

# 수소연소를 이용한 선형발전기 제어

이 승희<sup>1)</sup>, 정 승기<sup>2)</sup>, 최 주엽<sup>3)</sup>, 최 준영<sup>4)</sup>, 오 시덕<sup>5)</sup>

## Control of Linear Generator Using Hydrogen as a Fuel

Seunghee Lee, Seonggi Jeong, Juyeop Choi, Junyoung Choi, Sidoek Oh

**Key words** : Linear Generator(선형발전기), Hydrogen(수소), Linear Engine(리니어 엔진), PCS(전력 변환장치), Inverter(인버터)

**Abstract** : Global warming and air pollution have increased the amount CO<sub>2</sub> in the atmosphere. In order to decrease the amount of CO<sub>2</sub>, lots of researches are conducted toward using Hydrogen energy. Because of its high efficiency energy level and environmental friendly features, many companies have researched on developing hydrogen engine system and distributed generation system. Especially, the focus of this research provides the operation method of linear generator for hydrogen fuel combustion linear engine. During an ignition, linear generator is operated by motor to create the initial condition of engine combustion. Once the engine combustion is stabilized, the generator supplies electric power to grid.

In order to stabilize the engine, linear generator is required to control mover frequency, direction, and force; Hence the PCS(Power Conversion System) place three H-bridge type inverter stacks in parallel to control phase current independently. As well, by using Back-to-Back method, it can receive electric power from both end.

### subscrip

PSC : power conversion system

MSC: machine-side converter

LSI : line-side inverter

## 1. 서론

대기오염 저감 및 지구온난화 문제로 인한 전 세계적인 CO<sub>2</sub> 총량 규제에 대비하기 위한 하나의 방안으로서 수소에 대한 연구가 다방면에서 진행되고 있다. 최근에 수소 경제에 대비한 분산형 전원 또는 하이브리드자동차의 동력원으로서 수소를 사용하는 고효율 동력원이 부각됨에 따라서 외국에서 연구개발이 활발히 시도되고 있으며 국내에서도 수소프론티어 사업의 일환으로 수소 연소 리니어 동력/발전 시스템의 개발이 추진되고 있다.<sup>(1)</sup> 본 연구에서는 피스톤의 왕복운동을 크랭크축과 플라이휠을 이용하여 회전운동으로 변환하는 왕복동형엔진과는 달리, 선형운동 그대로 동력으로 변환하는 리니어 엔진용 선형 발전기 제어에 필요한 시동과 발전을 제어하는 방법에 대한 검증을 한다.<sup>(1)</sup> 발전기는 시동시에는 전동기로 동작하게 되어 초기 엔진연소조건을 만들어 주게 되며, 엔진이 연소가 안정화 되면 전력을 계통으로 보내주게 된다. 리니어 엔진용 선형발전기는 엔진의 안정화를 위하여 주파수, 운동방향

과 힘을 제어해야 하므로 각 상제어가 가능한 H-bridge 형태의 인버터 스택 3개를 병렬 연결된 구조로 제작하여 상전류를 독립적으로 제어할 수 있도록 하며, Back-to-Back 방식으로 양방향 전력 수수가 가능하도록 제어한다. 본 논문에서는 발전기를 모델링하고, 시동과 발전시의 전력 흐름을 관찰하였다.

## 2. 선형 동력/발전 시스템 소개

선형 동력/발전 시스템은 한 개의 리니어 발전

- 
- 1) 광운대학교 전기공학과 전력전자연구실  
E-mail : masei119@kw.ac.kr  
Tel : (02)940-5146 Fax : (02)943-7195
  - 2) 광운대학교 전기공학과  
E-mail : sgjeong@daisy.kw.ac.kr  
Tel : (02)940-5146 Fax : (02)943-7195
  - 3) 광운대학교 전기공학과  
E-mail : juyeop@daisy.kw.ac.kr  
Tel : (02)940-5143 Fax : (02)943-7195
  - 4) (주)효성 중공업 연구소 전력전자응용팀  
E-mail : choijy@hyosung.com  
Tel : (031)596-1749 Fax : (031)596-1698
  - 5) (주)효성 중공업 연구소  
E-mail : ohsidk@hyosung.com  
Tel : (031)596-1702 Fax : (031)596-1697

기와 발전기 양 옆에 연결되는 두 개의 엔진으로 구성되어 있다. 발전기는 고정자에 전류를 투입하면 전동기로서 동작을 하게 되고 엔진동력에 의해 이동자를 움직이게 되면 발전기로서 동작을 하게 된다. 이 때 PCS는 발전기와 연결되어 발전기로 전류를 투입하거나 발전된 전력을 계통으로 보내는 역할을 하게 된다. 그림 1은 선형 동력/발전 시스템의 전체 구성을 개략적으로 보여주고 있다.

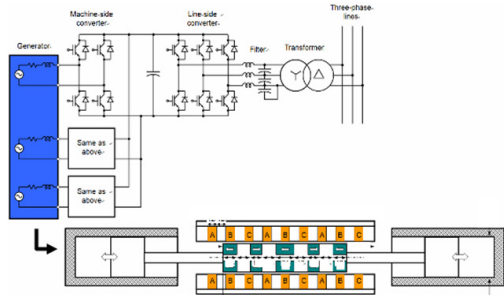


Fig. 1 선형 동력/발전 시스템 구성도

## 2.1 선형 발전기 & 엔진 구조

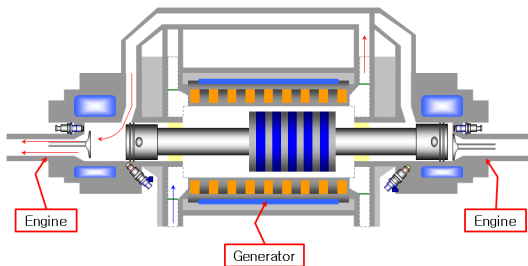


Fig. 2 선형 발전기 구조

선형 발전기는 그림 2와 같이 두 개의 엔진과 발전기로 구성되어 있다. 발전기의 양 끝에는 각각 엔진이 붙어 있고, 엔진의 피스톤은 발전기의 무버와 연결이 되어있다. 발전기는 엔진에서 발생된 힘으로 선형 이동자를 움직이고 이동자에 착자된 자계가 외부 고정된 권선에 자속변화를 주어 권선에 기전력을 유기하는 영구자석형 동기기이다. 영구자석형 동기기에서 기전력은 고정자 권선에 채교하는 자속의 변화에 따라 나타나며, 이동자의 이동이 자속 변화를 만든다.

Table 1 5kW급 수소연소 선형발전기 설계사양<sup>(2)</sup>

Parameter	Requirement
출력	5.9 [kW]
극/상	2극/3상
스트로크	85 [mm]
동작주파수	30 [Hz]
상 전압 최대값	380 [V <sub>peak</sub> ]

## 2.2 PCS 구조

선형 발전기용 PCS는 3개의 단상 컨버터와 3상 인버터로 이루어져 있다. 그림 3은 PCS의 구조를 나타낸다.

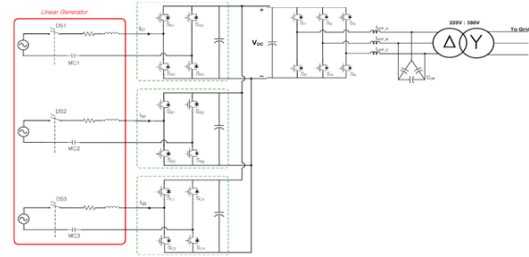


Fig. 3 선형발전기용 PCS 구조

3-leg의 3상 컨버터 구조는 이론적으로 임의의 파형에 대응하여 동작할 수는 있으나 이 방식은 교류측이 3상 대칭일 경우에 효과적인 제어가 가능하다. 선형 발전기에서는 3상 권선이 정확히 대칭이 아니며 각 파라미터 역시 상차이가 존재하므로 사실상 위상차가 있는 3개의 단상이라 판단할 수 있다. 단상 컨버터를 사용하면 각 상이 각자 주어진 지령 하에 독립적으로 제어가 되므로 상간 간섭이 없어서 제어를 용이하게 할 수 있다.

## 2.3 동력/발전시스템 연계운전 절차

그림 4는 선형 동력/발전 시스템의 운전 절차를 PCS와 발전기/엔진부분으로 나누어 보여준다.

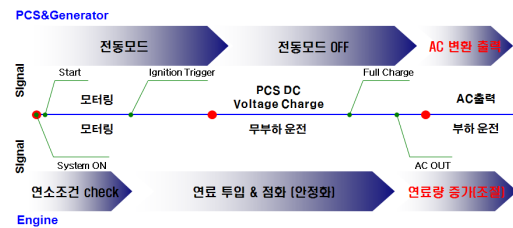


Fig. 4 선형 발전기의 동작 시퀀스

엔진은 초기에 연소를 위한 압축동작이 필요하다. 이를 위해 선형발전기는 PCS에 의하여 전동모드 동작을 하여 압축압력을 생성한다. 이때 엔진제어기는 실린더 내부의 압력을 측정하여 연소 조건을 판단하게 된다. 최소한의 연소조건을 만족하게 되면 엔진은 연료에 의해 점화를 일으키며 천천히 연료량을 증가하고 발전기는 전동모드에 의해 엔진의 안정화를 돕다가 멈춘다. 엔진 단독 동작으로 안정화가 되고 발전량이 증가하게 되면 PCS는 계통으로 전력을 공급하게 된다. 이 때 PCS가 송전 전력 조절하면 엔진제어기는 부하 조건에 의하여 연료량 조절을 하게 된다.

### 3. 모델링 및 제어

#### 3.1 선형 발전기 모델링

영구자석형 전동기는 Lenz's Law에 의해 고정자 권선에 전류를 투입하여 권선에 자계가 형성되게 하고, 이 자계와 계자의 자극이 자기력을 만들어 이동자를 움직이게 한다. 반대로 발전기는 Faraday's Law에 의해 이동자를 움직이게 되면 계자의 자극이 고정자 철심에 자계를 형성하고 이는 고정자 권선에 유기전압을 발생한다.

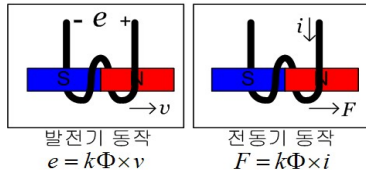


Fig. 5 발전기 및 전동기 동작원리

$k\Phi$ 는 발전기의 특성값이며 이동위치에 따라 크기와 극성은 고정된 값을 가진다. 그림 5 같은 원리를 이용하여 이동자와 고정자를 구성한다.

구성된 선형 발전기는 위치에 따라 다른 자속 밀도( $B$ )를 가지게 되고 이를 1mm간격으로 간략화 하였다.

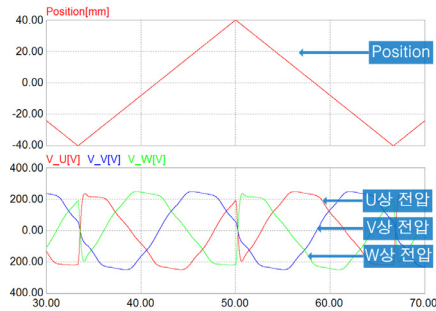


Fig. 6 등속운동 시 출력전압 [30Hz]

Fig. 6은 30Hz의 등속운동 시 출력전압을 나타내고 있다. 이를 토대로 발전기 특성( $k_m$ )을 알 수 있다.

$$e = B_m \cdot l \cdot v(t) = k_m \cdot v(t)$$

여기서,

$e$  : 유기 전압, [V]

$B_m$  : 자속 밀도, [Wb/m<sup>2</sup>]

$l$  : 도체의 길이, [m]

$v(t)$  : 영구자석의 이동속도, [m/s]

$k_m$  : 위치별 발전기 자속 정보 [Wb/m]

#### 3.2 전동모드 제어

PCS에서 LSI는 전동/발전모드시 DC link 전압 제어를 하게 되고, MSC는 전동모드시 발전기의 힘의 크기와 방향을 제어하고, 발전모드시 전력을 결정하여 전류를 조절하게 된다.

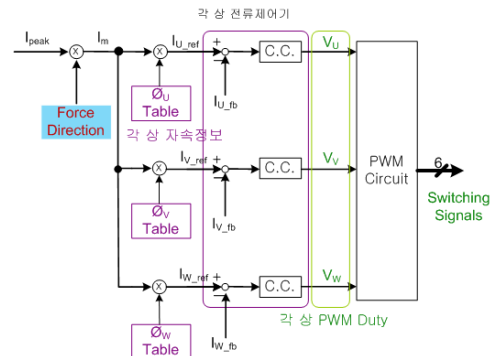


Fig. 7 전동모드시 전류 제어

선형 발전기의 전동모드에서 중요한 요소인 힘의 방향과 크기는 권선에 투입되는 전류의 극성과 크기로 결정된다. 따라서 전동모드를 위해 발전기에 연결되는 컨버터는 전류제어를 하게 되고<sup>(3)</sup>, 투입되는 전류는 일반적인 3상 평형 전류가 아니라 리니어 발전기 특성에 맞는 3상 불평형 전류이어야 한다. 그러므로 MSC는 각 상의 전류를 독립적으로 제어하는 것이 유리하다. 그림 7과 같이 전류의 크기와 극성이 결정된 전류는 각 상의 전류제어기를 통해 전압정보로 변환되고 PWM circuit에 의해 전력용 반도체를 구동하게 된다.

#### 3.3 발전모드 제어

엔진의 안정화가 이루어지면 PCS는 선형 발전기에서 생산된 전력을 계통에 보내준다.

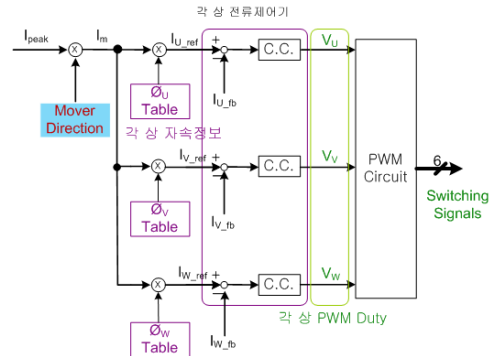


Fig. 8 발전모드시 전류 제어

발전모드 시에는 전류제어 방법은 그림 8과 같다. 전류의 크기는 발전하고자 하는 전력 크기에 따라 결정되고, 전류의 극성은 이동자가 움직이는 방향과 발전기의 자속 테이블에 의해 결정된다. 전류의 크기와 극성이 결정되면 전동모드와 마찬가지로 전류제어가 이루어진다.

### 4. 시뮬레이션

위의 이론적 배경을 이용하여 PSIM으로 타당성을 검증하였다. LSI의 DC-Link제어는 기존에 검증이 완료되었기 때문에 MSC에 대해서만 Simulation을 수행하였다. 발전기를 위치별로 모델링 하고, MSC 제어기를 구성하여 전동/발전모드를 구현하였다. 구성한 PSIM 모델은 그림 9와 같다.

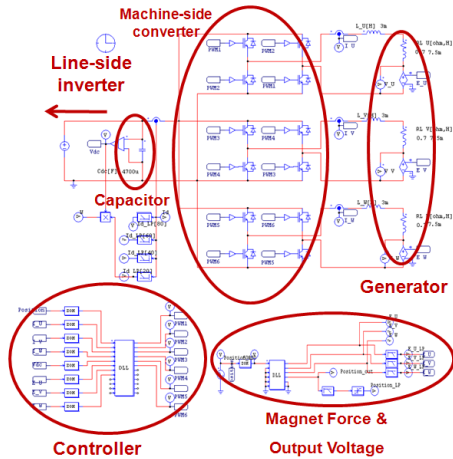


Fig. 9 시뮬레이션 모델

그림 10 은 전동모드와 발전모드시 위치변화, 역기전압파형, 그리고 U상 전류의 파형이다.

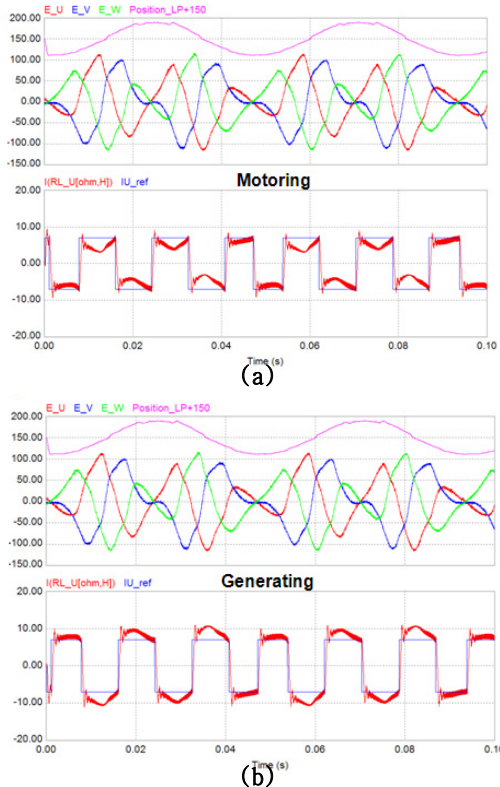


Fig. 10 동일 위치의 전동/발전모드시 U상 전류  
(a) 전동모드, (b) 발전모드

발전기 모델링을 토대로 특성값( $k_m$ )을 설정하고 위치 이동은 리니어 운동을 하는 것을 고려하여 양 끝에서 속도가 느려지다가 0이되는 sine으로 가정하였다. 동일 위치에서 역기전압은 전동모드와 발전모드 동일하지만 전류의 극성은 두 그림이 반전된 위상이다. 전동모드시에는 전류가 전압과 반대 위상으로 전력이 소비되고 있으며 발전모드시에는 전류와 전압이 같은 위상으로 전력이 LSI로 흐름을 알 수 있다.

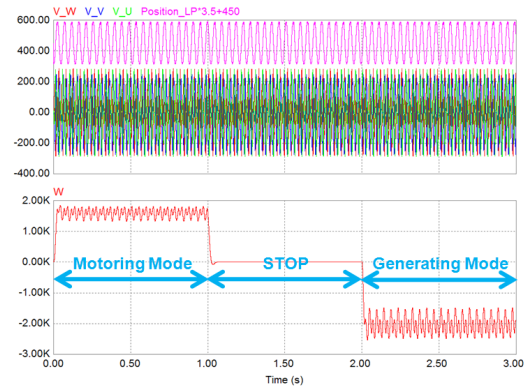


Fig. 11 전동모드→PCS정지→발전모드 시퀀스 test

그림 10과 같은 전동모드, 발전모드의 검증 후, 시스템 시퀀스를 확인하였다. 그림 11에서 알 수 있듯이 먼저 1초간 발전모드를 수행하여, 정상적인 이동자의 움직임, 역기전압과 전력을 관찰하였다. 그 후 1초간 MSC의 동작을 멈추고 물리적으로 이동자에 힘을 가했을 경우 전력의 이동은 없지만 역기전압이 형성됨을 확인하였고, 마지막으로 1초간 발전모드를 수행하여 전력이 LSI로 전달됨을 확인하였다.

## 5. 결론

선형발전기의 적절한 제어를 위해 발전기에 대한 이해와 모델링으로 PCS 제어 방법의 가능성을 확인하였다.

현재 다이오드 정류기와 MSC로 이루어진 단방향 전력변환이 가능한 PCS를 이용하여 전동모드의 타당함을 검증되었다. 위에서 확인한 내용을 토대로 양방향 전력수수가 가능한 PCS를 제작하여 시스템에 적용할 계획이다.

## 후기

본 연구는 고효율 수소에너지 제조·저장·이용 기술 개발 사업단의 21세기 프론티어 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- [1] 노태석, 김강출, 우영민, 이용균, 류정인, 이영재, "수소연소 리니어엔진의 동적특성에 대한 연구", 2006 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1841~1846
- [2] Hoyong choi, Jaewon lim, Hyunkyo jung, Sunki hong, Donghyeok cho, Sangyeon hwang, Sidoek oh, "Design of Flat-type linear Generator for Free-Piston Engine", 2004, ICEMS
- [3] 김경수, 정승기, 최준영, 오시덕, "수소연소 선형 발전기의 초기 기동", 2008 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부분회 춘계학술대회논문집, pp. 110~112