원자력발전소 주요기기에 대한 감시 및 예측진단 기술 적용성 고찰

A Study for Monitoring & Prognostic Technology of Nuclear Power Plant Critical Equipments

조 성 한*, 이 재 기, 김 형 관

(Sung-Han Jo¹, Jae-ki Lee¹, and HyounGwan Kim¹)

¹KHNP Central Research Institute, Plant Support Engineering Center

Abstract: The major goal of nuclear power industries during past 10 years has been increasing reliability and utility capacity factor. But as capacity factors crept upward, it became harder and harder to attain next percentage of improvement. Therefore, other innovative technologies and method are required. The monitoring, diagnostic and prognostic technologies have been applied to the fossil power plants and contributed a lot on improving their reliability and performance. However nuclear industries are still reluctant to apply the technology by several reasons. In this paper, current preventive maintenance status of nuclear power plants and industrial practice of monitoring, diagnostic and prognostic technologies are investigated. In addition, the restriction in the implementation of the technologies to the nuclear power plants are defined. Finally, we suggest appropriate methods of implementing the technology to nuclear industries for improving current reliability and performance.

Keywords: prognostic, monitoring, diagnostic

I. 서론

사회가 복잡해지고 고도화 되면서 재해 및 사고에 의한 인명과 자산의 손실이 더욱 광범위하고 중대한 영향을 미치고 있다. 원자력발전소는 국가산업발전 및 국민생활에 매우 유익한 역할을 담당하고 있지만 천재지변 등 예기치 못한 위험이 함께 존재하고 있다. 원자력발전소의 안전을 유지하기 위하여 다중의 안전설비를 설치하고 이러한 설비가 제 기능을 유지하는지 여부를 항상 감시하고, 이상 유무를 확인하고, 주기적으로 정비를 수행하고 있다. 최적의 교체 주기를 정하여 고장이나 성능저하 전에 정비를 수행하거나, 설비의 상태를 지속적으로 감시하여 상태진단을 통한 정비 시기를 결정하는 예측정비 프로그램을 제한적으로 적용하고 있다. 이러한 노력으로 우리나라 원자력발전소의 이용률은 93%이상을 유지하고 있으며, 호기당 발전정지 건수가 0.4건으로 세계적으로 우수한 원자력발전소 운영 능력을 보유하고 있다[1].

원자력발전소에 적용하고 있는 예방정비 프로그램은 제작사 권고나 정비경험을 기반으로 하는 시간기반정비(Time Base Maintenance)로서 때로는 필요하지 않은 정비를 수행하는 과잉정비나 정비시기를 놓쳐서 기기의 신뢰도를 저하시키는 단점이 있다. 따라서 기기의 신뢰도를 향상하고 경제성을 고려한 상태기반정비(Condition Base Maintenance)와 같은 정비전략이 요구된다.

현재 원자력발전소의 상태기반의 예측정비 기술 수준은 주요 회전기와 대형 전기기기에 적용하고 있으며 기기의 상태 감시를 통한 고장 징후를 사전에 확인하여 조기에 경보를 제공함으로써 기기의 신뢰도를 향상하는 수준에 머무르고 있다. 또한 주요 피동형기기(배관, 탱크 열교환기 등)의 경우 비파괴 검사를 주기적으로 시행하므로 피동기기의 재료에 대한 신뢰성을 확보하고 있다. 국 내,외 여러 연구기관에서 원자력발전소 주요기기에 대한 수명예측을 위한 성능분석 알고리즘 개발과 연구를 진행하고 있지만 원자력발전소에 적용에는 초기단계에 머무르고 있다.

상태기반 예측정비의 가장 큰 장점은 기기의 고장 시점을 예측할 수 있다는 것으로 사전에 조치를 수행하므로 신뢰성 있는 발전소 운영이 가능하다는 것이다. 이러한 상태기반정비 프로그램 구축을 위해 가장 중요한 것이 기기의 상태를 확인할 수 있는 정보의 수집이다. 원자력발전소에서 취득하고 있는 운전 정보는 발전소 운전을 위한 변수가 대부분이며 기기의 상태를 나타내는 정보는 상대적으로 부족하다. 또한 기기의 고장 시점을 예측하기 위해서는 장기간의 기기 운전 이력이 필요하지만 지금까지는 이러한 자료가 정보로서 관리되지 못하였다. 국내 외 연구기관에서 원자력발전소 주요기기 및 재료에 적용하기 위한 예측진단 알고리즘을 개발하고 있지만 아직까지는 발전소에 적용하지 못하고 있다. 그러나 최근에 EPRI에서 LTO (Long Term Operation) 프로젝트를 추진함으로써 원자력발전소 주요기기에 대한 온라인 감시 및 고장예측 모델을 개발하려고 계획하고 있다.

따라서 본 논문에서는 원자력발전소 주요기기의 고장시점을 예측하기위한 상태기반 예측정비의 적용 현황과 문제

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 8. 20., 수정: 2011. 9. 5., 채택확정: 2011. 9. 25.

조성한, 이재기, 김형관: 한수원중앙연구원 계측제어기술팀
(uljincom@khnp.co.kr/jaekile@khnp.co.kr/kimball29@khnp.co.kr)

점을 제시하고 원자력발전소에서 적용한 사례와 향후 통합 감시체계 기반의 상태진단 및 고장예측 정비의 적용 방안 에 대하여 제시하고자 한다.

II. 원자력발전소의 예측진단 현황 및 문제점

원자력발전소 주요기기에 대한 예측진단은 기기상태정보와 운전이력을 개발된 알고리즘에 입력하여 기기의 정비시기와 잔여수명을 예측하는 기법으로 기존의 고장진단과는 차별화된 개념이다. 이는 첨단기술을 활용한 과학적인 모니터링과 과거의 데이터 추이를 분석하여 기기의 성능저하, 고장, 정비 등을 예측하도록 한다. 그림 1은 EPRI (Electric Power Research Institute)에서 발행한 보고서에서 언급한 예측진단에 관한 개념도이다[2]. 발전소 운전정보를 지속적으로 감시하여 고장 또는 이상상태를 확인하고 이러한 상태를 기반으로 어떠한 고장인지 진단하게 된다. 상태정보와 진단결과는 예측진단의 입력 자료가 되어 잔여수명을 예측하게 되며 궁극적으로 기기 또는 시스템의 신뢰성을 위한 정보로 제공된다.

국내의 원자력발전소에서는 기기 신뢰도 향상을 위해 INPO (Institute of Nuclear Power Operations)에서 개발한 AP-913 프로그램을 적용하고 있다[3]. 그림 2는 AP-913 프로그램의 가장 상위 수준의 업무프로세스이다. 이 프로그램은 주요기기에 대한 감시를 이행하여 이상상태 발견시 시정 조치를 수행하고 그 결과를 성능감시에 반영하며 예방정비

이행, 경향분석 등 지속적인 신뢰도 개선업무를 수행하고 이를 토대로 증장기 정비전략 및 사업전략을 수립하게 된다.

AP-913 프로그램은 원자력발전소 기기의 신뢰도 및 이용을 향상에 효과적인 것으로 입증되었다. 그러나 이러한 프로그램에 예측정비 개념을 포함하여 원자력발전소에 적용하기 위해서는 AP-913 프로세스 수행에 필요한 많은 데이터와 업무프로세스를 효과적으로 처리하기 위한 정보관리기술의 개선과 성능분석을 위한 알고리즘 개발이 필요한 것으로 인식되고 있다.

원자력발전소의 예측진단체계 적용에 가장 큰 문제점은 기기의 상태를 진단할 수 있는 정보가 부족하다는 것이다. 현재 원자력발전소에서 취득하여 관리하고 있는 정보는 전력생산과 원자력 안전을 위한 운전정보가 대부분이며, 기기의 상태 파악과 성능분석을 위한 정보는 매우 부족하다. 또한 기기의 고장시점을 예측하기 위해서는 장기간 운전 이력(고장, 정비, 교체)이 필요하지만 축적된 정보 또한 부족한 실정이다. 특히 고온과 고압 그리고 고방사선에 장시간 노출되어 운전되고 있는 피동기기(배관, 탱크 등)의 경우 재질의 변형 또는 부식 상태를 확인할 수 있는 운전정보가 전혀 없으며 주기적인 비파괴 시험을 통하여 신뢰성을 확인하고 있는 실정이다.

III. 예측정비 적용사례 및 기술개발 동향

항공산업, 의료산업 등 고 위험산업계에서는 상태감시 및 고장예측 기술을 활발하게 개발하여 적용하고 있지만, 원자력발전소에서는 아직까지 초보적인 수준에 머물고 있다. 미국, 프랑스 등 원자력 선진국에서 원자력발전소에 고장예측 기술을 적용하기 위한 기술개발을 시작했으며 일부 상태감시 분야는 업무에 적용하고 있다. 우리나라 원자력발전소에서도 진동, 윤활유, 등 일부 분야에 대하여 초보적인 상태감시 및 예측정비를 수행하고 있다.

1. EPRI LTO Project

EPRI는 LTO 프로젝트로 필수기기 또는 계통에 대한 정보통합 및 통합 온라인감시 기술을 검토하고 있다. 이 프로젝트를 통하여 5년 내에 원전 중요기기에 대한 통합 온라인감시 적용기준, 데이터베이스 및 상태진단과 예측진단 표준 방법론을 포함한 기반을 구축할 예정이다.

그림 1. Hierarchy of reliability monitoring.

Fig. 1. Hierarchy of reliability monitoring.

그림 2. Equipment reliability process top level diagram.

Fig. 2. Equipment reliability process top level diagram.

그림 3. EPRI COLM model.

Fig. 3. EPRI Centralized On-Line Monitoring model.

또한 소형펌프, 압력전송기 등을 대상으로 상태진단 및 고장예측 알고리즘 개발을 위한 연구를 수행하고 있으나 아직까지 원자력발전소에 적용하지 않고 있다.

2. 해외 원자력발전사

2.1 Luminant 사

전력생산에 필수기기에 대한 55개의 무선센서를 설치하여 발전소 기술자들과 POC (Power Optimization Center)에 제공하여 고장예측업무 활용하고 있다. POC는 원자력발전소 및 화력발전소의 운전, 기기신뢰도, 열성능에 대한 엔지니어링 업무를 수행하고 있으며, 상태감시 및 이상상태 조기발견과 관련된 엔지니어링 업무를 주로 하고 있다.

2.2 Exelon 사

CPM (Centralized Performance Monitoring)을 구축하여 주요기기의 조기경보 모델과 주요시스템에 대한 기기 건전성 평가, 예측정비 데이터 통합관리 업무를 수행하고 있다.

2.3 Pacific Gas & Electric 사

Diablo Canyon 1,2호기발전소에 ER 프로세스를 도입하여 MR과 계통 건전성 평가 관리를 수행하고 있다. SAP업무 프로세스와 데이터를 자동으로 연계하여 고장을 등 운전보고서와 계통 건전성 평가 보고서가 자동으로 처리되도록 하고 있다.

2.4 Florida Power & Light Group 사

운영하고 있는 5개의 발전소에 대한 통합 계통 건전성 평가 관리를 수행하고 있다. 정비작업자와 시스템 엔지니어가 통합시스템에서 동시에 작업을 수행하고 그 결과가 다시 통합시스템에 입력되어 시스템 건전성 평가 보고서에 활용되도록 하고 있다.

2.5 First Energy Nuclear Operating Company 사

SAP을 기반으로 하는 ER 프로세스를 적용하였으며 기기 건전성평가 관리를 통하여 다양한 형태의 기기 추이분석을 수행하고 있다.

3. 국내 원자력발전사

국내원전의 상태감시 및 고장예측 체계는 일부 주요 기기에 대하여 단위기기별로 상태를 감시하여 이상상태 발생 시 초기에 경보를 제공하여 정비를 수행할 수 있도록 하고 있다. 특히 회전기기의 경우 진동 정보를 온라인으로 통합 관리하여 발전소 정비원과 기기엔지니어가 함께 분석할 수 있는 체계를 운영하고 있다. 최근에는 SmartSignal사의 PI (Plant Information)시스템을 구축하여 전사 운전정보통합시스템을 운영하고 있다. PI 시스템을 기반으로 발전운전정보, 정비이력, 예방정비이력, 신뢰도정보 등을 통합하여 운영하는 Engineering Workstation System을 구축하였으며, 일부 발전소에서 주요기기에 대한 상태감시를 통한 조기경보 시스템(EPI-Center)을 운영하고 있다.

4. 예측진단 기술개발 동향

원자력발전소에 적용하는 예측진단 기술은 능동기기와 피동기기로 구분하여 운영하고 있으며, 예측진단 기술개발도 이와 같이 구분하여 개발하고 있다. 예측진단 기술개발의 목적은 기기의 고장시점을 예측하여 적기에 교체하거나 성능저하의 직접원인을 통제하고 관리하여 성능저하를 늦추는 것이다. 예측 결과의 정확성을 높이기 위하여 과학적

모델에 근거한 기술이 개발되어야 하며 국내 외 주요 연구기관을 중심으로 예측진단 기초연구가 진행되고 있다[4,5].

4.1 기계분야

기계분야가 능동기기 예측진단 기술개발이 가장 활발하게 진행되고 있는 분야이며 특히 펌프와 밸브에 대한 예측진단 기술이 개발되고 있다.

최근에 전력연구원에서 “원전 주요 능동기기 예측진단 개발보고서”[4]를 발행하였다. 기계분야의 예측진단 기술개발 내용은 결합진단 기술과 고장예측 기술로 나누어 볼 수 있는데 표 1은 기계분야의 주요 예측진단 기술 개발 동향을 설명하고 있다.

4.2 전기분야

전기분야 예측진단 기술은 전동기, 변압기, 발전기 등 대형 전기기기에 대하여 연구개발이 진행되고 있다. 표 2는 전기기기에 대한 예측진단 기술개발 현황을 설명하고 있다.

4.3 계측제어분야

계측제어분야의 예측진단 기술개발은 단위기기에 대한 기술개발 보다 계통 또는 루프 단위로 기술개발이 진행되고 있다. 표 3은 원자력발전소의 주요기기의 제어루프에 대한 예측진단 기술과 전자회로기관 잔여수명 예측 기술에 대하여 설명하고 있다.

표 1. 기계분야 예측진단 기술개발 동향.

Table 1. Technology trend of mechanical prognostics.

기술	내용
결합진단	• 전기신호를 이용한 펌프 결합 진단
	• 가속도신호를 이용한 캐비테이션 소음 검출
	• 임펠러 마모링 추정
	• 메커니컬 셸 결합 검출
	• 솔레노이드 고착 진단 기술
고장예측	• 캐비테이션에 의한 임펠러 마모 예측
	• 베어링 Spall 진전 예측진단 알고리즘
	• 공기구동밸브 패킹 성능저하 예측기술

표 2. 전기분야 예측진단 기술개발 동향.

Table 2. Technology trend of electrical prognostics.

기술	내용
전동기	• 온라인 전류분석 및 상태진단 기술
	• 온라인 부분방전 진단기술
변압기	• 유중가스 감시 및 예측진단 기술
발전기	• 부분방전 진단기술
	• 고정자 권선 단부 진동 감시
	• 회전자 축간단락, 축전압, 축전류 분석

표 3. 계측제어분야 예측진단 기술개발 동향.

Table 3. Technology trend of I&C prognostics.

기술	내용
제어루프 상태진단	• 원격 모니터링 기술
	• 고장조기감지, 성능진단, 예측진단
전자회로기관 수명예측	• 카드 노화상태 온라인 감시
	• 카드 고장 조기발견 알고리즘
	• 카드 잔여수명 예측기술

4.4 피동기기 분야

피동기기는 정지된 상태에서 고유기능을 하는 기기로서 원자력발전소 계통의 압력경계를 유지하는 역할을 하며 대표적인 기기는 압력용기, 탱크, 배관 등이 있다. 피동기기에 대한 예측진단 기술은 기기의 수명기간 뿐만 아니라 수명 이후 계속운전 기간에도 기능저하 없이 사용할 수 있음을 보증하기 위해 매우 중요하다. 피동기기의 기능저하는 주로 경년열화에 의해 발생하며 경년열화는 Fatigue, Corrosion, SCC (Stress Corrosion Cracking), Corrosion Fatigue 등이 가장 빈번하게 발생하는 원인으로 분류된다. 피동기기의 예측진단 기술은 이러한 경년열화 원인을 관리하는 것과 경년열화에 의해 발생한 균열을 검출하는 것이다. 현재 원자력발전소에 적용하고 있는 피동기기 예측진단 기술은 EPRI보고서와[6,7] NRC 연구보고서를[8] 기초하고 있다. 이 보고서는 다음과 같은 내용을 포함하고 있으며 향후 연구항목 및 우선적으로 연구해야 될 분야에 대하여 설명하고 있다.

- 재료열화 종류와 관리 프로그램
- 열화에 따른 손상결과, 균열 검사 및 평가 기법
- 보수 및 교체 기법

현재 원자력발전소에 적용하고 있는 예측진단 기술은 재료의 균열측정, 평가, 보수, 교체 등 경년열화관리 중심의 기술이다. 엄밀한 의미의 예측진단 기술은 결함이 생성되기 전부터 손상을 예측하여 적절한 시기에 예방정비를 시행하는 것이다. 이것이 가능하려면 물리적, 화학적, 기계적 재료적 지식을 통합한 실험과 해석을 통하여 최적의 모델이 개발되고 필수 변수 선정과 변수 측정을 위한 센서개발이 먼저 이루어져야 한다. 이후 수많은 실험적 과정을 통하여 충분한 데이터베이스가 구축될 때 피동기기의 예측진단 기술이 원자력발전소에 적용될 수 있을 것이다.

IV. 원자력발전소 적용 방안

예측정비 적용사례에서 나타난바와 같이 현재 원자력발전소는 감시 설비가 잘 갖추어져 있으며 주요 설비별로 진단 프로그램도 운영하고 있다. 그러나 발전소 계통 및 주요 기기의 상태진단이나 고장예측을 위해서는 통합된 정보와 정보를 활용하여 분석할 수 있는 알고리즘 개발이 함께 진행되어야 할 것이다. 따라서 상태감시를 통한 예측진단을 원자력발전소에 적용하기 위해서는 기존의 운영프로그램을 기반으로 단계적 개발과 적용이 필요하다.

1. 통합모니터링센터 구축

통합모니터링센터는 단위기기별 감시설비 뿐만 아니라 발전소 전체 계통정보를 집중화 하여 체계적으로 관리하는 것으로 1차적으로 발전정지와 같은 긴급 상황 발생 시 긴급복구를 지원하지만 궁극적으로 기기상태 평가 및 진단을 통하여 고장을 조기에 발견하거나 예측할 수 있도록 지원하는 체계이다. 통합모니터링센터의 핵심은 신뢰성 있는 데이터의 확보이다. 데이터의 신뢰성이 발전소 계통 및 기기 상태 및 진단 결과가 정확하기 때문이다. 따라서 신뢰성 있는 네트워크 데이터베이스 구축이 요구된다.

2. 기기상태평가 및 고장예측 알고리즘 개발

기기상태평가와 고장예측 알고리즘 개발을 위해서는 단

제적인 접근이 필요하다. 고장 이력이 많고 투자대비 효과가 큰 기기나 국내원전 취약설비를 대상으로 시범적용한 후 점차 확대 적용하는 것이 효과적일 것이다.

2.1 Pilot Study

통합모니터링센터를 기반으로 기기상태평가 및 고장예측 알고리즘 적용 체계구축을 위하여 능동기기인 순환수펌프를 대상으로 Pilot Study를 수행하였다. 순환수펌프의 상태평가 및 진단을 위하여 과거 운전정보 학습을 통한 Empirical Model을 개발하였으며 EPI-Center Tool을 사용하여 조기경보 체계를 구축하였다. 이와 동시에 진동분석설비(DM2000) 데이터를 분석하여 결과의 신뢰성을 향상하였다. 또한 장기적으로는 고장예측을 위하여 기기별로 예측진단 모델을 개발과 모델에서 요구하는 추가 정보를 취득하기 위한 센서 설치 또는 개발이 필요한 것으로 검토되었다.

2.2 대상기기 선정

원자력발전소 주요기기의 상태평가 및 예측진단을 효과적으로 적용하기 위하여 대상기기를 선정할 필요가 있다. EPRI에서 기기 고장율과 고장 시 영향을 고려하여 대상기기의 우선순위를 정하는 연구를 수행하였다[9]. 발전소마다 상황이 다르겠지만 예측진단 체계를 적용하려고 하는 발전소는 이 보고서를 참조하는 것이 효과적일 것이다.

V. 결론

본 논문에서는 원자력발전소 주요기기의 감시, 예측진단 기술의 적용사례와 문제점, 기술개발 동향 등을 소개하고 원자력발전소에 적용방안을 제시하였다. 원자력발전소는 기기 신뢰도 확보를 위한 감시, 상태진단, 조기경보 등의 프로그램을 중심으로 운영하고 있으며 고장예측 알고리즘 적용을 통한 예측진단 업무는 아직까지 적용하지 못하고 있다. 향후 원자력발전소를 더욱 안전하고 경제적으로 운영하기 위해서는 통합모니터링센터 기반의 기기상태평가 및 예측진단 업무가 적용되어야 하며 본 논문에서 제시된 것처럼 단계적으로 적용하는 것이 효과적인 방안이 될 것이다.

참고문헌

- [1] "White Paper on Nuclear Power Generation," KME(in Korean), pp. 126-130, June 2009.
- [2] "Program on Technology Innovation: Prognostic Application for the Power Industry," EPRI, TR-1018245, pp. 2-3, May 2009.
- [3] "Equipment Reliability Process Description," INPO, AP-913 p. 7, Dec. 2007.
- [4] "Development of Prognostics of Active Equipments in NPP," KEPRI(in Korean), 2010.
- [5] "Prognostic Application for the Power Industry," EPRI, TR-1018245, May 2009.
- [6] "Materials Degradation Matrix," Rev.2, EPRI, TR-1020987 Aug. 2010.
- [7] "Issue Management Table," Rev2, EPRI, TR-1021024, Oct. 2010.
- [8] "Expert Panel Report on Proactive Materials Degradation

Assessment,” NRC, NUREC/CR-6923, Feb. 2007.

Assessment,” EPRI, TR-1010266, pp. 3-13, Oct. 2010.

[9] “Fleetwide Monitoring for Equipment Condition

조 성 한

2010년 충남대학원(석사) 전자정보통신공학과 졸업. 1983년~현재 한국수력원자력 근무. 한수원중앙연구원 계측제어기술팀 선임전문원. 관심분야는 정보관리 및 응용, 제어 모델링.

이 재 기

1994년 부산공업대 전기공학(학사). 1982년~현재 한국수력원자력 근무. 한수원중앙연구원 계측제어기술팀장. 관심분야는 제어설비 정비 및 개선기술.

김 형 관

1995년 조선대 전기공학(학사). 1995년~현재 한국수력원자력 근무. 한수원중앙연구원 계측제어기술팀 전문원. 관심분야는 Prognostic, Equipment Qualification