

<연구논문>

4차 산업기술을 활용한 원전설비 진동감시기반 예측정비 방안

고도영[†]

Predictive Maintenance Plan based on Vibration Monitoring of Nuclear Power Plants using Industry 4.0

Do-young Ko[†]

(Received 2 May 2023, Revised 30 May 2023, Accepted 2 June 2023)

ABSTRACT

Only about 10% of selected equipment in nuclear power plants are monitored by wiring to address failures or problems caused by vibration. The purpose is primarily for preventive maintenance, not for predictive maintenance. This paper shows that vibration monitoring and diagnosis using Industrial 4.0 enables the complete predictive maintenance for all vibrating equipments in nuclear power plants with the convergence of internet of things; wireless technology, big data through periodic collection and artificial intelligence. Predictive maintenance using wireless technology is possible in all areas of nuclear power plants and in all systems, but it should satisfy regulatory guides on electromagnetic interference and cyber security.

Key Words : Industry 4.0(4차 산업기술), Nuclear power plants(원전), Predictive maintenance(예측정비), Wireless technology(무선기술), Equipment condition monitoring(기기상태감시)

1. 서 론

원전(nuclear power plants)에서 안전성은 절대적 가치이다. 그리고 모든 산업계에서 경제성은 최고의 가치이다. 4차 산업기술(industry 4.0)은 산업계에서 가장 보수적이면서 검증된 기술을 적용하는 원전에도 변화의 바람을 일으키고. 원전의 안전성과 경제성 향상을 위한 4차 산업기술 중 하나는 원전설비의 기기상태감시(equipment condition monitoring, ECM)를 활용한 예측정비(predictive maintenance, PdM)이다. 원전 예측정비를 위해 가장 적절하게 활용할 수 있는 기술은 사물인터넷(internet of things, IoT), 빅데이터 그리고 인공지능(artificial intelligence, AI)의 융합이다. 사물인터넷은 이 기술들의 근간이 되는 기술이고,

사물인터넷의 핵심은 무선기술(wireless technology)이라 할 수 있다.

일반적으로 플랜트의 온라인 기기상태감시는 전체 기기의 20% 정도이며 유선시스템으로 구축 및 운영되고 있다. 실시간으로 감시해야 하는 중요한 설비의 상태감시를 선택적으로 하고 있어 플랜트의 불시 정지를 초래할 수 있고 막대한 경제적 손실을 초래할 수 있다.

유선시스템에 의한 기기상태감시는 플랜트 경제성 측면뿐 아니라 설계, 시공 및 운영 등 여러 가지 이유로 제한적일 수밖에 없다. 이러한 문제점들은 4차 산업기술의 도래에 따라 무선기술에 기반한 사물인터넷으로 해결이 가능해졌다. 무선센서가 전송하는 주기적 기기상태정보는 빅데이터 기술로 가공, 저장 및 활용된다. 여기에 인공지능 기술은 최적의 예측정비 기준과 시점을 제공한다. 따라서 4차 산업

[†] 책임저자, 회원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원
E-mail : doyoung.ko@khnp.co.kr
TEL : (042)870-5454, FAX : (042)870-5449

기술의 적절한 활용은 원전 불시 고장 및 정지로 인한 안전성과 경제성에 영향을 끼치는 모든 기기 및 시스템에 대해서 실시간 상태감시가 가능할 것이다.

본 논문에서는 국내 원전 진동감시 현황, 미국 원전 무선기술 진동감시 현황을 알아본다. 그리고 4차 산업기술을 적용한 원전 진동 예측정비 방안에 대해 기술하였다.

2. 원전 진동감시 현황 및 무선기술 적용

2.1 국내 원전 진동감시 현황

원전의 계통은 약 200개 정도이며 복합적 구조물, 기기 및 시스템으로 구성된다. 진동은 이러한 발전소 계통들의 안전성 및 건전성의 핵심적인 유해요소 중 하나이다. 원전 진동감시 및 진단시스템은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 주요 기기에 대한 단위 진동감시시스템이다. 대표적으로 원자로내부 구조물 진동감시계통(internals vibration monitoring system, IVMS)과 원자로냉각재펌프 진동감시계통(reactor coolant pump vibration monitoring system, RCPVMS) 등이 있다. 둘째는 주요 대형펌프(component cooling water pumps, emergency service pumps, feed water pumps, circulating water pumps, condensate pumps, etc.), 고압/저압터빈, 원자로 격납건물 FAN 등에 대한 온라인 진동감시시스템(vibration monitoring system, VMS)이다. 셋째는 예측정비시스템을 위한 오프라인 진동감시시스템이다. 이 중 첫째 및 둘째는 유선으로 연결된 진동감시시스템이며, 셋째는 정해진 주기(1, 3, 6, 12, 18개월) 마다 현장 대상기에서 직접 측정된 개별 진동값을 예측정비시스템에 입력해야 해야 한다. 셋째의 경우, 정해진 주기에 오프라인으로 개별 상태를 측정하는 것은 다음 측정 주기까지 설비의 상태를 실시간으로 감시할 수 없다는 것으로 기기 및 시스템의 불시 고장과 정지를 예측할 수 없다.

단위 진동감시시스템에 연결된 대상기기를 제외하면 한 개 원전(두 개 호기) 기준으로 볼 때, 진동감시 대상기기는 638개이다. 이 중 유선기반 온라인 진동감시시스템을 통해 상시 진동감시가 가능한 것은 64개에 불과하며 이는 약 10% 정도에 해당된다. 전체 진동감시시스템(단위 진동감시시스템, 온라인 진동감시시스템 및 오프라인 진동감시시스템)은 진동값에 대한 온/오프라인 감시, 저장 그리고 단순한 한

계값 초과를 기준으로 예측정비 대상을 선정하고 있다.

2.2 미국 원전 무선기술 진동감시

국내 원전은 가동 중 발전소 불시정지 및 시스템 오작동 등을 예방하기 아직까지 무선기술을 사용하지 않고 있다⁽¹⁾. 이러한 우려의 대부분은 전자기파 방해(electromagnetic interference, EMI)⁽¹⁻⁵⁾ 및 사이버 보안(cyber security)⁽⁶⁻⁸⁾ 등의 취약성 및 가능성의 우려에 기반한다.

미국 원전들은 기기감시뿐 아니라 음성통신, 랩탑 컴퓨터, 카메라감시, 선량계, 중장비 운영 등 다양한 분야에서 무선기술을 활용하고 있다⁽⁹⁾. 무선기술에 의한 예측정비의 경우 회전기기의 진동, 온도, 모터 전류의 기기상태감시가 가장 폭넓게 적용되었고 충분한 사용이력을 보유하고 있다. 원전의 무선기술은 진동감시 분야가 가장 보편적인 적용분야로 평가되고 있으며, 예측정비 진단능력은 기존 유선기술과 비교할 때 매우 발전하고 있다. 특히, 미국 원전에서 무선기술을 이용한 진동감시를 가장 모범적으로 운영하고 있는 곳은 Arkansas Nuclear One(ANO) 원전과 Comanche Peak 원전이다.

ANO 원전은 2011년 1호기 및 2012년 2호기 원자로 건물에 무선 AP(access point) 및 무선 진동감시 계측기를 설치하여 대용량 펌프의 건전성을 감시하였다. 4개 썬의 CEDM(control element drive mechanism) 냉각팬 및 원자로 건물 냉각팬의 경우는 1일 2회의 진동감시 정보를 지속적으로 저장하여 빅데이터에 기반한 예측정비에 활용하고 있다. Fig. 1은 ANO 원전의 원자로 건물 냉각팬에 설치된 진동감시 센서와 무선 전송기의 위치를 나타낸 것이다⁽¹⁰⁾.



Fig. 1 Vibration monitoring location of cooling fan of reactor containment building at ANO.⁽¹⁰⁾

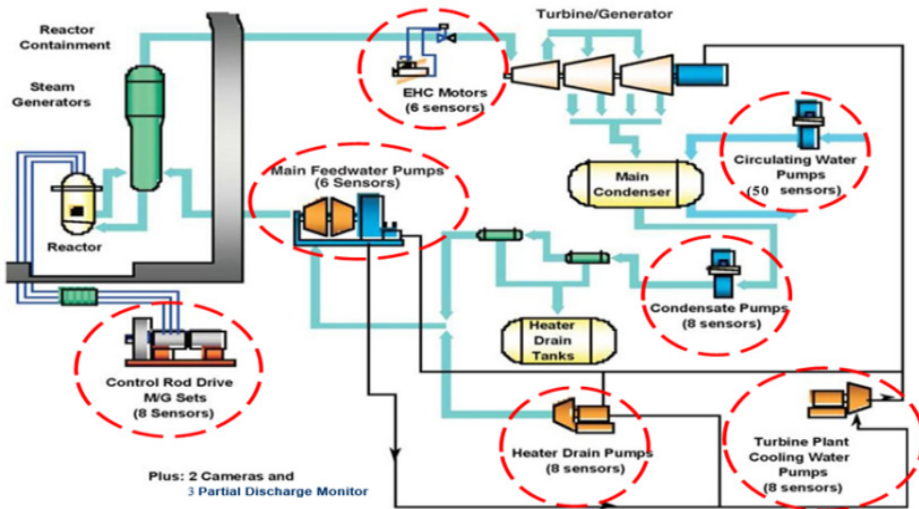


Fig. 2 Installation sites of vibration monitors at comanche peak.⁽⁹⁾

Comanche Peak 원전이 무선기술을 적용한 가장 중요한 목적은 예측정비를 개선하기 위한 것이었다. 매일 기기상태를 감시하기 위한 수동 데이터 수집과 입력 그리고 입력에 소요되는 인력과 비용을 절감하였다. Fig. 2는 Comanche Peak 원전 안전급 회전기기에 무선센서를 설치하여 진동데이터를 자동으로 수집하고 기기 이용성 향상이 가능하게 한 진동감시 구성도이다⁽⁹⁾.

미국 원전들은 무선기술을 적용한 진동 예측정비를 구현하기 위해서 U.S NRC(Nuclear Regulatory Committee) 규제지침(regulatory guide)을 만족시켰다. 전자기와 장애 예방을 위해 전자기와 민감기와 이격거리를 유지하였고, 무선 네트워크는 원전 운영 및 보안관련 네트워크와 분리하는 등 사이버보안을 확보하였다.

3. 4차 산업기술을 적용한 원전 진동 예측정비 방안

4차 산업기술을 적용한 원전 예측정비를 위해 가장 현실적으로 활용할 수 있는 것은 사물인터넷, 빅데이터 그리고 인공지능의 융합기술이다. 이 중에서 사물인터넷은 융합기술의 핵심이고 이를 가능하게 하는 것이 무선기술이다. 따라서 원전에서 무선기술을 적용하기 위한 진동 예측정비 구역과 계통의 선정 그리고 인허가 제고 방안은 매우 중요하다.

3.1 무선 적용 진동 예측정비 구역 선정

무선기술을 적용한 진동 예측정비 구역은 원전 파워블록 내부구역(원자로 격납건물, 보조건물, 복합건물 및 터빈건물 등)과 파워블록 외부구역(취수건물(intake), 배수건물(discharge), 스위치야드(switch yard) 등)을 포함하는 전 구역에 적용 가능하다⁽¹⁰⁾. 특히, 파워블록 내부는 원전의 주요 구조물, 기기 및 계통 대부분이 배치된다. 이 중에서 원자로 격납건물과 터빈건물은 콘크리트 격벽으로 분리되어 있지 않아 무선기술 적용이 용이할 것으로 판단되나, 원자로 건물은 방사능 영향을 고려해야 한다. 보조건물과 복합건물의 발전소 기기 및 계통들은 방사선 차폐를 위해 철근콘크리트 격벽으로 구분되어 있다. 따라서 분리된 각 공간마다 유선통신으로 구성된 별도의 무선중계기를 설치해야만 무선 진동감시가 가능하다. 그러나 국내 원전의 대다수 진동 예측정비 대상기가 오프라인 진동감시시스템이며 이러한 건물들에 위치하고 있어 최우선적으로 선정하여 예측정비에 포함시켜야 할 것이다.

3.2 무선 적용 진동 예측정비 계통 선정

무선기술을 적용한 진동 예측정비 계통은 국내의 원전 무선기술 적용을 위한 규제지침⁽²⁾⁻⁽⁸⁾에 따라, 원전 계통에 영향을 주지 않는 범위내에서 선정해야 한다. 무선 진동감시 대상기는 전자기와 민감기와 안전한 이격거리 및 출력을 유지하여 전자기와

적합성(electromagnetic compatibility, EMC)을 확보해야 하며^(1,4), 사이버보안을 확보하기 위해 무선 진동 감시시스템은 필수디지털자산(critical digital asset, CDA)과 연계시키지 않도록 해야 한다^(4,8). 이러한 규제지침을 만족한다면 원전 전체 계통에서 무선 진동 감시가 가능할 것으로 사료된다. 따라서, 무선 진동 감시가 가능한 계통은 1차 및 2차 계통이 모두 포함될 수 있고 펌프, 밸브, 모터, 팬 및 압축기 등의 회전 기기가 대표적인 진동감시 대상이 될 것이다^(9,10).

3.3 무선 적용 예측정비 인허가 제고 방안

국내 원전에서도 미국 원전과 같이 무선기술을 활용한 진동 예측정비가 가능하기 위해서는 전자기파 민감성(electromagnetic susceptibility, EMS)이 포함된 원전 기기검증(environmental qualification, EQ)자료, 원전 설계자료(기기배치도, 진동기기 목록 등)의 확인이 요구된다. 또한 국내의 규제지침을 만족하는 설계 및 실증시험을 통한 검증, 설계단계부터 규제 기관과의 소통, 규제기준에 맞는 시공, 그리고 원전 무선기술 활용지침(기술적, 운영적, 관리적)⁽¹⁾ 개발과 준수 등의 절차가 필요할 것으로 사료된다.

3.4 4차 산업기술 적용 진동 예측정비

원전의 4차 산업기술 적용을 통한 진동 예측정비는 무선 적용을 통해 구현 가능한 사물인터넷과 정상 및 비정상 상태의 주기적 기기상태감시 데이터의 축적을 통한 빅데이터, 그리고 빅데이터의 최적 활용을 통한 인공지능의 융합으로 구현 가능하다. 현재까지 원전 기기 및 구조물에 대한 진동정비는 예방정비(preventive maintenance) 중심이다. 오프라인 또는 유선기반 온라인을 통한 진동감시, 데이터 저장과 필요시 소수 전문가의 판단에 의존하여 정비를 수행해 왔다. 그러나, 융합으로 대표되는 4차 산업기술을 적용한다면 진동 전문가가 아니더라도 보다 신속, 정확 및 용이하게 원전 진동 예측정비를 할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

4차 산업기술을 적용한 원전 진동 예측정비는 기성능 극대화 및 효율 향상, 설비운영 및 관리 생산성 향상, 정비 및 유지보수 편의성 향상, 그리고 발전소 이용률 극대화를 가능하게 할 수 있다. 현재 건

설 중인 새울3,4호기는 국내 최초로 건설단계부터 무선기술을 적용하기 위해 연구, 설계 및 시공을 진행 중이다. 새울3,4호기의 4차 산업기술 적용은 원전 진동 예측정비를 통한 원전 안전성 제고와 불시정지 예방에 의한 경제성 향상에 크게 기여할 것이다.

후 기

본 연구는 한국수력원자력(KHNP)의 중장기 연구개발 과제로 한국수력원자력 중앙연구원에서 수행되었다.

참고문헌

- (1) Ko, D. Y., and Lee, S. I., 2013, "Applicable approach of the wireless technology for Korean nuclear power plants," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 265, pp. 519-525. doi:https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.09.001
- (2) Reg. Guide 1.180 Rev.1, 2003, "Guideline for Evaluating Electromagnetic and Radio-Frequency Interference in Safety-Related instrumentation and Control Systems," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- (3) KINS/RS-N03.00 Rev.4, 2016, "Validation for EMC," Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, Korea.
- (4) KINS/RG-N03.09 Rev.2, 2015, "Validation on EMI in Safety-related Instrumentation and Control Systems," Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, Korea.
- (5) KINS/RS-N10.00 Rev.2, 2015, "Communication System," Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, Korea.
- (6) Reg. Guide 5.71 Rev.1, 2010, "Cyber Security Programs for Nuclear Facilities, Rev.1," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- (7) KINAC/RS-015 Rev.1, 2016, "Security of Computer and Information System in Nuclear Facilities," Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control, Daejeon, Korea.
- (8) KINAC/RS-019 Rev.0, 2015, "Identification of Critical Digital Asset in Nuclear Facilities," Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control, Daejeon, Korea.
- (9) EPRI, 2009, "Implementation Guideline for Wireless Networks and Wireless Equipment Condition

- Monitoring,” Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, USA, Final Report 1019186.
- (10) KHNP, 2017, “Feasibility on Wireless Technology for Process Monitoring in Nuclear Power Plants,” Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd., Daejeon, Korea, 2017-50003339-Jeon-0781TM.