

원자로 정지 관련 동적보상기의 응답시간 평가

주 운 표, 황 희 수, 우 승 용
한국원자력안전기술원
김 건 중
충 남 대 학 교

요 약

가압 경수로형 원전 안전정지/ 안전 주입 변수와 관련된 계기는 관련 기술 기준에 따라 정기 보수시 교정이 이루어지면, 정지 신호를 모의 주입하여 물리량 검출기로부터 원자로 정지집계 권선의 풀림시간까지의 총 응답 시간이 사고해석시 가정된 계통의 응답 지연시간이내에 들어 있는 지를 확인한다. 이 정지 신호에 응답하는 동적 보상기의 특성과 관련하여 설계과정에서 삽입된 근사화 오차에 대한 정량적인 평가가 이미 알려진 바 있고, 시간 응답 측정시 삽입되는 지연 요소로 인한 오차도 이에 포함시켜 분석한 바 있어 실제 교정시 정밀도 향상을 위하여 활용하고 있다. 이 논문을 통하여 원자로 정지계통의 응답시간 측정시 노 냉각수 평균 온도 변화율 동적 보상 미분-지연 카드에 모의입력으로 스텝신호를 주입할 경우, 이를 과도하게 큰 신호로 인식하여 매우 짧은 시간(1초 이내)에 응답되고, 스텝신호대신 1%P.U./초로 평균온도 변화율만을 주입할 경우, 보다 늦게 응답됨을 밝혔다. 따라서 모의 시험 방법에 있어서 입력 선택을 적합하게 하여야만 계통의 건전성을 응답시간으로 확인할 수 있는 데, 이에 적합한 모의 입력 방법을 제안하였다.

1. 서 론

웨스팅하우스 가압경수로형 발전소의 안전 정지변수는 대개 19개로 구성되어 있으며, 고리1/2호기와 울진1/2호기는 변수가 한 두 가지 다르다¹⁾. 또한 원자로 정지계통의 호기별 응답시간은 표1과 같이 비교할 수 있다. 이러한 변수들 중에 동적 보상기를 사용하는 대표적인 안전정지 변수 관련 동적 보상기 전달함수를 요약하면 표2와 같다. 과잉출력 차온(OP ΔT)원자로트립에서 차온(ΔT)은 특정 노냉각수 평균온도에서 100% P.U.(기준단위)출력에 해당하는 고온관과 저온관 온도 차(예, 고리1호기 T_{avg} 293.9 °C에서 ΔT는 36.5°C)를 나타낸다.

과잉온도 차온(OT ΔT) 원자로 정지계통은 핵비등이탈 설계기준이내의 운전과 고온관 핵비등(DNB)제한치이내 운전을 보장하기 위한 목적으로 T_{avg} 변화, 가압기압력 변화, 중성자속 편차

등에 따른 가변 설정값을 가진다. 또한 OP ΔT 원자로 정지계통은 노심 일부에서 일어나는 과도한 선형 열발생 증가율(LHGR)에 의한 과도현상 중 연료중심선 용융(fuel centerline melt)으로부터 보호하기 위한 목적으로 T_{avg} 변화율, 중성자속 편차(실제는 0으로 설정), 출력 등에 따른 가변 설정값을 가진다²⁾. 이러한 개념을 도해하면 그림1과 같다. 이러한 보호 목적으로 계통에 동적 보상기가 설계되어 있다.

2. 과잉출력 차온 동적 보상기 응답

2.1. 개 요

국내 웨스팅하우스 원전 정지 변수 관련 동적 보상기는 모두 개루프에 사용되고, 보상기는 입력신호를 과도상태에서 동적 보상한다³⁾. 보상기 출력신호는 비교기 (bistable)에 들어가 동작 설정점(setpoint)과 비교되고, 설정값을 초과하는 경우 원자로 정지신호를 발생시켜 그림1 및 그림2와

같이 원자로를 트립 시키게 된다.

이러한 경우 시정수의 크기는 원자로 정지시간에 결정적인 역할을 하게 된다. 또한 아날로그 회로 채택원전의 경우에는 동적보상기로 자체의 고유drift⁴⁾ 현상으로 인하여, 핵연료 교환 주기마다, 표2의 동적보상기의 시정수를 교정하도록 관련 기술기준은 규정하고 있다⁵⁾⁶⁾.

원전 정기 검사의 교정시 적용하는 시정수의 평가에 대하여서는 오차 함수에 대한 시간 응답 분석을 통해 미분-지연 보상기와 진상-지상 보상기의 경우 0초 근방에서 오차가 매우 크게 나오게 됨을 계산하여 보이고, 실제 교정시에도 0초 근처의 출력으로 시정수를 교정하는 것에 큰 의미를 두지 말 것을 제안한 바 있다⁷⁾.

미분-지연 동적 보상기가 사용되는 계통은 원자로 정지 계통의 '출력 영역 中性子束 線束 比率(+2.5% / 초)트립과 過剩出力 差溫 노냉각수 평균온도(T_{avg}) 변화율에 의한 트립이 있는 데, 중성자 선속비율에 대한 입력신호는 내장된 시험모듈로 행하므로 OP ΔT 변수에 대한 원자로 정지 응답시간 시험결과와 이를 모의한 결과에 대해서 논의한다.

2.2. 과잉출력 차은 동적보상기의 역할

출력에 따른 냉각재 밀도와 열용량의 변화 때문에 원자로 열 출력은 차은에 정확하게 비례하지 않는다. 따라서 과도한 LHGR가 발생할 경우 핵연료의 용융 방지 보호장치에 T_{avg} 개념을 도입하고 열수력적 지연시간을 동적 보상할 필요가 있다. 실제의 열출력을 측정하여 비교기에 기준값으로 입력하고, 과도상태에서는 이를 아래 식(1),(2)에서 계산된 값과 비교하여 - 미리 설정된 K_4 에 도달하기 이전에 핵연료를 보호하기 위하여 - 원자로를 미리 정지시키는 것이 보상기의 역할이다.

2.3. 과잉출력 차은 원자로 정지 설정식

고리 1호기와 고리3/4, 영광1/2호기의 가변 OP

ΔT 정지 설정식은 다음 식(1),(2)과 같고, 이를 도해하면 그림1과 같다.

[고리 1호기 과잉 출력 차은 정지 설정치]

$$\Delta T_{set} \leq \Delta T_s [K_4 - K_5 \left(\frac{T_5}{1+T_3} \right) T - K_6 (T - T_s) - f_2 (\Delta z)] \dots (1)$$

여기서 ΔT_{set} 은 온도로 표현된 정지 설정치이고, ΔT_s 은 100%P.U. 출력 差溫으로 36.5°C이다. 상수 K_4 (1.093 °C/°C)는 사전 설정 과잉출력값 108.5 %에 해당하는 차은이득이다. 우변의 제2항은 핵연료의 열전달과 냉각재 이동 지연시간 보상 (변화율로 예측)항이고, 0초에서의 이득은 $T_5 \times T_3$ 로 결정된다. 고리1호기의 K_5 상수값은 K_6 의 25배 값인 0.0475/°C(4.75%/°C)이다.

우변 제3항은 ΔT 와 원자로 열출력의 상관관계에서 냉각재의 밀도 및 열용량을 고려하는 항이고, K_6 (0.00198 / °C)은 설정 기준 온도 T_s (301.11°C)보다 평균 온도가 클 경우에만 적용되며, 작을 경우의 이득은 0이다. f_2 는 상하부 출력 편차에 의한 과잉출력 감소분으로 - 설계에서 상수 K_4 로 연료용융이 보호되므로 - 0으로 설정되어 있다.

[고리3/4, 영광1/2과잉출력 차은 정지 설정치]

$$\Delta T_{set} = [K_4 - K_5 \left(\frac{T_5}{1+T_3} \right) T - K_6 (T - T_s) - f_2 (\Delta z)] \dots (2)$$

고리1호기 식과 차이는 출력으로 온도 환산 출력식으로 표현되었다는 것과 이득이 다른 것인데, 발전소 또는 핵연료마다 약간 이득이 다르다. K_5 / K_6 의 값도 25배가 아닌 16배이다. 상수 K_4 는 108.78%, K_5 는 3.6% / °C, K_6 (0.2263% / °C)는 설정 온도 T_s (309.2°C)보다 클 경우에 과잉출력의 상승을 억제하는 값이다⁹⁾. f_2 는 상하부 출력 편차에 의한 과잉 출력 감소분으로 0으로 설정되어 있다¹⁰⁾.

2.4. 원자로 정지 응답시간의 모의 방법

호기별 원자로 정지 계통의 응답시간은 표1및

표3과 같이, 관심 대상인 OP ΔT /OT ΔT의 T_{avg} 관련 응답시간을 측정하는 국내 발전소 자료를 수집·조사하였다. 원자로 정지응답시간 시험은 그림2와 같이 회로를 구성하여 시험한다.

이 회로를 SIMULINK (소프트웨어명)로 구성하여 그림3과 같은 스텝입력과 램프입력에 대하여 응답시간을 비교하도록 모의하였다. 실제 비교기 동작시간까지를 측정할 수 있도록 그림6과 같이 결선 하였다. 이 그림에서 $step * OPΔT * T_{avg}$ 및 $ramp * OPΔT * T_{avg}$ 블록은 그림3의 y_step 및 y_ramp 출력을 내는 계층블럭이다. 또한 측정熱出力이 100% P.U.인 경우, 이를 비교기로 계산된 트립설정치 출력과 비교하여 -0.2%에서 pick-up 동작, +0.2%에서 drop-out 동작을 시키도록 비교기 값을 설정하여 원자로 트립신호가 출력되는 시간을 측정할 수 있도록 하였다. 관련 회로도11), 관련 설정치 자료집12)13), 시운전관련 자료14)을 참고하여 온도를 출력으로 비교할 수 있도록 %P.U.단위로 환산하였다.

2.5. 모의 시험의 가정과 결과

계단응답을 모의입력으로하여 모의한 결과, 0.5초정도에서 80%까지 트립설정치가 떨어지고, 비교기(Bistable)가 100% 열출력과 비교하여 약 0.1초이내(실제 시험 결과는 0.064초)에 트립됨을 그림5와 같이 확인할 수 있다. 모의 시험은 변수 변화를 고정하고 변화에만 동작하도록 회로를 구성하였다. 일부 발전소 시험 절차는 고온관은 온도만을 변화시키기도 하는 데, 이러한 경우에는 측정 열출력까지 따라서 변화되게 되므로, T_{avg} 변화를 모의할 경우에는 고온관과 저온관 모두 같은 크기로 변화시켜야 할 것이다. 변화율 입력으로 1%/초 (108%→88%/20초)에 해당하는 온도저항값의 변화(0.365℃/초)와 조정이득을 주었다.

이러한 온도변화에 의한 출력 변화는 지연동

작과 겹쳐져 20초에 88% 출력까지 감소됨을 보여준다. 계단 신호입력으로 짧은시간(1초 이내)에 비교기는 이미 동작(pick-up action)되어서 그림5는 시간 축이 커서 동작 순간이 보이지 않는다. 그러나, 변화율에 의한 비교기 동작점은 3초 근처에서 동작 (pick-up)함을 확인할 수 있다. 이를 고리1호기에서 측정한 결과인 그림4로 계단 입력에 대한 시간응답(0.064초 동작)을 비교할 수 있다.

3. OP ΔT동적 보상기 응답시간 평가

3.1. 동적보상기 응답시간에 영향을 미치는 요소

일정 기율기의 입력을 가한 경우, 미분-지연 동적보상기의 분자항이 이득값을 결정하므로, 만약에 분모항의 지연 요소가 없다면 0초에서 일정 이득, 즉 미분값인 상수값을 출력하나, 분모 지연항(10초 시정수의 영향)으로 인하여 출력은 지연된다. 그러나, 0초에서 기율기가 무한대인 계단 신호를 입력하는 경우 미분동작으로 인하여 출력은 매우 빠르게 0초 시간축에 붙어서 이득값만큼 변화하고, 이후 안정된 값으로 지연항시정수에 의하여 감쇄된다. 그림5에서 1초이내에서 급하게 벌어져 떨어지는 것은 보상기 전단에서 온도저항/전류 변환기의 지연시간이 포함되어 있기 때문이다.

3.2. 동적보상기 응답시간 측정방법의 개선 제안

시험 절차에서 온도저항의 변화율보다는 간단한 전류/전압 변화율 신호를 주입하는 방법을 사용하면 용이하게 변화율 주입이 가능하다. 이때 저항-전류/전압 변환 지연시간을 별도로 측정하여 응답시간에 삽입시켜야 할 것이다. 추가로 T_{avg} 변화율 입력시 고온관 온도만을 상승시키지 않도록 하여야 할 것이다. 또한 미분-지연 보상을 제외하고 동적보상기에 계단 입력신호를 주

입하는 경우에는 그림7-1과 같은 방법으로 시험을 하는 경우에는 불필요하게 입력신호가 0을 거치게 되므로 일종의 glitch로 계단입력이 변화하므로 그림7-2와 같은 방법으로 개선하는 것이 바람직하다.

3.3. 결과의 논의

논문의 모의시험결과는 하드웨어를 사용하여 확인한 내용이 아니므로 실제시험 결과는 다소 차이가 있을 수 있다. 현장의 보상기의 이득, 구성 요소의 지연시간 등에 따라 여러 가지 해석이 달라질 수도 있다. 다만 여기에서 사용된 방법은 위에서 가정한 조건에서 성립된 계산 결과이다.

그러나, 발전소 현장시험절차는 제안사항을 고려할 경우 많은 개선여지가 보인다. 결론적으로 변화율 신호를 주입하여야 할 정지신호 보상기(미분-지연)에 계단 신호를 주입하면 반드시 응답시간이 빠르게 나올 수 밖에 없다는 것을 확인하였다.

4. 결론 및 향후 과제

모의실험결과와 평가에서 살핀 바와 같이 미분-지연 보상기를 거치는 원자로 정지 응답시간 측정은 반드시 적합한 변화율 입력 선택이 중요하다. 만약 계단 신호로 입력할 경우에는 응답이 과도하게 빠르게 나오게 된다는 것을 이론과 모의 시험결과를 통해 이를 보이고, 이에 대한 시험 방법의 개선을 제안하였다. 미분-지연 동적보상기를 제외한 보상기에 계단 입력신호를 주입하는 경우에는 입력신호가 0을 거치지 아니하는 방법도 제시하였다.

특정 저항온도 검출기의 고유지연시간 측정, 특정 변환기의 시간응답의 측정은 추후 확인하여야 할 과제로 남아있다.

참고문헌

1. 한국원자로안전기술원, "국내 원전 기술지침서 표준화연구", KINS/GR-095, 1993. 8., p.A-110
2. Westinghouse, "Design Bases for the Thermal Overpower DeltaT and Thermal Overtemperature DeltaT Trip Function", WCAP-8745-P-A, Sep. 1986
3. 김 종석, "선형제어시스템 공학", 청문각, 1990
4. US Regulatory Guide 1.105, "Instrument Setpoints for Safety related Systems, Feb. 1986.
5. Instrument Society of America, "Setpoint for Nuclear Safety Related Instrumentation", ANSI/ISA S 67.04- 1988, 1988. 2. 4
6. 고리1/2/3/4호기, 영광1/2호기, 울진1/2호기 최종안전성 분석보고서 §16.3/4 표4.3-1, 표 16.11
7. 주윤표의, "가압 경수로형 원전의 안전 정지 변수 관련 동적 보상기 시정수 교정 평가", '95년 한국원자력학회 춘계학술발표 논문집, p. 361 - p.366
8. 원자로 정지계통 응답 시험 절차서, 고리 1(1-9-346), 고리2(2-9-317), 고리3/4(경기-계-21), 영광1/2(점검733), 울진1/2(주기-142)
9. 한전, "영광1,2 호기 프로세스제어스켈링", 영광1발전소, 1995.
10. 고리3,4호기, Setpoint Study, WCAP-10348
11. 고리 1/2/3/4호기, Process Control Block Diagram
12. 고리 1/2/3/4 호기, "운전주의, 제한, 설정치 (PLS)"
13. 고리3,4호기, Process Control Systems Scaling Manual, WCAP-10378
14. 고리 2호기 Start-up Manual, KPR - SU - 2.7.1, 4/14/81

표1. 원자로 정지 계통 응답 제한 시간 비교
 (출처: 해당호기 운영기술지침서)(단위:초)

안전정지변수	호기별 원자로 정지 계통 응답시간				
	고리 1	고리 2	고리 3/4	영광 1/2	울진
1 선원영역 증성자속	-	-	-	-	0.6
2 중간영역 증성자속	-	-	-	-	0.6
3 출력영역 증성자속 저설정치	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6
4 출력영역 증성자속 고설정치	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6
5 출력영역 증성자속 고 증가율	0.5	-	-	-	0.6
6 출력영역 증성자속 고 감소율	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6
7 과잉 온도 차은	-	4.0	5.75	5.75	6.0
8 과잉 출력 차은	6.0	-	5.75	5.75	6.0
9 원자로 냉각계 계통 저유량	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
10 원자로 냉각계 펌프 저전압	1.2	1.5	1.5	1.5	-
11 원자로 냉각계 펌프 저주파수	0.6	0.6	0.6	0.6	-
12 원자로 냉각계 펌프 저-저 속도	-	-	-	-	0.7
13 원자로 냉각계 펌프 차단기개방	-	-	-	-	1.0
14 가압기 저압력	1.0	2.0	2.0	2.0	1.0
15 가압기 고압력	1.0	2.0	2.0	2.0	1.0
16 가압기 고수위	2.0	-	-	-	2.0
17 급수/중기유량불일치+SG 저수위	2.0	-	-	-	2.0
18 증기발생기 저-저 수위	2.0	2.0	2.5	2.5	2.0
19 증기발생기 고-고 수위+ P-7	-	-	-	-	2.0
20 안전 주입신호	2.0	2.0	2.0	2.0	1.0
21 터빈 트립	1.0	-	-	-	0.6

표 2. 대표적인 안전정지 변수 관련 동적 보상기 전달함수
 (출처: 고리3/4,영광1/2 PLS)

동적 보상기명	전달함수	보상기 형식
1 차은 보상기	$\frac{1+12s}{1+3s}$	진상-지상
2 과은도 차은 보상기	$\frac{1+22s}{1+4s}$	진상-지상
3 과출력 차은 보상기	$\frac{10s}{1+10s}$	미분-지상
4 SG 저-저 수위 보상기	$\frac{1}{1+s}$	지상
5 가압기 저압력 보상기	$\frac{1+2s}{1+s}$	진상-지상

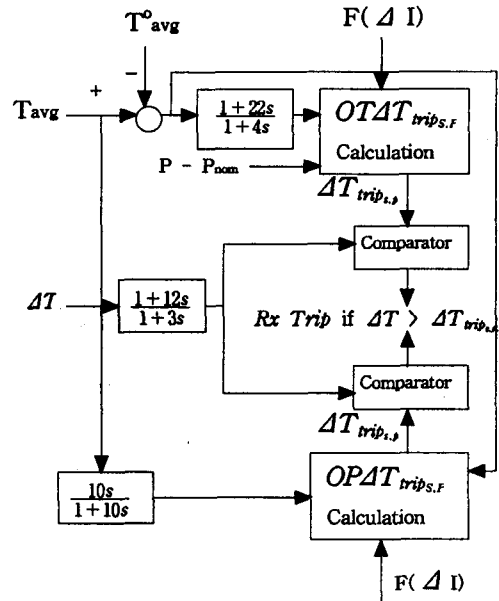


그림1. OP ΔT / OT ΔT 원자로 보호회로 개념도
 (출처: WCAP-8754)

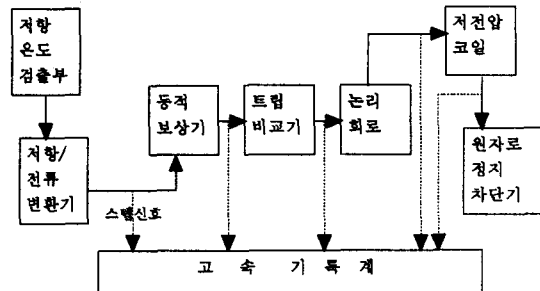


그림2. 과잉출력 ΔT 원자로정지 응답시간 시험회로
 (출처: 고리1/3/4,시험절차서)

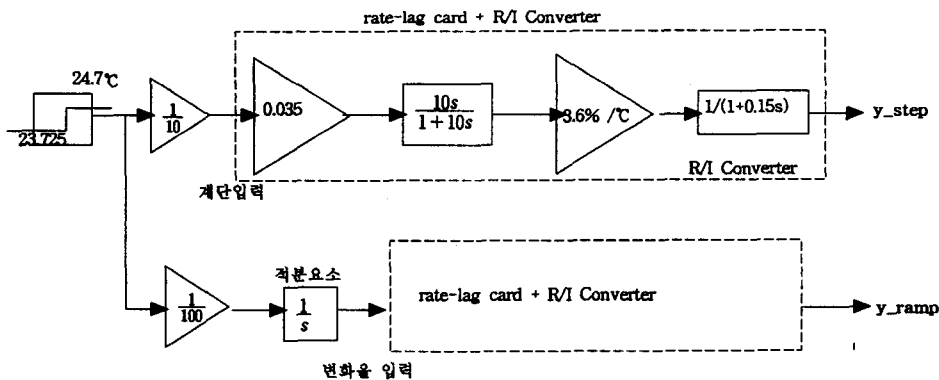


그림3. 계단 입력과 변화율 입력의 모의 회로 구성도

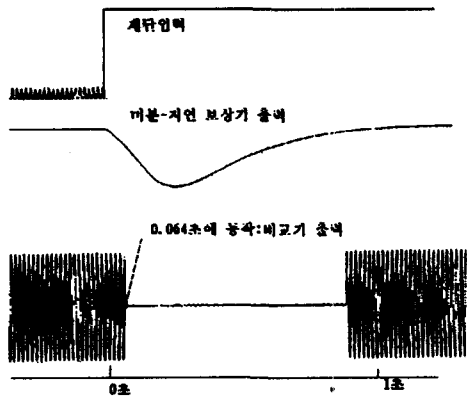


그림4. OP ΔT 응답시간 시험 결과값

[SIMULINK]

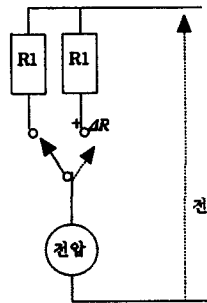


그림 7-1

glitch 발생가능
계단입력 회로

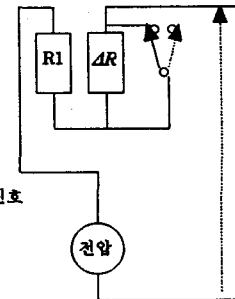


그림7-2

제안 계단입력회로

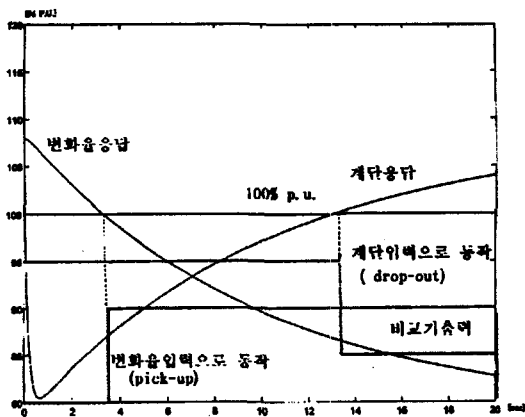


그림5. OP ΔT 응답시간 모의시험 결과값

표 3. 과잉은도/출력 응답시험방법 비교

측정변수		고리1	고리2	고리3,4	영광1,2	울진1,2
과잉 은도 차은	1.증성자속변화	X	X	X	X	O
	2.가압기 압력변화	O	X	X	X	O
	3.(Tavg-To) 변화	O	O	O	O	O
	4. RCP 속도변화	NA	NA	NA	NA	O
과잉 출력 차은	1.증성자속변화	X	X	X	X	O
	2.(Tavg-To) 변화	O	X	O	O	O
	3. Tavg 변화율	O	X	X	X	O
	4. RCP 속도변화	NA	NA	NA	NA	O

註. O : 시험, X : 시험생략, NA : 정지변수없음
[출처: 시험절차서: 고리1(1-9-346), 고리2(2-9-317), 고리3,4 (경기-계-21), 영광1,2 (점점733), 울진1,2(주기-142)]

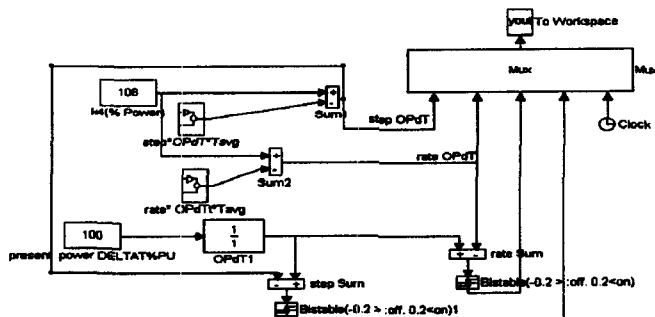


그림6. OP ΔT 응답시의회로의 결선간 모의 회로의 결선