

〈論 文〉

스팀터빈 발전기 진동진단 시스템 개발

Development of a Vibration Diagnostic System for Steam Turbine Generators

이안성* · 홍성욱** · 김호종*** · 이 현****

An Sung Lee, Seong-Wook Hong, Ho Jong Kim and Hyun Lee

(1995년 7월 28일 접수 : 1995년 11월 8일 심사완료)

ABSTRACT

Modern steam turbine generators are being built as a higher power and larger system, experiencing more frequent starts and stops of operation due to a constant change of power demands. Hence, they are inevitably more vulnerable to various vibrations, and more often exposed to the danger of sudden vibration accidents than ever before. Even under the circumstances, in order to secure the system reliability of steam power plants and there by to supply safely the public electricity, it is important to prevent a sudden vibration accident in one hand and even when it happens, to raise an operating efficiency of the plants through swift and precise treatments in the other. In this study, an interactive vibration diagnostic system has been developed to make the on-site vibration diagnosis of steam turbine generators possible and convenient, utilizing a note-book PC. For this purpose, at first the principal vibration phenomena, such as various unbalance and unstable vibrations as well as rubbing, misalignment, and shaft crack vibrations, have been systematically classified as grouped parameters of vibration frequencies, amplitudes, phases, rotating speeds at the time of accident, and operating conditions or condition changes. A new complex vibration diagnostic table has been constructed from the causal relations between the characteristic parameters and the principal vibration phenomena. Then, the diagnostic system has been developed to screen and issue the corresponding vibration phenomena by assigning to each user-selected combination of characteristic parameters a unique characteristic vector and comparing this vector with a diagnostic vector of each vibration phenomenon based on the constructed diagnostic table. Moreover, the diagnostic system has a logic whose diagnosis may be performed successfully by inputting only some of the corresponding characteristic parameters without having to input all the parameters. The developed diagnostic system has been applied to perform the diagnosis of several real cases of steam turbine vibration accidents. And the results have been quite satisfactory.

1. 서 론

우리나라의 전력수요는 공급을 비롯한 산업전반에

*정회원, 한국기계연구원 회전체 연구그룹

**정회원, 금오공과대학교 정밀기계공학과

***한국중공업(주) 기술연구소 진동연구실

****정회원, 한국전력연구원 기술연구소

걸친 빠른 발전과 경제성장에 따른 국민생활의 향상으로 매년 폭발적으로 증가하고 있다. 증가하는 전력수요의 충당을 위해 발전설비는 대용량 고효율화되고 있으며, 높은 효율과 함께 단위 중량당 출력을 높이기 위하여 스팀터빈 발전기의 회전체길이 대 단히 길어지는 유연 회전체/베어링시스템으로 설계·제작되고 있다. 따라서, 정격회전속도에 도달할 때까지 회전체는 여러개의 위험속도를 통과해야 하

며, Rubbing과 Misalignment 등에 대한 진단 및 대응 방법 등 각종 진동에 보다 광범위하고 종합적으로 접근하고 있다.

일반적으로, 스팀터빈 발전기는 운전 시점이나 또는 정격은진주진해상(정상 운전)을 운전하며 최적의 진동수치를 기록할 수 있도록 설계하고 있다. 그러나, 현재 진동수치의 특징은 이하와 같다. 스팀터빈 발전기는 계절별 최고치에 현저한 차이를 나타내는 습이다. 즉, 스팀터빈 발전기는 소위 일간가동정지(daily start and stop)와 주간가동정지(weekly start and stop), 그리고 여름철의 상황별 급전지속에 따른 급수부하조정 등으로, 설계점을 벗어난 과도운전상태에서 보다 많이 운전되게 되었다. 따라서, 설비의 수명이 단축됨은 물론 예기치 못한 돌발 진동사고의 발생가능성이 높아져, 설비의 보전이 보다 어렵게 되었다.

이와같은 상황에서, 공공전력의 안정적 공급을 위해서는, 발전설비의 핵심을 이루는 스팀 터빈 발전기의 운전상태를 상시감시하여 돌발 진동사고를 예방하고, 사고발생시 신속·정확한 조치 및 보수를 통해 설비의 가동효율을 높이는 설비보전기술의 확립이 중요하다. 한편, 회전기계의 설비보전기술은 현재 CBM(Condition Based Maintenance)이란 명칭과 함께 트라이블로지와 윤활, 회전체역학, 요소설계, 신호처리, 그리고 컴퓨터 사이언스가 접목된 종합응용 연구분야로서 자리를 굳혀 나가고 있다.

회전기계의 진동관련해서는 그간 방대한 연구가 수행되어 왔다. 여기서는 개개 연구논문의 소개보다는 각 연구결과가 종합되어 있는 문헌을 중심으로 소개하고자 한다. 진동 주파수에 따른 진동의 분류는 Jackson⁽¹⁾, Rao⁽²⁾, Vance⁽³⁾, B & K⁽⁴⁾에 정리되어 있으며, 진동의 위상특성은 Bently Nevada⁽⁵⁾의 Orbit 자료 등에 일부 소개되고 있다. 불안정 자려 진동은 종합적으로 Vance⁽³⁾에 소개되어 있으며, Someya⁽⁶⁾는 oil whip/whirl과 steam whirl의 특성 및 대책을 종합정리하였다. 불균형, Rubbing, Misalignment, 축 균열 관련한 진동특성은 Bently Nevada⁽⁵⁾의 자료에 정리되어 있으며, Vance⁽³⁾는 이들과 그 밖의 진동에 대한 소개와 함께 많은 참고문헌을 수록하고 있다. Piotrowski⁽⁷⁾에는 Misalignment의 유형, 검사방법, 대책, 그리고 현장감지법 등이 자세히 수록되어 있다. 한편, 中島秀雄의 4인⁽⁸⁾은 대형스팀 터빈회전체의 진동진단을 위하여 진동특성과 진동원인을 종합한 인과관계표를 구성하였으며, 이현⁽⁹⁾은 스팀터빈 발전기의 진동특성을 종합적으로 분석정리하였다. 그리고, 한전 기술지원보고서⁽¹⁰⁾

에는 국내 발전설비에서 발생한 스팀 터빈 발전기의 각종 진동사고가 상세히 분석되어 있다. 그러나 국내외에서 이미 발표된 진동진단 인과관계표들은 현장에서 손쉽게 적용될 수 있도록 포괄적이지 않거나 운전조건이나 상태변화 등 스팀터빈의 이력사항 등을 폭넓게 고려할 수 있도록 구성되어 있지 않다. 또한 현장에서 문제점을 즉시 파악할 수 있도록 하는 진단원인 검색시스템 등이 제공되지 않아 활용에 어려움이 있어왔다.

본 연구에서는, 스팀터빈 발전기의 진동사고 발생시 현장에서의 신속한 1차적 진단과 함께 차후 상세한 정밀진단에 도움이 될 수 있도록, 기존의 발표문헌들을 체계적으로 분석하여 스팀터빈 발전기의 종합진동진단을 위한 인과관계 진단표를 새롭게 구성하였고, 이를 토대로 대화식 진동진단 시스템을 개발하였다. 그리고 현장에서 얻어진 몇가지 사례에 시험적으로 적용한 결과 매우 유용하게 활용할 수 있음을 알 수 있었다.

2. 진단표의 구성

스팀터빈 발전기에서 발생할 수 있는 대표적 진동들의 특성, 주요발생원인, 그리고 몇가지 대책들은 부록에 정리되어 있다. 여기서는 스팀터빈 발전기 진동의 체계적인 종합진단을 위하여, 발생진동들의 특성을 정성분류하고 이를 토대로 인과관계 표 또는 매트릭스를 구성한 결과를 소개한다.

진동원을 특징지을 수 있는 진동특성은 주파수, 발생속도, 진폭, 위상특성 등으로 파악할 수 있다. Table 1은 주파수, 발생속도, 진폭, 그리고 위상에 따른 진동진단 특성매개변수들에 대해 앞에서 열거한 진동특성분석 결과를 토대로 그 특성에 따라 분류한 항목을 보여주고 있다. 스팀터빈 발전기 진동의 다른 큰 특징의 하나는, 각 발생 진동이 대응하는 운전조건 또는 상태변화들과 밀접하게 연계되는 고유의 특성을 가지고 있다는 점이다. 따라서, 정확한 진동원인의 판단을 위해서는 진동신호의 분석과 병행하여 운전조건/상태변화 등의 운전이력에 대한 정밀검토가 이루어져야 한다. Table 2는 운전조건/상태변화에 따른 진동진단 매개변수의 분류를 보여주고 있다. 이제 종합적인 진동진단을 위하여, Table 1,2의 진단 특성매개변수들과 각 대응진동을 연계시킨 인과관계가 Table 3의 종합 진동 진단표로 구성되어 있다. Table 1,2,3의 일부 항목이 ()로 연결되어 있는데, 이는 or 의 개념으로 해석된다.

Table 1 주파수, 발생속도, 진폭, 위상(진동진단 특성매개변수)의 분류

진동주파수	발생운전속도	진폭변화	위상변화
1. 1X 2. 로터/베어링계의 위험속도 3. 2X, 3X, 4X 4. 1/2X, 1/3X, 1/4X, 0.3X~0.8X	1. 임의, 전속도 범위 2. 위험속도 이하 3. 위험속도 이상 4. 위험속도의 2배 이상 5. 위험속도의 1/2배 6. 위험속도의 3배	1. 불변 2. 상승, 장기변화 3. 급증, 고진동 4. 불규칙	1. 안정 2. 일시적 변화, 변화후 안정 3. 역전변화, 회전반대방향 4. 연속적, 장기변화 불안정, 운전조건/상태변화에 따라 변화

Table 2 운전조건 상태변화(진동진단 특성매개변수)의 분류

운 전 조 건 상 태 변 화		
1. 회전수 2. 부하 3. Alignment, 커플링 4. 스팀압력 5. 스팀온도 6. 가감밸브 개도상태 7. 콘덴서, 터빈 케이싱의 진공도	8. 배기실 온도 9. 베어링 급유압력 10. 베어링 급유온도 11. 베어링 메탈온도 12. 베어링 형식 13. 회전자, 케이싱의 땀창/땀창차 14. 회전자의 조립/끼워맞춤	15. 여자전압/전류 16. 발전기 가스온도 17. 계통교란 (Line shock) 18. 정상 운전상태 19. 기동 운전시 20. 운전 정지시

Table 3 종합진동진단표

진 동 주파수	발 생 운전속도	진 폭 변 화	위 상 변 화	운전조건 / 상태변화	진동 원인판별	
1	1	1	1	1	불균형 진동	
1	1	3	2	1, 18, 19, 20		간류 질량불균형
1	1	2	1, 4	1		회전부품 일부탈락
1	1	2	1, 4	2, 5, 15, 16, 20		회전축 경년 굽힘
1	1	3	3, 4	2, 15		회전축 열특성
1, 2, 3, 4	1	3, 4	3, 4	1, 2, 3, 5, 7, 8, 13, 16, 19	Magnetic	
1, 3	1	2, 3, 4	4	1, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 16, 17, 18, 19, 20	Rubbing	
4	3	3, 4	-	1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 19	불안정 진동	
2, 4	4	3, 4	-	1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 19		Oil whirl
2, 4	3	3	-	2, 4, 6, 9, 10, 11, 12		Oil whip
2, 4	2	3, 4	-	1, 2, 14, 19		Steam whirl
2, 4	2	3, 4	-	1, 2, 14, 19		내부마찰
1, 2, 4	3	3, 4	-	1, 9, 10, 11, 18, 19		Hysteresis whirl
1, 2, 3	1, 5	2, 3	1, 4	1, 17, 18, 19, 20	베어링 급유부족	
4	6	3, 4	-	1, 19	축 균 열	
					베어링 저널의 헐거움	

또, Table 3에 보여지는 (-)는 해당 매개변수군이 대응진동의 진단에 크게 활용되지 않음을 나타낸다. 한편, Table 4.1, 4.2, 4.3, 4.4에는 각 진동의 대표적 특성을 간략하게 정리하여 진단 특성매개변수

의 선정 또는 진단결과의 검증에 활용할 수 있도록 하고, 아울러 운전조작 및 대책을 정리하여 현장에서의 응급조치시 참고가 될 수 있도록 하였다.

Table 4.1 진동원인별 대표특성, 운전조작 및 대책

진동원인		대표적 특성	운전조작 및 대책
불평형 진동	잔류 질량불균형	- 1X 성분의 우세 - 회전수에 따른 진폭변화	- 밸런싱 실시
	회전부 일부탈락	- 진동의 급증 - 1X 성분의 우세 - 위상의 일시적 변화후 안정 - 회전수에 따른 진폭변화	- 운전정지
	회전축 경년굽힘	- 1X 성분의 우세 - 진동의 장기간에 걸친 증가	- 부하유지 - 밸런싱 실시
	회전축 열 특성	- 1X 성분의 우세 - 부하 의존성 - 스팀온도 의존성 - 여자전압 / 전류 의존성	- 부하감발 - 스팀온도 / 압력 조정
	Magnetic	- 위상의 회전반대 방향 회전 - 부하 의존성 - 여자전류 / 전압 의존성	

Table 4.2 진동원인별 대표특성, 운전조작 및 대책

진동 원인	대표적 특성	운전조작 및 대책
Rubbing	- 1X 성분의 우세 - 진동의 급증 및 불안정 - 심한 rubbing의 경우 선회 / 위상회전이 회전반대방향 - 진폭이 산형으로 나타날 수 있음 - 부하 의존성 - 회전체 / 케이싱 팽창차의 영향 - 콘덴서, 터빈 케이싱 진공도의 영향 - Alignment의 영향 - 과도운전상태 의존성	- 운전정지 - 회전수 유지 - 부하유지 - 부하감발 - 진공도 조정 - 스팀압력 / 온도 조정 - Oil tank 압력조정 - Extraction 스템밸브의 조작 - Drain trap 조정 - Alignment 조정
Misalignment	- 1X 성분의 우세 - 비교적 큰 축방향 진동의 수반 - 부하 의존성 - Line shock의 영향 - 베어링 메탈의 고온 - 베어링 시일의 심한 누유 - Shim의 헐거움 - 기초의 균열, 침하의 영향 - 커플링의 잦은 손상	- 부하유지 - 부하감발 - 진공도조정 - 배기실 spray 조정 - Alignment 조정

Table 4.3 진동원인별 대표특성, 운전조작 및 대책

진동원인		대표적 특성	운전조작 및 대책
불안정 진동	Oil whirl	<ul style="list-style-type: none"> - 0.4X~0.48X 성분의 우세 - 1차 위험속도 이상에서 발생 - Misalignment의 영향 - 베어링 급유온도 의존성 	<ul style="list-style-type: none"> - 진공도 조정 - 배기실 spray 조작 - 베어링 급유압력 조정 - 베어링 급유온도 조정 - Alignment 조정
	Oil whip	<ul style="list-style-type: none"> - 진동주파수가 회전체 / 베어링계의 위험속도와 일치 - 1차 위험속도의 2배 이상에서 발생 - Misalignment의 영향 - 베어링 급유온도 의존성 	<ul style="list-style-type: none"> - 운전정지 - 진공도 조정 - 배기실 spray 조작 - 베어링 급유압력 조정 - 베어링 급유온도 조정 - Alignment 조정
	Steam whirl	<ul style="list-style-type: none"> - 진동주파수가 회전체 / 베어링계의 위험속도와 일치 - 1차 위험속도 이상에서 발생 - 부하에 따라 진동급증 - 스팀 가감밸브의 개도 의존성 	<ul style="list-style-type: none"> - 부하감발 - 스팀압력 / 온도 조정 - 베어링 급유압력 조정 - 베어링 급유온도 조정 - Alignment 조정
	내부마찰	<ul style="list-style-type: none"> - 1차 위험속도 이하에서 발생 - 진동주파수가 회전체/베어링계의 위험속도와 일치 - 회전체 조립 / 끼워맞춤의 영향 	<ul style="list-style-type: none"> - 운전정지 - 스팀압력 / 온도 조정

Table 4.4 진동원인별 대표특성, 운전조작 및 대책

진동원인		대표적 특성	운전조작 및 대책
불안정 진동	Hysteresis whirl	<ul style="list-style-type: none"> - 1차 위험속도 이상에서 발생 - 진동주파수가 회전체 / 베어링계의 위험속도와 일치 - 회전체 조립 / 끼워맞춤의 영향 	<ul style="list-style-type: none"> - 운전정지 - 스팀압력 / 온도 조정
	베어링 급유부족	<ul style="list-style-type: none"> - 1차 위험속도 이상에서 발생 - 진동주파수가 불안정하며, 위험속도 또는 subharmonic 성분이 나타날 수 있음 - 베어링 급유압력 의존성 - 베어링 메탈온도 의존성 	<ul style="list-style-type: none"> - 베어링 급유압력 조정
축 균열		<ul style="list-style-type: none"> - 대체로 1X 성분이 우세 - 기동 또는 정지시 2X 성분이 공진이 발생 	<ul style="list-style-type: none"> - 운전정지
베어링 저널의 험거움		<ul style="list-style-type: none"> - 1/2X, 1/3X 성분이 우세 	<ul style="list-style-type: none"> - 회전수 유지 - 베어링 급유압력 조정 - 베어링 급유온도 조정

3. 진단 프로그램의 개발

앞절에서 기술한 진단표에 의해 스팀터빈의 진동 원인을 진단할 수 있도록 하는 프로그램을 개발하였다. 이미 기술한 바와 같이 이 진단표에서는 5가지

의 특성매개변수를 가지며 이 진동진단 특성 매개변수의 선정에 의해 대응되는 진동원인을 추출하는 것이 본 프로그램의 목적이다.

3.1 진단 알고리즘

주어진 조건에 대한 검색에 있어 특이한 점은 특

성 매개변수 중 일부가 신장되지 않았을 경우 주어진 변수만으로 대응되는 진동원인을 찾을 수 있도록 구성되어야 한다는 점이다. 실제 진단을 행해야 할 시점에서 해당 매개변수를 모두 파악할 수 없는 경우가 많다는 점을 고려할 때 이같은 내용은 특히 그 중요성이 있다.

먼저 주어진 진단표에 의해 15가지 진단결과 각각에 번호를 부여하고 5개의 특성매개변수 조건이 주어졌을 때 대응되는 경우를 각각 행벡터로 취하여 행렬로 구성하였다. 이때 해당 매개변수가 진단에 활용되지 않는 경우, 즉 (-)로 표시되는 것에는 매개변수 값으로 0을 부여하여 진단 프로그램에서 검토하지 않을 수 있도록 배려했다. 한편 특성매개변수가 주어지면 이것을 벡터로 구성하여 미리 구성된 진단행렬의 행들과 대응시켜 동일한 벡터가 되는 경우에 해당되는 진단결과를 모두 도출할 수 있도록 하였다. 특정한 매개변수가 주어지지 않은 경우에는 해당되는 성분들을 제외한 벡터로서 비교하였다.

실제적으로 이상과 같은 진단논리를 적용시키게 되면 대부분 복수개의 진단결과가 도출되게 된다. 특히 매개변수 일부를 진단에 사용하지 않게 되는 경우에는 여러개의 진단결과가 예상되는데 이때 복수개의 진단결과를 분석할 수 있도록 각각의 진단결과에 대해 Table 4.1~4.4에 주어진 진동특징과 대책 등을 차례로 열거하여 2차적인 분석이 가능하도록 하였다.

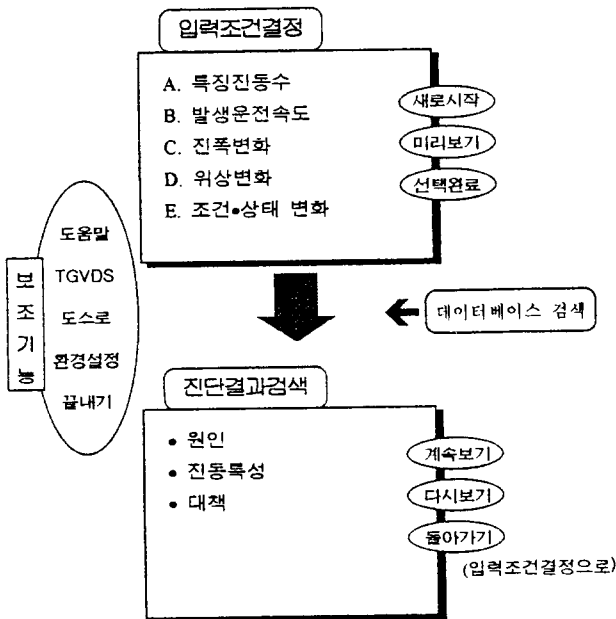


Fig. 1 진동진단 시스템(TGVDS)의 기능 개략도

3.2 진단 프로그램

본 진단 프로그램은 현장에서 손쉽게 활용할 수 있도록 저기능의 PC에서도 운용되는 프로그램으로 개발하였으며 초보자가 손쉽게 사용 가능하도록 모든 기능을 메뉴방식으로 처리하였다. 또한 화면에 표시되는 모든 내용을 한글로 처리하였다. 진단프로그램의 작업순서에 따른 주요기능을 나타내는 개략도를 Fig. 1에 보이고 있다.

Fig. 2는 진단 프로그램을 실행하였을 때 나타나는 초기화면이다. 화면의 상단에는 pull down메뉴가 준비되어 있으며 하단에는 검색에 필요한 추가적인 고정메뉴가 있음을 알 수 있다. 프로그램은 크게 두가지의 화면상태를 갖는다. 즉 매개변수값을 입력하는 화면과 입력된 매개변수 값을 이용해 진단한 결과를 보여주는 화면으로 구성된다. Fig. 3은 매개변수값 입력화면으로서 첫번째 진단매개변수인 진동주파수

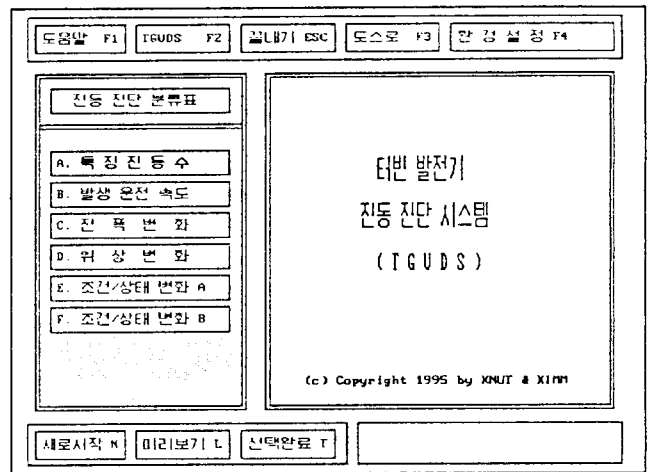


Fig. 2 진동진단 시스템(TGVDS)의 초기화면

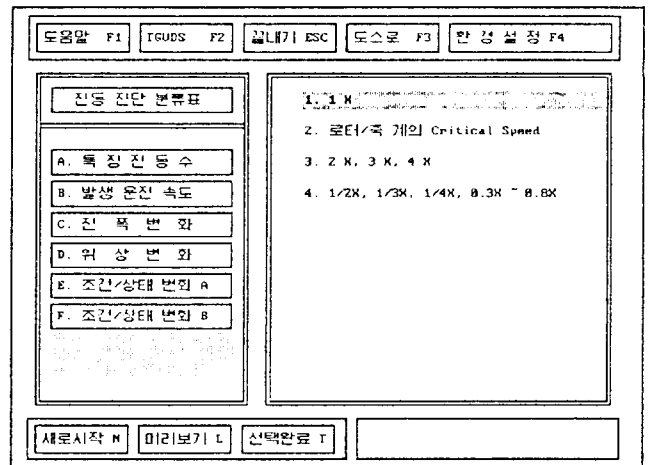


Fig. 3 진동진단 시스템 입력 모드 화면

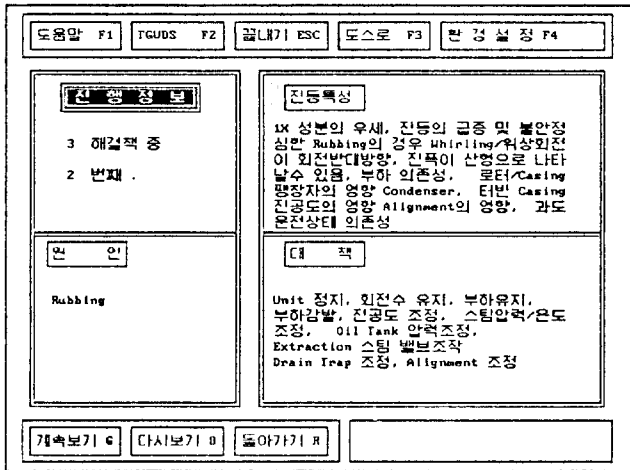


Fig. 4 진동진단 시스템 결과 검색 모드 화면

를 선정하였을 때 화면우측에 해당되는 4가지 조건을 보여주고 있는데 이때 해당 조건을 마우스나 키보드로 선정하면 해당조건이 선정된다. 이와같은 작업을 진단매개변수 개개에 대해 실시한 후 하단에서 선정완료 단추를 선정하면 진단알고리즘을 통해 대응되는 진단결과를 얻게 되며 진단결과 검색화면을 보여준다. 한편 입력된 사항을 확인하는 기능으로 미리보기 기능과 입력사항을 초기화하는 기능으로 새로시작 기능 등이 있으며 작업 중 필요한 각 기능들이나 매개변수에 대한 도움말 기능이 있어 임의의 순간에 도움말 기능을 호출할 수 있도록 하였다. Fig. 4는 진단결과를 검색하는 화면으로서 앞에서 선정된 조건에 의해 대응되는 진단결과를 차례로 보여주게 된다. 결과를 보여주는 화면에서는 예상되는 진단결과와 이때의 진동특징, 그리고 일반적인 대책을 동시에 보여주게 되어 복수개로 선정된 진단결과에서 보조적인 정보를 통해 최종 진동원을 확인할 수 있도록 하였다. 검색결과 입력사항을 변경하고자 한다면 되돌아 가기 기능을 선택하여 입력화면으로 되돌아 가서 입력사항을 변경하거나 재작업을 실시할 수 있다.

4. 적용사례 및 토론

개발된 대화식 스팀터빈 발전기 진동진단 시스템을 원인분석이 완료된 몇개의 스팀터빈 진동사고사례에 적용하여 보기로 하자.

4.1 적용사례 1

터빈에서 갑작스런 진동이 주기적으로 발생한 사

Table 5.1 (적용사례 1) 진단시스템에 대한 진단 특성매개변수의 압력조합과 진단결과

진동 주파수	진폭 변화	위상변화	진단결과
1X	급증	회전반대방향	· Magnetic-불균형진동 · Rubbing
1X	급증	불안정	· Magnetic-불균형진동 · Rubbing · Misalignment · 베어링 급유부족 · 축 균열
1/2X	급증	회전반대방향	· Rubbing
2X	급증	회전반대방향	· Rubbing

Table 5.2 (적용사례 2) 진단시스템에 대한 진단 특성매개변수의 입력조합과 진단결과

진동 주파수	진폭 변화	위상변화	진단결과
1X	급증	변화후 안정	· 회전부품의 탈락 — 불균형진동 · 베어링 급유부족

Table 5.3 (적용사례 3) 진단시스템에 대한 진단 특성매개변수의 입력조합과 진단결과

진폭 변화	운전조건/상태변화	진단결과
장기변화	스팀온도	· 로터 열특성 — 불평형진동 · Misalignment
고진동	스팀온도	· Rubbing · Misalignment
고진동	로터, 케이싱의 팽창차	· Rubbing · Misalignment

고로, 기록상의 진동현황을 검토하면 다음과 같다.

- 기록지상에 그려진 진폭이 모두 산형상을 이루고 있다.
 - 60 Hz synchronous 성분이 우세하고, 30 Hz subharmonic과 120 Hz higher harmonic 성분이 존재한다.
 - 위상이 불안정하며, 회전체의 회전 반대방향으로 선회하고 있다.
- 이에 대하여 진단시스템에 입력한 진단 특성매개

변수의 조합과 그에 따른 진단결과가 Table 5.1에 정리되어 있다. Table 5.1에서 rubbing의 진동원인 가능성이 가장 유력하게 제시되고 있으며, 기록상의 진동현황과 진단시스템상에 정리되어 있는 진동특성(또는, Table 4.1~4.4)을 종합검토하면 rubbing이 진동원인으로 진단된다. 한편, 이는 진동분석 보고서상의 rubbing 진단결과와 일치하여, 진단시스템을 이용한 진단가능성이 보여진다.

4.2 적용사례 2

터빈의 진동이 1, 2차례에 걸쳐 돌발급증(step change)하여 운전정지에 이른 사고로, 기록상의 특징은 다음과 같다.

- 1X synchronous 진동성분이 최대이다.
- 진폭이 step change하였고, 위상이 변화한 후 안정을 유지하였다.
- 진폭의 step change시 베어링 급유온도, 베어링 메탈온도, 출력, 증기조건에 변화가 없었다.

이에 대하여 진단시스템에 입력한 진단 특성매개 변수의 조합과 그에 따른 진단결과가 Table 5.2에 정리되어 있다. Table 5.2에서 회전부품의 탈락에 따른 불균형, 또는 베어링 급유부족이 진동원인으로 제시되고 있다. 여기서, 프로그램 상에 정리되어 있는 두 진동의 특성과 기록상에 진동돌변시 베어링 등의 운전조건에 변화가 없었던 점을 종합하면, 회전부품의 탈락에 기인한 불균형이 진동원인으로 최종진단된다. 한편, 진동분석 보고서에는 터빈회전체 부품의 절손탈락에 기인한 중량 불균형이 진동원인으로 분석되어 있다. 따라서, 진단시스템을 이용한 진단가능성이 보여진다.

4.3 적용사례 3

터빈의 시운전시 진동이 완만히 상승한 후 고진동으로 발전한 사고로, 기록상의 진동현황을 검토하면 다음과 같다.

- 무부하 1800 rpm에서 장시간 운전하였으며, 운전중 reheater를 정지시켰다. 이 때 스팀온도에 큰변화가 초래되었다.
- 운전조건의 변화 2~3 시간후 진동상승이 관찰되었다.

이에 대하여 진단시스템에 입력한 진단 특성매개 변수의 조합과 그에 따른 진단결과가 Table 5.3에 정리되어 있다. Table 5.3에서 진단시스템은 회전체의 열특성에 따른 불균형, misalignment, 그리고 rubbing을 가능한 진동원인으로 제시하고 있다. 한

편, 진동분석 보고서는 터빈의 장시간 무부하 운전과 reheater의 정지에 따른 스팀온도의 변화로, 회전체가 수축, 팽창 및 열굽힘(열특성 불균형에 속함)을 일으켜 진동이 서서히 상승하였고, 마침내 고진동으로 발전하여 rubbing이 발생한 것으로 종합분석하고 있다. 이러한, 보고서의 분석결과는 진단시스템에서 제시한 단편적인 진동원인을 종합하여 추론이 가능하다. 따라서, 진단시스템이 실제현장에서 접하게 되는 진동사고의 1차적 진단과정에 활용될 수 있음이 보여진다.

이상에서, 실제 스팀터빈 진동사고의 원인진단에 개발된 대화식 진단시스템을 사용하여 가능한 진동원인들을 대분류하고 이들을 검토·분석함으로써, 현장에서 신속한 1차적인 진동진단이 가능함이 확인되었다. 특히, 본 진단시스템에서는 진단 특성매개 변수의 모든항목을 선정할 필요없이, 현장에서 입수 가능한 대표적 진동현황 또는 특성만을 입력하여 진동진단의 수행이 가능한 것이 특징이다. 따라서, 무리한 진단결과의 도출을 피하고 가능한 진동원인을 복수 개로 제시할 수 있기 때문에, 개발된 진단시스템이 초심자 뿐만 아니라 전문가의 초기 진동진단에 크게 활용될 수 있을 것으로 보인다. 또한, 각 설비마다의 고유특성 및 이력을 진단시스템에 포함시켜 설비전용의 버전을 완성시키면, 보다 효과적인 진동진단 시스템이 될 것으로 예상된다.

5. 결 론

스팀터빈 발전기의 주요 진동현상을 분석종합하여, 진동진단을 위한 기초자료로 제공하였다. 진동진단 특성매개변수를 주파수, 발생속도, 진폭, 위상, 그리고 운전조건/상태변화에 따라 체계적으로 분류하였으며, 이를 인과관계에 따른 대응 진동원인과 연계시켜 종합진동진단표를 구성하였다. 아울러, 진단 특성매개변수의 선정 및 진단결과의 검증과 현장에서의 응급조치시 도움이 될 수 있도록, 각 진동별 대표적 특성과 운전조작/대책을 표로 작성하였다.

구성된 진단표를 토대로, 현장에서 노트-북 PC 등을 활용한 손쉬운 진단이 가능하도록, 대화식 스팀터빈 발전기 진동진단 시스템을 개발하였다. 개발된 진단시스템에서는 현장에서 입수가능한 일부 대표적 진동현황 또는 특성만을 입력하여도 진단이 가능하도록 로직이 구성되어 있다. 한편, 개발된 진단시스템을 실제 스팀터빈의 사고사례에 적용하여 시험운용 하였으며, 시험결과가 보고서의 분석결과와

만족스럽게 일치하였다. 따라서, 개발된 진단시스템을 활용하여 스팀터빈 발전기의 가능한 진동원인들을 반복해서 분류하고 이들을 검토·분석함으로써, 신속한 1차적인 진동진단이 가능한 것으로 판단된다.

끝으로, 향후 보다 많은 자료의 분석·검증을 통해 본 진단시스템을 개선 보완해 나아가고, 특히 각 설비마다의 고유특성 및 이력을 진단시스템에 포함시켜 설비전용의 버전을 완성시키면, 보다 효과적인 진동진단 시스템이 될 것으로 예상된다.

부 록

스팀터빈의 대표적 진동특성, 원인, 그리고 대책

A1. 불균형 진동

회전체의 질량중심이 회전축으로 부터 벗어날 때 작용하는 원심력이 회전체계를 정현파 가진하여 발생한다.

(1) 특성

- 진동주파수가 1X인 동조(synchronous) 진동으로, 진폭은 불균형양에 비례한다. 또한, 진폭은 회전속도에 비례하여 증가한다.
- 위상은 일정 회전속도에서 안정되어 있으며, 출력, 진공도 등이 변화여도 일정하게 유지된다.
- 회전속도변화에 대한 재현성이 있다. 다른조건의 변화가 없으면, 진폭-회전속도, 위상-회전속도의 관계가 재현된다.
- 등방축계에서의 선회체도는 원형이며(비등방 축계에서는 타원형임), 회전방향으로 선회한다.

(2) 원인

- 터빈 회전체의 질량 불균형
- 발전기 회전체의 질량 불균형
- 회전체의 굽힘
- 회전부품(회전날개 등)의 탈락, 이동

A2. 열특성 진동

발전기의 발열량 또는 냉각효과가 국부적으로 불균일하거나, 회전체에 비대칭성이 존재 또는 표면에 손상이 발생된 경우, 회전체가 열특성의 차이로 굽힘이 되어 진동이 발생한다.

(1) 특성 : 진동이 부하, 스팀조건, 스팀밀봉조정, 계자전류, 냉각개스의 온도 및 압력, 그리고 윤활유의 입구온도 등 운전조건의 변화에 민감한 반응을 보인다.

(2) 원인

- 재질의 불균일

- 표면거칠기, 질삭유 부착, 산화스케일 부착 등의 비대칭에 따른 회전체의 복사열 비대칭
- 잔류응력의 비대칭
- 회전체의 균열
- 열박음 회전체에서 디스크와 축간의 열팽창차
- 중공축에 물 또는 기름의 유입 등

A3. Rubbing 진동

Rubbing은 운전중 회전부가 정지부가 접촉하는 것을 의미하며, 대체로 다른 기계고장의 2차적 증상으로 나타난다. Rubbing 진동은 매우 비선형적인 특성을 갖으며, 접촉부의 국부과열에 따른 축의 굽힘으로 회전체가 불균형되어 고진동으로 발전할 수 있다. Rubbing은 크게 전원주(full annular) rubbing과 부분 rubbing의 두가지 형태로 분류된다.

(1) 전원주 rubbing의 특성

- 1X 또는 전진폭이 한계 틈새치까지 증가한다.
- Higher harmonics와 함께 불균형에 기인한 1X 진동이 가장 우세하다. 1X가 가장 낮은 주파수 성분이다.
- Rubbing에 기인한 자려진동은 회전반대방향으로 선회하며, 진동주파수가 회전체계의 위험속도와 일치한다.
- 진동이 일단 시작되면 시스템의 억제력이 가인력을 극복하게 될 때까지 진동이 악화되거나, 기계는 파손에 이르게 된다.

(2) 부분 rubbing의 특성.

- 가벼운 rubbing의 경우 1X 또는 전진폭이 대체로 일정하거나 증가하며, 심한 rubbing의 경우는 감소한다.
- 특히, 몇개의 rubbing 위치가 존재하고 마찰력이 충분히 크면, 회전반대방향으로 선회한다.
- 진동주파수는 축의 회전수에 따라 1X, 1/2X, 1/3X, 1/4X 등의 subharmonic 성분을 포함한다.

(3) 스팀터빈 발전기 rubbing의 대표적 특성

- 진폭 및 위상이 크게 변하며 재현성이 없다.
- 진폭은 산형을 이루며, 주파수는 1X, 2X, 그리고 higher harmonic 성분이 현저하다.
- 위상은 회전반대방향으로 선회한다.

(4) 원인

- Packing clearance부족
- 케이싱의 불균형 변형(냉기동시)
- 회전체와 케이싱의 열팽창차
- 물의 유입

- Alignment 변화
- 회전속도증가에 따른 축의 위치이동
- 베어링 마멸
- 진공도 변화
- Nozzle diaphragm의 이동
- Oil deflector의 퇴적 carbon
- Water seal gland의 누수
- Partial arc admission시의 토크작용

A4. Misalignment 진동

스팀터빈에서의 misalignment는 베어링 메탈의 고온, 베어링의 oil whip/oil whirl, 베어링, 시일, 또는 커플링의 마멸/파손, 그리고 축의 균열 등을 발생시킬 수 있다.

(1) 특성

- 반경방향 진동과 함께 비교적 큰 축방향 진동을 수반한다.
- 진동의 주성분은 1X이며, misalignment이 크면 2X 또는 3X 성분이 나타난다.
- 위상이 불안정하다.

(2) 원인

- 기초침하
- 베어링 pedestal의 경년변화
- 정기점검시의 보수불량
- 계통쇼크의 영향

A5. Oil whip/whirl

저널 베어링에서 베어링 하중이 작아 저널의 회전 에 따른 유막의 지지력과 불균형이 발생하면, 저널은 큰 진폭을 가지고 부상낙하를 반복적으로 계속하게 된다. 진동주파수는 축의 회전수의 1/2(일반적으로, 0.4X~0.49X)이다.

(1) Oil whip의 특성

- 축의 회전수가 1차 위험속도의 2배에 도달했을 때 발생하며, 회전수가 더욱 증가 하여도 진동이 사라지지 않는다. 회전체가 크게 진동하며, 때때로 베어링 파손 과 회전체 자체의 손상을 야기시킨다.
 - 진동주파수와 모드는 회전체계의 1차 위험속도에서와 일치하며, 축의 회전수가 변하여도 그다지 변하지 않는다.
 - 회전체의 중심은 축의 회전방향으로 선회한다.
 - 부하가 작을수록 더욱 쉽게 진동이 유발된다.
- 이외에, 회전체와 베어링의 조합에 따라 다음의 현상이 관찰될 수 있다.

- 축의 회전수가 1차 위험속도의 2배를 상당히 초과하기 전까지는, 진동이 발생하지 않는다. 그러나, 일단 진동이 발생하면 축의 회전수가 1차 위험속도의 거의 2배까지 내려가도 진동이 사라지지 않는다. 이를 oil whip의 관성영향(inertia effect)이라 한다.

(2) Oil whirl의 특성 : 1/2X의 진동주파수(일반적으로, 0.4X~0.49X)에서 작은 진폭(oil whip에서보다 상대적으로)을 갖는 진동은 축의 회전수가 1차 위험속도의 2배에 도달하기 훨씬 전에 발생한다. 이 진동을 oil whirl이라하며, 큰 진폭의 oil whip과 구별된다. oil whirl의 주파수는 축의 회전수와 함께 증가하며, 궁극적으로 1차 위험속도의 2배에서 oil whip이 된다.

(3) 원인

- Alignment 변화, 또는 misalignment의 발생
- 베어링 pedestal 및 교정부(sole pate) 사이의 미끄럼 불량
- 외부진동의 영향
- 밸브의 스팀력

(4) Oil whip의 대책

- 축의 회전수를 위험속도의 2배 이하로 유지
- 베어링 하중이 증대 되도록 alignment을 조정
- 베어링 pedestal의 미끄럼 부위에 그리이스를 주입(미끄럼이 원활하도록), 미끄럼 불량에 따른 misalignment를 고려하여 alignment 조정
- Oil whip에 대한 안정성이 높은 베어링 형태를 적용(대형 화력 스팀 터빈에서는 tilting pad 베어링을 적용)
- 제어밸브의 열림순서 또는 열림개시 시간을 조정
- 일반적으로, 베어링의 급유온도를 높여 오일의 점성을 낮춤
- 베어링의 급유량을 줄임(급유압력을 낮추거나 급유 orifice를 조임)

A6. Steam whirl

부하에 의존하는 자력진동이 스팀터빈의 고압(HP) 회전체에서 발생할 수 있다. 이 불안정 현상은 스팀속에서 편심되어 회전하는 회전체의 작용에 의해 발생하며, 주로 유체력이 회전체의 탄성력보다 상대적으로 큰 조건하에서 발생한다.

(1) 특성

- 베어링특성에 의해 발생하는 oil whip과 유사하며, 회전체계의 고유진동수에서 회전방향으로 선회한다.

- Oil whip과 다른 점은 1차 위험속도의 2배 이하에서도 발생하고, tilting pad 베어링을 사용하는 회전체계에서도 발생한다.

(2) 대책

- Oil way의 가공, tilting pad 베어링의 사용(베어링의 감쇠증가)
- Labyrinth packing의 하반축 간극확장(스타인력의 상향력 경감)
- Blade 원주를 따른 seal finishing 사용(베어링의 간극을 조정(원주상에서 원주 방향에서))
- Wheel과 nozzle diaphragm의 불균일 가공
- 스팀 입구밸브의 개방속도, 및 폐쇄속도, 및 폐쇄각의 저하방지

A7. 내부마찰진동/hysteresis whirl

축의 일부에 디스크를 열박음하고 부속물을 부착한 조립축에서 그 상태가 불안정하면, 반복굽힘이 작용할 때 축표면은 신축하고, 디스크 내경에서 미끄럼이 일어나 마찰이 발생한다. 또한, 기어 커플링으로 결합된 회전체에 misalignment이 작용하거나 윤활이 불량한 경우, 마찰이 발생하여 진동의 원인이 된다.

(1) 특성

- 내부마찰진동은 subsynchronous 진동으로, 축의 회전방향으로 선회한다.
- 축의 회전수가 1차 위험속도보다 낮을 경우 내부마찰은 양의 감쇠작용을 하며, 1차 위험속도보다 높은 경우는 음의 감쇠작용을 한다.
- 외부감쇠가 매우 작고 축의 회전수가 1차 위험속도를 넘어 증가할 경우, 내부마찰의 진동주파수는 축계의 1차 위험속도와 일치하게 되어 hysteresis whirl의 자려진동을 유발시킬 수 있다.

(2) 대책

- 끼워맞춤 수정 또는 구조변경
- 외부감쇠가 커지도록 베어링이나 베어링지지 개선

A8. 베어링 급유부족 진동

대형 저널 베어링에서 오일과 함께 유입된 공기가 유막압력에 의해 파괴되면, 급격한 용적변화로 유막의 압력변동이 유발되어 진동이 발생한다.

(1) 특성

- 대형 저널 베어링을 사용하는 회전체에서 발생한다.
- 회전수가 증가함에 따라 진동이 난점형태로 나타나며 진폭이 커지게 된다.

- 진동주파수는 일정치 않으나 위험속도 주위의 주파수 성분이 크면 진동이 불안정하게 되며, 급유량이 부족할수록 매동성분이 커지게 된다.

(2) 대책 : 베어링의 급유량을 증가시키거나 베어링 윤제를 감소시킴.

A9. 축 굽힘 진동

축에 굽힘을 가하면, 굽힘 회계되는 진동의 발생 원인이 된다.

- 축 굽힘의 원인은 위험속도 이하의 회전수, 부하, 계차 진동, 스타인력에 의해 발생하며, 몇일 또는 몇주의 사용경과와 무관성도 변화한다.
- 랜런싱효과가 불균질적으로 나타난다. 근본적으로 랜런싱에 의한 개선은 기대할 수 없다.
- Slow roll vector의 변화가 나타난다.
- 대부분의 경우에서(75%이상), 1X 진동만이 운전속도에서 나타난다.
- 또한, 균열에 따른 축의 강성비대칭으로 2X 성분의 진폭 및 위상변화가 나타날 수 있다. 특히, 축의 회전수가 위험속도의 1/2이 될 때 2X 성분의 진폭 및 위상 변화가 크게 나타난다.

참고 문헌

- (1) Jackson, Charles, 1979, The Practical Vibration Primer, Gulf Publishing Company.
- (2) Rao, J.S., 1983, Rotor Dynamics, A Halsted Press Book, Chap. 4-6 or pp. 219~225.
- (3) Vance, J.M., 1988, Rotordynamics of Turbomachinery, John Wiley and Sons.
- (4) B & K, 1982, Measuring Vibration, B & K Booklet, pp. 36~37.
- (5) Bently Nevada, Orbit Magazines과 그 밖의 간행물
- (6) Someya, T., 1989, Journal Bearing Databook, Spring-Verlag.
- (7) Piotrowski, J., 1986, Shaft Alignment Handbook, Marcel Dekker, Inc.
- (8) 中島秀雄 외 4인, 1987, "Rotor Vibration Diagnosis System for Large Steam Turbine," 火力原子力發電, Vol. 38, No. 12.
- (9) 이현, 1992, "진동신호처리에 의한 터빈상태진단 및 결함탐지 기술연구," 한국전력공사기술연구원.
- (10) 한국전력공사 기술연구소, 년간 기술지원보고서.