

## 화력발전소의 안정운전 지원을 위한 계측값 검증 기법에 관한 연구

(A Sensor Value Validation Technique for Supporting Stable Operations of  
Thermal Power Plants)

이승철\* · 김승진 · 한승우

(Seung-Chul Lee · Seung-Jin Kim · Seung-Woo Han)

### 요 약

발전소 현장에 설치되어 있는 계기들은 주위환경의 영향이나 계기 자체의 고장으로 틀린 값을 나타내는 경우가 종종 발생한다. 그러나 기존의 발전소 운전감시 및 고장진단 시스템들은 대부분 정확한 센서 값들이 항상 주어진다 는 가정 하에서 상황판단 및 고장진단을 수행하기 때문에 계측값들에 에러가 발생할 경우 잘못된 판단과 정보의 제 공으로 불필요한 발전소의 긴급정지와 같은 심각한 운전상의 문제점이 야기될 수 있으며 이로 인해 큰 경제적 손실 을 초래할 수 있다. 본 논문에서는 발전소의 각 부속 시스템 중 특히 보일러 주급수 공급 시스템(Boiler Feed Water System)에 공간적으로 분포되어 있는 계측기들의 상호관계를 체계적으로 표현하고 적절한 데이터구조로 나타냄으 로서 그러한 상호관계를 통하여 내재하는 계측값들의 중복성(Redundancy)을 최대한 발굴하여 각 계측값들의 유효 성 여부를 검증하고 고장진단과 연계하여 발전소의 안정운전을 지원하기 위한 기법을 개발하고 그 적용 예와 향후 의 적용 가능성을 보였다.

### Abstract

In power plant operations, sensor values often exhibit erroneous values due to their failures or the intrusions of various noises. However, most of the power plant monitoring and fault diagnosis systems perform their tasks based on the assumptions that the collected sensor values are correct all the times. These assumptions, which are not valid, often lead to serious consequences such as power plant trips. In this paper, we propose a power plant sensor value validation technique that can utilize the relationships existing among the sensor values as the sensor redundancy. The proposed technique is applied to the flow meters installed along boiler feed water systems of a typical tubular type boiler thermal power plant and shows a good potential of future applications.

Key Words : Sensor Value Validation, Power Plant Monitoring, Power Plant Fault Diagnosis, Causal Relation, Sensor Precision

\* 주저자 : 중앙대학교 전자전기공학부 교수

Tel : 02-820-5325, Fax : 02-826-1103, E-mail : scllee@cau.ac.kr

접수일자 : 2009년 11월 17일, 1차심사 : 2009년 11월 18일, 심사완료 : 2009년 12월 7일

## 1. 서 론

발전소 현장에 설치되어 있는 계기들의 측정값들은 계측값의 표류(Drift), 바이어스(Bias), 진동, 고온 또는 전자장 결합(Electro-Magnetic Coupling)등의 주위환경의 영향으로 틀린 값을 나타내거나 계기 자체가 고장이 나는 경우가 자주 발생한다[1-2]. 그러나 기존의 발전소 운전감시 및 고장진단 시스템들은 대부분 정확한 센서 값들이 항상 주어진다 가정 하에서 출발하여 상황판단 및 고장진단을 수행하기 때문에, 실제로 현장에 설치하여 사용하는 데는 현실성이 떨어지는 문제점이 있다[3-4]. 계측값들에 에러가 발생할 경우, 발전소 운전 중 운전 오 조작 유발, 불필요한 경보의 발생, 부당한 기기의 트립, 불필요한 발전소의 긴급정지와 같은 심각한 운전상의 문제점이 야기될 수 있으며 이로 인해 큰 경제적 손실을 초래할 수 있다. 이러한 문제점들을 최소화하고 운전 신뢰성을 향상시키기 위해서는 센서값들을 사전에 검증하여 정확한 센서값을 기초로 운전 상황을 파악할 필요가 있다.

본 논문에서는 참고문헌[5-6]에서 제시하는 방법에 기초하여 신뢰할 수 있는 발전소의 운전감시 및 고장진단 시스템 개발을 지원하기 위해 실시간으로 수집되는 계측값들의 정확성 여부를 체계적으로 검증하기 위한 기법에 대하여 논하고자 한다.

발전소 전체적으로 흩어져 설치되어 있는 계기들의 측정값 사이에는 해당 계통의 흐름에 따라 통상 여러 가지 형태의 유기적인 관련성이 존재하게 된다. 본 논문에서는 특히 발전소의 각 부속 시스템 중 특히 보일러 주급수 공급 시스템(Boiler Feed Water System)에 공간적으로 분포되어 있는 계측기들의 상호관계를 체계적으로 표현하고 적절한 데이터구조로 나타냄으로서 그러한 상호관계를 통하여 내재하는 계측값들의 중복성(Redundancy)을 최대한 발굴하여 각 계측값들의 유효성 여부를 검증하고 고장진단과 연계하는 방안을 위한 기법을 개발하고 그 적용 예를 보이고자 한다.

## 2. 인과관계를 이용한 계측값 검증 기법

### 2.1 인과관계의 정의

발전소의 각 부속시스템(subsystem)에 흩어져 설치되어 있는 계기들의 계측값 사이에 존재하는 논리적인 관계들을 체계적으로 활용하여 계측값들의 유효성 여부 검증에 이용하기 위하여 계측값들 사이의 인과관계(Causal Relation)를 다음과 같이 정의하도록 한다.

정의 1. S를 발전소에 설치된 모든 계측센서들의 집합이라고 하자. 즉

$$S = \{s_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$$

여기서  $s_i$  : 임의의 센서,  $n$  : 센서의 총 수

이때 S의 임의의 한 부분집합을  $A_i$  라고 하고  $A_i$  내의 모든 센서들의 측정값이 모두 정확할 경우 임의의 센서  $s_k \in A_i$  의 측정값을  $A_i - \{s_k\}$  내의 모든 센서들의 측정값들로부터 유도할 수 있으면  $A_i$  내의 센서들 간에 인과관계(Causal Relation)  $R_i$  가 존재한다.

발전소의 계측값들 사이에 존재하는 인과관계들은 물리법칙, 시스템의 연결 구성, 시스템의 설계값 등에 기초하여 얻도록 한다.

그림 1에 국내 500[MW]급 표준 화력발전소의 주급수 및 증기 계통의 흐름도(Functional Flow Diagram)와 설치되어 있는 주요 계측기들의 예를 나타내었다. 그림에서 계측기들의 유량계는 “F”(Flow), 압력계는 P(Pressure), 온도계는 “T”(Temperature), 수위계의 경우는 “L”(Level)로 각각 나타내고, 계측기를 2개 또는 3개를 중복 설치하여 정확하다고 간주되는 계측값을 선택하거나 또는 선정 하는 경우에는 (1/2) 또는 (2/3)와 같이 표시하였다. 예를 들어 보일러 주급수 계통 계통의 유량계의 경우는 터빈 구동 보일러 급수펌프(Turbine driven Boiler Feed water Pump Turbine: BFPT) A 와 B,

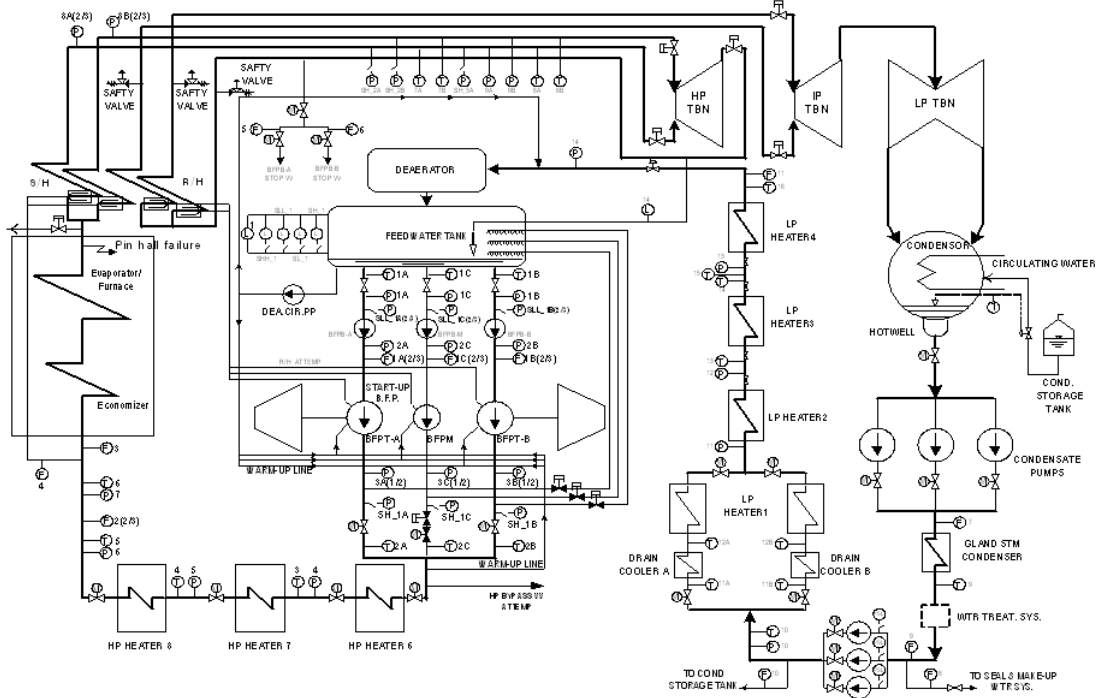


그림 1. 관류형 보일러 화력발전소 주 급수 및 주 증기 계통의 흐름도  
 Fig. 1. Function Flow Diagram of Tubular Boiler Thermal Power Plant

그리고 모터구동 보일러(Motor driven Boiler Feed water Pump: BFP)의 흡입 측에 각각 3개씩 유량계가 설치되어 있고 다시 HP Heater No. 8의 출구 측에 3개의 유량계가 중복 설치되어 있으며 이후 절탄기 입구와 과열기 분기 측에 각각 하나씩의 유량계가 설치되어 있다. 따라서 이 계측기들만으로 인과관계를 나타내면 표 1과 같다.

3개가 중복 설치된 센서들의 경우에는 이들 사이에 3개의 인과관계가 존재하게 된다. 이들 센서가 여타 센서들과 인과관계를 형성할 경우에는 이들 중 1개의 센서만을 선택하여 인과관계를 구성하도록 한다. 예를 들어 R13의 경우

$$F2a = F1Aa + F1Ba + F1Ca \quad (1)$$

로서 F1Aa, F1Ba, F1Ca 및 F2a 모두 3개가 중복 설치된 센서들 중 1개이며 나머지 센서들 간에도 유사한 조합으로 다수의 인과관계가 존재할 수 있으나

표 1. BFP계통의 유량계들 사이에 존재하는 인과관계  
 Table 1. The Causal Relations among Flow Meters in BFP System

R1	:	F1Aa = F1Ab
R2	:	F1Ab = F1Ac
R3	:	F1Ac = F1Aa
R4	:	F1Ba = F1Bb
R5	:	F1Bb = F1Bc
R6	:	F1Bc = F1Ba
R7	:	F1Ca = F1Cb
R8	:	F1Cb = F1Cc
R9	:	F1Cc = F1Ca
R10	:	F2a = F2b
R11	:	F2b = F2c
R12	:	F2c = F2a
R13	:	F2a = F1Aa + F1Ba + F1Ca
R14	:	F2a = F3 + F4

뒤에 설명하는 센서들의 “유효급수” 산정에서 결과는 동일하게 되며 따라서 조합으로 이루어지는 인과관계를 모두 열거할 필요는 없다. Two out of three 다수결(majority voting) 방법을 사용할 경우 비록 확률적으로 낮기는 하지만 계측신호의 변환기(transmitter)가 같은 위치에 설치되고 신호선도 같은 케이블 트레이로 포설되어 DCS의 데이터 수집 장치로 인입 될 경우 동일한 센서 고장 모드(Common Failure Mode)에 함께 노출되어 동시에 고장이 나거나 같은 전자파 잡음이 침입할 가능성이 높고 이러한 경우 3개 중 2개 이상의 센서가 함께 틀린 값을 나타내어 그대로 기기 트립으로 이어질 수가 있는 문제점이 있다. 그러나 본 논문에서 제안하는 계측값 검증 기법을 사용할 경우 이들 중복 설치된 계측기들의 계측값 3개 중 2개가 틀릴 경우에도 이들 계측값들이 다른 계측값들과 인과관계를 형성할 경우에는 이를 분별해 낼 수가 있다. 이에 대해서는 뒤의 “유효급수” 산정 설명 시 다시 설명하기로 한다.

## 2.2 Sensor Redundancy Graph(SRG)

임의의 두 인과관계  $R_i$  와  $R_j$  가 센서  $s_c$  를 공통으로 포함하고 있을 때 각각의 인과관계를 노드(node)로 나타내고, 이 두 인과관계를  $s_c$  로 표기(Labeling)한 에지(Edge)로 연결하면 그래프가 형성된다. 이와 같이 인과관계들에 속해 있는 공통센서들을 이용하여 그래프를 시스템 전체로 확대할 경우 그래프 내의 어느 한 인과관계에 속하는 센서도 그래프 내에 속하는 다른 모든 센서값들의 검증에 직간접적으로 이용될 수 있는 가능성을 제시한다. 상기와 같이 센

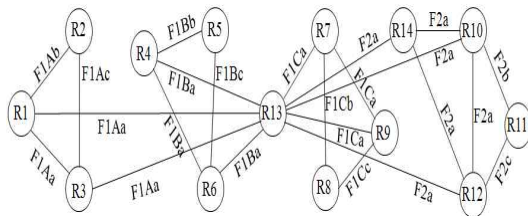


그림 2. 표 1의 급수계통의 유량계들 사이의 인과관계로 구성된 SRG의 예  
Fig. 2. The SRG composed with the CRs existing among the Flow Meters shown in Table 1

서들의 인과관계들로 구성된 그래프를 Sensor Redundancy Graph (SRG)라고 정의한다. 그림 2는 표 1의 인과관계를 SRG로 표현한 것이다.

## 2.3 인과관계의 성립여부판정 및 센서의 유효급수(Validity Level)

### 2.3.1 인과관계의 성립

임의의 인과관계  $R_i$  에 일정한 시점에 수집한  $A_i$  내의 센서들의 측정값을 대입하였을 때 적정 오차범위 내에서 인과관계가 성립하면  $A_i$  내의 모든 센서들의 측정값들이 유효하기 위한 필요조건이 만족되게 되고 이때  $[R_i]=1$ 로 나타낸다. 반대로  $R_i$  가 성립하지 않으면  $[R_i]=-1$ 로 나타낸다. 즉  $A_i$  내의 센서들을  $s_p, s_q, s_r \dots$  라고 할 때  $R_i$  는 이들 측정값들의 함수 형태인  $f_i(s_p, s_q, s_r, \dots) \equiv f(A_i) = 0$  으로 나타낼 수 있다. 인과관계의 성립여부를 확인하기 위해 상기함수에 센서들의 측정값을 대입할 경우를

$$f_i(\langle s_p \rangle, \langle s_q \rangle, \langle s_r \rangle, \dots) \equiv f(\langle A_i \rangle)$$

로 나타내면 측정값들이 모두 정확할 경우  $f(A_i) = 0$  이 되나, 실제 측정값들은 오차를 포함하므로 일반적으로  $f(\langle A_i \rangle)$  는 0이 되지 못한다. 이때 인과관계  $R_i$  가 성립한다고 인정할 수 있는 오차범위  $\epsilon_i$  를 인과관계 성립기준(consistency criteria)이라고 정의한다.

### 2.3.2 인과관계의 성립여부 판정

센서들의 실제 측정값(measured value)은 주위환경의 영향이나 계기자체의 고장으로 인하여 참값(true value)과 차이가 생기거나 틀린 값을 나타낼 수 있다. 따라서 인과관계의 성립기준을 정하기 위해서는 인과관계를 구성하는 센서들간의 오차의 결합과 파급효과를 고려하여야 한다.

### 2.3.3 임의의 센서 $s_k$ 의 측정값에 대한 오차 허용범위

센서의 측정값이 포함하는 오차는 정밀오차(Precision error)와 고정바이어스 오차(Fixed-bias

error)로 나눌 수 있다. 정밀오차는 센서의 정밀도로 인하여 발생하는 랜덤(random)한 오차로써 그 분포는 다음과 같이 정밀지수(Precision Index) S로 나타낼 수 있다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (2)$$

여기서

$x_i$  : ith measurement

$\bar{x}$  : mean value of measurements

$N$  : total number of measurements

고정바이어스 오차는 측정치의 중심값이 참값으로부터 벗어나 있는 정도를 나타낸다. 센서  $s_k$ 의 정밀지수  $S_k$ 와 예상되는 고정바이어스 오차를 감안한  $s_k$ 의 예상 오차범위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-B_k - t_{99}S_k \leq s_k - \langle s_k \rangle \leq t_{99}S_k + B_k \quad (3)$$

여기서

$s_k$  : 센서  $s_k$ 의 참값(또는 센서  $s_k$  자체)

$\langle s_k \rangle$  : 센서  $s_k$ 의 측정값

$t_{99}$  : the two-tailed Student-t distribution에서 99%되는 점

$S_k$  : 센서  $s_k$ 의 정밀지수

$B_k$  : 센서  $s_k$ 의 바이어스 리미트(Bias-Limit)

### 2.3.4 인과관계의 성립기준

임의의 인과관계  $R_i$ 는 여러 센서들로 구성되어 있고 따라서 각 센서들의 오차는 인과관계에 따라 결합되고 퍼져나가게 된다. 본 논문에서는 인과관계의 성립기준을 구하기 위해 각 센서들에 포함된 정밀오차와 고정바이어스 오차의 파급을 고려하였다.

$R_i$ 의 모든 항을 동일한 변으로 이항하여 얻은 함수  $f_i(s_p, s_q, s_r, \dots) \equiv f(A_i) = 0$ 에서  $f(A_i)$ 의 정밀 지표(Index)  $S_{A_i}$ 와 바이어스 리미트  $B_{A_i}$ 는  $A_i$ 내의 센서  $s_p, s_q, s_r, \dots$ 들의 정밀오차와 고정바이어스 오차가  $f(A_i)$ 에 따라 파급된 결과이고 Taylor Series Expansion을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{A_i} = \sqrt{\left(\frac{\partial f(A_i)}{\partial s_p} S_{s_p}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(A_i)}{\partial s_q} S_{s_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(A_i)}{\partial s_r} S_{s_r}\right)^2 + \dots} \quad (4)$$

$$B_{A_i} = \sqrt{\left(\frac{\partial f(A_i)}{\partial s_p} B_{s_p}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(A_i)}{\partial s_q} B_{s_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(A_i)}{\partial s_r} B_{s_r}\right)^2 + \dots} \quad (5)$$

여기서  $\frac{\partial f(A_i)}{\partial s_p}, \frac{\partial f(A_i)}{\partial s_q}, \frac{\partial f(A_i)}{\partial s_r}, \dots$ 는  $f(A_i)$ 을  $A_i$

내 센서들로 편미분하여 각 센서값을 대입한 값이다.

$A_i$  내의 모든 센서가 정확한 값을 가지면  $f(A_i) = 0$ 이 된다. 따라서  $|f(A_i) - f(\langle A_i \rangle)|$ 의 예상 오차 구간  $\epsilon_{A_i}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$-B_{A_i} - t_{99}S_{A_i} \leq \epsilon_{A_i} \leq t_{99}S_{A_i} + B_{A_i} \quad (6)$$

### 2.3.5 유효급수

임의의 인과관계  $R_i$ 가 성립하면, 즉  $[R_i] = 1$ 이면,  $A_i$ 내의 모든 센서의 “유효급수(Validity Level)”를 1씩 증가시킨다. 모든 센서의 유효급수는 매 검증주기마다 0으로 초기화한다. 따라서 임의의 센서  $s_k$ 가  $n$ 개의 인과관계에 동시에 속해 있고 이들  $n$ 개의 인과관계가 모두 성립하면  $s_k$ 의 유효급수는  $n$ 이 되고  $[s_k] = n$ 으로 나타낸다.

$R_i$ 와  $R_j$ 에 동시에 속해 있는 센서  $s_k$ 가 고장이 나서 두 인과관계가 함께 성립되지 못할 때 다음의 조건1을 만족하면  $R_i$ 와  $R_j$ 를 동시에 성립하게 만들 수 있다.

조건 1 :  $\langle s_k \rangle$  대신에  $R_i$ 에서 유도하여 얻은 센서  $s_k$ 의 값  $\langle s_k \rangle_i$ 를  $R_j$ 에 대입하여  $R_j$ 가 성립하거나  $\langle s_k \rangle$  대신에  $R_j$ 에서 유도하여 얻은 센서  $s_k$ 의 값  $\langle s_k \rangle_j$ 을  $R_i$ 에 대입하여  $R_i$ 가 성립한다.

상기의 경우  $\langle s_k \rangle, R_i, R_j$ 는 각각 논리적으로 수리(Logically Repaired)되었다고 하고 이때 논리적으로 수리된 센서(Repaired Virtual Sensor)를  $\hat{s}_k$ 로 표현한다.  $\langle \hat{s}_k \rangle$ 는  $\langle s_k \rangle_i$ 와  $\langle s_k \rangle_j$ 의 평균치로 취한다. 또한  $R_i$ 와  $R_j$ 는 논리적으로 수리되었기 때문에  $A_i$

및  $A_j$  내의  $s_k$  를 제외한 모든 센서들의 유효급수를 1 씩 증가시켜 준다.

다음으로  $[R_i]=1$  이면  $A_i$  내에서 유효급수가 가장 낮은 센서들의 수  $n_i$  는 2 이상이어야 한다. 즉  $n_i(m_{\min}) \geq 2$  이어야 한다. 단  $m_{\min}$  은  $A_i$  내에 존재하는 센서의 유효급수들 중 가장 낮은 수이다. 즉 임의의 인과관계  $R_i$  가 성립하고 센서  $s_k$  는  $R_i$  내에서 가장 낮은 유효급수를 가진 센서라고 할 때  $s_k$  값은  $A_i - \{s_k\}$  로부터 그 유효성 여부가 지원(Support)되므로  $[s_k]$  는 최소  $A_i - \{s_k\}$  내의 센서들 중에서 가장 낮은 유효급수를 가진 센서의 유효급수만큼은 증가시키는 것이 타당하다. 이와 같은 유효급수의 증가를 특히 최소유효급수 증가(Minimum Validity Level Increment : MVLI)라 한다.

상기한 세 가지의 경우 임의의 센서  $s_k$  의 유효급수  $[s_k]$  를 증가시킬 수 있다.

### 2.3.6 유효급수의 파급

임의의 인과관계  $R_i$  와  $R_j$  내에 센서  $s_c$  가 공통으로 포함되어 있고 임의의 인과관계  $R_j$  와  $R_k$  내에는 센서  $s_d$  가 공통으로 포함되어 있다고 가정하자.  $[R_i]=1$  이면  $A_i$  내의 모든 센서의 유효급수가 증가하므로  $s_c$  의 유효급수도 증가하게 된다. 이때  $R_j$  내에서  $s_c$  의 유효급수보다 낮은 센서가  $s_d$  만 있을 경우에  $s_c$  의 유효급수가 증가함에 따라  $s_d$  의 유효급수도  $s_c$  의 유효급수만큼 증가시켜 주어야 한다. 이때  $s_d$  는  $R_j$  와  $R_k$  의 공통센서이므로  $s_d$  에 의해서  $R_k$  도 영향을 받게 된다. 상기한 방식으로 유효급수가 파급되는데 이러한 파급은 만일 파급이 길게 진행되어 다시  $R_i$  로 되돌아올 경우에도 파급되어온 공통센서의 유효급수는 파급을 유발한  $s_c$  의 유효급수보다 낮거나 같기 때문에 파급이 멈추게 되며 다른 경로로 파급되는 유효급수도 SRG내로 퍼져가면서 결국 찾아들게(settle down) 된다. 따라서 공통센서들의 유효급수의 증가는 SRG 내에서 인접한 노드내의 다른 센서들의 유효급수에 연쇄적으로 파급되며 이들을 증가시키게 된다.

### 2.3.7 유효급수의 의미

센서  $s_k$  의 유효급수가 1일 경우 센서값  $\langle s_k \rangle$  가 속한 인과관계 중 하나가 성립한다는 의미로서 해당 인

과관계내의 센서들의 값이 틀린데도 불구하고 센서값들의 오차가 공교롭게도 상쇄되어 인과관계가 성립되는 경우가 아닌 한 센서값이 정확하다는 증명이 된다. 또 실제 발전소를 운영하는 기술자들도 통상 이와 유사한 방법으로 서로 관련 있는 센서값들을 비교해가며 센서값이 맞는지의 여부를 판단한다. 유효급수가 2 이상일 경우에는 센서값이 틀린데도 2개 이상의 인과관계 모두 인과관계내의 틀린 센서값들의 오차들이 상쇄되어 인과관계가 성립할 가능성은 거의 없으므로 사실상 센서값이 정확하다는 증명이 된다.

### 2.3.8 계측값 검증 기법과 고장 진단과의 연계

제안하는 계측값 검증기법은 고장진단과 연계시킬 경우 고장진단을 위한 중요한 정보도 제공할 수 있다.  $R_i$  를 구성하는 센서들의 집합인  $A_i$  내의 각 센서들의 위치에 의해서 경계되어지는 플랜트 계통의 일부분을  $r_i$  로 나타낼 경우, 만일  $[R_i]=-1$  이지만  $A_i$  내의 모든 센서값의 유효급수가 1 이상이면  $r_i$  내에  $R_i$  의 성립을 제한하는 센서 외적인 요인, 즉 고장이나 그 외의 교란이 존재한다는 것을 의미한다.

## 3. 사례연구

그림 3에 운전 중인 국내 500[MW]급 화력발전소의 정상운전 중 임의의 1시간동안의 터빈 구동 주급수 펌프(Turbine driven Boiler Feed Water Pump: TBFP) A의 흡입유량(Suction Flow)을 측정하는 3개 유량계의 유량 데이터와 발전소 출력을 초단위로 나타내었다. 이들 세 유량계 사이에는 표 1에 열거한 R1~R3 인과관계가 존재한다.

수집한 유량데이터에 Central Limit Theorem (CLT)을 적용하여 유량계의 정밀도 및 인과관계 표현을 통한 오차의 전파량을 산정하기로 한다. 정밀도 산정을 위하여 1시간 데이터 중 발전기 출력이 크게 변동을 보이지 않은 데이터를 각 유량계별로 30개씩 10세트를 추출하여 각각의 평균을 취하였다. 즉

$$F1Aa : \overline{x_{11}}, \overline{x_{12}}, \overline{x_{13}} \dots \overline{x_{110}}$$

$$F1Ab : \overline{x_{21}}, \overline{x_{22}}, \overline{x_{23}} \dots \overline{x_{210}}$$

$$F1Ac : \overline{x_{31}}, \overline{x_{32}}, \overline{x_{33}} \dots \overline{x_{310}}$$

여기서  $\bar{x}_{ij}$  ( $i=1, 2, 3$ ), ( $j=1, 2, 3...10$ )은 3개의 유량계 각각의 데이터 세트 평균값들이고 각 유량계의 300개 데이터 전체 평균은

$$\bar{X}_1 = 852.9971$$

$$\bar{X}_2 = 853.8392$$

$$\bar{X}_3 = 850.8441$$

로 나타났다.

각 유량계의 전체 평균값에 대한 정밀지표  $s_i$ 는

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} (\bar{x}_i - \bar{X}_i)^2}{N-1}} \quad i = 1, 2, 3, \quad N = 10$$

에 의해 각각  $s_1 = 0.0779$ ,  $s_2 = 0.5048$ ,  $s_3 = 0.4833$ 으로 산출되었다. CLT에 의하여 표본데이터 평균값의 표준편차는 센서의 정밀도에 해당하는 전체 표준편차의  $\frac{1}{\sqrt{n-1}}$ 에 접근해가므로 센서의 정밀도는 각각

$$S_i = \sqrt{n-1} s_i \quad i = 1, 2, 3... \text{으로부터 각각 } S_1 = 0.4197$$

$$S_2 = 2.7184 \quad S_3 = 2.6029 \text{ 을 구할 수 있다.}$$

각 유량계에 대한 바이어스 리미트는  $B_i = \bar{X} - \bar{x}_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  여기서  $\bar{X} = -(\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3)$ 로 산정하였고 각각

$$B_1 = -0.4370$$

$$B_2 = -1.2791$$

$$B_3 = 1.7161$$

이 된다. 인과관계 표현을 통한 오차의 전파와 바이어스 리미트를 산정하면  $f(A_1) = F1Aa - F1Ab$ 와 식 (4)로부터

$$S(A_1) = \sqrt{\{(1-0)S_1\}^2 + \{(0-1)S_2\}^2} = 2.7506$$

이 되고 마찬가지로

$$S(A_2) = 3.7636$$

$$S(A_3) = 2.6365$$

을 구할 수 있다. 각 인과관계와의 바이어스로 마찬가지로 식 (5)를 이용하여

$$B(A_1) = \sqrt{\{(1-0)B_1\}^2 + \{(0-1)B_2\}^2} = 1.3517$$

$$B(A_2) = 2.1403$$

$$B(A_3) = 1.7708$$

와 같이 산정할 수 있다.

따라서 인과관계 R1, R2, R3가 성립되기 위한 오차범위를 Student-t Distribution의  $t_{99}$ 을 적용하여 구하면

$$|\epsilon(A_1)| \leq |t_{99}S(A_1) + B_k| = 8.9323$$

$$|\epsilon(A_2)| \leq |t_{99}S(A_2) + B_k| = 12.5128$$

$$|\epsilon(A_3)| \leq |t_{99}S(A_3) + B_k| = 9.0371$$

이 된다. 여기서  $t_{99}$  값은 Student-t 분포 테이블에서 2.756을 구하여 대입하였다.

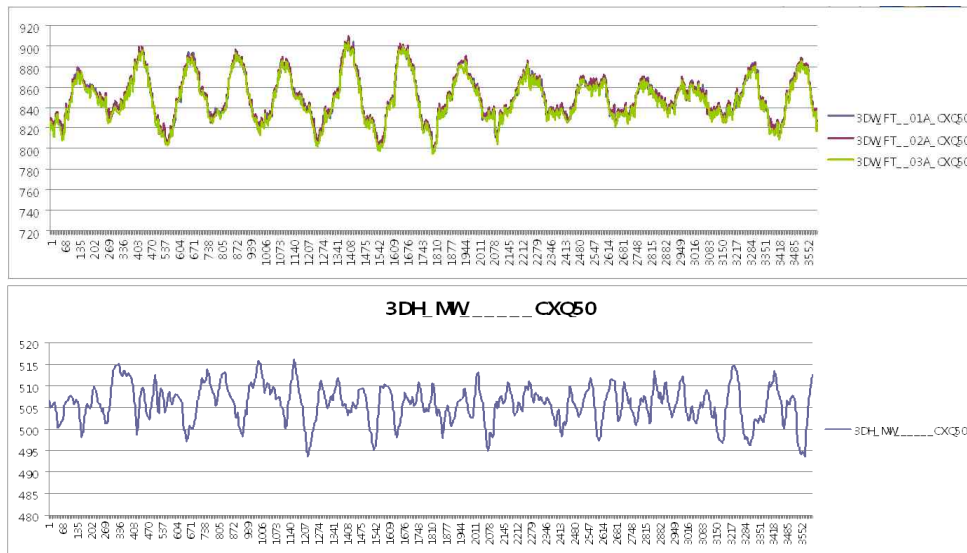


그림 3. BFPT 흡입유량 (2/3) vs 발전소 출력((MW))  
Fig. 3. BFPT Suction Flow(2/3) vs Plant Output((MW))

화력발전소의 안정운전 지원을 위한 계측값 검증 기법에 관한 연구

상기 사례연구에서의 연산과정은 MatLab 프로그램을 이용하여 구현하였으며 실행결과 사례에 적용한 BFPT-A 유량계 데이터들 간의 인과관계는 모두 허용오차 범위 내에서 성립하며 측정값이 정확한 것으로 나타났다.

앞의 그림 2에 나타낸 SRG에 포함된 인과관계가 취득한 데이터 값을 대입하였을 경우 모두 성립

(Consistent)되는 경우에 각 데이터 값들의 유효급수가 세트되고 상호 파악되면서 계속적으로 증가되어 가는 과정과 최종 유효급수 값을 표 2에 보였다. 인과관계가 모두 성립될 경우 F3과 F4를 제외한 센서들의 유효급수는 전체적으로 3 이상이 되어 센서 값들이 유효하다는 것을 강하게 증빙(Strongly Support)해 주고 있다. F3과 F4는 R14 하나의 인과

표 2. 모든 인과관계가 모두 성립 시 유량계들의 유효급수(Validity Level)  
Table 2. Validity Levels for Flow Meters with all consistent CRs

Consistent CR \ Flow Meter	F1Aa	F1Ab	F1Ac	F1Ba	F1Bb	F1Bc	F1Ca	F1Cb	F1Cc	F2a	F2b	F2c	F3	F4
R1, R4, R7, R10	1	1		1	1		1	1		1	1			
R2, R5, R8, R11		2	1		2	1		2	1		2	1		
R3, R6, R9, R12	2		2	2		2	2		2	2		2		
R13	3			3			3			3				
R14	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	1	1
MVLL에 의한 유효급수의 파악														
최종 유효급수	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	1	1

표 3. 유량계 F1Ab, F1Bc, F2b, 값이 틀릴 경우의 유량계들의 유효급수  
(\* 성립되지 않는 CR: R1, R2, R5, R6, R10, R11)

Table 3. Validity Levels for Flow Meters with Measurement Error in F1Ab, F1Bc and F2b

Consistent CR \ Flow Meter	F1Aa	F1Ab	F1Ac	F1Ba	F1Bb	F1Bc	F1Ca	F1Cb	F1Cc	F2a	F2b	F2c	F3	F4
R3, R4, R7, R12	1		1	1	1		1	1		1		1		
R13	2			2			2			2				
R14										3			1	1
MVLL에 의한 유효급수의 파악														
최종 유효급수	2	0	2	2	2	0	2	2	0	3	0	3	1	1

표 4. HP HTR #7 내 Tube leak시 유효급수

Table 4. Validity Levels for Flow Meters Tube leak in HP HTR #7

Consistent CR \ Flow Meter	F1Aa	F1Ab	F1Ac	F1Ba	F1Bb	F1Bc	F1Ca	F1Cb	F1Cc	F2a	F2b	F2c	F3	F4
R1, R4, R7, R10	1	1		1	1		1	1		1	1			
R2, R5, R8, R11		2	1		2	1		2	1		2	1		
R3, R6, R9, R12	2		2	2		2	2		2	2		2		
R14										3			1	1
MVLL에 의한 유효급수의 파악														
최종 유효급수	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1



관계에만 소속되어 유효급수 값이 1이 되었으며 F3과 F4의 오차가 서로 상쇄되지 않는 한 그 값이 유효하다는 의미가 된다.

표 3는 여러 개의 센서값이 동시에 틀릴 경우에도 제안하는 센서값 검증기법을 사용할 경우 올바른 센서값과 틀린 센서값을 구별해 낼 수 있음을 보여주고 있다. 틀린 센서값들은 유효급수가 0 이 되고 F3과 F4를 제외한 나머지 센서값들의 유효급수는 모두 2 이상이 됨을 알 수 있다.

표 4는 R13을 제외한 모든 인과 관계가 실제로 측정한 계측값을 대입하여 성립하며 R13에 속하는 계측값 F2a, F1Aa, F1Ba, F1Ca도 R13을 통한 유효급수 증가는 이루지 못했어도 이들이 속한 다른 인과관계를 통해 유효급수가 증가되어 이들 센서값이 모두 정확하다는 것이 검증될 수 있음을 보여주고 있다. 따라서 R13에 속한 계측기들이 설치되어 있는 구간 즉 BFPT-A와 BFPT-B 및 BFFPM의 흡입 측으로부터 HP Heater 8의 출구 구간 사이에 이 인과관계를 성립하지 못하도록 하는 고장, 예를 들면 F2a가 F1Aa + F1Ba + F1Ca 값보다 현저히 적을 경우에는 해당 구간에서 누수 고장이 발생한 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서 제시한 계측값 검증 기법은 계측기들을 중복해서 설치하지 않고도 흠어져 설치되어 있는 계측값들 간에 유지되어야 할 관련성을 체계적으로 최대한 활용함으로써 같은 위치에 계측기를 중복 설치하는 경우보다도 오히려 더욱 안정적인 계측값 검증을 가능하게 하는 이점이 있다. 또한 계측값들간에 성립해야할 인과관계가 성립하지 않을 경우에도 계측값들이 주위의 인과관계들로 인해 모두 정확하다는 것이 확인될 경우 계측기들이 설치된 계통 자체에 고장이 발생한 것도 발견 할 수 있는 장점이 있다. 본 계측값 검증기법은 발전소의 운전 감시 및 고장 진단 시스템을 개발할 경우 감시와 고장 진단에 앞서 그의 기초가 되는 계측값들의 정확성을 확인시켜 줌으로써 보다 안정적이고 신뢰도 높은 발전소 운영에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

#### References

- [1] Abernethy, R. B et al., Measurement uncertainty handbook ; Uncertainty in gas turbine measurements, Rep. No. AEDC-TR-73-5, Arnold Engineering Development Center, 1973.
- [2] Stein, P. K., "The reponse of transducers to their environment : The problem of signal and noise", Lf/MSE Publication, No. 17, Laboratory for Measurement and System Engineering, Arizona State University, 1969.
- [3] Chandrasekaran B. and Punch III, W. F., "Hierarchical classification : its usefulness for diagnosis and sensor validation", IEEE Journal of Selected Areas in Communications Vol. 6, No. 5, pp. 884-891, 1988.
- [4] Scarl, E. A. Jamieson, J. R., and Delaune, C. I., "Diagnosis and sensor validation through Knowledge of structure and function", IEEE Trans. on system Man, and Cybernetics, Vol. SMC-17, No. 3, pp. 360-368, May/June 1987.
- [5] Lee, S. C., "Sensor Value Validation Based on Systematic Exploration for the Sensor Redundancy for Fault Diagnosis KBS", IEEE Trans. System, Man and Cybernetics, Vol. 24, No. 2, pp. 594-604, March, 1994.
- [6] Lee, S. C. and Park, C. E "Sensor value validation based on implicit sensor redundancy for reliable operation of power plants", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 20, No. 2, pp. 373-380, June, 2005.

본 논문은 한국서부발전(주)의 지원에 의하여 기초전력 연구원 주관으로 수행된 것임.

#### ◇ 저자소개 ◇

##### 이승철 (李承哲)

1946년 6월 16일생. 1969년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 재무부 전매청 신탄진 연초제조창 전력과장. 1980년 현대엔지니어링 기전사업부 차장. 1982년 미국 Univ. of Florida 전기공학과 석사. 1985년 동대학원 박사. 1995년 미 테네시대 항공우주대학원 전기 및 컴퓨터 공학과 교수. 현재 중앙대 공대 전자전기공학부 교수.

Tel : (02)820-5325  
 Fax : (02)826-1103  
 E-mail : sclee@cau.ac.kr

##### 김승진 (金承鎭)

1982년 1월 3일생. 2008년 중앙대 전자전기공학부 졸업. 2009년 중앙대 공대 전자전기공학부 석사 과정 중.

Tel : (02)826-2614  
 E-mail : seungjin.kim.cau@gmail.com

##### 한승우 (韓勝宇)

1981년 9월 20일생. 2007년 강원대 제어계측공학과 졸업. 2009년 중앙대 공대 전자전기공학부 석사 과정 중.

Tel : (02)826-2614  
 E-mail : hsw-7@hanmail.net