

비대칭 축강성을 가지는 로터의 2X 진동 예측 The 2X Vibration Prediction of a rotor with Asymmetric Shaft Stiffness

박철현† · 김영춘* · 양보석**

Chul Hyun Park, Yeong Chun Kim and Bo Suk Yang

1. 서 론

대부분의 회전기계에서 사용되는 로터는 원형 단면을 가지고 있지만 그 사용 목적에 따라 원형 단면을 취할 수 없는 로터가 있다. 그 대표적인 것이 발전기 로터인데, 자기적인 극성을 만들기 위하여 로터 단면을 slot 가공을 해야 되기 때문이다.

이러한 단면을 가지는 로터는 상호 직교하는 2 방향에서 현저하게 다른 굽힘 강성을 가지게 때문에 Fig. 1 과 같이 중력에 의해서 로터의 한 회전 당 2 번의 처짐 형상 변화를 겪게 된다. 이것은 마치 회전속도의 2 배의 진동수를 가지는 외부 가진력이 작용하는 것과 같은 효과를 가지며 로터에는 회전속도의 2 배 성분의 진동, 즉 2X 진동이 나타난다. 따라서 이 굽힘 강성의 차가 클수록 2X 진동은 커지게 되며 특히, 회전속도의 2 배수 부근에 로터의 고유진동수가 존재하게 되면 외부 가진력의 진동수와 고유진동수가 일치하여 2X 진동은 허용할 수 없을 정도로 커질 수가 있다.

이러한 로터의 형상에 기인하는 2X 진동을 방지하기 위해서 로터 단면이 모든 방향으로 동일한 강성을 가질 수 있도록 인위적인 작업을 가하게 된다. 통상적으로 발전기 로터의 경우에는 Fig. 2 와 같이 강성이 높은 로터 단면 부위에 Cross Slot 가공을 하여 전체적으로 로터 단면의 강성이 등방성을 가지도록 한다. 그리고 밸런싱을 수행할 때 2X 진동의 크기를 예측하여 제품의 신뢰성을 최종 검증한다.

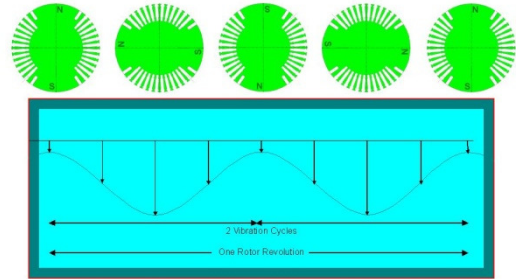


Fig. 1 The concept of the 2X vibration due to asymmetric shaft stiffness

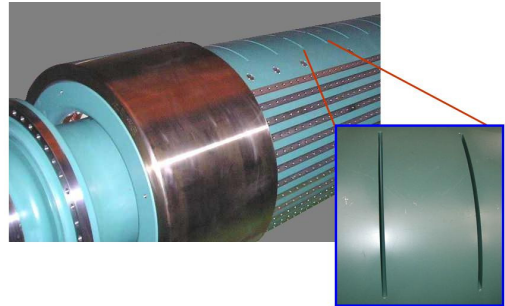


Fig. 2 Cross slots machined in pole to reduce the stiffness

그러나 밸런싱을 수행할 때 예측된 2X 진동치와 실제 현장에서 예측되는 2X 진동치가 상이한 경우가 많기 때문에 QC(Quality Control) 입장으로서의 2X 진동 예측이 무의미해지는 경우가 있다. 이에 따라 신규 발전기 로터의 안정적인 운전을 위하여 보다 신뢰성 있는 2X 진동 예측이 요구되어졌다.

본 논문은 기존보다 더 합리적인 2X 진동 예측 방법을 제시하고 실제 신규 발전기 로터에 적용한 사례를 통하여 본 방법의 타당함을 보여주고자 한다.

† 교신저자; 정회원, 두산중공업㈜

E-mail : chulhyun.park@doosan.com

Tel : 055-278-3710, Fax : 055-278-8528

* 두산중공업㈜

** 부경대학교

2. 사례를 통한 2X 진동 예측 방법 소개

2.1 노후 발전기 교체

외국 기술사에 의해 국내에 공급되어 약 20년 이상 운전 중이던 400MW급 대형 화력 발전기의 교체 공사를 당사가 수행하게 되었다. Fig 3은 터빈을 포함한 전체 회전축계의 개략도를 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전체 터빈/발전기는 4개의 로터로 구성되어 있는 터빈과 1개의 로터로 구성되어 있는 발전기를 포함하여 총 5개의 로터가 6개의 베어링으로 지지되고 있는 다축 다베어링 계(multi rotor - multi bearing system)이며, 정격 회전속도는 3,600 rpm이다.

특이한 점으로는 터빈의 경우는 1개의 로터가 1개의 베어링으로 지지되는데 이는 1개의 로터가 2개의 베어링으로 지지되는 일반적인 터빈 회전축계와는 크게 차이를 알 수 있다. 반면, 1개의 로터로 구성되어 있는 발전기의 경우는 2개의 베어링으로 지지되고 있다.

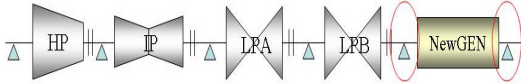


Fig. 3 Schematic of turbine-generator unit

2.2 신규 발전기 로터의 2X 진동

신규 발전기 로터를 제작하고 밸런싱 공장에서 진동을 계측하였다. Fig. 4는 진동 계측 위치를 나타내며 Table 1은 2X 진동 결과를 보여주고 있다. 4번과 5번 위치에서는 설비 구조상 수평과 수직 양쪽을 측정하기가 힘들기 때문에 한 쪽 방향만 측정을 하였다.

Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 전반적으로 높은 2X 진동치를 보이고 있으며, 특히 4번 위치의 수평 방향의 2X 진동치는 허용하기가 힘든 수준이었다. 이에, 보다 합리적인 방법으로 실제 현장에서의 2X 진동치를 예측하는 것이 요구되어졌다.

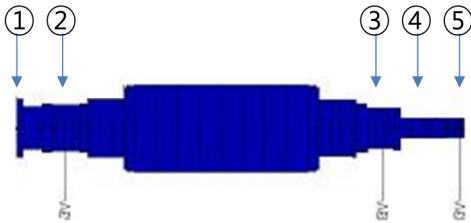


Fig. 4 The measurement location of vibration

Table 1 2X vibration measurements in shop [μm, p-p]

location	1	2	3	4	5
Hor.	27.1	22.6	23.9	64.8	-
Ver.	39.4	6.8	16.6	-	23.0

2.3 2X 진동 예측 방법 개선

기존의 2X 진동 예측 방법의 배경에는 밸런싱 공장에서 계측되는 2X 진동은 바로 현장에서도 똑같이 나타날 것이라는 가정이 숨어있다.

그러나 밸런싱 공장에서의 2X 진동 계측값과 실제 현장에서 계측되는 2X 진동 계측값이 상이한 이유는 밸런싱 공장의 경계조건과 현장의 경계조건이 다름에 기인하여 회전속도의 2배 수 근방의 고유진동수가 바뀌기 때문으로 추측할 수 있다. 그러므로 경계조건을 각각 다르게 한 해석적인 결과를 가중치로 도입하면 보다 신뢰성 있는 예측 값을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 이에 따라 회전속도의 2배수 근방의 고유모드와 감쇠 정도를 나타내는 Q-factor 값을 바탕으로 아래와 같은 2X 진동 예측 식을 제시하였다.

$$R_{\text{site}} = R_{\text{shop}} \times \frac{Q_{\text{site}}}{Q_{\text{shop}}}$$

여기서,

- R_{site} : 현장에서 예측되는 2X 진동
- R_{shop} : 공장에서 계측되는 2X 진동
- Q_{site} : 현장 경계조건에서의 Q-factor
- Q_{shop} : 공장 경계조건에서의 Q-factor

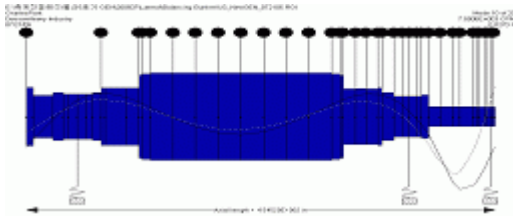
위 식의 의미는 비록 밸런싱 공장에서 계측되는 2X 진동 값이 높다고 할지라도 계의 응답을 결정지우는 감쇠 능력이 충분히 크다면 실제 현장에서는 낮은 2X 진동 값이 나타날 것임을 의미한다. 또한 역으로 밸런싱 공장에서 계측되는 2X 진동 값이 낮다고 할지라도 실제 현장에서의 감쇠 능력이 낮다면 높은 2X 진동 값을 가질 것이다.

2.4 로터다이나믹 해석

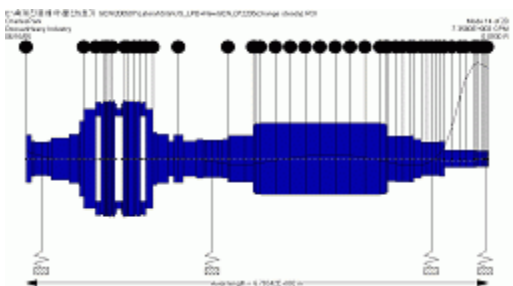
밸런싱 공장 및 현장 경계조건을 고려한 로터다이나믹 해석을 각각 수행하였다. 경계조건을 주요 차이점은 실제 현장에서는 터빈이 커플링으로 강하게 연결되어 있고 베어링 하중이 2배 이상 크며 베어링을 받혀 주고 있는 Pedestal 부의 강성이 높다는

차이가 있다.

Table 2는 운전속도의 2배수 근방의 고유진동수와 Q-factor를 나타내며 Fig. 5는 각각의 모드 형상을 보여주고 있다.



(a) The mode shape in balancing shop



(b) The mode shape in site

Fig. 5 Results of mode shape

Table 2 Results of Natural Frequency and Q-factor

	Shop condition	Site condition
Natural Frequency	7,550 cpm	7,358 cpm
Q-factor	18.5	5.3

상기 해석을 바탕으로 실제 현장에서 발생할 수 있는 2X 진동치를 예측해 본 결과 Table 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과를 통해 적어도 실제 현장에서의 2X 진동은 밸런싱 공장에서의 값보다는 작을 것으로 판단된다.

Table 3 2X vibration prediction at site [μm , p-p]

location	1	2	3	4	5
Hor.	7.9	6.6	6.9	18.8	-
Ver.	11.4	2.0	4.8	-	6.7

2.5 현장 설치 후 2X 진동 측정 결과

Fig. 6은 신규 발전기 로터를 현장에 설치하는 과

장을 보여주는 사진이며, Table 4는 설치를 완료한 후 실제 정격출력(400MW)에서 운전 될 때, 각 베어링에서 측정된 신규 발전기 로터의 2X 진동치를 보여주고 있다. Table에서 알 수 있듯이 밸런싱 공장에서 측정된 것 보다는 낮은 진동치로 운전되고 있음을 확인할 수 있다.



Fig. 6 Installation of new generator

Table 4 2X vibration measurements at site [μm , p-p]

location	Generator		
	No.2	No.3	No.5
Hor.	8.2	9.9	21.5
Ver.	6.5	8.0	10.2

3. 결 론

발전기 로터의 구조적인 형상 때문에 나타나는 2X 진동의 보다 신뢰성 있는 평가 방법을 제시하고 신규 발전기 로터에 적용하여 그 방법의 적합성을 검증받았다. 이 연구 결과는 대형 노후 발전기를 국내에서 최초로 개/보수 하는 과정에서 가장 우려 사항 중의 하나인 동적 안정성을 확보하기 위한 노력의 일환으로 나온 것으로서 향후 신규 발전기 로터 설계 및 QC 자료로 활용되어 국내뿐만 아니라 해외의 신규 발전기에 대한 기술 경쟁력 제고에 일조할 것으로 기대된다.