

SMART 계측제어계통을 위한 실시간 신호검증알고리즘 개발

성승환, 김동훈, 이철권, 서용석, 박희운
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART 계측제어계통 측정신호의 신뢰성을 높이기 위한 실시간 신호검증알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 선행고장검출행렬, 아날로그 신호용 다중성 기법, 접촉신호용 논리표 알고리즘, 주파수 신호용 다중성 기법 그리고 아날로그 센서 검증을 위한 통계적 모듈의 5개 모듈로 구성되어 있다. 선행고장검출행렬은 측정 신호 중에서 고장의 가능성이 있는 신호를 추출하여 선정된 신호만을 적절한 알고리즘으로 검증하도록 함으로써 전체적인 수행시간을 감소시킨다. 아날로그 신호검증 모듈은 아날로그 측정신호에 대한 물리적/해석적 다중성에 입각하여 고장신호의 크기, 위치를 검출하며, 접촉신호 검증 모듈은 접촉신호들간의 논리값을 비교하여 발생 불가능한 논리값을 가지는 신호를 고장신호로 검출한다. 주파수신호는 아날로그 신호와 유사한 기법을 구현하였으며, 통계적 모듈은 아날로그 센서 자체의 물리적 건전성을 검사하는 모듈이다. 현재 SMART의 설계가 확정되어 있지 않으므로 개발된 신호검증알고리즘을 시험하기 위해서 여러 주요 공정변수가 표현되는 상용 원자로의 냉각재계통을 대상으로 검증 알고리즘을 구현하였으며, 운전모사기로 모사된 신호를 이용하여 개발된 신호검증알고리즘을 시험하였다. 시험결과 각 모듈 별로 적절히 고장을 검출함을 보였다.

1. 서론

SMART에서 측정값이 잘못된 경우에 정상적인 운전 및 제어가 힘들게 되며 특히 주요 공정변수의 값이 잘못 판독되는 경우에는 안전성의 저해요소가 된다. 이와 같은 문제점을 SMART에서 해결하기 위하여, 다중의 센서나 주위의 물리적인 연계성이 있는 센서의 측정값을 최대한 활용하

여 측정 신뢰도를 높이고 또한 중복되는 신호 채널의 수와 측정값의 표시기 개수를 줄일 수 있는 신호검증 기술의 개발이 요구된다. 본 논문에서는 SMART 측정신호의 신뢰성을 높이기 위한 실시간 신호검증알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 선행고장검출행렬, 아날로그 신호용 다중성 기법, 접촉(contact)신호용 논리표 알고리즘, 주파수 신호용 다중성 기법 그리고 아날로그 센서 검증을 위한 통계적 모듈의 5개 모듈로 구성되어 있다.

측정된 신호는 먼저 선행고장검출행렬에 의해서 검사되고 고장의 가능성이 있는 신호만이 신호 종류에 따라 적절한 모듈을 통해 검증된다. 고장 가능성이 있는 신호만이 구체적인 검증알고리즘을 거치게 되므로 모든 입력신호를 검증하는데 소요되는 계산시간을 감소시켜 실시간 신호검증이 가능하다. 아날로그 신호를 검증하기 위해서 물리적 혹은 해석적 다중성^{[1][2]}에 근거한 불일치도 검사에 의해 고장 신호를 검출하는 다중성 기법을 개발하였다. 각 신호간의 물리적 연관관계에 의한 해석적 다중성은 최소제곱법에 의한 다항식으로 표현하였다. 접촉신호를 위해서 논리표에 구성된 논리값의 불일치도에 의해서 고장 신호를 검출하는 논리표 알고리즘을 개발하였다. 접촉 신호만으로 완전한 논리표가 구성되지 않는 경우에는 관련되는 아날로그 신호값으로부터 적절한 논리값으로 근사하여 논리표를 구성한다. 주파수 신호를 위해서 아날로그 신호와 유사하게 불일치도에 근거한 다중성 기법을 개발하였다. 또한 아날로그 센서의 물리적 건전성의 변화를 탐지하기 위하여 통계적 검증 알고리즘을 개발하였다.^[3] 통계적 알고리즘은 표본으로 추출된 신호의 평균과 표준편차 각각의 차이에 대한 확신도, 첨도와 왜도의 차이를 검사하는 4개의 세부 모듈로 구성되어 있다.^[4]

현재 SMART의 설계가 확정되어 있지 않으므로 개발된 신호검증알고리즘을 시험하기 위해서 여러 주요 공정변수가 표현되는 상용 원자로의 냉각재계통을 검증 알고리즘을 구현하기 위한 대상으로 선정하였다. 또한 개발된 알고리즘을 시험하기 위해서는 운전자료가 필요하나 이를 확보하기는 어려우므로 본 연구소에서 보유하고 있는 영광 3,4호기 운전모사기의 자료를 이용하여 시험자료를 생성하였다. 시험 절차는 운전모사기를 이용하여 시험자료를 생성하고 고장의 발생, 크기, 위치를 탐지하는 지의 여부를 확인하는 방법으로 수행하였다. 시험결과 정상운전시에 발생한 고장에 대하여 고장의 발생, 크기, 위치에 대한 실시간 탐지가 가능하였다.

2. 신호검증알고리즘

개발된 실시간 신호검증알고리즘의 전체적인 흐름은 그림 1과 같다. 먼저 선행고장검출행렬은 모든 신호를 입력으로 받아 고장의 발생 가능성이 있는 신호를 선정한다. 선정된 신호의 종류에 따라 적절한 검증 알고리즘 모듈로 이동하며 고장 가능성이 있는 신호가 선정되지 않으면 통계적

검증 모듈에서 처리된 후에 다음의 입력신호 취득 단계로 이동한다. 각 모듈의 세부적인 내용은 다음과 같다.

2.1 선행고장검출행렬 모듈

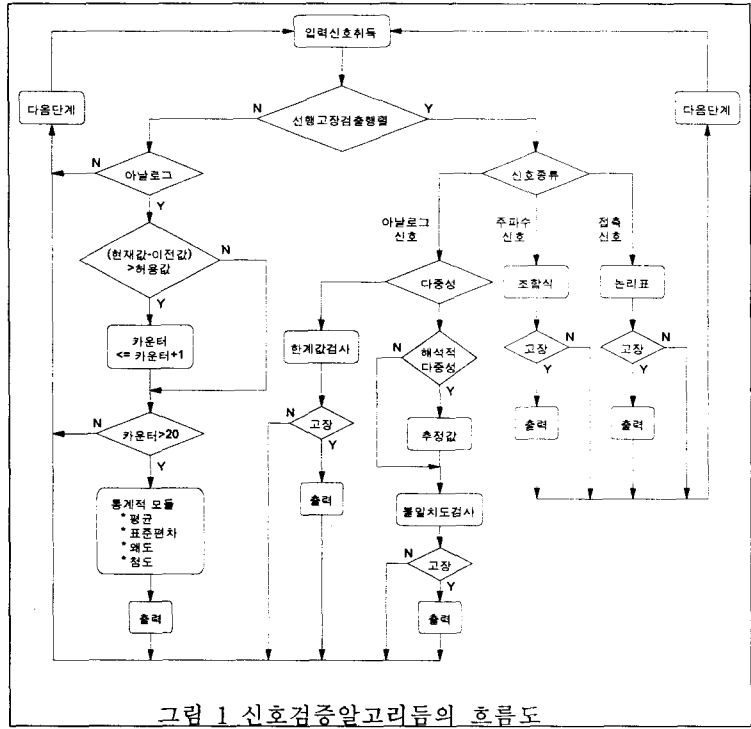


그림 1 신호검증알고리즘의 흐름도

측정 신호를 가장 먼저 검증하는 부분으로서 SMART의 운전은 사고 상황을 제외한 정상상태에서 여러 운전 조건이 있으므로 특정 운전 조건에서 각 신호의 측정값은 거의 결정되어 있다. 따라서, 특정 운전조건에 맞는 측정값을 행렬 형태로 만들고 각 원소값과 측정값을 비교하여 그 편차가 주어진 한계값을 넘어서면 일단 고장의 가능성이 있는 것으로 판정하고 적절한 신호검증 모듈을 실행한다. 일종의 패턴인식에 해당하는 것으로서, 고장 가능 신호를 정상운전 중의 패턴과의 차이에 의하여 탐지하기 위함이다.

이와 같은 고장 가능성 판별모듈은 실시간으로 운전되어야 하는 SMART 계측제어시스템의 특성상, 건전한 신호와 고장 가능성이 있는 신호를 분리하여 필요한 신호검증 모듈만을 실행함으로써, 신호검증에 요구되는 계산시간을 최소화할 수 있는 장점이 있다.

2.2 아날로그 신호 검증 모듈

아날로그 신호 검증 모듈은 측정신호의 다중성에 따라 불일치도 검사 모듈과 한계값 검사 모듈로 구성되어 있다. 다중성은 해석적 다중성과 물리적 다중성으로 구분되는데 물리적 다중성은 센서 자체가 여러 개로 구성되어 있는 것을 의미하며 해석적 다중성은 측정센서는 2개 이하이지만 측정신호간의 물리적 연관관계에 의해 해석적으로 다중성이 확보되는 것을 뜻한다. 예를 들면 고온관의 온도는 가압기의 서지(surge) 온도와 열출력과 밀접한 관련이 있는 신호이므로 고온관

의 온도는 위의 두 신호를 이용한 추정값으로 표현이 가능하다. 본 논문에서는 최소제곱근사에 의해 측정신호의 추정값을 계산하였다. 다중성이 확보되는 경우에 현대적인 신호검증 모듈은 패러티 공간법을 들 수 있으나, 본 연구에서는 선행고장검출행렬을 통하여 이미 고장의 가능성이 있는 계측신호를 선정하였으므로 패러티벡터^[2]와 같은 복잡한 알고리즘을 거치지 않고 단순한 불일치도 검사만으로도 고장이 없는 신호와의 편차에 의하여 고장신호의 크기와 위치 판별이 가능하다. 다중성이 확보되지 못하는 측정 신호에 대해서는 한계값 검사에 의한 검증만을 수행한다.

2.3 접촉 신호 검증 모듈

접촉 신호는 모두 접점(on,off) 신호이므로 통계적인 모듈이나 최소제곱법에 의한 해석적 다중성을 확보하기 어려우며 대부분의 신호가 물리적 다중성이 없으므로 불일치도 검사에 의한 신호 검증도 불가능하다. 본 연구에서는 접점신호의 검증을 위하여, 넓게는 해석적 다중성이라고 볼 수 있는 논리표에 의한 신호검증 기법을 개발하였다. 하나의 기기에 대한 개폐신호가 동시에 측정될 수 없다는 등의 사실에 근거하여, 논리표 상으로 이루어 질 수 없는 신호조합이 입력되는 경우를 점검하여 측정신호의 고장유무를 판단한다. 그런데 접촉신호만으로 완전한 논리표가 구성되지 않는 경우에는 관련되는 아날로그 신호의 변화를 이용하여 논리표를 구성할 수 있다. 예를 들면, 냉각제펌프의 차압이 일정하게 유지되고 있는 냉각제펌프의 동작신호가 Off 상태라고 측정되면 접촉 신호의 고장임을 판별할 수 있다.

2.4 통계적 신호 검증 모듈

센서의 성능저하, 드리프트와 같이 서서히 진행되는 고장을 판별하기 위한 모든 아날로그 센서에 적용하는 신호검증 모듈이다. 아날로그 센서의 물리적 특성은 가우시안 분포를 따르는 것으로 알려져 있으므로 가우시안 분포에 대한 표본 공간의 평균차이, 분산차이, 왜도와 첨도의 기준값과 측정값의 편차로 센서의 고장유무를 판단할 수 있다.

통계학적 검증모듈의 경우 센서의 고장 유무를 판별하기 위한 한계값은 고장 미검출 확률, 고장 오검출 확률에 의해서 결정되어야 한다. 대상 신호의 중요도, 운전상의 변화, 열유체적인 특성에 따라 그 한계값이 달라질 수 있으므로 성능이나 안전 해석 결과에 의해 결정되어야 한다. 본 연구에서는 한계값을 도입하기보다는 통계의 추정 및 검증 모듈에서 유의 수준을 고장발생의 확신도로 환산하여 신호 검증의 결과로 나타내었다. 또한 전체적인 효율성을 높이기 위하여 각각의 입력단계에서 통계적 모듈을 수행하는 것이 아니라 현재값과 이전값의 차이가 없는 경우에 카운터(counter)를 설계하여 카운터가 20이상인 경우에만 통계적 모듈이 수행되도록 하였다.

2.5 주파수 신호 검증 모듈

주파수 신호는 접촉 신호기술을 이용하여 펌프의 속도를 측정하지만, 그 특성상 아날로그 신호의 특성도 함께 갖고 있으며 각 펌프마다 두 개의 속도 측정기를 가지고 있으므로 물리적 다중성을 확보하고 있다. 그러나 이종의 측정값으로 고장의 위치까지 판별할 수 없으므로 냉각재펌프 차압이 유지되고 있는 경우는 주파수가 유지된다고 가정하여 주파수의 편차를 계산하는 주파수 신호 검증 기법을 개발하였다.

3. 신호검증알고리즘의 시험

개발한 신호검증 기술을 시험하기 위해서는 실제 운전 자료가 필요하다. 특히 해석적 다중성을 확보하기 위한 공정변수의 최소제공법에 의한 추정기의 설계시, 고장 없이 정상적으로 운전된 운전자료가 필요하다. 실제 운전자료는 확보의 어려움이 있어 본 연구소가 보유한 영광 3,4 호기 운전모사기를 이용하여 운전 자료를 확보하였다.

원자로냉각재계통으로부터 추출한 294개의 공정입력신호 모두를 대상으로 하여 각 신호별 검증 기법에 따라 수행하였다. 시험은 운전모사기를 이용하여 정상적인 운전자료를 확보하고, 신호검증을 위한 임의의 고장 입력 시나리오를 작성하여 고장의 발생, 크기, 위치를 판정하는 지의 여부를 확인하는 방법으로 모든 측정 신호에 대한 검증을 수행하였다. 검증 결과는 반복되는 내용이 많으므로 대표적인 몇 가지 경우에 한정하여 다음과 같이 나타내었다:

- (1) 아날로그 신호검증 시험 결과 중 일부를 표 1에 나타내었다. 추정값이 나타난 경우는 해석적 다중성이 확보된 측정 신호이며 넓은 열출력 범위에 걸친 검증 결과이다.
- (2) 표 2는 가압기 수위 측정 신호에 대한 통계적 신호검증 시험의 결과로써 여기서 확신도는 고장의 발생가능성을 나타내는 항목으로 평균이나 표준편차가 다를 확률을 의미한다.
- (3) 접촉 신호검증은 아날로그 신호검증과는 달리, 가정된 논리적 조합에 의한 신호만이 검증 가능하다. 접촉신호 검증 결과중 대표적인 경우를 표 3에 나타내었다.
- (4) 주파수 공정입력 신호검증 시험은 냉각재펌프 1A의 주파수신호의 기준값은 1190일 때 측정값을 각각 1190, 1090으로 주고 “냉각재펌프 1A 주파수 신호(#2) 고장”을 탐지함을 시험하였다.

4. 결론

본 연구에서 개발된 신호검증알고리즘은 운전모사기로 모사된 측정값들에 대해 아날로그 신호, 접촉 신호, 주파수 신호, 통계적 검증 기법이 모두 다 적절한 응답을 보이고 있음이 증명되었다. 특히 복잡한 이론의 도입이나 시스템 모델링으로 인한 계산 시간을 최소화시켜 최대한 빠른 시간 내에 고장을 검출할 수 있어 실시간 요건을 만족할 수 있다. 그리고 일반적인 방법론이므로

SMART 설계가 확정되면 바로 적용이 가능하며 신호 검증을 위한 추가적인 설비나 센서가 요구되지 않는 장점도 있다. 그러나 해석적 다중성의 확보와 관련하여 운전이력의 요구, 설계자의 판단이 요구되므로 이를 극복할 수 있는 연구가 추후 요구된다.

표 1 아날로그 신호검증 결과

신호 이름	열출력	기준값(추정값)	측정값	고장 판별 내용
가압기 온도	100.0	343.5(343.5)	355.5	가압기 온도 이상
저온관 온도	99.0	296.5℃	299.2	저온관 온도 루프2 (제어) 고장
고온관 온도 (루프 2)	96.5	326.4 (326.5)	320.4	고온관 온도 루프 2 이상
가압기 온도	94.0	344.5 (343.4)	333.4	가압기 온도 이상
냉각재 펌프 1A 차압 #2	91.0	7791.7 (7792.2)	7000.7	냉각재 펌프 1A 차압 (#2) 고장
가압기 살수 온도 #1	88.0	296.8 (296.7)	310.8	가압기 살수 온도 (#1) 고장
냉각재 펌프 2B 전류량	84.0	260.4 (261.3)	200.4	냉각재 펌프 (2B) 전류량 이상
가압기 서지 온도	69.0	331.1 (330.9)	341.1	가압기 서지 온도 이상
원자로 용기 차압 #3	64.0	3663.9	3000.0	원자로 용기 차압 (#3) 고장

표 2 통계적 신호검증 결과

신호 이름	열출력	기준값 (평균,표준 편차,왜도,첨도)	측정값	출력 내용
가압기 수위	100	52.6 1.0 0.0 0.263	52.4 0.263 0.040 0.095	확신도 = 40.0 확신도 = 100.0 왜도차이 = 0.030 첨도차이 = 0.168

표 3 접촉 신호검증 결과

신호 이름	열출력	기준값	측정값	고장판별 내용
냉각재펌프 1A	100.0	0 0 0 1 0 0	1 0 0 1 0 0	냉각재펌프 1A INOP 고장
O'ring leak monitor	100.0	0 0 0	0 1 1	O'ring leak monitor불일치(NFC/NFO)
가압기 비례전열기 P2	76.0	0 0 0 1 0	1 0 0 1 0	가압기 비례전열기 (P2) INOP 고장
가압기 보조전열기 B2	59.0	0 0 1 0 0	0 0 1 1 0	가압기 보조전열기 (B2) ON 고장

5. 참고문헌

1. M.Frank, "Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-based Redundancy-A Survey and Some Results," Automatica Vol. 26, pp 459-474, 1990.
2. 신용철외, "고장검출 및 Fault Tolerance," KAERI/AR-361/92, 한국원자력연구소, 1992
3. B.R.Upadaya and T.W.Kerlin, "Development and Testing of an Integrated Signal Validation System for Nuclear Power Plant," DOE/NE/37959-34, 1989.
4. 김우철외, 현대통계학, 영지문화사, 1990.