단순화된 패리티 공간기법을 이용한 원전 다중센서 신호검증

°오성헌*, 김대일*, 주운표*, 정윤형*, 류부형*, 임장현*, 김건중**
* 한국원자력안전기술원 ** 충남 대학교

Redundant Sensor Signal Validation of Nuclear Power Plants Using the Simplified Parity Space Method

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

ABSTRACT

The function estimation characteristics of neural networks can be used for sensor signal validation of a system. In case of applying the neural networks to signal validation, it is a important problem that the redundant sensor signals used as a input signal of neural networks should be validated. In this paper, we simplify the conventional parity space method in order to input the validated signal to the neural networks and also propose the sensor signal validation method, which estimates the reliable sensor output combining neural networks with the simplified parity space method. The acceptability of the proposed signal validation method is demonstrated by using the simulation data in safety injection accident of nuclear power plants.

1. 서 론

센서신호검증은 발전소의 운전요원과 자동제어기기에 신뢰성 있는 정보를 제공하기 위하여 다중 또는 기능적으로 다양한 센서로부터 오는 정보를 통합하여 검증된 신호를 제공해 주는 기법을 말한다. 이와같은 신호검증은 발전소제어 및 보호계통 입력신호는 물론이고 컴퓨터화된 발전소의 운전원 지원시스템의 개발 및 이용에 있어서도 필수적인 요소이다. 따라서 운전원 및 자동제어기기에 필요한 정보를 제공하는 센서신호를 검증하여 사용하면 잘못된 센서정보의 이용을 배제하므로써 발전소 보호계통에 대한 불필요한 부담과 발전소 정지고장을 감소시켜 발전소의 안전성 및 이용률을 향상시킬 수 있다.

원자력분야에 적용된 기존의 신호검증기법은 다중성기법, 제한치점검기법, 계측기루프 건전성점검 및 교정기법등이 있다.[1] 그러나 최근에는 지금까지 사용하고 있는 하드웨어 다중성을 탈피하여 계산속도와 신뢰성의 입장에서 커다란 개선을 이룬 컴퓨터기술을 바탕으로 하는 소프트웨어 다중성을 이용한 해석적기법들이 주류를 이루고 있으며, 이들 방법은 공정 또는 계통을 수학적으로 모델링하여 입,출력측정치로 부터 출력 또는 변수의 참값을 추정하고 계측센서의 고장을 탐지하는 방법들이 제시되고 있다. 그러나 정확한 모델의 개발은 계통의 복잡성이나 비선형특성 때문에 정확한 변수추정이 어려운 실정이다.[2] 따라서 어떤 시스템의 해석적 모델화가 필요없는 신경회로망을 이용하여 원하는 계통을 모델링할 수 있으며 원전센서 신호검증분야에 이용될 수 있다.[3]

이와같은 신경회로망을 센서신호검증에 이용하는 경우의 중요한 문제는 신경회로망의 입력신호로 제공되는 신호는 검증된 신호여야 된다는 점이다. 이와같은 측면에서 본 논문에서는 신경회로망 입력신호로써 다중센서의 평균값을 사용하는 대신에 기존의 패리티 공간기법을[4] 단순화하여 신경회로망의 입력신호가 이 알고리즘을 통하여 검증된 후 신경회로망에 입력되어 신뢰성 있는 센서출력값을 추정하도록 하는 센서신호 검증방법을 제안하고 이 방법의 타당성을 입증하기 위하여 가압경수형 원전의 가압기 저압력에 의한 안전주입 사고시의 모의 운전데이타를 이용하여 검증하였다.

2. 센서신호 검증방법

2.1. 단순화된 패리티 공간 기법

신호검증에 사용되는 패리티 공간 기법의 기본 개념은 프로세스 변수중 어느 한 변수의 다중 측정 벡터로부터 패리티 벡터를 계산하여 측정 오차항만을 포함하도록 하여 이상채널을 검출해서 신호를 검증 하는것이다. 센서신호에 이상이 없으면 패리티 벡터는 영(zero)에 접근하고 나머지 신호는 건전한 것으로 판단한다. 그러나 기존의 패리티 공간기법은 센서신호의 이상유형에 따라 각 센서측정값에 대한 패리티벡터의 크기 및 방향을 결정하게 되고 이상이 발생되어 앞단계에서 제거된 센서와 이에 대한 고장정보등을 포함해야 되므로 알고리즘이 복잡하게된다. 그러므로 이 방법을 신경회로망의 입력신호를 검증하는데 이용하기 위해서는 단순화 시킬 필요성이 있다. 따라서 기존의 알고리즘을 단순화시킨 패리티 공간기법을 고려하였으며, 그림1에서 보는 바와 같이 이 방법에서 패리티벡터를 계산하는 과정은 기존의 알고리즘과 같다. 그러나 본 논문에서는 패리티 공간 알고리즘을 센서검증의 최종 결정/추정기로 이용하는 것이 아니고 단순히 다중 센서신호에서 고장이 발생한 신호를 제거하고, 건전한 센서신호만을 이용하여 검증된 신호가 신경회로망의 입력으로 이용될 수 있도록 하는 것이 목적이다. 따라서 고장신호를 격리시키기 위하여 패리티공간에서 각각의 측정신호방향에 수직인 직교패리티벡터(Orthogonal Parity Vector)의 크기를 계산하고 이 값과 고장설정값(δ_ℓ)를 비교한다. 이 경우에 있어서 순간적인 잡음스파이크에 의한 의사(Spurious)고장 등을 고려하기 위하여 측정신호의 직교패리티 벡터값이 설정값보다 적은 횟수를 계산하여 이값이 정해진 횟수를 초과하면 해당센서를 격리시키고 나머지 건전한 센서신호들을 이용하여 신경회로망의 입력신호를 계산하였으며, 단순화된 패리티공간 알고리즘의 내용은 다음과 같다.

1) 측정값 $m_1, m_2, \ldots m_\ell$ 의 값을 얻는다.

2) 잉여값(Residual)을 식(1)에 따라 계산한다.

$$\eta_i = m_i - \frac{1}{\ell}\sum_{i=1}^{\ell} m_i \qquad (1)$$

3) 직교 패리티 벡터를 식 (2)와 같이 계산한다.

$$P^2_{1j} = \sum_{i=1}^{\ell}\eta_i^2 - \frac{\ell}{(\ell-1)}\eta_j^2 \qquad (2)$$

4) 이상센서를 검출하는 과정은 다음과 같다.

. 가장 큰 P^2_{11}가 설정값 δ_ℓ보다 적으면 모든 센서가 건전한 것으로 판단한다.

. $P^2_{11} > \delta_\ell$이고 $P^2_{12} < \delta_\ell$이면 나머지 센서가 모두 고장인 것으로 판단한다.

. 만약 센서가 $\ell = 4$ 개라고 가정할 때 $P^2_{\perp 1} > \delta_\ell$, $P^2_{\perp 2} > \delta_\ell$, $P^2_{\perp 3} > \delta_\ell$이고 $P^2_{\perp 4} < \delta_\ell$이면 $P^2_{\perp 4} < \delta_\ell$에 해당되는 센서 한개만 고장인 것으로 간주한다.

. 만약 모든 직교패리티 벡터가 $P^2_{\perp i} > \delta_\ell$을 만족한다면 패리티 벡터중 가장 작은 것을 제거하고 다시 같은 시간스텝내에서 센서신호를 추정하게 된다.

5) 센서신호의 추정값은 건전한 센서신호의 평균값을 사용한다.

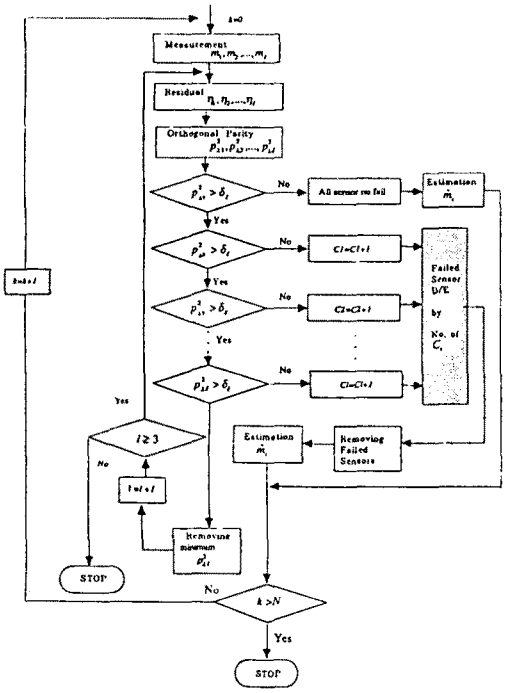

그림 1 단순화된 패리티공간 알고리즘 Flow Chart

2.2 신경회로망을 이용한 신호검증

기존에는 필요한 변수값을 추정하기 위하여 처리하고자 하는 시스템을 수학적 해석을 통한 모델을 사용하였으나[4] 해결하고자 하는 문제에 비선형 특성이 많이 포함되어 있거나, 시스템 함수가 시변일 경우, 또는 불확실한 정보가 많이 포함되어 있는 경우 기존의 방법으로는 시스템의 모델을 구하기는 매우 어렵다. 그러나 신경회로망은 대규모 병렬처리, 비선형특성 및 적응학습등의 장점을 가지고 있어 복잡한 특성과 구조를 갖는 시스템에 대해 상세한 정보 없이도 입, 출력 데이타 만으로 학습과정을 통하여 그 특성과 구조를 근사화할 수 있으므로 시스템의 모델링에 이용할 수 있다.[5,6] 따라서 다층구조의 신경회로망은 입력과 출력데이타로 그 시스템을 식 (3) 과 같이 근사화할 수 있다.

$$y = w_o + \sum w_i \phi_i(x_i, ..., x_m) \qquad (3)$$

여기서, w_i, w_o : 가중치,

ϕ_i : 비선형 함수,

$x_i, ..., x_m$: 입력패턴.

식 (3)과 같이 임의의 함수를 근사화 할 수 있는 개념을 토대로 신경회로망를 이용하여 임의의 시스템 함수를 근사화 할 수 있기 때문에 센서신호를 검증하는데 있어서 하나의 계통변수를 추정하는데 이용이 가능하며, 원자력발전소의 센서검증분야에 적용될 수 있다. 신경회로망을 센서검증에 적용하는 경우 일반적으로 잘 알려진 역전파학습 알고리즘을 살펴보면 다음과 같다.

일반적인 순방향 신경망회로에서 출력층 및 은닉층에 대한 오차는 식 (4), (5)와 같다.[7] 즉,

$j=L$에 대한 출력층 오차신호는 다음 식(4)과 같고

$$e_{pLk} = f'(y_{pLK})(o_{pk} - x_{pLK}) \qquad (4)$$

은닉층에 대한 오차신호는 식 (5)와 같다.

$$e_{pjk} = f'(y_{pjk}) \sum_i (e_{pj+1,i}\, w_{j+1,k,i}) \qquad (5)$$

여기서, $f'(y_{pjk})$: 비선형함수 $f(y_{pjk})$ 의 미분함수,

o_{pk} : 목표값,

x_{pjk} : 비선형함수의 출력값,

y_{pjk} : 각 뉴런으로부터의 합,

p, j, k : 각각 패턴, 층 그리고 뉴런노드를 나타낸다.

t 번째 학습 시간에 대한 뉴런의 가중치에 대한 갱신식은 식 (6)과 같다.

$$w_{jki}(t+1) = w_{jki}(t) + \mu\, e_{pjk}\, x_{pj-1,i} \qquad (6)$$

여기서, μ : 학습률을 나타낸다.

전체적인 학습알고리즘은 다음과 같다.

1) 각 뉴런층의 가중치값을 랜덤하게 초기화 시킨다.
2) 학습데이타를 네트워크에 입력시킨다.
3) 식 (4), (5)에 의해 오차신호를 계산한다.
4) 식 (6)에 의해 뉴런의 가중치 w_{jki}를 갱신한다.
5) 수렴하지 않으면 2)번에서 다시 학습시킨다.

3. 가압기 수위 센서 검증에 대한 모의실험 결과

가압기를 포함한 원자로 냉각재계통에는 가압기압력,수위 및 냉각재온도를 측정하는 여러개의 다중센서가 설치되어 있으며, 원전 과도상태 운전시 가압기수위와 압력은 원자로의 출력이 증가하면 일시적인 냉각재의 온도감소를 가져와 원자로 냉각재의 체적이 줄어 들게되어 감소하게되고, 출력감소시에는 이와는 반대현상이 나타난다. 따라서 원자력 발전소 가압기 수위는 원자로 출력, 가압기 압력, 냉각재 고온관 및 저온관 온도와 서로 밀접한 상관 관계를 갖고 있으므로 이와같은 변수의 함수로써 표시할 수 있다.[8]

가압기 수위센서 신호는 가압기 수위제어계통의 제어신호 및 원자로 보호계통의 원자로 정지신호로 이용되고 있기 때문에 가압기 압력신호와 함께 발전소 안전운전에 있어서 중요한 신호정보로써 이용되고 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 전체적인 센서신호검증 알고리즘의 타당성을 입증하기 위하여 가압경수로형 원자로의 가압기 살수밸브의 열림으로 인한 안전주입사고시 발생한 과도신호를 이용 하였다. 가압기 수위센서 검증을 위한 신경회로망 구성에 있어서 가압기 수위가 위에서 언급한 4개변수의 함수이므로 입력층의 뉴런수는 4개로 정하였고 출력층은 가압기 수위센서의 출력값을 추정하는 것이므로 1개의 뉴런을 갖도록 구성하였으며, 중간층의 층수와 뉴런수는 각각 1개와 15개로 정하였다. 이와같이 구성된 신경회로망에 그림 2에서 보는바와 같이 신경회로망에 입력되는 각 센서신호들의 신뢰성을 확보하기 위하여 단순화된 패리티 공간 알고리즘을 사용하여 신경회로망의 입력신호를 검증하고 이와같이 검증된 신호를 신경회로망의 입력변수로 이용하여 신경회로망을 학습시키면 신경회로망이 보다 신뢰성있는 신호를 추정할 수 있다. 4개의 프로세스변수에 대한 하나의 예로써 그림 3a에서 보는 바와 같이 4개의 가압기 압력센서중 1개의 센서(1번센서)에 고장이 발생하였을 경우, 이에 상응하는 직교패리티 벡터는 그림 3b와 같이 계산되었으며, 여기에서 제일 적은 값을 갖고 있는 1번센서를 제거하고 건전한 3개의 센서를 이용하여 검증된 가압기 압력값을 계산하였다.

안전주입 사고시의 과도상태동안 가압기 수위신호와 함수관계를 갖고 있는 나머지 다중센서신호에 대해서도 이와 같은 검증과정을 수행하였으며, 가압기 수위신호의 추정에 이용된 입력센서신호는 그림 4와 같다. 이와 같이 단순화된 패리티 공간기법을 이용하여 검증된 입력신호로써 신경회로

망의 입력층에 들어오는 원자로 출력,가압기 압력, 냉각재 고온관 및 저온관 온도값을 이용하여 역전파 학습알고리즘에 따라 신경회로망을 학습시키면 신경회로망의 함수추정 특성의 결과로써 그림 5에서 보는 바와 같이 파도 운전상태에서도 신경회로망은 가압기 수위 센서값을 근사하게 추정하였다. 따라서 신경회로망을 정상상태는 물론 파도상태의 프로세스변수를 추정하는 데에도 이용할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 발전소의 다중센서 신호검증에 단순화시킨 패리티공간 기법과 신경회로망을 적용하고 가압경수로형 원전의 사고모의 데이타를 이용하여 신경회로망을 학습시킨 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 신경회로망과 단순화시킨 패리티공간기법을 이용한 센서신호검증 알고리즘을 제안하고, 이 알고리즘을 다중센서 출력신호에 적용하여 센서출력에 잡음신호가 포함되어 있는 고장의 경우에도 이를 검증하여 신뢰성 있는 검증된 단일 입력신호를 신경회로망 학습에 이용할 수 있음을 보였다.

2) 단순화된 패리티 공간 기법 알고리즘을 통하여 다중센서신호의 검증된 출력값을 신경회로망에 입력하여 원자력발전소 안전주입사고시의 파도상태 가압기 수위값을 신경회로망을 이용하여 추정한 결과, 신경회로망의 추정값은 센서측정값과 근사하게 일치하였다. 따라서 신경회로망을 정상상태는 물론 파도상태의 프로세스 변수를 추정하여 센서신호 검증에 이용할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

1. S. M. Divararuni, Bill K-H, "Signal Validation Techniques and Power Plant Applications", Ann. Nucl. Energy, Vol.22, No.3, pp.181-211, 1988.
2. B. R. Upadhyaya, "Sensor Failure Detection & Estimation", Nuclear Safety, Vol. 26, No. 1, pp. 32-43, Jan.-Feb. 1985.
3. 오 성헌외, "원자력발전소 개량형 계측제어계통의 신뢰도 평가", KINS/AR-161, pp.79-90, 한국원자력안전기술원, Dec. 1992.
4. J. C. Deckert, "On-line Power Plant Signal Validation Techniques Using P-S Representation and Analytic Redundancy", EPRI NP-2110, Nov., 1982.
5. K. Hornik, "Approximation Capabilities of Multi-feedforward Networks", Neural Network, Vol.4, pp. 251-257, 1991.
6. P. D. Wasserman, "Neural Computing: Theory and Practice", Van Nostrand Reinhold, NY, 1990
7. Robert Scalero, et al, "A Fast Algorithm for Training Feedforward Neural Networks" IEEE Signal Processing Vol. 40, No. 1, Jan, 1992.
8. K. E. Holbert, B. R. Upadhyaya, "Development and Testing of an Integrated Signal Validation System for Nuclear Power Plants", NE/37959-34, Sept , 1989.

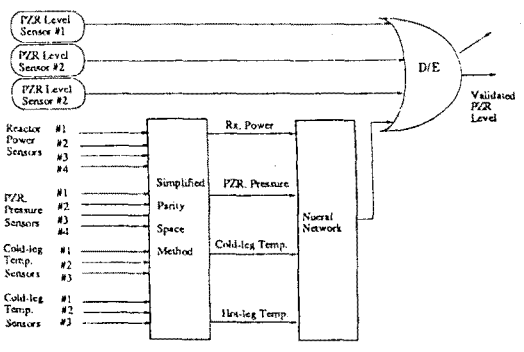

그림 2 가압기 수위센서 검증 시스템 개략도

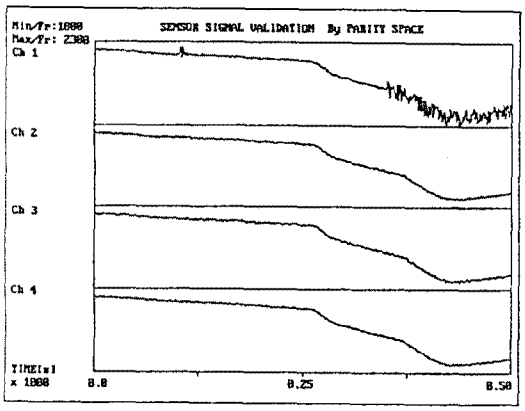

그림 3a 가압기압력 센서 #1 고장시 센서신호

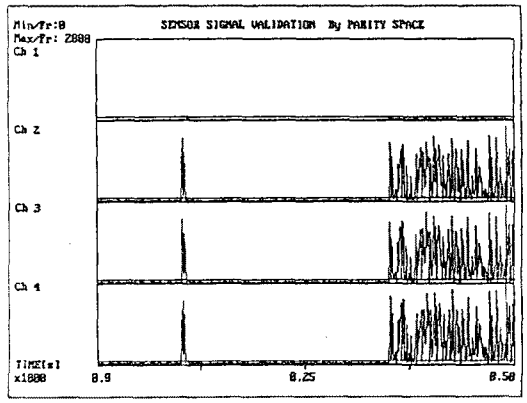

그림 3b 가압기압력 센서 #1 고장시 직교 패리티벡터

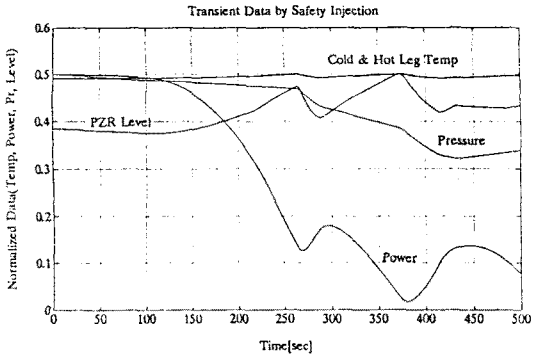

그림 4 가압기 수위신호 측정을 위한 입력신호

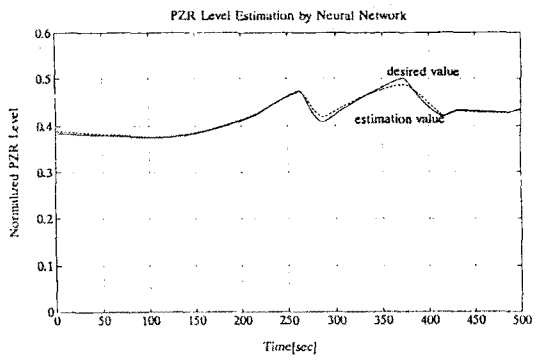

그림 5 신경회로망에 의한 가압기수위 신호 학습결과