

# 베어링-지지구조물의 영향에 따른 터빈의 동특성 변화

김희수\*, 배용채\*, 김연환\*, 이현\*, 김성휘\*, 이영신\*\*

## A Study on the Dynamic Characteristics of Turbine due to the Stiffness of Bearing-Pedestal

Heesoo Kim, Yongchae Bae, Yeonwhan Kim, Hyun Lee, Sunghwi Kim, Youngshin Lee

### ABSTRACT

It is impossible to predict accurately the dynamic behavior of turbine-generator system because bearing, and rotor characteristics are nonlinear and different from temperature, load, operation speed and bearing lubricant oil property. Especially, the characteristics of turbine hoods affect much the entire vibration characteristics of turbine. As the dynamic stiffness of turbine hoods are changed, the critical speeds of rotor are shifted.

In this paper, the vibration behavior of turbine-generator is analyzed by using component mode synthesis and the critical speeds measured during shut-down are compared with the analytic results. It is confirmed that the 1st natural frequency and the mode shape are well in agreement with actual measured data.

### 1. 서론

최근의 전력 수요 양상은 주로 주간과 주중에 전력 수요가 집중되는 반면, 야간 또는 주말에 줄어드는 경향이 점점 커지고 있다. 따라서, 빈번한 일일 기동 정지, 주말 기동 정지 등의 운전이 불가피하게 되었으며, 이러한 조건에서 발전 설비가 운용됨에 따라 발전소의 효율 및 설비의 수명이 단축됨은 물론 예기치 못한 갑작스러운 진동 사고의 발생 가능성이 높아져 설비의 운영이 보다 어렵게 되었다. 이러한 환경에서 회전체를 구성하는 블레이드, 베어링, 커플링, 쉘 등에서 진동 문제가 빈번하게 발생되고 있으며, 특히 로터의 하중을 지지하면서 터빈 시스템의 안정성을 유지시키는 역할을 하는 베어링에서 진동이 가장 많이 발생하고 있다.

발전 설비용 대형 저널 베어링은 이론적인 근거보다는 오랜 경험에 의해서 시스템의 안정성과 효율을 도모하기에 적합한 구조로 발전되어 왔다. 초기에는 단순히 축의 하중을 지지하기 위한 목적

으로 원형 저널 베어링이 사용되었으나 점차 시스템이 대형화, 고속화되면서 타원형 또는 텀팅 패드 저널 베어링이 사용되고 있다.

탄성 기초 위에 있는 터보-회전체의 진동 거동을 해석하는 것은 설계와 설치의 최적화에 있어서 매우 중요한 문제이다. 터빈-발전기의 진동 거동을 예측한다는 것은 마치 정확한 일기예보를 하는 것과 같다. 정교한 모델링 기법을 사용함으로써 터빈-발전기의 고유진동수에 대해서는 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수는 있지만 진동 가진에 대한 응답에는 약간의 불확실성이 존재한다. 각 로터는 일반적으로 강체 플랜지 커플링으로 연결되어 있으며 이 커플링은 고전적인 지지 원리인 2개의 베어링 사이에 위치하고 있다. 특히, 저압터빈의 경우는 고압터빈 및 발전기와 달리 강한 콘크리트 기초 위에 베어링이 설치되어 있지 않고 터빈 하부 케이싱 즉, 후드(hood)라는 구조물 위에 설치되어 구조물의 강성에 따라 베어링에 미치는 등가강성이 달라져 회전체 진동 특성이 크게 변하게 된다. 일반적으로 베어링 유막 강성에 대한 지지구조물 강

\* 한국전력공사 전력연구원

\*\* 충남대학교 공과대학 기계설계공학과

성의 비율이 대략 3.5배 이하이면 구조물의 탄성 영향을 고려하여야 한다고 알려져 있다. 따라서, 대형 터보 회전체의 진동 특성을 예측하기 위해서는 슬리브 베어링 계통(베어링, 페데스탈, 후드) 특성, 축 정렬 불량이나 슬리브 베어링에 주는 진동 특성과 로터의 부분별 온도 분포 차이 등을 고려하여야 한다.

대부분의 연구는 단순 로터에 관한 이론적 연구들이며 베어링 지지구조물의 영향 및 로터의 온도 분포 차이를 감안한 연구는 거의 없는 실정이다. 특히, 여러 로터로 구성되는 대형 터빈-발전기에 대한 실험 및 해석에 관한 연구는 미미하다. 따라서, 본 연구에서는 로터, 베어링, 베어링 지지구조물, 커플링으로 구성되는 대형 터빈-발전기의 베어링 및 베어링 지지구조물의 동특성에 의한 효과가 대형 회전체에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

## 2. 터빈-발전기 동특성 해석

### 2.1 모델링

회전체계를 모델링하는 데 있어서 동역학적 설계 조건은 회전체의 운전 속도 내에 존재하는 위험속도를 가능한 한 운전 속도에서 멀리 떨어지도록 하는 것이다. 이를 위해서는 시스템의 정확한 위험 속도 예측이 필수적이다. 특히, 터빈과 같은 터보 기계의 회전체계는 연속 탄성체로서 무한대의 고유 진동수를 가지고 있기 때문에, 이를 적절히 피하기 위한 위험 속도 예측의 정밀도는 회전체계의 동역학적 모델링의 정확도에 달려 있다.[1,2,3] 따라서 회전체계의 모델링은 회전축-베어링 시스템의 설계를 위한 동특성 해석에 있어서 가장 중요한 부분임을 알 수 있다. 모델링시 기본적으로 필요한 자료는 로터, 블레이드 및 베어링의 제원이다. 이러한 데이터는 제작사 및 현장에서 얻을 수 있으며 특히, 강성 직경을 결정할 때 직경이 급격히 바뀌는 부위, 커플링, 블레이드 그루브에 있어서 직경차이가 15% 이상 발생하는 부분에 대해서는 45° 법칙을 적용하여 모델링하였다.[4,5] 또한, 베어링은 회전체계의 동역학적 거동에 있어서 베어링 하중, 형상, 간극, 길이/직경비와 윤활 특성에 따라 동역학적 거동은 많은 차이가 있을 수 있으며 후드의 특성은 위험 속도와 증폭 계수에 크게 영향을 미치므로 페데스탈 강성이 베어링 강성

의 3.5배를 기준으로 그 효과를 고려해서 설계하여야 한다. 베어링 및 지지구조물의 등가강성은 표 1과 같으며 그림 1은 위의 조건을 고려하여 표준화력 터빈-발전기를 모델링한 그림이다. 발전용 터빈-발전기 로터의 경우 고압터빈(HIP), 저압터빈(LPA, LPB) 및 발전기(GEN)로 구성되는 multi-rotor, multi-bearing 시스템이며 총 길이는 약 37.7m이고, 총 중량은 약 174ton이다.

표 1 베어링 및 지지구조물의 등가 강성계수

	등가 강성계수
HIP	$K_{xx} = K_{yy} = 1.1 \times 10^9 \text{ N/m}$
LP	$K_{xx} = K_{yy} = 2.5 \times 10^9 \text{ N/m}$
GEN	$K_{xx} = K_{yy} = 4.0 \times 10^9 \text{ N/m}$

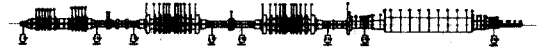


그림 1 터빈-발전기 모델링

### 2.2 고유진동수 및 고유진동모드

베어링 및 후드의 특성을 고려하여 표준화력 터빈-발전기 전체를 모델링하여 부분구조합성법을 사용하여 해석한 결과와 실 측정 결과를 표 2와 그림 3에 각각 나타내었다. 표 2는 터빈-발전기의 고유진동수를, 그림 2는 고유진동모드를 보여주고 있다. 고유진동수 및 고유진동모드 결과를 실제 표준화력 터빈-발전기의 정지시 데이터를 계속하여 확인한 임계속도와 거의 일치하였다. 임계 속도에서의 근사한 차이는 로터의 온도에 따른 물성치의 변화, 베어링의 운전속도별 동특성 변화에 의한 것으로 판단된다. 그림 3은 운전중인 표준화력 터빈-발전기 정지시 베어링에서 측정한 Bode 선도이다.

표 2 고유진동수 및 진동모드

Mode	Natural Frequency(rpm)		reference
	해석	실험	
1st	858.493	870	GEN 1차
2nd	1702.951	1880	LPA 1차
3rd	1871.262	1875	LPB 1차
4th	2001.446	1905	HIP 1차

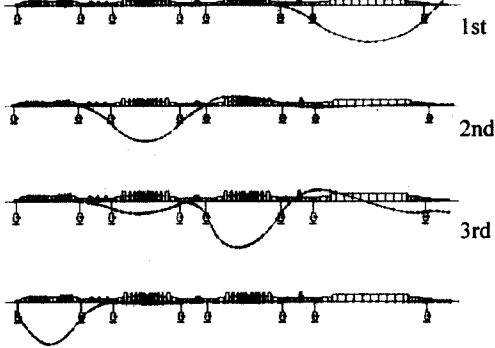
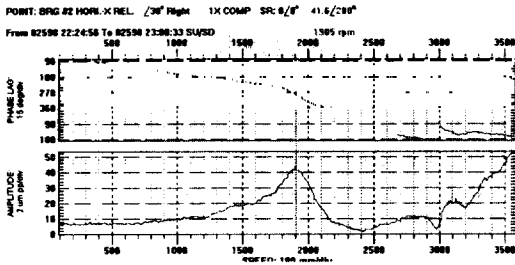
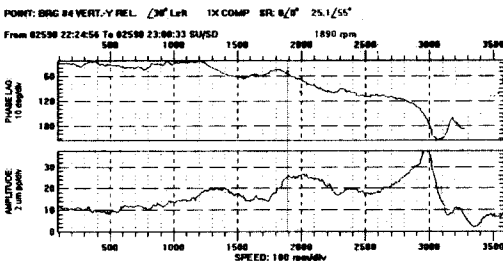


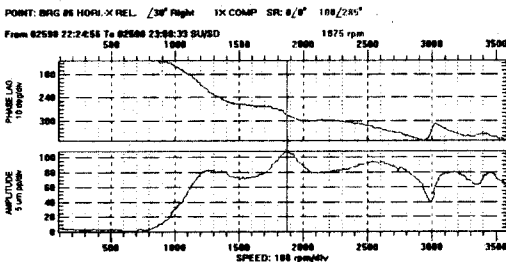
그림 2 터빈-발전기의 고유진동모드



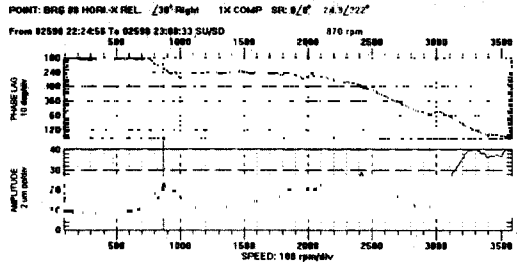
(a) 베어링 #2



(b) 베어링 #4



(c) 베어링 #6



(d) 베어링 #8

그림 3 기동·정지시의 Bode 선도

### 2.3 베어링 지지구조물의 지지강성이 터빈-발전기의 임계속도에 미치는 영향[8,9]

터빈-발전기는 여러 터빈 로터로 구성되어 로터 직경(최대 1.4m)에 비해 로터의 길이(38m)가 상당히 크고 회전속도가 임계속도의 70% 이상에서 운전되므로 한 개의 로터에 2개의 베어링을 갖는 회전기계에 비해 매우 유연함을 예상할 수 있다. 베어링의 지지구조물 강성이 베어링의 유막 강성보다 작아지면 베어링 및 지지구조물의 총 등가강성에는 많은 변화가 있으며 이는 터빈-발전기의 동특성에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 임계속도에서의 진동 진폭이 작은 경우에는 베어링의 지지강성 및 감쇠가 임계속도에는 상당한 영향이 있으며 임계속도를 예측하는 것이 매우 어려워진다. 따라서, 베어링 및 지지구조물의 지지특성이 시스템의 임계속도에 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.[6,7]

베어링 지지구조물의 강성이 임계속도에 미치는 영향을 규명하기 위하여 전력연구원에서 개발한 베어링 해석 프로그램을 이용하여 구한 유막 강성( $4.61 \times 10^9 N/m$ ) 및 감쇠( $1.78 \times 10^7 Ns/m$ )를 고정하고 베어링 지지구조물의 강성을 변화시켰을 때 베어링의 총 등가강성의 변화 상태를 나타낸 것이 그림 4이다. 선형성은 존재하지 않으나 등가강성은  $4.5 \times 10^9 N/m$ 로 수렴됨을 알 수 있다. 즉, 베어링의 등가강성은 탄성작용으로 인해 베어링 유막 강성보다 항상 적게 된다는 의미이고 이들 두 강성의 차이만큼 임계속도에 영향을 준다는 사실을 알 수 있다. 임계속도에 영향을 주는 인자는 로터의 중량 및 강성과 베어링의 등가강성이다. 따라서, 로터의 중량과 강성은 해석시 모델 형상으로부터 주어지는 일정한 상수이므로 베어링의 등가 강성의 크기를 변화시켜 가면서 저

압터빈(LPБ)의 임계속도를 해석하였으며 표 3은 그 결과를 정리한 것이다. 표 3에서 알 수 있는 바와 같이, 저압터빈의 등가강성인  $2.04 \times 10^9 N/m$ 을 기준으로 할 경우 임계속도는 1871rpm이나 이보다 등가강성이 증가되더라도 임계속도의 편차는 작지만 반면에 등가강성이 감소할 경우에는 상당한 편차를 보이고 있다. 일반적으로, 설계 공차를 약 5%로 볼 때 이를 벗어나는 임계속도 1714rpm에 해당하는 지지강성인  $1.5 \times 10^9 N/m$ 가 대형 터빈 발전기의 진동특성에 주는 한계점이라 볼 수 있다.

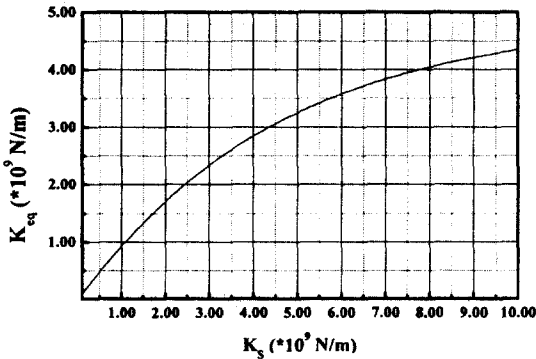


그림 4 베어링 지지구조물의 강성변화에 따른 베어링의 총 등가강성의 변화

표 3 베어링 등가강성의 변화에 따른 저압터빈(LPБ)의 임계속도 변화

Bearing equivalent stiffness ( $K_{eq} \times 10^9$ )	LPB (rpm)	D* (%)	Bearing equivalent stiffness ( $K_{eq} \times 10^9$ )	LPB (rpm)	D* (%)
0.45	1235	34.0	2.04	1871	Basis
0.82	1463	21.8	2.40	1894	0.2
1.39	1680	10.2	2.50	1909	2.0
1.50	1714	8.4	2.92	1963	4.9
1.87	1799	3.8	3.00	1972	5.4

$$* D = \text{difference} = \frac{|RPM_{K_{eq}=2.04} - RPM_{K_{eq}=i}|}{RPM_{K_{eq}=2.04}} \times 100(\%)$$

### 3. 결론

대형 증기 터빈-발전기에 대한 유효한 진동 특성을 해석하기 위해서는 로터 형상에 따른 모델링, 베어링 및 베어링 지지구조물의 강성 및 감쇠계수,

로터의 온도 분포를 고려하여 진동해석을 수행해야 비교적 정확한 진동 예측이 가능할 것으로 판단된다.

1. 운전중인 표준화력 터빈-발전기의 기동·정지 데이터로부터 결정할 수 있는 임계속도와 해석적으로 구한 임계속도는 거의 일치하였다.
2. 베어링 지지구조물의 강성이 베어링 유막 강성의 3.5배 이하이면 임계속도가 5% 이상의 편차가 발생하므로 진동해석을 할 경우에는 이의 영향을 반드시 고려해야 함을 확인하였다.

### 참고문헌

- (1) H. D. Nelson, "A Finite Rotating Shaft Element Using Timoshenko Beam Theory", Trans. of the ASME, J. of Mechanical Design, Vol. 102, pp.793-803, 1991
- (2) 長松, 大熊, "部分構造合成法", 培風館, 1991
- (3) Guyan, R. J., "Reduction of Stiffness and Mass Matrices", AIAA J., Vol. 3, No. 2, pp 380, 1965
- (4) W. D. Pilkey, "Formulas for Stress, Strain and Structural Matrices", John Wiley, 1994
- (5) 김계연, "고리 원전 저압 터빈 회전자 교체 교육 보고서," 한국전력공사, 1996
- (6) Nicholas, J. C., Whalen, J. K. and Franklin S. E., "Improving Critical Speed Calculations Using Flexible Bearing Support FRF Compliance Data," Proceedings of 15th Turbomachinery Symposium, pp. 69~78, 1986
- (7) Lawrence, L. B., Bruce, E. G., Royce, N. B., and Richard, A. L., "Critical Speeds and The Important of Stiffness - A Case Study in The Design and Testing of A Large Mechanical Drive Steam Turbine to API Standard 612," Proceedings of 22nd Turbomachinery Symposium, pp. 73~79, 1993
- (8) 이현, "베어링 지지구조물이 대형 터보-회전체에 미치는 진동 특성 해석 연구," 박사논문, 충남대, 2000
- (9) 김희수, "대형 터빈의 베어링-페데스탈 특성 해석", 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, pp. 737-740, 1999