

양측식 선형발전기의 부하 가변에 따른 특성 고찰

정수권, 이동엽, 장기봉, 김규탁
 창원대학교 전기공학과

Characteristic Analysis of Double-sided Linear Synchronous Generator
 with Variable Load

Jeong Su-Kwon, Lee Dong-Yeup, Jang Ki-Bong, Kim Gyu-Tak
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract - This paper presents the characteristic analysis of Double-Sided Linear Synchronous Generator for wave power generation under different operating conditions. FEM is applied to analyze performance of generator at no-load and load with variable resistance. Moreover, the validity of characteristic analysis is confirmed through the experimental work.

는 이러한 저해요인이 원천적으로 발생하지 않는 공심형 양측식 선형발전기를 제안하였고, FEM을 이용하여 특성 해석을 수행하였다.

1. 서 론

2.2 양측식 선형발전기 사양

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 친환경적인 에너지로서 각광 받고 있다. 그러나 종래의 회전형 발전기를 이용한 공기 터빈 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[1-2].

그림 1은 본 연구에서 제안된 양측식 선형발전기를 도식적으로 나타내고 있다. 양 측면에 영구자석으로 구성된 고정자 사이에 가동자가 위치한 구조이다. 영구자석은 상대적으로 에너지 밀도가 높고 온도특성이 좋은 NdFeB계열을 사용하여 영구자석형 발전기의 이점을 극대화 하였고, 고정자 코어는 SS41로 가공하였다. 가동자는 3상 집중권으로 권선한 코일로 병렬 결선되어 있다. 코일 수는 총 9개이지만 그림 1에서처럼 3개의 코일만 모델링하여 특성해석을 수행하였다. 최대 전류 밀도는 6.21[A/mm²]이고 공심형 구조를 가지므로 에폭시 몰딩 처리를 하여 코일을 지지하였다.

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.

표 1은 본 연구에서 제안된 양측식 선형발전기의 주요 사양을 나타내고 있다.

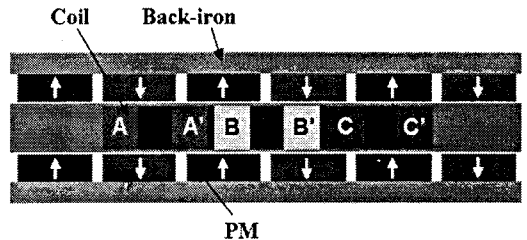


그림 1. 양측식 선형발전기

표 1. 양측식 선형발전기의 사양

따라서 본 논문에서는 구조적으로 Detent-force 및 수직력이 발생하지 않는 공심형 양측식 선형발전기를 제안하였다. 또한 저항(R) 부하 가변에 따른 특성의 효과적인 분석을 위해 무부하 및 가변부하 조건하에서 유효요소 해석을 수행 하였고, 시작기를 이용한 실험을 통해 부하가변에 따른 전압 및 전류 파형을 측정하여 해석결과와 비교함으로써 본 연구의 타당성을 검토하였다.

	항목	값 [단위]
고정자 (Secondary)	영구자석 폭	26.5 [mm]
	영구자석 길이	95 [mm]
	영구자석 두께	9 [mm]
	극 간격	30 [mm]
	전류 자속밀도	1.32 [T]
가동자 (Primary)	코일 폭	12.7 [mm]
	코일 높이	14.6 [mm]
	코일 간격	40 [mm]
코일당 턴수		342 [턴]
역기전력 상수		15 [V/m/s]
상 전류		7.2 [A]
최대 전류 밀도		6.21 [A/mm ²]
기계적 공극		1.6 [mm]

2. 해석 모델

2.1 해석 모델 선정

일반적으로 선형기에서 가장 많이 쓰이는 편측식 구조는 발생추력의 수 배에 해당하는 큰 수직력이 발생한다. 이 힘이 가동자를 지지하는 LM 가이드에서 마찰력으로 작용하여 가동자의 운동을 저해한다. 또한 슬롯 구조를 가지는 철심형 선형기는 높은 에너지밀도를 가지는 특징이 있지만 치-슬롯 형상에 의한 고조파 성분이 함유되어 상대적으로 큰 Detent-force가 발생하여 가동자의 운동을 방해하는 요인으로 작용한다[3]. 따라서 본 연구에서

3. 특성 해석 및 실험

3.1 특성 해석

본 연구에서는 해석 모델의 간략화를 위하여 2차원적인 등가 모델을 정의하여 유한요소 해석을 수행하였다. 전체 9개의 코일 중 3개만 모델링하여 가동자 양측의 고정자 사이를 1[m/s]로 이동시 유기되는 전압 및 전류특성을 외부 회로를 구성하여 부하에 따라 해석하였다. 무부하시 유기되는 전압을 구하기 위해 초기 저항을 크게 하여 양단에 걸리는 전압을 구하였고, 부하특성은 R 부하를 인가하여 해석을 수행하였다.

그림 2는 해석 모델에서 구한 무부하시 3상의 유기 전압 파형으로서 대체적으로 양호한 정현파가 나타남을 볼 수 있다.

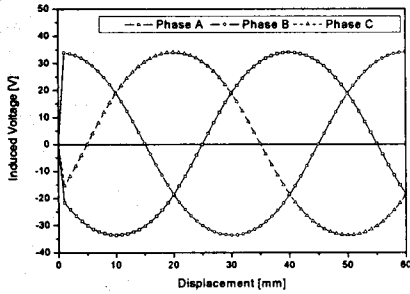


그림 2. 무부하시 3상 전압 특성

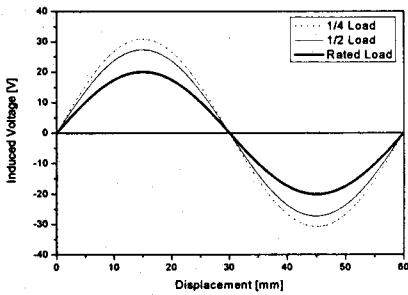


그림 3. R 부하 시 한 상 전압특성

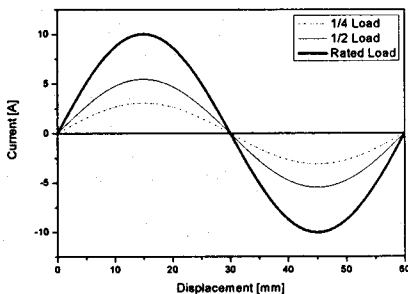


그림 4. R 부하 시 한 상 전류특성

그림 3은 R 부하에서 부하증가에 따른 한 상의 전압 특성을 나타낸 것으로, 대체적으로 양호한 정현파가 나타나는 것을 볼 수 있다. 낮은 부하에서는 유기 기전력이 많이 나타났으며, 부하가 증가하여 정격부하가 인가

됨에 따라 실제치 전압과 유사한 14.2[V]를 나타내는 것을 볼 수 있다. 그림 4는 R 부하에서 코일에 흐르는 한 상의 전류특성을 나타낸 것으로 양호한 정현파가 나타나고, 실효치로 환산하였을 경우 7.1[A]로 정격 시 한 상의 전류와 대동소이함을 알 수 있다.

3.2 실험을 통한 검증

유한요소 해석을 통한 결과의 타당성을 검토하기 위하여 본 연구에서는 해석시와 동일한 조건하에서 실제 실험을 수행하였다. 그림 5는 실험 장비를 나타낸다. 실험 시 가동자를 파도의 평균 운동 속도인 1[m/s]로 운동시키기 위해서는 외부의 힘을 필요로 하는데 본 연구에서는 다른 선형 전동기를 이용하여 그림과 같이 두 기기의 가동자를 연결하여 동시에 움직이도록 하였고, 이때 유기되는 전압과 전류특성을 동시에 측정하였다.

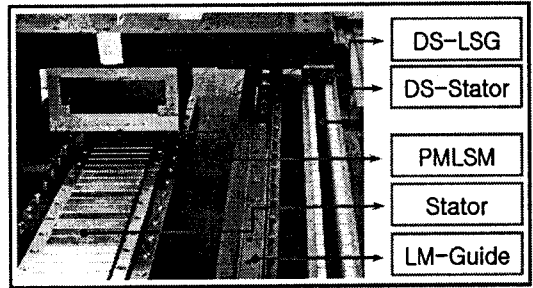


그림 5. 실험 장비 및 부하용 권선저항

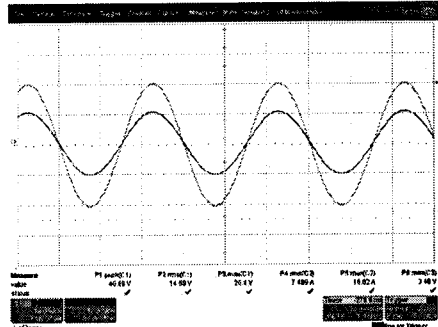


그림 6. 정격 시 전압 및 전류 파형

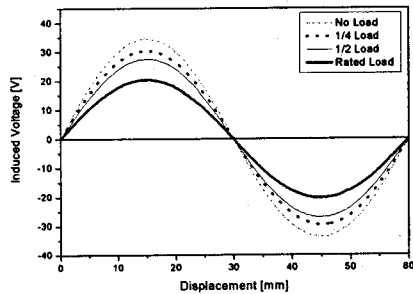


그림 7. R 부하 시 한 상 전압 특성

그림 6은 정격시 실제 측정된 전압과 전류 파형을 나타낸다. 부하로서 R 부하만 적용되었기 때문에 전압과 전류의 위상차는 발생하지 않았고, 전류의 크기를 살펴보면 7.4[A]로 해석치와 일치함을 볼 수 있다. 그림 7은 무부하시와 R 부하에서 부하 증가에 따른 한 상의 전압

특성을 나타낸 것이다. 해석시 외부 회로에 인가된 저항과 동일한 조건으로 부하를 인가하였고, 해석치와 유사하게 저부하에서 유기기전력이 많이 나타났으며, 정격부하가 인가됨에 따라 설계치 전압과 상응하는 것을 볼 수 있다.

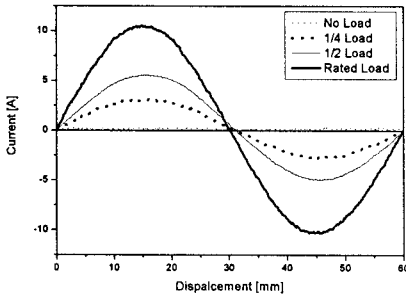


그림 8. R 부하 시 한 상 전류 특성

그림 8는 무부하시와 R 부하에서 코일에 흐르는 한 상의 전류특성을 나타낸 것이다. 외부회로에 초기저항을 크게한 경우를 무부하시로 정의하였기 때문에 전류는 외거의 흐르지 않고, 부하가 증가함에 따라 코일에 흐르는 전류는 비례적으로 증가하여 정격 시 흐르는 전류가 7.4[A]로 해석치에 근접함을 알 수 있다. 측정된 파형의 양상도 양호한 정현파로 유한요소 해석결과와 유사함을 알 수 있다. 결과적으로, 실험을 통하여 해석의 신뢰성이 입증되었다.

3.3 효율 정의

본 연구에서는 실험을 통해 유한요소 해석결과를 검토하는 동시에 발전기 자체의 효율도 정의 하였다. 그림 9은 효율을 정의하기 위한 실험구도를 도시적으로 나타낸 것이다. 효율은 발전기의 가동자를 움직이기 위한 기계적 입력과 발전기에서 유기되는 전기적인 출력의 비로 정의할 수 있다. 먼저 기계적인 입력은 발전기의 가동자를 움직이기 위해 필요한 힘과 움직이는 속도로 나타낼 수 있는데, 본 연구에서는 이 힘을 구동용 모터에 로드셀을 연결하여 무부하시와 정격 부하시의 측정된 힘의 차이를 발전기만의 입력으로 정의하였다. 또한 전기적인 출력은 부하로서 R 부하만 인가하였기 때문에 정격 시 유기되는 전압과 전류의 곱으로 쉽게 정의할 수 있다.

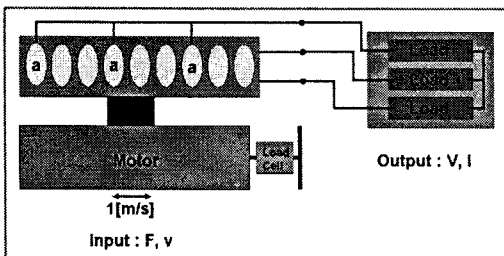


그림 9. 효율 정의

그림 9는 기동 시부터 각 단위시간까지의 누적효율을 나타낸 것이다. 구동용 모터로 사용된 선형전동기의 운동을 살펴보면, 이동거리가 제한적이기 때문에 1[m/s]로 움직이는 등속 구간과 가속 구간이 존재한다. 따라서 앞서 언급한 방법으로 효율을 구하면 각 운동구간에서의 순시적인 효율이 계산 되는데 이는 각 시점에서의 순간적인 효율이므로 물리적 의미를 부여하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 가동자가 움직이기 시작한 시점부터

정지할 까지를 임의의 단위시간으로 효율을 적분하여 각 단위 시간까지의 누적된 효율을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 누적된 효율은 시작 시점부터 증가하여 정지 시 임의의 값에 수렴함을 볼 수 있다. 등속 구간에서의 평균 효율이 51[%]로 계산되는데, 가속 구간에서 상대적으로 큰 힘이 입력으로 인가되어 가속 구간을 포함한 전체 효율은 약 38[%]로 다소 저하되었다. 또한 전체적으로 효율이 낮게 계산 되었는데, 이는 상대적으로 큰 기계적 공극의 영향과 소용량 발전기이므로 발전기 내부의 권선저항에서의 손실 및 구동용 모터의 운동시 리니어 가이드에서의 마찰 손실등의 영향이 크게 작용된 것으로 사료된다.

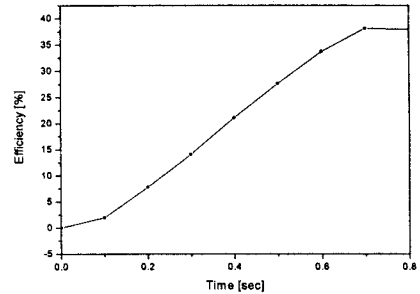


그림 10. 누적 효율 패턴

4. 결 론

본 연구에서는 파력 발전을 위한 양축식 선형발전기의 부하 가변에 따른 특성을 유한요소 해석과 실험적 방법을 통하여 분석하였다. 먼저 유한요소 해석을 이용하여 무부하 및 R 부하 가변시의 특성변화를 고찰 하였고, 해석시와 동일한 조건하에서 실험을 통해 결과의 타당성을 검토하였다. 무부하 및 R 부하시 전압 및 전류 특성결과는 두 경우에서 대동소이 하였고, 또한 실험을 통해 발전기 자체의 효율을 정의 하였다. 향후 R 부하뿐만 아니라 L 부하등의 다양한 부하 실험이 연구 과제로 남아 있지만, 본 연구의 특성 분석결과는 다양한 모델과 형상의 선형발전기 설계 및 특성해석에 효과적으로 적용될 것으로 기대한다.

[참고 문헌]

- [1] Polinder, H. 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, 2002.
- [2] Shibaike, Akihiko Sanada, Masayuki Morimoto, Shigeo, "Suitable Configuration of Permanent Magnet Linear Synchronous Generator for Wave Power Generation", Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07, p. 210-215, 2007.
- [3] Dong-Yeup Lee, Chun-Gil Jung, Kang-Jun Yoon and Gyu-Tak Kim, "A study on the efficiency optimum design of a permanent magnet type linear synchronous motor", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 41, No. 5, pp. 1860 - 1863, 2005. 5.
- [4] 황돈하 외 5 "부하 가변에 따른 영구자석형 동력발전기의 운전특성 해석", 2002년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 추계학술대회 논문집, pp. 121-123, 2002. 11. 14