

왕복 구동 평판형 선형 발전기의 디텐트 포스 저감 설계

임재원*, 최효용*, 정현교*, 홍신기**, 조동혁**, 황상연**, 오시덕**
 서울대학교*, 호서대학교**, (주)효성**

Design for reduction of detent force in flat type linear generator

Jae-Won Lim*, Ho-yong Choi*, Hyun-Kyo Jung*, Sun-ki Hong**,
 Dong-Hyeok Cho**, Sang-Yeon Hwang**, Si-Doek Oh**
 Seoul National University*, Hoseo University**, Hyosung co.**

Abstract - 철심형 영구 자석 선형 전기기기에서 디텐트력은 구조상 피할 수 없는 기기 특성이다. 본 연구에서와 같이 정격 외부 입력이 작은 경우, 디텐트력은 기기의 성능에 크게 영향을 미칠 수 있으며, 이를 저감할 수 있는 설계법이 필수적이다. 본 논문에서는 1kw급 왕복 구동 평판형 선형 영구자석 발전기의 치의 구조에 따른 역기전력과 디텐트력의 관계를 해석 하였다. 치의 구조에 따른 디텐트력의 변화를 해석적 방법을 통해 예측하고, 이를 기기 설계에 적용, 유한요소법을 이용해 실제 모델을 해석하였다. 치 구조의 변화는 디텐트력 외에 역기전력에도 영향을 주게 되는데 기기의 목표 성능을 만족할 수 있도록 설계안의 적절한 선택이 필요하다.

1. 서 론

그림 1은 Free-piston 엔진 선형 발전 시스템의 개념도이다. Free-Piston 엔진은 기존의 회전형 엔진과 달리 운동 변환 과정 없이 피스톤의 직선 운동만을 동력원으로 사용하는 엔진이다. 기존 엔진의 로드, 크랭크축에서의 에너지 손실이 없으므로 고효율의 선형 에너지 변환 장치와 결합할 경우 전체 시스템의 에너지 효율을 극대화 할 수 있는 시스템이다. 구조의 단순화로 시스템의 안정성이 좋고, 연료 압축비의 선택이 자유로워 다양한 연료의 사용이 가능한 것도 Free-piston 엔진의 장점이다 [1].

선형 발전기는 이 엔진 시스템의 핵심적인 요소가 된다. 시스템의 고효율화를 위해 발전기 자체의 고효율화가 요구되며 입력원인 피스톤으로부터의 충격에 견딜 수 있는 강한 구조와 엔진 입력을 적절히 전기적 출력으로 전환할 수 있는 제어 시스템도 필수적이다. 본 연구에서는 철심형 영구자석 선형 발전기를 목표 기기로 설정하였는데, 이와 같이 정격외부 입력이 작은 경우에 디텐트력은 기기의 출력이나 운전 특성에 상당한 영향을 미칠 수 있으므로 이를 저감하기 위한 효율적인 설계 방법이 필요하다.

디텐트력은 치와 영구 자석 사이에 생기는 인력에 의한 것으로 치와 영구 자석의 구조에 결정적인 영향을 받는다. 본 논문에서는 1kw급의 왕복구동 평판형 선형 영구자석 발전기의 치의 구조에 따른 역기전력과 디텐트력의 변화를 해석적 방법을 통해서 예측하고 이를 설계에 적용하였다. 설계 모델은 유한요소법을 이용하여 역기전력 및 디텐트력 특성을 해석하였다. 치 구조의 변화는 디텐트력뿐만 아니라 발전기의 성능을 결정하는 역기전력에도 영향을 미치는데 보통 두 가지는 서로 반대되는 경향을 보이므로 설계안의 최종 결정시에 적절한 역기전력과 디텐트력 특성을 나타내는 설계안을 결정하여야 한다.

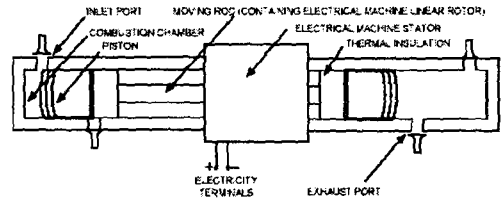


그림 1. Free-Piston 엔진 선형 발전 시스템의 개념도

2. 본 론

2.1 발전기 타입 결정

선형 발전기로 동작 가능한 기기 형태는 유도기, 동기 릴럭턴스 발전기, 영구 자석 발전기, transverse flux 발전기 등 여러 형태가 가능하다 [2]. 그러나 효율과 역률의 전기적 성능 면에서 NdFeB 계열의 고성능 영구자석을 사용한 영구 자석기기가 가장 우수한 특성을 보인다. 영구 자석 기기도 다양한 형태 중에서 transverse-flux 기기는 이론적으로 전기적 성능이나 기계적 특성이 우수하나, 소형으로 제작 시에 제작성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 성능 향상을 위해 전기자 철심을 사용하고 표면 부착형 영구자석 이동자를 적용한 평판형 발전기를 개발 모델로 결정하였다. 기계적 구조에 따라서도 선형 발전기 형태는 고정자를 길게 하는 방법(Long-stator)과 고정자를 짧게 하는 방법(Short-stator)의 두 가지가 있을 수 있는데 고정자를 짧게 하는 경우의 전기적 성능이 약간 우수한 것으로 알려져 있으나, 이동자의 무게가 늘어나 관성이 커지게 되어 운동특성이 나빠지게 되므로 이동자를 짧게 하여 가동자의 무게를 최소화 하는 구조를 선택하고 또한 코일을 가동자 측에 구성하게 될 경우 권선연결을 위한 부가적인 지지 구조 등을 필요로 하기 때문에 영구자석을 이동자에 붙이는 구조를 선택하였다. 그림 2는 제안된 선형 발전기 구조의 개략도를 나타내었다.

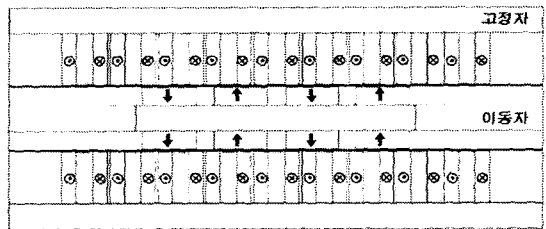


그림 2. 왕복 구동 평판형 선형 발전기

2.1.1 기본 설계 내역

선형 발전기의 기본 목표 사양 및 설계 내역은 표 1에 나타냈다.

표 1. 목표 사양 및 기본 설계안

	사양	치수
일반	출력	1[kw]
	극/상	2극 단상
	공극 길이	1[mm]
	스트로크	50[mm]
	총 길이	150[mm]
	선간 최대 전압	220[V]
	최대 속도	4.71[m/s]
	평균 속도	3.33[m/s]
	동작 주파수	30[Hz]
	평균 반작용력	300[N]
이동자	극피치	25[mm]
	자석 높이	7[mm]
	자석 폭	18.5[mm]
	자석 종류	NdFeB

동작 주파수나 스트로크는 엔진에 의한 제한 조건이며, 50[mm]의 제한된 스트로크를 효율적으로 이용하기 위해 극수는 2극으로 결정하였다. 상 수와 전압 제한은 제어부 특성에 의한 제한 조건이다. 동작 속도는 가동자가 30[Hz]의 주파수로 50[mm]를 운동하기 때문에 양쪽 끝에서는 속도가 0[m/s]이 되고 중앙에서는 속도가 최대가 되는 정현적인 속도 프로파일을 갖는다고 가정하여 해석을 수행하였다.

2.2 디텐트력

디텐트력은 치와 자석 사이에 작용하는 힘으로 일반적으로 치피치와 극피치의 최대 공약수를 주기로 갖는다 [3]. 디텐트력을 저감 방법으로는 치피치와 극피치를 조절하거나, 챔퍼링과 같이 치 구조를 변형하여 릴럭턴스 변화율을 낮추는 방법이 있다. 이외에 자석의 폭을 조절하거나 스큐를 적용한 디텐트력 저감법도 가능하다. 본 연구에서는 이론적 저감법 외에 실제 기기의 제작성도 함께 고려하여 치피치의 조절과 챔퍼링, 스큐 효과를 검토하였다.

2.2.1 치피치의 조절

본 발전기는 그림 2에서 알 수 있듯이 영구자석이 이동자에 부착되어 있는 구조를 가지고 있다. 따라서 자석의 극피치나 폭을 변화하는 것은 가동자의 무게에 변화를 주게 되고 이것은 가동자의 관성 및 운동특성에 큰 영향을 줄 수 있으므로 극피치는 25[mm]로 고정하고 치피치를 바꾸어 가면서 디텐트력과 역기전력을 계산하였다.

디텐트력과 역기전력은 자석과 치 구조에 따라 주기적인 특성을 나타내므로 그 기본파는 정현파로 가정할 수 있고, 극피치, 치피치에 따라 식 (1), 식 (2)와 같은 수식으로 나타낼 수 있다. 그림 3은 치가 7개일 경우의 계산 결과를 나타낸 것이다.

$$F_{detent} = \sum_{\tau_i} \sin\left[\frac{2\pi}{\tau_i} \times (x - \tau_i)\right] \quad (1)$$

$$EMF = \sum_{\tau_i} \sin\left[\frac{2\pi}{2 \times \tau_i} \times (x - \tau_i)\right] \quad (2)$$

(τ_i : 치피치, τ_b : 극피치)

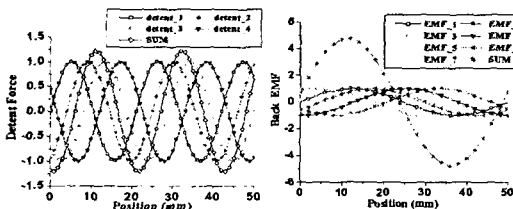


그림 3. 치가 7개일 경우 디텐트력과 역기전력 비교

식 (1)과 식 (2)를 이용해 계산한 치 수의 변화에 따른 디텐트력과 역기전력의 변화는 그림 3과 표 2에 나타내었다.

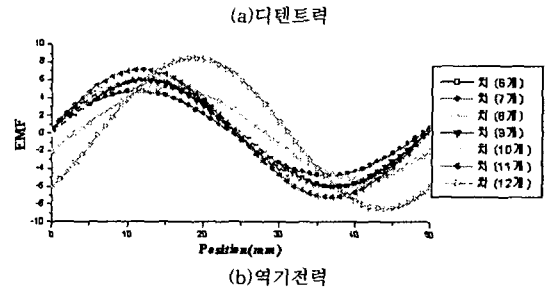


그림 4. 치의 변화에 따른 디텐트력과 역기전력

표 2. 치수별 특성 비교

치수	치피치[mm]	역기전력/치수	디텐트력	역기전력비[%]
6	25	6.0/6	4	100
7	21	4.75/7	2.2	79
8	18.75	4.83/8	1	60
9	16.5	6.01/9	0.19	67
10	15	6.47/10	1	65
11	13.5	7.20/11	2.13	65
12	12.5	8.48/12	4	70

*치 하나에 작용하는 디텐트력을 1로 보았을 때

표 2에서 보이듯이 치가 9개 일 때 디텐트력이 0.19로 상당히 감소함을 볼 수 있다. 그러나 역기전력은 권선의 위상차 때문에 상당량 감소하게 된다. 단상인 경우 위상차에 의한 합의 감소는 피할 수 없는 현상이나, 만약 3상이 적용 가능하다면 이러한 위상차에 의한 감소 문제는 해결 할 수 있다.

2.2.2 챔퍼링(Chamfering)

치의 챔퍼링은 그림 5에서 보이듯 치 양단의 형상을 조절하여 자기저항의 변화를 최소화 하여 디텐트력을 감소시키는 방법이다. 챔퍼링을 하게 되면 기본적으로 유효공극이 늘어나게 됨으로 역기전력의 측면에서는 손해를 보게 된다. 그러나 실제 제작 과정에 적용이 쉽고 비용에 비해 효과가 우수하여 챔퍼링은 철심형 선형기에서 디텐트력을 줄이기 위해 널리 쓰이고 있다 [4]. 치에 2[mm]의 높이와 폭의 챔퍼링을 적용한 경우, 디텐트력 및 역기전력 변화는 그림 5와 같다.

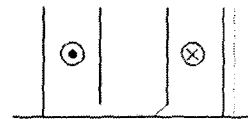


그림 5. 챔퍼링 된 슬롯

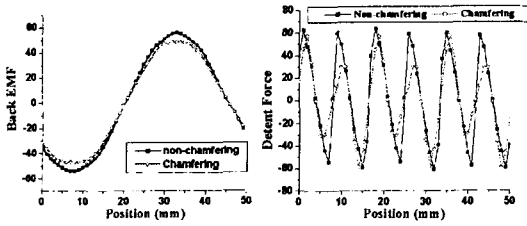


그림 6. 챔퍼링 했을 때 역기전력 값과 디텐트력의 변화

챔퍼링 적용 결과 평균 디텐트력의 감소를 확인할 수 있으나 디텐트력 최대값의 변화는 크지 않다. 상대적으로 역기전력 값은 13.6% 정도의 큰 폭의 감소를 보이고 있으므로 본 모델에서는 비용의 증가에 비해 효과는 크지 않을 것으로 보인다.

2.2.3 스큐(Skew)

디텐트력의 저감 방법으로 스큐의 적용도 생각해 볼 수 있는데 스큐는 가동자의 자석을 스큐각만큼 회전시켜 부착하는 방법과 고정자의 치를 회전시켜 가공하는 방법이 있다. 이때 치에 스큐를 적용하는 것은 철심의 적층 제작 시 어려움이 발생할 수 있기 때문에 그림 7에서처럼 자석을 회전시키는 것이 바람직하다. 그림 8과 그림 9에 치가 9개인 모델에 대해 스큐를 적용한 디텐트력의 결과와 역기전력의 결과를 나타내었다.

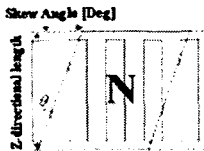


그림 7. 자석 배열의 스큐

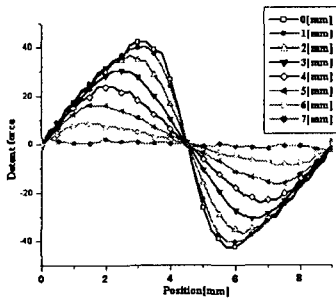


그림 8. 스큐 길이에 따른 디텐트력

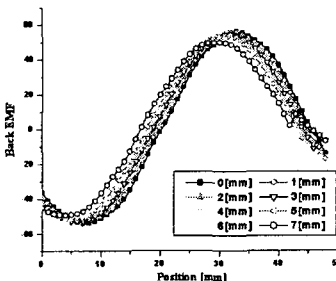


그림 9. 스큐 길이에 따른 역기전력

일반적으로 자석 배열에 스큐를 적용하게 되면 역기전력이 감소한다. 하지만 디텐트력의 저감 효과가 가장 큰 7[mm]의 스큐를 적용한 경우를 보면, 디텐트력은 97% 저감 효과를 보이는데 반해 역기전력 값은 8.9% 감소가 일어난다.

2.3 최종 모델 해석 결과

본 논문에서 제시한 최적해인 치 9개인 모델에서, 이 동작자 정현적인 속도 프로파일을 갖는다고 가정할 때 역기전력 파형과 디텐트력을 그림 10과 그림 11에 나타내었다. 역기전력의 최대값은 220[V]정도 나오게 되고 디텐트력은 최대값이 3[N]까지 저감된다. 이와 같은 설계를 통해 안정적으로 1[kw]의 출력을 얻을 수 있다.

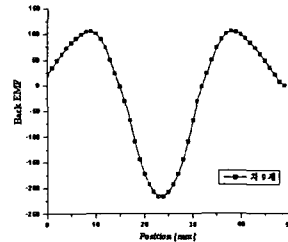


그림 10. 치 9개일 때의 역기전력

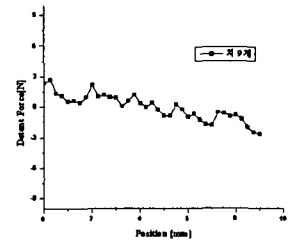


그림 11. 치 9개일 때의 디텐트력

3. 결 론

본 논문에서는 왕복 구동 평판형 선형 발전기의 디텐트력을 저감하기 위해 치와 자석과의 구조를 다양하게 변화 시킨 모델을 해석적 방법으로 예측하고 이를 유한요소법으로 해석하여 검증하였다. 2극의 극피치를 고정하고 치피치를 조정하여 본 경우 치가 9개일 때 저감 효과가 가장 좋았으며 치에 챔퍼링을 적용한 경우는 제작 비용의 증가에 비해 효과가 크지 않은 것으로 판명되었고, 자석 배열에 스큐를 적용하는 것은 역기전력의 손실에 비해 뛰어난 디텐트력의 저감효과를 보였다. 본 논문에서와 제시된 방법을 적용함으로써, 선형발전기의 정상운전을 저해 하는 주요요소인 디텐트력을 역기전력의 심각한 손실 없이 저감할 수 있는 설계가 가능할 것이다.

감사의 글

이 연구(논문)은 과학기술부의 지원으로 수행하는 21세기 프론티어연구개발사업(수소에너지 사업단)의 일환으로 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] I. Boldea, S.A. Nasar, "Linear Electric Actuators and Generators". IEEE Trans. on Energy conversion, Vol. 14, pp712-717, September 1999
- [2] Arshad, "Alternative electrical machine solution for a free-piston generator", 논문지명, 권호, 페이지, 출판년도
- [3] 최효용, 정현교, "제작성을 고려한 철심형 선형 전동기의 디텐트력 저감", 대한 전기학회 추계학술대회 논문집, pp.30-32, 2002년 11월
- [4] T.Yosimura, H.J. Kim, M. Watada, S. Torii, D. Ebihara, "Analysis of the Reduction of Detent Force on a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 31, No. 6, pp3728-3730, November 1995