

역기전력을 고려한 평판형 선형 발전기의 디텐트력 저감 설계

임재원*, 최효용*, 정현교*, 홍선기**, 조동혁**
 서울대학교*, 호서대학교**, (주)효성**

Reduction of the Detent Force in the Flat Type Linear Generator
 Considering Back EMF

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

Abstract - 영구자석형 선형발전기의 설계에 있어서 주로 고려되어야 할 사항은 영구자석, 철심형 치 및 코일의 형상 설계이다. 또한 영구자석과 철심형 치의 상호작용에 의한 디텐트력은 기기의 안정적인 성능을 위해 저감되어야 한다. 본 논문에서는 1kW급 왕복 구동 평판형 선형 발전기의 영구자석과 치의 구조에 따른 디텐트력과 역기전력의 변화를 유한요소법을 이용하여 해석하였고, 디텐트력의 저감을 위해 다양한 구조의 영구자석과 치 형상이 적용되었다. 기기 구조의 변화는 역기전력에도 영향을 끼치므로 적용된 설계안 중 역기전력의 손실을 최소화할 수 있도록 설계안의 적절한 선택이 필요하다.

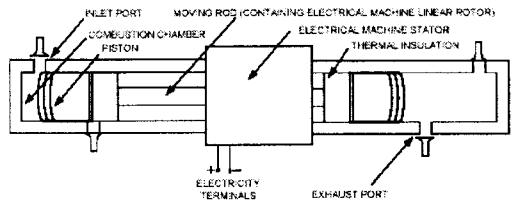


그림 1. Free Piston 엔진 선형 발전 시스템의 개념도

2. 본 론

2.1 발전기의 기본 설계안

일반적으로 유도발전기, 동기 릴럭턴스 발전기, 영구자석 발전기, transverse flux 발전기 등 다양한 형태의 기기가 선형 발전을 위해 사용될 수 있다[2]. 하지만 기기의 효율과 역률의 성능 측면과 제작의 편이성 등을 고려하여 볼 때 고성능의 영구자석을 이용한 영구자석 기기가 본 연구에 가장 적합하다. 구조적인 측면에서도 고정자를 길게 하는 방법(long stator)과 고정자를 짧게 하는 방법(short stator)이 있는데, 이동자의 질량이 늘어날 경우 피스톤의 전체 관성이 늘어나게 되어 기기의 운동특성이 나빠지므로 이동자의 관성을 최소화하는 고정자를 길게 하는 구조를 선택하였다.

선형발전기의 기본 사양과 기본 설계안은 표 1에 나타내었다. 동작주파수와 스트로크, 평균 반작용력은 엔진에 의한 제한 조건이고 72[mm]의 스트로크 동안 양쪽 끝에서는 속도가 0[m/s]이 되고 스트로크의 중앙에서는 6.11[m/s]의 최대 속도를 갖는 정현적인 속도 프로파일을 갖는 것으로 가정하였다. 제한된 스트로크를 효율적으로 이용하기 위해서 극수는 2극으로 제한하였다. 하지만 단일 구조로는 주어진 출력을 충분히 내지 못하므로, 그림 2에서 보이듯 전체 시스템을 2극 모델이 연결된 두개의 모듈로 구성하였다. 고정자의 경우는 9개의 치를 갖는 구조로 이루어져 있는데, 각각 a상, b상, c상을 구성하고, 이로부터 나온 출력은 제어부에 의해 정류되어 사용된다.

표 1. 목표 사양 및 기본 설계안

항목	값	항목	값
출력	1[kW]	평균 반작용력	300[N]
극/상	2극 3상	치피치	24[mm]
스트로크	72[mm]	극피치	36[mm]
최대 속도	6.11[m/s]	자석 높이	7[mm]
평균 속도	4.32[m/s]	자석 폭	27[mm]
동작 주파수	30[Hz]	자석 종류	NdFeB

1. 서 론

Free piston 엔진 선형 발전 시스템은 그림 1에서 보이는 것과 같이 양쪽의 연소실로부터의 기계적인 입력을 중앙의 선형 발전기가 전기적인 출력으로 변환시켜주는 시스템이다. 이 시스템은 기존의 발전 시스템에서 필요로 하는 로드, 크랭크축등의 운동변환장치가 필요 없으므로 운동의 변환과정에서 생기는 손실을 줄일 수 있다. 따라서 고효율의 선형 발전기와 결합할 경우 전체 시스템의 에너지 효율을 극대화할 수 있다. 또한 구조가 단순하여 기계적인 안정성이 좋고, 피스톤의 움직임에 제한이 없어 자유로운 연료의 압축비 선택이 가능하여 다양한 연료를 사용할 수 있다는 장점이 있다[1].

선형 발전 시스템의 전체의 효율을 높이기 위해 선형 발전기 자체의 고효율이 요구되며 피스톤으로부터의 충격에도 견딜 수 있도록 기계적으로 강인한 구조를 필요로 한다. 또한 엔진으로부터 나오는 기계적인 입력을 적절히 전기적인 출력으로 변환할 수 있는 제어 시스템도 함께 고려되어야 한다.

본 연구에서는 피스톤의 관성을 줄이기 위해, 이동자에 영구자석을 부착하는 모델을 선택하였으며, 시스템의 고출력을 만족하기 위해 고정자에 철심형 치를 적용하였다. 이때 영구자석과 철심형 치의 사용으로 인해 디텐트력이 생기게 되는데, 이는 본 연구에서와 같이 정적외부 입력이 작은 경우 기기의 출력과 운전의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이를 저감하기 위한 다양한 설계 방법의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 영구자석과 철심형 치의 구조의 변화에 따른 디텐트력과 역기전력의 변화를 해석적 방법을 통해 예측하고 이를 설계에 적용하였다. 설계모델은 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 영구자석과 철심형 치의 구조의 변화는 디텐트력 뿐만 아니라 역기전력에도 영향을 미치게 되는데 일반적으로 디텐트력과 역기전력의 특성은 서로 상반되는 경향을 갖고 있으므로 적절한 설계안의 선택이 필요하다.

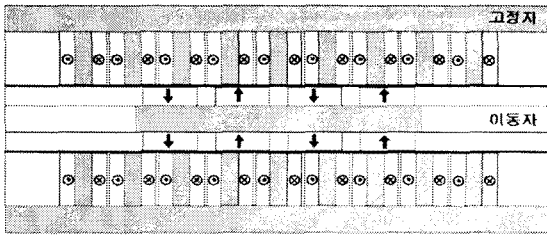


그림 2. 양복 구동 평판형 선형 발전기

2.2 디텐트력

디텐트력은 철심형 치와 영구자석 사이에 생기는 인력에 의한 것으로 그 특성상 기기의 출력이나 운전특성에 악영향을 주게 된다. 이를 저감하기 위해 다양한 방법이 제시되어 있는데, 치피치와 극피치를 조절하는 방법, 자석의 폭을 조절하는 방법, 치와 영구자석간의 릴럭턴스 변화를 줄이는 챔퍼링, 반페슬롯, 페슬롯 효과를 이용하는 방법 등이 그것이다. 이외에 스큐드 디텐트력의 저감을 위해 적용될 수 있는 방법 중의 하나이다.

2.2.1 자석 폭의 조절

디텐트력은 영구자석과 치의 기계적 구조에 의해 생기는 것으로 일반적으로 치피치와 극피치의 최대 공약수를 주기로 갖는다[3]. 하지만 본 연구에서는 72[mm]의 선형 운동을 하는 동안 2극/3상을 전부 포함할 수 있어야 하므로 극피치를 36[mm], 치피치를 24[mm]로 고정하고, 자석의 폭 조절에 따른 디텐트력의 변화를 살펴보았다.

72[mm]의 스트로크 중 36[mm]의 운동에 대한 디텐트력과 역기전력을 그림 3, 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 보이는 것과 같이 자석의 폭이 넓어질수록 자석의 사용양이 많아져 역기전력 값이 증가함을 알 수 있다. 하지만 디텐트력의 경우에는 자석의 폭이 27[mm]일 때 가장 많은 저감효과가 나타났고, 이때의 디텐트력은 19.6[N]이다. 또한 예측한 바와 같이 디텐트력의 주기는 극피치와 치피치의 최대 공약수인 12[mm]주기로 나옴을 확인할 수 있다.

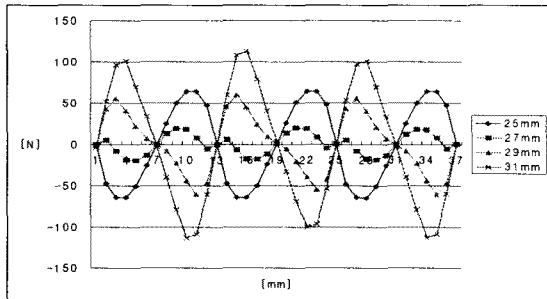


그림 3. 자석의 폭 조절에 따른 디텐트력의 변화

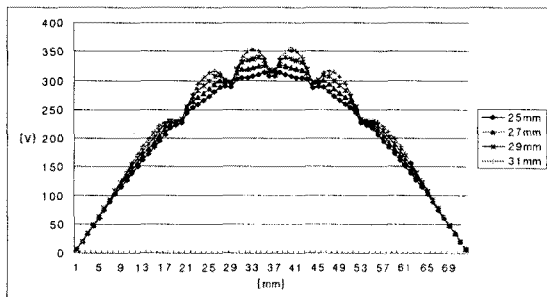


그림 4. 자석의 폭 조절에 따른 역기전력의 변화

2.2.2 챔퍼링(chamfering)

챔퍼링은 치 양단의 형상을 변화시켜 공극의 릴럭턴스 변화율을 낮추어 디텐트력을 저감하는 방법이다. 일반적으로 챔퍼링을 하게 되면 유효공극의 길이가 늘어나게 되어 역기전력의 측면에서 어느 정도의 손실이 생긴다. 하지만 실제 제작과정에서의 적용이 쉽고 비용에 비해 효과가 우수하여 철심형 치를 갖는 선형기기에서 널리 쓰이고 있다[4]. 치 양단에 폭과 높이가 2[mm]인 모양으로 챔퍼링한 결과는 그림 6과 같다.

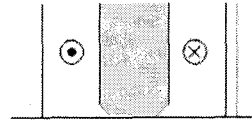


그림 5. 챔퍼링된 슬롯

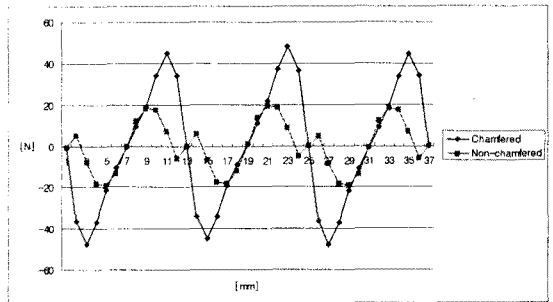


그림 6. 챔퍼링에 따른 디텐트력의 변화

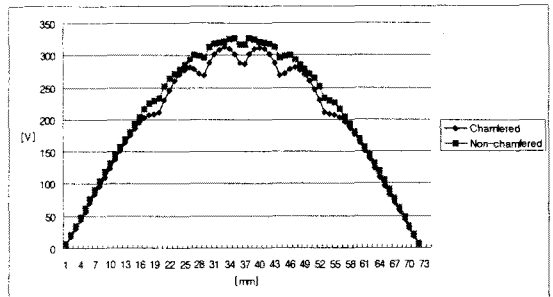


그림 7. 챔퍼링에 따른 역기전력

그림 6과 그림 7을 살펴보면 디텐트력 값과 역기전력의 특성이 챔퍼링을 하기 전보다 오히려 나빠진 것을 알 수 있다. 이는 자석의 폭 조절에 의해 저감된 디텐트력이 치의 형상변화로 인해 상대적인 자석길이의 값이 달라졌기 때문이라고 볼 수 있다. 따라서 이번 모델에서는 챔퍼링이 적용되지 않는 것이 더 유리할 것으로 보인다.

2.2.3 반페슬롯, 페슬롯 효과

반페슬롯과 페슬롯도 챔퍼링과 마찬가지로 치의 형상을 바꿔 공극의 릴럭턴스 변화율을 낮추는 디텐트력 저감법 중의 하나이다. 그림 8에서 보이듯 이 경우는 챔퍼링과는 달리 철심으로 코일부를 덮는 형상을 지닌다. 이러한 형상 때문에 누설자속이 증가하게 되고 이는 역기전력의 감소로 이어지게 된다. 1[mm]의 두께를 갖는 반페슬롯과 페슬롯의 해석결과는 그림 9, 10과 같다.

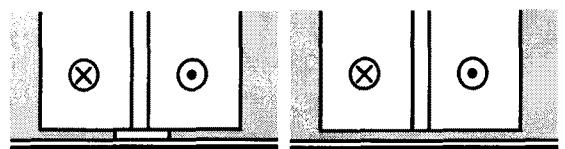


그림 8. 반페슬롯과 페슬롯 형상

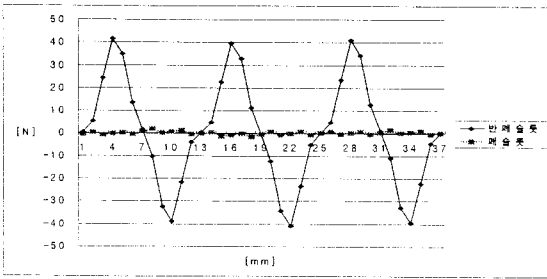


그림 9. 반폐슬롯과 폐슬롯 디텐트력

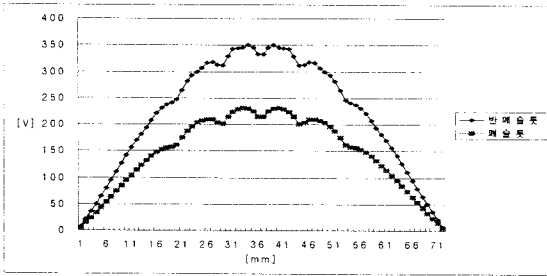


그림 10. 반폐슬롯과 폐슬롯 역기전력

그림 9에서 알 수 있듯이 폐슬롯의 경우는 디텐트력이 거의 모두 저감되는 효과를 보인다. 하지만 이에 따른 역기전력의 손실이 심각하여 실제 모델에 적용하기 힘들다. 반폐슬롯의 경우에는 챔퍼링의 경우와 같은 이유로 인해 디텐트력 저감효과가 떨어지는 것으로 나타났다.

2.2.4 스큐(skew)

다른 디텐트력의 저감법으로 스큐도 고려해 볼 수 있다. 스큐는 이동자의 자석이나 고정자의 철심형 치를 스큐각만큼 회전시켜 가공하는 방법이다. 치에 스큐를 적용할 경우에는 권선과정과 적층제작 시 어려움이 생기는 경우가 많아 이동자의 자석에 스큐를 적용하는 경우가 많다. 스큐에 따른 디텐트력과 역기전력은 그림 11, 12에 나타내었다.

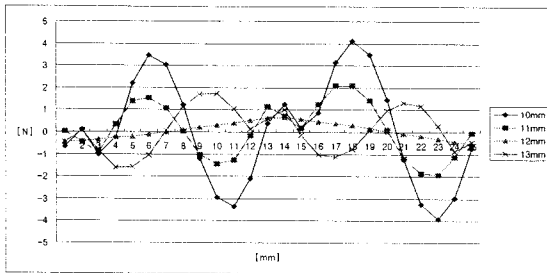


그림 11. 스큐 길이에 따른 디텐트력

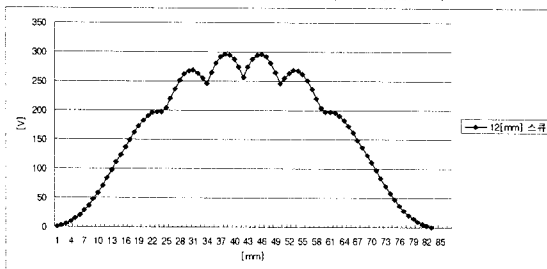


그림 12. 12[mm] 스큐를 적용하였을 때의 역기전력

일반적으로 스큐는 디텐트력의 주기만큼 자석을 회전

시켰을 때 가장 좋은 성질을 보인다. 그림 11에서 알 수 있듯이 디텐트력의 주기인 12[mm]를 스큐해 주었을 때 디텐트력의 침투치가 1[N]이하로 떨어지는 것을 알 수 있다. 반면에 그때의 역기전력 값은 약 8[%]정도 감소하는 모습을 보인다.

2.3 최종 모델 해석 결과

본 논문에서 제시한 모델이 보이는 디텐트력은 그림 13에 나타내었다. 자석 폭 조절에 따른 효과와 스큐 효과를 적용한 모델의 디텐트력은 1[N]이하로 저감되는 것을 볼 수 있고, 그림 12에서 보이듯 정류된 선간 전압의 최댓값은 300[V]정도 나오는 것을 알 수 있다. 이와 같은 설계안으로 안정적인 1[kW]의 출력을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

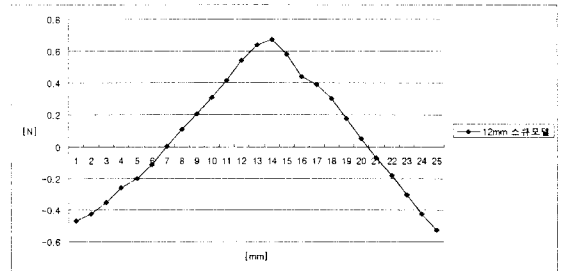


그림 13. 디텐트력

3. 결 론

본 논문에서는 평판형 선형 발전기의 디텐트력을 저감하기 위해 자석의 폭 조절과 다양한 치의 구조를 설계안에 적용해 보았고 유한요소법으로 해석하여 검증하였다. 고정된 극피치와 치피치에 대해 자석의 폭을 조정하여 본 경우 디텐트력의 저감효과가 컸고, 챔퍼링과 반폐슬롯, 폐슬롯의 적용은 비용의 증가에 비해 효과가 보장되지 않는 것으로 판명되었다. 자석배열에 스큐를 적용하는 것은 역기전력의 손실에 비해 디텐트력의 뛰어난 저감효과가 확인되었다. 본 논문에 제시된 방법을 적용함으로써, 역기전력의 큰 손실 없이 선형발전기의 정상운전을 저해하는 디텐트력을 저감할 수 있는 설계가 가능할 것으로 보인다.

감 사 의 글

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

[참 고 문 헌]

- [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"
- [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