

2003 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

RTD우회배관 제거에 따른 OTDT/OPDT 운전여유도 영향평가

Study on the OTDT/OPDT Operating Margin Following RTDBE

김주성, 송동수, 윤덕주, 이창섭  
한진전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

RTD우회배관을 통한 온도측정 방법을 개선하기 위하여 미국, 일본, 한국에서는 80년대 이후에 우회배관을 제거하고 보호관형 직접 삽입식 저항온도기를 고온관 및 저온관에 직접 설치하는 작업을 수행해 왔다. 그 결과 발전소 종사자의 방사선 피폭저감 및 냉각재누출 사고 등의 발생 확률은 현저히 감소되어 원전운영은 개선되는 반면, 온도의 순시변동(fluctuation)은 기존의 측정 방법보다 커짐으로 인해 운전 여유도 감소등 운전성에 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 RTD우회배관을 제거하고 보호관형 직접삽입식 RTD를 설치함에 따른 운전 여유도의 영향을 평가, 분석하고 운전 여유도 확보방안에 대하여 연구하였다.

Abstract

To improve temperature measurements by RTD bypass lines, the U.S.A, Japan, Taiwan and Korea have eliminated RTD bypass lines and then established the directly inserted RTDs to the hot legs and cold legs(3 RTDs each hot leg and 1 RTD each cold leg) since 1980s. Measurements by the directly inserted RTDs are predicted that the temperature fluctuation( $T_{hot}$ ,  $T_{avg}$ ) will be higher than before the RTD Bypass Line Elimination(RTDBE), actually those were showed in the most of units which eliminated the RTD bypass lines. Because of the temperature fluctuation increases, the unit's operating margin will be decreased. In this paper, the OTDT/OPDT operating margin was evaluated and some methods to secure the operating margin were studied.

1. 서론

우리나라에서는 90년대 후반부터 우회배관을 통한 온도 측정의 단점을 보완하기 위해 기존의 우회배관을 제거하는 작업을 수행해왔다. RTD우회배관 제거(Resistance Temperature Detector Bypass Line Elimination, RTDBE)작업에 앞서 우회배관 제거작업이 타당한지 평가하고, 제거 후에 예상되는 문제점들과 그 영향을 최소화 하는 방안이 연구되었다.

본 논문에서는 우회배관 제거에 따라 감소될 것으로 예상되는 운전여유도 확보를 위해 몇 가지 방안을 제시하고 그 중 가장 타당성이 있는 방안으로 판단되는 Lag Filter 시정수

를 변경하는 방안에 대하여 온도에 대한 민감도 분석을 수행한다. 이를 바탕으로 기 수행된 발전소에서 우회배관 전,후의 온도 데이터를 취득 분석하고, 예상되는 여유도 감소를 정량적으로 평가한 후 이를 U원전 1,2호기에 적용하여 RTD우회배관 제거 및 여유도 확보 방안의 타당성을 검증하고 발생할 수 있는 문제점들을 최소화하는 방안을 연구하였다.

## 2. 고온관 온도 Fluctuation

고온관에서 온도 증화가 발생한다. 온도 증화의 원인은 저 누출형 연료 장전으로 인한 Core Power의 불균등한 분포(대개의 경우 Core의 중심부의 온도가 높음)와 Upper Plenum에서 냉각재의 충분한 혼합없이 고온관으로 통과하기 때문이라고 판단된다. 또한 Vessel 윗부분에서 냉각재의 급작스런 방향변화와 통과면적의 변화는 고온관에서 냉각재의 속도분포의 불균형의 원인이 된다. 특히 높은 출력에서 Core Power의 불균등이 심할수록 온도 증화는 보다 증가하게 된다. 대개 연료 주기초의 온도 Fluctuation이 주기말보다 크고 고온관에서 냉각재의 온도 증화와 속도 불균형의 발생은 고온관 온도 Fluctuation 증가의 원인이 된다. 다음 그림은 발전소에서 RTD우회배관 제거 전에 측정된 고온관의 온도 분포를 나타낸다.

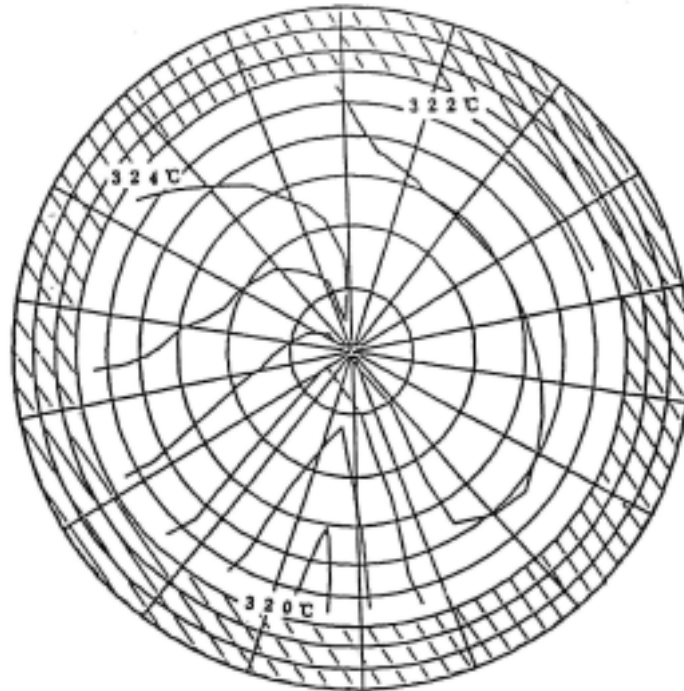


그림 1 고온관내 온도증화 분포

기존의 RTD우회배관을 통한 온도 측정 시스템은 냉각재가 우회배관을 통과하면서 충분히 혼합된 후 매니폴드에서 측정되기 때문에 고온관 온도 증화 및 냉각재 속도 분포등에 의한 온도 측정 불확실도에는 아무런 영향이 없었다. 그러나 우회배관을 제거하고 보호관형 직접삽입식 RTD를 이용한 온도 측정 시스템은 온도증화 및 냉각재 속도 분포 불균형 등에 많은 영향을 받는다. 본 논문에서는 이러한 이유로 인하여 증가가 예상되는 온도 Fluctuation에 대한 원자로 보호계통 및 제어계통의 영향을 평가하고 운전여유도 확보방안을 제시하고자 한다.

3. OTDT/OPDT

가

OTDT/OPDT

가

Fuel melting, DNB, Hot leg

Boiling

OTDT/OPDT

1

Core Thermal Power, Coolant

Pressure, Axial Neutron Flux Distribution( I)

OTDT/OPDT

가

3.1. Description of the OTDT/OPDT Trip

OTDT/OPDT

Tavg T

Lag Filter Lead-Lag

Filter

Reactor Trip

C3(OTDT Turbine Runback Set Point, 3%),

C4(OPDT Turbine Runback Set Point, 3%) Alarm

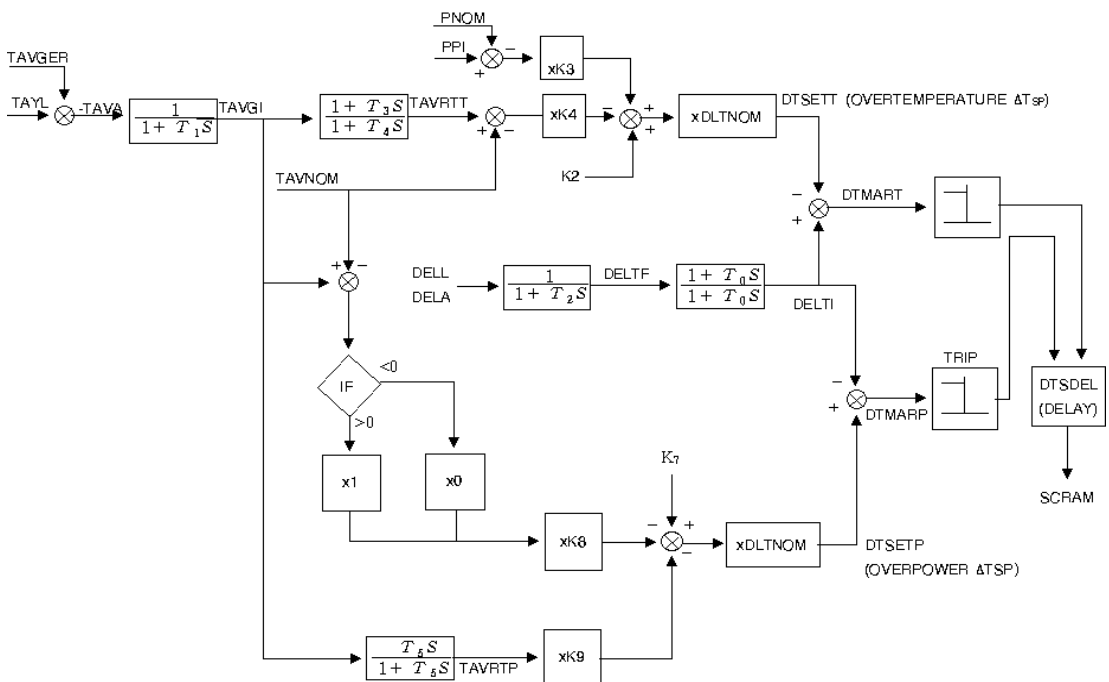
RTD Measurement Sensor, Thermal & Hydraulic, Electronic

Delay Time

Dynamically

Tavg

T Lead/Lag Filter



2 Description of the OTDT/OPDT TRIP

4. RTDBE . OTDT/OPDT

4.1. Y 1,2 U 1,2 RTDBE ,

RTDBE

Y 1,2

RTDBE .

Tavg

Thot

Standard Deviation

RTDBE

RTDBE

Tavg

Thot

1,2

Y

1,2

Fluctuation

U

가

Y 1,2호기보다 보수적으로 할 필요가 있다.

표 1 Y원전 및 U원전의 Thot, Tavg 온도

		1호기			2호기		
		Loop1	Loop2	Loop3	Loop1	Loop2	Loop3
Y원전 RTDBE 전	Thot	325.13	326.79	326.91	325.73	325.62	325.54
	STDEV	0.12	0.09	0.15	0.2	0.18	0.18
	Tavg	307.96	308.52	308.73	308.58	308.5	308.37
	STDEV	0.064	0.046	0.076	0.089	0.073	0.075
Y원전 RTDBE 후	Thot	325.74	326.29	326.29	325.46	325.82	326.57
	STDEV	0.216	0.31	0.19	0.21	0.15	0.24
	Tavg	308.92	308.67	308.71	308.89	308.07	309.01
	STDEV	0.127	0.248	0.11	0.11	0.08	0.12
U원전 RTDBE 전	Thot	323.18	323.38	323.2	323.47	322.86	323.02
	STDEV	0.22	0.34	0.29	0.24	0.28	0.28
	Tavg	304.57	304.6	304.46	304.8	304.3	304.62
	STDEV	0.12	0.18	0.15	0.13	0.15	0.13

#### 4.2. RTDBE전 U원전 1,2호기 OTDT/OPDT 운전여유도 Margin

U원전1,2호기 OTDT/OPDT 여유도를 확인한 결과 1호기의 LOOP2가 3.27%로 가장 제한적으로 나타난다. 반면에 U원전 2호기는 전체적으로 많은 양의 여유도가 있다. 그 이유는 1호기는 연료 주기초인 관계로 노심이 2호기 보다 불안정 한데 원인이 있다.

보다 보수적으로 발전소의 OTDT/OPDT 여유도를 평가하기 위하여 가장 제한적인 여유도를 나타내는 1호기 LOOP2의 데이터를 기준으로 여유도 평가했다.

표 2 U원전 1,2호기 OTDT/OPDT 여유도

	1호기			2호기		
	LOOP1	LOOP2	LOOP3	LOOP1	LOOP2	LOOP3
Ave. DT	100.16	101.03	100.86	100.42	99.86	98.98
Ave. OPDT_Cal	110.53	109.92	109.91	109.89	109.92	110.18
Ave. C4 Alarm	7.37	5.90	6.02	6.90	7.06	8.21
Min. C4 Alarm	5.89	3.27	3.87	4.19	5.34	6.54

#### 4.3. OTDT/OPDT 설정치 평가

C3 정보와 관련이 있는 울진 1,2호기 K1의 설정치는 137%로서 여유도가 충분하다.

Tavg에 대한 OTDT의 민감도를 분석해보면 다음과 같다.

*Overtemperature*  $\Delta T$

$$\Delta T \left( \frac{1 + \tau_1 s}{1 + \tau_2 s} \right) \left( \frac{1}{1 + \tau_3 s} \right) = \Delta T_0 \left( K_1 + K_2 (P - P') - K_3 \left( \frac{1 + \tau_4 s}{1 + \tau_5 s} \right) \left( \frac{1}{1 + \tau_6 s} \right) (T - T') - f(I) \right)$$

여기서  $K_1:137\%$ ,  $K_2:3.96(\%/^{\circ}\text{C})$ ,  $K_3:1.45(\%/bar)$  이다. 계측오차, 교정오차, 각 filter의 보상이 없다고 가정하고 순간 온도가  $5^{\circ}\text{C}$  높게 측정된 Tavg에 대한 OTDT는  $3.96 \times 5 = 19.80\%$  낮게 나타난다. 약 20%의 여유도가 감소함에도 불구하고 울진 1,2호기는 설정치의 여유도가 37%이기 때문에 본 논문에서는 OTDT 여유도는 충분하다고 본다.

*Overpower*  $\Delta T$

$$\Delta T \left( \frac{1 + \tau_1 s}{1 + \tau_2 s} \right) \left( \frac{1}{1 + \tau_3 s} \right) = \Delta T_0 \left( K_4 - K_5 \left( \frac{\tau_7 s}{1 + \tau_7 s} \right) \left( \frac{1}{1 + \tau_6 s} \right) T - K_6 \left( \frac{1}{1 + \tau_6 s} \right) (T - T') - f(I) \right)$$

여기서  $K_4:110\%$ ,  $K_5:3.08(\%/^{\circ}\text{C})$ ,  $K_6:0.3334(\%/^{\circ}\text{C})$  이다. Tavg에 대한 OPDT의 민감도를 위와 같은 방법으로 분석해보면 순간 Tavg가  $1^{\circ}\text{C}$  높게 측정된다면 OPDT는 약 3.41% 감소된다. 이는 OPDT의 설정치 여유도가 10%에 비해 여유도 감소는 크다. 따라서 본 논문에서는 OPDT에 대한 온도 및 각 filter의 시정수변화에 대한 민감도 분석을 하고 최적화된 방안을 도출하는 것이 목적이다.

#### 4.4. 운전여유도 확보방안

OTDT/OPDT의 운전 여유도는 Tavg의 Fluctuation에 많은 영향을 받는다. 온도가 급작스럽게 올라가거나 내려가면 OTDT/OPDT의 운전 여유도 또한 급작스럽게 감소한다. 따라서 여유도 확보를 위해서는 원자로 보호계통 지연 Filter 시정수를 변경하여 온도 Fluctuation의 영향을 완화하는 방법이 있다.

5. U 1,2

OTDT/OPDT

RTDBE

Fluctuation

OTDT/OPDT

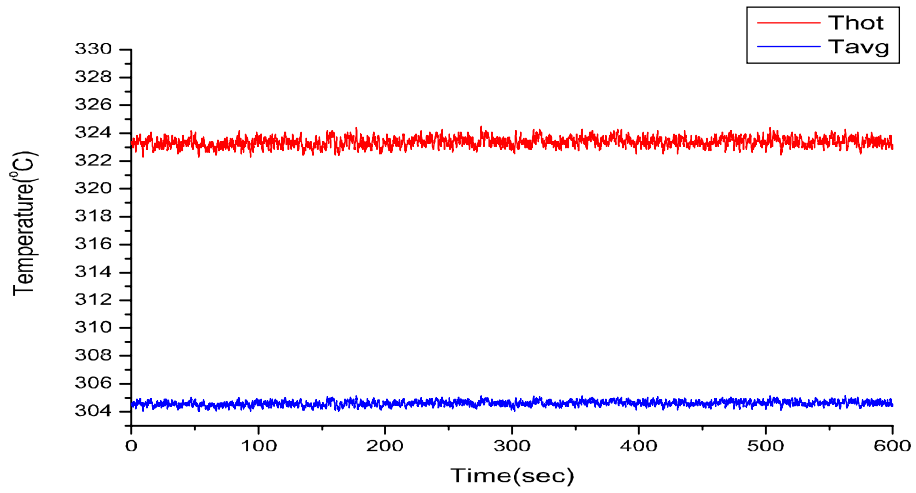
가

Hot leg

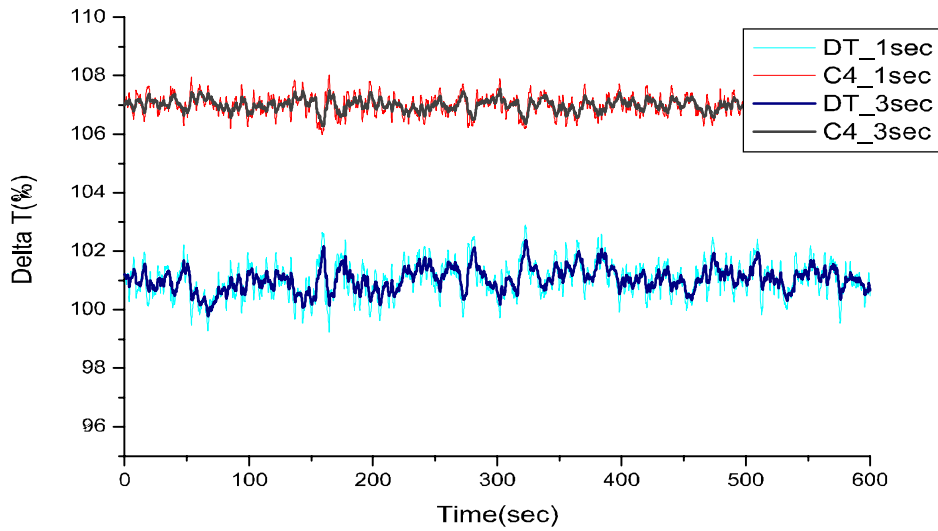
가

5.1.

가



3 Thot Tavg



5.2.

4 C4

가

가

가

가

가

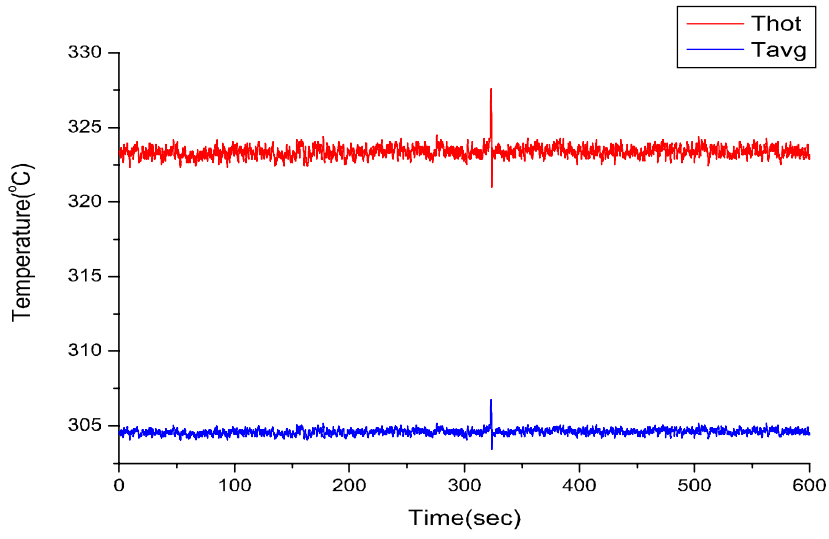
가

Lag

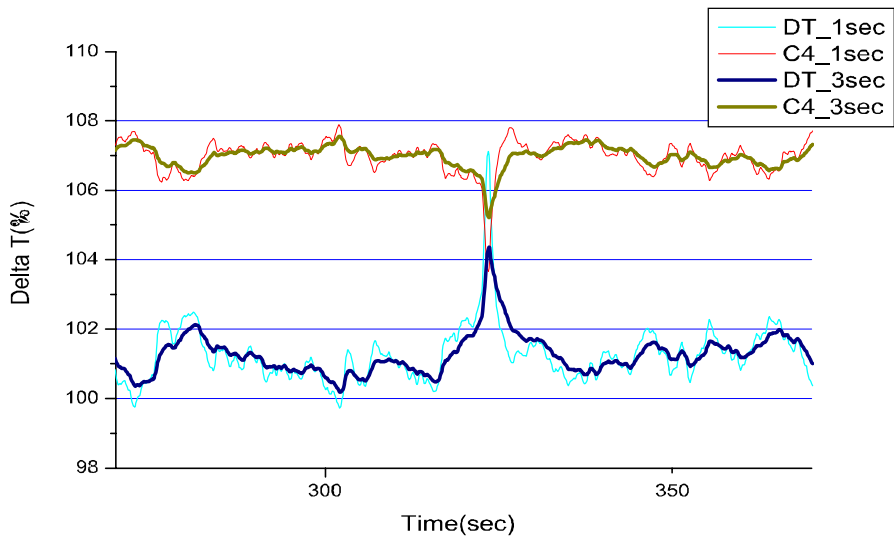
가 1sec

3sec

가



5 가 가



6 C4 가

3 가

			가
Min. C4 Margin	1sec	3.327	-3.453
	3sec	4.012	0.837
가		0.675	4.290

위의 결과에서 측정 데이터를 비교 분석한 결과 Lag Filter 시정수를 1sec에서 3sec로 증가 하는 방안에 대해 C4 여유도는 3.3%에서 4.0%로 약 0.7%의 여유도를 확보할 수 있었다. 그러나 RTDBE후에는 온도 순시변동의 양을 예상하기 어렵다. 따라서 보다 보수적으로 평가하기 위하여 Hot Leg에서 약 5℃의 순간적인 온도 증가를 가정하여 평가 하였다. Lag 시정수의 효과는 온도 순시변동이 급작스럽게 커질 때에 보다 좋은 효과를 얻을 수 있다.

가정된 온도 데이터 평가 결과 Lag 시정수가 1sec 일때는 여유도가 -3.45%다. C4 여유도가 -3%이상이 되면 원자로는 Trip된다. 반면에 Lag 시정수가 3sec 일때는 C4 여유도가 0.837%로 충분한 여유도를 갖는다.

따라서 발전소에 3sec의 Lag 시정수를 설치 했을 경우 Hot leg의 온도 순시 변동이 5℃이상이 되지 않으면 발전소의 C4 경보는 발생하지 않는다. 결론적으로 U원전 1,2 호기에 3sec의 Lag 시정수를 설치하는 발전소 운영측면에서 효과적이라고 할 수 있다.

## 6. 온도 순시변동의 제어 계통으로의 영향

RTD우회배관 제거 후의 제어계통의 Tavg온도 신호는 중간값 선택기를 사용한다. 중간값 선택기는 각 LOOP 채널의 Tavg의 신호를 받아서 이중 중간값을 제어용 신호로 선택한다. 그러므로 어느 한 채널의 고장에 의해서 제어계통에는 불리한 영향을 미치지 않는다.

제어 계통으로 공급되는 ΔT 신호는 중간값 선택기로 입력되지 않아도 된다. 왜냐하면 ΔT신호는 제어봉 삽입한계 비교에만 공급되므로 제어 및 보호계통의 상호작용과는 무관하기 때문이다.

결국 어떤 채널이 고장으로 높은 또는 낮은 신호를 제어계통에 공급한다하더라도 중간값 선택기가 이들 두개의 고장 신호를 제거해 줌으로써 제어계통에는 영향을 미치지 않게 된다. 그러나 개조 후에 고온관의 온도 Fluctuation이 커짐이 예상됨에 따라 제어 계통의 온도 deviation 정보와 제어봉 스텝핑 문제가 발생할 가능성이 있다.

### 6.1. 제어봉 스텝핑 영향

온도 순시변동의 증가는 보호계통뿐만이 아니라 제어계통에도 많은 영향을 미친다. 제어 계통의 영향을 최소화하기 위해 보호계통의 시정수를 변경한 것과 마찬가지로 제어봉 스텝핑과 관련이 있는 Lag시정수, Lead/Lag 시정수를 변경할 수 있다.

$$T_E = T_{ref} \left( \frac{1}{1 + \tau_2 S} \right) - T_{avg} \left( \frac{1 + \tau_3 S}{1 + \tau_4 S} \frac{1}{1 + \tau_5 S} \right) + (Q_{tu} - Q_n) \left( \frac{1}{1 + \tau_6 S} \right) \left( \frac{\tau_1 S}{1 + \tau_1 S} \right) K_1 K_2$$

가. 개선방안: 민감도 분석을 통해 최적의 설정치 시정수를 결정하며 시정수 변경범위는 다음과 같다.

- 지연회로 시정수(τ<sub>5</sub>)를 1초에서 5초 개정
- 지상/지연회로 시정수(τ<sub>3</sub>/τ<sub>4</sub>)를 50초/10초에서 40초/10초로 개정
- Power Mismatch Non-Linear Gain Break Point를 1% 유지

이러한 시정수가 변경됨에 따라 이에 대한 영향평가를 아래와 같이 수행한다. 즉, 제어봉제어계통으로 인하여 영향을 받는 운전과도현상에 대해 분석하여 발전소 안전성을 입증해야한다. 또한 시정수 변경 시 제어봉제어에 미치는 영향평가를 통해 제어봉 제어의 안정성을 입증한다.



나. 운전자료 분석

- 설정치 및 시정수의 변경시 RCS 평균온도에 대해 Simulink를 이용한 분석

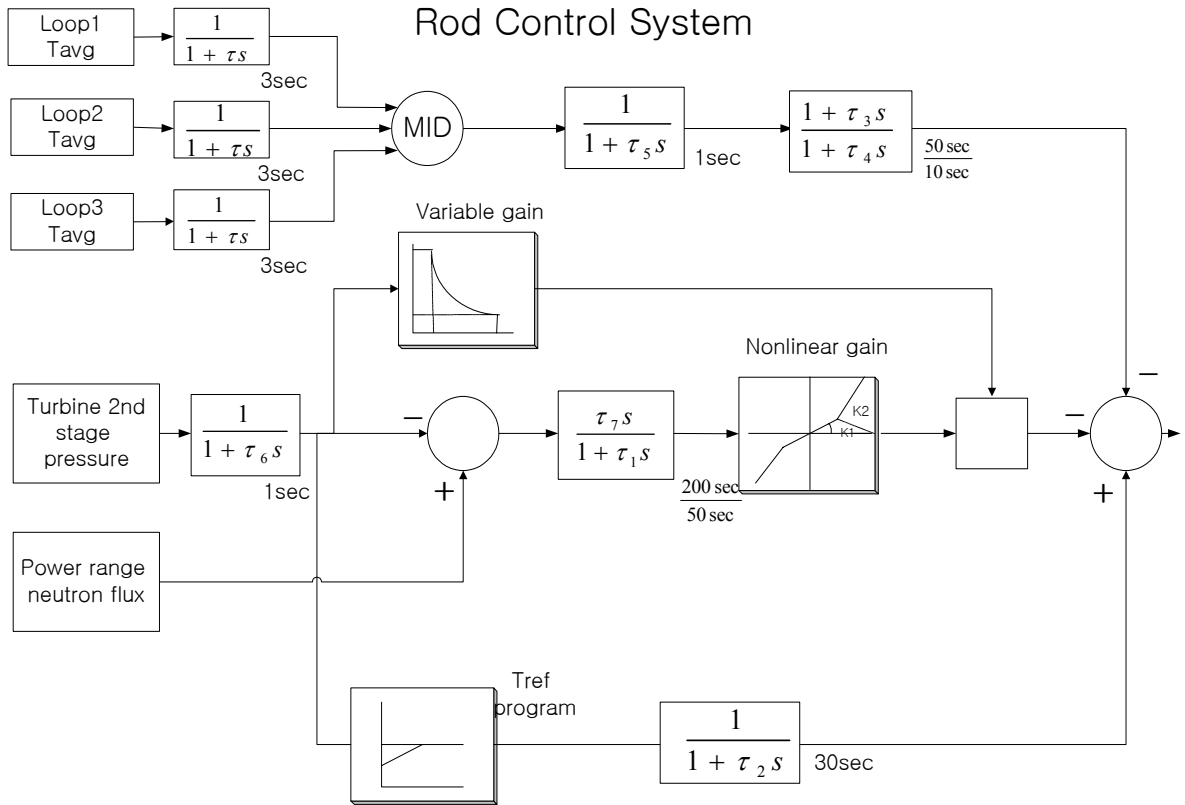


그림 7 Rod Control System

다. 성능 분석 : LOFTRAN 코드를 이용한 해석

- 90%에서 10% 출력 계단상승
- 100%에서 50%부하 감소
- P-9 설정치 분석(P-9 연동신호이하에서 원자로정지가 발생하지 않는 터빈정지)

라. 허용기준

- 이러한 과도상태에서 제어봉(출력)의 진동이 발생치 않아야 함
- OTDT/OPDT 설정치의 적절한 마진
- 가압기 PORV 설정치 보다 낮고 가압기 저 안전주입 설정치 높아야 함
- 국부 출력밀도가 제한치 보다 낮아야 함

마. 안전해석

제어봉 제어 지연회로 시정수( $\tau_5$ )를 1초에서 5초로 늘리고 지상/지연회로 시정수를 50초/10초에서 40초/10초로 개정할 경우 다음의 두 가지 사고를 분석해야 한다.

- 주급수계통 오동작 사고(Feedwater Malfunction)
- 과도한 부하증가 사고(Excessive Load Increase)

## 6.2. 온도 편차 경보 계통

온도 편차 경보는 Channel Error 혹은 각 Loop의 Tavg 혹은  $\Delta T$ 의 편차가 기준치를 넘으면 즉각적으로 운전자에게 알려준다. 그러므로 온도 편차 경보를 위한 Tavg,  $\Delta T$  설정치는 다음과 같은 근거에 따라 결정되어야 한다.

- 온도편차 경보 계통은 정상적인 운전 상태에서는 작동하지 않는다.
- Channel error 혹은 각 Loop의 Tavg,  $\Delta T$ 의 이상 편차가 발생시에는 즉각적으로 경보가 작동되어야 한다.

## 7. 결론

일반적으로 RTD 우회배관을 제거하여 온도를 일차냉각재 배관으로부터 직접 측정하면 기존의 우회배관 매니폴드에서 측정하는 것에 비하여 온도 Fluctuation이 증가한다. 온도 Fluctuation의 증가로 인해 감소되는 여유도 확보방안은 여러 가지가 제안된다. 본 논문에서는 여유도 확보 방안 중 가장 현실적으로 적용할 수 있는 방법인 시정수를 변경하는 방법을 채택하고 민감도분석 및 여유도 분석을 실행했다. 민감도 분석결과 시정수 변경 안은 우회배관 제거 후의 온도 순시변동의 증가에 대해 충분한 운전 여유도(현재조건: 3.37% → 4.012%, 약 5℃의 온도 순시증가 가정한 경우: -3.45% → 0.384%)를 유지할 수 있게한다. 또한 변경안을 이용하여 FSAR기준 안전해석을 수행해본 결과 모든 사고에서 안전기준을 만족하였다. 따라서 여유도 확보를 위해 올진 1,2호기의 RTD우회배관 제거 후 변경안이 채택되어 발전소에서 사용될 예정이다.

그러나 운전성 측면인 제어계통 평가 결과 발전소 안전에는 직접 관련이 없는 제어붕스텝핑, 온도 편차 경보발생 등 문제점이 발생할 수 있다. 제어 계통의 문제는 선형호기에서도 종종 발생한 문제점이다. 선형호기에서는 제어 계통의 시정수를 변경하여 문제점을 해결했다. 이러한 방법은 U원전 1,2호기에서도 채택될 수 있으며 시정수 변경과 함께 운전성능 및 안전성관련 사고해석을 재 수행한 후 모든 결과가 설계 기준에 만족하면 발전소 운영에 적용할 예정이다.

## 참 고 문 헌

1. 한전 전력연구원, 1999. “고리 2호기 RCS 온도 순시변동 증가로 인한 운전 여유도 감소분 만회방안”
2. 한전전력연구원, 2000. “영광 1,2호기 OTDT/OPDT 설정치 시정수 변경에 따른 안전성 평가”
3. Benjamin C. Kuo, 1982, "Automatic Control Systems",
4. James A.Cadzow, Hugh F. Van Landingham, 1985, "Signals and Transforms",
5. Yoon-Jae Choe, Se-jin Baik, 2003, JSME, “ A study on the temperature distribution in the hot leg pipe”
6. Mitsubishi Heavy Industries, 2003, “ The Evaluation of Main Parameter before RTDBE”