

원전 가압기수위신호 고장검출 및 검증에 관한연구

°오성현*, 김대일*, 주운표*, 정운형*, 임장현*, 윤원영*, 김진중**
 * 한국원자력안전기술원 ** 충남 대학교

A Study on the Failure Detection and Validation of Pressurizer Level Signal in Nuclear Power Plant

°S.H. Oh*, D.I. Kim*, O.P. Zoo*, Y.H. Chung*, C.H. Lim*, W.Y. Yun*, K.J. Kim**
 * Korea Institute of Nuclear Safety, ** Chung Nam National Univ.

< ABSTRACT >

The sensor signal validation and failure detection system must be able to detect, isolate, and identify sensor degradation as well as provide a reconstruction of the measurements. In this study, this is accomplished by combining the neural network, the Generalized Consistency Checking(GCC), and the Sequential Probability Ratio Test(SPRT) method in a decision estimator module. The GCC method is a computationally efficient system for redundant sensors, while the SPRT provides the ability to make decisions based on the degradation history of a sensor. The methodology is also extended to the detection of noise degradation.

The acceptability of the proposed method is demonstrated by using the simulation data in safety injection accident of nuclear power plants. The results show that the signal validation and sensor failure detection system is able to detect and isolate a bias failure and noise type failures under transient conditions. And also, the system is able to provide the validated signal by reconstructing the measurement signals in the failure conditions considered.

1. 서론

원자력발전소와 같은 대규모 동적 시스템에 있어서는 수많은 프로세스 신호가 발전소 안전계통과 감시 및 제어계통 등에 이용되고 있다. 센서의 출력신호들은 사고후 고장진단과 과도상태 발생 중에 아주 중요한 역할을 하는 정보로서 만일 센서의 이상 상태가 발견되지 않은 상태로 운전된다면 원전의 안전운전에 심각한 결과를 가져올 수 있다. 따라서 원전에서 발전소의 안전성을 확보하고 운전의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 센서의 고장 종류를 신속하게 확인하고 적절한 조치를 취하는 것은 중요한 일이다.[1]

그러나 센서고장확인 문제에서 자주 직면하게 되는 어려운 점은 한번의 샘플링 후에 어떤 센서를 고장으로 판단할 것인가 또는 한번 이상의 샘플링을 한 후에 고장에 대한 결정을 할 것인가의 문제로써 한번의 샘플링에 근거하여 고장유무에 대한 결정을 하는 것은 틀린 결정을 내릴 수 있는 가능성이 높게 된다. 따라서 측정값에 대해서 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해서는 여러 개의 샘플링값이 필요하게 되고 매번의 새로운 샘플링에서 평균값(mean)과 분산(variance)을 계산하여 이 값을 센서에 고장이 발생하였는지의 여부를 점검하는데 이용할 수 있다. 그러나 이러한 절차는 유용한 평균값과 분산을 얻기 위해서는 너무 많은 샘플링을 요구하게 되고 샘플링기간동안 감시되는 프로세스에서 중대한 고장이 일어날 수도 있다. 따라서 각 샘플링에서 새로운 평균값과 분산을 계산하지 않고 센서의 연속적인 거동과 고장의 정도를 이용하여 센서의 고장을 탐지하는 것이 바람직하다. Wald에 의해서 제안된 순차적 확률비방법(Sequential Probability Ratio Test:SPRT)[2]은 이와 같은 요건을 만족시킨다.

SPRT는 센서고장을 점검하기 위하여 칼만필터와 함께 이미 사용되었으며[3], 칼만필터는 신호의 추정값을 제공해 주는 역할을 한다. 칼만필터를 이용한 추정값은 해석적 모델에 기초를 두고 있는데 이와 같은 방법이 센서의 다중 배열을 이용하여 개선될 수 있는가를 고려할 수 있다. 따라서 만일, 신호의 추정값이 다중 추정값 또는 다중 모델에 기초를 두고 있다면 추정값은 단일 모델에 기초한 추정값보다 더 신뢰성 있는 추정값을 얻을 수 있다는 것이 예상되며 본 연구에서는 칼만필터를 이용한 추정값을 일반화된 불일치도기법(Generalized Consistency Checking:GCC)을 이용하여 계산된 추정값으로 대체하였다. 따라서 GCC는 칼만필터 대신에 SPRT에서 필요로 하는 추정값을 제공하며 SPRT에서는 특정센서의 출력값이 추정값과 비교되어 센서의 고장종류를 검출할 수 있다.

원전에 적용되는 신호검출 및 고장검출시스템은 센서의 비정상상태를 탐지하여 격리시킨 다음 고장의 종류를 식별하여 최종적으로는 신호를 재구성할 수 있는 능력을 갖고 있어야 한다. 이와 관련하여 본 연구에서는 신경회로망의 함수추정특성을 이용한 신호추정방법[4]과 결정 및 추정기모델에 일반화된 불일치도기법 및 순차적 확률비방법을 조합하여 원자력발전소의 가압기수위 센서신호를 검출하고 고장종류를 판별할 수 있는 신호검출 및 고장검출 알고리즘을 구현하였으며, 가압경수형 원전의 안전주입사고시의 과도상태운전자료를 이용하여 제안된 알고리즘의 적합성을 확인하였다.

2. 센서고장검출

2.1. 고장검출방법

순차적 확률비방법은 센서의 고장상태를 순차적으로 점검하고 센서의 고장이력에 근거하여 고장종류에 대한 결정을 내리는 능력을 갖고 있는 방법으로써[2], GCC방법과는 다르게 신호사이의 일치도점검 또는 신호의 상호비교를 하지 않는 방법이다. 이 방법은 센서출력값과 측정되는 프로세스변수의 추정값 사이의 차이값에 적용된다. 이 방법에서 추정값은 GCC기법을 이용하여 계산된 추정값으로 근사화 될 수 있고, 특정센서에 대해서 프로세스변수 X 의 측정값을 시간 t_m 에서 $X(t_m)$ 이라 하고 $\hat{X}(t_m)$ 을 X 의 추정값이라고 하면 $X(t_m)$ 과 $\hat{X}(t_m)$ 사이의 측정 편차를 다음식(1)과 같이된다.

$$S(t_m) = X(t_m) - \hat{X}(t_m) \quad (1)$$

이와 같은 측정편차 $S(t_m)$ 은 정상적인 센서 동작중의 매 샘플링순간에 계산되며, 이 값에 대한 평균값 m_0 과 분산 σ_0^2 을 정의한다. $S(t_m)$ 이 정상운전시 정규분포(Gaussian Density Function)를 갖고 있다고 하면, 이에 대한 확률밀도함수는 다음식(2)와 같이된다.

$$P_0(s, m_0, \sigma_0^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \exp\left[-\frac{(s-m_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] \quad (2)$$

센서의 고장은 평균값 m , 분산 σ^2 의 변동상태를 평균함으로써 검출할 수 있고 고장 설정치를 S 의 평균과 분산으로 규정하여 해당되는 가우시안 밀도함수가 $P_1(s_m, m_1, \sigma_1^2)$ 으로 된다고 하면 정상 모드에서 확률분포함수와 고장모드에서의 확률분포함수를 상호간에 비교함으로써 센서의 이상상태를 판별할 수 있다.

SPRT의 기본은 m 개의 샘플에 근거하여 다음식 (3)으로 표현되는 LLR(Log Likelihood Ratio)을 순환적으로 계산하는데 있다.[5]

$$\lambda_m = I_n \frac{P_1(s_1, s_2, \dots, s_m | m_1, \sigma_1^2)}{P_0(s_1, s_2, \dots, s_m | m_0, \sigma_0^2)} \quad (3)$$

정상적인 센서에 대해서 이 비율값은 감소하게 되어 최종적으로는 지정된 한계값 $A < 0$ 에 도달하게 되며, 고장이 발생한 센서에 대해서는 이 값은 증가하게 되고 지정된 한계값 $B > 0$ 에 도달하게 되며 이때에 고장이 발생하였다는 결정이 내려지게 된다.

어떤 센서가 정상상태에 있는가 또는 고장상태에 있는가를 결정하기 위해서 사용되는 한계값 A 와 B 는 그 설정지에서 거짓 고장확률과 찾지 못한 고장 확률을 각각 α , β 라 하면 Wald에 의해서 제안된 아래 식(4), (5)를 이용하여 각각 계산된다.[2]

$$A = I_n \frac{\beta}{1-\alpha} \quad (4)$$

$$B = I_n \frac{1-\beta}{\alpha} \quad (5)$$

LLR값은 매 샘플링 순간에 새롭게 계산되고 위의 식(3)을 순환형 절차로 바꾸면 다음식(6)과 같이된다.

$$\lambda_m = \lambda_{m-1} + \ln \left[\frac{P_1(S_m | m_1, \sigma_1^2)}{P_0(S_m | m_0, \sigma_0^2)} \right] \quad (6)$$

윗식(6)을 바이어스고장과 잡음고장으로 분류하여 LLR의 형태로 단순화시킨 다음과 같다. 즉, 단지 바이어스 또는 평균값고장을 검정하기 위해서는 σ_1^2 과 σ_0^2 을 같게 놓으면 되고 정상적인 센서에 대해서 센서 오차의 평균값(m_0)은 이론적으로 0(Zero)이 되어야 된다. 이와 같이 단순화시킬 수 있는 내용을 이용함으로써, 다음 식 (7)이 바이어스 고장탐지에 대해서 유도된다.

$$\lambda_m = \lambda_{m-1} + \frac{m_1}{\sigma^2} (S_m - \frac{m_1}{2}) \quad (7)$$

식 (7)은 바이어스 드리프트와 일정한 바이어스오차 모두를 감지하기 위하여 이용되며, 신호에서 잡음준위를 감지하기 위해서는 m_1 과 m_0 를 같게 놓음으로써 잡음고장에 대한 LLR은 다음식 (8)과 같이된다.

$$\lambda_m = \lambda_{m-1} + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sigma_0^2} - \frac{1}{\sigma_1^2} \right] S_m^2 + \ln \left[\frac{\sigma_0}{\sigma_1} \right] \quad (8)$$

2.3. 고장검출 알고리즘

바이어스 드리프트와 일정한 바이어스 형태의 고장을 탐지하기 위해서는 GCC와 SPRT의 조합이 필요하다. GCC는 신호의 추정값 \hat{X}_m 을 제공하고 SPRT는 고장을 식별하고 격리하기 위하여 \hat{X}_m 을 이용하며 GCC는 각 샘플링 순간에 센서사이의 상대적인 일치도에 대한 정보를 제공해 준다. 즉, GCC와 SPRT 알고리즘이 신호검증시스템에 대한 결정 및 추정기모듈을 구성하고 있으며 GCC는 매번의 샘플링에서 추정값 \hat{X}_m 을 계산하고 SPRT는 GCC가 신호의 추정값을 발생하자마자 곧 매

샘플링에서 LLR을 계산한다.

따라서, 센서오차 S_m 이 각각의 센서에 대해서 계산되고 LLR 값 즉, λ_m 값이 식 (7)을 이용하여 각 센서에 대해서 계산된다. 만일 계산된 λ_m 이 0(Zero)보다 작다면 센서는 정상인 센서로 평가된다. 그러나 만일 λ_m 값이 0(Zero)보다 크다면 이 값은 식 (5)에 의해서 규정된 한계값 B 와 비교되고 만일 λ_m 이 B 값을 초과한다면 그 λ_m 에 해당되는 센서에서 바이어스 고장이 발생하였다는 결정이 내려진다. 이 시점에서 알고리즘은 다시 초기화되고 위의 절차가 반복된다.

SPRT를 이용하여 잡음고장을 탐지하는 경우, 잡음신호의 평균값은 0(Zero)이 되는 것으로 알려져 있기 때문에 추정값 \hat{X}_m 이 요구되지 않는다. 따라서 SPRT는 GCC에 독립적으로 적용되며, 추정값 \hat{X}_m 은 정의에 의해서 0(Zero)과 같기 때문에 식 (1)에 의해서 정의된 센서의 측정편차는 잡음신호 $X(t_m)$ 과 같게 된다. 그러므로 잡음고장에 대해서 적용되는 수식은 식 (8)의 S_m 을 $X(t_m)$ 으로 바꾸어 이용하면 된다. 이와 같이 수정된 수식을 이용하여 계산된 λ_m 값은 각각 식 (4)와 식(5)에 주어진 한계값 A , B 와 비교되고 만일 λ_m 값이 한계값 B 를 초과하였다면 해당 센서에 잡음고장이 발생하였다는 결정이 내려진다.

3. 고장검출 시스템 및 결과

본 연구에서 제안한 전체적인 센서신호검증 및 고장검출 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 가압경수로형 원자로의 안전주위사고시의 운전변수신호를 이용하였으며, 다중 추정값 내에서 불일치 하는 센서의 탐지와 격리기능을 수행하고 주어진 변수의 검증된 단일 추정값을 출력하는 기능을 갖고 있는 결정 및 추정기의 알고리즘으로서, 일반화된 불일치도기법을 이용하였다. 즉, 직접추정값인 가압기 수위추정값과 신경회로망의 함수 추정 특성으로 출력된 센서의 추정값[4]을 입력으로 하여 최종적으로 결정 및 추정기에서 불일치하는 센서신호의 탐지, 격리 및 검증된 단일 가압기수위 값이 출력되도록 하였으며 GCC기법을 이용하여 검증된 추정값[6,7]이 SPRT 모듈에 입력되어 센서의 고장종류를 판별할 수 있도록 신호검증 및 고장검출시스템을 그림 1과 같이 구성하였다. 따라서 결정 및 추정기에는 센서의 직접추정값과 신경회로망 출력값이 입력으로 인가된다.

이와 같은 입력신호 중에서 내번체 센서에 고장이 발생하였을 경우, 결정 및 추정기의 입력신호는 그림 2와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 내번체 센서에서의 고장은 100초에서 300초 사이에 노이즈에 의한 센서고장으로 모든 신호를 인가하였으며, 신경회로망과 일반화된 불일치도기법 및 순차적 확률비계산기법을 조합한 신호검증 및 고장종류검출 알고리즘에 의한 가압기 수위센서 신호검증 및 고장검출결과는 다음과 같다.

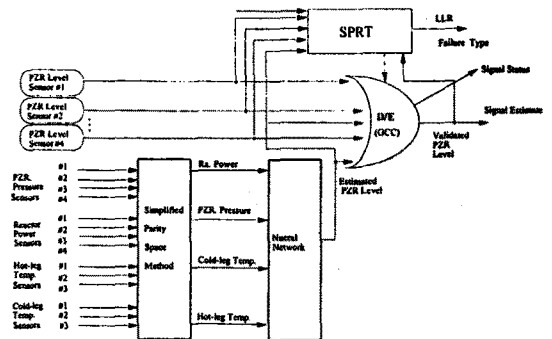


그림 1. 고장검출 및 신호검증시스템 기하도

앞에서 기술한 바와 같이 본 연구에서는 칼만필터를 이용한 추정값 대신에 GCC 방법을 이용하여 계산된 신호의 검증된 추정값은 그림 3과 같고 이와 같은 추정값이 SPRT기법의 입력으로 이용되었으며, 센서의 고장종류를 판별하기 위하여 SPRT기법의 알고리즘에 따라서 계산된 LLR값이 그림 4와 5에 각각 나타나 있다. 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 바이어스고장을 판별하기 위한 LLR값은 마이어스고장을 나타내는 고장한계값을 초과하고 있지 않다. 그러나 잠음고장을 판별하기 위한 LLR값은 나타내고 있는 그림 5에서는 모의된 고장신호 자체가 잠음 신호이기 때문에 센서신호에 잠음신호가 인가된 100초 이후시간부터 LLR값이 계속적으로 증가하여 고장한계값을 초과하고 있으므로 내번재 센서의 고장은 잠음고장으로 확인되었다. 따라서 신경회로망과 GCC 및 SPRT기법을 조합하여 고장이 발생한 센서를 적절히 격리시키고 검증된 추정값을 계산하여 최종적으로는 이 값을 이용하여 고장종류를 식별함으로써 발전소보호 및 제어기기와 운전원의 지시설비에 제공되는 센서신호의 다양성 신뢰성이 향상되어 비정상사고등인 운전원의 조치능력을 향상시킬 수 있고 센서에 대한 초기고장 원인분석등이 쉽게 수행될 수 있으므로 인하여 운전 및 보수요원의 업무부담을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

원전에 적용되는 신호검증 및 고장검출시스템은 센서의 비정상상태를 탐지하여 격리시킨 다음 고장의 종류를 식별하여 최종적으로는 신호를 재구성할 수 있는 능력을 갖고 있어야 한다. 이와 관련하여 본 연구에서는 원자력발전소의 가압기수위 센서 신호를 검증하고 고장종류를 판별할 수 있는 신호검증 및 고장검출 알고리즘을 구현하였으며, 가압경수형 원전의 안전주입사고시의 운전변수자료를 이용하여 제안한 알고리즘의 적합성을 확인한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫번째로 센서신호검증 및 고장검출시스템에 신경회로망의 함수추정특성을 이용하여 다중센서의 직접추정값과는 독립적인 다양성 있는 신경회로망의 검증된 추정값을 추가하고 칼만필터 대신에 일반화된 불일치도기법을 이용한 추정값을 이용함으로써 단일모델에 기초한 추정값보다 더 신뢰성 있는 검증된 추정값을 얻을 수 있도록 하여 신호검증 및 고장검출시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있었다.

두번째로 신경회로망과 일반화된 불일치도기법 및 순차적화확비 계산기법을 통합하여 센서의 고장을 적절하게 탐지 및 격리하여 마이어스와 잠음고장을 판별하고, 최종적으로는 고려된 고장상황에서도 검증된 신호를 재구성할 수 있는 능력이 있음을 보였다.

추후 연구과제로써는 다중센서에서 공통원인고장이 발생하였을 경우의 신호검증시스템의 신뢰성을 향상시키고 고장종류를 식별할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] T. M. Tsai and H. P. Chou, "Sensor Fault Detection with the Single Sensor Parity relation", *Nuclear Science and Engineering*, 114, pp 141-148, 1993.
- [2] A. Wald, *Sequential Analysis*, Dover, New York, 1973.
- [3] B. R. Upadhyaya, "Sensor failure detection & estimation", *Nuclear Safety*, Vol. 26, No. 1, pp. 32-43, Jan.-Feb. 1985.
- [4] 오 성현, 김 대일, 김 건중, "페리디공간기법과 신경회로망을 이용한 원전공정변수추정", *대한전기학회 논문지*, 43권 7호, pp. 1169-1177, 1994. 7.
- [5] Asok Ray, Mukund Desai, John Deyst, "Fault Isolation in a Nuclear Reactor by Sequential Testing", *Proceeding of 17th Intersociety Energy Conversion Engineering IEEE Conference*, Los angeles, pp 1306-1311, 1982.
- [6] 오 성현, 김 대일, 김 건중, "원전 가압기수위센서 신호검증에 관한 연구", *대한전기학회 논문지*, 44권 4호, pp. 502-507, 1995. 4.
- [7] Sung H. Oh, Dai I. Kim, Kern J. Kim, "Sensor signal validation method of nuclear power plants using the neural network and inconsistency index", *Topical Proceeding of the 40th American nuclear society annual meeting*, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 459-466, June 1995

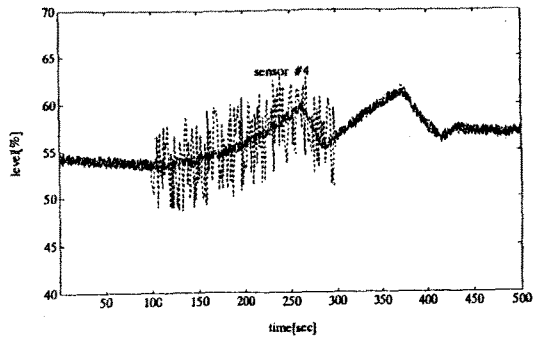


그림 2. 신호고장검출 및 검증시스템의 입력신호

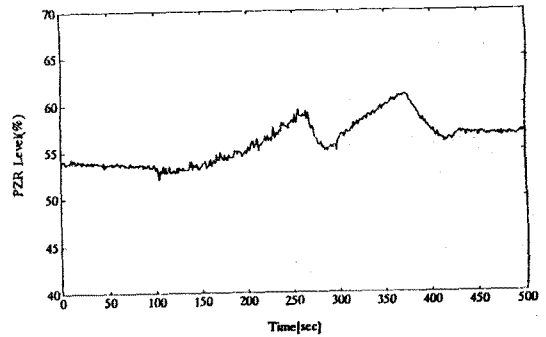


그림 3. 신호검증시스템의 최종추정값

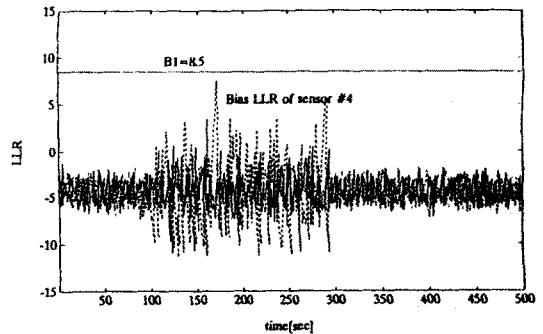


그림 4. 마이어스 고장검출에 대한 LLR 값

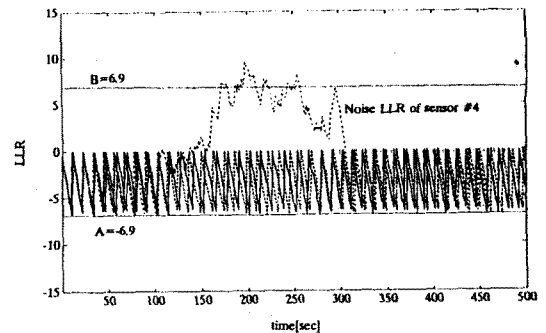


그림 5. 잠음 고장검출에 대한 LLR 값