

원전 계측 채널 Drift에 관한 연구

김인환 · 김형택 · 김윤중
한국수력원자력(주) 중앙연구원

(2014년 5월 30일 접수, 2014년 9월 11일 수정, 2014년 9월 15일 채택)

A Study on the Drift Effect of Instrument Channel for Nuclear Power Plant

In Hwan Kim · Hyeong Taek Kim · Yun Jung Kim

Korea Hydro & Nuclear Power Company, Central Research Institute

(Received 30 May 2014, Revised 11 September 2014, Accepted 15 September 2014)

요약

원자력발전소의 원자로보호계통 및 공학적안전설비계통의 계측채널 설정치는 발전소 안전성을 확보하는 데 있으며, 출력조건의 변화시에는 보호계통의 작동이 보장되어야 한다. 본 연구에서는 발전소 운영자료, 시방서 및 운전 매뉴얼등을 사용하여 설정치를 평가하는 데 불확실도의 중요한 요소인 계측기와 process rack drift의 적절성을 확인하고, 설정치 여유가 부족할 경우에 대한 대책을 연구하였다.

Abstract - The Instrument Channel setpoints of the Reactor Protection System(RPS) and the Engineered Safety Feature Actuation System(ESFAS) ensures the safety of Nuclear Power Plants (NPPs), and the actuation of the protection system should be guaranteed on power change condition. The goal of this study is to verify the appropriateness of the sensor drift and rack drift which are important factors for setpoints evaluation and to improve the setpoints margin using the operation data, design specifications and operation manuals of the NPPS.

1. 서 론

발전소 출력조건이 변화하면 변화된 출력 조건에서도 보호계통이 적절하게 작동할 수 있음이 확인되어야 한다. 이를 위해서는 계통의 안전해석값(Safety Analysis Limit), 보호계통설정값(Nuclear Trip Setpoint) 및 총 채널 불확실도(Channel Statistical Allowance)를 사용하여 보호계통 설정계통의 설계여유도를 계산한다. 본 연구에서는 발전소 안전분석용 총 채널 불확실도 평가 방법을 기술하고, 불확실도 요소중의 하나인 drift에 대해 검토하고 운전에서 따른 실제적인 영향을 평가하였다.

각 계측채널의 총 채널 불확실도를 합성하는 기본 방법론은 제곱합의 제곱근(Square Root of the Sum of Square : SRSS)[3] 기법을 사용한다.

$$CSA = \pm \sqrt{PMA^2 + PEA^2 + SRA^2 + SCA^2 + SD^2 + SPE^2 + STE^2 + SMTE^2 + RCA^2 + RMTE^2 + RTE^2 + RD^2 + EA + BIAS} \quad (1)$$

여기서

- 1) PEA : Primary Element Accuracy
- 2) PMA : Process Measurement Accuracy
- 3) Sensor Accuracy
 - SRA : Sensor Reference Accuracy
 - STE : Sensor Temperature Effect
 - SCA : Sensor Calibration Accuracy

[†]To whom corresponding should be addressed.
Korea Hydro & Nuclear Power Company, Central Research Institute
Tel : 042-870-5253 E-mail : kiminh@khnp.co.kr

- SPE : Sensor Pressure Effect
- SMTE : Sensor Measurement & Test Equipment
- SD : Sensor Drift
- 4) Rack Accuracy
 - RCA : Rack Calibration Accuracy
 - RTE : Rack Temperature Effect
 - RMTE : Rack Measurement & Test Equipment
 - RD : Rack Drift
- 5) EA : Environmental Allowance
- 6) BIAS : bias

2. drift 평가

2-1. 부취제 및 LPG 연료의 조성

계측채널의 불확실도는 drift 인자를 포함하고 있는데, 이는 발전소 운전기간 동안 시간에 따른 출력값의 원하지 않는 변화를 의미한다. 시스템의 drift 검출 능력은 drift 유형에 따라 다르며, 계측기의 drift 값은 일반적으로 제작 시방서나 운전 매뉴얼에 제공된다.

2-1 drift 유형

2-1-1 zero shift drift

zero shift는 drift유형의 약 45~50%를 차지하며,

계측기의 영점이 변화되고 영점으로부터 교정곡선이 shift되는 drift 유형이다. zero shift의 변화에 의해서만 센서의 drift가 발생한다면 검출위치에 관계없이 감지될 것이다. 그림 2-1은 zero shift drift[1]의 특성을 보여준다.

2-1-2 span shift drift

span shift는 drift유형의 약 20~25%를 차지한다. 원하는 span에 대한 계측기 span의 변화가 발생하는 계측기 drift 유형으로, 계측기 span의 어느 지점에서는 교정점내에 있지만 다른 지점에서는 교정범위 밖에 있다. span shift는 Forward span shift형과 Reverse span shift형이 있으며, Span shift의 변화에 의해서만 센서의 drift가 발생한다면 위치에 따라 drift가 감지될 수도 없을 수도 있다. 그림 2-2는 span shift drift[1]의 특성을 보여준다.

2-1-3 combination of zero and span shift

combination of zero and span shift는 drift 유형의 약 15~30%를 차지하며, zero와 span shift에 의해 동시에 변화하는 drift 유형이다. 이 유형은 검출위치에 관계없이 drift를 더 잘 감지할 것이다. 그림 2-3는 combination of zero and span shift[1]의 특성을 보여준다.

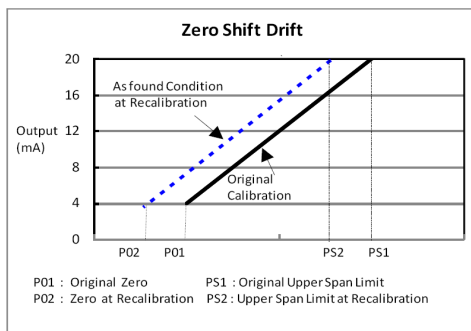


Fig. 2-1. Zero shift drift

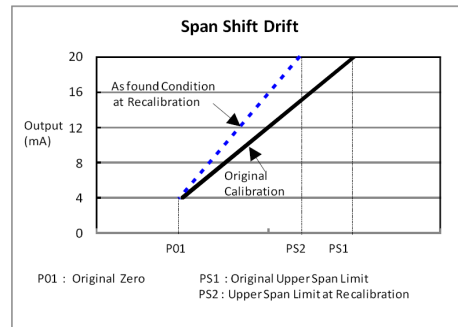


Fig. 2-2. Span shift drift

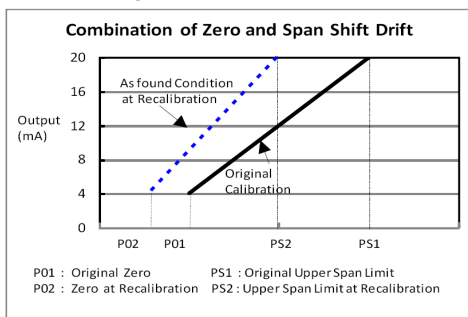


Fig. 2-3. combination of zero and span shift

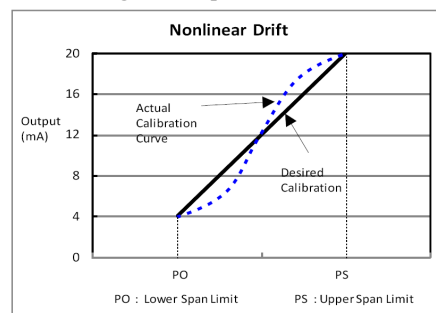


Fig. 2-4. Nonlinear drift effect

2-1-4 nonlinear drift

nonlinear drift 유형은 상대적으로 드물며 약 5%를 차지하는 데, zero shift, span shift 또는 combination of zero and span shift가 분명하지 않은 유형을 말한다. 이 유형은 검출위치에 따라 drift를 감지한다. 그림 2-4는 nonlinear drift[1]의 특성을 보여준다.

2-1-5 single outlier

single outlier 유형은 nonlinear drift 유형의 특별한 경우로써 한지점이 다른 지점에 비하여 매우 큰 값을 나타낸다. single outlier는 대부분의 경우 자료입력 또는 복사 오류로써 나타나는 것으로서, single outlier에 대한 물리적인 설명은 표현할 수 없다.

2-2 drift 평가 방법

drift는 일정한 기간동안 변화되는 값으로써 제작자 시방 매뉴얼이나 운전자 매뉴얼에 제공되나 정확한 설정값 분석을 위해서는 제공된 값보다는 계산된 drift 값을 사용한다.

drift는 원자력 발전소 안전계통의 계측채널 교정 자료를 사용하여 계산하며, drift 분석을 위해 span point의 교정값의 as-found minus as-left (AFAL) 값에 의한 방법을 사용한다. 즉 sensor 또는 rack의 연속된 교정동안 직전의 상태로부터 벗어난 값이 drift를 의미한다.

$$Drift_i = \frac{AF_i - AF_{i-1}}{span} \quad (2)$$

여기서

$Drift_i$: i 와 i-1 교정 사이의 drift

AF_i : i 번째 교정시의 값(As-found value)

AL_{i-1} : i-1 번째 교정시의 값(As-left value)

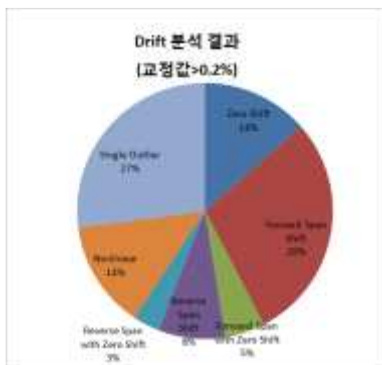


Fig. 3-1. drift 유형 분석결과

Table 3-1. 계측기 및 교정자료

계측기	계측기 수량	Drift 자료*
가압기 수위	4	1,2,3**
가압기 압력	6	1,3,4
원자로냉각재 유량	9	1,3,4
증기발생기 수위	15	2,3,4
증기관 압력	9	3,4,5
주증기 유량	6	3,4,5
주급수 유량	6	3,4,5

*예방보수기간

**분석에 사용된 자료기준

3. drift 평가 결과

3-1 계측기 drift 평가

본 연구를 위해 울진 원자력발전소 원전 보호계통으로부터 안전관련 계측기 교정자료를 55개 계측기에 대해 연속 3번씩의 교정자료를 수집하여 분석하였으며, 각 자료는 5지점(계측기 사용범위의 0, 25, 50, 75, 100%)에서 교정된다. 표 3-1은 분석에 사용된 계측기 수와 drift 자료 수집근거, 그림 3-1은 교정자료를 분석한 계측기의 drift 유형을 나타낸다.

그림 3-1에 나타난 바와 같이 교정결과 drift값이 0.2%를 초과하는 경우에 Forward span shift이 가장 많고 Reverse span with zero shift 이 가장 적었다.

그러나 교정자료의 약 36% 정도만 drift 0.2%를 초과하고, 대부분의 경우 95%신뢰수준에 95%확률로 운전주기 동안 제작자 매뉴얼에 표기된 기준값 이내에서 운전됨이 확인되었다.

그림 3-2에서 3-8은 연속적인 예방보수시의 교정 자료를 기준으로, 각 계측기의 drift 값과 추세를 보이기 위해 예시로 나타내었다.

제작자 시방서에서와 같이 drift는 30개월 동안



Fig. 3-2. 가압기 압력 계측기 drift



Fig. 3-3. 가압기 수위 계측기 drift

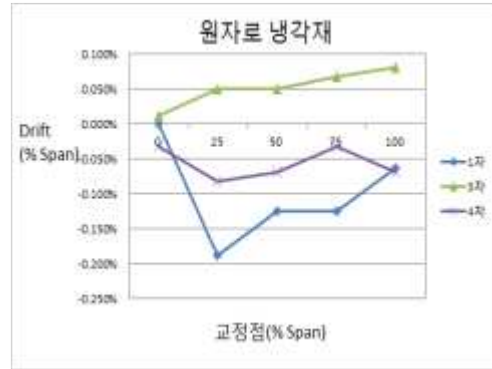


Fig. 3-4. 원자로 냉각재 유량 계측기 drift

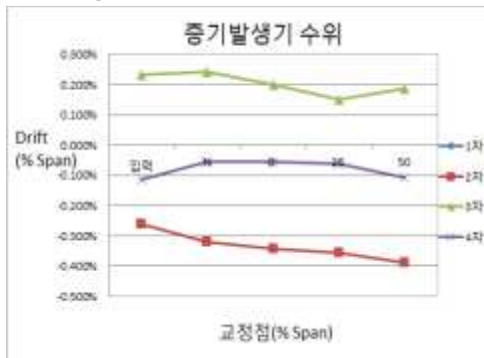


Fig. 3-5. 증기발생기 수위 계측기 drift

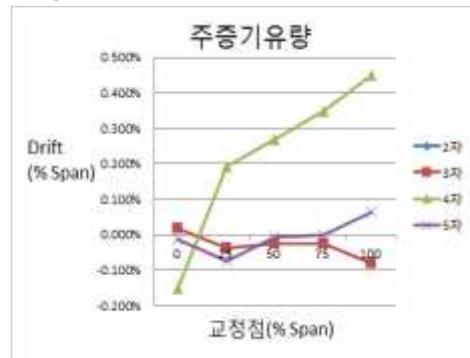


Fig. 3-6. 주증기 유량 계측기 drift



Fig. 3-7. 증기발생기 압력 계측기 drift



Fig. 3-8. 주급수 유량 계측기 drift

Table 3-2. 계측기 drift 제한값

계측기	단위	URL	span	0.2% URL
가압기 수위	bar	206.84	69.98	0.59
가압기 압력	bar	1.87	0.38	0.97
원자로냉각재 유량	bar	1.87	0.74	0.51
증기발생기 수위	bar	1.87	0.27	1.38
증기관 압력	bar	206.84	85.01	0.49
주증기 유량	bar	1.87	0.88	0.42
주급수 유량	bar	1.87	0.72	0.52

0.2% URL와 같이 제한되므로 URL(Upper Range Limit)은 계측기 span으로 재계산 되어야 한다, 그러나 drift가 시방서의 기간내에서 제한값 이내이므로 교정기간은 보정하지 않았다.

$$\text{Drift}_{\text{제한값}} = 0.2\% * \text{URL} / \text{span} \quad (3)$$

여기서

Drift_{제한값} : 재계산된 계측기 drift 제한값

그림 3-4에서 3-8에서 볼 수 있듯이 주증기 압력과

주증기 유량의 일부 drift 자료 외에는 대부분 0.2% URL을 만족한다. 교정 자료 drift 분석 결과 운전 주기동안 95%신뢰도에서 95% 확률로 drift한계치를 만족하는 것으로 나타났으며, pass 확률계산은 아래와 같다.

$$P_f = \frac{x}{n} \quad (4)$$

여기서

P_f : 고장 확률

x : 성공 또는 실패 요건을 초과할 값의 수

n : 총 집단 크기

$$P = 1 - P_f \quad (5)$$

$$P_l = P - Z \times \sqrt{\frac{1}{n} \times P \times (1 - P)} \quad (6)$$

$$P_u = P + Z \times \sqrt{\frac{1}{n} \times P \times (1 - P)} \quad (7)$$

여기서

P_l : 요건을 통과할 최소 확률

P_u : 요건을 통과할 최대 확률

Z : 희망 신뢰 수준에서의 표준 정규분포값,

$z = 1.96$ for 95% 신뢰수준[1]

3-2 rack drift 평가

대부분의 총 채널 불확실도의 불확실도 인자는 제작자 시방서, 운전 매뉴얼 등에 정의되어 있지만 rack의 drift는 process rack 설계시방서에 정의되어 있지 않아서 Westinghouse사에서는 설치지 분석을 위해 일반적인 값으로 0.5%를 사용한다.

본 연구를 위해 울진 원자력발전소의 예방보수 기간동안 보호계통으로부터 안전관련 계측기에 대한 7번 연속 교정자료를 수집하여 분석하였으며, 표 3-3은 계측기 수와 drift자료 수집 근거, 그림 3-9은 process rack의 교정 개념을 나타낸다.

process rack 교정자료로는 bistable의 설정치를 사용하였으며, 이것은 위의 그림 3-10 및 3-11에 나타난 바와 같이 특정 유형을 가지지 않아 rack drift 유형 분석은 불가능하였다. 그림 3-10과 3-11과 같이 모든 교정 자료를 사용하여 drift를 분석한 결과 운전 주기동안 95% 신뢰도에서 95% 확률로 0.5% drift한계치를 만족하는 것으로 나타났으며, 여유도 개선을 위한 대책으로 분석 결과 0.35%에 대해서도 95% 신뢰도에서 95% 확률로 만족하는 것으로 분석되었다.

Table 3-3. process rack 및 교정자료

계측기	Bistable 수	Drift 자료*
가압기 수위	12	1,2,3,4,5,6**
가압기 압력	64	1,2,3,4,5,6
원자로냉각재 유량	36	1,2,3,4
원자로냉각재 온도	42	1,2,3,4
증기발생기 수위	132	1,2,3,4
증기관 압력	96	2,3,4
주증기 유량	36	2,3,4
격납건물 압력	28	1,2,3,4
핵연료재장전수탱크 수위	20	1,2,3,4

*예방보수기간

**분석에 사용된 자료기준

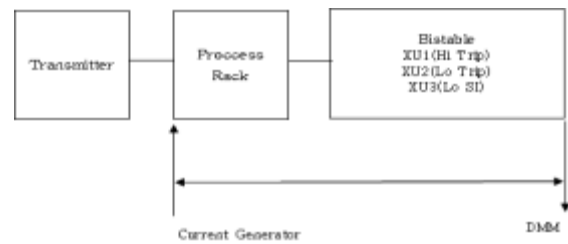


Fig. 3-9. process rack의 교정 개념

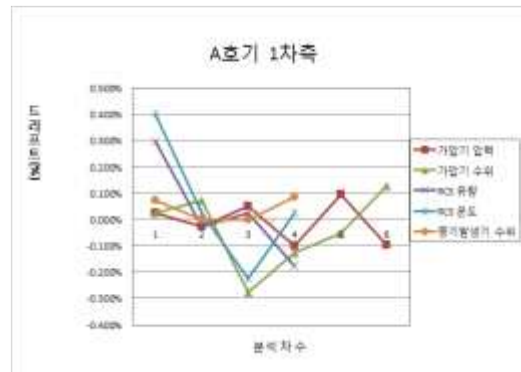


Fig. 3-10. 1차측 process rack drift

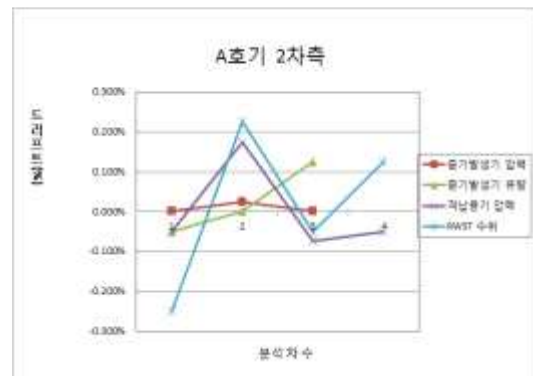


Fig. 3-11. 2차측 process rack drift

4. 결 론

계측기 drift 유형 분석결과 drift가 0.2%를 초과하는 조건에서 span shift drift와 nonlinear drift가 많은 부분을 차지했고 reverse span with zero shift이 가장 적은 값을 나타냈으며, process rack은 drift 유형 분석을 할 수 없었다.

계측기 설정치 분석시 불확실도 계산에 있어서 95%신뢰수준을 만족하는 drift보다 큰 2.0%를 적용하는 것은 보수적이며, rack drift는 95%신뢰수준에 95%확률로 설정치 분석시에 일반적으로 사용하는 0.5%를 만족하며, 여유도 개선을 위해 0.35%까지 사용할 수 있음을 확인하였다.

References

1. On-Line Monitoring of Instrument Channel Performance, Volume 3: Applications to Nuclear Power Plant Technical Specification Instrumentation, EPRI : 2004.12. 1007930.
2. Modern Statistics for Business and Economics Using Microsoft Excel Rev 2, Bumjo Park, 2003.
3. Setpoints for Nuclear Safety-Related Instrumentation, May 2006, ISA, ISA-RP67.04.01-2006
4. Methodologies for the Determination of Setpoints for Nuclear Safety-Related Instrumentation, January 2000, ISA, ISA-RP67.04.02-2000