

Free-piston 엔진용 원통형 선형 발전기의 기동을 위한 동특성 해석

김영욱^{*}, 임재원^{*}, 최호용^{*}, 홍선기^{**}, 정현교^{**}
 서울대학교^{*}, 호서대학교^{**}

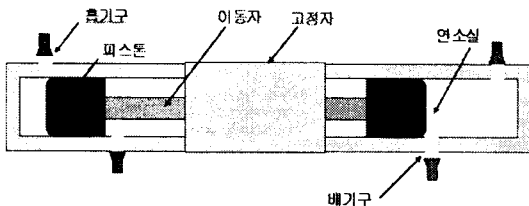
Starting Mode Analysis of Tubular-type Linear Generator for Free-Piston Engine with Dynamic Characteristics

Young-wook Kim^{*}, Jae-Won Lim^{*}, Ho-Yong Choi^{*}, Sun-ki Hong^{**}, and Hyun-kyo Jung^{**}
 Seoul National University^{*}, Hoseo University^{**}

Abstract - 본 연구에서는 Free-piston 엔진용 원통형 선형 발전기의 전동기 운전을 이용한 기동에 관한 연구를 수행하였다. Free-piston 엔진의 피스톤이 흡기, 압축, 폭발, 배기 과정에 따라 정상 상태로 왕복운동을 하기 위해서는 기동 시 정지상태인 피스톤을 외부의 힘으로 움직여 연소실에 있던 공기를 밀어내고, 연료를 연소실 안에 흡입한 뒤 다시 압축시켜 플러그를 통해 폭발시켜 주어야 한다. 이 과정에서 별도의 전동기를 사용하는 대신 Free-piston 엔진에서 사용하는 원통형 선형 발전기를 전동기로 사용하여 엔진의 기동을 위해 요구되는 속도와 토크를 만족시키는지 동특성 해석을 하였고, free-piston 엔진을 기동시키기에 충분한 속도와 토크를 낼 수 있다는 결론을 얻었다.

1. 서 론

Free-piston 엔진은 그림 1과 같이 연소실의 폭발력에 의한 피스톤의 직선운동을 그대로 이용하는 엔진이다. 일반 회전형 엔진이 엔진 내부에서 피스톤의 직선운동을 크랭크와 로드를 통해 회전운동으로 바꾸어 주는 반면 free-piston 엔진은 피스톤의 직선운동을 그대로 이용하므로 선형발전기와 연결하면 운동변환장치에 의한 손실 없이 높은 시스템 효율을 기대할 수 있다. 엔진 내부에서는 피스톤의 운동을 통해 흡기, 배기가 일어나고 피스톤의 관성을 이용해 연료를 압축한 뒤 플러그에 의한 점화를 통해 폭발력을 얻어 다시 왕복 운동할 수 있는 힘을 얻는데, 초기 기동 시에는 피스톤이 정지상태에 있기 때문에 피스톤의 운동과 관성을 이용한 흡기, 배기, 연료 압축이 불가능하다. 일단 정지상태에 있는 피스톤은 전동기를 사용하여 움직여 주어야 하는데 본 연구에서는 free-piston 엔진에서 사용하는 원통형 선형 발전기를 기동 시에 전동기로 사용하여 피스톤이 정상 상태에서 왕복 운동할 때까지 움직여 주려 한다. 원통형 선형 발전기의 전동기 운전으로 기동 시에 필요한 속도와 힘을 만족시킬 수 있는지 결정하기 위해서 기기가 낼 수 있는 속도와 힘의 관계를 나타내는 능력곡선을 정의하였고, 요구되는 속도와 힘의 관계를 나타내는 운전 궤적에 의한 속도-추력곡선을 정의하여 이 두 곡선의 비교를 통해 운전 가능성을 결정하였다.

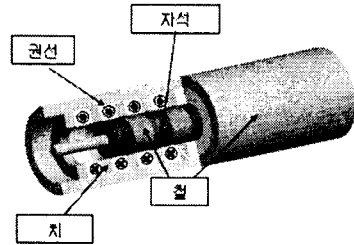


<그림1> free-piston 엔진

2. 본 론

2.1 원통형 선형 발전기

그림 2는 원통형 선형 발전기의 단면도이다. 평판형 발전기에 비해 원통형 선형 발전기는 힘을 발생시키지 않고 동손만 발생시키는 엔드부 권선이 없기 때문에 전반적인 효율이 더 높고, 이동자가 원통형 이므로 특별한 가공 없이 피스톤의 로드와 연결할 수 있는 장점이 있다. 원통형 선형 발전기의 권선을 가동자 측에 구성하게 될 경우 권선연결을 위한 부가적인 지지 구조 등을 필요로 하기 때문에 고정자를 권선형으로 하고 이동자에 영구자석을 사용하였다. 이동자는 축 방향으로 자화된 자석과 철폴로 이루어진 폴슈(pole shoe)를 이용하여 반경 방향 자속을 만들 수 있도록 하였다.



<그림2> 원통형 선형 발전기

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

<표1> 선형 발전기의 설계사양

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

2.2 선형 발전기의 전동기 운전 해석

2.2.1 기기의 동특성 해석

동특성 해석을 위해서는 먼저 기기의 능력 곡선(최대 추력 vs 속도)과 운전 궤적에 의한 속도-추력 곡선(필요추력 vs 속도)를 정의한다. 기기의 능력 곡선은 기기의 전압과 전류 제한에 따라 기기가 낼 수 있는 최대 추력과 속도를 나타낸 곡선이고, 운전 궤적에 의한 속도-추력 곡선은 free-piston 엔진을 기동시키기 위해 필요한 운전 궤적을 정의 한 뒤 그 운전 궤적에 따라 기기가 동작하기 위해 필요한 추력과 속도를 나타낸 것이다. 기

기의 동작 가능성을 결정하기 위해서는 이 능력 곡선과 운전 궤적에 의한 속도-추력 곡선을 비교하여 능력곡선이 운전 궤적에 의한 속도-추력 곡선보다 항상 높은 경우 동작 가능한 것이고, 그렇지 않을 경우 기기가 필요한 추력을 내지 못하여 동작 할 수 없는 것이다.

2.2.2 능력 곡선

선형 기기에서 d-q 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V_d = R_s i_q + L_d \frac{di_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau_p} v L_q i_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s i_d + L_q \frac{di_q}{dt} + \frac{\pi}{\tau_p} v L_d i_d + K_e v \quad (2)$$

이동자의 구조를 생각할 때 d-q 제어가 유리하고, 본 연구에서는 $i_d=0$ 제어를 통해 제어하려 한다.

$$F_x = K_f i_q = m \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

$$K_f = \frac{3}{2} K_e \quad (4)$$

(3),(4)를 (1),(2)에 대입하고 전압 방정식을 이용하면 추력 방정식을 얻을 수 있다.

$$F_{\max} = \frac{3}{2} K_e \min \left\{ \frac{-R_s K_e v + \sqrt{C_1 - C_2}}{R_s^2 + v^2 L_q^2 (2\pi/\tau)^2}, I_{\max} \right\}$$

$$C_1 = (R_s^2 + v^2 L_q^2 (2\pi/\tau)^2) V_{\max}^2$$

$$C_2 = K_e L_q v^2 (2\pi/\tau)$$

$$C_3 = -R_s \left(K_e v + \frac{2L_q}{3K_e} \left(m \frac{da}{dt} \right) \right) \quad (5)$$

최대 추력식 (5)는 전압제한과 전류제한 모두를 포함하는 식이다. 식(5)를 운전궤적에 따라 그린 것이 기기의 능력 곡선이 된다.

2.2.3 능력곡선과 운전궤적에 의한 속도-추력 곡선
원통형 선형 발전기의 운전 가능성을 결정하기 위해서 사다리꼴 가속도 운전 궤적을 정의하였다. 본 연구에서 전기적 기계적 사양은 다음과 같다.

$$R_s = 1.25[\Omega], \quad L_q = 0.063[mH], \quad \tau_p = 36[ms]$$

$$K_e = 31.9[V/(m/s)], \quad m = 4.33[kg],$$

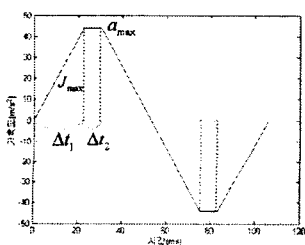
$$V_{\max} = 200[V], \quad I_{\max} = 5[A],$$

요구되는 성능은

$$a_{\max} = 44.1[m/s^2], \quad v_{\max} = 1.36[m/s],$$

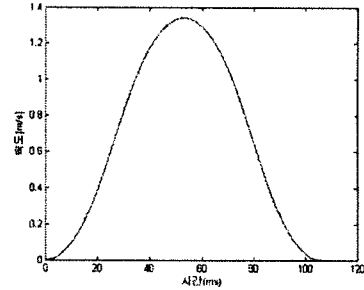
$$J_{\max} = 1951[m/s^3], \quad \Delta t_1 = 22.6[ms],$$

$$\Delta t_2 = 7.8[ms]$$

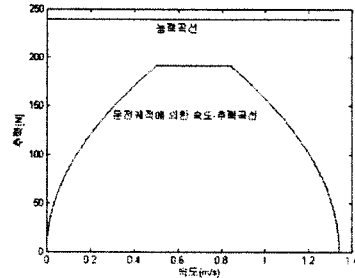


<그림3> 사다리꼴 가속도 운전 궤적

그림 3은 전동기 운전을 위해 필요한 가속도 궤적이다. 스트로크가 매우 짧고 이동자가 매우 짧은 시간 안에 최고 가속도, 최소 가속도에 도달해야 하기 때문에 등가속도 구간이 매우 짧다. 그림 4는 순간적으로 최고속도에 도달하고 순간적으로 멈추어야 하는 이동자의 속도 궤적을 나타낸다. 가속도 궤적으로부터 요구되는 추력을 계산할 수 있고 식(5)를 통해 능력 곡선을 그릴 수 있다. 그림 5는 능력곡선과 요구되는 추력을 나타낸 것이다. 능력 곡선이 항상 운전 궤적에 의한 속도-추력 곡선보다 위에 있기 때문에 본 연구에 사용된 원통형 선형 발전기는 free-piston 엔진의 기동 시에 필요한 추력을 충분히 낼 수 있다는 결론을 얻게 된다.



<그림4> 속도 궤적



<그림5> 능력곡선과 운전궤적에 의한 속도-추력 곡선

3. 결 론

본 연구에서는 동특성을 고려하여 free-piston 엔진용 원통형 선형 발전기를 이용한 기동을 해석하였다. 동작 가능성을 알기 위해 기기의 능력 곡선과 운전궤적에 의한 속도-추력 곡선을 구하였고, 기기의 능력 곡선이 모든 속도에 대하여 운전궤적에 의한 속도-추력 곡선보다 높기 때문에 본 연구에서 사용된 원통형 선형 발전기로 free-piston 엔진을 기동시킬 수 있다는 결론을 얻었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Waqas M. Arshad, Thomas Backstrom, Peter The lin 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] J.M. Dupont, "Paper in a journal", Proc.IEEE,vo 1.81, pp.905-913, June 1993
- [4] 정상용, "고추력용 철심형 영구자석 선형동기전동기 특성해석 및 설계", 서울대학교, pp.43-54, 2004