

원자로냉각재펌프 정지신호 다중화 변경에 대한 신뢰도평가

이은찬, 지문구, 배연경

한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

Reliability Evaluation of Reactor Coolant Pump Trip Signal Redundancy

Eun-Chan Lee, Moon-Goo Chi, Yeon-Kyoung Bae

Korea Hydro & Nuclear Power Co., Nuclear Engineering & Technology Institute

Abstract - 원자력발전기술원은 발전정지 관련계통 제어캐비닛 내에 장착된 제어용 기기들의 다중화 설계변경 활동을 지원하고 관련 기기의 배선상태 등의 육안점검을 통해 취약성 여부를 최종 확인하기 위하여 국내 Westinghouse형 원전 계측제어 캐비닛 점검을 수행하였다. 또한 관련 설계변경에 대한 신뢰도평가 기술지원도 함께 수행하여 해당 설계변경이 설비의 신뢰도 향상에 효과가 있는지를 정량적으로 평가하고자 하였다.

이에 따라 원자로냉각재펌프(RCP, Reactor Coolant Pump) 제어 채널의 다중화 개선에 대하여 설계변경 전후의 기기 배열 변화에 따른 계통 신뢰도 변화를 대표유형 기기의 고장률에 근거하여 분석하였다. 고장수목을 이용하여 설계변경 전후의 RCP 고장정지로 인한 발전정지를 유발하는 고장조합을 도출하고, 고장정지 확률 변화를 정량화 하였다. 또한 기기 보호 측면에서 펌프 보호를 위한 신호를 출력하지 못하는 경우를 정량화하여 이를 비교하였다.

1. 서 론

고장시 발전소를 정지시킬 수 있는 취약 기기의 다중화 설계변경 대상 기기들 가운데 기기냉각수(CCW, Component Cooling Water) 서지탱크 저수위 및 RCP 모터 베어링 냉각기의 기기냉각수 저유량으로 인한 RCP 정지 신호를 출력하는 제어회로를 평가하였다. 평가 대상 회로는 크게 현장 입력부와 논리부, 현장 출력부로 나뉘며, 1개 기기의 고장만으로도 RCP를 정지시킬 수 있는 취약한 설계를 가지고 있다. 과거 국내 Westinghouse형 원전에서 CCW 서지탱크 저지 수위로 인한 RCP 정지가 발생한 경험이 있으며, 관련 전자회로기판 정비 절차를 개정하는 등 단기적 조치를 취한바 있다. 이러한 취약 회로의 다중화 설계변경으로 오신호 발생에 의한 RCP 정지를 유발시킬 수 있는 가능성을 크게 저감할 수 있게 되었으며, 관련 변경내용에 대한 신뢰도 평가를 수행하여 발전소 이용률과 기기 보호의 관점에서 본 설계변경에 문제가 없음을 뒷받침 하였다.

2. 본 론

2.1 제어루프 구성 기기의 신뢰도데이터 평가

원자로냉각재펌프 정지신호 다중화에 사용된 기기는 논리용 전자회로기판 및 제어용 접점이 포함된 모듈형 계전기이며, 표 1의 고장률을 적용하여 평가를 수행하였다. 기기의 고장률값은 국내 원전의 고유데이터[1]를 사용하였으며, 이 값은 해외 일반데이터[2]에 국내 고장정험을 배이지만 처리하여 계산하였다.

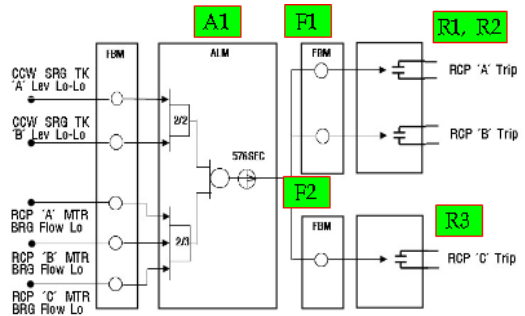
〈표 1〉 설계변경 대상기기의 고장모드 및 고장률 데이터

기기명	고장모드	고장률	고장확률	비고
M(Logic Card)	Fail to Operate	7.83E-8	6.86E-4	Relay의 고장확률을 점점 고장확률로 적용
R(Relay Contact)	Fail to Open/Close	5.00E-7	4.38E-3	

2.2 RCP 정지신호 다중화 평가 결과

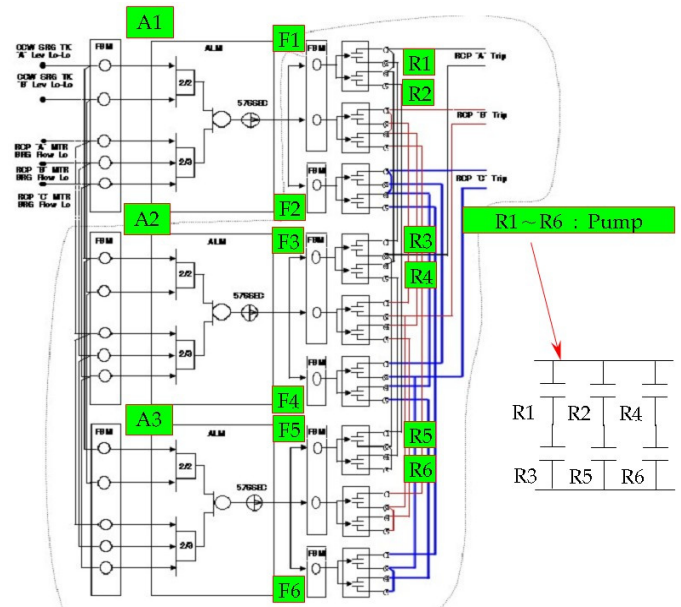
그림 1에 있는 RCP 정지회로의 개선 전 회로는 RCP 보호를 위해 입력되는 현장의 아나로그 입력을 1장의 ALM 전자회로기판에서 2/3 논리로 처리하여 계전기(Relay)의 각 개별 접점으로 출력, RCP를 정지시키도록 한다. 따라서 개선 전 회로에서는 전자회로기판이나 계전기의 단

일 고장에 의한 RCP 정지 위험이 존재하였다. 즉, ALM, FBM, 계전기의 단일 고장에도 RCP 정지에 의한 발전소 정지가 발생도록 설계되어 있다.



〈그림 1〉 RCP 정지회로(개선 전)

설계변경으로 다중화된 개선 후 회로는 논리 처리 및 출력 접점을 RCP별로 구분하여 분리하고 각 분리된 접점조를 조합하여 2/3 논리로 출력되도록 하여 전자회로기판이나 계전기의 단일 고장에 의한 RCP 정지 위험을 제거하였다. 신호 입력부 FBM의 경우에는 단일고장에 의하여 출력신호들이 다발적으로 오작동할 확률이 매우 낮은 것으로 판단하여 평가 대상에 포함시키지 않았다.



〈그림 2〉 RCP 정지회로(개선 후)

표 2는 개선 후 RCP 정지회로(그림 2)에 대한 구성 기기들의 고장조합으로서 이러한 다중 고장조합이 발생할 경우에만 RCP 정지로 인한 발전소 정지가 발생할 수 있다.

〈표 3〉 RCP(1대) 정지를 초래하는 기기 고장조합 및 확률(개선 후)

NO	고장조합 확률	기기고장 조합		비고
1	1.92E-05	R4	R6	
2	1.92E-05	R1	R3	
3	1.92E-05	R2	R5	
4	3.00E-06	ALM3	R4	
5	3.00E-06	FBM3	R6	
6	3.00E-06	ALM2	R6	
7	3.00E-06	FBM1	R5	
8	3.00E-06	ALM1	R5	
9	3.00E-06	FBM5	R4	
10	3.00E-06	ALM2	R1	
11	3.00E-06	FBM5	R2	
12	3.00E-06	ALM3	R2	
13	3.00E-06	FBM1	R3	
14	3.00E-06	ALM1	R3	
15	3.00E-06	FBM3	R1	
16	4.71E-07	ALM2	ALM3	
17	4.71E-07	FBM1	FBM5	
18	4.71E-07	ALM1	FBM5	
19	4.71E-07	FBM3	FBM5	
20	4.71E-07	ALM2	FBM5	
21	4.71E-07	ALM3	FBM3	
22	4.71E-07	ALM1	FBM3	
23	4.71E-07	ALM2	FBM1	
24	4.71E-07	ALM1	ALM2	
25	4.71E-07	ALM3	FBM1	
26	4.71E-07	ALM1	ALM3	
27	4.71E-07	FBM1	FBM3	
합계	9.93E-05	-	-	-

표 3은 RCP 정지회로 다중화 개선에 대한 발전소 이용률 관점의 평가 결과를 비교해 놓은 것으로서 개선 전과 개선후의 RCP 이용률비율 차이가 매우 큼을 알 수 있다. (공통원인고장(CCF, Common Cause Failure)은 고려되지 않음)

〈표 4〉 RCP 정지회로 다중화 개선시 이용률비율

구분	개선 전	개선 후	RCP 정지 확률 변화
구성 제어기기 고장시	5.75E-3	9.93E-5	약 57배 감소

표 4는 설비개선에 대한 RCP의 기기보호 관점에서의 이용률비율 변화율 개선 전과 후의 평가 결과로 비교한 것으로서 CCF 미고려시 이용률 관점과 마찬가지로 매우 큰 신뢰도 개선이 이루어짐을 알 수 있다.

〈표 5〉 RCP 정지회로 다중화 개선시 이용률비율

구분	개선 전	개선 후	RCP 1대를 정지시키지 못할 확률 변화
구성 제어기기 고장시	5.75E-3	4.24E-5	약 135배 감소

2.3 공통원인고장(CCF) 평가

2.2항의 평가에서는 다중화 설계변경시 관련 회로의 신뢰도 개선 효과가 매우 큰 것으로 평가되었으나 이것은 공통원인고장(CCF)을 고려하지 않은 결과로서 매우 낙관적으로 분석된 결과로 볼 수 있다. 따라서 다음과 같이 동일 유형 기기간 CCF 확률을 평가하여 회로 이용률비율 분석을 수행하였다. 계통 분석 모델에 공통원인 고장을 반영하기 위해 알파팩터(α Factor) 방법을 사용하였으며[3], 평가된 알파팩터 모델을 CCF 계수로 간략화 하여 고장수목에 적용, 이를 정량화 하였다.

〈표 6〉 Alpha Factors (Generic Demand CCF)

CCCG수(m)	CCF수(k)	Alpha Factor	Values
2	1	α1	9.65E-1
	2	α2	3.53E-2
3	1	α1	9.64E-1
	2	α2	2.40E-2
	3	α3	1.23E-2

〈표 7〉 Alpha Factors (Generic Rate CCF)

CCCG수(m)	CCF수(k)	Alpha Factor	Values
2	1	α1	9.72E-1
	2	α2	2.79E-2
3	1	α1	9.72E-1
	2	α2	1.73E-2
	3	α3	1.05E-2

표 5와 표 6의 알파팩터 값을 사용하여 설비개선 전, 후의 CCCG (Common Cause Component Group) 크기에 따른 CCF 계수를 다음의 식들을 사용하여 계산하였다. 여기서 Qk는 k개의 기기가 동시에 고장을 일으킬 확률, Qt는 전체 시스템 고장확률, Qccf는 공통원인고장으로 인한 시스템 고장확률을 의미하며, m은 CCCG의 크기를 나타낸다.(nk는 k개 기기가 공통원인 고장에 의해 고장나는 사건수를 말함)

$$Q_t^{(m)} = \sum_{k=1}^m \binom{m-1}{k-1} Q_k^{(m)} \dots\dots\dots \text{식 (1)}$$

$$\frac{Q_k}{Q_t} \approx \frac{n_k}{\binom{m-1}{k-1} \sum_{k=1}^m n_k} = \frac{\alpha_k}{\binom{m-1}{k-1}} \dots\dots\dots \text{식 (2)}$$

평가 결과, 표 7과 같이 RCP 정지회로 다중화 개선으로 관련 회로의 고장으로 인해 RCP가 정지될 수 있는 확률이 개선 전에 비해 89.9% 감소될 수 있음을 알 수 있었다.

〈표 8〉 RCP 정지회로 다중화 개선시 이용률비율(CCF 반영)

구분	개선 전	개선 후	RCP 정지 확률 변화
구성 제어기기 고장시	5.75E-3	5.81E-4	89.90% 감소

또한 이것을 RCP 보호관점에서 평가한 결과, RCP 정지회로의 구성 기기 고장으로 인해 RCP를 정지시키지 못할 확률이 개선 전과 비교하여 77.22% 감소됨을 알 수 있었다.(표 8)

〈표 9〉 RCP 정지회로 다중화 개선시 이용률비율(CCF 반영)

구분	개선 전	개선 후	RCP 1대를 정지시키지 못할 확률 변화
구성 제어기기 고장시	5.75E-3	1.31E-3	77.22% 감소

3. 결 론

단일 고장시 발전소를 불시에 정지시킬 수 있는 발전정지유발기와 관련된 제어회로의 다중화 설계변경이 이루어지고 있다. 이러한 기기들 가운데 기기냉각수 서지탱크 저지 수위 및 모터 베어링 냉각수 저유량으로 인한 RCP 정지 신호를 출력하는 제어회로의 설비개선 전, 후 신뢰도 변화를 평가하였다. 그 결과 RCP 정지신호 루프의 다중화로 인해 설비 개선 전보다 개선 후가 이용률 관점 및 기기 보호 측면에서 모두 긍정적인 신뢰도 개선 효과를 보이는 것으로 분석되었다. 즉, 단일 기기 고장으로 RCP가 불시에 정지될 확률과 기기 보호 측면에서 RCP를 정지시키지 못할 확률 모두 크게 저감되는 것이 확인되었다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] KHNP,영광1,2호기 확률론적안전성평가 최종보고서, 2007
- [2] NRC, Reliability Study, NUREG/CR-5500, 1998
- [3] NRC, "CCF Parameter Estimations 2007", updating data for NUREG/CR-5485, 2007