The Korean Journal of Applied Statistics (2016) DOI: http://dx.doi.org/10.5351/KJAS.2016.29.7.1385
29(7), 1385–1398

A study on early faults detection of pressurizer pressure control system using MTS

Jae-Min Cha[a,1] · Joon-Young Kim[a] · Junguk Shin[a] · Choongseob Yeom[a] · Seong-Ki Kang[b]

[a]Plant SE Team, Institute for Advanced Engineering (IAE); [b]MND

(Received September 2, 2016; Revised October 12, 2016; Accepted October 30, 2016)

Abstract

A pressurizer is a major equipment system in a nuclear power plant (NPP) and controls the reactor cooling system pressure within the allowable range. Faults in the pressurizer can be critical to the NPP; therefore, early fault detection in the pressurizer is significant for NPP safety. This study applies Mahalanobis Taguchi system (MTS), which is one of the promising pattern classification methods, based on the Mahalanobis distance concept and Taguchi quality engineering theory to the early fault detection problem of the pressurizer pressure control system. We conducted experiments using data from full scope NPP simulator based on a pressurizer pressure transmitter faults scenario to validate the faults detection performance of MTS. As a result, MTS can rapidly detect the faults compared to conventional faults detection based on single sensor monitoring.

Keywords: nuclear power plant (NPP), pressurizer, pressurizer pressure control system, pressurizer pressure transmitter, Mahalanobis Taguchi system (MTS), early faults detection

1. 서론

원자력발전소는 우리나라의 기저 부하를 담당하는 핵심 기반 시설 중 하나이며, 높은 안전성을 고려하여 설계 및 운영되고 있다. 하지만, 발전소의 장기적인 운영 기간 동안 설비의 성능 저하 및 고장은 불가피하며, 이를 조기에 감지하여 적절히 대응하지 못하면 발전소의 불시정지(trip)나 큰 사고로 이어질 수도 있기 때문에, 설비의 고장을 조기에 감지하는 것이 매우 중요하다.

원자력발전 방식에 따라 약간 차이가 있지만 원자력발전소를 구성하는 주요 설비는, 크게 원자로, 가압기, 증기발생기, 터빈/발전기, 복수기 등이 있다. 이 중 가압기는 1차 계통의 냉각재가 고온에서도 기화되지 않도록 압력을 가해주는 장치로써, 원자력발전소의 정상운전 중 원자로 냉각재 계통의 압력을 일정하게 유지하고 과도 상태에서 압력변화를 제어하기 때문에, 원자로 안전에 필수적인 기기 중 하나이다. 가압기가 원자로 냉각재 계통의 압력을 일정하게 유지하기 위해서는 가압기에 설치된 압력 감지기 및 전송기가 가압기 압력 신호를 감지하고 가압기 압력 주제어기에 압력 신호를 전송하면, 수신 된 압력 신

This work was supported by the Energy Technology Development Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, and Republic Korea (No. 2014520400090).
[1]Corresponding author: Plant SE Team, Institute for Advanced Engineering (IAE), Yongin-si, Gyeonggi-do 17180, Korea. E-mail: dr.jaemin.cha@gmail.com

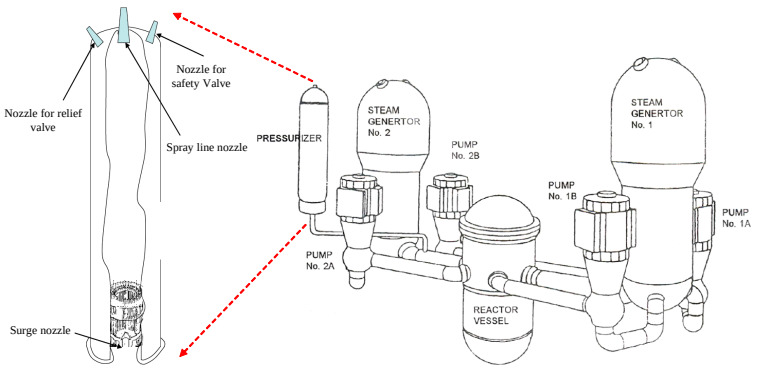


Figure 1.1. Reactor system and pressurizer.

호에 따라 내부 로직에 의하여 적정 압력 수준을 유지하도록 작동하게 되어 있다. 이때 만일 가압기 압력전송기에 고장이 발생하여 가압기 압력 주제어기에 잘못된 압력 신호를 전달하면 가압기 압력 주제어기는 잘못된 압력 신호에 따라 압력을 높이거나 낮추기 위해서 전열기와 살수 밸브를 동작시켜 가압기의 압력을 실제 요구되는 정상 압력에서 벗어나도록 높이거나 낮추게 되고, 이를 적시에 감지 및 대응하지 못하면 발전소의 불시정지를 유발하게 된다. 따라서, 가압기의 고장 전 이상 상태를 조기에 감지 및 대응함으로써, 가압기의 고장과 불시정지를 예방할 수 있다면 발전소의 안전성을 향상시키고, 설비 고장 및 불시정지로 인한 보수 비용 및 재가동 비용과 시간을 절감할 수 있을 것이다. Figure 1.1은 원자로 계통과 가압기의 구조를 보인다.

전술한 필요성을 만족시키기 위해, 가압기의 조기 고장 및 감지를 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. Tylee (1982)와 Willsky와 Jones (1976)은 정상 상태 시 구동되는 칼만(Kalman) 필터와 고장을 감지하고 크기를 추정할 수 있는 필터를 이용하는 generalized likelihood ratio(GLR) 기법을 가압기의 계측 장치의 고장 진단에 적용하였다. 이 기법은 성능이 우수한 것으로 알려져 있으나, 고장 검출을 위해 설정 된 창의 크기만큼 시간 지연이 생기는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 피하기 위해, Chun 등 (1987)은 separate bias estimation(SBE) 기법을 도입한 고장 진단 방법을 제시하였다. 한편, Oh 등 (1996)은 센서의 비정상 상태를 탐지하여 격리시킨 다음 고장의 종류를 식별하여 최종적으로 신호를 재구성할 수 있도록, 신경회로망의 함수추정특성을 이용한 신호추정방법과 결정 및 추정기 모듈에 일반화 된 불일치도 기법 및 순차적 확률비방법을 조합한 방법을 기반으로 가압기 수위 센서 신호를 검증하고 고장 종류를 판별할 수 있는 신호 검증 및 고장 검출 알고리즘을 제안하였다. 또한, Lee (1992)는 3-Layer를 갖는 오류역전파 학습 기반 인공신경망을 사용하여 가압기에 대한 고장 진단을 수행하였으며, Park 등 (2002)는 이산 이벤트 시스템(discrete event system; DES)를 이용한 고장 진단 방법을 가압기 압력 조절 계통에 적용하였다.

전술한 고장 진단 방법들 이외에도 가압기 고장 진단 문제에 적용 가능성이 있는 다양한 진단 방법들이 다양한 연구자들에 의해 제시되고 있다. 마할라노비스 다구찌 시스템(Mahalanobis Taguchi system; MTS)은 이러한 진단 방법 중 하나이다. MTS는 대상 시스템의 정상 상태와 고장 상태를 판별하기 위한 다변량 패턴 인식 방법 중 하나로써, 상태를 판별하기 위해서 마할라노비스 거리(Mahalanobis distance; MD)와 다구찌 품질공학 이론에 기반하고 있다 (Taguchi와 Jugulum, 2002). 구체적으로, 어떤 집단의 평균값을 기초로 한 마할라노비스 공간(Mahalanobis space; MS)을 설정하고, 새로운 관측값이 MS로부터 얼마나 벗어나있는지를 측정함으로써 상태를 판별한다. 그리고, 직교배열표(orthogonal array; OA)와 신호-잡음비(signal-to-noise ratio; SN비)를 이용함으로써 다변량 변수 중에서 측정값에

영향을 적게 미치는 변수를 찾아내어 제거함으로써, 효율적인 진단을 가능하게 한다. MTS는 2000년대 처음 제안된 이후, 효과를 인정 받아 회전 기기의 고장 진단 (Park 등, 2008), 파킨슨병의 진단 (Hong, 2009), 쿨링 팬과 인덕션 모터의 고장 진단 (Jin과 Chow, 2013), 베어링의 고장 진단 (Soylemezoglu 등, 2010; Wang 등, 2012), 풍력 발전 터빈의 고장 진단 (Choo 등, 2012) 등 다양한 설비의 고장 감지 및 진단 문제들에 널리 적용되고 있다. 하지만, 이러한 MTS의 효과에도 불구하고 아직까지 가압기 압력 제어 계통의 고장 감지에 적용된 연구는 찾아보기 어렵다. 이에, 본 연구에서는 타 분야에서 검증된 MTS가 가압기 압력 제어 계통의 고장 감지에 효과가 있고, 어떠한 한계점이 있는지 확인하기 위한 연구를 수행하였다. 이어지는 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 MTS에 대한 기본적인 개념과 절차를 설명하고, 3장에서는 Full Scope 원자력발전소 시뮬레이터를 통해 모사된 가압기 고장 시나리오 및 데이터를 이용하여 실험함으로써 MTS의 고장 감시 성능을 확인한다. 마지막으로, 4장에서는 결론으로 마무리한다.

2. Mahalanobis Taguchi system (MTS)

본 장에서는 MTS에 대한 이론을 간략하게 설명한다. MTS는 정상 그룹의 중심점을 기준으로 각 개별 데이터를 단위 공간 안에 표현한 후 이들이 중심점으로부터 얼마나 멀리 떨어져 있는지를 MD로 계산하게 된다. 여기서 MD가 클수록 정상 그룹이 아닐 가능성이 높아지며, 클래스 구분을 위한 문턱값(threshold value)을 초과하면 비정상 그룹으로 판단한다. 이와 같은 MTS는 다변량 데이터를 MD라는 하나의 종합 지표로 쉽게 표현할 수 있으며, 거리 편차를 극대화하는 변수를 선택적으로 선정함으로써 클래스 구분을 보다 효과적으로 할 수 있다는 특징을 가지고 있다. MTS의 설계 절차는 다음과 같이 크게 4단계로 구성된다.

첫 번째 단계는 정상 그룹의 MS를 구축하는 단계이다. 이를 위해 우선 적절한 변수로 구성된 정상 상태의 데이터를 수집하고, 정상 데이터를 기반으로 한 정상 그룹을 선정한다. 다음으로, 정상 그룹으로부터 MS를 도출한다. 중심점으로부터 거리 평균이 1.0이 되는 MS를 도출하기 위해서는 정상 그룹 데이터를 정규화 해야 되며, 정규화는 측정값에서 평균값을 뺀 값을 표준편차로 나누어준다. 이때 수식은 식 (2.1)과 같다.

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - m_i}{s_i}, \tag{2.1}$$

여기서 i는 변수의 개수($i = 1, 2, \ldots, k$), j는 관측치의 개수($j = 1, 2, \ldots, n$), x_{ij}는 i번째 변수의 j번째 관측치에서의 값, m_i는 i번째 변수의 평균, s_i는 i번째 변수의 표준편차이다. 이렇게 도출한 정규화 된 벡터(Z)는 상관계수로 구성된 상관행렬(C)의 역행렬을 이용하여 정상 그룹의 MD를 계산하며, 이에 대한 수식은 식 (2.2)와 같다.

$$\mathrm{MD}_j = \frac{1}{k} {Z_{ij}}^T C^{-1} Z_{ij}, \tag{2.2}$$

여기서 k는 변수의 개수, Z_{ij}는 x_{ij}의 정규화 된 벡터, Z_{ij}^T는 Z_{ij}의 전치행렬, C^{-1}는 상관행렬의 역행렬이다. 해당 계산식에서 공분산행렬의 역행렬 대신 상관행렬의 역행렬을 사용하는 이유는 상관행렬은 ± 1 범위 내에 있는 단위 값인 상관계수로 구성되어 있기 때문에 공분산행렬에 비해 계산과 해석이 빠르다는 장점을 활용하기 위함이다.

두 번째 단계에서는 앞서 구축 된 MS의 유효성을 확인한다. 이를 위해, 우선 비정상 데이터로 구성된 비정상 그룹을 선정하고, 정상 그룹의 MS를 기준으로 비정상 그룹의 MD를 계산한다. 이때, 비정상 그룹을 정상 그룹과 같은 공간에서 비교하기 위해, 비정상 그룹의 측정값에서 정상 그룹의 평균값을 뺀 후

이를 정상 그룹의 표준편차로 나눔으로써 비정상 그룹을 표준화 한다. 이에 대한 수식은 (2.3)과 같다.

$$Z_{ij} = \frac{y_{ij} - m_i}{s_i}, \tag{2.3}$$

여기서 i는 변수의 개수($i = 1, 2, \ldots, k$), j는 관측치의 개수($j = 1, 2, \ldots, n$), y_{ij}는 i번째 변수의 j번째 관측치에서의 값, m_i는 정상 그룹의 i번째 변수의 평균, s_i는 정상 그룹의 i번째 변수의 표준편차이다. 이어서, 비정상 그룹의 MD를 계산하게 되며, 계산된 비정상 그룹의 MD와 앞선 단계에서 계산된 정상 그룹의 MD를 비교하였을 때 두 그룹간의 차이가 명확히 구분된다면 초기 설정한 MS 공간이 유효성 있게 구축되었다고 평가할 수 있다.

세 번째 단계에서는 예측 능력이 높은 유용한 변수를 설정한다. 여기서 예측 능력이 높은 변수는 다른 변수들에 비해 정상 그룹과 비정상 그룹간의 차이를 보다 크게 하여 그룹간의 구분을 명확하게 하는데 도움이 되는 변수를 의미하는데, 본 절차는 이들을 선별함으로써 시스템의 정확도를 높이기 위함이다. 변수들의 예측능력을 평가하기 위해 2수준계 직교배열표와 신호잡음비를 활용한다. 우선 내측배열과 외측배열에 변수와 신호인자를 배치하여 각 실험 조건에 따라 MD를 계산하고, 이들로부터 SN비를 도출한다. SN비의 수식은 변수 값의 특성에 따라 달라지는데, 변수 값이 클수록 좋은 특성을 의미할 경우에는 망대특성(lager-the-better)의 SN비, 변수 값이 작을수록 좋은 특성을 의미할 경우에는 망소특성(smaller-the-better)의 SN비, 변수 값이 특정 목표 값에 가까울수록 좋은 특성을 의미할 경우에는 망목특성(nominal-the-better)의 SN비, 알려진 신호인자가 있는 경우에는 동특성(dynamic)의 SN비 계산식을 사용한다. 이 중 동특성의 SN비의 예측능력이 정확도가 가장 높은 것으로 알려져 있으며, 이에 대한 수식은 식 (2.4)와 같다 (Taguchi와 Jugulum, 2002).

$$\text{SN Ratio} = 10\log_{10}\left[\frac{\frac{1}{n}(S_m - V_e)}{V_e}\right], \tag{2.4}$$

여기서 n은 비정상 그룹의 시료 수, D_i^2는 i번째의 MD, S_m은 평균제곱합(sum of squares due to mean), V_e는 오차 분산(error variance)이다. 이어서, 도출된 실험 조건 별 SN비를 이용하여 변수 별로 예측 능력이 있는지 여부를 판단하기 위해, SN비 이득(SNR gain)을 계산한다. 이를 위해서 변수 별로 해당 변수가 사용된 실험 조건들의 SN비 평균에서 해당 변수가 사용되지 않은 실험 조건들의 SN비 평균의 차를 구하면 해당 변수의 SN비 이득이 된다. 이에 대한 수식은 식 (2.5)와 같다.

$$\text{SNR Gain}_i = \overline{\text{SN}_i^+} - \overline{\text{SN}_i^-}, \tag{2.5}$$

여기서 i는 변수의 번호이고, SN_i^+은 i번째 변수가 사용된 SN비의 평균이고, SN_i^-은 i번째 변수가 사용되지 않은 SN비의 평균이다. 도출된 변수 별 SN비 이득이 음의 값을 갖는 경우 해당 변수는 예측 능력이 없는 것으로 해석할 수 있으며, SN비 이득이 양의 값을 갖는 경우 예측 능력이 있는 것으로 해석할 수 있는데, 그 값이 클수록 예측 능력이 높은 주요 변수로 해석할 수 있다.

마지막으로, 네 번째 단계에서는 예측 능력이 높은 변수로 구성된 진단 시스템을 구축한다. 앞선 단계에서 선정된 예측 능력이 높은 변수만으로 진단 시스템을 만든 후 이들의 MD를 계산하여 정상 그룹과 비정상 그룹의 판단에 활용한다.

3. 실험 및 결과

3.1. 고장 시나리오 및 데이터

3.1.1. 고장 시나리오 MTS를 이용한 가압기 압력 계통의 조기 고장 감지 성능을 확인하기 위해 본 연구에서는 발전소 운전 전문가와의 인터뷰를 통해 가압기의 압력전송기 고장 시나리오를 도출하였다.

Table 3.1. A part of variables in the NPP simulator

Variables	Unit	Description
hmi_RCSLT459A_VALUE	percent	Pressurizer level
hmi_CCWFT66_VALUE	liter/sec	Component cooling water to seal water heat exchanger
hmi_CCWFT62_VALUE	kg/sec	Component cooling water from reactor coolant pump thermal barrier
hmi_CCWFT95_VALUE	kg/sec	Component cooling water pump a flow
hmi_TCSWT1_VALUE	MW	Turbine load
hmi_RRCNP10_VALUE	percent	Reactor thermal power
hmi_RCSTT499B_VALUE	deg(c)	Reactor coolant system reference temperature
hmi_RCSCT5_VALUE	ppm	Boron concentration
hmi_RCSPT455_VALUE	kg/cm^2	Pressurizer pressure
hmi_RCSPT456_VALUE	kg/cm^2	Pressurizer pressure
hmi_RCSPT457_VALUE	kg/cm^2	Pressurizer pressure
hmi_RCSPT458_VALUE	kg/cm^2	Pressurizer pressure
hmi_MGPWT11_VALUE	PCT	Generator electrical power
hmi_RRCTP10_VALUE	MW	Reactor thermal power
hmi_RCSTC502_VALUE	deg(c)	Reactor coolant system average temperature
⋮	⋮	⋮

가압기 압력전송기 고장은 발전소에서 실제 발생하는 고장 상황 중 하나로서, 이를 고장의 발생에서부터 조치까지의 단계를 순차적으로 나열하면 다음과 같다.

- 가압기 내부에서 측정된 가압기의 압력을 가압기 압력 주제어기에 전송하는 압력전송기에 고장이 발생한다.
- 가압기 압력감지기는 고장으로 인해 실제 측정된 가압기의 압력보다 높은 값을 가압기 압력 주제어기에 전송하게 된다.
- 가압기 압력 주제어기는 잘못된 입력 신호를 바탕으로 현재 가압기 압력이 높다고 판단하고, 가압기의 압력을 낮추기 위해서 가압기 전열기를 키고, 살수 밸브를 닫는다.
- 전열기와 살수 밸브의 조작으로 인해 가압기의 압력이 서서히 감소한다 (157.133⇒156.785 kg/cm^2).
- 발전소 경보 시스템은 가압기의 압력이 156.8 kg/cm^{2}가 되면 이를 자동으로 감지하고, 운전자에게 경보를 알린다.
- 운전자는 경보를 듣고, 가압기의 압력이 정상 운전 상태보다 낮음을 인식하고, 경보절차서 및 비정상 운전절차서에 기반하여 가압기의 압력을 정상 운전 상태 157.133 kg/cm^{2}로 높이도록 운전한다.

3.1.2. 데이터 MTS를 이용한 가압기 압력 계통의 조기 고장 감지 성능을 확인하기 위해 본 연구에서는 원자력발전소 시뮬레이터를 이용해 모사한 데이터를 이용하여 실험을 수행하였다. 사용된 시뮬레이터는 Western Services Cooperation(WSC)사의 APR1400 타입 Full Scope 시뮬레이터로써, 발전소의 동적 거동을 잘 모사하고 있을 뿐 아니라 국내외의 운전 훈련 및 연구에 널리 쓰이고 있어, 본 연구에서 제시한 MTS 알고리즘의 조기 고장 감지 성능을 확인하는데 있어서 충분하다고 판단되었다.

사용된 WSC 시뮬레이터는 내부 접근을 통해 60만여개의 변수로부터 데이터를 추출할 수 있는데, 이들 변수들 중 대부분은 시뮬레이터 내부에서만 사용되는 시스템 설정 변수들이다. 이에, 원자력발전소 운전 전문가 및 시뮬레이터 전문가와 함께 실제 원자력발전소 운전과 관련이 높다고 판단된 572개의 변수

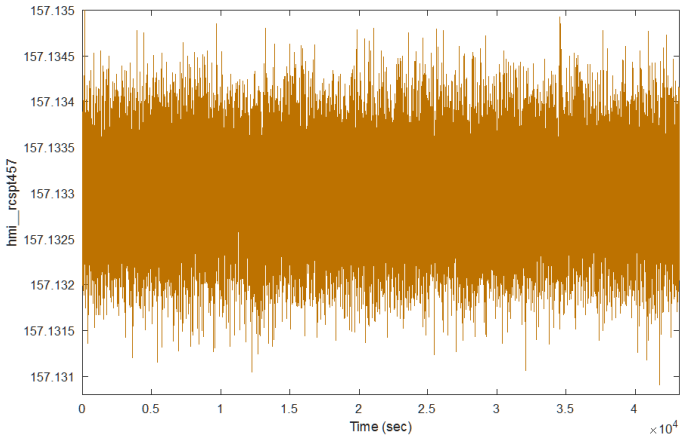


Figure 3.1. Changes over time of the hmi_RCSPT457 value during the normal operation.

들을 선별하였다. 선별 된 변수들은 시뮬레이터 화면 상에 나타나는 계측기 변수들과 밸브, 펌프, 스위치, 경보 등에 대한 상태 변수를 포함한다. Table 3.1은 실험에 사용된 572개의 변수들 중 일부를 보인다.

본 실험을 위해 WSC 시뮬레이터를 이용하여 원자력발전소를 100% 출력 상태에서 운전한 정상 데이터와 앞서 제시된 가압기 압력 전송기 고장 시나리오를 모사한 비정상 데이터를 생성하였다. 먼저, 정상 데이터는 시뮬레이터를 100% 출력 상태로 운전한 데이터를 사용하였다. 일반적으로, 원자력발전소를 100% 출력 상태에서 운전하여도 변수의 값들은 시간에 따라 계속 미세한 변동이 발생하며, 이는 시뮬레이터 역시 동일하다. 본 연구에서는 정상 데이터가 일반적인 정상 운전 상태를 대표할 수 있도록 100% 출력으로 43,200초(12시간) 동안 연속 운전한 데이터를 확보하였다. 참고로, 데이터의 획득 주기는 1초이다. 획득한 정상 운전 데이터 중 가압기의 압력을 의미하는 주요 변수인 hmi_RCSPT457 값의 43,200초 운전 동안의 평균은 157.133, 표준편차는 0.00094, 최대값은 157.135, 최소값은 157.1309이다. 즉, 43,200초 운전 동안 거의 변화 없이 안정적인 상태를 유지한 것으로 간주할 수 있다. Figure 3.1은 43,200초 동안의 정상 운전 중 hmi_RCSPT457 값의 시간에 따른 변화를 보인다.

한편, 비정상 데이터의 확보를 위해서, 100% 출력의 정상 운전 상태에서 11초 동안 정상 운전을 하다가, 제시된 고장 시나리오에 따라 가압기 압력인 hmi_RCSPT457의 값이 156.785 kg/cm^{2}로 1,800초 동안 지속적으로 낮아지도록 모사된 데이터를 사용하였다. 시뮬레이터에서는 hmi_RCSPT457의 값만을 임의로 조작하였지만, 시뮬레이터 내부에서는 hmi_RCSPT457의 값의 변화에 영향을 받는 다른 변수들의 값도 지속적으로 같이 변화된다. Figure 3.2는 1,811초 동안 변화된 hmi_RCSPT457의 변화와, 1–105초 사이의 hmi_RCSPT457의 값의 변화를 보인다. Figure 3.2에서 보이는 바와 같이 초기 11초 동안은 hmi_RCSPT457의 값이 변화가 없다가 12초에서부터 1,800초 동안 지속적으로 하강하는 것을 알 수 있다.

3.2. MTS의 적용

3.2.1. 정상 상태의 데이터로 구성된 정상 그룹의 MS 구축 1단계에서는 43,200초의 정상 운전 동안 매초 수집된 데이터로 구성된 정상 그룹의 MS를 구축하였다. 이를 위해, 선정된 정상 그룹을 대상으로 정규화를 통해 정규화 행렬(Z)를 구하고, 변수들의 상관행렬(C)를 구한다음, 이를 이용하여 정상

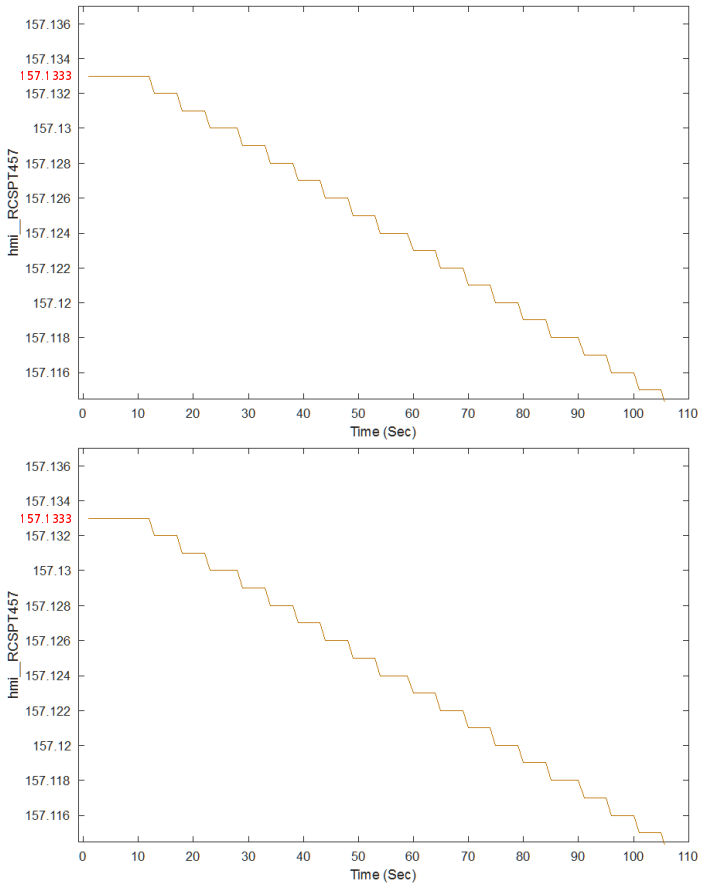


Figure 3.2. Changes over time of the hmi_RCSPT457 value when the pressurizer pressure transmitter is broken.

그룹의 MD 값을 계산하였다. 43,200개의 관측치로 구성된 정상 그룹 MD값의 평균은 1.0이며, 표준편차는 0.0587, 최대값은 1.2802, 최소값은 0.7593이다. 이는 다구찌 박사가 정상그룹 MD의 분포는 평균 1.0을 중심으로 0–2 범위 안에 존재한다는 기준에 부합하며, 정상그룹의 선정이 적합한 것임을 의미한다. Figure 3.3은 43,200개로 구성된 정상 그룹의 MD 값을 보인다.

3.2.2. 비정상 그룹의 식별 및 MS의 유효성 확인 2단계에서는 MTS 절차에 따라 정상 그룹의 평균과 표준편차를 기반으로 비정상 그룹의 MD를 구했다. Figure 3.4는 1,811초 동안 변화한 비정상 MD 값의 변화를 보인다. Figure 3.4에서 보이는 것과 같이 초기에는 서서히 증가하다가, 시간이 지날수록 급격하게 증가하는 것을 보인다. 이는 발전소의 상태가 정상 상태에서 시간에 따라 급격하게 벗어나는 것을 의미한다. 비정상 MD를 보다 구체적으로 살펴보면, 1–11초까지는 0.1을 중심으로 변동하다가, 12–30초까지는 0.2175에서 14.5759로 천천히 증가하고, 31초에는 8.52998E+10으로 크게 증가하는 현상을 보인다.

hmi_RCSPT457의 값이 1,811초 동안 선형적으로 하강하는 반면에, 비정상 MD는 시간에 따라 지수적으로 증가하는 것은 hmi_RCSPT457의 값의 변화가 시간에 따라 이와 관련이 있는 다른 변수들에

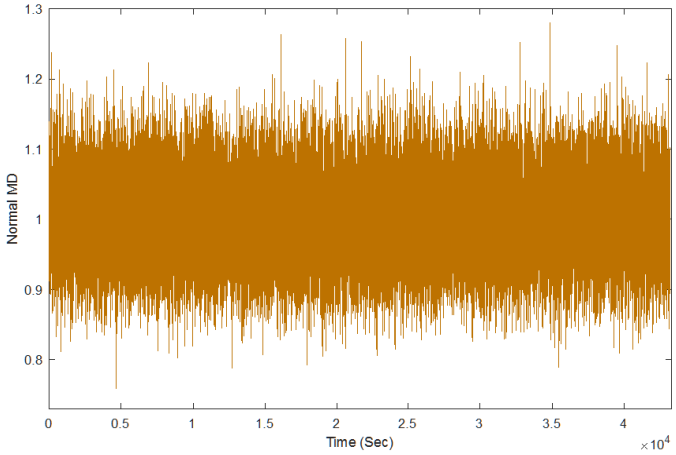
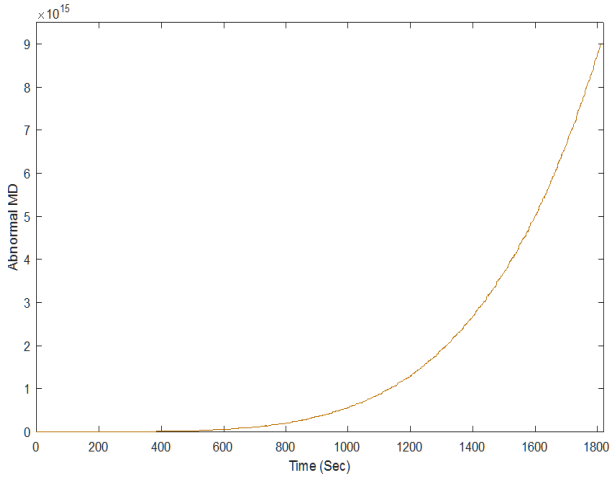


Figure 3.3. Changes over time of the normal operation.



Time (Sec)	Abnormal MD	Time (Sec)	Abnormal MD
1	0.0018	27	10.5775
2	0.1016	28	11.8168
3	0.0957	29	13.3043
4	0.1173	30	14.5759
5	0.0951	31	8.52998.E+10
6	0.1063	32	8.52998.E+10
7	0.1148	33	8.52998.E+10
8	0.0763	34	8.52998.E+10
9	0.1734	35	8.52998.E+10
10	0.1510	36	8.52998.E+10
11	0.1361	37	8.52998.E+10
12	0.2175	38	8.52998.E+10
13	0.3939	39	8.52998.E+10
14	0.6565	40	8.52998.E+10
15	0.9638	...	...
16	1.3029	1801	8.79338.E+15
17	1.8000	1802	8.81759.E+15
18	2.4269	1803	8.81759.E+15
19	2.9804	1804	8.84185.E+15
20	3.6221	1805	8.86616.E+15
21	4.3603	1806	8.89051.E+15
22	5.1885	1807	8.89051.E+15
23	6.1414	1808	8.91491.E+15
24	7.1648	1809	8.93935.E+15
25	8.2878	1810	8.97650.E+15
26	9.3458	1811	9.00099.E+15

Figure 3.4. Changes over time of abnormal MD.

영향을 미치기 때문이며, 또한 영향을 받은 변수들이 시간이 연속적으로 다른 변수들에 영향을 미치며 확산되기 때문인 것으로 간주될 수 있다. Figure 3.5와 Table 3.2는 시간에 따른 비정상 MD와 hmi_RCSPT457의 값을 비교한 결과를 보인다.

앞의 실험 결과를 본 연구의 가압기 압력전송기 고장 시나리오 관점에서 해석하면 다음과 같다. 발전소 운전자는 일반적으로 hmi_RCSPT457의 값이 정상 상태에서의 값인 157.133 kg/cm^{2}에서 벗어나서 156.8 kg/cm^2 이하로 떨어지면 가압기 압력전송기의 고장으로 진단한다. 반면에, 본 연구에서 제안하는 MTS를 이용한 비정상 MD를 이용하면, hmi_RCSPT457의 값 하나만 감시하는 것이 아닌, hmi_RCSPT457에 관련된 수 많은 변수의 변화를 동시에 감시함으로써, 훨씬 조기에 고장을 감지할 수 있는 것을 의미한다. 이때, 발전소가 얼마나 빨리 조기에 고장을 감지할 수 있는지의 정도는 정상 상태와 비정상 상태를 판단하는 문턱값을 어떻게 설정하는지에 따라 차이가 발생한다. 왜냐하면 문턱값이 너무 작게 설정되면, 비정상 상태를 보다 빠르게 감지할 수 있지만, 정상 상태를 비정상 상태로

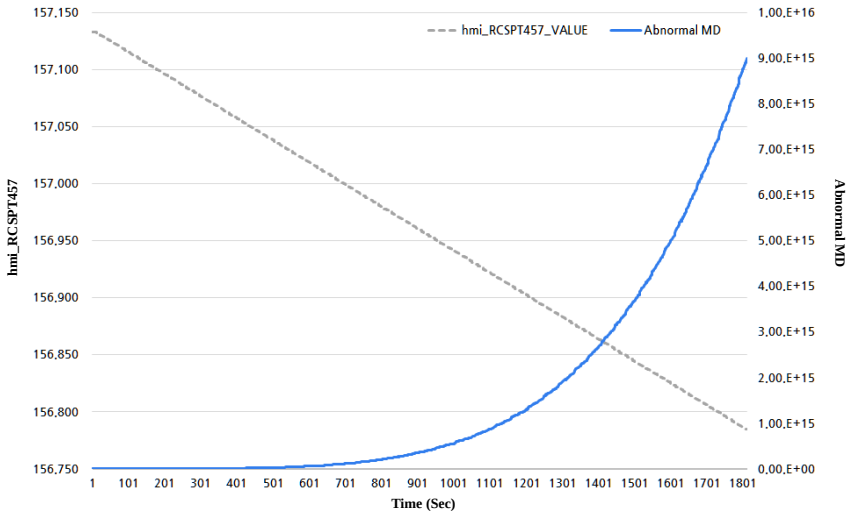


Figure 3.5. Changes over time of the hmi_RCSPT457 value and abnormal MD.

Table 3.2. Comparison of hmi_RCSPT457

Time(Sec)	mi_RCSPT457	Abnormal MD	Time(Sec)	hmi_RCSPT457	Abnormal MD
1	157.133	0.0018	27	157.130	10.5775
2	157.133	0.1016	28	157.130	11.8618
3	157.133	0.0957	29	157.129	13.3043
4	157.133	0.1173	30	157.129	14.5759
5	157.133	0.0951	31	157.129	8.52998.E+10
6	157.133	0.1063	32	157.129	8.52998.E+10
7	157.133	0.1148	33	157.139	8.52998.E+10
8	157.133	0.0763	34	157.128	8.52998.E+10
9	157.133	0.1734	35	157.128	8.52998.E+10
10	157.133	0.1510	36	157.128	8.52998.E+10
11	157.133	0.1361	37	157.128	8.52998.E+10
12	157.133	0.2175	38	157.128	8.52998.E+10
13	157.132	0.3939	39	157.127	8.52998.E+10
14	157.132	0.6565	40	157.127	8.52998.E+10
15	157.132	0.9638	⋮	⋮	⋮
16	157.132	1.3029	1801	156.786	8.79338.E+15
17	157.132	1.8000	1802	156.786	8.81759.E+15
18	157.131	2.4269	1803	156.786	8.81759.E+15
19	157.131	2.9804	1804	156.786	8.84185.E+15
20	157.131	3.6221	1805	156.785	8.86616.E+15
21	157.131	4.3603	1806	156.785	8.89051.E+15
22	157.131	5.1885	1807	156.785	8.89051.E+15
23	157.130	6.1414	1808	156.785	8.91491.E+15
24	157.130	7.1648	1809	156.785	8.93935.E+15
25	157.130	8.2878	1810	156.785	8.97650.E+15
26	157.130	9.3458	1811	156.758	9.00099.E+15

Table 3.3. Orthogonal array and SN Ratio Gains per variable

No.	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	$\cdots$	x_{570}	x_{571}	x_{572}
1	1	1	1	1	1	1	$\cdots$	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	$\cdots$	2	2	2
3	1	1	1	1	1	1	$\cdots$	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	$\cdots$	2	2	2
5	1	1	1	1	1	1	$\cdots$	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	$\cdots$	2	2	2
7	1	1	1	1	1	1	$\cdots$	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	$\cdots$	2	2	2
9	1	1	1	1	1	1	$\cdots$	1	1	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
1017	2	2	1	2	1	1	$\cdots$	1	2	1
1018	2	2	1	2	1	1	$\cdots$	2	1	2
1019	2	2	1	2	1	1	$\cdots$	1	2	1
1020	2	2	1	2	1	1	$\cdots$	2	1	2
1021	2	2	1	2	1	1	$\cdots$	1	2	1
1022	2	2	1	2	1	1	$\cdots$	2	1	2
1023	2	2	1	2	1	1	$\cdots$	1	2	1
1024	2	2	1	2	1	1	$\cdots$	2	1	2
SNR Gain	−3.00E-03	−5.00E-04	2.00E-03	3.00E-04	−5.00E-04	−3.00E-03	$\cdots$	3.00E-05	6.00E-06	−2.00E-05

판단하는 오류가 발생할 수 있기 때문이다. 따라서, 발전소의 상태를 판단할 수 있는 문턱값의 설정이 중요하다. 이를 위해, 앞서 도출된 정상 그룹의 MD와 비정상 그룹의 MD를 동일선상에서 비교해보면, 정상 그룹의 MD는 전 시간을 걸쳐 약 1.0을 계속 유지하는데 반해, 비정상 그룹의 MD는 1–11초까지는 0.1을 중심으로 변동하다가, 12–30초까지는 0.2175에서 14.5759로 천천히 증가하고, 31초에는 8.52998E+10으로 크게 증가하는 현상을 보인다. MTS에서는 비정상 그룹의 MD가 정상 그룹의 평균 MD 대비 커질수록 비정상 그룹이 정상 그룹과 차이가 커진다고 해석할 수 있으며, 즉 발전소의 상태가 정상 상태에서 시간에 따라 점차 비정상 상태로 변하고 있으며, 특히, 31초 시점부터 급격하게 변하기 시작한다는 것을 의미한다. 따라서, 본 연구에서는 발전소의 상태가 크게 변하게 되는 초기 시점의 MD 값인 8.52998E+10을 문턱값으로 설정하였으며, 설정된 문턱값을 통해 가압기 압력전송기의 고장이 발생한 11초에서부터 20초 만에 고장을 감지할 수 있었다. 이는 현재 발전소에서 단일 센서를 모니터링 했을 때 고장이 발생한 지 1,717초 만에 고장을 감지하는 것 대비 훨씬 더 빠르게 고장을 감지할 수 있다는 것을 의미한다.

3.2.3. 유용한 변수 선정 2단계에서는 전처리 된 572개의 변수를 사용하여 가압기 압력 계통의 고장을 경보 발생 전 조기에 감지할 수 있었다. 하지만, 압력 제어 계통의 고장을 진단하기 위해 모든 변수를 실시간으로 감시하는 것은 비효율적일 수 있다. 특히, 모든 변수가 가압기 압력 제어 계통의 고장을 감지하는데 유용한 것은 아니기 때문에, 본 단계에서는 데이터셋의 변수를 압력 제어 계통의 고장 감지에 유용한 항목과 그렇지 않은 항목을 구분하여 효율적인 분류를 할 수 있도록 하였다. 이를 위해 2수준계 직교배열표 중에서 572개의 변수를 최소한으로 배치할 수 있는 L_{1024} 직교배열표를 사용하여, 실험 조건 별 SN비 이득을 계산하여 유용한 변수를 선정하였다. 참고로, SN비 계산을 위해서는 가장 정확한 예측이 가능한 것으로 알려진 동특성 SN비를 사용하였다. Table 3.3은 L_{1024} 직교배열표와 계산된 변수 별 SN비 이득을 보인다. 또한, Figure 3.6은 변수 별 SN비 이득을 0을 중심으로 도식화한 모습을 보

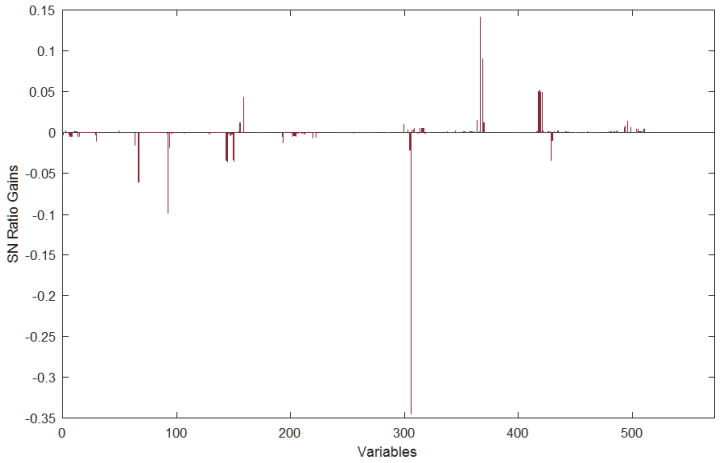
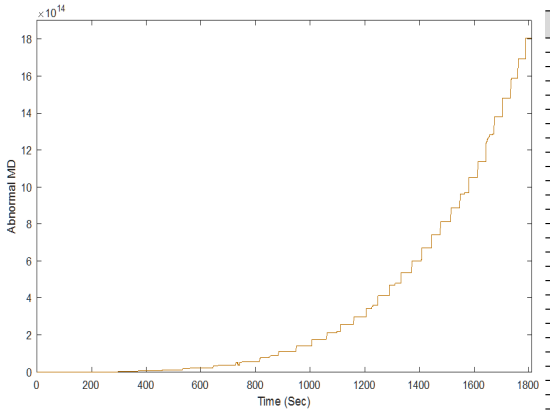


Figure 3.6. SN Ratio Gain.



Time (Sec)	Abnormal MD with useful variables
1	0.0027
2	0.1156
3	0.1100
4	0.1502
5	0.1396
6	0.1293
7	0.1368
8	0.0866
9	0.1843
10	0.1905
11	0.1706
12	0.3185
13	0.6731
14	1.1016
15	1.7048
16	2.3618
17	3.3253
18	4.4998
19	5.5765
20	6.7757
21	8.1351
22	9.7406
23	11.5637
24	13.4220
25	15.5404
26	17.6012

Time (Sec)	Abnormal MD with useful variables
27	19.9618
28	22.3104
29	25.1572
30	27.6134
31	1.47255.E+11
32	1.47255.E+11
33	1.47255.E+11
34	1.47255.E+11
35	1.47255.E+11
36	1.47255.E+11
37	1.47255.E+11
38	1.47255.E+11
39	1.47255.E+11
40	1.47255.E+11
...	
1801	1.80254.E+15
1802	1.80254.E+15
1803	1.80254.E+15
1804	1.80254.E+15
1805	1.80254.E+15
1806	1.80254.E+15
1807	1.80254.E+15
1808	1.80254.E+15
1809	1.80254.E+15
1810	1.80254.E+15
1811	1.80254.E+15

Figure 3.7. Changes over time of the abnormal MD with useful variables.

인다. 그림에서 보이는 바와 같이, 572개의 변수 중 275개의 SN비 이득이 0 미만의 음의 값을 갖고, 나머지 297개의 SN비 이득은 0 이상의 양의 값을 갖는 것으로 계산되었다. 즉, 572개의 변수 중 297개의 변수가 가압기 압력 제어 계통 진단에 크게 기여하는 유용한 변수임을 확인할 수 있었다.

3.2.4. 유용한 변수 기반 진단 4단계에서는 3단계에서 도출한 유용한 변수 297의 예측능력을 검증하기 위해, 가압기 압력 제어 계통 고장 시나리오를 바탕으로 실험을 다시 수행하였다. 실험 결과, 297개 변수 만을 사용하였음에도 불구하고, 572개 변수를 사용한 비정상 MD와 유사한 경향을 가진 비정상 MD가 계산되었다. Figure 3.7은 297개 변수를 이용한 비정상 MD의 1,811초 시간 동안의 변화를 보인다. Figure 3.7에서 보이는 바와 같이, MD가 초기에는 서서히 증가하다가 점차 급격하게 지수적으로 증가하며, 이는 Figure 3.4에서 보이는 변화의 형태와 유사하다는 것을 알 수 있다. 하지만, 572개 변수를 사용한 비정상 MD와 297개 변수를 사용한 비정상 MD를 보다 구체적으로 비교하면, 572개 변수를 사용한 비정상 MD와 297개 변수를 사용한 비정상 MD의 1,811초에서의 최대값이 각각 9.0010E+15과 1.8025E+15로써, 297개 변수를 사용한 비정상 MD가 훨씬 작다. 또한, 572개 변수를 사용한 비정상

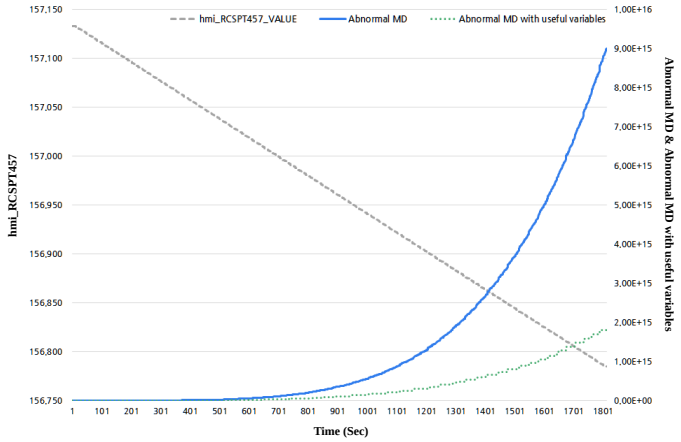


Figure 3.8. Changes over time of the hmi_RCSPT457 value, abnormal MD, and abnormal MD with useful variables.

MD 대비, 297개 변수를 사용한 비정상 MD는 상대적으로 계단적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 유용한 변수를 제거하면서, 정상과 비정상을 판단하는데 필요한 정보의 손실이 발생하고, 시스템의 전체 변화에 대한 민감도가 줄어들기 때문인 것으로 간주할 수 있다. 하지만, 이러한 민감도 저하에도 불구하고, 31초 시점에 1.47255E+11로 크게 증가하였으며, 이를 문턱값으로 설정하면 572개 변수를 사용하여 조기에 고장을 진단했을 때와 마찬가지로, 고장이 발생한 지 20초만에 조기에 고장을 감지할 수 있다는 것을 의미한다. Figure 3.8은 시간에 따른 비정상 MD, 유용한 변수를 이용한 비정상 MD와 hmi_RCSPT457의 값을 비교한 결과를 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 타 분야에서 검증된 MTS가 가압기 압력 제어 계통의 고장 감지에 효과가 있고, 어떠한 한계점이 있는지 확인하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해, 실제 원자력 발전소에서 발생하고 있는 가압기 압력전송기 고장 시나리오를 대상으로 하여, Full Scope 시뮬레이터를 통해 모사된 데이터에 적용하였다. 실험 결과, hmi_RCSPT457의 값의 변화만을 모니터링 하였을 경우 고장이 발생하기 시작한 지 1,717초 만에 고장이 감지되는 것 대비, MTS를 이용한 고장 감지에서는 고장이 발생하기 시작한지 20초 만에 고장이 감지되는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 아직까지 원자력 발전소의 조기 고장 감지/진단 분야에는 적용된 사례를 찾아보기 어려웠던 MTS를 가압기 압력 제어 계통의 고장 감지 문제에 적용함으로써, 부분적으로 효과를 확인할 수 있었다. 하지만, MTS가 실제 현장에 적용되기 위해서는 여전히 몇 가지 한계가 존재하며, 다음과 같은 추가 연구가 필요하다. 우선, 본 연구에서는 가압기 압력 전송기 고장 시나리오를 기반으로 가압기 압력 제어 계통의 고장을 감지 하였으나, 센서들의 값이 정상 상태에서 벗어날 수 있는 다른 고장 상황에도 비정상 MD가 증가하게 된다. 이는 MTS가 정상 상태를 기준으로 센서들의 값이 변하면 비정상 MD가 증가하기 때문이다. 즉, 현재의 알고리즘 상에서는 고장이 발생한 것으로 조기에 감지할 수는 있지만, 어떠한 고장이 발생하였는지에 대하여 알기 어렵다. 추후 연구에서는 발전소에서 발생할 수 있는 다양한 고장 시나리오를 바탕으로, 고장의 조기 감지에 더하여, 어떠한 고장이 발생한 것인지 진단하기 위한 연구가 필요하다. 다음으로, 본 연구에서 사용된 데이터는 고성능의 검증된 시뮬레이터를 통해 획득되

었지만, 이는 여전히 발전소의 실제 데이터는 차이가 존재하므로, 발전소로부터 획득된 실제 데이터로의 적용 및 검증이 필요하다.

References

Choo, K.-K., Oh, S.-D., and Kim, Y.-J. (2012). Faults diagnosis of wind turbine using MTS techniques, *Proceedings of the Korean Institute of the Industrial Engineers/The Korean Operations Research and Management Science Society*, 2406–2416.

Chun, H.-Y., Park, G.-T., Park, S.-Y., and Kim, In.-S. (1987). A study of instrument failure detection in PWR pressurizer, *The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers*, **36**, 70–76.

Hong, J.-E. (2009). Analysis of multivariate system using Mahalanobis Taguchi system, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, **32**, 20–25.

Jin, X. and Chow, T. W. S. (2013). Anomaly detection of cooling fan and fault classification of induction motor using Mahalanobis-Taguchi system, *Expert Systems and Applications*, **40**, 5787–5795.

Lee, C. Y. (1992). Fault diagnosis of a PWR pressurizer using an artificial neural network, *Proceedings of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, 210–219.

Oh, S.-H., Kim, D.-I., Zhu, O.-P., and Kim, K.-J. (1996). A study on the failure detection and validation of pressurizer level sensor signal in nuclear power plant, *The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers*, **45**, 1460–1466.

Park, J. H., Lee, D. H., and Lee, S. (2002). Failure diagnosis of pressurizer in PWR, *Proceedings of Korean Society of Precision Engineering*, 474–477.

Park, S. G., Park, W. S., Lee, Y. Y., Kim, D. S., and Oh, J. E. (2008). A fault diagnosis on the rotating machinery using MTS, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, **18**, 619–623.

Soylemezoglu, A., Jagannathan, S., and Saygin, C. (2010). Mahalanobis Taguchi system (MTS) as a prognostics tool for rolling element bearing failures, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **132**.

Taguchi, G. and Jugulum, R. (2002). *The Mahalanobis-Taguchi Strategy: A Pattern Technology System*, John Wiley & Sons, New York.

Tylee, J. L. (1982). A generalized likelihood ratio approach to detecting and identifying failures in pressurizer instrumentation, *Nuclear Technology*, **56**, 484–492.

Wang, Z., Wang, Z., Tao, L., and Ma, J. (2012). Fault diagnosis for bearing based on Mahalanobis-Taguchi system, *Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference (PHM–2012 Beijing)*, 1–5.

Willsky, A. S. and Jones, H. L. (1976). A generalized likelihood ratio approach to the detection and estimation of jumps in linear systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **21**, 108–112.

MTS를 이용한 가압기 압력 제어 계통의 조기 고장 감지에 대한 연구

차재민[a,1] · 김준영[a] · 신중욱[a] · 염충섭[a] · 강성기[b]

[a]고등기술연구원 플랜트 SE팀, [b](주)엠엔디

(2016년 9월 2일 접수, 2016년 10월 12일 수정, 2016년 10월 30일 채택)

요 약

원자력 발전소의 가압기는 1차 계통의 냉각재가 고온에서도 기화되지 않도록 압력을 가해주는 장치이다. 즉, 가압기의 고장은 원자력 발전소에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 따라서, 가압기의 조기 고장 감지는 원자력 발전소의 안전에 매우 중요하다. 이를 위해, 본 연구에서는 마할라노비스 거리 개념과 다구찌 품질 공학 이론에 기반한 패턴 분류 인식 알고리즘 중 하나인 마할라노비스 다구찌 시스템(MTS)을 가압기 압력 제어 계통의 조기 고장 감지에 적용하였다. MTS의 고장 감지 성능을 검증하기 위해, 실제 원자력 발전소에서 발생하고 있는 가압기 압력전송기 고장 시나리오를 대상으로 하여, Full Scope 시뮬레이터를 통해 모사된 데이터에 적용하였다. 실험 결과, MTS는 단일 센서 모니터링 기반의 전통적인 고장 감지에 비하여 매우 빠르게 고장을 감지할 수 있었다.

주요용어: 원자력발전소, 가압기 압력제어계통, 조기고장감지, 마할라노비스 다구찌 시스템

본 연구는 2106 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었습니다 (No. 20141520400090).

[1]교신저자: (17180) 경기도 용인시 처인구 백암면 고안로 51번길 175-28, 플랜트 SE팀, 고등기술연구원. E-mail: dr.jaemin.cha@gmail.com