

원자력 발전소 고리 #1호기 운전원 훈련용 시뮬레이터 노외 핵계측 계통 개발

이지우, 서인용, 박신열
한국전력연구원

The Development of NI System for Kori #1 Nuclear Power Plant

J.W. Lee, I.Y. Seo, and S.Y. Park
Korea Electric Power Research Institute

ABSTRACT

실시간 시뮬레이션이란 시뮬레이션 모델의 시간 진행을 실시간에 기반하여 수행하는 시뮬레이션을 말한다. 이러한 시뮬레이션은 가상 운전 교육 프로그램으로 자주 사용되며, 실제로 이를 이용한 교육 훈련 프로그램이 많이 개발되고 있다. 발전소와 같은 대규모 시스템에서는 서로 다른 계통별로 나누어 시뮬레이션 모델링 후 하나의 시스템 안에 통합시키는 방법으로 사용한다. 본 논문에서는 실제 고리 #1호기 원자력 발전소의 상태와 유사한 시뮬레이터 개발을 통하여, 운전원에게 가상 시뮬레이션 교육용 Simulator로 제작되었던 일부 계통인 Nuclear Instrumentation System에 관련하여 개발된 사례를 서술하고 있다.

1. 서 론

노외 핵계측계통 (Ex-Core NIS : Nuclear Instrumentation System)은 발전소 운전 정보를 제공하고 원자로의 모든 운전상태에서 원자로용기 외부에서 중성자속 준위 감시, 과잉 출력상태에서 보호하기 위한 적절한 경보 및 비상정지 발생, 기술 지침서상의 요구를 위한 관련 원자로 정지회로에 입력신호를 제공하게 된다. 핵계측 계통의 기본적인 요구사항을 충족하기 위해서는 중성자와 감마선의 특성 및 영향, 검출기 설계 및 운전특성, 계측계통의 구성기기, 원자로의 광범위한 운전영역을 측정할 수 있는 계통설계 및 배치에 대한 사항을 고려하여 모델링을 해야 한다. 노외 핵계측계통을 통하여 현 시뮬레이터의 출력상태와 출력상태에 따른 각종 신호와 경보를 발생, Soft Panel을 통하여 운

전원에게 현재의 실시간 정보를 발전소 환경과 유사한 시뮬레이션 모델을 구현하였다.

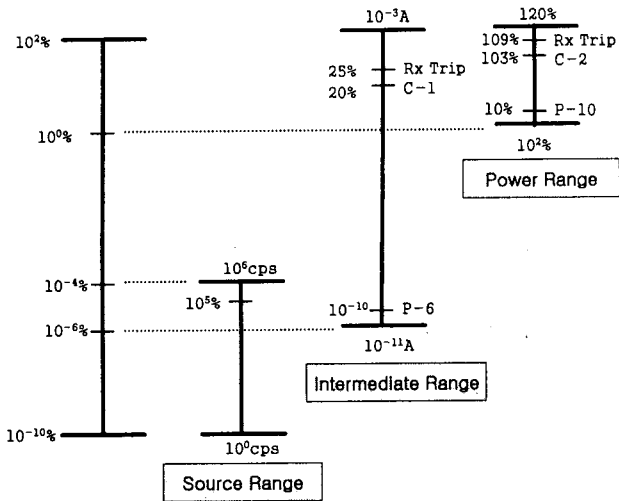
2. 본 론

2.1 노외 핵계측 계통의 특성

노외 핵계측 계통의 모델링에 앞서 노외 핵계측 계통의 특성을 알아본 후 이러한 특성을 실제 모델링 구현 부분에 대하여 설명하도록 한다.

2.1.1 검출기의 특성

원자로의 모든 상태하에서 중성자 및 감마선은 원자로 용기를 통과하여 핵계측 계통의 검출기가 설치된 곳으로 누설된다. 이 누설된 중성자 및 감마선은 검출기 챔버의 봉입기체에 영향을 주어 측정 가능하게 된다. 고속 중성자는 에너지 준위가 높아 원자로심으로부터 누설되며 이 누설된 중성자는 원자로의 출력을 측정하게 되는 것이다. 이러한 중성자 flux의 데이터를 이용하여 운전원에게 필요한 정보로 변환을 하게 된다. 노외 핵계측 계통은 발전소의 완전정지에서부터 전 출력범위까지의 중성자속을 감시해야 하므로 세가지 영역으로 나뉘어지며 각 영역별 각각 다른 검출기를 이용하여 원자로의 상태를 감시하게 된다. 선원영역은 전출력영역 중 하반부의 6디케이드에 해당하는 대략 $10^{-10}\%$ 에서 $10^{-4}\%$ 까지의 출력준위를 지시하도록 되어있고 중간영역은 대략 $10^{-6}\%$ 에서 $10^2\%$ 까지 원자로출력중 8디케이드를 담당한다. 출력영역은 중간영역 상부 측과 완전히 중첩되어 있는데 1%에서 120%까지의 출력준위를 지시해 준다. [그림-1]에 각각의 계측기의 측정범위와 중요 정보 신호를 표시한 것이다.



[그림-1] 각 계측기의 측정범위 및 신호발생

각각의 영역에 따른 출력신호를 자세히 알아보자.

- 선원영역 출력신호

- 핵계측계통 검출기 고전압 지시계
- 검출기 공급전압 상실 경부
- 가청계수율회로의 입력신호
- 주 제어실 출력준위 지시계
- 기록계
- 소내 전산기
- 기동율회로의 입력신호
- 격납용기내 작업자 대피 경보
- 선원영역 고 중성자속 원자로 정지

- 중간영역 출력신호

- 고전압 상실 경보
- 보상전압 상실 경보
- 주 제어실 출력 준위 지시계
- 기록계
- 소내 전산기
- 기동율회로에 입력신호
- 선원영역 허용신호 (P-6)
- 중간영역 고 중성자속 제어봉 인출정지 신호 (C-1)
- 중간영역 고 중성자속 원자로 정지

- 출력영역 출력신호

- 중성자속 편차 지시계(%ΔI)
- 기록계
- 검출기 출력 비교기
- 소내전산기
- 과잉출력 및 과잉온도 ΔT 설정치
- 제어봉 자동제어
- 채널 전류 비교기

- 과잉출력 기록계
- 냉각재 유량 허용신호 (P-8)
- 출력 허용신호 (P-10)
- 출력영역 고 중성자속 원자로 정지(저 설정치)
- 출력영역 고 중성자속 제어봉 인출 정지 (C-2)
- 정방향 출력변화율 원자로 정지
- 부방향 출력변화율 원자로 정지

각각의 출력상태에 따라 계측기로부터 받아온 12개의 flux (source range-2개, Intermediate range-2개, power range((Upper-Lower) 4개)값에 따라 위와 같은 신호를 모델 개발시 발생시켜 주어야 한다.

2.1.2 계측기의 출력신호

가. 선원영역 계측기(Source Range : N31, N32)

검출기 고전압은 정상전압보다 약 100V 이상 낮아지면 “검출기 전압상실”정보를 발생한다. 또한 출력준위 지시계가 선원영역 드로어 및 주 제어반에 설치되어 출력준위를 지시하며 발전소 소내전산기, 기록계, 기동율회로에 입력된다.

출력준위가 증가하여 10⁻⁵ CPS에 도달하면 “선원영역 중성자속 원자로정지(SR Hi Flux Rx Trip) 신호를 발생시켜 비정상적인 원자로출력폭주를 감시한다. 이 원자로 정지신호는 P-6(IR 10-10A)가 발생되면 운전원이 수동으로 차단할 수 있다. 이때 고전압(2000VDC)도 제거된다. 또한 출력 운전중 불필요한 원자로정지를 방지하고자 출력 10%이상에서 P-10(PR 10%)에 의해 자동 차단된다. 원자로 출력 준위가 P-6이하시 선원영역 고 중성자속 원자로정지 기능이 되살아나며 고전압도 자동 공급된다.

나. 중간영역 계측기

(Intermediate Range : N35, N36)

출력준위 10-10A에 도달하면 P-6가 발생되어 선원영역 고 중성자속 원자로 정지 차단 허용한다. 원자로출력 20%에 도달하면 “중간영역 고 중성자속 제어봉정지(IR Hi Flux Rod Stop : C-1)”신호가 발생되어 출력 상승중 출력폭주를 감시한다. 이 원자로정지신호는 P-10(PR 10%)이 발생되면 운전원이 수동으로 차단할 수 있다.

다. 출력영역 계측기

(Power Range : N41, N42, N43, N44)

각 출력영역 상부 및 하부 검출기 신호는 지시, 기록 및 각종 입력신호로 사용되기 위해 격리된다. 주 제어반의 상하부 중성자속 편차 지시계는 각 검

출기 상부 및 하부의 전류치 사이의 편차를 지시한다. 발전소 소내 전산기, 중앙제어실 지시계, 기록계에 입력된다.

각 검출기의 전류신호는 검출기 전류 비교기에 입력되어 노심 상부 또는 하부검출기 편차 경보를 노심출력이 50%이상시 검출기 각각의 신호와 검출기 평균출력 신호와 2%편차 발생시는 노심 사분면 출력 경사를 감시하는 경보를 발생한다.

과잉출력 ΔT 및 과잉온도 ΔT 설정치의 계산 및 원자로 보호계통에 수직 출력편차 입력신호에 제공된다.

상하부의 합산된 출력신호는 출력준위 지시를 위해 주제어반 지시계, 기록계, 소내전산기에 공급된다. 또한 주제어반의 과잉출력 기록계(0~200%)에도 입력된다.

제어신호로는 제어봉 자동제어의 제어인자 및 주급수 우회제어밸브 제어에 입력되어 사용되어진다. 채널 전류 비교기에 입력되어 1개의 채널이 모든 채널 신호중의 최저치와 2%의 편차가 발생하면 출력경사를 감시하기 위해 경보를 발생시킨다.

출력영역 채널 2/4에서 원자로출력이 10%에 도달하면 허용신호 P-10를 발생시켜 선원영역 고 중성자속 원자로 정지신호를 자동 차단, 중간영역 고 중성자속 원자로정지신호 및 제어봉 인출정지(C-1)를 수동 차단, 출력영역 고 중성자속(저 설정치)원자로정지신호를 수동차단 허용한다. 또한 P-7의 입력신호로 제공된다.

출력영역 채널 2/4에서 원자로출력이 30%에 도달하면 허용신호 P-8이 발생하며 P-8 미만에서 원자로냉각재 유로 중 어느 한 유로 냉각재 저 유량 원자로정지를 자동으로 차단한다.

출력영역 고 중성자속 원자로정지(저 설정치)신호는 원자로출력 25%에서 출력영역 2/4채널에서 발생되어 중간영역 고 중성자속 원자로정지신호에 대한 중첩신호이다. 이 신호는 출력영역에서 P-10이 발생되면 수동 차단이 가능하다.

출력영역 고 중성자속 제어봉 인출정지(C-2)신호는 출력영역 1/4채널이 출력 103%에 도달하면 발생되어 제어봉 인출에 의한 출력 상승을 방지한다. 이 신호는 제어봉 인출정지 우회 스위치로 우회가능하다.

출력영역 고 중성자속 원자로정지(고 설정치)신호는 출력영역 2/4채널이 출력 109%에 도달하면 발생하여 과잉출력을 방지하기 위한 신호이며 차단할 수 없다.

출력영역 고 증가율 원자로정지 신호는 출력영역 2/4채널에서 2초 내 5%이상 출력이 증가하면 발생되어 제어봉 이탈 사고시 원자로를 보호한다.

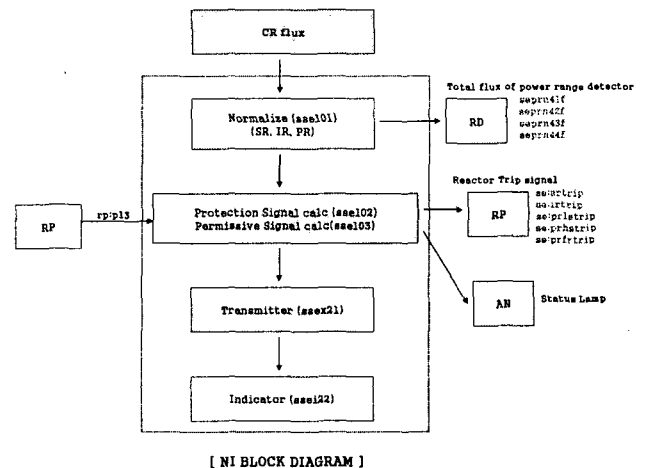
출력영역 고 감소율 원자로정지 신호는 출력영역 2/4채널에서 2초 내 5%이상 출력이 감소되면 발생되어 1개 또는 2개 이상의 제어봉낙하로 인하여 고 중성자속 피크로부터 노심을 보호한다.

2.2 노외 핵계측 계통 모델링

본 시뮬레이터에 대한 모델링 구현시 Sim Suite Power 3.3 이라는 시뮬레이션 환경 Tool을 사용하였다. 노외 핵계측 모델링은 Fortran 문법을 통하여 작성 되었으며, 실제 운전 지침서에 따라 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 앞에서 설명한 계측기의 출력신호 대부분을 모델링 하였다.

2.2.1 모델링 구성도

모델링에 대한 개략적인 구성도를 보면 아래 [그림-2]와 같다. 우선 flux 값을 Core계통에서 받아 온다. flux의 값 12개의 데이터를 이용하여 Source Range(2), Intermediate Range(2), Power Range((Upper-Lower) 4)의 값을 아래와 같은 순차적인 계산을 통하여 각 Soft Panel의 변수 값에 값을 뿌려주고, 경고 신호를 발생시켜준다. 이러한 신호들은 다른 계통에 전달되기도 하며, 운전원에게 실제 조작되는 단위(bar)로 변경되어 Ramp 나 Indicator로 보내어 진다.



[그림-2] 핵계측 계통 모듈 구성도

2.2.2 모델링 구현 (세부내용)

전체적인 구성은 위의 구성도 에서 보았듯이 Core 계통에서 flux의 값을 받아 서브루틴이 시작된다. 본 시뮬레이터에서 구현된 모델은 5개의 Subroutine(ssel01, ssel02, ssel03, ssex21, ssei22) 과 5개의 Function(bistable, yslimf, ysrand, ystenlog, ystrans_new)으로 구성되어 있다. 우선 ssel01의 subroutine에서 각각의 계측기 측정 영역에 대해서 서로 다른 단위로 눈금을 가리키게 되는

데, 이러한 단위를 실제 발전소 상황과 맞추어 일반화된 값으로 변환하게 된다.

Source Range 는 CPS 단위로 된 대수눈금으로 지시한다. temp1은 발전소 상황에 맞추어 계산되는 값이다. 출력 100%시 sesrn31f라는 변수의 값은 12의 값을 가져야 하므로, 이때 crsn31의 값이 발전소 100%출력일 경우 이때 상수 temp1을 구해 적용하게 된다.

```
sesrn31f = ystenlog(temp1 * crsn31)
```

하지만 Source Range의 계측범위는 $10^0 \sim 10^6$ cps 범위이므로 yslimf 함수를 통하여 그 이외의 데이터 값은 최고값 또는 최저값을 리턴하게 된다.

```
temp1 = 0.0
temp2 = 6.0
call yslimf(temp1, temp2, sesrn31f)
```

그 외의 Intermediate Range, Power Range에 대해서도 유사한 루틴이 적용이 되었다. ssel02 와 ssel03 의 subroutine은 발전소의 원자로 노심의 보호 계통에 대한 logic으로 구현되어 있다. 이러한 logic은 고출력이나 저출력 등에 대하여 경고 신호를 발생시킨다. 이러한 신호는 다른 계통에 전달되어 원자로 정지 및 제어를 위한 신호로 사용되어 진다. bistable이라는 함수를 호출하게 되는데, bistable 함수는 출력상태에 대하여 현재의 상태를 리턴해주는 함수이다. 어느 신호의 값이 특정 범위를 넘어 설 경우 경고 및 알람을 운전원에게 알리게 되며, Reactor Trip Signal을 발생시키기도 한다. 아래와 같은 zdsehsn31lt라는 변수는 현재 핸드 스위치가 bypass가 아닐 경우에만 신호를 발생시키도록 한다.

```
call bistable(setemp1, sek31dsp, sek31drp, se:nc31d, a0)
se:lg5 = se:nc32d .and. .not.zdsehsn31lt
```

이러한 모델링은 발전소의 Panel에 부착되어 있는 스위치의 상태 운전원의 조작과 서로 상호 작용을 할 수 있도록 고찰되어야 한다. 실제로 운전원이 스위치를 조작한다든지, 이벤트를 주었을 경우 이에 대한 응답을 실제 모델 개발시 고려되었다. 위의 소스는 간단한 BOOL 형식 스위치에(bypass or normal) 대한 내용을 담고 있다.

ssex21의 subroutine은 transmitter를 거친 값으로 다시 계산한다.

```
! sesrn31f : n31 source range detector flux
temp1 = 10**sesrn31f
```

```
temp6 = 1.0
temp7 = 1e+6
```

```
call ystrans_new( nixnt031b, k:true,
& temp1, ypfgsent031b,
& yp:gsent031b, ypigsent031b, ypxgsent031b, k:false,
& temp6, temp7, kf0, kf10,
& kf0, kf10,
& temp10, k:false)
```

Soft Panel 변수에 이 값을 보여주기 위해서 ssei22의 subroutine에서는 주로 일반화된 0~1사이의 값으로 변형한다.

```
zonini31b = ( ystenlog(nixnt031b) - 0.0 )
            * ( 1 / ( 6.0 - 0.0 ) )
```

0 과 1사이의 변형된 값은 Soft Panel 상에서 현재의 데이터 값을 표시해 주는데 용이하게 사용된다.

3. 결 론

본 논문에서는 원자력발전소 고리 #1호기 운전원 훈련용 시뮬레이터 노외 핵계측 계통에 대한 모델을 소개하였다. 노외 핵계측 계통은 다른 계통과 연계시 필수 계통중의 하나이다. 모델 개발시 잘못된 정보를 다른 계통에 전달할 경우 매우 큰 위험에 빠지게 되며, 운전원에게 직접적으로 현재 운전 상태를 알리는 중요한 Interface 역할을 한다. 현재에도 많은 시뮬레이터의 역할이 위험한 상황을 모의하고 인간에 대한 실수를 줄이기 위한 방안으로 시뮬레이션을 통하여 반복 연습을 하게 된다. 이러한 중요한 시뮬레이터의 역할에 있어 보다 효과적인 훈련 시스템이 더욱더 요구되는 상황이다. 앞으로 실제 상황과 같은 상황을 만들어가는데 많은 시간과 노력이 투자될 것이며, 인간-기계 연계기술에 대한 연구와 함께 발전할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- [1] 김강열, 송철환, 장주경, 배한경 “고리 1,2호기 발전실무 (I - 상)” : 한국전력공사 원자력연수원.
- [2] 김강열, 송철환, 장주경, 배한경 “고리 1,2호기 발전실무 (I - 하)” : 한국전력공사 원자력연수원
- [3] “원자로운전원” : 고리원자력본부.