

발전기 고정자 프레임의 모드 매개변수 규명

⁰류석주* · 김철홍* · 박종포* · 서명덕** · 김호종*

Modal Parameter Identification of a Generator Stator Frame

Seok Ju Ryu, Cheol Hong Kim, Jong Po Park, Myung Deok Seo, Ho Jong Kim

ABSTRACT

The modal testing results of a generator stator frame for a 500 MW fossil power plant are presented, which will be used to tune and to validate the finite element model of the stator frame.

1. 서론

발전기는 회전부인 계자(field)와 고정부인 전기자(armature)로 구성되며, 계자는 여자기(exciter)에서 공급되는 전류가 권선(field winding)의 코일에 흐름으로서 전자석이 되어 자속(flux)을 발생시키며, 전기자는 계자에서 발생한 자속의 통로를 형성하여 코어(core)에 조립된 전기자 코일로부터 전류를 발생시킨다. 대형 발전기에서는 통상 전기자는 정지해 있고, 계자가 회전하기 때문에 기계적으로 계자를 회전자(rotor)라 하고 전기자를 고정자(stator)라 지칭한다. 발전기는 계자의 극 수에 따라 2극, 4극 및 다극 발전기 등으로 구분되는데, 일반적으로 500MW급 이하 대형 화력 발전기는 2극(Fig. 1 참조), 500MW 이상 대형 원자력 발전기는 4극, 수력 발전기는 다극을 채용하고 있다.

고정자 프레임은 전기자 core, 회전자, 수소 냉각기(hydrogen cooler) 및 고압부싱(high voltage bushing) 등을 지지하며, 냉각 매체인 수소 가스를 수용하여 강제 순환되는 수소가스의 통로를 제공하고, 비정상적인 상태에서도 충분한 강도를 가질

수 있도록 설계, 제작되어지는 원통형 압력 용기이다. 이와 같은 발전기 고정자 프레임을 설계하는데 있어 고려할 사항은 프레임 내에서 가스의 흐름에 필요한 공간 확보 및 원활한 흐름의 유지, 프레임 내부에 부착되는 여러 요소들의 기능 수행을 위한 공간 제공, 프레임의 고유 진동수와 강성(stiffness)의 설계 한계 등이다

발전기 고정자 프레임에 발생하는 진동은 회전자에 의한 자장이 회전하면서 발생하는 전자기력(electromagnetic force)이 고정자에 전달되면서 일어난다. 일반적으로 60Hz의 전기를 생산하는 화력 발전소용 발전기의 회전자는 3600rpm으로 회전한다. 이 경우 회전자는 N 및 S의 두 극을 가지는데 양극에서 전자기력에 의하여 고정자를 끌어 당기게 된다(Fig. 3 참조)[1,2]. 이것이 회전하면 회전 주파수의 두 배(120Hz)에 해당하는 주파수의 전자기력에 의해 원통형 쉘 형태의 고정자 프레임은 원주 상에 절점(nodal point)이 4개인 4절 형태의 진동 형상을 갖는다. 원통형 쉘의 진동 이론[3,4]에 의하면 이는 원주 방향의 절 직경(nodal diameter) 수(n)가 2인 것에 해당하며, 극 수가 4개인 경우는 8개의 절점(n=4)을 갖는다.

2극 발전기에서는 n=2인 모우드를 120Hz의 전자기력이 고정자를 가진하며, 이때 고정자 프레

* 한국중공업 기술연구원 진동연구팀

** 한국중공업 발전기설계실

임 4 절 고유 진동수가 가진 진동수에 일치하면 공진에 의한 과도한 진동과 소음을 야기해 발전기의 운전 및 안전성에 위험한 요소가 된다. 따라서 고정자 프레임의 고유 진동수는 기계적 또는 전자기적 가진 진동 주파수와 충분한 주파수 분리 여유를 갖도록 설계되어야 한다. 본 연구는 발전기의 진동 성능 저하 없이 고정자 프레임의 무게 경량화를 위한 설계 변경 및 유한 요소 모델의 타당성 검증을 위한 기본 자료 마련을 위해 수행되었다.

2. 실험 장치 및 방법

발전기 고정자 프레임의 진동 특성을 실험적으로 규명하기 위하여, 당사에서 제작하고 있는 500MW 발전기 고정자 프레임에 대하여 충격 가진에 의한 모드 시험을 수행하였다. Fig. 3 에 진동 시험 개략도를 나타내었다. 길이 약 9m, 직경 3m 인 고정자 프레임은 공장 내에 콘크리트 바닥에 놓인 각목 위에 수직 4 점 지지된 상태이다. 원주 방향으로 8 개 지점, 축 방향으로 6 개 지점을 응답점으로 선택하여 총 48 점에 가속도계를 부착하고 프레임 측면에 있는 응답점 중 한 점을 반경 방향으로 충격 가진하여, 총 48 개의 주파수 응답 함수를 구하였다. 관심 있는 진동 방향 및 주파수 구간은 각각 반경 방향과 0-200Hz 이다. 이들 주파수 응답 함수로부터 모드 해석 상용 소프트웨어 (LMS CADA-PC)를 이용하여 고유 진동수 및 고유 모드를 추정하였다. 이때 소프트웨어에서 사용한 추정법은 LSCE(least square complex exponential) 및 LSFDF(least square frequency domain)이다.

3. 실험결과 및 고찰

프레임은 원통 형상이기 때문에 그 진동 모드는 원주형(circumferential mode)과 축형(axial mode)이 동시에 나타난다. 원주형의 진동 모드에는 반경 방향(radial direction)과 접선 방향(tangential direction)의 운동이 동시에 나타나지만, 접선 방향의 진폭이 반경 방향에 비해 상대적으로 매우 작다. 이러한 관점에서 측정은 상대적으로 진폭이 큰 반경 방향에 대하여 수행되었다. 원주형의 진동 모드들은 직경절 수 혹은 전파(full wave) 수에 의해 구분 가능하고, 축형의 진동 모드는 반파(half wave)의 수로 구분된다. 통상 전자의 경우를 n 으로, 후자의 경우를 m 으로 표시한다. 즉, 원주방향의 모드는 $n=0-4$, 축방향의 모드는 $m=1-3$ 등으로 표시된다. 이들 원주형과 축형의 각 모드들이 혼합되어 원통형 쉘의 진동 모드를 나타내게 된다.

진동 시험으로부터 추정된 주파수 응답 함수 및 상관 함수(coherence function) 중 일부를 Fig. 4 에 나타내었다. 시험은 제작 중인 공장 내에서 시행되었고, 이들 데이터로부터 최초 5 개의 모드를 추정하였다. 추정된 고유 진동수는 24.25, 79.52, 86.47, 90.5, 102.57 Hz 이며, 해당 고유 모드를 Fig. 5 에 나타내었다. 이들 중 Fig. 5-(c)를 제외한 Fig. 5 (a)~(e)의 그림들은 각각 측면과 정면에서 본 그림들이다. 그리고 Fig. 5-(c)는 평면과 정면에서 본 모양이다.

Fig. 5-(a)를 관찰하면 원주 방향으로 2 절점($n=1$) 모드이며 축 방향으로는 프레임의 탄성 모드라기 보다는 강체 모드에 가까운 겉로 여겨진다. Fig. 5-(b)는 4 절점($n=2$) 모드로 축 중심선에서 동일한 반경 및 각도를 가지는 점들이 동위상으로 진동하는 것을 보여준다. Fig. 5-(c)는 2 절점($n=1$) 모드로 축 방향으로는 굽힘 모드이다. 이는 보의 굽힘 모드와 유사하다. Fig. 5-(d) 와 Fig. 5-

(c)는 4 절점($n=2$) 모드이며 축 방향으로 만화의 수가 1 및 2($m=1,2$)인 모드이다.

관찰에 의하면 추정된 모드들은 원주형에서 2 개 및 4 개의 절점을 가진 진동 모드를 보여주고, 축형에서는 굽힘, 1차 및 2차 모드를 나타내고 있다. 프레임의 진동은 이와같은 원주형 모드와 축형 모드가 동시에 일어남을 알 수 있다.

4. 결론

500MW급 발전기 고정자 프레임의 모드 매개 변수를 규명하기 위하여 실험 모드 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고정자 프레임의 진동은 원주형 진동 모드 뿐만 아니라 축형 진동 모드로 존재하여 이들이 동시에 나타남을 관찰하였다.
- 2) 원주방향으로 4 절 이면서 축방향 모드를 가진 때의 1차, 2차 고유 진동수는 각각 90.5 Hz, 102.57 Hz 이다.
- 3) 이렇게 구한 실험적 모드 해석 결과는 고정자 프레임의 유한 요소 모델의 타당성 검증과 고정자 프레임의 결량화를 위한 기본 자료로 사용 될 것이다.

참고문헌

1. A. L. Penniman, Jr., "Suppression of Magnetic Vibration and Noise of Two-Pole Turbine Generators", paper 41-39, AIEE winter convention, Philadelphia, 1941
2. P. Richardson, "Stator Vibration in Large Two-Pole Generators", IEEE Winter Power Meeting, New York, paper No. 31 CP 66-50, 1966
3. W. Soedel, *Vibrations of Shells and Plate*, Marcel

Dekker, Inc., New York and Basel, 1981

4. S. Markus, *The Mechanics of Vibration of Cylindrical Shells*, Elsevier, Amsterdam, 1988

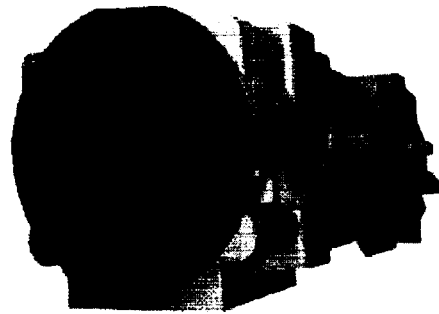


Fig. 1 Two pole generator stator frame

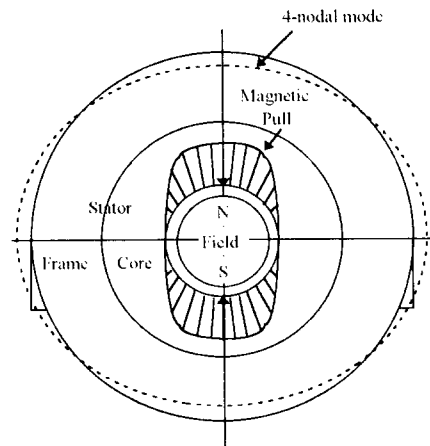


Fig. 2 Magnetic pull of a typical 2-pole generator

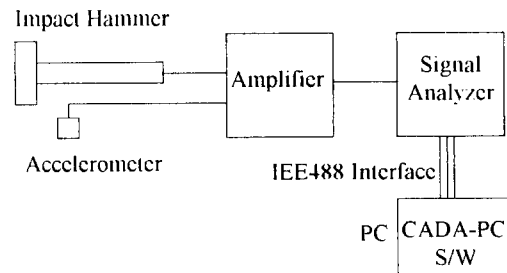
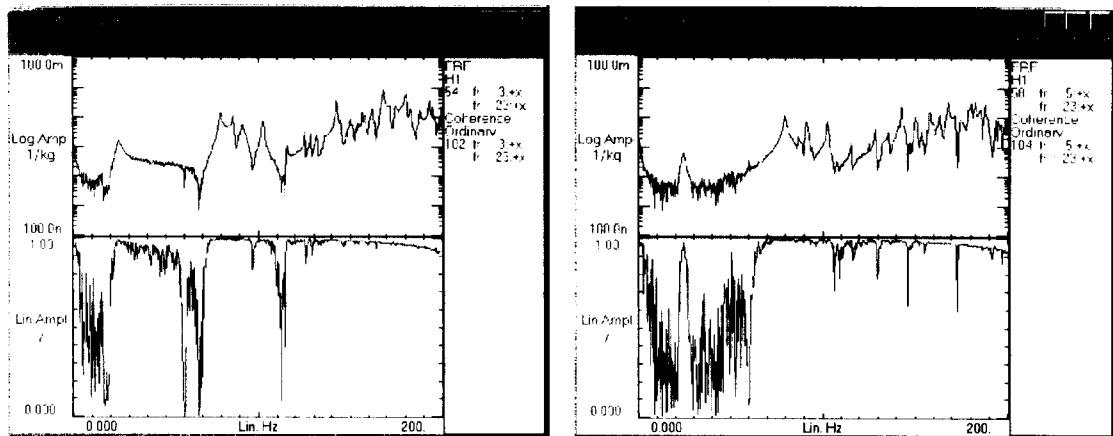


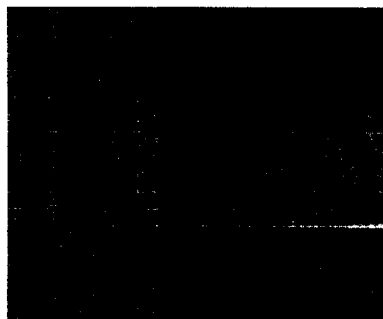
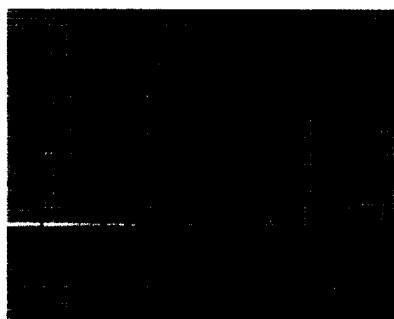
Fig. 3 Schematics diagram of experimental set-up



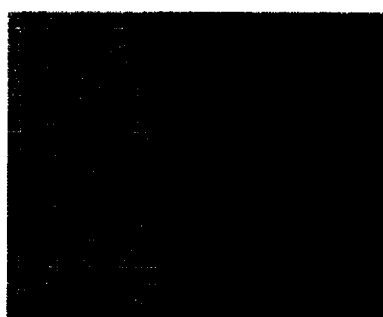
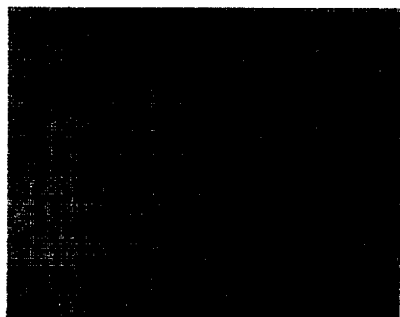
(a) At front-end upper point

(b) At front-end lower point

Fig. 4 Typical frequency response and coherence functions

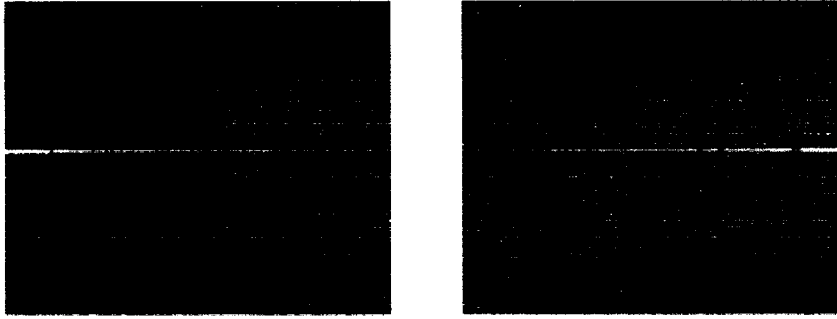


(a) The 1st mode (n=1 ; 24.25Hz)



(b) The 2nd mode(n=2 ; 79.52Hz)

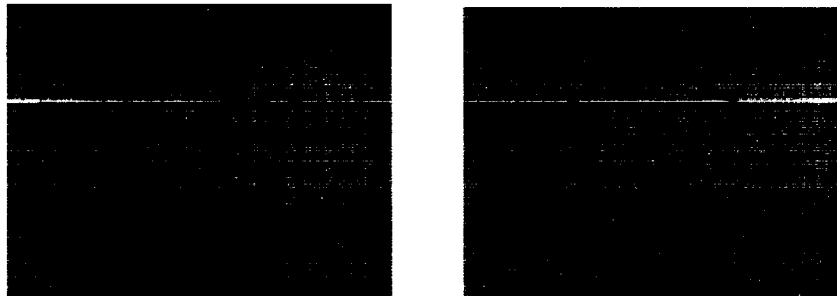
Fig. 5 Mode shapes of the stator frame (continued)



(c) The 3rd mode ($n=1$; 86.47Hz)



(d) The 4th mode($n=2$, $m=1$; 90.5Hz)



(e) The 5th mode($n=2$, $m=2$; 102.57Hz)

Fig. 5 Mode shapes of the stator frame