

Halbach 영구자석 배열의 공심형 선형발전기의 설계 및 특성 해석

정수권, 한광규, 안호진, 장기봉, 김규탁
 창원대학교 전기공학과

Design and Characteristic Analysis of Slotless-type Linear Generator with Halbach Array

Su-Kwon Jeong, Kwang-Gyu Han, Ho-Jin Ahn, Ki-Bong Jang, Gyu-Tak Kim
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract - Wave power generation as an environmentally friendly energy has received the attention. In this paper, therefore, the tubular type Permanent Magnet Linear Synchronous Generator (PMLSG) is proposed for wave power generation. The characteristics of tubular type PMLSG are investigated by analysis using a Finite Element Analysis (FEA). Moreover, the operating performance of generator under no-load and load with variable resistance is examined. And Taguchi method is applied for considering tolerance in manufacture. The results of FEA show that proposed tubular type PMLSG is a useful solution for small-scale wave power generation.

1. 서 론

최근 급격한 산업의 고도화로 에너지 수요가 급증함에 따라 한정된 에너지 자원 부족으로 석유 등 화석 연료의 가격이 폭등하고, 화석 연료의 과다한 사용으로 지구 온난화 등 전 세계적으로 많은 환경적인 문제가 대두되고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위한 신재생 에너지 개발에 대한 관심이 고조 되고 있는 가운데 특히 파력 발전은 친 환경적인 에너지로서 각광 받고 있다. 그러나 종래의 회전형 발전기를 이용한 공기터빈 방식의 파력발전은 파력을 회전 운동으로 변환하는 기계적인 메카니즘을 필요로 하기 때문에 전체 시스템이 비대하여 경제적인 면에서 많은 문제점이 있고, 비효율적이다. 따라서 직선 왕복운동을 하는 파력을 직접적으로 이용할 수 있는 선형발전기에 대한 필요성이 증가하고 있다.

한편, 선형발전기는 선형전동기와 구조적으로 동일하지만 발전기로 구동되기 때문에 몇 가지 고려사항이 존재한다. 먼저 작은 파력에도 가동자의 용이한 운동성 확보를 위해 Detent-force 및 수직력등의 운동성 저해 요인을 최소화해야 하고, 실제 발전 시스템에 적용시의 기구적 안정성 확보도 간과할 수 없다.

따라서 본 논문에서는 고정자의 형상에 따른 특성을 FEA를 통해 분석하고, 극 간격과 출력 및 Loss와의 관계를 검토하여 구조적으로 Detent-force 및 수직력이 발생하지 않는 Slotless type 원통형 선형발전기를 설계하였다. 또한, 선형 발전기의 부하가변에 따른 운전특성의 효과적인 분석을 위해 무부하 및 가변부하 조건하에서 특성해석을 수행하였다. 저항(R) 부하를 가변시켜 수행한 운전특성 해석에서 부하의 증가에 따른 전압 및 전류 특성과 각 부하 시 요구되는 기계적인 입력을 구하여 효율을 정의하였다. 더욱이 가동자의 소프트 직경을 감소시키는 것이 불가피하여 직경 감소에 따른 한 코일에서의 유기 전압 감소가 예상되므로 이를 보상하기 위해 실험 계획법과 유한요소법을 이용하였다. 가동자는 자속의 집중을 위해 축 방향으로 자화된 자석사이에 코어를 삽입한 halbach 배열을 이용하였다.

2. 원통형 선형발전기의 형상설계

2.1 원통형 발전기의 구조

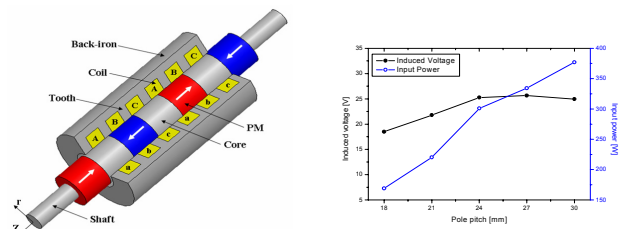
그림 1은 일반적인 원통형 선형 발전기의 단면도를 나타낸 것이다. 평판형 발전기와 비교하여 원통형 선형 발전기는 Ring 형태의 권선을 사용하므로 유효자속과는 무관한 end-turn이 없기 때문에 상대적으로 효율이 높다. 또한 가동자의 운동에 방해 요인으로 작용하는 수직력이 구조적으로 발생하지 않고, 원통형이므로 리니어 가이드와 같은 기계적 장치가 필요하지 않아 손실을 최소화 할 수 있다. 원통형 발전기에서 권선을 가동자 측에 할 경우 권선 연결을 위한 부가적인 지지 구조 등이 필요하기 때문에 본 논문에서는 고정자 측에 3상 집중권을 시행하였다. 가동자는 자속의 집중을 위해 축 방향으로 자화된 자석사이에 코어를 삽입한 halbach 배열을 이용하였다.

파력발전을 위한 선형발전기에는 저속의 파력에서도 유기전압이 발생

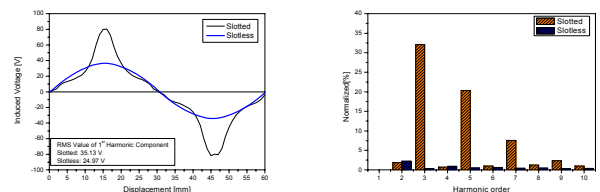
하도록 하기 위해서 작은 극 간격이 유리하다. 그러나 극 간격이 작으면 동시에 주파수가 증가하고 이렇게 되면 철손도 증가하여 효율이 떨어진다. 따라서 극 간격에 따른 특성해석이 매우 중요한 부분이다. 그림 2는 극 간격에 따른 무 부하 시 발생 유기 전압의 실효치와 정격 부하 시 가동자를 1m/s의 속도로 움직이기 위해 요구되는 최소한의 기계적인 입력력을 나타낸다. 극 간격 24mm 모델에서 출력은 설계치와 동일하고 정격 부하 시 가동자를 움직이기 위해 요구되는 입력은 감소함을 알 수 있다.

그림 3, 4는 고정자 형상에 따른 유기 전압 파형과 유기전압의 고조파 분석 결과를 나타낸다. 두 전압파형의 기본과 성분의 실효치를 비교해 보면, 슬롯형은 35.13V, 슬롯리스형은 24.97V로 슬롯형의 경우에 약 10V 정도 크게 발생한다. 그러나 치-슬롯 형상에 의한 3,5,7고조파와 치부분의 포화의 영향으로 전압파형이 많이 왜곡된 형태를 나타낸다.

표 1은 본 연구에서 설계된 원통형 선형발전기의 주요 사양을 나타낸다.



〈그림 1〉 원통형 선형발전기 〈그림 2〉 극 간격에 따른 전압 및 입력



〈그림 3〉 고정자 형상에 따른 유기전압 〈그림 4〉 고조파 분석

〈표 1〉 설계 사양

항목	값[단위]	항목	값[단위]
극수	4	상 전압	35 [V]
전류자속밀도	1.37 [T]	정격 전류	2 [A]
공극길이	1 [mm]	슬롯당 턴수	164

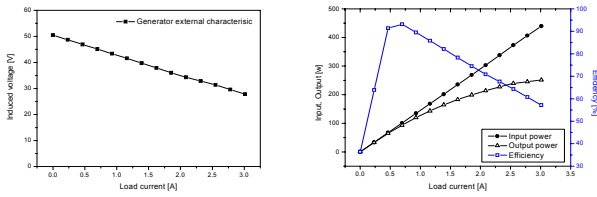
2.2 부하 가변에 따른 운전 특성

본 논문에서 해석 모델의 주요사양은 3상, 200w급이고 원통형 선형발전기의 부하가변에 따른 운전특성의 정확한 분석을 위하여 무 부하 및 가변 부하 조건하에서 FEM을 통해 특성 해석하였다. 무 부하 시에는 유기되는 전압을 구하기 위해 외부회로에 초기저항을 크게 하여 부하양단에 걸리는 전압을 구하였고, 부하특성은 저항부하를 인가하여 해석을 수행하였다.

그림 12는 저항부하에서 부하증가에 따른 유기 전압 특성을 나타낸 것으로서, 저 출력에서 유기전압이 많이 나타났으며, 정격 부하가 인가됨에 따라 설계치 전압과 거의 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

그림 13는 저항 부하에 대하여 부하 증가에 따른 입-출력 및 효율 특성을 나타낸 것이다. 외부회로의 저항부하를 가변 하여 저항에 흐르는 전류의 변화로 출력을 구한 것으로, 부하전류의 변화에 따른 발전기의

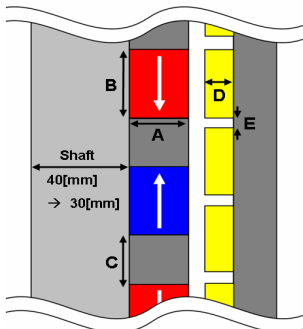
출력 특성을 의미하며 정격전류 2A에서 정격 출력 200W가 됨을 확인할 수 있다. 또한 가변 부하전류에서 발전기의 기계적인 입력을 구하여 출력과 비교함으로써 발전기의 자체의 효율을 정의하였다.



〈그림 5〉 부하전류에 따른 유기 전압, 입력, 출력 및 효율

2.3 Taguchi method를 이용한 발전기의 설계

본 연구에서는 발전기와 가동자 구동부의 결합을 위해 가동자의 샤프트의 직경을 줄이는 것이 불가피하다. 이렇게 되면 영구 자석의 크기가 감소하여 발생 유기 전압의 감소가 예상된다. 또한 소형 발전기이므로 작은 치수 변화에도 민감할 것으로 사료되어 제작 시 가공 오차를 고려하기 위해 실험 계획법중 Taguchi method를 이용하였다. 이는 제어할 수 없는 인자는 잡음인자로 두고, 제어 가능한 요소를 조절하여 신호 대 잡음비를 통해 노이즈에 강한 인자를 설계할 수 있게 한다. 먼저, 목적 함수는 유기전압의 최대화로 두고 잡음 인자는 3수준으로 가공오차를 고려하였다. 설계 변수는 유기전압과 관련된 5가지를 모두 4수준으로 선정하였고, 그림 6과 표 2에 이를 나타내었다.



〈그림 6〉 발전기의 설계 변수

〈표 2〉 설계 변수와 노이즈 선정 치수

구분	파라미터 [단위]	변수			
		Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
설계변수	A PM 높이 [mm]	10	11	12	13
	B PM 폭 [mm]	16	17	18	19
	C 코어 폭 [mm]	6	7	8	9
	D 코일 높이 [mm]	4	4.5	5	5.5
	E 코일 간격 [mm]	1	2	3	4

잡음 인자	Level 1	Level 2	Level 3
노이즈 가공오차 [mm]	-0.1	0	0.1

표 3은 직교 배열법에 의한 실험 순서를 나타낸 것이다. 각 공차별로 실험 순서에 따른 실험은 FEA를 통해 수행하였다. 발생 유기 전압은 잡음에 대하여 좋은 성능을 나타내는 것이 중요하므로, 신호 대 잡음비는 식과 같은 망대특성을 사용하였다.

$$S/N = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (1)$$

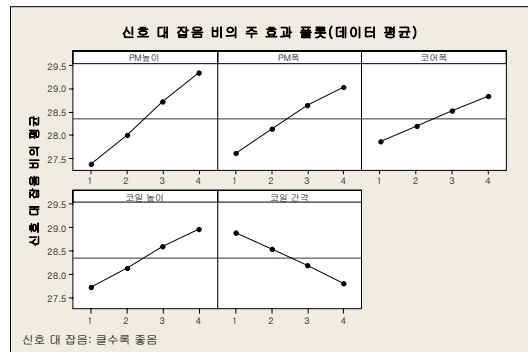
그림 7은 S/N의 주 효과를 나타낸 것이다. 결과를 확인해 보면 유기 전압에 가장 큰 영향을 미치는 인자로는 설계변수 A와 D정도로 볼 수 있다. A와 D는 PM높이와 코일 높이인데, PM높이가 크면 코일과 쇠코어는 자속이 증가하여 유기전압이 증가하고, 코일높이가 크면 턴수를 더 많이 감을 수 있으므로 발생 유기 전압이 증가할 것으로 사료된다.

이러한 결과를 바탕으로 유기 전압이 최대 인 값은 S/N비가 최대인 값을 선택함으로써 최적의 해를 얻을 수 있다. 노이즈에 대하여 강한 인자를 선정하면 A4B4C4D4E1의 조합을 획득하였다. 이 조합을 이용하여

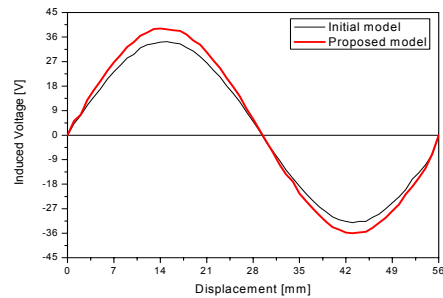
샤프트 직경이 30[mm]인 모델을 재 해석하여 기존의 모델과 비교해 보면 한 코일에서의 실효치가 23.48[V]에서 26.55[V]로 증가하여 설계치 전압에 상응함을 나타내었다.

〈표 3〉 직교배열법에 의한 실험 순서

	PM높이	PM폭	코어폭	코일높이	코일간격
실험 1	1	1	1	1	1
실험 2	1	2	2	2	2
실험 3	1	3	3	3	3
실험 4	1	4	4	4	4
실험 5	2	1	2	3	4
실험 6	2	2	1	4	3
실험 7	2	3	4	1	2
실험 8	2	3	4	2	1
실험 9	3	1	3	4	2
실험 10	3	2	4	3	1
실험 11	3	3	1	2	4
실험 12	3	4	2	1	3
실험 13	4	1	4	2	3
실험 14	4	2	3	1	4
실험 15	4	3	2	4	1
실험 16	4	4	1	3	2



〈그림 7〉 설계 인자의 주 효과



〈그림 8〉 유기 전압의 비교

3. 결 론

본 연구에서는 친환경 에너지인 파력을 이용한 발전 시스템에 효과적으로 적용될 것으로 예상되는 원통형 선형발전기의 설계 방안을 제안하였다. 고정자의 형상 및 극 간격에 따른 특성해석을 통하여 파력 발전에 적합한 설계를 하였고, 부하가변에 따른 운전 특성을 검토하였다. 또한, 가동자의 구조 변화에 효과적으로 대응하기 위해 FEA와 Taguchi method를 이용하였고, 설계된 모델과 기존모델을 비교하여 타당성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Polinder, H. et'al Mecrow, B.C. Jack, A.G. Dickinson, P.G. Mueller, M.A., "Conventional and TFPM linear generators for direct-drive wave energy conversion", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 20, No. 2, pp. 260-267, 2005.