

수력발전소 정비변수 및 회전체 통합관리시스템 개발

Development of an Integrated Management System for Maintenance Parameters and Rotary Machine of Hydro-power Plant

신 성 환*·박 진 호*·윤 두 병*·손 기 성**

Sung-Hwan Shin, Jin-Ho Park, Doo-Byung Yoon and Ki-Sung Son

(2012년 4월 17일 접수 ; 2012년 5월 29일 심사완료)

Key Words : Condition-based Maintenance(CBM: 상태기반정비), Condition Monitoring(상태감시), Rotary Machine(회전체), Maintenance Parameters(정비변수), Hydro-power Plant(수력발전소)

ABSTRACT

Condition-based maintenance(CBM) has been used as a useful concept for optimizing maintenance plan and decreasing maintenance cost in several kinds of plant sites. This study introduced an example that developed an integrated management system for maintenance parameters and hydraulic turbine of hydro-power plant in order to improve its maintenance strategy as applying CBM technique. The integrated management system consists of three parts. One is a hardware part including PDA inspection system and several kind of precision measuring instruments. Another is a vibration monitoring system on hydraulic turbine. The other is a software part that takes charge of making hierarchy tree of maintenance parameters and their inspection route, managing accumulated database, assessing health condition of components, and supporting interface with other enterprise management system. The system has been installed at Chuncheon hydro-power plant for test and demonstration. It is expected that the system can contribute database construction for diagnostics and prognostics on facility health condition and systematic accumulation of know-how on operation and maintenance of plant.

1. 서 론

최근 해외 발전시설과 정유·화학·제철 등의 산업 현장에서는 설비상태에 관계없이 일정한 주기를 정하여 설비를 관리하는 시간기반정비(time-based maintenance; TBM)를 대체할 수 있는 발전된 형태의 설비관리 개념의 필요성을 인지하고 있다. 이에

상태기반정비(condition-based maintenance; CBM) 개념을 도입하여 설비관리 최적화 및 경제성 향상을 실현하기 위한 움직임이 두드러진다. 특히 발전 분야에서 이러한 변화가 뚜렷하게 나타나고 있는데 이는 발전시설의 운영비용 중 정비·보수 비용이 차지하는 비중이 타 비용에 비해 높기 때문이다⁽¹⁾.

상태기반정비란 설비운전 중 설비 상태를 정확히 파악할 수 있는 감시·진단 기능을 갖춰 설비의 이상 발생 징후를 사전에 발견하여 적절한 관리(정비)를 수행할 수 있도록 하는 설비관리기법이다⁽²⁾. 상태기반정비는 그 구축 과정을 3단계로 나눌 수 있다⁽³⁾. 1 단계는 오감 또는 간이계측기를 이용하여 정해진 시간간격으로 점검을 수행하는 예방정비(preventive maintenance, PM), 2단계는 1단계 기법을 포함하면

* 교신저자; 정희원, 한국원자력연구원
E-mail : soulshin@kaeri.re.kr
Tel : (042)868-4851, Fax : (042)868-8313
* 정희원, 한국원자력연구원
** 세안기술(주)

이 논문의 일부는 2012년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

서 설비상태의 보다 정확한 진단을 위하여 정밀계측기를 이용한 주기적 점검을 수행하는 예측정비(predictive maintenance, PdM), 3단계는 1/2단계와 함께 실시간 감시시스템(real-time & remote monitoring system)으로 상시감시를 수행하고, 자동진단 기능으로 정비계획 수립에 정보를 제공하는 것을 포함한다.

국내 수력발전소의 경우, 설비의 운전 상태에 대한 감시는 주제어실(MCR)에서 이루어지고 있는 반면, 설비의 정비·점검은 현장에서 간이계측기를 이용하여 주기적으로 수행되고, 수기기록을 통해 관리되고 있다. 이는 설비관리기법면에서 1단계 상태기반정비 수준으로 볼 수 있기 때문에, 최근 기존 업무의 자동화를 포함한 업무 혁신 및 주요 설비에 대한 원격 상태감시시스템 설치로 향상된 설비 관리체계를 구축하기 위하여 노력하고 있다.

이 연구에서는 수력발전소 정비체계 향상을 목표로 상태기반정비 개념을 도입하여 발전소 성능 유지를 위한 정비변수(maintenance parameter) 관리 및 수차에 대한 진동감시, 정비이력 자동 DB 구축 기능을 갖는 통합관리시스템 개발 사례를 소개한다. 이를 위하여 상태기반정비 구축 단계에 따라 현장 점검을 위한 개선사항, 정밀계측기 보완, 수차 진동 상태 감시시스템 및 온도, 압력 등의 주요 점검사항과 진동감시시스템을 통합 관리할 수 있는 시스템을 구현한다. 마지막으로 구현된 시스템이 적용된 수력발전소 현장에서의 개선 정도를 파악한다.

2. 현장점검체계 개선

2.1 정비변수 관리

정비변수란 설비점검 및 데이터 취득을 위해 설정한 관리 기준으로 정성, 정량적인 속성을 갖는 정비·점검 데이터를 의미한다. 수력발전소 정비변수로는 육안점검이외에 기계분야의 진동, 음향레벨, 압력, 유량 등이 있고, 전기분야는 온도, 접지저항, 전류, 전압 등이 다수를 차지한다. 이외 계획정비시 오일 분석이 추가된다. 이러한 항목들은 상태기반정비에서 설비진단을 위해 사용되는 진단기법의 적용을 위한 측정항목이다(Fig. 1).

기존 점검에서는 정량적인 점검이 가능한 ‘이음여부’, ‘소음발생’, ‘진동유무’, ‘발열상태’ 등과 같은

Vibration Analysis (진동)	148 (17.29%)
Oil Analysis (오일분석)	113 (13.20%)
Infra-red Thermography (열화상)	99 (11.57%)
Human Senses (오감)	92 (10.75%)
Motor Current Analysis (모터전류분석)	77 (9.00%)
Dye Penetrant Examination (형광액침투검사)	74 (8.64%)
Ultrasonic Thickness Testing (초음파 두께측정)	73 (8.53%)
Ultrasonic Crack Detection (초음파 균열탐지)	63 (7.36%)
Magnetic Particle Inspection (자분탐상검사)	56 (6.54%)
Acoustic Emission Analysis (음향방출)	39 (4.56%)
Other(기타)	22 (2.57%)

Fig. 1 Analysis methods used for health diagnostics of equipment in the field of condition-based maintenance and their rate of application⁽⁴⁾

다수의 정비변수들이 정성적인 점검, 즉 육안점검으로 수행되어 점검자의 경험이 중요한 판단기준으로 작용하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 다양한 정밀계측기기를 도입했다. 먼저 전기부분에서의 ‘이음여부’에 대한 판단은 음향초음파계측기를 이용하여 정량화하였다. 음향초음파계측기는 송/배전선, 변전소, 스위치 기어, 변압기 및 부분 방전시 발생하는 이음을 측정할 수 있고, 기계부분의 회전체 구동시 마찰현상과 누설 점검에도 적용될 수 있다.

가청영역의 ‘소음발생’ 및 ‘진동유무’를 정량화하기 위해서는 휴대용 소음계 및 가속도계를 사용하였다. 가속도계의 경우 현장에서 가속도/속도/변위량, 시간과형 및 주파수 분석 결과까지 파악가능한 사양으로 0.16 Hz ~ 40 kHz의 주파수영역을 측정할 수 있다.

전기 설비에서 이상이 발생할 경우 특정 부위의 온도가 상승하기 때문에 ‘발열상태’에 대한 정량화는 이상 판단을 위해 중요한 항목이다. 그러나 주변 압기를 포함한 발전소 전기 계통은 고압으로 접근이 용이하지 않기 때문에 비접촉온도계와 열화상카메라를 도입하였다.

포괄적인 육안점검 항목들을 상세화하고 정밀측정장비의 활용도를 높이면서 결과적으로 기계와 전기 부분의 정비변수의 총 수는 각각 25%와 44% 증가하였다.

따라서 점검항목의 증가에 따라 발생할 수 있는 업무증가 현상을 해결할 방안 수립이 요구된다.

체계적인 정비변수 관리를 위하여 각 정비변수들은 ‘발전소(plant)’ - ‘호기’ - ‘계통(system)’ - ‘설비(component)’ - ‘구성요소(part)’ - ‘정비변수’의 구조를

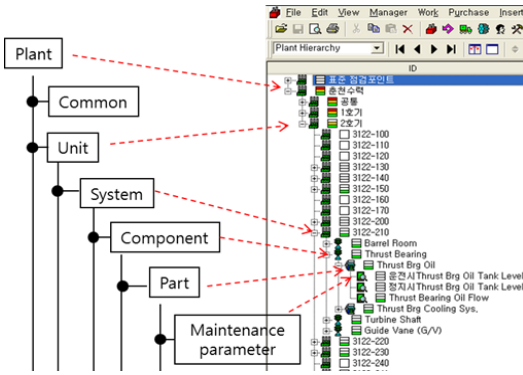


Fig. 2 Hierarchy structure for maintenance parameters

갖는 계층구조로 정리되었다(Fig. 2). 설비단계까지는 기존 시스템과의 호환성을 유지하기 위하여 한 수원(주)의 SAP 기능위치를 기준으로 분류하였고, 구성요소는 기존 점검보고서를 참조하였다. 이 구조는 같은 설비에 대한 정비변수들이 담당분야(기계/전기)와 점검계획(주간, 월간, 분기, 반기, 계획예방정비 등)에 따라 분류되어 설비의 상태를 포괄적으로 관리할 수 없는 문제를 제거한다. 이 연구에서는 이 구조를 생성하고 관리하기 위하여 캐나다 D사의 상용소프트웨어(S/W)를 사용하였다.

2.2 정비변수 점검

정비변수는 점검업무 분야에 따라 기계 및 전기로 구분된다. 기계분야의 경우 같은 계통의 설비가 수직으로 넓게 분포되어 있기 때문에 정비변수 점검시 위치별로 수행하는 것이 효율적이고, 전기분야의 경우는 계통에 따른 설비가 동일 공간에 위치하고 있어 설비별로 시행하는 것이 유리하다. 또한 점검계획에 따라 정비변수들을 각 분야의 주간/월간/분기/반기/계획예방정비로 구분하여 운영하는 것이 필요하다.

이 연구에서는 점검담당 및 점검계획에 따라 효율적이고 신뢰성을 갖는 업무 수행을 위해서 점검 기기별 또는 점검위치별로 정비변수들을 체계적으로 분류하는 점검루트(route)를 Fig. 3과 같이 구성하였다. 이러한 점검루트는 현장점검을 위해 도입된 PDA(portable digital assistant) 전달되고, 점검자는 정비변수의 측정량에 따라 구성된 PDA 입력화면에 결과를 입력한다(Fig.4). 도입된 PDA는 PDA와 직접 연결될 수 있는 비접촉 온도계와 가속도센서를

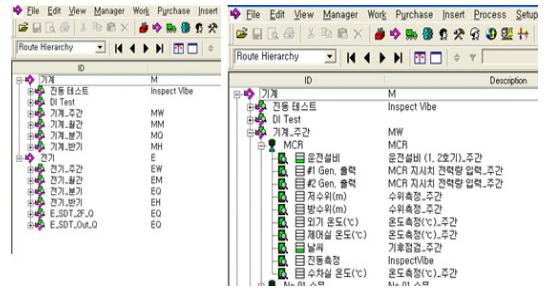


Fig. 3 Inspection route and maintenance parameters

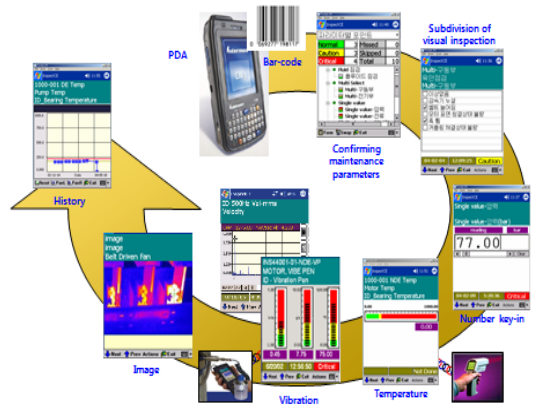


Fig. 4 Input windows of PDA according to the type of maintenance parameter

이용하여 측정된 온도 및 진동신호를 실시간으로 입력 가능하다.

이 연구에서는 현장 점검이 이루어지는 위치에 바코드를 설치하고, PDA의 바코드 인식기능을 점검루트와 연동하여 해당 설비 또는 위치에서 점검해야 할 정비변수 파악이 가능하도록 하였다. 이는 점검 시 설비/위치별 정비변수를 실시간으로 확인할 수 있고, 점검 정비변수를 누락하는 실수를 제거하는 장점과 초급 점검자 훈련 및 업무 적응도를 향상시킬 수 있다. 이러한 PDA 점검 시스템의 도입은 정비변수 증가에 따른 업무증가 현상을 해결할 수 있는 방안이다.

3. 수차 진동감시시스템

3.1 수차 진동 특성

수차는 수력발전소에서 예비기가 없는 가장 중요한 설비로 상대기반정비 적용을 위해 가장 적합한

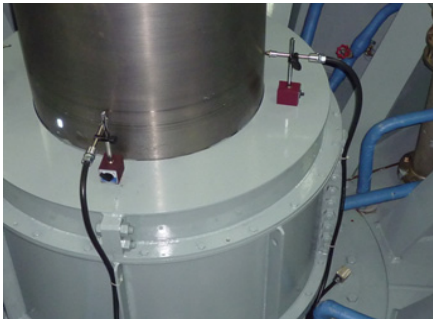


Fig. 5 Positions of sensors installed in barrel room for measuring vibration of hydraulic turbine

대상이다. 수차 설비 관리를 위한 주요 정비변수는 고정체 중 베어링, 스테이터(stator) 코일 및 코어의 온도, 수차로 유입되는 물의 압력, 수차 회전속도, 수차 축의 흔들림 공차(run-out), 수차 상부 진동 등이다.

고정체 부분의 온도와 압력, 회전 속도와 관련된 항목에 대해서는 성능 개선 및 계획예방정비 기간 중 적절한 위치에 센서가 설치되어 MCR에서 실시간으로 데이터를 확인할 수 있다. 하지만 현재 진동 측정을 위해 설치된 센서는 전무하고, 현장에서 간이진동계 또는 수동 변위측정기를 이용한 주기 점검만 수행되고 있다.

수차의 실시간 진동감시를 위하여 수차 설비에 직접 접근 가능한 barrel room에 수차축의 진동 변위 측정용 비접촉 변위센서를 90°간격으로 두 개 설치하고, 상부 진동 측정을 위하여 3축 가속도 센서를 설치하였다(Fig. 5). 수차의 회전수가 150 rpm 이기 때문에 변위센서, 가속도센서 및 관련 신호증폭기등은 0.5 Hz 이상의 주파수 대역에서 유효한 것으로 선택하였다. 참고로 변위센서의 경우는 3.9 nm의 동적해상도를 갖는다.

변위센서를 이용하여 측정된 신호에 대한 궤도분석(orbit analysis) 결과는 Fig. 6(a)와 같다. 각 방향의 축 진동 변위는 ±100 μm 정도이고, 원형의 궤도로부터 측정력 불량 문제는 없다고 판단된다. Fig. 6(b)는 각 변위 신호의 주파수 분석 결과이다. 수차가 초당 2.5회전을 하고 있기 때문에 이에 따른 기본주파수(1X) 성분과 고조주파수 성분(2X, 3X 등)이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 6(c)는 각 변위신호를 이용한 방향성 스펙트럼^(5,6) 분석 결과를 나타낸다. 질량 불평형에 해당하는 1X 성분이 타

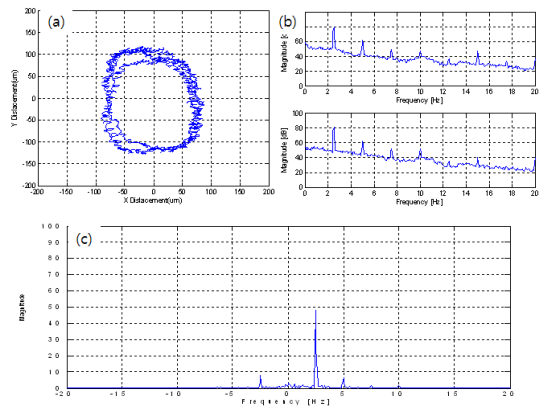


Fig. 6 (a) Orbit analysis, (b) spectrum analyses, and (c) directional spectrum analysis results on displacement signals of the turbine shaft

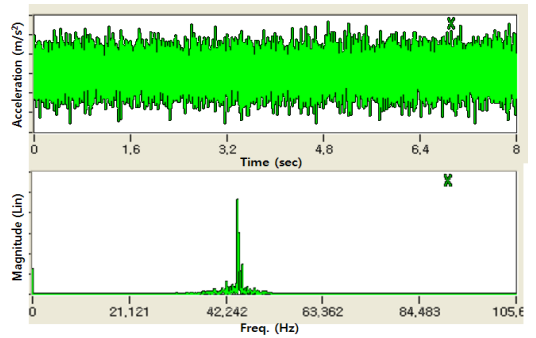


Fig. 7 Time signal(upper) and frequency spectrum (lower) of acceleration on the floor of barrel room

성분과 비교하여 주요하게 나타나지만 변위관련 제한치에 미치지 않기 때문에 설비 상태에는 문제가 없다. 또한 2X 성분은 거의 나타나지 않는 것으로부터 측정력 불량이 없음을 다시 확인 가능하다⁽⁷⁾.

Fig. 7은 수차 안내깃(guide vane) 상부, 즉 barrel room 바닥의 수직방향 가속도 신호에 대한 시간과 형 및 주파수 분석 결과를 보여준다. 안내깃의 수가 18개이므로 기본주파수의 18배인 45 Hz에 주요한 진동 성분이 발생함을 알 수 있다.

3.2 진동감시시스템 주요 기능

진동감시시스템은⁽⁸⁾ 수차의 진동을 감시하고 분석하기 위하여 회전기기 신호 분석 및 진단 기능과 분석/진단 결과를 자동 DB화 할 수 있도록 개발되었다^(9,10). 현장에서 직접 감시 상황을 파악하고, 데

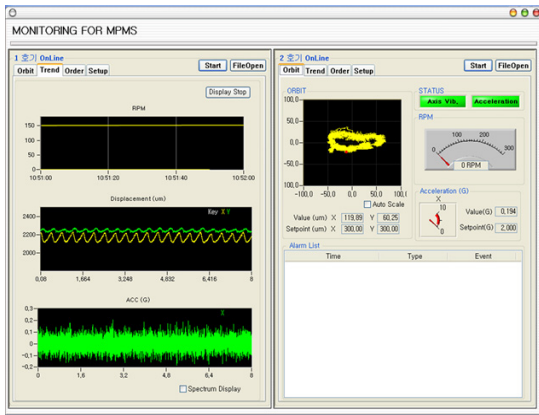


Fig. 8 Vibration monitoring system for hydraulic turbine

이더 관리 효율을 높이기 위해 데이터 수집 및 분석용 컴퓨터를 현장에 설치하여 운영한다. 진동감시 시스템의 주요기능은 다음과 같다(Fig. 8).

- 변위 및 가속도 평균값(RMS) 표시
- 변위/가속도 신호의 시간파형 및 주파수 분석
- 축진동 변위에 대한 궤도 분석(orbit analysis)
- 차수분석(order analysis)
- 방향성 스펙트럼(directional spectrum)^(5,6)
- 데이터 저장 및 불러오기
- 임계치 및 알람 설정
- DB 자동 생성 및 데이터 전송
- 알람 로그 기능 및 시스템 관리

개발된 진동감시시스템은 신호 저장을 위한 다양한 트리거(trigger) 기능을 갖는다. 먼저 수력발전소는 주파수 추적 능력이 우수하여 빠른 가동/정지가 가능하기 때문에 전력계통수요에 따라 운전 및 정지가 빈번하다. 따라서 정지/운전시 데이터를 구분하여 측정하는 것이 필요하다. 이를 위하여 축진동 변위의 특징값을 정하여 발전소 가동 여부를 파악하고, 운전시 데이터만 측정하도록 하였다. 그리고 정상적인 운전상태 데이터 축적을 위하여 진동감시시스템은 일정한 시간 간격(현재 5분으로 설정)으로 데이터를 저장하는 기능과 설정된 임계치(threshold for alarm) 이상의 신호가 감지되었을 경우 이상 신호를 저장하는 트리거 기능을 추가로 갖는다.

4. 통합관리시스템

4.1 시스템 통합 및 주요 기능

수력발전소 정비·점검업무 향상을 위해 개발된 정비변수 및 회전체 통합관리시스템은 운영 하드웨어(H/W)부, 진동감시시스템부, 운영 S/W부로 구분된다. 운영 H/W부는 기존 수기기록을 대체하기 위하여 도입된 PDA 점검 시스템, 온도, 진동, 이음의 정량적 평가를 위하여 정밀진동계, 열화상카메라 및 비접촉온도센서, 음향초음파진단기이다.

진동감시시스템부는 수차의 진동현상을 실시간으로 감시한다. 현장의 분석컴퓨터에서 측정신호 저장 및 분석을 수행하고, 분석된 결과 및 알람발생 등의 이력은 유무선 통신을 통해 통합관리시스템 서버에 저장된다. 실시간 데이터 처리의 경우 CPU 및 메모리에 부하가 클 수 있기 때문에 전체적인 시스템 운영 속도에 영향을 미칠 수 있고, 통합관리 서버에서 분석을 수행할 경우 운영 S/W의 구조가 복잡해질 수 있는 문제가 있다. 따라서 분석컴퓨터에서는 측정 신호 저장 및 정밀 분석을 수행하고, 통합시스템 서버에서는 설비 상태진단에 필요한 데이터만을 저장, 관리하는 것이 효율적이다.

통합관리시스템 운영 S/W부는 정비변수의 통합관리, 정비변수 점검루트 생성, 설비건전성 평가, DB 운용/분석/비교, 보고서 작성 및 결재기능을 가지고, PDA 점검시스템, 진동감시시스템과의 인터페이스 기능을 제공한다. 그리고 수력발전소 운전팀에서 모니터링하고 있는 운전변수들이 관리되는 PAROS 시스템과의 인터페이스를 통하여 10초 간격으로 회전체의 베어링 온도, stator 온도를 포함한 관련 데이터를 통합관리하는 기능을 갖는다.

통합관리시스템의 기능 중 설비 건정성평가는 설비 이상이 발생하여 경보가 발생하기 전에 설비 상태를 파악하는 것이 주목적이다. 일반적으로 건전성평가는 고장이 발생했을 때 설비의 이상현상을 정밀 분석하여 물리적 특징을 추출하고, 이러한 데이터를 축적하여 관련 고장과 관련된 codebook(비교군)을 정의한 후, 향후 설비에서 발생하는 신호와의 비교를 통해 이루어진다.

하지만 수력발전소 설비의 경우, 안전계수가 매우 크게 설계되어 있고, 상대적으로 고장 발생 확률이

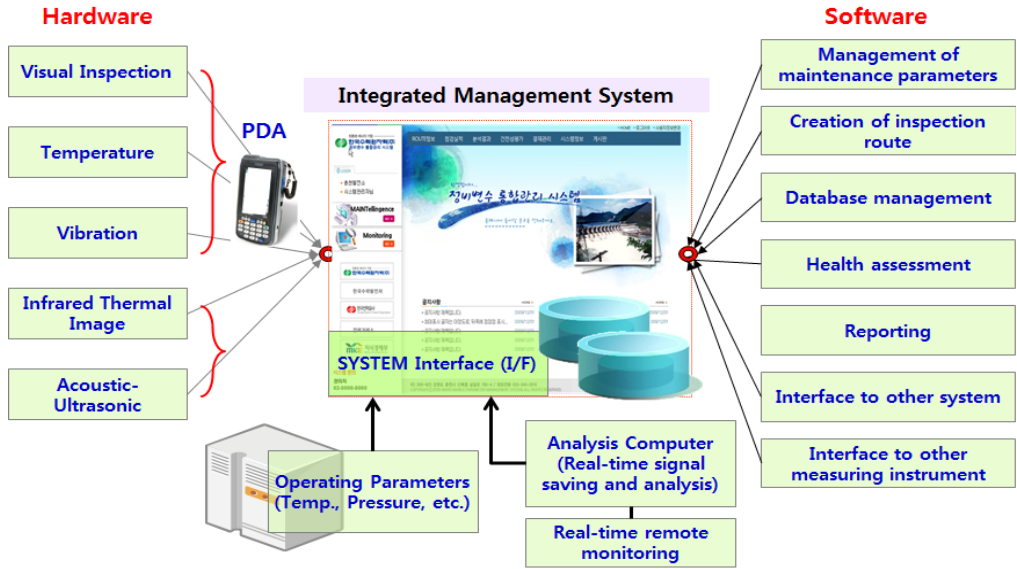


Fig. 9 Integrated management system for maintenance parameters and hydraulic turbine

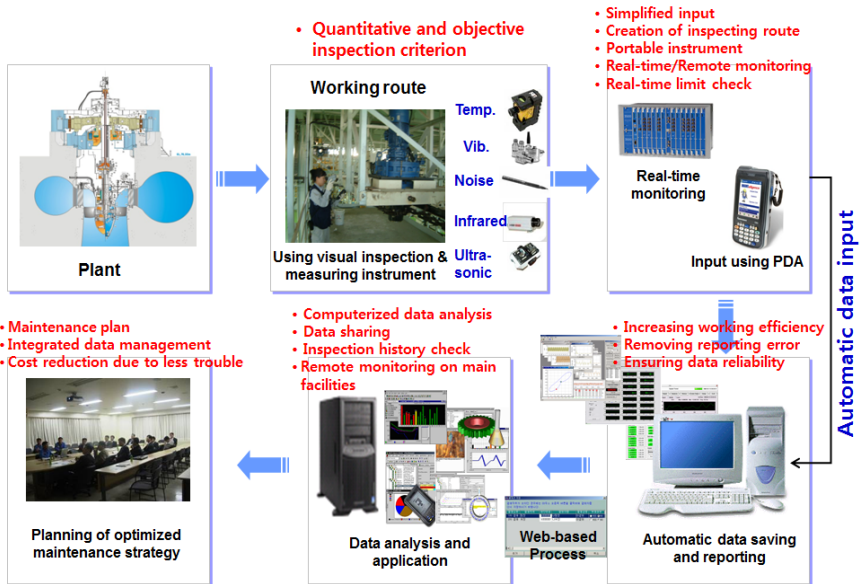


Fig. 10 Main functions of the developed integrated management system in this study and its effect

적어 특정 고장이력으로 부터 확률적으로 의미있는 특징 추출이 쉽지 않다. 따라서 이 연구에서는 건전성 평가를 위하여 정상상태에서의 정비변수 분포특성을 파악하여 정상 기준값을 설정하고, 이 값을 알람 값과 연동하여 이상을 예측하는 방법을 선택하였다.

정상범위를 설정하기위하여 정규분포를 적용하여 $\pm 2\sigma$ 에 해당하는 부분을 경계값으로 선정하였다. 이

와 함께 최근 20개, 50개, 100개의 데이터를 회귀 분석하여 얻은 회귀곡선을 바탕으로 경보발생 시점을 예측하도록 하였다⁽¹¹⁾.

4.2 통합관리시스템 적용 효과

개발된 정비변수 및 수차진동 통합관리시스템은 춘천수력발전소에 적용되었고, 적용 1년 후 현업 중

Table 1 Questionary results on work efficiency

System launching	Before		After	
Consuming time	100 %		95 %	
	Inspection	Reporting and others	Inspection	Reporting and others
Duty portion	82 %	18 %	92 %	8 %

사자들을 대상으로 시스템의 효과를 설문 조사하였다. 설문분야는 정비변수 관리의 신뢰성 향상여부, 시스템의 적정성, 업무효율 향상정도에 중점을 두었다.

정비변수 관리 신뢰성 부분에서는 설비별 정비변수 파악이 용이하고, 정밀측정 결과의 자동 입력 및 DB 구축으로 관리 체계가 확립되었다는 긍정적인 의견이 제시되었다. 특히 수차의 실시간 진동감시시스템 및 설비 건전성 평가 체계의 구축은 IT 기술을 융합한 설비 관리의 추진 방향으로 인정받았고, PDA 점검 시스템의 적용은 전입 및 신입 정비 담당자들에게 효과적인 업무 파악 도구로 사용 가능한 장점이 나타났다.

시스템의 적정성 부분에서는 통합관리시스템 도입으로 다수 정비변수의 정량적인 관리가 가능해졌고 정밀계측기기 도입의 타당성은 인정되나, 전체적인 사용 방법을 숙지하는데 어려움이 있고, 이론적인 교육을 통하여 측정 결과에 대한 자체 분석 역량향상의 필요성이 제기되었다.

업무효율 향상부분에서는 2.1절에서 언급한 것과 같이 점검해야 할 정비변수의 수가 증가했음에서 불구하고, 통합관리시스템 도입 후 5%의 점검업무 시간이 감소하였다. 또한 현장에서의 실제점검과 점검전후 준비 및 보고서 작성에 할애하는 시간 비율이 시스템 도입전 8:2에서 도입후에는 9:1로 변화하였다. 이는 현장에서의 보다 충실한 점검이 수행되고 있음을 의미하는 결과이다(Table 1).

5. 결 론

이 연구에서는 수력발전소의 정비·점검 업무에 적합한 선진 설비관리체계의 기반을 마련하기 위하여 상태기반정비 개념을 적용한 통합관리시스템을 구축하였고, 이를 통하여 예방정비수준(1단계 상태기반정비) 이던 수력발전소 설비관리 체계를 3단계

상태기반정비 수준까지 향상시켰다. 오감 및 정성적 점검에 의한 수기입력에 머무르던 관리 수준을 정밀계측장비의 도입으로 정비변수를 정량적으로 측정하고, PDA 점검 시스템 및 진동감시시스템 도입으로 전산화된 데이터 분석/정리/공유를 통한 자동 DB 축적이 가능하게 되었다. 이는 정비·점검 계획의 최적화를 통하여 설비관리 비용을 최소화 할 수 있는 기틀이 될 수 있다(Fig. 10).

현재 구축된 시스템의 경우, 정비변수의 신뢰성 향상 및 DB 축적을 위한 인프라면에서 매우 뛰어난 성능을 보이지만 이는 경제적인 투자로 쉽게 구축 가능한 단계이다. 따라서 축적된 DB를 활용하고 현 설비에 대한 상태를 정확히 파악하여 정비계획을 세우기 위한 설비 이상 진단·예측 기술 개발에 지속적인 투자와 관심을 기울여야 한다.

후 기

이 연구는 2011년 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP; No. 2011T100200116) 및 한국수력원자력(주)의 지원으로 수행된 연구내용입니다. 수력발전소 정비변수 통합관리시스템 구축을 위해 협조해 주신 한강수력본부에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Krebs, S., 2007, Wind Farm - Technology Challenges and Future Strategies: Airtricity, Proceedings of SKF Wind Farm Management Conference.
- (2) MIMOSA Website: <http://www.mimosa.org/?g=resources/specs/osa-cbm-v330>.
- (3) Gulati, R., 2009, Maintenance and Reliability Best Practices, Industrial Press Inc., NewYork.
- (4) Higgs, P. A., et al., 2004, A Survey on Condition Monitoring Systems in Industry, Proceedings of 7th Biennial ASME Conference Engineering Systems Design and Analysis, pp. 19~22.
- (5) Lee, C. W., 1993, Vibration Analysis of Rotors, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- (6) Lee, C. W. and Joh, Y. D., 1991, A New Horizontal in Model Testing of Rotating Machinery,

The 4th Asia - Pacific Vibration Conference, Key-note Paper.

(7) Yang, B. S., et al., 1996, Development of Vibration Diagnosis System for Rotating Machine, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 325~332.

(8) Shin, S. H., et al., 2010, Development of Vibration Monitoring System on Rotary Machine in Hydra-power Plant, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 280~281.

(9) ISO 13374-1:2003, Condition Monitoring and Diagnostics of Machines - Data Processing, Communication and Presentation- Part 1: General Guidelines.

(10) ISO 13374-2:2007, Condition Monitoring and Diagnostics of Machines - Data Processing, Communication and Presentation- Part 2: Data Processing.

(11) Devore, J. L., 1998, Probability and Statistics for Engineering and the Science, Duxbury, Singapore.