

수소연소 리니어 발전기의 초기 구동방안

정승기, 김경수
광운대학교 전기공학과

Starting of a Linear Generator Driven by a Hydrogen Engine

Seung-Gi Jeong, Kyung-Su Kim

Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University

Abstract - A linear generator driven by hydrogen (or other kind of fuel) combustion engine requires special consideration for starting because of its none-conventional way of operation. This study investigates the possibility of replacing mechanical (hydraulic) start-up with electrical motoring. Simulation study based on 1 kW prototype system shows that the mover position of a linear generator can be controlled with a proper current control of power converter.

되어야 한다. 본 연구의 선행 연구에서 구현한 시제품에서는 이를 위하여 유압 시스템을 적용하여 초기기동을 시행하였다 [1]. 그러나 발전기에 기동을 위해 유압시스템을 장착하는 것은 현실적인 방안이라 보기 어렵기 때문에 기왕에 발전기 출력단에 장착되는 PCS를 이용, 발전기를 전동기 모드로 동작시킴으로써 초기압축을 시행하는 방안을 추진하고 있다. 여기에서는 리니어발전기를 전동기 모드로 동작시켜 초기 기동을 하는 방안에 대하여 서술하고 있다.

1. 서 론

수소에너지는 신재생 에너지의 한 축을 담당하고 있다. 수소는 최근 분산형 전원 또는 하이브리드 자동차의 동력원으로 부각되어 외국에서 활발히 연구개발이 시도되고 있다. 국내에서도 수소 프론티어 사업으로 수소에너지의 발생, 저장 및 이용기술 개발이 추진되고 있으며 수소에너지 이용기술의 일환으로 수소연소 리니어 발전시스템의 개발이 진행되고 있다.

리니어 발전기는 일반적 회전형 발전기와는 달리 내연기관에서 피스톤의 왕복운동을 회전운동으로 변환하지 않고 직접 발전기에 적용하는 것을 말한다. 이 방식은 크랭크를 통해 회전운동을 변환하는 과정에서 발생하는 기계적 손실이 없고 팽창행정의 제약을 받지 않아 피스톤의 자유도가 높기 때문에 압축 및 팽창효과를 극대화할 수 있어서 엔진 효율을 높일 수 있는 장점을 지니고 있다. 나아가 이를 구동하는 엔진으로 수소연료를 사용할 경우 초저공해의 발전기를 구현하는 것이 가능하며 미래형 고효율 환경친화적 엔진으로서의 전망이 기대되고 있다.

리니어발전기는 수소연료, 혹은 기존의 연료를 사용하는 내연기관의 피스톤에 직접된 이동자(mover)와 이동자 주위를 둘러싸고 있는 전기자로 이루어져 있다. 이동자에는 다수의 영구자석이 착자되어 있고 전기자에는 동심원 코일이 배치되어 이동자가 왕복운동을 함에 따라 기전력이 유기된다. 이때 유기되는 기전력은 이동자가 스트로크의 양쪽 끝에서 멈추었을 때는 0이 되었다가 양쪽 끝 사이를 이동하는 도중에는 크기가 커지는 모양을 띠게 된다. 이러한 파형의 기전력을 직접 전원으로 사용할 수 없으므로 리니어발전기의 출력은 전력변환장치(이하 PCS(Power Conversion System)라 씀)를 통해 일정 크기 일정 주파수의 교류로 변환시켜 주어야 한다.

한편 기존의 회전형 발전기는 엔진에서 발생한 에너지가 일정한 방향의 회전운동에너지로 축적되는 반면 리니어발전기에서는 매 스트로크마다 운동에너지가 소진되므로 초기 기동이 문제가 된다. 즉 초기 기동을 위해서는 엔진 연소실 내부를 적절히 압축시켜 주는 방안이 강구

2. 시스템의 개요

그림 1은 엔진과 1kW 급 리니어발전기 구조의 개요를 보여주고 있다. 발전기는 좌 우 두 개의 연소실을 갖는 엔진에 의해 구동된다. 발전기의 이동자에는 표면에 N극과 S극이 교대로 나타나도록 축방향으로 자화된 자석이 부착되어 있다. 이동자의 최대 스트로크는 좌우로 36mm씩, 총 72mm이다. 고정자에는 총 9개의 동심코일이 장착되어 있고 3개씩을 직렬로 연결하여 A, B, C 3개 상의 출력이 인출되도록 만들어져 있다.

그림 2는 발전기에 부착된 PCS를 보여주고 있다. PCS는 발전기측 컨버터와 직류링크, 그리고 부하측 컨버터로 이루어진다. 그림에 나타난 발전기측 컨버터는 3개의 단상 컨버터로 이루어져 발전기에서 인출된 6개의 출력단자(혹은 3상 4선식 결선)에 접속되어 있다. 부하측은 3상 전력계통에 연계하는 것을 전제로 하고 있으나 이는 물론 발전기의 용도에 따라 달라질 수 있다. 단 여기서와 같이 전력계통에 연계된 경우에는 부하측 컨버터가 동작하지 않고 있는 상태라 해도 3상 정류기로 기능하여 직류링크에 전압이 나타나므로 바로 초기 모터링이 가능하다. 만일 부하측이 수동부하에 접속된다면 초기 모터링을 위해 직류링크에 배터리가 사용되어야 한다.

발전기측에 단상 컨버터를 적용한 이유는 불규칙한 기전력 파형을 갖는 선형발전기에서 전류제어를 행할 경우에는 상간 간섭이 없는 단상 컨버터가 제어의 단순성을 꾀할 수 있기 때문이다. 그러나 적절한 전류제어 방안이 강구된다면 3상 컨버터를 사용하는 것도 가능하다.

발전기의 제어를 위한 피드백 요소로는 이동자의 위치 센서 출력과 발전기 상전류 및 직류링크 전압이 제공된다.

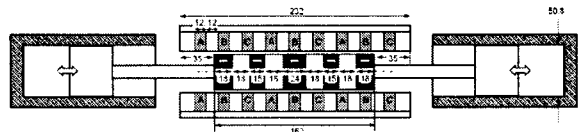


그림 1. 리니어발전기의 구조

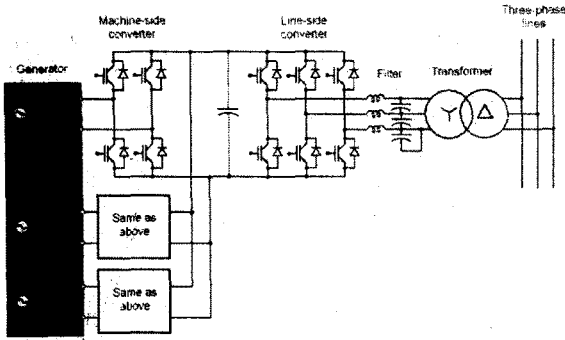


그림 2. PCS의 구성

3. 시스템의 모델

그림 3은 리니어 발전기의 이동자가 1m/sec의 일정한 속도로 이동하는 것을 가정하였을 때 전자기장 수치해석을 통하여 구한 발전기 각 상에 유기되는 기전력 파형이다. 일정 속도로 이동하고 있는 상태이므로 시간축은 곧 이동자의 위치에 해당한다. 또한 각 위치에서 기전력의 크기는 각 상을 이루는 3개 코일을 하나의 등가 코일로 간주하였을 때 코일을 쇠교하는 자속밀도를 나타내는 것으로 볼 수 있다.

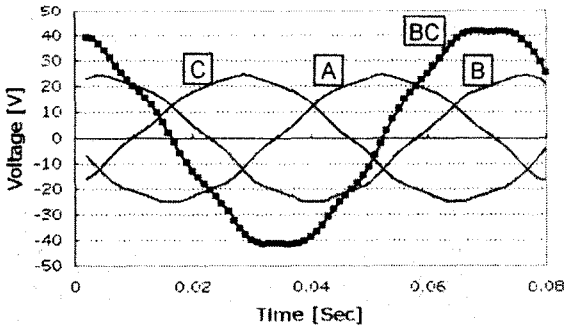


그림 3. 1m/sec에서의 유기기전력 파형

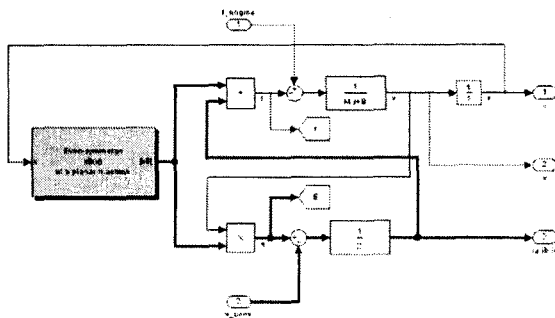


그림 4. 발전기의 모델

그림 4는 발전기의 모델을 보여주고 있다. 왼편의 블록은 그림3에 입각하여 이동자의 위치 x 를 입력으로 받아들이며 자속에 해당하는 $[kB] = [kB_a, kB_b, kB_c]$ 를 출력한

다. 이로부터 발전기 코일에 작용하는 힘 f 와 유기기전력 $[e] = [e_a, e_b, e_c]$ 는 아래와 같이 계산된다.

$$f = kB_a i_a + kB_b i_b + kB_c i_c = [kB][i] \quad (1)$$

$$[e] = [kB_a v, kB_b v, kB_c v] = [kB]v \quad (2)$$

위의 식 (1)에서 $[i] = [i_a, i_b, i_c]$ 이다.

그림 4 오른쪽의 위쪽은 이동자의 속도를 계산하는 부분을, 아래쪽은 전류를 계산하는 부분을 나타낸다. 이동자에 가해지는 힘은 식 (1)에서 계산된 코일에 가해진 힘의 반작용으로 나타난다. 이것과 연소실에서의 압축 및 폭발로 피스톤에 가해지는 힘의 차이를 입력으로 하여 이동부의 총 중량 M 과 마찰계수 B 에 의해 속도가 계산된다. 전류의 계산도 이와 유사한 형태로 이루어진다. 즉 발전기의 유기기전력과 컨버터로부터 발전기측 단자에 가해지는 전압간의 차이가 입력으로 되고 발전기 권선의 저항과 인덕턴스에 의해 코일 전류가 계산된다. 여기서 발전기 단자전압은 컨버터의 직류링크 전압과 컨버터 스위칭 상태에 의해 결정된다.

발전기를 구동하는 엔진의 피스톤에 가해지는 힘을 나타내는 모델은 선형 유압시스템 시험 결과[1]에서 취득하였다. 그림 5는 이동자의 위치에 따라 피스톤을 통해 가해지는 압력을 측정된 결과를 보여주고 있다. 중심(0)에서 좌우로 이동함에 따라 좌 우 피스톤에 가해지는 힘이 표현되어 있다. 이를 합산하고 압력을 피스톤 치수에 따른 힘으로 환산하면 이동자에 가해지는 힘이 된다.

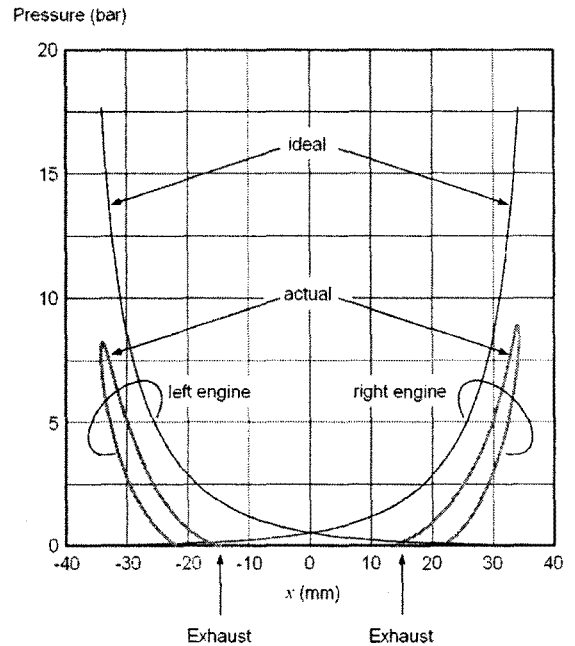


그림 5. 이동자의 위치에 따른 압력 변화

연소실의 누설로 인해 실제 측정에 의한 결과는 그림에서 보다시피 계산에 의한 이상적인 특성에 비해 상당한 차이를 보이고 있으며 압축할 때와 팽창할 때의 압력 변화도 일치하지 않는다. 나아가 우측 연소실과 좌측 연소실의 압력변화 특성에도 다소 차이가 존재하고 있다. 여기서는 모델을 단순화하기 위하여 이들 효과를 무시하고 아래와 같이 이동자에 가해지는 힘을 계산하였다.

$$P = \frac{K}{D-x} + P_0 \quad (3)$$

$$P_{net} = P(-x) + P(x) \quad (4)$$

$$f_{engine} = kAP_{net} \quad (5)$$

여기서 K 와 D , P_0 는 그림 5의 실험 특성으로부터 구해지는 상수이고 A 는 피스톤의 단면적, k 는 압력(bar)를 힘(newton)으로 환산하는 계수이다.

4. 제어 및 시뮬레이션

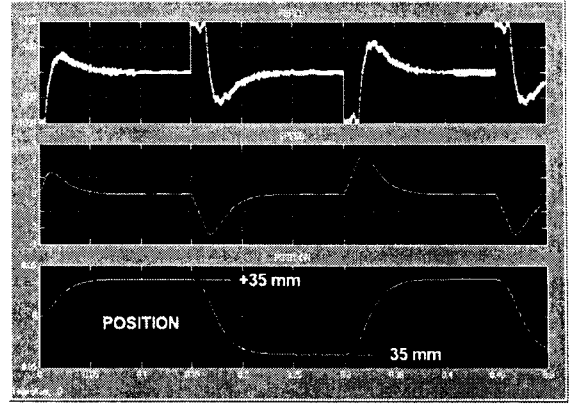
위에서 서술한 모델을 기반으로 발전기의 모터링 모드 제어특성을 시뮬레이션하였다. 발전기를 모터링 모드로 제어하기 위해서는 발전기로 동작할 때와 반대 방향으로 전류를 흐르도록 한다. 일반적으로 발전기 동작에서는 유기기전력과 같은 방향의 전류가 흐르게 된다. 따라서 각 상에 유기기전력과 반대 방향의 전류가 흐르도록 컨버터를 제어하면 모터링 동작이 이루어질 수 있다.

이동자의 위치정보가 피드백되는 것을 전제로 하여 제어기에서 위치에 따른 기전력의 극성을 판별한 다음 유기기전력과 반대 방향의 전류지령을 컨버터의 전류제어기에 출력한다. 이때 전류의 지령치는 단순하게 일정한 크기의 구형과 형태로 하였으며 그 크기는 상위의 위치제어기로부터 주어진다. 위치제어기는 피드백된 위치정보와 위치 지령치 간의 오차에 의해 작동한다.

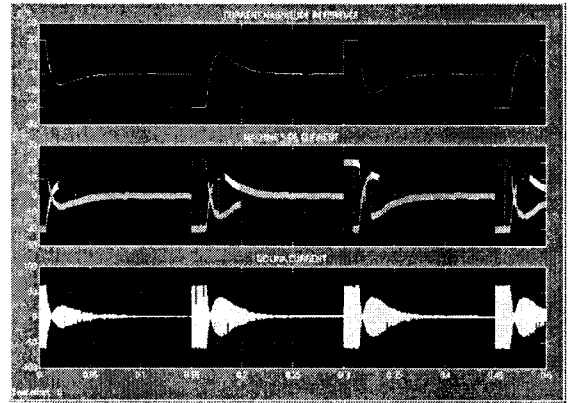
그림 2와 같은 단상 컨버터를 사용하였을 경우 전류의 크기를 제어하기 위해 히스테리시스 전류제어를 적용한다. 만일 3상 컨버터를 사용한다면 공간벡터 제어와 유사한 형태의 제어를 적용하여 전류제어를 행하게 된다.

그림 6은 시뮬레이션 결과의 한 예를 보여주고 있다. 위치지령치는 좌우 36mm의 한계에 약간의 여유를 두고 주기적으로 +35mm와 -35mm를 교대로 가하였다. 그림에서 이동자의 위치가 지령치에 적절히 추종함을 볼 수 있다. 이때 전류지령은 컨버터의 전류용량을 고려하여 상한치를 두고 포화되도록 하였으며 이동자가 가속하는 동안에는 발전기 권선전류가 이 상한치에서 포화되는 것을 알 수 있다. 실제 시스템에 적용할 때 초기 압축은 1회 내지 2회만 이루어지면 되므로 초기전류 지령치는 발전기 권선의 정격전류용량을 상회하여도 무방하다. 그 값은 발전기보다는 컨버터 제작상의 경제성에 의해 좌우될 것으로 예상된다.

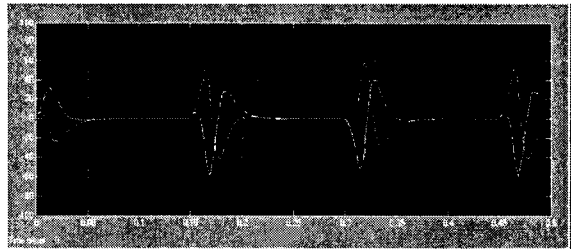
그림 6은 이동자의 위치제어기를 PI 제어기로 하고 위치제어기 하부에 속도제어기를 추가, 속도제어기 출력을 전류 지령치로 하였을 때의 결과이다. 속도제어기를 적용하지 않고 직접 위치제어를 행하였을 때는 PI 제어기로는 적절한 제어가 이루어지지 않았으며 매우 불안정한 특성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이 경우 PI 대신 PD제어기를 적용하면 어느 정도 안정화가 가능하나 도달위치에 오차가 생기고 이를 제거하려면 오버슈트를 감수하여야 하는 문제가 나타난다. 따라서 이 시스템의 적절한 제어를 위해서는 속도피드백이 필요함을 알 수 있었다.



힘과 속도 및 위치



전류기준치, 발전기 상전류, 직류링크 전류



유기기전력

그림 6. 시뮬레이션 결과

5. 결 론

본 연구에서는 수소엔진에 의해 구동되는 리니어발전기의 모델을 구축하고 이를 기초로 시뮬레이션을 행하여 적절한 제어기 구조와 PCS의 전류제어를 통해 이동자의 위치를 제어할 수 있음을 확인하였다. 이는 리니어발전기의 초기 구동을 위해 PCS로 유압시스템을 대신할 수 있음을 의미한다. 향후 (1) 모델의 제반 상수에 정밀성을 보완하고 (2) 제어방식의 최적화를 꾀하며 (3) 실제 실험을 통해 입증하기 위한 작업이 진행중에 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 노태석, 김강출, 우영민, 이용근, 류정인, 이명재, "수소연소 리니어엔진의 동적특성에 대한 연구", 한국자동차공학회 2006년도 춘계학술대회논문집, pp. 184-1-1846, 2006.