

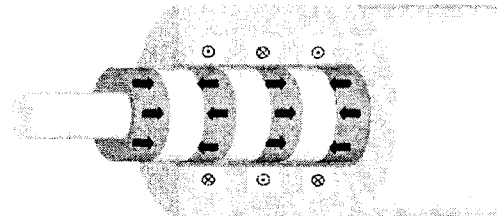
### Free-piston 엔진용 원통형 선형 발전기의 디텐트력 저감 설계

김영욱\*, 임재원\*, 최호용\*, 홍선기\*\*정현교\*  
서울대학교\*, 호서대학교\*\*

#### Detent force reduction in tubular type linear generator for free piston engine

Young-wook Kim\*, Jae-Won Lim\*, Ho-yong Choi\*\*, Sun-ki Hong\*\* and Hyun-kyo Jung  
Seoul National University\*, Hoseo University\*\*

**Abstract** - 디텐트력은 철심형 영구 자석 전기기기의 구조상 피할 수 없는 기기 특성이며 원통형 선형발전기에서도 기기의 정상적인 동작을 방해하는 요인으로 작용한다. 특히 정격 외부 입력이 작은 경우 디텐트력은 기기의 성능에 크게 영향을 미칠 수 있으며 이를 저감할 수 있는 설계가 필수적이다. 본 논문에서는 여러 가지의 디텐트력 저감법 중 이동자의 극 피치 조정을 통해 디텐트력을 저감하고자 하였다. 극피치의 변화는 디텐트력 외에도 역기전력 파형에 영향을 주게 되므로, 기기의 목표 성능을 만족하기 위해서는 디텐트력과 역기전력을 함께 고려하여야 한다. 제안된 설계안은 유한요소법을 이용하여 해석되었으며 이를 통해 얻어진 결과를 고려하여 최종 모델을 도출하였다.



〈그림 1〉 원통형 선형 발전기의 단면도

#### 1. 서 론

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.

선형발전기는 이 엔진 시스템의 핵심적인 요소가 된다. 시스템의 고효율화를 위해 발전기 자체의 고효율화가 요구되며 입력원인 피스톤으로부터의 충격에 견딜 수 있는 강인한 구조와 엔진 입력을 적절히 전기적 출력으로 전환할 수 있는 제어 시스템도 필수적이다[1,2]. 본 연구에서는 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 1kW 급의 왕복구동 원통형 선형 영구자석 발전기의 극 피치 조절에 따른 역기전력과 디텐트력의 변화를 해석하고 이를 설계에 적용하였다. 극 피치의 변화는 디텐트력 뿐만 아니라 발전기의 성능을 결정하는 역기전력에도 영향을 미치게 되므로 설계안의 최종 결정시에는 적절한 역기전력과 디텐트력 특성을 나타내도록 최적화하여 설계하였다.

스트로크, 주파수, 극수와 상 수는 free-piston 엔진과 기기 제어부의 조건에 의해 결정 된다. 이번 논문에서는 1[kW], 2극 3상 선형 발전기를 설계하였다. 유한 요소법을 사용하였으며, 시뮬레이션을 통해 역기전력과 디텐트력을 해석하였다.

#### 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. 그러나 효율과 역률의 전기적 성능 면에서 NdFeB 계열의 고성능 영구자석을 사용한 영구 자석기기가 가장 우수한 특성을 보인다. 영구 자석 선형 발전기 중에도 형태에 따라 크게 평판형과 원통형으로 구분되는데, 원통형 선형 발전기는 측면에서의 누설자속이 발생하지 않아 효율이 전반적으로 향상되며, 평판형에 비해 필요한 권선의 양이 적고 엔드 부 권선이 없기 때문에 동손이 적다. 이동자가 원통형이므로 복잡한 기계적 구조 없이 쉽게 피스톤의 로드와 연결할 수 있고, 피스톤의 움직임에 따라 이동자가 회전하여도 자기적 특성이 변하지 않는다[3-5]. 따라서 본 연구에서는 성능 향상을 위해 원통형 선형 발전기를 개발 모델로 결정하였다.

그림 1은 원통형 선형 발전기의 단면도이다. 권선을 가동자 측에 구성하게 될 경우 권선연결을 위한 부가적인 지지 구조 등을 필요로 하기 때문에 고정자를 권선형으로 하고 이동자에 영구자석을 사용하였다. 이동자는 축방향으로 자화된 자석과 철로 이루어진 폴슈(pole shoe)를 이용하여 반경방향 자속을 만들 수 있도록 하였다. 반경방향으로 자화된 자석을 사용해 Halbach 자석열을 이용할 수도 있지만, 제작성이 좋지 않고, 가격이 매우 비싸므로, 본 연구에서는 반경방향으로 자화된 자석 대신 폴슈를 사용하였다.

##### 2.2 선형 발전기의 설계 사양

표 1은 본 연구의 선형 발전기의 설계 사양을 보여준다. 정격 출력 1[kW]과 선형 발전기의 스트로크 72[mm]은 free-piston 엔진 스트로크에 의해 제한되고, 동작 주파수 30[Hz]는 수소엔진의 동작 주파수에 의해 제한된다. 최대 출력 전압 300[V]는 제어부에 의해 제한된다.

Free-piston 엔진의 기계적 크기에 따라 적절한 크기의 선형 발전기를 선택하며, 2개의 2극 이동자 모듈과, 3개의 3상 고정자 권선 모듈 중에서 선택한다.

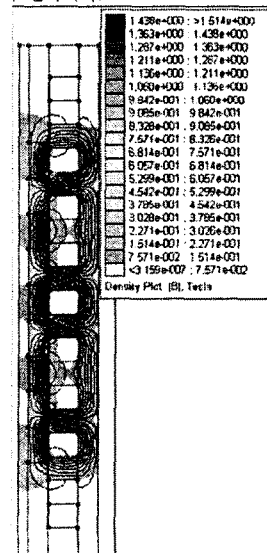
〈표 1〉 선형 발전기의 설계 사양

출력	1[kW]
극/상	2극/3상
스트로크	72[mm]
주파수	30[Hz]
최대출력전압	300[V]

##### 2.3 역기전력 해석

선형 발전기의 스트로크는 짧고 동작 주파수는 높고, 이동자가 일정한 속도로 움직이지 않는다. 설계 시에는 정형적인 속도 데이터를 가정한다. 양쪽 끝 부분에서는 이동자의 속도가 0 이고, 스트로크의 중앙에서 최대값을 가지게 하면, 이동자의 최대 속도는 6[m/s]를 넘고, 평균 속도는 약 4.3[m/s]이다. 출력파형은 정현적이고, 최대 출력 선간 전압은 300[V]이어야 한다.

선형 발전기의 자기 특성은 유한요소법을 사용하여 해석하였다. 그림 2는 시험모델의 축대칭 해석 결과이다.



〈그림 2〉 원형 선형 발전기의 자속 밀도

## 2.4 디텐트력 저감

디텐트력은 치와 자석 사이에 작용하는 힘으로 일반적으로 치피치와 극피치의 최대 공약수를 주기로 갖는다. 디텐트력을 저감하는 방법으로는 치피치와 극피치를 조절하거나, 챔퍼링과 같이 치 구조를 변형하여 릴럭턴스 변화율을 낮추는 방법이 있다. 이외에 자석의 폭을 조절하거나 스류를 적용한 디텐트력 저감법도 가능하다.

Free-piston 엔진이 안정적으로 동작하기 위해서는 시스템의 핵심적인 요소인 선형 발전기의 디텐트력이 작아야 한다. 하지만 기본 선형 발전기 모델의 최대 디텐트력이 약 70[N]으로, 테스트 모델의 정격 반작용력 약 250[N]에 비하면 상대적으로 큰 값이다. 치 피치를 조절하는 것은 디텐트력을 상당히 감소시키나 권선의 위상차에 의해 역기전력 역시 상당히 감소하게 된다. 챔퍼링을 사용하면 디텐트력의 최대값 변화는 크지 않으나 상대적으로 역기전력은 큰 폭의 감소를 보이므로 본 모델에서는 비효율의 증가에 비해 효과는 크지 않을 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 성능 향상을 위해 이동자의 극피치를 불균일하게 조절하는 방법을 적용했다.

이동자의 극피치의 변화는 그림 3과 같다. 극피치를 바꿈으로써 약간의 조화성분들이 서로 상쇄되고, 전체 디텐트력은 줄어든다. 일반적으로 극피치를 불균일하게 하면 각 상에 불평형을 가져와 최대전압이 감소되는데, 이 경우 최대 전압이 약간 감소한 반면 출력 파형이 좀 더 정현적으로 향상되었다.

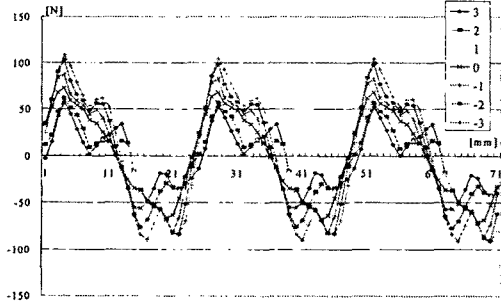
그림 4에서 극 피치의 x 변화에 따른 디텐트력을 나타내었다. x=3인 경우 디텐트력은 최소값을 가진다. 그림 5는 x를 3에 고정된 후에 y 변화에 따른 디텐트력의 변화를 나타낸다. y=-3인 경우에 디텐트력이 최소값을 가진다.

그림 6은 그림 5와 같은 상황에서 출력 전압 파형의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. y=-3인 경우, 최대값이 약간 감소하였지만, 출력파형이 좀 더 정현적이게 된다. 결론적으로 작은 디텐트력과 출력 파형의 향상을 위해 불균일한 극피치를 이용하는 방법은 매우 유용한 방법이며, 이 방법은 제작성도 좋다.

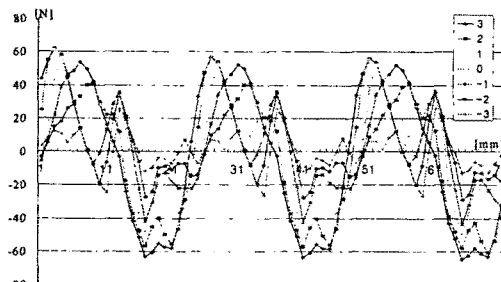
본 논문에서 제시한 극 피치변화의 최적해인 x=3, y=-3일 때 디텐트력이 최소가 되었으므로, 이 때에 이동자가 정현적인 속도 프로파일을 갖는다고 가정하고 역기전력 파형을 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 역기전력의 최대값이 298[V]으로 극 피치를 조절하기 전에 비해 크게 감소하지 않은 반면, 최대 디텐트력은 정격 반작용력 약 250[N]의 10% 정도인 25[N]으로 역기전력의 손실에 비해 뛰어난 디텐트력의 저감효과를 보였다.



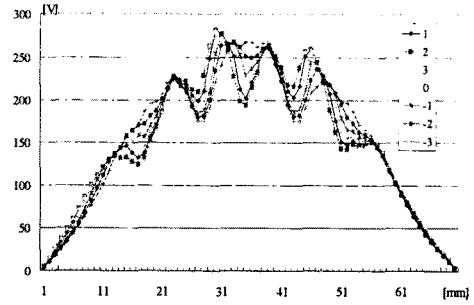
<그림 3> 극 피치 조절



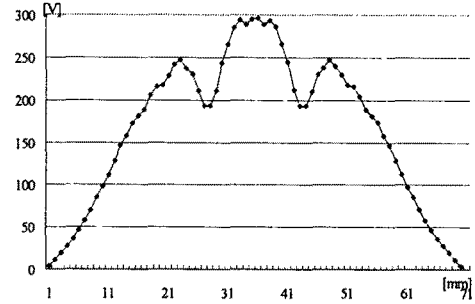
<그림 4> x의 변화에 따른 디텐트력



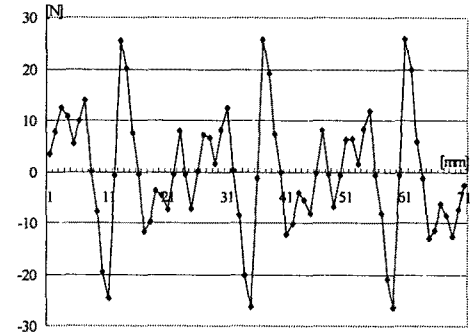
<그림 5> y의 변화에 따른 디텐트력(x=3)



<그림 6> y의 변화에 따른 전압의 출력파형(x=3)



<그림 7> 최종 모델의 전압의 출력파형(x=3)



<그림 8> 최종 모델의 디텐트력

## 3. 결 론

본 논문에서는 free-piston 엔진용 원통형 선형 발전기의 디텐트력을 저감하기 위해 피치를 다양하게 조절한 모델을 유한요소법으로 해석하였다. 이동자는 제작이 쉽고 가격이 싼 축 방향으로 자화된 자석과 철로 이루어진 풀슈를 사용하였고, 높은 효율을 위해 불균일한 극피치를 적용하여 디텐트력을 저감하였다. 일반적으로 극 피치가 불균일하면 최대전압이 줄어드는데, 본 연구에서 극 피치를 변화 시켰을 때 최대전압은 많이 줄어들지 않으면서 파형이 좀 더 정현적으로 변하는 효과가 있었다. 최종 최대 출력 전압은 298[V]이고 최대 디텐트력은 25[N]으로 디텐트력을 상당량 감소시키면서도, 최대 출력 전압이 크게 감소하지 않고, 좀 더 정현적인 파형이 되었다. 본 논문에서 제시된 방법을 적용함으로써, 선형발전기의 정상운전을 저해하는 주요요소인 디텐트력을 역기전력의 심각한 손실 없이 저감할 수 있는 설계가 가능할 것이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Waqas M. Arshad, Thomas Backstorn, Peter Thelin and Chandur Sadarangani, "Integrated free-piston generators: an overview", Electrical Vehicle Symposium, 2002
- [2] William R. Cawthorne, "Optimization of a brushless permanent magnet linear alternator for use with a linear internal combustion engine", West Virginia University, 1999
- [3] A. Cosic, J. Lindback, W.M. Arshad, M. Leksell, P. Thelin, E. Nordlund, "Application of a free-piston generator in a series hybrid vehicle", LDIA, 2003
- [4] Waqas M. Arshad, Chandur Sadarangani, Thomas Backstorn and Peter Thelin, "Finding an appropriate electrical machine for a free-piston generator", Electrical Vehicle Symposium, 2002
- [5] Ho-Yong Choi, Jae-Won Lim, Hyun-Kyo Jung, Sun-Ki Hong, Dong-Hyeok Cho, Sang-Yeon Hwang, Si-Deok Oh, "Design of Flat-type Linear Generator for Free-Piston Engine", ICEMS, 2004