

원전 제어봉제어시스템 예방정비 방법론 개발

임형순, 홍형표, 한희환, 구준모, 김항배
한국전력기술(주)

Development of the Predictive Maintenance Methodology for Rod Control System in Nuclear Power Plant

Hyeong-Soon Yim, Hyeong-Pyo Hong, Hee-Hwan Han, Jun-Mo Koo, Hang-Bae Kim
Korea Power Engineering Company

Abstract The demand for safety and reliability of Nuclear Power Plants (NPPs) has been constantly increasing and economical operation is also an important issue. Developing and adopting predictive maintenance technology for the major systems or equipment is considered as one way to achieve these goals.

This paper suggests the predictive maintenance methodology that can be applied to NPPs and describes a sample application of the Rod Control System (RCS) to verify the effectiveness of the methodology.

It is expected that the same methodology can be adopted for other systems of NPPs and general industry fields when its effectiveness is verified.

1. 서 론

예방정비 시스템의 목적은 설비의 결함이나 성능을 실시간으로 감시하여 추이를 분석함으로써 설비의 고장징후를 사전에 감지하여 예측정보를 제공함으로써 적절한 계획정비가 수행될 수 있도록 하는데 있다. 예측정보를 활용한 예방정비를 통하여 불시고장으로 인한 사고나 원자로 정지를 방지하여 원전의 안전성 제고는 물론 궁극적으로 이용률을 향상시키며 유지보수 비용을 절감할 수 있다.

정확한 진단과 예측정보를 제공하기 위해서는 우선 계통변수를 적절히 선정하여 신호를 취득하고, 취득된 신호에서 가치 있는 정보를 추출하여야 한다. 추출된 정보와 고장의 인과관계 모델링과 고장에 따른 전개 시나리오가 구축되어야 하며, 이에 따른 진단과 예측이 자동으로 이루어져야 한다. 또한 이들 정보를 실시간 처리하여 사용자에게 이해하기 쉬운 형태로 제공하여야 한다.

본 논문에서는 이러한 예방정비 방법론을 구성하는 각 요소기술에 대하여 기술하고 원자력발전소 제어봉제어시스템(Rod Control System, RCS)에 본 방법론을 적용하고 검증하는 방법을 기술한다.

2. 본 론

2.1 예방정비 방법론 개요

예방정비시스템은 그림 1과 같이 스마트센서, 데이터베이스, 전문가시스템, 신뢰도 분석도구 및 인간-기계연계장치(MMI)로 구성된다.

스마트센서는 신호의 취득, 가공, 특징(Feature)추출 및 통신기능을 담당하여 계통의 진단에 필요한 모든 신호와 특징을 변수화하여 데이터베이스화 한다. 데이터베이스는 스마트센서로부터 전달된 모든 신호를 기록하고 유지하며, 전문가시스템용 입력력 변수, 신뢰도 분석 결과 및 MMI 표시용 변수들을 관리한다. 전문가시스템은 계통의 각 고장모드에 따르는 원인-결과 모델에 의거하

여 계통을 자동으로 진단하고 예측정보를 제공한다. 신뢰도 분석도구는 계통별, 기기별 또는 부품별로 고유의 수명, 가동년수 및 정비이력을 고려하여 신뢰도를 계산하여 독립적인 예방정비 정보를 제공하고 또한 전문가시스템의 입력요소로도 사용된다. MMI는 예방정비시스템 전체를 제어하고 필요정보를 입력하고 표시할 수 있는 수단이다.

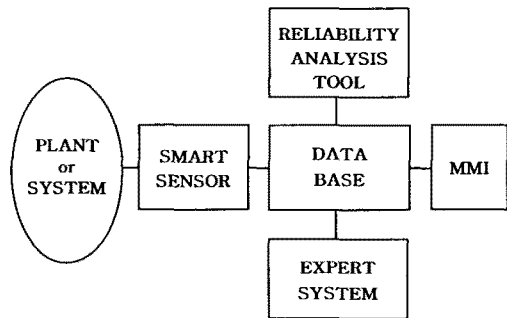


그림 1. 예방정비시스템 구성도

2.2 제어봉제어시스템 예방정비 시스템

원자력발전소의 제어봉제어시스템은 제어봉을 원자로 심 내에 삽입/인출시켜 발전소 출력을 조절하는 계통이다. 따라서 제어봉제어시스템에 문제가 발생할 경우 발전소 이용률에 직접적인 영향을 끼치게 된다. 제어봉제어시스템의 건전성 여부는 결국 구동요구 신호에 따라 제어봉이 적절히 구동되는지에 달려있다. 제어봉구동장치 구동코일에 흐르는 전류신호를 분석하면 공급되는 전원의 특성과 구동동작의 적절성을 파악할 수 있으며 나아가서 문제 발생 시 원인을 밝혀거나 고장을 예측할 수 있다. 현재까지 발전소에서 이러한 과정을 수동으로 수행하였기 때문에 객관적이고 체계적인 분석과 진단이 이루어지지 않았고, 따라서 예방정비를 위한 정보의 확보가 곤란하였다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 제어봉구동장치의 코일전류를 이용하여 계통을 자동으로 진단하고 예방정비 정보를 제공할 수 있는 예방정비 시스템을 제어봉제어시스템에 우선적으로 적용하고자 한다.

2.2.1 제어봉제어계통 코일전류 신호 추출

하나의 제어봉구동장치에는 4개의 코일 즉, 상부인출코일(Upper Lift Coil, UL), 상부집게코일(Upper Gripper Coil, UG), 하부인출코일(Lower Lift Coil, LL) 및 하부집게코일(Lower Gripper Coil, LG)이 설치되어 있다. 제어봉을 구동시키기 위해서 전원회로와

제어회로의 조합에 의해 구동장치의 4개의 코일에 정해진 시퀀스에 따라 Zero/Low/High 준위의 전원이 공급(그림 2)된다. 제어봉 구동에 따라 코일에는 공급전원의 특성과 전자기력 동작에 따른 전기적 영향 및 코일 자체 인덕턴스에 의한 영향 등이 반영되어 독특한 형태의 전류(그림 3)가 흐른다.

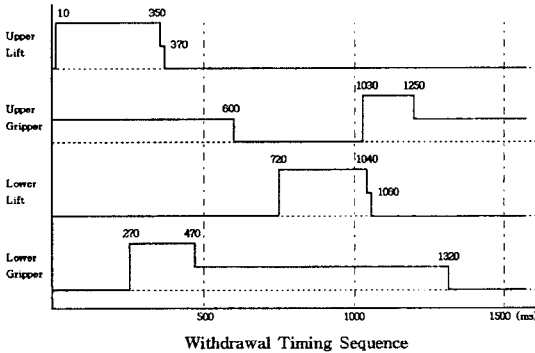


그림 2. 제어봉인출시 공급전압 시퀀스

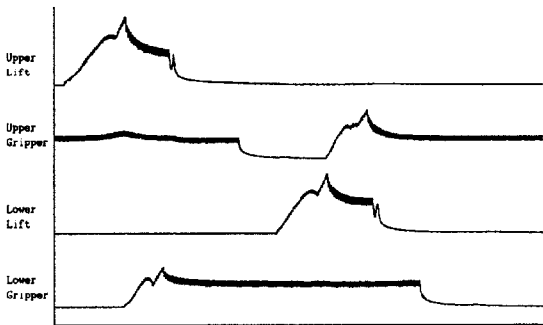


그림 3. 제어봉인출시 코일전류 파형

코일전류는 각 코일과 직렬로 연결된 저항(Shunt) 양단의 전압차를 측정하여 다시 전류로 환산하여 취득된다. 측정된 전류신호는 제어봉제어시스템의 건전성을 진단할 수 있는 다양한 특징을 내포하고 있다.

o 전류신호의 크기

제어봉의 구동 또는 유지상태시 각 코일의 전류크기를 통하여 제어봉구동장치 또는 제어시스템의 이상유무 진단과 열화추이를 예측할 수 있다. 코일전류의 크기는 0 - 25 [A] 범위이며 구동동작 상태와 제어봉 종류에 따라 전류크기의 기준값은 다르다.

o 전류파형 시퀀스

제어봉의 인출과 삽입 시 코일의 여자순서에 따라 고유의 구동 시퀀스를 사용하며, 이는 일련의 전류파형으로 나타나게 된다. 따라서 파형의 시퀀스를 통하여 구동 동작의 종류와 정상여부를 판별할 수 있다.

o 체결 펄스와 해제 펄스

제어봉이 구동될 때 구동장치와 제어봉구동축(Shaft) 간에 기계적인 체결과 해제시 순간적인 역기전력에 의하여 전류파형 상에 체결펄스(Engagement Pulse)와 해

제펄스(Release Pulse)가 나타난다. 이러한 펄스의 형태를 분석하면 제어봉제어시스템의 기계적 또는 전기적 문제점을 파악할 수 있다. 따라서 전류파형에 나타나는 펄스의 발생유무와 발생위치 및 크기를 검출하고 계산한다.

o 파형의 주기 (Cycle Time)

제어봉의 정상적인 구동시 한 구간(Step) 구동에 소요되는 시간은 약 1.5초이다. 따라서 연속 구동의 경우 1.5초의 간격으로 동일 파형이 반복되며, 만일 계통의 기계적 또는 전기적 문제가 발생하는 경우 한 주기의 시간이 정상범위를 벗어나게 된다. 한 주기 시간은 파형의 주기별 구동시점과 종료시점을 감지하여 계산한다.

o 주파수 분석

제어봉구동용 공급전원은 3상의 60[Hz]를 정류하여 공급되므로 기본적으로 180[Hz]의 리플이 포함되어 있다. 그러나 전원공급 회로의 이상시 180[Hz] 성분 외에 불필요한 60[Hz] 성분 또는 고주파 잡음이 유입될 수 있다. 따라서 코일별로 유입된 60[Hz] 성분과 고주파 잡음을 추출하여 그 크기와 주파수를 계산한다.

2.2.2 전문가시스템

계통의 고장을 자동으로 진단하고 예방정비 정보를 추출하기 위하여 전문가시스템을 이용한다. 즉, 제어봉제어시스템에 대하여 전문가의 지식을 바탕으로 인과관계를 다이어그램화 한 후 확률론적 추론엔진을 이용하여 주어진 상황에 따라 동적으로 최적의 진단과 예측을 하는 것이다. 이러한 용도로서 전문가시스템의 일종인 베이시안 네트워크(Bayesian Networks 또는 Bayesian Belief Networks, BBN)에 기반한 상용 프로그램을 이용한다.

BBN은 주어진 관측결과에 따라 불확실한 상황에서 이벤트와 가정들의 확률을 계산하기 위하여 사용된다.⁽²⁾ BBN에서 전문가 지식은 변수를 대표하는 노드와 화살표로 연결된 그래프로 표현된다. 각 노드는 변수의 상호 배타적인 유한의 상태(State)를 갖으며, 조건부 확률 테이블(Conditional Probability Table)을 포함한다. 그리고 화살표는 양 노드간의 인과관계를 나타낸다.⁽³⁾

제어봉제어시스템을 대상으로 BBN을 작성하기 위하여 우선 부품의 기능적 계층을 구성하여 상호 인과관계를 표시하고, 가능한 의사결정(Decision) 내용을 정하며, 상태에 따르는 조건부 확률값과 조치 및 상태변화에 대한 효용함수(Utility Function)를 입력한다.

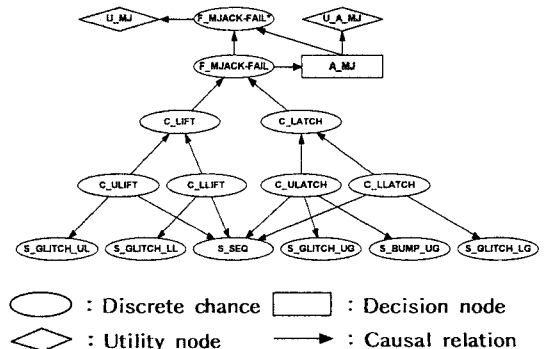


그림 4. 제어봉구동장치중 마그네틱 책의 BBN

그림 4는 제어봉구동장치의 구성기기 중 마그네틱 잭 (Magnetic Jack)에 대한 BBN 모델 예이다.

2.2.3 신뢰도 분석

계통의 가동연수가 증가함에 따라 구성기기와 부품은 열화 또는 마모되어 신뢰도는 감소하게 된다. 따라서 계통의 신뢰도를 적정수준 이상으로 유지하기 위해서는 계통을 구성하는 기기와 부품의 신뢰도나 이용률을 계산하여 적정시점에 해당 기기나 부품을 보수 또는 교체해야 한다. 이러한 계산은 별도의 상용 소프트웨어를 이용하며, 계산결과는 독립적인 정보로 사용되거나 BBN의 입력요소로 활용된다.

2.2.4 인간-기계연계(MMI)

예방정비시스템 전체를 제어하고 필요정보를 입력하거나 사용자에게 진단결과와 예방정보를 표시하는 MMI는 계층구조 형태의 여러 화면으로 구성된다. 계층 1 화면에는 계통의 제어에 필요한 수단과 전체계통의 건전성 상태를 제공하며, 계층 2 화면에는 선택된 하부계통의 진단결과와 신뢰도 정보가 제공되며, 계층 3 화면에는 기기 또는 부품별 관련 센서값, BBN 결과, 변수의 추이, 유지보수 기록, 비용합수 등을 표시한다. 화면에 표시되는 모든 데이터는 중앙 데이터베이스와 연결되어 정보의 속성에 따라 주기적으로 또는 요구에 의해 갱신된다.

2.2.5 데이터베이스

데이터베이스의 역할은 스마트센서에 의해 취득된 센서값과 추출된 특징, BBN에 의해 계산된 확률과 최적의사결정과 효율도 및 신뢰도 분석도구에 의해 계산된 기기의 신뢰도와 이용률 등을 기록하고 갱신하여 MMI 화면에서 요구하는 데이터를 제공하는 것이다.

2.2.6 시제품(Prototype) 개발 및 검증

예방정비 방법론 개발결과를 실증하기 위하여 제어봉 제어시스템을 대상으로 그림 5와 같은 시제품을 개발하고 있다.

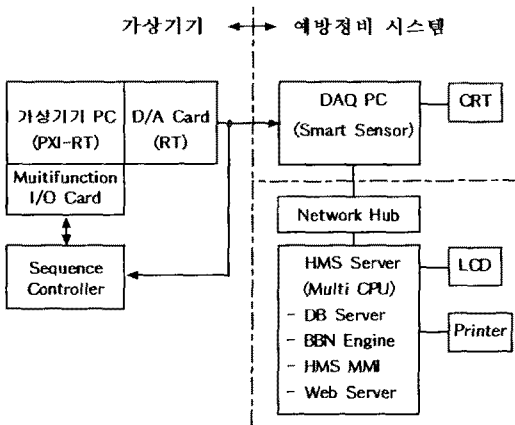


그림 5. RCS 예방정비 시스템 시제품 구성도

o 가상기기

대상계통인 제어봉제어시스템의 다양한 고장상태를 인위적으로 모사할 수 있는 PC 기반의 가상기기를 개발하여 활용한다. 시퀀스제어기는 8 비트 제어기로 실제 발

전소에 사용되는 보드를 사용한다. 가상기기는 전체 제어봉제어시스템을 구성하는 73 개 제어봉중 1개의 제어봉에 대한 시스템을 모사하며, 가상기기의 출력신호는 발전소 실제 시스템의 신호형태와 준위가 동일하다.

o 신호취득과 특징추출

아날로그-디지털 변환카드(12 bit, 2 kS/s)를 장착한 데이터취득 PC에 의해 코일전류 신호가 취득되며, 취득된 데이터를 바탕으로 프로그램에 의해 계통의 진단과 예측에 필요한 다양한 센서특징이 추출된다.

o 건전성감시 서버

건전성감시(Helath Monitoring System, HMS) 서버는 예방정비시스템의 핵심으로서 데이터베이스, 추론도구, 신뢰도분석 도구, MMI 프로그램을 수용하는 서버급 PC이다. 이것은 신호취득 컴퓨터와 네트워크로 연결되며, 필요시 부하의 분담을 위하여 2 개 이상의 컴퓨터로 분산될 수 있도록 네트워크 개념의 데이터 접근방식을 사용한다.

o 검증내용 및 방법

제어봉제어시스템 예방정비시스템의 시작품을 통하여 예방정비시스템의 효용성을 검증할 주요 내용은:

- 제어봉 구동장치의 기계적 마모 진단과 예측
- 제어봉 구동축(Shaft) 마찰증가 진단과 고착예측
- 제어회로카드 결합의 진단과 열화 예측
- 제어봉 구동실패 또는 낙하 가능성의 종합예측
- 결합진단과 고장예측에 따른 의사결정 정보의 제공

등이며, 각 내용에 대한 예방정비시스템의 결과를 국내외 발전소의 고장이력과 관련 보고서를 바탕으로 평가함으로써 검증할 것이다.

3. 결 론

원전에 적용할 수 있는 예방정비 방법론을 제시하고 예방정비 시스템을 구성하는 요소기술로서 스마트시스템 기술, 기기 고장모드 분석기술, 예방정비 추론기술 및 MMI 부분으로 구성된 건전성 감시기술을 개발하고 있으며, 이러한 기술을 바탕으로 원전의 제어봉제어시스템에 대한 예방정비 시스템 시제품을 구축하고 있다.

시제품 제작을 통하여 제어봉구동장치와 관련된 제어장치의 건전성을 감시하고 예방정비 정보를 제공하는 성능이 검증되면 향후 동 방법론을 원전내 타 계통이나 일반 산업분야에도 확대 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력선진기술 확보사업의 일환으로 수행중이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Daryl L. Harmon, "Developing "Smart" Equipment and Systems through Collaborative Research and Development", 15th KAIF/KNS Conference, 2000.4
- [2] Finn V. Jensen, "Bayesian Networks and Decision Graphs", Springer, 2001. 01
- [3] Burton H. Lee, "Using Bayes Belief Networks in Industrial FMEA Modeling and Analysis", 2001 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, P 7 - 15, 2001
- [4] E. Grove & W. Gunther, "Aging Assessment of the Combustion Engineering and Babcock & Wilcox Control Rod Drives", Brookhaven National Lab., 1993.01