

인과관계내에서 계측값들의 오차파급을 고려한 계측값 검증 기법에 관한 연구

이 승 철, 어 래 진  
 중앙대학교 전기공학과

A Sensor Value Validation Technique taking account of the Error Propagation among the Sensor Values in Causal Relation

S. C. Lee, R. J. Uh  
 Department of Electrical Engineering, Chung-Ang Univ.

**Abstract** - This paper presents an algorithmic sensor value validation technique that can systematically explore the embedded sensor redundancies in complex physical systems and maximize their utilization in validating sensor values. The confidency criteria are developed for checking the consistency of sensor relationships called Causal Relations. Development results are applied to a tubular type supercritical pressure type thermal power plant with rated operational data to demonstrate the effectiveness of the proposed technique.

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 센서들간에 인과관계(causal relation)  $R_i$ 가 존재한다고 한다. [4]

또한 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 labeling한 edge로 연결하면 그래프가 형성된다. 이와 같이 인과관계들에 속해있는 공통센서들을 이용하여 그래프를 시스템 전체로 확대할 경우 그래프 내의 어느 한 인과관계에 속하는 센서도 그래프 내에 속하는 다른 모든 센서값들의 검증에 직간접으로 이용될 수 있는 가능성을 제시한다. 상기와 같이 센서들의 인과관계들로 구성된 그래프를 *Sensor Redundancy Graph(SRG)*라고 정의한다.

1. 서 론

기호

- $s_k$  : 임의의 센서(계기)
- $\langle s_k \rangle$  :  $s_k$ 의 측정값
- $[s_k]$  :  $s_k$ 의 유효급수
- $\hat{s}_k$  : 논리적으로 수리된 센서  $s_k$
- $R_i$  : 임의의 인과관계
- $[R_i]$  :  $R_i$ 의 성립여부
- $A_i$  :  $R_i$ 를 구성하는 모든 센서의 집합
- $r_i$  :  $R_i$ 의 인과범위
- $\langle s_k \rangle$  :  $R_i$ 를 통해 유추한  $\langle s_k \rangle$
- $n_i(m)$  :  $A_i$  중 유효급수가  $m$ 인 센서의 개수

대형 발전소나 화학 공정 발전소에서 운전상황을 상시 감시하고 고장발생 시에 신속한 상황진단과 처방을 내려 줄 수 있는 운전 상황감시 및 고장진단 시스템의 개발에 선결되어야 할 가장 중요한 과제 중에 하나는 정확한 계측값들을 이들 시스템에 공급하는 것이다.

본 논문에서는 발전소와 같이 크고 복잡한 시스템 내에 흩어져 설치되어 있는 계기들의 계측값 검증을 위해서 계측값들 사이에 존재하는 논리적인 관계들을 이용하였다[1-2]. 이를 위하여 계기간의 인과관계를 효과적으로 나타낼 수 있는 graph 형태의 데이터 구조를 구현하고 이를 계측값 검증 및 고장진단에 적용하기 위해서 계측값의 유효성 여부 판정 방법, 유효한 계기값 내에 포함된 오차들의 파급을 고려한 인과관계 성립기준을 제시한다. 그리고 제안한 기법을 전형적인 화력발전소의 주중기 및 급수 계통[3]에 적용하여 그 효용을 보이고 계측값 검증 결과를 고장진단에 이용할 경우 효율적으로 고장진단을 할 수 있는 가능성을 제시한다.

2. 인과관계와 Sensor Redundancy Graph(SRG)

S를 어느 한 플랜트 시스템에 설치된 모든 계측센서들의 집합이라고 할 때, S의 임의의 한 부분 집합을  $A_i$ ,

3. 인과관계의 성립여부와 센서의 유효급수 (Validity Level)

3.1. 인과관계의 성립여부 판정

임의의 인과관계  $R_i$ 에 일정한 시각에 수집한 센서들의 측정값을 대입하였을 때 적절한 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. 이때 인과관계  $R_i$ 의 성립여부를 판정하기 위한 오차범위를 인과관계 성립기준(consistency criteria)이라고 정의한다. 본 논문에서는 인과관계 성립기준을 정하기 위하여 유효한 센서의 측정값에 포함되어 있는 precision error와 fixed-bias error를 고려하였다. Precision error는 센서의 정밀도로 인하여 발생하는 random한 오차로서 다음과 같이 정밀지수(precision index) S로 나타낼 수 있다[5].

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

여기서  $x_i$  :  $i$ th measurement  
 $\bar{x}$  : mean value of the measurements  
 $N$  : total number of measurements

Fixed-bias error는 센서 측정값의 중심값이 참값으로부터 벗어나 있는 정도를 나타내며 본 논문에서는 센서 측정값들은 fixed-bias error를 고려한 값으로 사용하였다. 이때 센서  $s_k$ 의 정밀지수 S에 따라 각 센서의 허용오차 범위를  $\pm t_{95}S$ 로 정해주면, fixed-bias error를 감안한 각 센서의 허용 error 범위는 다음과

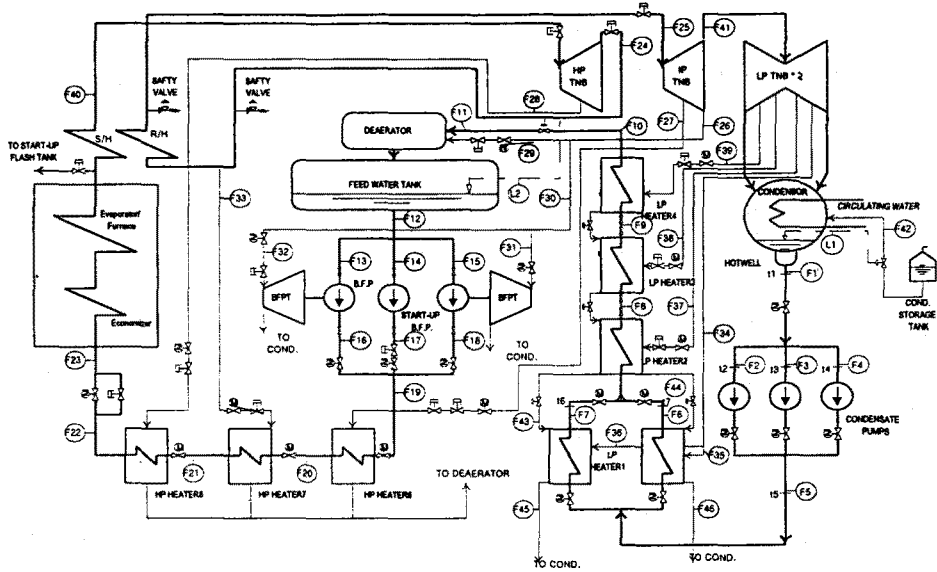


그림 1. 초입계압 관류형 보일러 화력발전소의 급수 및 주증기 계통도 (예)

같이 된다.

$$-t_{95}S \leq \langle \bar{s}_k \rangle - \langle s_k \rangle \leq t_{95}S \quad (2)$$

여기서

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

$\langle \bar{s}_k \rangle$  :  $\langle s_k \rangle$ 의 평균값

(참값을 알 수 없으므로 참값의 best estimator로서  $\langle \bar{s}_k \rangle$ 를 사용)

$t_{95}$  : the two-tailed Student-t distribution에서 95%되는 점

임의의 인과관계  $R_i$ 는 여러 센서들로 구성되어 있고 따라서 각 센서값들의 precision error와 fixed-bias error는 인과관계를 통하여 결합되고 퍼져나가게 된다. 상기한 결과로  $R_i$ 내의 모든 센서들이 유효한 측정값을 가지고 있다고 하더라도  $R_i$ 가 성립하지 않을 수가 있다. 따라서 인과관계 성립여부의 판정은 센서값들의 허용할 수 있는 오차들로 인하여 발생하는 영향을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 인과관계 내에서 센서값들의 오차파급으로 인한 결합된 정밀 지수  $S_{R_i}$ 를 Taylor series expansion을 이용하여 구하였다. 이때 오차파급으로 인한 인과관계  $R_i$ 의 오차 허용 범위, 즉 인과관계의 성립기준  $U_{R_i}$ 를 다음과 같이 구한다.

$$-t_{95}S_{R_i} \leq U_{R_i} \leq t_{95}S_{R_i} \quad (3)$$

여기서  $U_{R_i}$ 는  $R_i$ 의 모든 항을 한쪽으로 이동시켜 합한 값을 말하며  $U_{R_i}$ 의 참값은 0이 된다.

### 3.2. 유효급수

임의의 인과관계  $R_i$ 가 성립하면, 즉  $[R_i]=1$ 이면,  $\Lambda_i$ 내의 모든 센서의 "유효급수(validity level)"를 1씩 증가시킨다. (단, 모든 센서의 유효급수는 0으로 초기화하며 임의의 센서  $s_i$  ( $s_i \in \Lambda_i$ )의 측정값이 0의 값을 가질 경우는 유효급수의 증가대상에서 제외한다.) 따라서 임의의 센서  $s_k$ 가  $n$ 개의 인과관계에 동시에 속해 있고

이들  $n$ 개의 인과관계가 모두 성립하면  $s_k$ 의 유효급수  $[s_k]$ 는  $n$ 이 된다.

센서들의 유효급수는 상기와 같이 속해있는 인과관계가 성립할 경우 이외에도 추가로 다음과 같은 두가지 경우에 증가시킬 수 있다.

먼저 연속 센서  $s_k$ 를 공통으로 포함하고 있는 인과관계  $R_i$ 와  $R_j$ 가  $s_k$ 만의 고장에 기인하여 성립하지 않을 때 다음의 조건을 만족하면  $R_i$ 와  $R_j$ 를 동시에 성립하게 만들 수 있다.

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

상기의 경우  $\langle s_k \rangle$ ,  $R_i$ ,  $R_j$  각각 논리적으로 수리(logically repaired)되었다고 하고 이때 논리적으로 수리된 센서(repaired virtual sensor)를  $\hat{s}_k$ 로 표현한다. 본 논문에서는  $\langle \hat{s}_k \rangle$ 는  $\langle s_k \rangle$ 와  $\langle s_k \rangle$ 의 평균치로 취하였다. 또한  $R_i$ 와  $R_j$ 는 논리적으로 수리되었기 때문에  $\Lambda_i$  및  $\Lambda_j$ 내의  $s_k$ 를 제외한 모든 센서들의 유효급수를 1씩 증가시켜준다. 그리고 수리된  $s_k$ 의 유효급수  $[s_k]$ 는 1을 감소시킨다.

다음으로  $[R_i]=1$ 이면  $n_i(m_{\min}) \geq 2$ 여야 한다. 단  $m_{\min}$ 은  $\Lambda_i$  내의 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 할때  $s_k$  값은  $\Lambda_i - \{s_k\}$ 로부터 그 유효성 여부가 지원(support)되므로  $[s_k]$ 는 최소  $\Lambda_i - \{s_k\}$ 내의 센서들 중에서 가장 낮은 유효급수를 가진 센서의 유효급수만큼 증가시키는 것이 타당하다.

상기한 세가지의 경우 임의의 센서  $s_k$ 의 유효급수  $[s_k]$ 를 증가시킬 수 있고 결국 센서  $s_k$ 의 유효급수가 높다고 하는 것은  $\langle s_k \rangle$ 의 신뢰성이 그만큼 지원되고 크다는 것을 의미한다.

#### 4. 인과범위(causal range)와 고장진단

제한한 센서값 검증 기법을 이용하면 부수적으로 고장진단의 유용한 정보를 얻을 수 있다.

입의 인과관계  $R_i$  대하여  $\Lambda_i$  내의 센서들의 위치에서 경계되어지는 부분을 인과범위라고 정의하고  $r_i$ 로 나타낸다.

만약 인과범위  $r_i$  내에 disturbance가 발생한다면 인과관계  $R_i$ 를 성립하지 않게 될 수 있다. 역으로  $[R_i] = -1$ 이지만  $\Lambda_i$  내의 모든 센서 값의 유효급수가 1 이상이면  $r_i$  내에  $R_i$ 의 성립을 제한하는 고장이나 그 외의 교란 등이 존재한다는 것을 의미한다. 상기한 정보를 고장진단에 이용하면 보다 효율적인 고장 진단을 할 수가 있다.

표 1. 그림 1에 보여진 화력발전소에 설치된 센서들간의 인과관계

$R_1$	: $\langle F1 \rangle = \langle F2 \rangle + \langle F3 \rangle + \langle F4 \rangle$
$R_2$	: $\langle F5 \rangle = \langle F2 \rangle + \langle F3 \rangle + \langle F4 \rangle$
$R_3$	: $\langle F5 \rangle = \langle F6 \rangle + \langle F7 \rangle$
$\vdots$	$\vdots$
$R_{24}$	: $\langle F26 \rangle = \langle F29 \rangle + \langle F30 \rangle$
$R_{25}$	: $\langle F30 \rangle = \langle F32 \rangle + \langle F31 \rangle$
$R_{26}$	: $\langle F37 \rangle + \langle F38 \rangle + \langle F39 \rangle = \langle F43 \rangle + \langle F44 \rangle$
$R_{27}$	: $\langle F45 \rangle = \langle F36 \rangle + \langle F43 \rangle$
$R_{28}$	: $\langle F46 \rangle = \langle F35 \rangle + \langle F44 \rangle$

\*  $\langle Fi \rangle$  : 센서  $Fi$ 의 측정값

#### 5. 모의 실험 및 결과

제한한 센서값 검증기법을 그림 1에서 보여진 초입 제어 보일러 화력발전소의 주증기 및 급수계통에 적용하였다.

표 1은 그림 1에서 보여진 화력발전소 급수 및 증기 시스템에 mass flowmeter들간에 존재하는 인과관계를 보인 것이고 그림 2는 표 1에서 보여진 모든 인과관계들을 SRG로 나타낸 것이다.

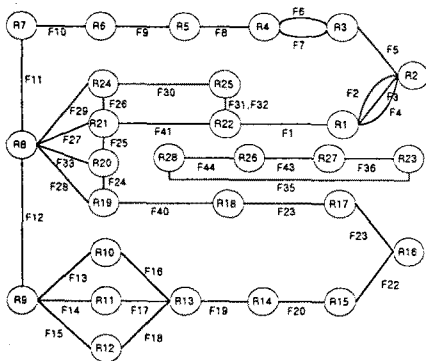


그림 2. 그림 1의 화력발전소 급수 및 증기 계통에 대한 SRG

표 2는 시스템이 정격부하시 각 센서 위치에서의 급수와 증기의 유량과 각 센서들의 유효급수를 나타낸 것으로 case 1은 모든 센서값이 정상적으로 동작하는 경우이고 case 2는 여러 개의 센서 F5, F10, F20, F44에 이상이 있고 인과관계  $R_{25}$  내의 센서들의 위치로 경계되어지는 인과범위  $r_{25}$  내에 leak와 같은 disturbance가 발생하는 경우를 보인 것이다. 모의 실험 결과 정상적으로 동작하지 않는 모든 센서들은 논리적으로 수리가 되어 유효급수가 음수로 되었다. 그리고 수리된 센서값

을 구함으로서 고장으로 판단되는 센서의 위치에서도 유량을 얻을 수가 있었다. 또한 인과관계  $r_{25}$ 는 성립하지 않지만  $r_{25}$  내에 포함된 센서 F30, F31, F32의 유효급수는 다른 인과관계에 의해 검증되었기 때문에  $r_{25}$  내에 disturbance가 존재하는 것을 알 수 있다.

표 2. 모의 실험 결과

(Case 1 : 모든 인과관계가 성립할 경우

Case 2 : flow sensor F5, F10, F20, F44와  $r_{25}$ 의 인과범위내에서 고장이 발생한 경우)

센서	case 1		case 2	
	센서 측정값 (kg/h)	유효급수	센서 측정값 (kg/h)	유효급수
F1	1281390	2	1281390	2
F2	640695	2	640695	2
F5	1281390	2	678600	-2
F6	640695	2	640695	2
F10	1281390	2	385430	-2
F11	1281390	2	1281390	2
F20	1704476	2	1404370	-2
F21	1704476	2	1704476	2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
F30	94437	2	94437	1
F31	47218.5	2	40218.5	1
F32	47218.5	2	40218.5	1
F43	89798.5	2	89798.5	2
F44	89798.5	2	5970.5	-2
F45	119613.5	2	119613.5	2
F46	119613.5	2	119613.5	2

#### 6. 결론

본 논문에서는 계측값들의 인과관계를 이용한 계측값 검증기법과 계측값들의 오차를 고려한 인과관계 성립기 준을 제시하였다. 제안한 계측값 검증 기법은 복수의 센서고장도 쉽게 발견할 수 있을 뿐만 아니라 고장난 센서들의 기대되는 센서값을 구할 수 있고 실제 시스템의 고장까지도 발견이 가능함을 알 수 있다.

본 연구는 98년 한국과학 재단 연구비 지원에 의한 결과임

#### [참고 문헌]

- [1] Chew, E. Y. and Wilsky, A.S., "Analytic Redundancy and design of the Robust Failure Detection System", *IEEE Trans. on Auto. Control*, Vol AC-29, No. 7, pp604-614, July 1984.
- [2] Deyst, J.J. Jr., Kanazawa, R.M., and Pasquenza, J.P., "Sensor Validation: A method to enhance the quality of the man/machine interface in nuclear power stations", *IEEE Trans. on Nuclear Science*, Vol. 28, No. 1, pp. 886-890, February 1981.
- [3] 보령화력 3,4호기 운전지침서 부도, 한국전력공사, 1993. 9
- [4] Lee, S.C., "Sensor Value Validation Based on Systematic Exploration for the Sensor Redundancy for Fault Diagnosis KBS", *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 24, No. 2 pp. 594-604, March, 1994.
- [5] Abernethy, R.B. et. al., *Measurement uncertainty handbook: Uncertainty in gas turbine measurements*, Rep. No. AEDC-TR-73-5, Arnold Engineering Development Center, 1973.