", IEEE Trans. Magn., Vol. 44, 1530-1533.
- [9] Nam, K.H., 2010, "AC Motor Control and Electric Vehicle Applications", CRC Press.
- [10] Valerio, D., Beirao, P. and Costa, J.S., 2007, "Reactive control and phase and amplitude control applied to the Archimedes Wave Swing", The 17th International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- [11] Valerio, D., Beirao, D. and Costa, J.S., 2007, "Optimization of Wave Energy Extraction with the Archimedes Wave Swing", J. Ocean Eng., Vol. 34, 2330-2344.

---

Received 15 January 2016

1st Revised 8 March 2016, 2nd Revised 7 April 2016

Accepted 4 May 2016