

**원전 지진 위험도 평가를 위한 계전기의 선별기준 분석**  
**Estimation of Relay Screening Criteria for the NPP Seismic Probabilistic Risk**  
**Assessment**

최인길, 박진희, 서정문  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호

**요 약**

원전의 지진위험도 평가 시 내진성능이 매우 큰 것으로 판단되는 계전기는 상세한 지진취약도 분석대상에서 제외한다. 계전기의 내진성능 평가는 대부분 계전기에 대한 검증시험자료, 취약도시험자료 및 경험자료 등을 이용하여 보수적으로 평가한다. 계전기의 극한성능을 평가하기 위해서는 취약도자료가 요구된다. 그러나 대부분의 계전기에 대해 취약도자료가 매우 미미한 실정으로 이들 계전기의 파괴수준을 평가하기는 매우 곤란하다. 지금까지는 대부분 RLE(Review Level Earthquake) 수준에 따라 계전기를 선별제거하고 대체요소를 사용하여 SPRA를 수행하여 왔다. 본 연구에서는 SPRA 및 SMA에서의 계전기 선별제거 기준의 현황을 분석/평가하고 합리적인 선별기준 및 선별제거된 기기의 고려방안을 제시하였다.

**ABSTRACT**

A relay may be screened out in SPRA if the relay chatter capacity is shown to be sufficiently high based upon preliminary bounding calculation. For screened out relays, no further detailed fragility analysis would be performed. Seismic capacity of relay is conservatively estimated based on the dynamic qualification data, fragility data or earthquake experience data. The fragility test data is required for the ultimate seismic capacity of relay. It is very difficult to estimate the fragility level of relays, since the fragility data for relay is rare. In past SPRA's, the relay chatter screening has been performed based on the review level earthquake used in seismic margin analysis(SMA). To account for the capacity level assumed in the screening level an additional element or surrogate element must be added to the SPRA to represent the screened out component. The state-of-the-art review and estimation of relay screening criteria were performed to propose the realistic screening criteria and the procedures for considering the screened out element.

## 1. 서론

원자력발전소의 지진시 안전성을 평가하기 위해 원전 내에 설치된 구조물 및 기기 등에 대한 현실적인 성능 및 응답의 평가를 통한 SPRA(Seismic Probabilistic Risk Assessment) 및 SMA(Seismic Margin Analysis)를 수행한다. 1980년대의 원자력발전소에 대한 SPRA(Seismic Probabilistic Risk Assessment)에서는 계전기(Relay)의 오작동(Chattering)에 대한 분석을 전혀 수행하지 않고 계전기의 오작동 발생 시 운전원에 의해 복구할 수 있는 것으로 가정하였다[1]. 그러나 NRC에 의해 수행된 연구 결과[2] 주요 계전기에 대한 운전원의 복구가 적절히 시행되지 않을 경우 매우 큰 노심손상 유발 확률을 가지는 것으로 나타남에 따라 이에 대한 관심이 크게 고조되었다.

SPRA에서는 계전기에 대해 선별제거방식(Successive Screening Approach)을 사용한다. 그 첫 단계로 안전에 영향을 미치는 모든 계전기에 대한 목록을 작성하고 이들 계전기에 선별기준을 적용하여 단계별로 선별제거하는 방식으로 최종적으로 내진성능이 작고 안전에 영향을 미치는 일부 선별제거되지 않은 계전기에 대한 상세한 취약도 분석을 수행하게 된다.

IPEEE(Individual Plant Examination of External Event) 수행 시 지진에 대한 계전기의 평가절차는 NUREG-1407[3]에 제시되어 있다. 이 절차에 따르면 계전기의 평가 범위를 내진평가의 범위 및 USI A-46 대상 여부에 따라 제시하고 있다. 그러나 SPRA에서 계전기의 선별기준에 대한 정량적인 규정이 제시되어 있지 않으며, 실제 미국에서 수행된 많은 발전소에 대한 SPRA 수행 시 계전기에 대한 취급이 매우 다양한 형태로 나타났다[4]. SPRA 수행에 있어 수많은 계전기에 대해 모두 지진취약도 분석을 수행하는 것은 매우 비효율적이며 비현실적이라고 할 수 있으므로 SPRA의 최종적인 결과인 CDF(Core Damage Frequency)에 미치는 영향이 크지 않은 범위에서 선별제거를 수행하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 원전의 SPRA 수행 시 계전기의 선별제거 기준에 대한 분석을 통하여 현재 적용하고 있는 계전기 선별제거 시의 문제점과 그에 따른 적합한 선별제거 기준 및 선별제거에 따른 조치 방안을 제시하고 한다.

## 2. 계전기의 특성 및 지진위험도에 미치는 영향

### 2.1 계전기의 종류 및 특성

일반적으로 계전기는 발전소의 비정상 상태를 감지, 기기의 작동, 지시, 보호를 위한 기능을 수행한다. 계전기의 종류는 크게 나누어 보호 계전기(Protective Relays)와 보조 계전기(Auxiliary Relays)로 분류할 수 있다. 보호계전기는 배선, 기기 및 전원계통의 단락이나 과부하 등과 같은 기기의 비정상 상태나 위험 상태를 감지하여, 모터, 송풍기, 공기압축기, 발전기 등에 연결된 전기 회로를 연결시키는 스위치, 차단기를 개방시키거나 투입을 방지하여 기기 및 회로를 보호한다. 반면, 보조 계전기는 다른 계전기나 기기의 기능을 보완하기 위해 회로의 보호 계전기의 개방, 닫힘에 따라 작동한다. 발전소에 지진이 발생하여 계전기가 오동작을 일으키게 되면 발전소의 안전정지를 위해 작동되어야 하는 기기 및 계통들이 요구되는 기능을 수행하지 못하기 때문에 발전소의 안전성을 저해시키거나 노심 손상에 도달하는 주요 인자로 작용할 수 있다.

## 2.2 SPRA에서의 계전기 분석

SPSA에서 다루게 되는 계전기 분석은 지진 발생 시에 발전소의 안전 정지 및 사고 결과를 완화시키는데 필요한 계통 및 기기를 확인하고 이들의 기능에 영향을 줄 수 있는 계전기를 선별하여 분석하는 두 가지 과정으로 이루어진다.

일반적으로 SPRA에서 취급하는 안전 정지 및 사고 결과를 완화시키는데 필요한 계통 및 기기는 1단계 내부사건 PSA에서 고려된 계통이나 기기를 분석 대상으로 하며, 지진분석에서 고려되는 계전기는 이들 계통 및 기기의 운전과 관련된 계전기 들을 분석 대상으로 한다. 각 계통 및 기기 운전과 관련된 계전기 확인은 전력공급계통의 설계도면(Single Line Diagram, Electric Circuit Diagram 등)을 통해 확인하며, 선별과정에서 비안전 관련 기능을 수행하거나 기기의 동작과 관련이 없는 계전기는 분석 대상에서 제외시킨다.

발전소 안전정지와 관련되어 분석대상에 포함된 계전기 들은 다시 지진에 대한 내구성 확인 과정을 통해 내진 능력을 보유하지 못하여 지진 발생 시에 손상되거나 오동작을 일으켜 관련 기기의 작동에 영향을 줄 수 있는 계전기들을 최종 선별한다. 선별된 계전기들은 제작사나, 종류별로 분류하여 각 계전기의 설계문서나 내진성능 검증자료 또는 일반자료원을 통하여 내진성능을 확인하고 내진성능이 충분한 것으로 평가된 계전기를 선별하여 제거하고, 그렇지 않은 계전기들은 기기의 최종 취약도계산에 포함시켜 분석을 수행하게 된다.

지진 위험도 분석에서 다루게 되는 계전기는 일반적으로 발전소 안전정지 기능을 수행하는 안전계통에 전원을 공급하는 전원계통에 포함된 계전기들이다. 발전소 안전관련 계통에 전원을 공급하는 전원계통은 4.16kV switchgear, 480V Load Center & Motor Control Center(MCC), 125V DC BUS 및 120V AC Vital BUS로 구성되어 있다. 이들 안전관련 전원계통에 포함된 계전기들은 각 BUS나 MCC 자체의 고장을 감지하여 전원을 차단하는 기능과 각 부하로의 전원공급을 차단하는 기능을 수행한다. 그 외 고장계통의 차단기의 재투입을 방지하는 기능을 수행하고 있다. 이들 계전기의 위치는 국내 표준형 발전소의 경우에는 대부분 지반높이인 100ft에 위치한 Switchgear Room과 동일 높이의 각 Cabinet에 부착되어 있으며, 일부 전동기와 관련된 계전기는 발전소 전지역의 전동기 제어반에 위치한다.

미국의 28개 원전 41기에 대한 SPRA에 수행결과 원전의 노심손상 빈도에 미치는 지배적인 요소로는 전기캐비닛, 탱크, 대체요소(Surrogate Element), 건물 등으로 나타났으며, 계전기 역시 무시할 수 없는 것으로 나타났다[5]. 또한 지배적인 요소에 포함된 전기 캐비닛 및 대체요소는 계전기와 관련되어 있을 수 있으므로 그 영향은 그림 1에 나타난 것에 비해 더 클 것으로 판단된다.

## 3. 계전기의 지진취약도분석

### 3.1 지진취약도 분석 방법

계전기의 지진취약도 분석은 대부분 내진검증시험, 취약도 시험, GERS 및 기기검증 DB 등을 이용하여 수행한다. 계전기의 오작동에 대한 해석적인 평가는 불가능하므로 이들과 같은 실험 및 경험자료에 의존하게 되는 것이다. 계전기의 오작동에 대한 파괴기준은 지진하중 발생 시 계전기의 Chattering이 2ms 이상 발생하는 것으로 규정하고 있다[6]. 노후 원전의 경우 원전에 설치된 각종 계전기에 대한 내진검증 자료가 미비하여 경험자료에 의존하고 있으나 우리나라의 경우 대부분 내진검증시험 결과를 이용하여 취약도 분석을 수행하고 있다.

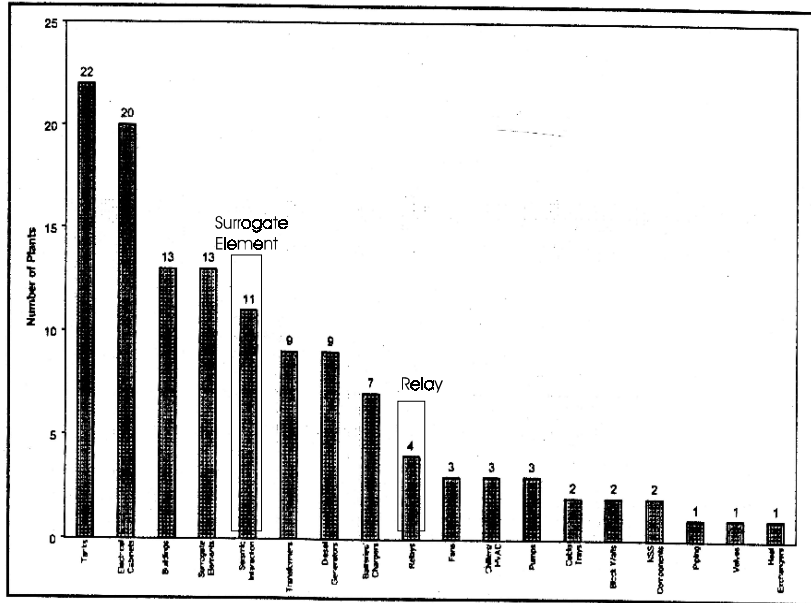


Fig. 1 Dominant Risk Contributor Components Seismic IPEEE

SPRA 수행에 있어 가장 어렵고 논란의 소지가 많은 부분이 특정 시험응답스펙트럼(Test Response Spectrum, TRS)에 대해 기기가 파괴되지 않는다는 것을 보여주고 있는 내진검증시험 보고서를 가지고 있는 기기에 대한 취약도곡선을 작성하는 것이다. 이 경우에는 기기의 최종적인 파괴한계를 추정하기가 매우 어려우며 실험결과의 형태 차이에 의해 취약도해석에 일관성 있게 적용되어야 할 보수성의 수준이 달라지게 된다. 전체 전기캐비닛이 실험된 경우 외에는 전기기기 (즉 relay 또는 contractor) 자체에 대한 실험데이터이며, 이 경우 취약도 해석을 수행할 때는 건물 층에서 기기가 부착된 캐비닛 내에서의 위치에 이르는 운동의 증폭을 포함하여야 한다.

실험에 의해 검증된 기기에 대한 일반적인 취약도 식은 다음과 같으며, 실험 데이터가 기기를 포함한 캐비닛 전체에 대한 것인가 또는 기기 자체에 대한 것인가에 따라 달라지게 된다.

$$A = \frac{TRS_c}{RRS_c} \cdot F_D \cdot F_{RS} \cdot PGA \quad (1)$$

이때 시험에 의해 검증된 기기의 TRS 및 RRS에 대해 시험 방법에 따라 다음의 식을 적용하여 중앙값  $TRS_c$  및  $RRS_c$ 를 산정한다.

Cabinet-Based Test Data	Device Based Test Data
$TRS_c = TRS \cdot C_T \cdot C_I$	$TRS_c = TRS \cdot C_T \cdot C_I$
$RRS_c = RRS \cdot C_C \cdot D_R$	$RRS_c = TRS \cdot C_C \cdot \frac{AF_C}{F_{MS}}$

여기서,

- $A$  : 지반가속도 성능(Ground Acceleration Capacity)
- $TRS$  : 기기의  $TRS$
- $RRS$  : 기기의  $RRS$
- $C_C$  : Narrow-banded 요건에 대한 감소계수(Clipping Factor)
- $C_T$  : Narrow-banded  $TRS$ 에 대한 감소계수
- $C_I$  : 성능증가계수(Capacity Increase Factor)
- $D_R$  : 요건감소계수(Demand Reduction Factor)
- $AF_C$  : 캐비닛의 증폭계수(Cabinet Amplification Factor (Clipped))
- $F_{MS}$  : 변환계수(Multi-axis to Single-axis Conservatism Factor)
- $F_D$  : 광대역 입력에 따른 성능 증가계수
- $F_{RS}$  : 구조물의 응답계수
- $PGA$  : 침투지반가속도

캐비닛 전체에 대한 경우와 기기별 검증을 한 경우의 실험자료에 대한 식의 차이는  $TRS_C$ 와  $RRS_C$ 에서 나타난다. 캐비닛 전체에 대하여 실험한 데이터의 경우  $TRS_C$ 는 기기를 포함하는 캐비닛 전체의 실험에 따른 응답스펙트럼이다. 일반적으로  $TRS$ 는 형태가 광역화되어 있으며 clipping이 필요하지 않으며  $TRS$ 와  $C_I$ 를 곱한 값이  $TRS_C$ 가 된다. 캐비닛에 대한 실험은 주로 광대역 스펙트럼을 사용하거나 광대역진동수 다축  $TRS$  (broad frequency multi-axis  $TRS$ )로 수정하여 기술한다. 그러나 sine-beat나 sine-dwell 실험 등과 같은 narrow-band 입력을 이용하여 주요 관심 진동수폭을 만족하도록 하는 경우도 있다. 이러한 경우에는  $TRS$ 에 대한 clipping이 요구된다. 캐비닛에 대한 실험데이터의 경우 입력 지진에 대한 캐비닛 하부에서의 충응답스펙트럼을 clipping하고  $TRS_C$ 와 비교한다.

캐비닛 실험에 대한  $TRS$ 와는 반대로 계전기와 같이 개별 전기기기에 대한 실험자료에 대해서는 개별 기기실험의 대한  $TRS$ 가 필요하다. 이러한 경우  $RRS_C$ 는 clipping 뿐 아니라 충응답스펙트럼이 캐비닛 내부의 기기 부착위치에 전달될 때의 증폭을 고려하여야 한다.

### 3.2 계전기의 내진성능 평가

계전기의 내진성능을 평가하기 위해서는  $TRS$ 로부터 메디안 성능을 산정하여야 한다. 일반적으로  $TRS$  성능에는 보수성과 변동성이 존재하고 있다. 메디안 성능증가계수  $F_D$ 는 사용된 실험방법에 기초한  $TRS$ 에 존재하는 것으로 판단되는 보수성의 정도에 따라 달라지게 된다. EPRI TR-103959[7]에서는 각종 시험방법과 기기의 종류에 따른 메디안 성능 증가계수를 다음의 표 1과 같이 제시하고 있다.

표 1에서는 세 가지 일반적인 형태의 실험데이터를 포함하고 있다. 첫 번째 형태는 특정한 종류

의 부품 및 기기에 적용하기 위해 개발된 성능응답 파라메타이다. 표 1의 처음 세 가지가 이 실험 데이터 종류에 해당한다. BNL 및 LLNL에서 개발된 전기기기에 대한 HCLPF(High Confidence of Low Probability of Failure) 성능[8,9]이 사용될 경우 계수 1.75를 이용하여 중앙값으로 변환할 수 있다. GERS 성능에서의 보수성은 계전기 및 비 계전기 GERS 성능을 중앙값으로 변환하는데 각각 1.45 및 1.07을 사용하는 것이 바람직하다.

Table 1 Broad Frequency Input Spectrum Device Capacity Factors

Data Source	$\check{F}_D$	$\beta_r$	$\beta_u$	HCLPF $F_D$
HCLPF Capacities (BNL & LLNL)	1.75	0.11	0.23	1.00
GERS - Non Relay	1.45	0.11	0.23	0.83
GERS - Relay	1.07	0.09	0.18	0.69
IEEE C37-98 - Relay Fragility	1.5	0.09	0.18	0.96
Qualification Test Function During	1.4	0.09	0.22	0.84
Function After (no anomalies)	1.95	0.09	0.28	1.06
Function After (anomalies)	1.1 - 1.65	0.09	0.28	0.6 - 0.9

IEEE C37.98[6]에서는 세 개의 계전기를 시험하고 세 번의 실험 중 최소성능을 *TRS*로 정의하고 있다. 따라서 메디안 성능은 *TRS*보다 큰 성능을 가지는 것으로 판단되므로 이의 변환에는 계수 1.5를 사용한다.

세 번째 형태의 실험데이터는 일반적인 성능실험데이터로 주어진 경우이다. 이러한 형태의 데이터에 대해서는 실험이 파괴수준 까지 수행되지 않았으므로 취약도 파라메타 값을 산정하기 어렵다. 우리나라 원전에 설치된 계전기는 앞서 기술한 바와 같이 대부분 IEEE 344[10]또는 IEEE C37.98[6]의 Proof Testing 요건에 따라 SSE에 대한 *RRS*를 만족시키는 수준의 실험을 수행하였다. 따라서 이들 계전기에 대한 실질적인 최대성능을 평가하기에 매우 곤란하다. 이들 시험자료로부터 메디안 지반가속도 성능을 평가하기 위해서는 위의 표 1에서 제시된 계수를 복합적으로 사용하는 것이 바람직하다. 즉, IEEE C37.98의 기준에 따라 SSE 수준에서의 *TRS*를 메디안 지반가속도 성능으로 변환하기 위해서는 다음의 표 1의 검증시험 및 IEEE C37.98에 의한 실험에 따른 증폭계수를 복합적으로 사용하여야 한다. 이 두 가지 요소를 동시에 고려하면 다음의 표 2와 같다. 이 때 메디안 계수는 단순히 두 계수의 곱으로 나타냈으며 대수표준편차는 SRSS로 구하였다. 표 2의 식은 단순히 표 1의 값을 조합한 결과로 이들 값에 대한 검증이 필요하다. 우리나라에서 현재 수행되고 있는 계전기의 취약도 분석은 검증시험에서 얻은 *TRS*를 기준으로 수행하므로 과도한 보수성이 내포되어 있으므로 이에 대한 충분한 연구를 통하여 합리적으로 평가할 수 있는 방안을 확립하여야 한다.

표 2 Broad Frequency Input Spectrum Device Capacity Factors

Data Source	$\check{F}_D$	$\beta_r$	$\beta_u$
Proof Testing Function During	2.1	0.13	0.28
Function After (no anomalies)	2.9	0.13	0.33
Function After (anomalies)	1.65 - 2.48	0.13	0.33

#### 4. 계전기의 선별제거 기준

##### 4.1 SPRA의 선별제거 기준

SPRA에서 내진성능이 큰 기기 및 구조물을 취약도 분석 대상에서 제외시키는 방법에 대한 정확한 기준은 존재하지 않는다. 그러나 일반적으로 내진성능 시험이나 취약도 시험 결과 및 경험자료를 이용하여 내진성능을 평가하고 내진성능이 매우 커 SPRA의 최종 결과인 노심손상 빈도에 미치는 영향이 매우 미미할 경우 상세한 취약도 분석 대상에서 제외시킴으로써 SPRA 수행 시 인력 및 비용을 절약할 수 있다.

우리나라의 SPRA 수행에서는 기기의 선별제거 기준으로 메디안 지반가속도 성능이 1.5g 이상일 경우 선별제거하고 더 이상의 상세한 취약도분석은 수행하지 않았다. 이는 지진재해도 곡선 상에서 지진가속도 발생확률 1E-7에 해당한다. 그러나 계전기의 경우에는 이러한 선별제거 기준 외에 SMA에서 사용하고 있는 선별기준을 선택적으로 사용하여 왔다[11].

SPRA 수행에 있어 계전기의 선별제거 기준은 기기의 선별제거 기준과 동일하게 적용하는 것이 일반적이다[12]. SPRA에서의 계전기 선별기준은 일반적으로 다음과 같다.

- 계전기의 오작동이 안전 정지 상태를 확보하고 유지하는데 영향을 미치지 않는 것
- 기계적으로 작동되는 계전기는 내진성능이 매우 큰 것으로 평가
- 계전기의 메디안 지반가속도 성능을 평가하여 일정 수준 이상일 경우

이상의 선별제거 기준을 적용하여 취약도분석 대상 계전기를 순차적으로 선별제거해 나가면 대부분의 계전기는 선별제거 되는 것으로 나타났다[11]. 일반적으로 원전에서 분석대상 계전기는 100여개 이상이 되며 이중 선별제거 과정을 거치면 실제적으로 상세한 분석을 수행하여야 할 계전기는 10개 이내로 줄어들게 된다. 또한 지진발생 후 작업자에 의해 복구하여야 할 계전기에 대한 목록에 대한 평가도 이루어져야 한다.

앞서 기술한 바와 같이 현재 우리나라에서 가동중인 대부분의 원전에 설치된 계전기의 내진성능은 내진성능 검증보고서로부터 확인할 수 있다. 그러나 이들에 대한 내진검증은 IEEE-344[10] 또는 IEEE C37.98[6]에서 규정한 방법에 따라 주어진 *RRS*에 만족하는지에 대한 검증시험이 주류를 이루고 있으며 실제 계전기의 최종적인 취약도를 평가한 경우는 거의 없다. 따라서 계전기의 취약도를 평가하는 것은 매우 어려운 실정에 있으며 위의 선별제거 기준을 만족하지 못하는 계전기가 많이 발생할 수 있다.

이러한 문제의 해결을 위해 Reed 등[7]은 SMA에 사용되는 선별제거 기준을 SPRA에 사용하는 방법을 제안하고 있다. 선별제거된 기기에 대해서는 선별제거 시 사용한 RLE(Review Level Earthquake)를 기준으로 하여 각각의 기기에 적절한 내진성능을 부여한 대체요소를 사용하게 된다.

#### 4.2 SMA의 선별제거 기준

SMA 수행에서도 지진으로 인한 계전기(relay) 또는 접촉기(contract)의 접촉불안정(chatter)에 대한 평가가 포함된다. 이 사항에 대한 수행은 전기기술자, 계통기술자 및 내진기술자가 공동으로 수행한다. 계전기는 다음과 같은 항목을 만족시킬 경우 검토대상에서 제외된다.

- 계전기의 접촉불안정에 의한 결과가 전기적, 계통적 및 운영측면에서 심각한 영향을 미치지 않을 경우
- CDFM SME 성능이 예비해석 결과 충분히 커서 RLE(Review Level Earthquake) 수준을 초과하는 경우

여러 가지 자료를 이용하여 CDFM 성능을 평가할 수 있으나 가장 용이한 방법은 현재까지 축적된 많은 자료들로부터 계전기의 5% 감쇠에 대한 10g 또는 그 이상의 GERS를 이용하여 내진성능을 평가하는 것이다. 이때 계전기의 경우 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다[13].

$$TRSc = \frac{GERS}{1.25} \quad (2)$$

따라서 10g의 GERS에 대하여 TRSc는 8g가 된다. 큰 비보강 패널의 캐비닛에 위치할 경우 최대 유효 캐비닛증폭계수( $AF_C$ )는 약 7.2가 된다. 계전기의 경우 캐비닛 하단부에서의 최대 RRS<sub>B</sub>는 다음과 같다.

$$Peak RRS_B > \frac{8.0g}{7.2} = 1.11g \quad (3)$$

그러나, 0.25g의 NUREG/CR-0098 중앙값 스펙트럼 입력에 대해 콘크리트 전단벽 구조물의 높이가 아무리 높다해도 5% 감쇠의 최대 RRS<sub>B</sub>는 1.1g를 넘지 않는다. 따라서 GERS가 10g인 계전기의 경우 위치나 캐비닛의 특성에 관계없이 0.25g NUREG/CR-0098 중앙값 스펙트럼을 초과하는 CDFM SME성능을 가져야 한다. 마찬가지로 계전기가 진동수 10Hz 이상의 패널위에 놓인 강성이 큰 캐비닛에 위치할 경우 최대 AF<sub>C</sub>는 약 4.5가 되며, 0.25g의 NUREG/CR-0098 중앙값 스펙트럼을 초과하는 CDFM SME 성능을 제공하는데는 6g의 GERS로 충분하다.

0.25g NUREG/CR-0098의 CDFM SME 성능으로 충분하다면, 최소 10g의 GERS 가진 계전기나 패널의 진동수가 10Hz 이상인 캐비닛에 설치된 계전기의 경우 6g 이상의 GERS를 가질 경우 그 자체의 성능만으로 검토대상에서 제외할 수 있다. CDFM SME의 요구성능에 따라 GERS의 수준은 선형적으로 스케일할 수 있다.



## 5. 계전기 선별기준 평가

SPRA에서 내진성능이 매우 큰 기기에 대한 선별기준은 일반적으로 노심손상빈도에 영향을 거의 미치지 않는 지반가속도 이상의 내력을 가진 기기에 한정하는 것이 일반적이다. 그러나 계전기의 경우 취약도를 평가하기 곤란한 경우가 매우 많으며 이러한 계전기를 모두 취약도 산정 대상에 포함시킬 경우 이에 필요한 시간 및 경제적인 노력이 많이 요구된다.

미국 원전의 SPRA 수행내용을 보면 27개의 SPRA를 수행한 발전소 중 12개의 발전소에서 SMA의 선별제거 기준에 따라 선별을 수행하고 대체요소를 사용하여 수행하였다. 대체요소를 사용한 발전소들은 0.3g 또는 0.5g에 해당하는 지반가속도 내력을 갖는 대체요소를 사용하였다[4].

SPRA에서 계전기의 선별제거를 위한 기준으로는 SPRA에서 일반적으로 사용하고 있는 노심손상 빈도에 영향을 미치지 않는 지반가속도 내력을 갖는 경우와 EPRI NP-6041에서 제시된 선별기준을 복합적으로 사용할 수 있으나 최종적인 노심손상빈도 결정 시 이들 선별제거 기준에 부합되는 취약도 값을 갖는 대체요소를 사용하는 것이 바람직하다. 대체요소를 사용하지 않을 경우 선별제거된 모든 계전기의 지진하중에 대한 파괴가 발생하지 않는 것으로 가정하기 때문에 모든 부품이 선별제거되고 추가적인 요소가 SPRA에 추가되지 않을 경우 파괴확률은 없다고 말할 수 있다. 이는 실제적인 지진위험도를 나타내지 못하는 요인이 된다. 대체요소의 목적은 선별제거된 모든 구조물 및 기기의 파괴모드를 나타내기 위한 것이다.

## 6. 결론 및 건의

본 연구에서는 원전의 SPRA 수행 시 원전에 설치된 계전기의 취약도 분석을 위한 선별제거 기준에 대한 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 계전기의 선별제거를 위해서는 기존의 활용가능한 시험자료의 특성을 고려하여 내진성능을 보수적으로 평가하고 이를 이용하여 선별제거 기준에 부합되는지를 판단하여야 한다.
- 기기 내진검증 보고서에 기초한 *TRS*를 기준으로 계전기의 취약도를 평가할 경우 과도하게 보수적인 결과를 가져오게 되며 이에 따라 최종적으로 노심손상빈도를 증가시킬 가능성이 있으므로 정확한 파괴수준의 평가가 필요하다.
- 선별제거된 계전기에 대해서는 대체요소를 사용하여 선별제거 기준에 부합되는 취약도값을 부여하여 지진에 의한 계전기의 파괴영향이 무시되는 것을 방지하여야 한다.
- 계전기의 취약도 분석 및 선별제거를 위해서는 각종 시험자료의 수집 및 데이터베이스화가 필요하며 필요한 경우 추가적인 취약도 시험을 수행하여야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. Robert J. Budnitz, "Current Status of Methodologies for Seismic Probabilistic Safety Analysis," Reliability Engineering and System Safety, 62, pp.71-88, 1998.
2. Budnitz, R.J., Lambert, H.E. and Hill, E.E., Relay Chatter and Operator Response after a Large Earthquake: An Improved PRA Methodology with Case Studies, NUREG/CR-4910, 1987.
3. J.T. Chen et al., Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Event(IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities, NUREG-1407, 1991.
4. U.S. NRC, Perspectives Gained from the Individual Plant Examination of External Event(IPEEE) Programs: Draft Report for Public Comment, NUREG-1742, 2001.
5. G.S. Hardy, R.P. Kassawara, J.M. Richards and W.H. Tong, "Seismic IPEEE Results and Their Use in Risk-Informed Application," SMiRT 16, Paper # 1406, 2001.
6. IEEE, IEEE Standard Seismic Testing of Relays, ANSI/IEEE C37.98-1987, 1987.
7. John W Reed and Robert P. Kennedy, Methodology for Developing Seismic Fragilities, EPRI TR-103959, 1994.
8. K. Bandyopadhyay, et al., Seismic Fragility of Nuclear Power Plant Components (Phase I, II, and III), NUREG/CR-4659, 1988.
9. G.S. Holman, et al., "Component Fragility Research Program, Phase I, NUREG/CR-4900 and Phase II, NUREG/CR-5470, 1989.
10. IEEE, IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, ANSI/IEEE std 344-1987, 1987.
11. 한국전력공사 전력연구원, 영광 56 호기 확률론적 안전성 평가보고서, 작성중.
12. M. Vermaut, Ph. Monette, P. Shah and R.D. Campbell, "Methodology and Results of the Seismic Probabilistic Safety Assessment of Krsko Nuclear Power Plant," Nuclear Engineering and Design, 182, pp.59-72, 1998.
13. J. W. Reed, R. P. Kennedy, D. R. Buttemer, I. M. Idriss, D. P. Moore, T. Barr, K. D. Wooten, and J. E. Smith, A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin (Revision 1), EPRI NP-6041-SL, 1991.