

문 병 희^o

한국전력공사 기술연구원

A study on the digitalize and application of Steam Generator level control system for nuclear power plant

Byung-heuee, Moon

KEPCO Research Center

Abstract

A control for Steam Generator (S/G) level is very difficult by automatic control mode but also manual control mode during plant start up and/or low power level operation with the analog control system because of a non-nominal process responce . The goal of this study is to improve and computerize and applicate for KO-RI #1 Steam Generator level control system.

1. 서 론

원자력발전소 제어계통중 운전 정지에 많은 영향을 주고 제어하기 가장 까다로운 것은 증기발생기 수위 제어계통으로 특히 가압경수로형(PWR) 발전소의 경우 기동시 및 저출력시에 자동제어는 물론 수동제어도 매우 어려운 상태에서 운전원에게 많은 부담을 주고 있는 실정이다.

따라서 증기발생기 수위 제어 계통의 제어방법 개선과 관련 설비의 개조, 교체등이 필요하나 현재 고리 1호기에서 사용하고 있는 아나로그 제어설비와 관련 설비에 대한 변경은 그 변경 내용이나 규모가 너무 커서 실현성과 경제성에 문제가 있다. 본 연구의 목적은 기존 설비의 변경을 최소화하고 제어 성능을 향상시키며 다가오는 첨단 디지털 제어 시대에 대비하여 디지털 제어의 원전 적용기술을 개발, 축적하고 고리 1호기의 실제 룠에 적용함으로써 제어성능과 신뢰도를 향상시키고자 함.

2. 증기발생기 수위 특성

가. 증기발생기 (S/G: Steam Generator)

화력발전소는 보일러내에서 기름, 석탄, 가스등을 연소시켜 그 열로 물을 가열하여 증기를 생성하지만 가압경수로형 원자로(PWR)의 원자력발전소에서는 원자로내의 우라늄이 핵분열시 발생하는 열로 1차계통의 물을 가열한후 가열된 1차계통 물이 증기 발생기내에서 2차계통인 급수를 가열하여 증기를 발생시키도록 되어 있다. 즉 증기발생기는 일종의 열교환기 역할을 하며 증기를 발생시키는 것으로 화력발전소의 증기는 과열증기

(Super Heated Steam)이지만 증기발생기의 증기는 건도 99.75% 이상의 포화증기(Saturated Steam)이다.

나. 수위특성 분석

(1) 수위측정 및 유지

증기발생기내에는 하부의 물과 상부의 증기가 존재하는데 하부의 물의 높이를 증기발생기 수위라 한다.

증기발생기 수위측정은 증기발생기 내부의 대부분을 측정대상으로 하는 광역수위(Wide Range Level)과 주요 운전부분을 측정 대상으로 하는 협역수위(Narrow Range Level)로 나누어지며 광역수위 측정 범위는 약 1420[cm]정도이고 협역수위는 약 325[cm]정도이다. 일반적으로 증기발생기 수위라 함은 협역수위를 말한다.

증기발생기 수위는 일정 범위내에서 유지되어야 하는데 수위가 낮아지면 열교환 부분이 수면위로 노출되어 1차계통의 Heat Sink 상실로 인한 원자로 과열을 막기위해 원자로를 정지시켜야 하기 때문이다.

(2) Swell 및 Shrink 현상

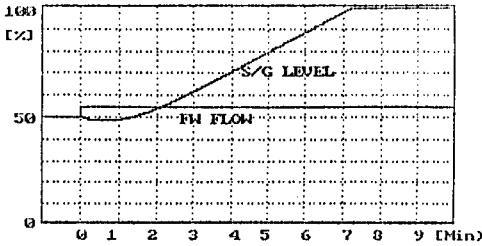
증기발생기 하부의 물은 가열, 비등하기 때문에 물과 함께 기포 형태의 증기가 혼재하고 있다.

동일한 질량의 물에서 기포의 영향을 분석하면 물속의 기포가 많으면 부피가 늘어나 수위는 증가하고 기포가 적으면 부피가 줄어들어 수위는 감소하게 된다. 발전소 운전중 갑작스런 증기유량의 증가로 증기압이 감소하면 물속의 증기량이 늘어나서 수위가 증가하는데 이런 현상을 Swelling이라 하며 반대로 증기유량의 감소로 증기압이 증가하면 기포량이 줄어들어 수위는 감소하는데 이런 현상을 Shrinking이라 한다.

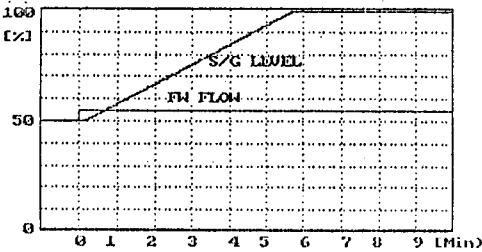
(3) 급수온도의 영향

증기발생기에 공급되는 급수의 온도가 낮을 경우에는 수위가 저하되어 급수유량을 증가시키도 수위가 증가하는 것이 아니라 낮은 온도의 급수가 증기발생기내의 물을 웅속시켜 수위는 오히려 감소하며 계속된 급수의 증가에도 수위가 증가하지 않다

가 공급된 급수가 가열원후 수위가 증가하기 시작하여 급수유량을 감소시키더라도 수위는 이미 공급된 급수증가량 만큼 계속 증가한다. 즉 급수온도가 낮으면 조작기의 조작량과 제어변수의 응답이 비정상적인 물리현상을 보이므로써 자동제어는 물론 수동제어도 매우 어려운 제어 대상이다.



< 그림 1 > 급수온도 = 50 'C 일 때의 수위 특성



< 그림 2 > 급수온도 = 150 'C 일 때의 수위 특성

급수온도가 낮을 때 급수유량 증가에 따른 수위 변화는 크게 다음의 2가지 형태로 나누어 분석된다.

- (가) 유량차에 따른 일반적인 적분 형태의 수위 증감
- (나) 저온 급수유량 증가에 따른 기포계수의 영향

첫번째 항의 응답 전달함수

$$\frac{Ls(S)}{Fw(S)} = \frac{G1}{S}$$

두번째 항의 일반적인 응답 전달 함수는 다음과 같다.

$$\frac{Ld(S)}{Fw(S)} = \frac{G2}{1+\tau 2S}$$

따라서 복합적인 응답은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{L(S)}{Fw(S)} &= \frac{Ls(s)}{Fw(s)} + \frac{Ld(S)}{Fw(S)} \\ &= \frac{G1}{S} + \frac{G2}{1+\tau 2S} \\ &= G1 \frac{1 - (G2/G1 - \tau 2) S}{S(1+\tau 2S)} \end{aligned}$$

$$\tau 1 = \frac{G2}{G1} - \tau 2 \text{ 라 하면}$$

$$\frac{L(S)}{Fw(S)} = G1 \frac{1-\tau 1S}{S(1+\tau 2S)}$$

위의 전달함수에서 G2 와 τ2 는 급수 온도에 따라 변하는 가변수이기 응답이 달라져 고정값의 PID 제어기로는 자동제어가 어렵다.

급수 온도가 높을때에는 급수 유량의 변화에 따른 수위 변화응답이 빠르기 때문에 제어하는 데 지장을 주지 않는다.

(4) 기동시 및 저출력시 수위제어 불안

원자력 발전소 기동시와 저출력시에 낮은 급수 온도와 증기 방출(STEAM DUMP)에 의한 증기압 변화, 제어 밸브의 낮은 개도 등으로 증기 발생기 수위제어에 많은 불안 요소가 있어 자동제어 뿐만 아니라 수동제어도 매우 어렵다.

3. S. G SIMULATOR 개발

S/G LEVEL DCS(DIGITAL CONTROL SYSTEM) 을 개발하기 위해 최적제어 알고리즘 연구에 이용하고 아날로그 제어설비와 DCS 의 INTERFACE 기술개발과 디지털 제어 프로그램 개발, 검증에 활용하는 등 DCS 성능시험, 개발 대상의 PLANT 대응 목적으로 개발하였다.

개발된 주요 프로그램 내용은 다음과 같다.

- 입출력 (I/O) 처리 프로그램
- SIMULATION 기본 BLOCK 프로그램
- 프로세스 모델링, 프로그램
- 그래픽 프로그램
- DCS 용 제어 알고리즘
- REAL TIME SIMULATION
- ON-LINE MENU 프로그램

4. S/G LEVEL DCS 개발

제어 프로그램은 DCS 개발의 목표를 달성하기 위해 최적제어 구현, FTCS (FAULT TOLERANT CONTROL SYSTEM), 및 ACS/DCS AUTO BACK UP 등 새가지 부분에 역점을 두었다.

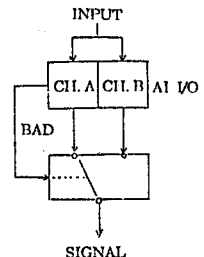
가. SIGNAL VALIATION 및 FTCS

모든 입력 신호는 I/O MODULE 을 통하여 2 중화 하여 I/O MODULE 의 고장에 대비하였으며 제어에 사용되는 주요 아날로그 신호는 검증, 판별, 선택프로그램을 거쳐 사용하고 신호의 이상 유무 판별 결과에 따라 경보 또는 AUTO BACK UP 프로그램이 수행하도록 하였다.

제어에 사용되는 입력의 주요 신호 검증 내용은 다음과 같다.

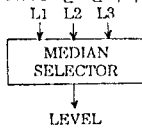
(1) INPUT SIGNAL (ANALOG, DIGITAL)

- I/O MODULE 2 중화 : CH. A, CH. B
- 정상 운전중 CH. A 사용
- CH. A 고장시 CH. B 로 전환



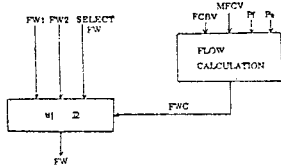
(2) S/G LEVEL

- 3 CH INPUT (ACS 1 CH 사용)
- MEDIAN SIGNAL 을 선택하여 사용



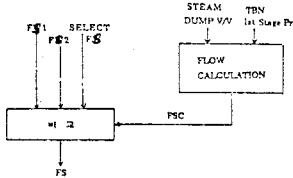
(3) FW FLOW

- FLOW 2 CH, SELETEDC FLOW CH(ACS 사용)
- V/V 궤도와 DP 로 FLOW CALCULATION
- 위의 신호를 비교하여 제어 신호 선택



(4) STM FLOW

- FLOW 2 CH, SELECTED FLOW CH(ACS 사용)
- STEAM DUMP V/V 궤도와 TBN 1ST STAGE Pr.로 FLOW CALCULATION.
- 위의 신호를 비교하여 제어 신호 선택



나. 수위제어 프로그램

(1) BYPASS CONTROL LOOP

기동시 및 저 출력시에 사용하기 때문에 증기 발생기 수위 특성에 맞도록 프로그램에 의해 제어 되도록 하였으며 개요는 다음과 같다.

급수 온도가 낮을 때에는 수위 응답이 늦기 때문에 비례 GAIN 은 작게 하고 적분 시간은 크게하여 제어계의 안정을 이루고 급수 온도가 낮을 때에는 수위 응답이 늦기 때문에 비례 GAIN 은 작게 하고 적분 시간은 크게 하여 제어계의 안정을 이루고 급수 온도가 증가함에 따라 기레 GAIN 은 증가 시키고 적분시간은 감소시키도록 하였다.

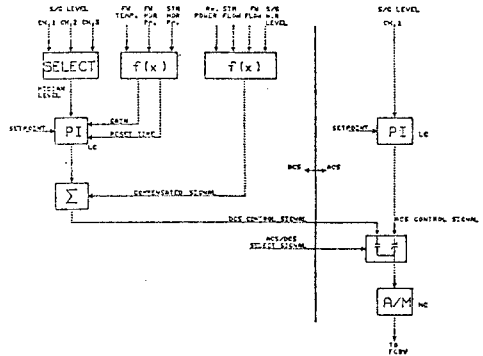
비례 GAIN 의 계산에는 급수 온도와 급수 헤더 압력과 증기 압력 차 중 변수가 사용되었으며 낮은 GAIN 으로 인한 늦은 응답을 보상하기 위해 FEED FORWARD 신호를 추가하여 속응력을 증대 시켰다.

계산에 사용된 변수로는 원자로 출력, 증기 유량, 급수 유량, 광역수위 등이 있다.

(2) MAIN CONTROL LOOP

정상 운전중에 사용하기 때문에 급수 온도가 높아서 ACS 로 자동제어가 가능하다. 따라서 DCS 제어 방식도 ACS 와 마찬가지로 3 ELEMENT의 CASCADE PI 제어가 되도록 프로그램 하였다.

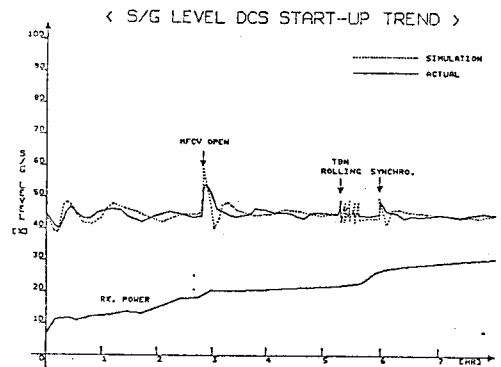
다만 DCS 에 의해 광범위하게 제어할 수 있도록 하기 위해 BYPASS LOOP 에서와 같이 PI 값을 계산 하면서 사용하도록 하였다.



< 그림 3 > Digital Control Block Diagram

다. 성능 시험

주급수 펌프가 운전된후 DCS 운전 MODE 로 증기 발생기 수위 제어가 저출력 상태에서 자동으로 이루어 지는지 시험한 결과 원자로 출력 변화에 따라 증기 발생기 수위가 목표치인 +/- 5% 이내로 제어되어 양호하였다.



< 그림 4 > Simulation 결과 및 실제 DCS 제어 상태

5. 결론

본 연구 과제는 원자로 발전소 저출력시 증기 발생기 수위 제어 불안을 해소하기 위한 제어 계통 디지털화 적용에 관한 연구로서 새로운 제어 알고리즘과 제어 계통 2 중화, FTCS 등 DCS 의 원전 적용 기술을 개발하고 확보하여 실제 고리 1 호기에 설치 운전함으로써 그 성능을 입증하였으며 보다 나은 DCS 제어 기술 개발의 시급성이 되었다.

참 고 문 헌

- 1) Rolf Isermann, Digital Control Systems, 1981
- 2) F. G SHINSKEY, Process Control Systems
- 3) Westinghouse Electric Corp., Low Power S.G Water Level Control System Impronevements, WCAP-11126, 1986
- 4) KO-RI #1 Process Control Block Diagram