

발전기 운전에 따른 고정자 권선의 진동 특성 변화

A Study on the Change of Dynamic Characteristics of Stator Windings due to Generator Operation

김희수* · 배용채** · 이두영** · 김연환** · 이 현**

Hee-soo Kim, Yong-chaee Bae, Doo-young Lee, Yeon-whan Kim and Hyun Lee

Key Words : Generator Stator Winding(발전기 고정자 권선), Dynamic Characteristics(동적 특성), Reciprocity Test(상호연관성 시험), Frequency Response Test(주파수 응답 시험), Modal Test(모드 시험)

ABSTRACT

During operation of generator, the excitation force with 120Hz always exist irrespective of No. of poles. Therefore the vibration is generated in the stator end windings and the micro-crack is grown up inside the bars. After all, coolant water is leaked outside the bars or the stator is moved and is worn out. What is more, one bar is touched with another bar so a short circuit may frequently happen in operation. In order to prevent it from occurring, the evaluation of mechanical integrity for generator stator windings is carried out periodically during overhaul period. This help troublesome end windings to complement with insulation material and to change vibration characteristics.

In this paper, the evaluation of mechanical integrity for generator stator windings is described and the change of vibration characteristics is analysed.

1. 서론

발전기의 운전 신뢰성 및 수명 제고를 위하여 정기 예방 점검 기간 중 발전기 로터 및 고정자 권선에 대한 유지 보수를 수행하고 있으며 특히 20년 이상 장기간 운전하여 노후화된 발전기에 대해서는 수명 진단을 수행하고 있다. 최근 자주 발생되고 있는 국내의 발전기 고정자 권선의 냉각수 누수 및 수소 누설 사고의 주요 원인으로 발전기 로터의 회전에 의해 발생하는 전자력에 의한 진동이 보고되고 있다. 이에 전력연구원은 국내 전 발전기를 대상으로 발전기 고정자 권선에 대한 진동 특성 시험을 수행하여 불량 권선에 대해서 보완을 하고 있다.

발전기 고정자 권선의 진동을 유발시키는 힘은 터빈-발전기 로터의 불평형 또는 기계적 결함에 의하여 발생하는 힘과 전자력, 유니트 기동 정지 및 부하 변동에 따른 열 팽창력, 그리고 돌발적인 사고로 인한 단락 또는 계통 분리 등과 같은 비정상 운전 조건에서 발생하는 과도적인 힘 등을 들 수

있으며 발전기 회전자와 고정자 사이에 유기되는 전자력에 의하여 발전기 운전 중 항상 진동이 유발되고 비교적 구속력이 약한 권선 단말 부는 진동에 취약하여 구속 장치의 느슨함 또는 권선의 마멸 등을 야기시킨다.

발전기 고정자 권선에 대한 점검 중에서 육안 점검은 매우 중요하며 권선 및 스페이스 사이의 파우더의 존재 여부 및 through bolt에서의 균열 및 파우더 성분의 존재 여부는 진동 측면에서 필히 점검해야 할 사항이다. 특히 진동 특성 평가 후 고유 진동수가 전자력에 의한 가진 주파수인 120Hz 주위에 권선 군이 존재하거나 다른 권선에 비하여 응답의 크기가 크게 나타나는 권선 군에 대해서는 세심한 육안 점검이 필요하다. Fig. 1은 발전기의 진동 특성 평가 시 불량 부분에 대한 육안 점검 후 발견한 사항으로서, 여자기측 상 연결 권선(phase connection ring)을 구속하기 위하여 설치된 스페이스의 탈락 부분을 보여주며 정상 운전 중 이러한 스페이스의 탈락은 매우 심각한 사고를 유발시킬 수 있다. 비정상 상태에서 발생하는 과도한 힘에 비해 상대적 크기는 작지만 정상 운전 중 항상 작용하는 힘으로서, 진동 및 피로 현상을 발생시키면서 가진주파수는 120 Hz인 전자력에 의한 가진력은 고정자 권선 단말 부의 기계적 건전성 측면 즉 공진 영역과의 충분한 여유와 공진 영역에 있는 고유진동수에서의 진동 허용치를 만족시킴으로써 발전기 고정자

* 한국전력공사 전력연구원
E-mail : hskim@kepri.re.kr
Tel : (042) 865-5427, Fax : (042) 865-5444

** 한국전력공사 전력연구원

권선에 대한 기계적 건전성을 확인하고 있다. Fig. 2는 고정자 권선에 대한 기계적 건전성 평가를 수행하여 공진이 우려되는 권선에 대해서 전자력과 공진을 방지하기 위한 권선 보완 작업을 보여주고 있다. 절연재를 권선 사이에 삽입시키고 절연테이프를 구속력을 증가시켜 단말 권선의 고유진동수를 이동시킴으로써 전자력과 권선과의 공진 여유를 확보하기 위한 방법이다. 발전기 고정자 권선에서 발생할 수 있는 사고를 미연에 방지하기 위해서는 발전기 고정자 단말 권선 각각의 진동 특성 및 진동 모드를 파악하고 이를 DB화하여 관리함으로써 발전설비의 운영효율 및 운전 신뢰성을 제고시킬 수 있다.

본 논문에서는 국내에서 운전되고 있는 수냉식 발전기 고정자 권선에 대한 기계적 건전성 평가 방법과 발전기 운전에서 다른 고정자 권선의 진동 특성 변화를 분석하였다.

2. 발전기 고정자 권선의 구조

국내에 주로 운전 중인 발전기의 제작사는 Alstom, GE, Westinghouse, GEC, Hitachi, Toshiba 등을 들 수 있다. 발전기는 제작사에 따라 차이가 있으나 정상 운전 중 발생하는 전자력 또는 로타 회전에 따른 기계력과 같은 정상 상태의 힘과 3상 단락과 같은 과도력에 견딜 수 있는 구조로 제작되어야 한다. 일반적인 수냉식 발전기 고정자는 수냉식 발전기 고정자의 구조는 Fig. 3과 같으며 크게 프레임, 고정자 철심, 권선 및 권선 지지장치, 그리고 냉각수 공급을 위한 호스와 헤더로 구성된다. 고정자 단말 권선을 지지하기 위한 장치는 주로 스페이스(spacer)와 끈, 그리고 이를 지지하기 위한 링으로 이루어져 있으며 일부 제작사에서는 콘형의 지지 장치를 사용하기도 한다. 이와 같이 발전기 고정자의 지지 구조가 제작사 별로 다르기 때문에 고정자 단말 권선의 진동 특성도 차이를 나타낸다. 고정자 프레임에 고정된 키바(key bar)에 적층된 고정자 철심의 슬롯에 고정자 권선이 2단으로 삽입되며, 이들을 구속하기 위하여 웨지가 사용된다. 고정자 슬롯에서 나온 상하 권선은 스페이스와 끈으로 인근 권선들과 묶여 있으며 내부 링과 외부 링 그리고 권선 지지장치에 의하여 구속되어 있다. 따라서 고정자 슬롯부에 비하여 권선 단말 부의 기계적 구속 상태가 비교적 취약하며, 실제로 발전기 고정자 냉각수 누수 및 권선 마멸 현상이 고정자 권선 단말 부에서 자주 일어나고 있다.

3. 기계적 건전성 평가

발전기 고정자 권선에 작용하는 전자력은 전류와 자속 밀도의 벡터 외적으로 표현된다. 발전기 회전자와 고정자 사이에서 발생하는 전자장에 기인한 전자력으로 말미암아 발전기는 정적인 변형을 일으키며, 운전 중에 회전자에 의하여 전자장이 회전하므로 발전기는 동적 힘을 받는다. 즉, 2극 발

전기의 경우 운전 주파수의 2배, 4극 발전기의 경우 운전 주파수의 4배인 120Hz의 가진 주파수를 가진 외력이 항상 발생한다. 이는 고정자 권선 및 권선 단말 부에 진동을 유발시키며 피로로 인한 균열 및 수명 감소를 야기시킨다. 따라서 모든 권선은 충분한 구속력을 가진 적절한 지지 장치를 필요로 하며 고정자 권선을 포함한 구조물들의 고유진동수는 반드시 전자력에 의한 가진주파수인 120Hz와 일정 범위만큼 떨어져야 한다. 특히 관심이 되는 권선 단말 부의 진동은 권선 지지 장치의 느슨함에 관련이 있으며 이 진동의 크기는 공진의 경우를 제외하고는 비교적 서서히 증가된다. 권선 단말 부에서의 진동은 여러 가지 파급 사고를 유발시킬 수 있다. 따라서 권선 단말 부의 진동은 미연에 방지하여야 하며 진동을 감지하였을 때는 즉시 대책을 세워야 한다. 고정자 권선과 스페이스 사이의 상대 운동은 마멸의 원인이 되고 부가적으로 느슨하게 하여 더욱더 큰 진동과 마멸을 유발시킨다. 이러한 현상은 계속 축적되어 심각한 상태에 이르게 한다.

3.1 상호연관성 시험(Reciprocity test)

발전기 고정자계의 선형성을 검토하여 모드 시험을 통하여 계가 해석될 수 있는지를 판정하는 것으로서, 고정자 권선 단말부의 상반 위치에서의 가진력 대 응답을 측정하여 이들의 주파수 및 진동크기를 상호 비교함으로써 분석할 수 있다. Fig. 4는 각 권선과의 상관관계를 나타내는 선도이다. 주파수와 진동크기가 거의 일치하므로 상관관계가 매우 높음을 알 수 있다.

3.2 주파수 응답 시험(Frequency response test)

발전기 운전 중 발생하는 전자력에 의하여 고정자 단말 부에 위치한 각각의 권선에 대한 공진 가능 여부를 파악하기 위하여 각각의 권선에 대한 고유진동수 및 크기를 측정하여 발전기 운전중 전자력에 의한 공진 여부를 평가한다. Fig. 5는 임의의 단말 권선에 대한 주파수 응답 특성에 대한 선도이다. 관심 주파수인 128Hz에서 허용 진동 기준치인 $220 \text{ mm/sec}^2/N$ 을 초과하므로 보완해야 할 권선이라고 판단할 수 있다.

3.3 모드 시험(Modal test)

발전기 운전 중 고정자 단말 부의 고유진동수에 대한 거동 특성을 분석하기 위한 시험으로서, 권선 단말 부의 공진 모드가 발전기의 극수와 일치되는 지의 여부를 파악함으로써 진단한다. 즉, 고정자 권선 단말 부의 고유 주파수가 전자력에 의한 가진 주파수인 120Hz 근방에 존재할 때 이 고유 주파수가 화력발전소의 경우 2차 모드, 원자력 발전소의 경우 4차 모드와 일치하는 지를 평가하는 시험이다. Fig. 6에

는 관심 주파수인 115~130Hz 사이에 고유진동수가 존재하지 않으며 타원형 모드도 나타나지 않으므로 진동 특성은 양호하다고 할 수 있다.

4. 진동 특성 분석

GE 발전기 고정자 권선의 경우 발전기 운전 중 발생하는 전자력에 의한 가진 주파수인 120Hz 부근에 고유 특성이 분포되어 권선 공진의 가능성이 비교적 높게 나타나며 WH 발전기 고정자 권선의 경우 단말 부 권선이 3~4개씩 브레이싱으로 연결되어 있어 권선 상호 간의 진동 특성이 유사하게 나타난다. WH, Alstom 및 GEC 발전기 고정자 권선의 고유 특성이 모두 120Hz 부근에 존재하나 크기가 매우 작게 나타나며 특히 Alstom 발전기 고정자의 일부 내부 링의 고유 특성이 120Hz에 존재하므로 진동에 의한 링과 권선 사이의 구속력이 떨어져 느슨해질 수 있으므로 링과의 체결 상태가 중요하다. 발전기 고정자의 제작사가 같다고 할지라도 고정자 단말 권선의 구속력 및 조건의 차이가 있으므로 진동 특성의 차이가 존재한다. 따라서 발전기 고정자 권선 단말 부에 대한 진동 특성을 파악하고 이를 유지 관리하는 것은 매우 중요한 의미가 있으며 국내에서 운전 중인 발전기를 대상으로 발전기 고정자 권선의 진동 특성을 분석하였다.

Fig. 7과 8은 500MW급 발전기로서, 수냉식 형태의 고정자 권선이며 Fig. 9는 150MW급 발전기로서, 공랭식 형태의 고정자 권선이며 모두 발전기의 여자기 측에서 바라본 모습이다. 고정자 권선 단말 권선은 상하부 권선이 서로 연결되어 있으며 진동 측면에서 가장 취약한 구조로 되어 있음을 알 수 있다.

전력연구원에서는 2003년 정기 예방 점검 기간 중에 A, B, C 발전기 고정자 권선에 대한 기계적 건전성 시험을 수행하였으며 이 중에서 A, B 발전기 여자기 측 다수의 고정자 권선이 불량하여 강성 보강 작업을 수행하였다. 또한, C 발전기 고정자권선에서도 다수의 권선에서 진동 특성이 불량하였으나 권선의 특성상 보완할 방법을 찾을 수 없었다. 시험 수행 후에 A, B 고정자 권선에서는 대부분의 권선에 보강 작업을 수행하였기 때문에 2005년에 수행한 시험 데이터와 비교할 수 있는 권선 수는 불과 5개 정도 밖에 없었다. 향후에는 다수의 보완한 권선에 대한 비교가 가능하므로 보다 더 좋은 분석을 할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1에는 A, B, C 발전기 고정자 권선에 대해서, 발전기 운전 때 따른 고유진동수의 변화를 정리하였다. 물론 많은 권선에 대한 분석은 아니지만 고유진동수의 변화가 거의 없거나 대부분의 권선에 대한 진동 특성을 대표하는 고유진동수는 이전보다 낮아지는 경향이 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 모든 데이터를 제시하지는 않았지만 현장에서 150여 회의 발전기 고정자 권선에 대한 진동 특성 데이터에서도

비슷한 진동 특성이 나타나는 것을 확인하였다. 이는 발전기 운전 때 따른 진동에 의해 권선을 구속하고 있는 절연체들의 구속력이 감소되어 강성이 저하된 점이 주원인으로 생각할 수 있다. 또 다른 특징으로는 보완이 필요한 권선끼리 절연 테이프를 사용하여 묶은 경우 서로 묶이지 않은 권선에도 많은 영향을 미친다는 것이다. Fig. 10에는 권선에 아무런 보완조치를 하지 않았음에도 불구하고 2003년과 2005년의 진동 특성 결과에서 알 수 있듯이, 보완된 권선들의 영향에 의해 보완하지 않은 권선에서도 예상하지 못한 진동 특성의 변화가 있음을 확인하였다.

Table 1 Change of natural frequency due to operation

	'A' Generator (Toshiba)		'B' Generator (GE)		'C' Generator (ABB)	
	No.	Shift of Natural Frequency	No.	Shift of Natural Frequency	No.	Shift of Natural Frequency
Rad.	CE 05	↓	CE 04	same	CE 02	↓↓↓
	CE 12	↓	CE 24	↓	CE 04	↓↓↓
	-		CE 39	same	CE 42	↓↓↓
	TE 10	↓	TE 26	↓	CE 51	↓↓↓
Tan.	CE 09	↓	CE 04	same	-	
	CE 27	↓	-		-	
	TE 02	↓	TE 29	same	-	

5. 결론

발전기 운전 때 따른 발전기 고정자 단말 권선의 진동 특성을 평가하였다. 제작사, 용량 및 운전 기간 별로 비교 분석하였다.

- (1) 대부분의 고정자 권선의 고유진동수는 발전기 운전 때 따라 고유진동수가 감소됨을 확인하였다. 이는 다양한 원인이 있겠지만 가장 큰 원인은 진동에 의해 권선을 구속하는 링이나 절연테이프 구속력이 감소되어 전체적으로 권선의 강성이 낮아진 것임을 확인하였다.
- (2) 기계적 건전성 평가를 통해 문제시되는 권선을 보완하게 되면 보완하지 않은 권선에도 진동 특성의 변화가 발생하므로 반드시 재시험을 수행하여 모든 권선의 기계적 건전성을 확보하여야 한다.

참 고 문 헌

- 1) Y. C. Bae, etc., "Comparison of Vibration Characteristics of Stator Windings by Generator Model", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, 1999
- 2) Y. C. Bae, etc., "Modeling / Vibration Analysis of Generator Stator End Windings", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, 2000

- 3) Y. C. Bae, etc., "Modification of Vibration Characteristics for Generator Stator Windings in Dangjin Fossil Power Plant, KEPRI Technical Memo, 2001
- 4) Y. C. Bae, etc., "Vibration Characteristics for Generator Stator Windings in Boryung Combined Cycle Power Plant, KEPRI TM, 2003, 2005
- 5) H. S. Kim, etc., "Vibration Characteristic & Winding Absorption Test in Samcheonpo Power Plant Unit 5, KEPRI TM, 2003, 2005
- 6) H. S. Kim, etc., "Vibration Characteristic & Winding Absorption in Boryung Power Plant 2", KEPRI TM, 2003, 2005

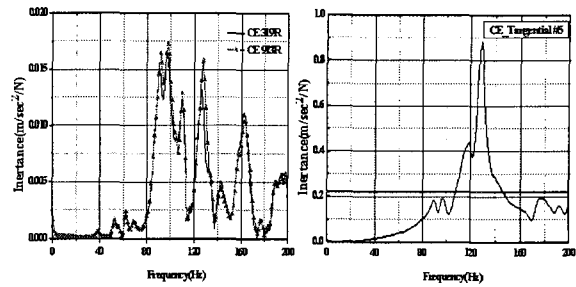


Fig. 4 Reciprocity test Fig. 5 Frequency response test

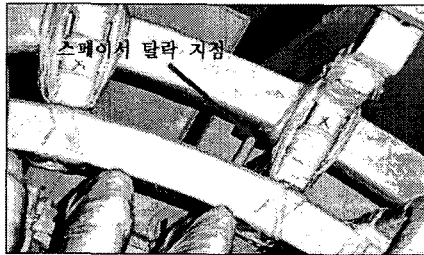


Fig. 1 Omission of spacer in phase connection bar

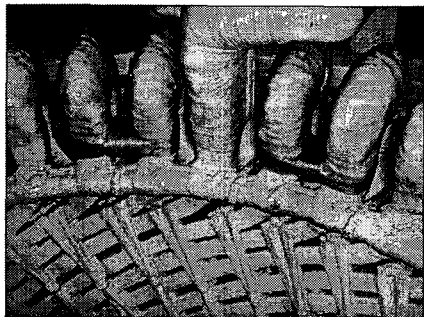


Fig. 2 Complement by blocking for stator end winding

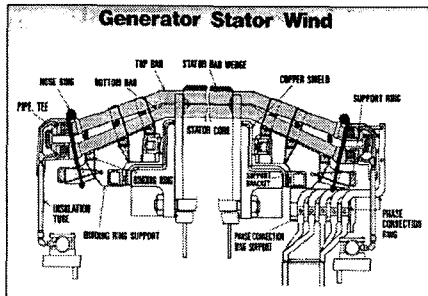


Fig. 3 Structure of generator stator windings

Undeformed, # 3:70.90 Hz

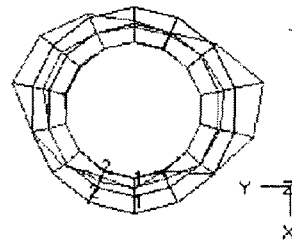


Fig. 6 Mode shape

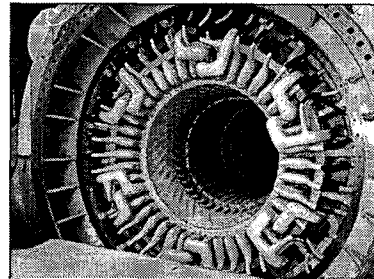


Fig. 7 'A' generator(500MW, Toshiba)

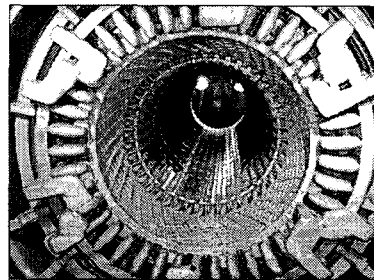


Fig. 8 'B' generator(500MW, GE)

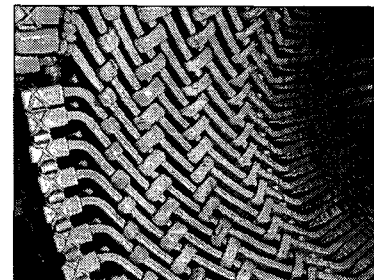


Fig. 9 'C' generator(150MW, Alstom)

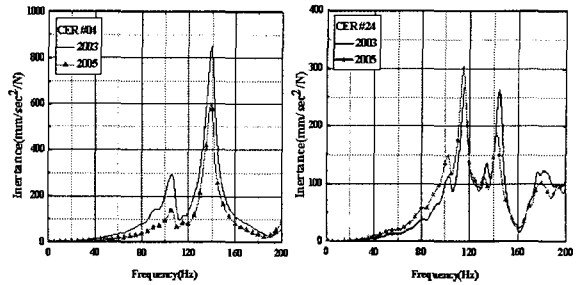
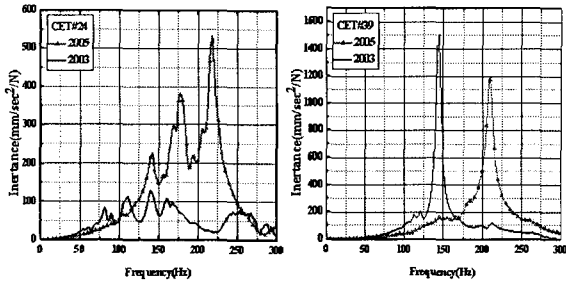


Fig. 10 Unexpected change of vibration characteristics

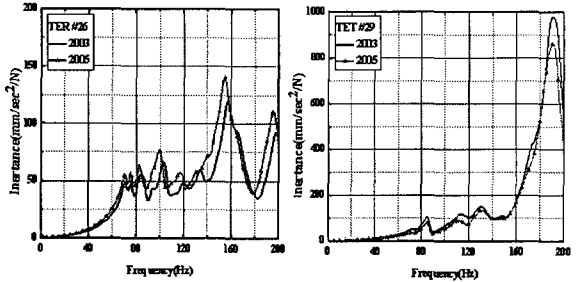
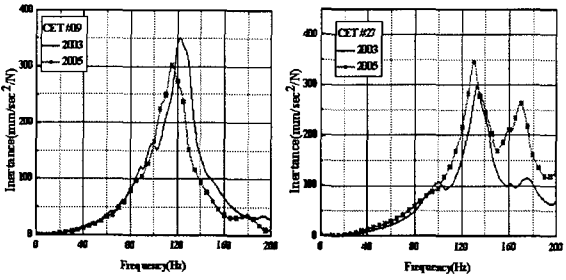
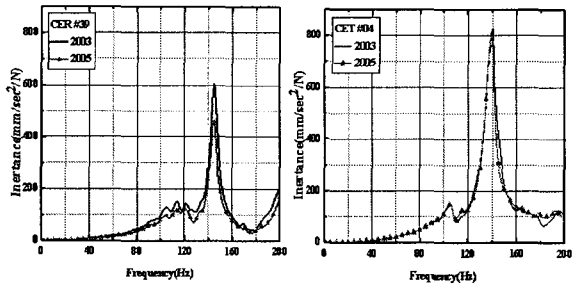
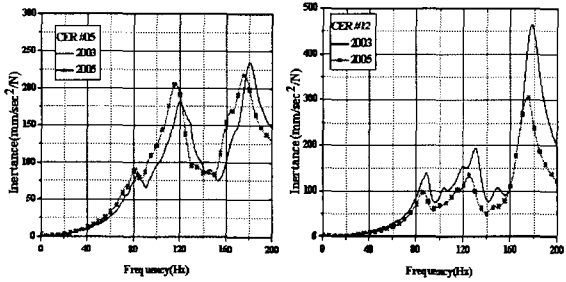


Fig. 12 Vibration characteristics of 'B' generator

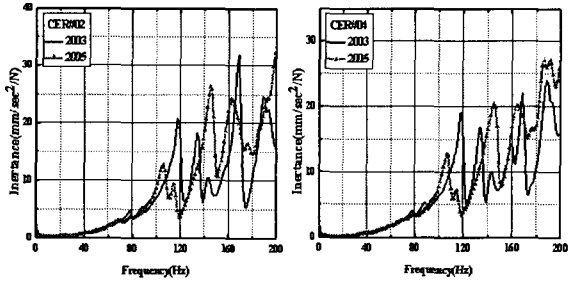
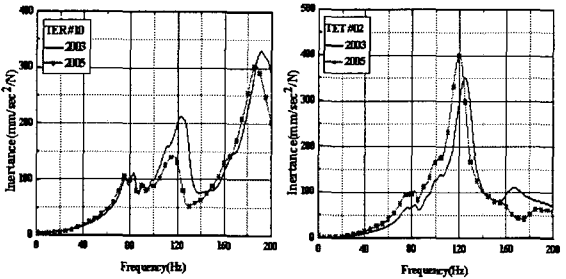


Fig. 11 Vibration characteristics of 'A' generator

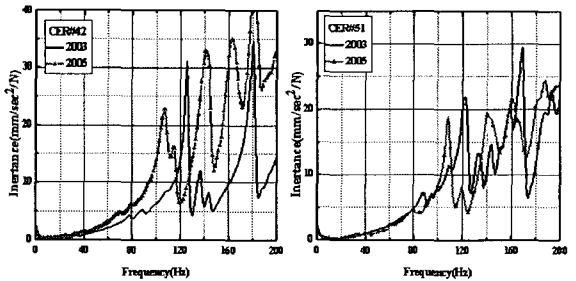


Fig. 13 Vibration characteristics of 'C' generator