

초고속 전동발전기의 구동특성 평가

Evaluation of Driving Characteristics on Ultra High Speed Motor-generator

홍도관* · 주대석* · 우병철**

Do-Kwan Hong, Dae-suk Joo and Byung-Chul Woo

1. 서 론

현재 배터리가 가진 한계를 극복하고, 향후 국방 분야에서 휴대용으로 차세대 군용전원용 500W급 마이크로 터빈 발전기 시스템이 컴팩트한 구조로 개발되고 있다⁽¹⁾. 본 논문은 출력밀도 500W급의 마이크로 터빈 발전기 시스템의 심장역할을 하는 전동발전기를 설계하고, 전기적 해석과 기계적 해석을 통해서 결정된 사양으로 제작하였다. 고속영역까지 전기적인 성능평가를 확인하고, 기계적인 구동특성 평가를 수행하였다. 속도 증가에 따라 소음특성과 회전체 변위 특성을 평가하였으며 ISO 10816-3을 기준으로 회전기계의 허용진동평가를 평가하였다. 전동발전기를 고정하는 지그를 일체형과 분할형 V블록으로 하여 초고속 전동발전기의 구동특성 평가를 수행하였다.

2. 초고속 전동발전기의 구동특성 평가

2.1 초고속 전동발전기

Fig. 1은 마이크로 터빈 발전기 시스템과 전동발전기의 성능평가를 위한 전동발전기의 형상을 나타내고 있다. Table 1은 전동발전기의 사양을 나타내며, 전동모드의 경우 200,000rpm에서 구동되며 약 400W의 출력을 가지고 있다. 마이크로 터빈 발전기에서 구동은 공기베어링으로 적용되어 있으며, 본 논문에 적용된 전동발전기의 경우 세라믹 볼베어링으로 적용되어 있다. 적용된 베어링은 앵글러 컨택트 베어링으로 회전속도와 예압량에 따라서 베어링

강성이 변화하며, 특히 예압의 정도에 따라서 구동 특성에 큰 영향을 준다.

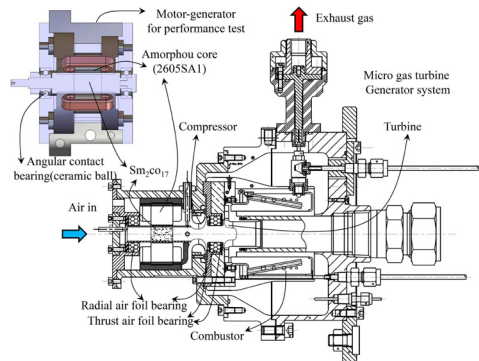


Fig. 1 Microturbine generator system and motor-generator

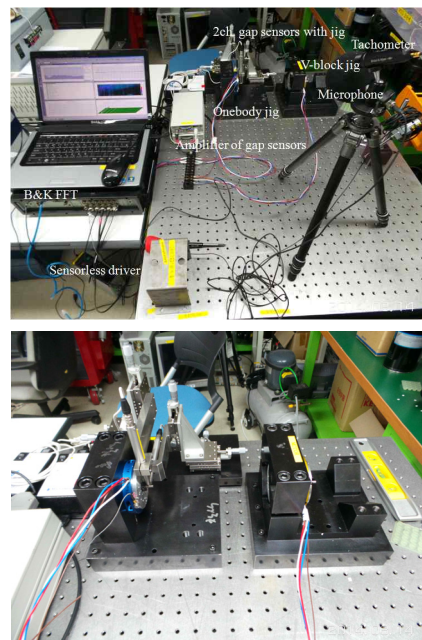


Fig. 2 Prototype, sensors and test equipments

† 교신저자; 정희원, 한국전기연구원 전동력 연구센터
E-mail : dkhong@keri.re.kr

Tel : 055)280-1395, Fax : 055)280-1490

* 한국전기연구원 전동력 연구센터

본 연구에 사용된 베어링은 150,000rpm까지 구동 가능하며, 내륜에 예압을 적용하여 예압을 주기위한 볼트 및 너트 부분의 불평형에 의해서 회전체의 진동이 크게 작용하였으며, 발란싱을 통해서 불평형을 크게 제거하였다. G등급으로 약 5정도로 발란싱을 수행하였다.

초고속 전동발전기를 전동모드로 안정적인 회전 속도 100,000rpm까지 구동특성을 평가하였다. 제작된 전동발전기를 고정하고 고속구동하기 위해서 V블록 지그와 일체형 지그에 각각 고정하여 구동특성을 평가하였다. Fig. 2은 성능평가를 위한 시험장치, 전동발전기 시작품 및 측정장비를 나타낸다. 회전자의 변위를 측정하기 위한 2채널 캡센서와 전동기 허용진동 평가를 위한 가속도센서 및 소음측정을 위한 마이크로폰을 이용하였으며, 회전속도에 따라 진동 및 소음 평가하기 위해서 타코미터와 B&K FFT 분석 및 order 분석을 이용하여 동특성을 평가하였다.

Table 1 Motor-generator specifications

Item	Value	Unit
Pole/Slot	2/6	-
No. of phase	3	phase
Stator outer diameter	44	mm
Rotor outer diameter (NdFeB35EH, PM)	11.6 (9.2)	mm
Stack length	14.4	mm
Motoring rated power	400	W
Motoring rated speed	200,000	rpm
Generating rated power	800	W
Generating rated speed	400,000	rpm

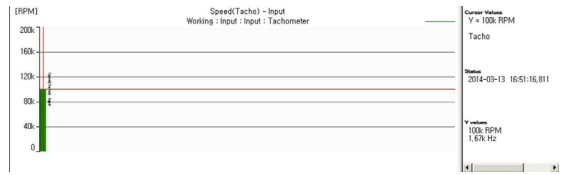
Conditions : air foil bearing

2.2 구동특성 평가

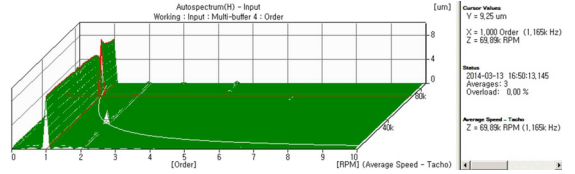
(1) V블록 지그

Fig. 3은 V블록 지그에 고정된 전동발전기 시작품을 100,000rpm까지 구동할 때 구동특성 결과를 나타내었다. Fig. 3(a)는 타코미터를 이용하여 전동발전기의 구동속도를 나타낸다. Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)는 캡센서를 이용하여 회전체의 수평 및 수직방향 진동변위의 차수분석(order analysis)을 나타낸다. 1차 오더가 지배적으로 나타나며, 불평형에 의한 진동성분이 대부분이라고 할 수 있다. 수평방향의 진동변위가 수직방향의 진동변위보다 더 크게 발생하

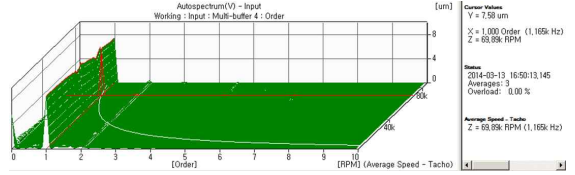
였으며 각각 9.25 μ m와 7.58 μ m로 발생하였다. 약 70,000rpm에서 V블록지그의 공진주파수가 있어서 피크가 발생한 것을 알 수 있다.



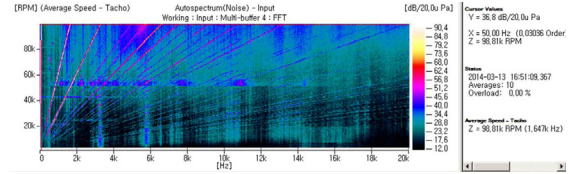
(a) Tachometer



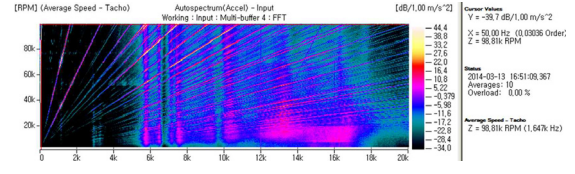
(b) Order analysis horizontal displacement of rotor



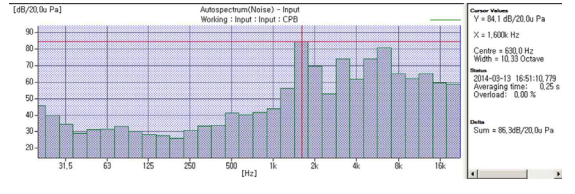
(c) Order analysis vertical displacement of rotor



(d) FFT analysis of noise signal (waterfall)



(e) FFT analysis of vibration acceleration (waterfall)



(f) Octave analysis

Fig. 3 Noise and vibration results of prototype supported by v-block jig

Fig. 3(d)는 마이크로폰을 이용하여 소음의 주파수 분석을 나타내었으며, Fig. 3(e)는 베어링 케이싱

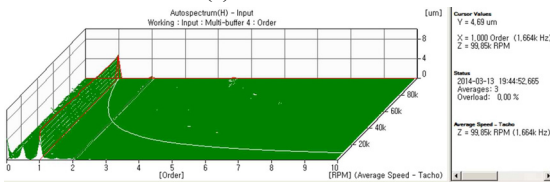
부의 수평방향 진동가속도 신호의 주파수 분석을 waterfall로 나타내었다. 수평방향 진동가속도를 적분하여 진동속도로 환산한 후 회전기계의 허용진동 평가기준인 ISO 10816-3을 근거로 하여 평가해보면 강지지에 그룹 2 C/D 영역(4.5mm/s_{rms})을 넘어서는 것을 평가할 수 있었다. ISO 10816-3의 주파수 영역은 1,000Hz미만이나 고속전동기의 1X주파수가 높기 때문에 주파수 영역을 10,000Hz로 하였다. 이럴 경우 진동속도는 약 10mm/s_{rms}을 넘는 것으로 나타나서 허용 불가한 것으로 평가되었다. Fig. 3(f)는 1/3 옥타브 분석결과를 나타내며, 가청주파수범위의 음압레벨은 약 86.3dB(A)을 나타낸다. 소음 또한 최대 구동속도에서 1X성분이 지배적으로 나타났다.

(2) 일체형 지그

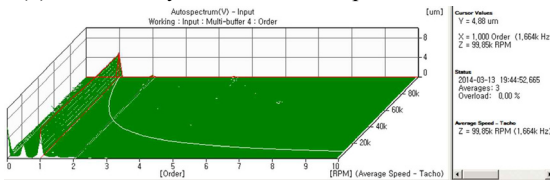
Fig. 4는 일체형 지그에 고정된 전동발전기 시제품을 100,000rpm까지 구동할 때 구동특성 결과를 나타내었다. Fig. 4(a)는 타코메터를 이용하여 전동발전기의 구동속도를 나타낸다. Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)는 갠센서를 이용하여 회전체의 수평 및 수직방향 진동변위의 차수분석(order analysis)을 나타낸다. 1차 오더가 지배적으로 나타나며, 불평형에 의한 진동성분이 대부분이라고 할 수 있다. 수평방향의 진동변위가 수직방향의 진동변위보다 더 크게 발생하였으며 각각 4.69 μ m와 4.88 μ m로 발생하였다.



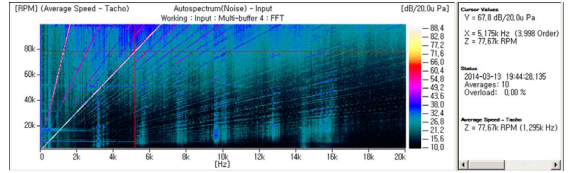
(a) Tachometer



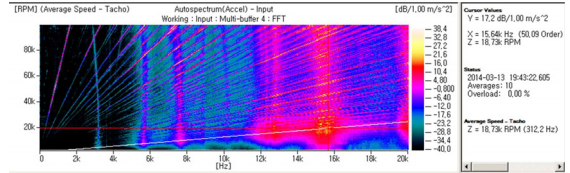
(b) Order analysis horizontal displacement of rotor



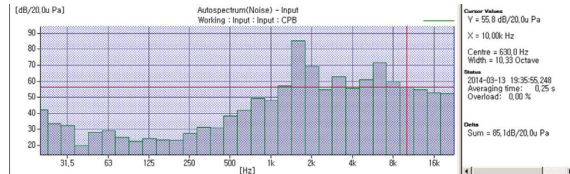
(c) Order analysis vertical displacement of rotor



(d) FFT analysis of noise signal (waterfall)



(e) FFT analysis of vibration acceleration (waterfall)



(f) Octave analysis

Fig. 4 Noise and vibration results of prototype supported by one body jig

앞서 V블록지그에서 나타난 약 70,000rpm에서 공진주파수의 피크는 발생하지 않았다. 100,000rpm까지 전반적으로 진동특성이 양호하게 나타났다. Fig. 4(d)는 마이크로폰을 이용하여 소음의 주파수 분석을 나타내었으며, Fig. 4(e)는 베어링 케이싱부의 수평방향 진동가속도 신호의 주파수 분석을 waterfall로 나타내었다. 수평방향 진동가속도를 적분하여 진동속도로 환산한 후 회전기계의 허용진동 평가기준인 ISO 10816-3을 근거로 하여 평가해보면 강지지에 그룹 2 A/B 영역(2.8mm/s_{rms}) 이내에 들어오며 안정적으로 구동함을 확인할 수 있었다. Fig. 4(f)는 1/3 옥타브 분석결과를 나타내며, 가청주파수범위의 음압레벨은 약 85.1dB(A)을 나타낸다. 소음 또한 최대 구동속도에서 1X성분이 지배적으로 나타났다.

3. 결 론

본 논문은 출력밀도 500W급의 마이크로 터빈 발전기 시스템의 심장역할을 하는 전동발전기의 고속 구동 시 발생하는 회전체 진동변위 측정과 소음 및 회전기계의 진동평가를 V블록 지그와 일체형 지그

에 따라서 결과를 분석하였다. 고속 구동 시 V블록 지그일 때 1차 공진주파수가 내포되어 있고, 전체적인 소음 및 진동의 크기가 전반적으로 크게 발생하는 것을 확인하였으며, 고속구동 시에는 일체형 지그가 안정적인 지지가 되는 것을 확인하였다. 그리고, 앵글러 컨택트 베어링의 경우 내륜에 예압을 주는 구조는 예압량을 맞추기가 어렵다. 또한 진동발전기 2대를 유연커플링으로 연결하여 성능평가를 해야하는데, 커플링을 연결하는 축의 끝단직경이 4mm로 매우 작고, 베어링 내륜에 예압을 주게 되면 회전체 끝단이 탄성영역 내에서 휘어지게 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 초기에 회전체 NRRO (non-repeatable runout) 진동 변위를 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 베어링 외륜에 예압을 주는 구조가 더 효율적이며, 회전자의 발란싱과 베어링 내륜에 예압을 가함으로 인해서 회전자의 끝단이 휘는 문제를 해결 할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소 지원으로 수행되는 차세대 군용전원특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Hong, D. K., Joo, D. S., Woo, B. C., Jeong, Y. H. and Koo, D. H., 2013, Investigations on a Super High Speed Motor-Generator for Microturbine Applications Using Amorphous Core, IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 49, No. 7, pp. 4072~4075.
- (2) Hong, D. K., Woo, B. C., Koo, D. H., Jeong, Y. H. and Min, S. K., 2010, Allowable Vibration Verification of Ultra High Speed Motor, Proceedings of the KSPE Annual Autumn Conference, pp. 665~666.