

수소연소 동력시스템용 1kW급 리니어 발전기 개발 및 성능평가에 관한 연구

노 태석¹⁾, 공 민석²⁾, 임 희수³⁾, 오 시덕⁴⁾

A Study on Performance Evaluation and Development of 1kW Linear Generation System using Hydrogen Fueled Power

Taeseok Noh, Minseok Kong, Heesu Lim, Sidoek Oh

Key words : Linear Generator, Hydrogen, Free Piston, Distributed Generation, Linear system

Abstract : 최근 대두되고 있는 에너지 문제와 더불어 대체에너지 개발 및 에너지의 이용효율을 높이려는 연구가 많이 이루어지고 있다. 수소에너지는 비 탄소계 연료로서 그 중요성에 대한 인식이 높아지고 있으며, 다양한 분야에서 수소에너지를 이용하기 위한 노력이 이루어지고 있다. 수소는 재순환이 가능하고, 환경에 미치는 영향이 적기 때문에 미래형 에너지원으로 각광을 받고 있다. 수소이용 기술 중 연료전지는 에너지 변환효율이 높고 유해 배출물이 생성되지 않아 차세대 발전시스템으로 유망하지만 비용과 기술적 제약으로 단기간에 상용화하기에는 어려움이 있다. 따라서 저비용, 고효율의 수소에너지를 이용할 수 있는 시스템 개발이 요구되고 있다. 리니어동력/발전시스템은 저비용으로 제작이 가능하고 기존 기술의 인프라를 활용할 수 있는 장점과, 크랭크 기구가 없기 때문에 얻어지는 변환손실, 열손실을 최소화 할 수 있는 효율의 장점 때문에 고효율의 수소 이용 기관으로 평가되고 있다.

본 연구에서는 수소이용 동력시스템의 직선운동을 전기적인 에너지로 변환 할 수 있는 고효율의 리니어 발전시스템 개발을 위해 Prototype의 평판형 및 원통형의 리니어발전기를 제작했고 각각의 성능에 대한 평가와 엔진과 발전기의 연계운전 결과를 비교하여 시스템 전체에 대한 성능예측을 했으며 연계운전을 통해 출력된 발전기의 출력과형을 PCS로 변환하여 정현파의 AC 출력을 얻었다.

subscrip

PCS : power conditioning system

LM : linear motion

1. 서 론

리니어 동력/발전시스템이란 크랭크가 없는 직선 왕복 운동 형태의 엔진을 동력원으로 하는 발전 시스템을 말한다. 크랭크가 없기 때문에 기계적인 에너지 변환 손실을 최소화 할 수 있고 팽창에너지를 최대한 활용 할 수 있는 장점이 있어 수소이용을 위한 고효율 기관으로 평가되고 있다. 특히 최근에 수소경제에 대비한 분산형 전원, 하이브리드 자동차의 동력원으로 수소를 사용하는 고효율 동력원이 부각됨에 따라 국내외에서도 활발한 연구가 이루어지고 있다.^{1,4-5)}

국내에서는 현재 수소 프론티어사업의 일환으로 수소연소 리니어 동력/발전시스템의 개발 과

제가 (주)효성과 (주)엔진텍의 컨소시엄 형태로 추진되고 있다. 2003년도부터 연구를 진행하고 있으며, 1단계(2003-2006)에서 1kW급 Prototype 제작 및 평가를 실시하였고, 2단계(2007-2009)에서는 5kW급 개발을 진행 중이다.

본 연구에서는 수소를 연료로 사용하는 리니어 동력 시스템에 적합한 발전시스템 개발과 성

-
- 1) (주) 효성 중공업연구소
E-mail : nots97@hyosung.com
Tel : (02)707-4307 Fax : (02)707-4399
 - 2) (주) 효성 중공업연구소
E-mail : mskong@hyosung.com
Tel : (02)707-4396 Fax : (02)707-4399
 - 3) (주) 효성 중공업연구소
E-mail : limhs@hyosung.com
Tel : (02)707-4375 Fax : (02)707-4399
 - 4) (주) 효성 중공업연구소
E-mail : ohsidk@hyosung.com
Tel : (02)707-4360 Fax : (02)707-4399

능을 평가하기 위한 시험 장치를 구성하여 운전속도별 효율과 손실 특성을 살펴보고 동력시스템과 연계하여 측정된 발전기 출력 파형과 비교하여 발전시스템의 성능에 대한 검증을 실시했다.

2. 시험장치 및 방법

2.1 리니어 동력/발전시스템

2.1.1 리니어 동력 시스템

Fig. 1과 같이 리니어 동력/발전 시스템은 중앙에 리니어 발전기를 중심으로 구동원인 엔진이 양단에 결합되어져 있는 형태를 가지고 있다. 발전기와 엔진의 피스톤은 하나의 축으로 연결이 되어져 있어 한쪽의 엔진이 폭발하면 반대편 엔진이 압축되어 지고 축과 연결이 된 발전기의 무버도 같이 움직이도록 되어져 있다.

기존의 엔진은 피스톤의 왕복운동을 크랭크 장치를 이용하여 회전력을 얻는 방식을 취하기 때문에 동력변환에서의 손실이 발생하게 되고 크랭크에 구속된 행정길이 때문에 팽창에너지의 일부를 배기로 버리게 되어 열손실도 발생하게 된다. 그러나 리니어 엔진의 경우는 크랭크의 구속이 없어 팽창력을 최대한 활용 가능하고 동력변환 손실이 없어 고효율을 달성 할 수 있는 동력 시스템이다. 하지만 기계적인 구속력이 없기 때문에 자유도가 높아 연소 시 마다 TDC가 변하고 위치별 속도가 변경되어 제어가 어렵고 관성력을 저장할 수 있는 기구가 없어 실화 발생시 엔진이 정지하는 단점이 있다.

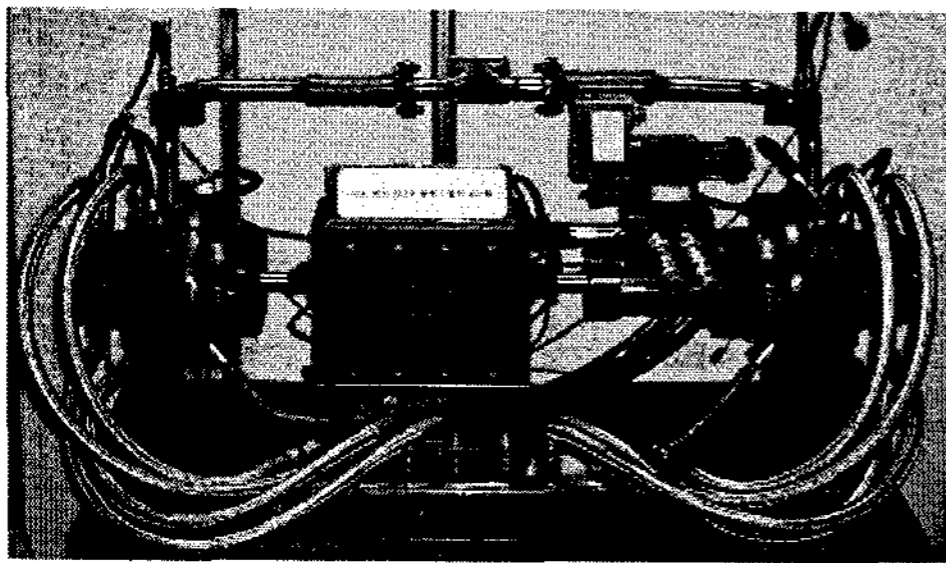


Fig. 1 Front view of Linear Power/Generation System

2.1.2 리니어 발전 시스템

Fig. 2는 동력시스템에 설치하기 위해 제작한 평판형 및 원통형 타입의 리니어 발전기 개념도이다. 리니어 발전기는 리니어엔진의 직선운동을 바로 전기에너지로 변환할 수 있는 에너지변환장치이며, 일반적으로 회전형 발전기 보다 효율이 떨어지지만 엔진의 동력변환에 의한 손실을 줄일 수 있기 때문에 동력/발전시스템 측면에서는 효율의 이득을 볼 수 있다.

Table 1과 같이 발전기는 30Hz의 동작주파수에서 1kW 출력을 내도록 설계되어졌으며 300V, 2극 3상의 AC출력 사양을 갖는다. 발전기의 스트로크는 엔진의 스트로크를 기준으로 설정되었고

순간 속도는 6.11m/s 로 설계하였다. 상세 치수는 Table 2에 나타낸다.

직선 왕복운동을 하기 때문에 왕복운동에 적합한 지지구조에 대한 고려가 필요했고 평판형의 경우는 LM 가이드를 사용하였고 원통형은 리니어 볼 부쉬를 사용하였다.

리니어 동력시스템에서 왕복운동을 하게 되면 하나의 축으로 연결된 무버가 왕복운동을 하여 전기적인 출력을 발생하게 된다. 일반 발전기와는 달리 리니어발전기의 출력 파형은 계통전원의 정현파와는 상이하기 때문에 PCS에서 변환하여 사용가능한 파형과 전압으로 조정을 해주게 된다.

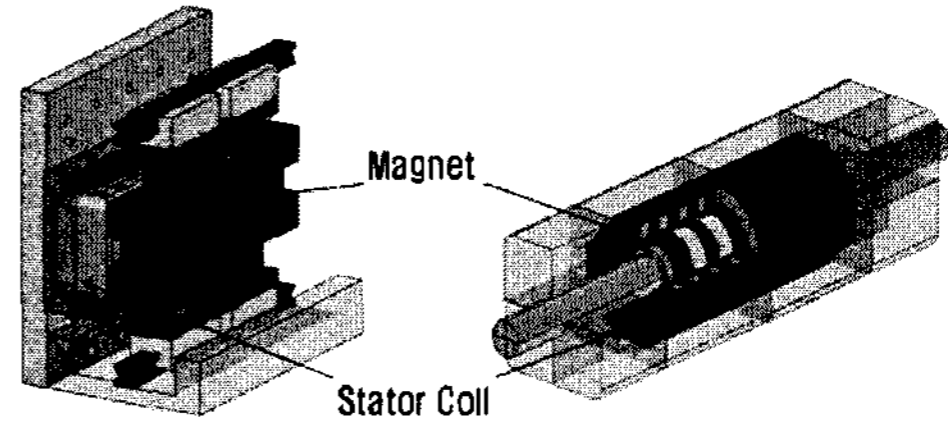


Fig. 2 Shape of Flat & Cylinder type Linear Generator

Table 1 Specifications of the Linear Generator

| Item | Specification |
|---------------------|----------------|
| Output | 1[kw] |
| Pole/Phase | 2 pole 3 phase |
| Stroke | 72[mm] |
| Maximum Voltage | 300[V] |
| Maximum Velocity | 6.11[m/s] |
| Operation Frequency | 30[Hz] |

Table 2 Dimensions of the designed Linear Generator

| (unit : mm) | | | |
|-------------|--------------------------|-------|------------|
| Item | | Flat | Cylinder |
| stator | Teeth Pitch | 24 | 12 |
| | Teeth width | 11 | 12 |
| | Teeth height | 24 | 88 |
| Mover | Pole pitch | 36 | 17 |
| | Magnet width | 29 | 15, 18, 24 |
| | Magnet height / Diameter | 7/14 | 50 |
| | Air gap | 1 | 2 |
| Total | length | 216 | 260 |
| | Height / Diameter | 94/84 | 88 |

2.2 시험장치 및 방법

리니어발전기의 성능을 측정하기 위한 시험장치는 Fig.3과 같이 발전기 구동장치, 인버터, Power Analyzer, Oscilloscope, 부하저항, 전력

변환기로 구성된다.

현재 제작된 리니어 엔진으로는 여러 범위의 속도를 제어하기 힘들기 때문에 이와 같은 테스트장치를 따로 제작하여 속도별 발전기의 성능을 측정하였고 Fig.4와 같이 구동장치를 제작하였다. Fig.4의 모터는 발전기를 동작시켜주기 위한 구동원이며 크랭크장치가 부착되어져 모터의 회전운동을 직선운동으로 변환하여 리니어 발전기의 무버에 전달하게 된다.

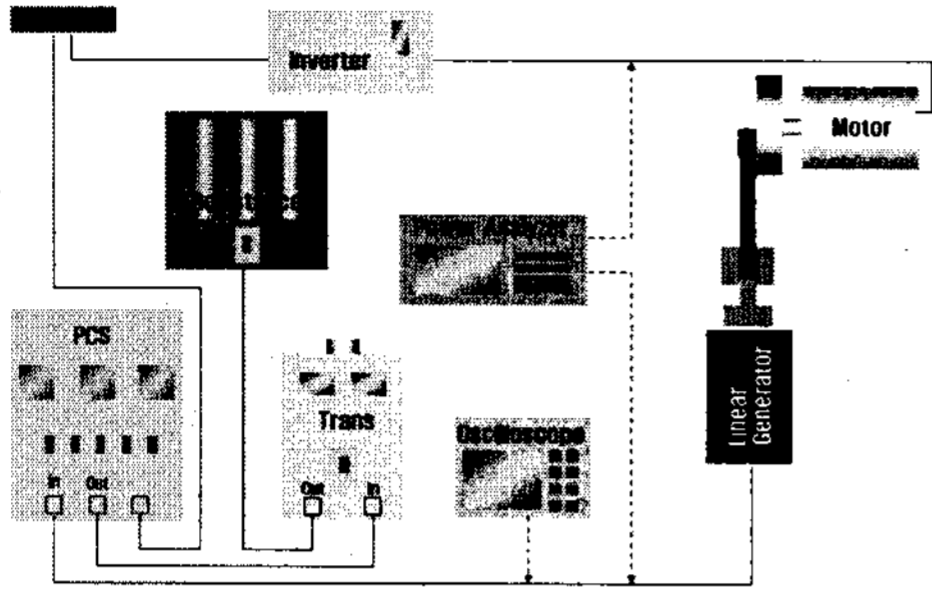


Fig. 3 Plan of Generator test system



Fig. 4 Test rig for Linear Generator

발전기의 성능테스트는 발전기의 출력과 철손, 동손을 측정하여 운동주파수별 효율을 구하도록 수행되었다. 모터의 회전수를 인버터로 조정하여 발전기의 속도주파수를 30Hz, 45Hz, 53Hz, 57Hz, 60Hz로 고정하고 이때의 효율을 측정했다.

발전기의 동손은 발전기 출력단에 부하저항을 연결했을 때와 제거했을 때 구동장치에 입력되는 전력량을 측정하여 두 값의 차이로 구했으며, 철손은 무부하시의 입력되는 전력량과 발전기의 스테이터를 분리했을 때의 입력되는 전력량을 측정하여 두 값의 차이로 계산하였다.

시험장치의 엔진동력 모사에 대한 검증은 리니어엔진과 발전기를 연계하여 리니어엔진의 구동동력으로 발전기를 작동했을 때 출력되는 발전기의 파형과 동일 Hz일때의 발전기 성능 시험장치를 통해 측정된 출력 파형 비교를 통해 수행하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 발전기 단독 성능평가

Fig. 5는 평판형과 원통형발전기의 철손을 비

교한 그래프이다. 그래프에서 보여지는 것처럼 평판형이 원통형보다 철손이 컸으며 그 차이는 속도의 증가와 함께 커지는 특성을 보였다.

Fig. 6은 동손을 비교한 그래프이다. 동손역시 속도의 증가와 함께 증가하였고 평판형이 원통형보다 큰 특성을 보였다.

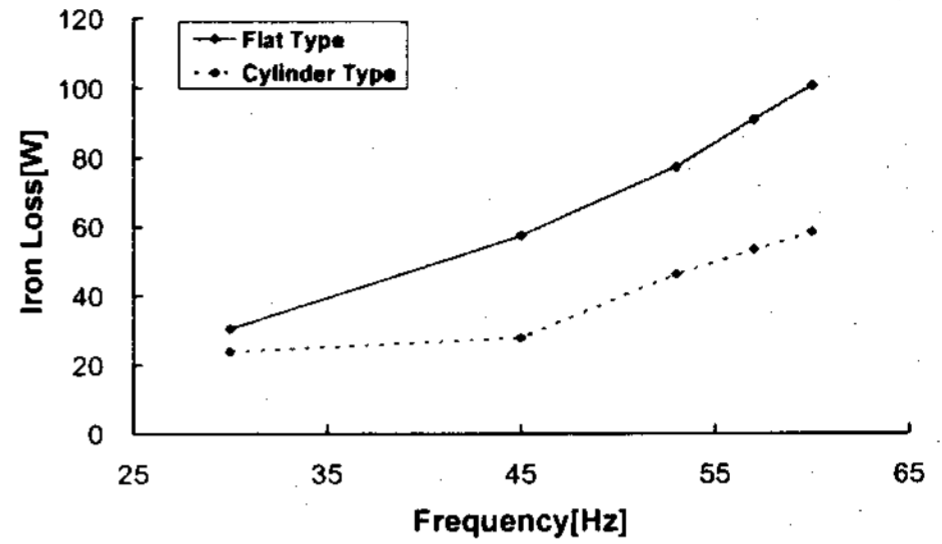


Fig. 5 Iron loss of Flat and Cylinder Type Linear Generator

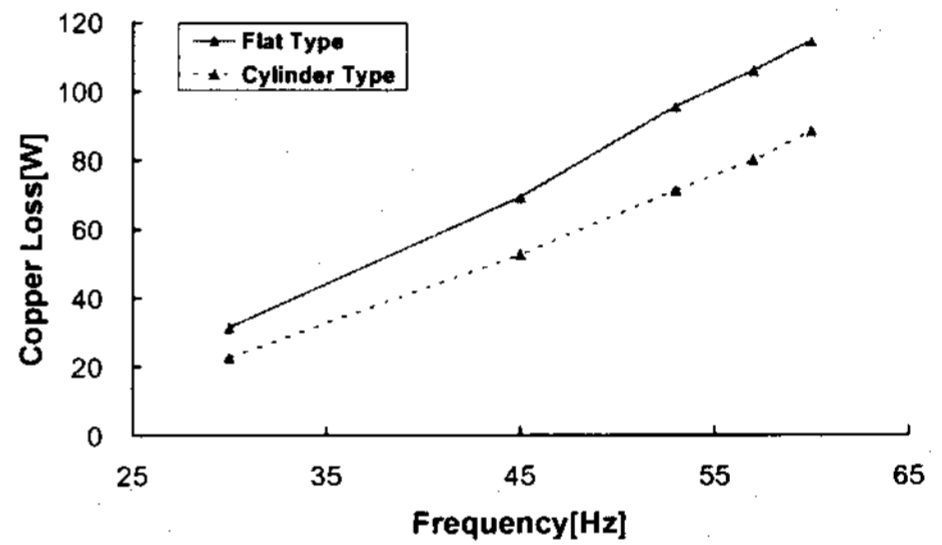


Fig. 6 Copper loss of Flat and Cylinder type Linear Generator

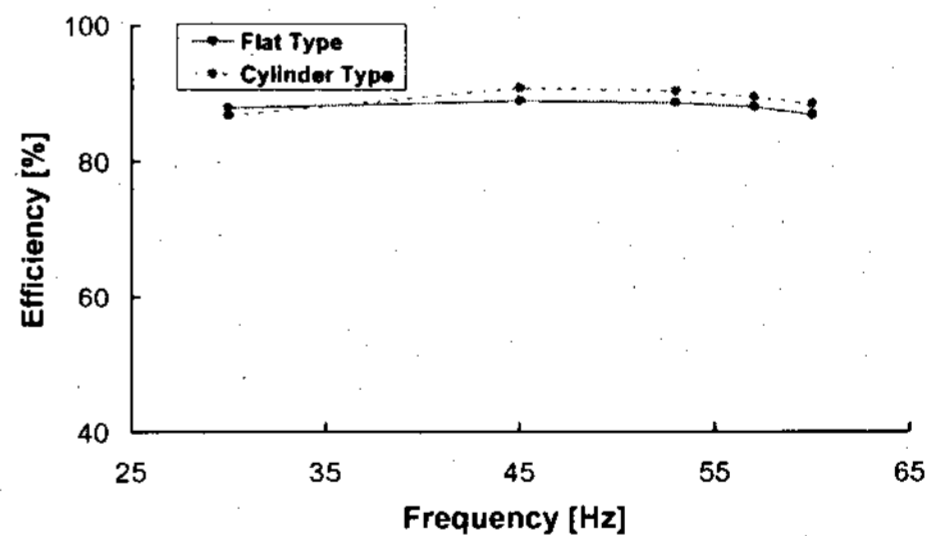


Fig. 7 Efficiency of Flat and Cylinder type Linear Generator

Fig.7은 평판형과 원통형 발전기의 속도별 효율을 나타내고 있다. 평판형과 원통형 모두 45Hz의 운전속도영역에서 가장 높은 효율을 보였고 이때의 값은 평판형이 89%, 원통형이 90.8%이다.

발전기의 속도주파수가 30Hz일때 출력은 약 310W, 45Hz일때 650W, 60Hz일때 약1100W의 출력 값을 얻었다.

향후 발전기 성능장치 개선 및 보완, 반복 실험을 통하여 평판형 발전기와 원통형 발전기의 성능 특성에 관한 연구를 지속할 예정이다.

3.2 엔진&발전기 연계시스템 성능평가

국외에서도 리니어 동력/발전시스템에 대한 연구는 이루어지고 있으나 엔진발전기의 연계운전에 대하여 공개된 성과보고는 거의 없는 상태이며 Sandia Lab.의 평가보고서에 약20분정도의 연속운전이 있었다는 기록이 있을 뿐이다. 현재 약50분간 엔진발전기 연계시스템의 연속운전이 가능했고 PCS의 변환을 통하여 185W의 AC출력을 내었다.

Fig.8과 9에 발전기 성능 시험장치에서 발전기 단독으로 측정된 출력 파형과 엔진과 발전기를 연계했을 때의 출력 파형을 비교했다.

Prototype 리니어엔진의 정격 운전속도는 30Hz 이나 구조 및 제어의 문제로 목표속도 보다 낮은 영역에서 운전이 되었으며 엔진의 연속운전속도 영역이었던 15-18Hz일 때의 출력파형과 16Hz일 때의 발전기 단독 시험 출력파형을 비교하였다. 비교 결과 그림에서 보는바와 같이 동일한 출력파형을 갖는 것을 알 수 있다.

따라서 시험장치에서 측정된 발전기의 효율과 출력은 엔진과 연계했을 때에도 동일하게 얻을 수 있다고 할 수 있다.

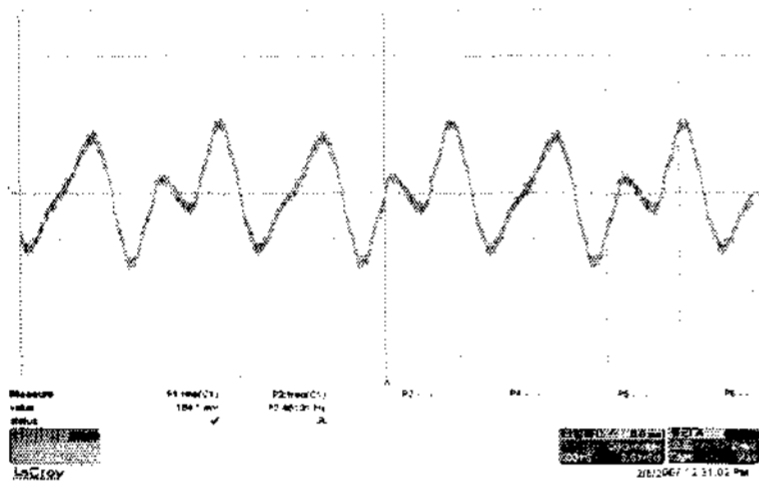


Fig. 8 Output pulse at 16Hz of Generator only

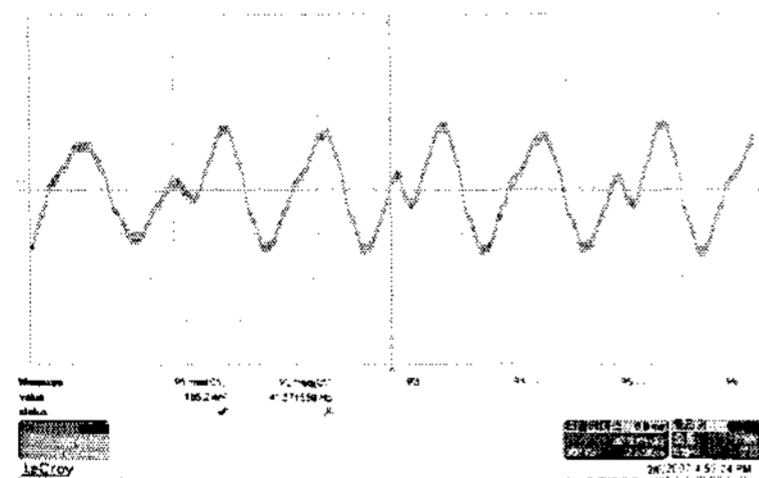


Fig. 9 Output pulse at 15-18Hz of Linear Engine and Generator

Fig.10은 엔진과 발전기의 연계운전 시 PCS를 통해 AC출력으로 변환된 파형이다. 운전조건은 13Hz이며 이때의 출력은 185W였다. 현재는 기구적, 제어상의 문제로 엔진의 속도가 정격30Hz에 못 미치는 13Hz의 속도로 운전되어 출력이 185W지만 엔진성능이 개선되어 정격속도로 동작한다면 1kW의 출력을 달성할 수 있다는 것을 발전기 단독 성능시험 결과를 통해 예측할 수 있다.

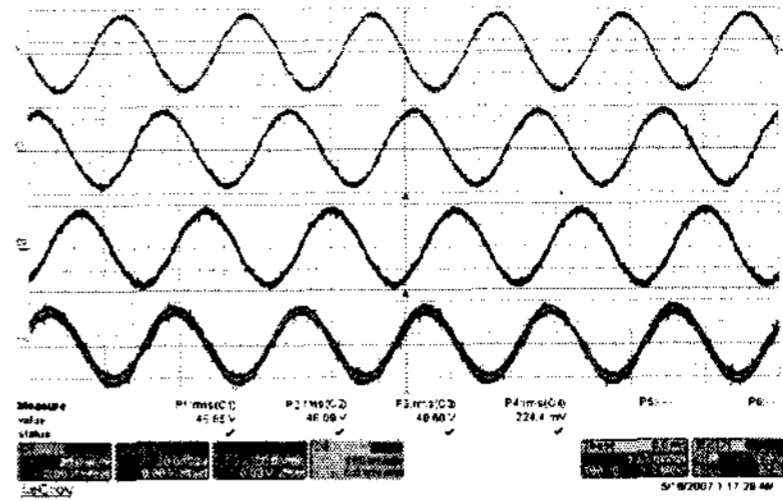


Fig. 10 AC Output pulse converted through PCS of Engine-Generator System

현재 엔진의 목표속도달성과 성능최적화를 위하여 시험 및 개선이 진행되고 있으며 연구결과를 바탕으로 추후 시스템 재설계, 제작 및 평가를 수행할 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 수소연소 리니어 동력시스템에 적용될 1kW급 리니어 발전기의 개발을 위한 연구가 시행됐고 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 리니어 동력시스템용 1kW급 발전기는 30Hz 동작시 2극 3상의 300V 1kW급 출력으로 평판형과 원통형 두 타입을 설계/제작하였다.
- 2) Prototype을 평가한 결과 철손 및 동손은 운전속도가 증가함에 따라 증가하였고, 평판형이 원통형보다 높은 특성을 보였다.
- 3) 제작된 평판형 및 원통형 발전기는 45Hz에서 가장 높은 효율 특성을 보였다. 원통형 발전기의 최대효율은 90.8%, 평판형 발전기의 효율은 89%로 원통형 발전기가 평판형보다 높은 특성을 보였다.
- 4) 동일 운전속도영역에서 발전기 단독 및 엔진 발전기 연계시의 출력파형은 동일했고 이는 발전기 단독시험 결과가 연계 후에도 적용될 수 있다는 것을 검증한다.
- 5) 13Hz의 엔진&발전기 연계운전 결과 PCS의 변환 AC출력은 185W였다. 발전기 단독성능 측정 결과의 타당성이 검증된 측면에서 30Hz연계운전시 AC 변환출력 1kW급을 달성할 것이라 판단된다.

본 논문에서 얻어진 결과를 바탕으로 동력/발전시스템의 연계테스트 및 성능평가를 수행 중이며, 5kW급 개발에 반영할 예정이다.

후 기

본 연구는 고효율 수소에너지 제조·저장·이용 기술개발 사업단의 21세기 프론티어연구개발사업 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Waqas M. Arshad, Thomas Backstrom, Peter Thelin and Chandur Sadarangani, August 2002, "Integrated free-piston generators : an overview", Proceedings of the Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORpie 2002), Stockholm, Sweden.
- [2] Peter A. J. Achten, "A Review of Free Piston Engine Concepts", SAE paper 941776, 1994.
- [3] 양시원, 2006, "1kW급 수소리니어 발전기 열 해석", 한국 신·재생에너지학회 2006년 춘계학술대회 논문집, pp.29-32.
- [4] 이영재, 2005, "수소연소 리니어 동력시스템 성능평가 및 최적화 연구", 고효율 수소에너지 제조·저장·이용 기술개발 사업단 워크샵, pp.371.
- [5] 임재원, 2006, "Free-Piston 엔진용 원통형 선형 발전기의 개발", 2006 KIEE EMECS학회 추계학술대회 논문집.