

# 원자력발전소의 증기발생기 수위 디지털 제어 시스템 개발 및 적용에 관한 연구

(A study on the Development and Application of a Steam Generator Level Digital Control System for Nuclear Plants)

문병희\* · 김경철

(Byung-Hee Moon · Kyung-Chul Kim)

## 요 약

원자력발전소 제어계통중 운전 정지에 많은 영향을 주고 제어하기 가장 까다로운 증기발생기 수위 제어는 특히 기동시 및 저출력시에 자동제어는 물론 수동제어도 매우 어려운 상태이다. 증기발생기 수위특성을 분석하여 안정성이 보장된 증기발생기 수위 제어 계통의 제어방법을 개선하여 제어 성능과 신뢰도를 향상시킬 수 있는 알고리즘을 개발하고 디지털 제어 시스템으로 구현하여 실제 발전소에 설치 적용하였다.

## Abstract

It is a very difficult to control the S/G(Steam Generator) levels for not only automatic operation mode but also manual operation mode by operators in case of start up or low power in PWR nuclear power plants. The object of this study is to develop and applicate a DCS(Digital Control System) that process the reliable control algorithm in order to control S/G levels automatically from a start-up to full power operation mode for nuclear power plants.

Key Words : Steam Generator, Digital Control System, Nyquist, Simulation

## 1. 서 론

본 논문에서는 원자력발전소의 증기발생기 수위특성을 분석, 모델링하여 안정성이 보장되며 수학적으로 증명된 새로운 제어 알고리즘을 도출한 후 이것

을 디지털 제어 시스템을 이용, 구현하여 실제 발전소에 적용하고자 한다.

본 연구의 목적은 증기발생기 수위 제어 통의 제어방법을 개선하고 제어 성능과 신뢰도를 향상시킬 수 있는 방안을 제시하고 이것을 디지털 제어 시스템을 이용해서 구현하여 실제 발전소에 적용하는데 있다.

연구결과와 적용으로 발전소 기동중 저출력시의 바이패스제어밸브(Bypass Control Valve)에 의한 수위 제어 자동화, 출력 증감에 따른 바이패스제어밸브

\* 주저자 : 홍익대학교대학원 전기공학과 박사과정 수료  
Tel : 041-860-2610, Fax : 041-863-7605  
E-mail : moonbh@dailysecure.com  
접수일자 : 2002년 3월 23일  
1차심사 : 2002년 3월 28일  
심사완료 : 2002년 4월 29일

와 주 제어밸브(Main Control Valve)의 중첩운전과 절체 자동화, 계통병입후 전출력시 까지 주 제어밸브에 의한 수위 제어 완전 자동화를 이루었으며, 또한 기존 아날로그 제어 계통(Analog Control System, ACS)과 신설한 디지털 제어 계통(Digital Control System, DCS)의 병행 운전이 가능하도록 설계하였다.

## 2. 증기발생기 수위 제어

원자력발전소 제어계통중 운전 정지에 많은 영향을 주고 제어하기 가장 까다로운 것은 증기발생기 수위 제어계통으로 특히 가압 경수로형(Pressurized Water Reactor, PWR) 발전소의 경우 기동시 및 저출력시에 자동제어는 물론 수동제어도 매우 어려운 상태이다. 이 현상은 전세계 가압경수로 원자력발전소의 공통된 문제점으로 여기에 대한 연구가 다방면으로 수행되고 있는 실정이며 그 일환으로 디지털 제어설비를 이용하여 수위제어 문제를 해결하였다.

### 2.1 증기발생기 수위 특성

#### 2.1.1 증기발생기(S/G : Steam Generator)

가압 경수로형 원자로의 원자력발전소에서는 원자로내의 우라늄이 핵분열시 발생하는 열로 1차계통의 물을 가열한 후 가열된 1차계통 물이 증기 발생기내에서 2차계통인 급수를 가열하여 증기를 발생시키도록 되어 있다. 즉 증기발생기는 일종의 열 교환기 역할을 하며 증기를 발생시키는 것으로 화력발전소의 증기는 과열증기(Super Heated Steam)이지만 증기발생기의 증기는 건도 99.75 [%] 이상의 포화증기(Saturated Steam)이다[1].

#### 2.1.2 수위 측정 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)와 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 범위 내에서 유지되어야 하는데 수위가 낮아지면 열교환 부분이 수면위로 노출되어 1차 계통의 열부하(Heat Sink) 상실로 인한 원자로 과열을 막기 위해 원자로를 정지시키며 수위가 높아지면 습분이 많이 포함된 증기가 터빈에 공급되므로 터빈 브레이드 손상을 막기 위해 터빈을 정지 시켜야 하기 때문이다.

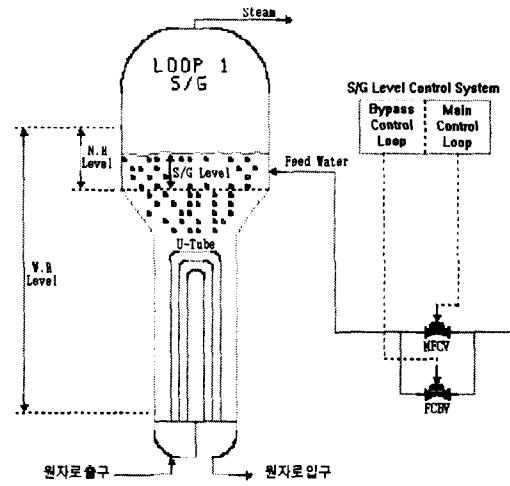


그림 1. 증기발생기 수위 및 제어 루프  
Fig. 1. S/G level and control loop

#### 2.1.3 Swelling 및 Shrinking 현상

증기발생기 하부의 물은 가열, 비등하기 때문에 물과 함께 기포형태의 증기가 혼재하고 있다. 발전소 운전중 갑작스런 증기유량의 증가로 증기압이 감소하면 물속의 기포량이 늘어나서 수위가 증가하는데 이런 현상을 Swelling이라 하며 반대로 증기유량의 감소로 증기압이 증가하면 기포량이 줄어들어 수위는 감소하는데 이런 현상을 Shrinking이라 한다[2].

#### 2.1.4 급수온도의 영향

증기발생기에 공급되는 급수의 온도가 낮을 경우에는 수위가 저하되어 급수유량을 증가시켜도 수위가 증가하는 것이 아니라 낮은 온도의 급수가 증기발생기내의 물을 용촉시켜 수위는 오히려 감소하며 계속된 급수의 증가에도 수위가 증가하지 않다가 공급된 급수가 가열된 후 수위가 증가하기 시작하여 급수유량을 감소시키더라도 수위는 이미 공급된 급수증가량 만큼 계속 증가한다.

### 2.2 증기발생기 수위 제어 분석

급수온도가 낮으면 조작기의 조작량과 제어변수의 응답이 비정상적인 물리현상을 보이므로써 자동제어는 물론 수동제어도 매우 어려운 제어 대상이다. 보통 증기발생기 수위는 다음과 같이 표현된다[3].

$$L(s) = G_1 \cdot 1 - \tau_1 \frac{S}{S \cdot (1 + \tau_1 S)} \cdot F_{er}(s) \quad (1)$$

증기발생기 수위 전달함수에서  $\tau_1$  와  $\tau_2$  는 급수온도에 따라 변하는 가변수이기 때문에 증기발생기 수위 응답이 달라져 고정 제어값을 갖는 PID 제어기로는 자동제어가 어렵다. 급수 온도가 높을 때에는 급수 유량의 변화에 따른 증기발생기 수위 변화 응답이 빠르기 때문에 제어하는 데 지장을 주지 않는다. 발전소 기동시 계통병입전 급수온도가 낮을 때와 계통병입후 급수온도가 증가했을 때의 증기발생기 수위 응답 특성 변화는 그림 2와 그림 3과 같다.

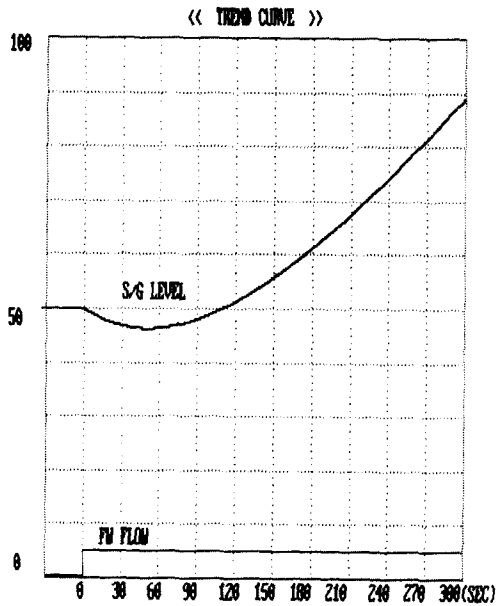


그림 2. 급수온도가 낮을 때의 수위 응답특성  
Fig. 2. Responce of level at low F. W temperature

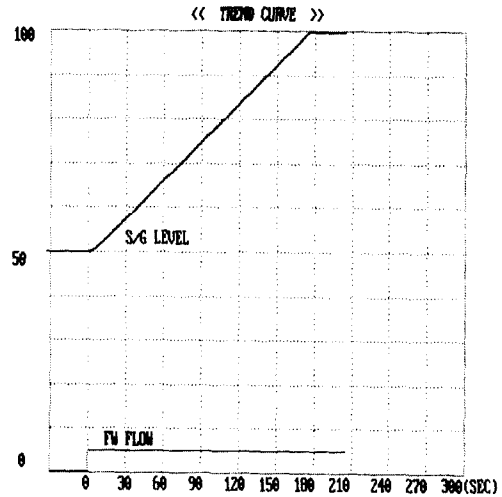


그림 3. 급수온도가 높을 때의 수위 응답특성  
Fig. 3. Responce of level at high F. W temperature

### 3. 제어 계통 안정도 분석

계통병입후 급수온도가 높을 때는 주 급수제어밸브(Main Feedwater Control Valve)에 의한 수위제어는 자동운전이 되므로 기동시 부터 계통병입 전후에 운전되는 바이패스 밸브 제어회로(Bypass Valve Control Loop)에 대한 안정도를 분석하기로 한다. 여기서 초기 가변 신호로는 수위제어 회로와 독립성을 갖는 증기유량 신호를 2[%] 증가시켜 사용한다. 분석 대상 신호는 다음과 같다.

- \* Level : 증기발생기 수위(NR)
- \* Lw : 증기발생기 광역 수위(WR)
- \* Fw : 급수유량
- \* Fs : 증기유량

분석조건은 다음과 같다.

- 수위는 설정치와 같은 50[%]를 유지하고 있다.
- 증기유량과 급수유량은 7[%/Flow]로 같다.
- PI 제어기는 자동운전 상태로 평형을 이룬다.
- 급수유량은 PI 제어기 출력변화에 따라 변화한다.
- 증기유량을 7[%]에서 9[%]로 증가시킨다.
- 수위변화와 제어기 동작상태를 분석한다.

분석 내용은 주급수 온도(Tw)가 낮을 때와 높을 때에 제어기의 비례 이득(Kp)이 제어상태에 미치는 영향을 나타내는 것으로 같은 비례 이득이더라도 주 급수 온도 변화에 따라 증기발생기 수위 제어가 안정 상태

가 되기도 하고 불안정 상태가 되는 것을 알 수 있다.

### 3.1 Simulation에 의한 제어상태 분석

Simulation에 사용한 Tool은 QUICK BASIC[8]이고, 비례이득의 변화에 따른 응답곡선을 그림 4-그림 7에 나타내었다.

#### 3.1.1 급수온도가 낮을 때의 제어상태

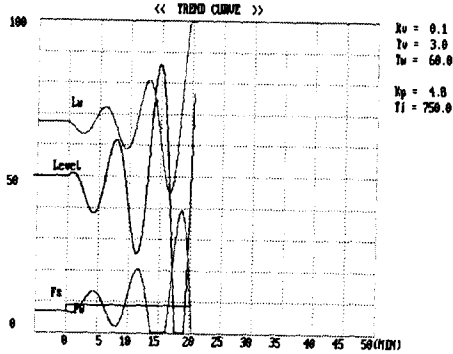


그림 4. 비례이득이 클 경우 (Kp=4.8)의 제어  
Fig. 4. Control with high gain (Kp=4.8)

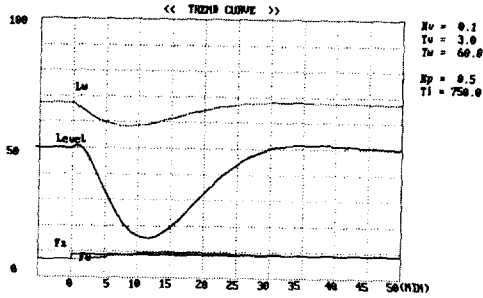


그림 5. 비례이득이 작을 경우 (Kp=0.5)의 제어  
Fig. 5. Control with low gain (Kp=0.5)

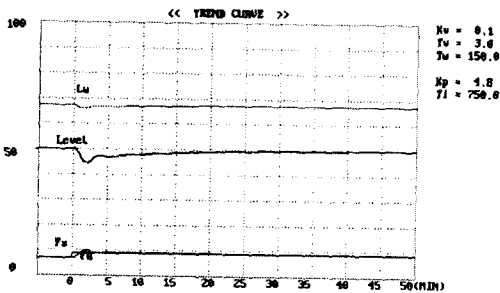


그림 6. 비례이득이 클 경우 (Kp=4.8)의 제어  
Fig. 6. Control with high gain (Kp=4.8)

#### 3.1.2 급수온도가 높을 때의 제어상태

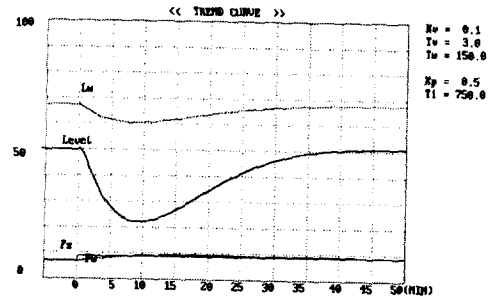


그림 7. 비례이득이 작을 경우 (Kp=0.5)의 제어  
Fig. 7. Control with low gain (Kp=0.5)

### 3.2 NYQUIST 안정도 판별법에 따른 분석

수위 제어 계통의 전달함수 블록도는 그림 8과 같고, 식(1)에서 Fer(s)를 제어밸브의 함수로 대체하면 수위제어 계통의 전달함수 G(s)는 식(2)와 같다.

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) * K_v \frac{1}{1 + T_v s} * G_1 \frac{1 - \tau_1 s}{s(1 + \tau_2 s)} \quad (2)$$

$$= K_p * K_v * G_1 * \frac{\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)(1 - \tau_1 s)}{s(1 + T_v s)(1 + \tau_2 s)}$$

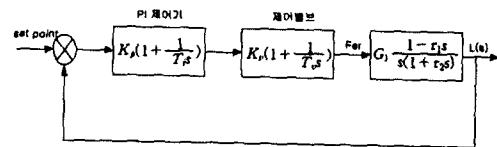


그림 8. 증기발생기 제어시스템의 전달함수 블록도  
Fig. 8. Transfer function block diagram of a steam generator control system

NYQUIST 안정도 판별식  $G(j\omega)$ 는 다음과 같다.

$$G(j\omega) = K_p * K_v * G_1 \frac{\left(1 + \frac{1}{T_i j\omega}\right)(1 - \tau_1 j\omega)}{j\omega(1 + T_v j\omega)(1 + \tau_2 j\omega)} \quad (3)$$

분석방법은 다음과 같이 하였다.

- 급수유량 변화에 따른 수위변화 계수는[3]  
 $G_1 = 0.058 [ \% / \%Flow ]$
- FCBV에 대한 급수유량 계수와 시정수는  
 $K_v = 0.1 [ \%Flow / \% ], T_v = 3 [Sec]$

등의 고정 상수로 하고, 다른 파라미터는 급수온도에 따라서 다음과 같이 적용한다.

- 급수온도  $T_w = 60$  [ O C ]일 때

$$\tau_2 = 116.0 \text{ [Sec]}, \tau_1 = 46.9 \text{ [Sec]}$$

- 급수온도  $T_w = 150$  [ O C ]일 때

$$\tau_2 = 27.0 \text{ [Sec]}, \tau_1 = 11.3 \text{ [Sec]}$$

위의 조건에서 PI 제어기의  $K_p$ 와  $T_i$ 가 다른 값일 때 수위제어 계통의 안정도를 분석하기로 한다[4].

### 3.2.1 급수온도가 낮을 때의 NYQUIST 궤적

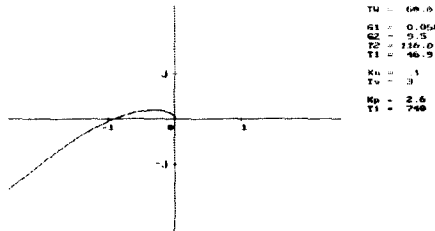


그림 9.  $K_p=2.6, T_i=740\text{sec}$  때의 NYQUIST 궤적  
Fig. 9. NYQUIST Mapping for  $K_p=2.6, T_i=740\text{sec}$

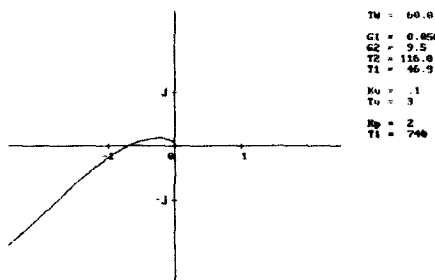


그림 10.  $K_p=2, T_i=740\text{sec}$  때의 NYQUIST 궤적  
Fig. 10. NYQUIST Mapping for  $K_p=2, T_i=740\text{sec}$

### 3.2.2 급수온도가 높을 때의 NYQUIST 궤적

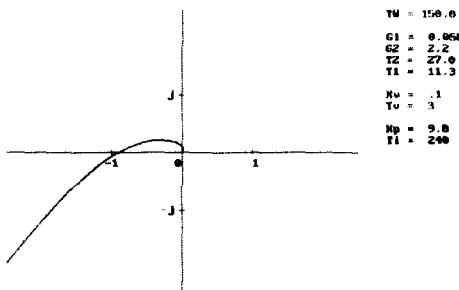


그림 11.  $K_p=9.8, T_i=240\text{sec}$  때의 NYQUIST 궤적  
Fig. 11. NYQUIST Mapping for  $K_p=9.8, T_i=240\text{sec}$

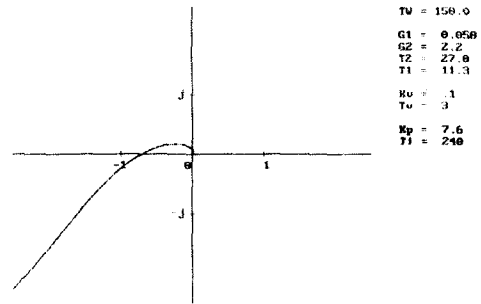


그림 12.  $K_p=7.6, T_i=240\text{sec}$  때의 NYQUIST 궤적  
Fig. 12. NYQUIST Mapping for  $K_p=7.6, T_i=240\text{sec}$

## 3.3 분석 결과

증기발생기 수위 제어계통의 Simulation에 의한 분석이나 NYQUIST 안정도 판별법에 의한 분석 결과에서 급수온도가 낮을 경우 비레이득이 클 경우에는 제어계통이 불안정 상태가 될 수 있으며, 비레이득이 작을 경우에는 제어계통이 안정상태를 유지하나 응답속도가 매우 늦음을 알 수 있다.

또한 급수온도가 높을 경우 비레이득이 크더라도 제어계통이 안정상태를 유지함을 알 수 있다.

즉, 급수온도에 따라 제어기의 비레이득을 가변시키면 제어계통을 안정상태로 계속 유지할 수 있음을 나타내고 있다[5,6].

## 4. 증기발생기 수위 제어변수 개선

### 4.1 가변 PI 제어 적용

NYQUIST 안정도 판별에 의한 방법과 제어성능 평가 방법에 따라 결정된 제어기 비레이득  $K_p$ 를 다음과 같은 함수로 계산하여 사용한다.

$$K_p = K(T_w) * K_v$$

여기서 제어밸브 유량상수  $K_v$ 는 FCBV(Feedwater Control Bypass Valve)의 정격용량  $C_v$ 와 밸브차압( $\Delta P$ )의 함수인데 정격용량  $C_v$ 는 상수이므로  $K_v$ 는 밸브차압( $\Delta P$ )의 함수로 사용할 수 있다.

또한, 제어기의 적분시간  $T_i$ 는 제어대상의 응답시간에 따라 설정하므로 증기발생기 수위 응답시간에 직접 영향을 주는 주급수 온도  $T_w$ 의 함수로 가변하여 사용할 수 있다[7].

- $K_p = K(T_w) * K(\Delta P)$
- $T_i = T(T_w)$

결과는 다음과 같다.

#### 4.2 Feed Forward 제어 개선

급수온도가 낮을 때에는  $K_p$ 를 작게 하여 제어해야 하나 응답이 늦어서 외란 발생시 수위제어가 불안정해진다. 증기발생기 수위 제어 계통이 안정성과 속응성을 갖기 위해서 수위에 영향을 주는 파라미터를 이용하여 다음의 F.F(Feed Forward) 항목을 추가하여 사용한다.

- $Q_n$  : Rx. POWER (원자로출력)
- $F_s$  : Steam Flow (증기유량)
- $F_w$  : FeedWater Flow (급수유량)
- $L_w$  : W.R Level (광역 수위)

$$F.F = f(Q_n) + f(F_s) - f(F_w) - f(L_w) \quad (4)$$

#### 4.3 계산된 유량 적용

발전소 기동시 및 저출력시에는 증기유량( $F_s$ ) 신호와 급수유량( $F_w$ ) 신호가 불안정하여 제어신호로 사용이 불가능하므로 주변 변수를 이용하여 계산된 유량 신호를 사용한다.

- Steam Flow = Steam Dump + TBN Inlet
- Feed Water Flow = (FCBV Demand + MFCV Demand) x  $f(\Delta P)$

#### 4.4 Simulation에 의한 제어 성능 분석

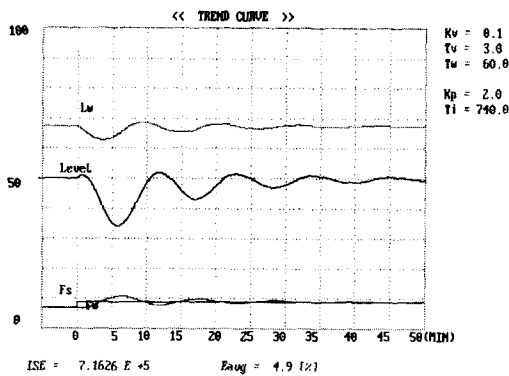


그림 13. F.F가 없을 때의 제어  
Fig. 13. Control without F.F

개선한 제어 알고리즘을 Simulation으로 분석한

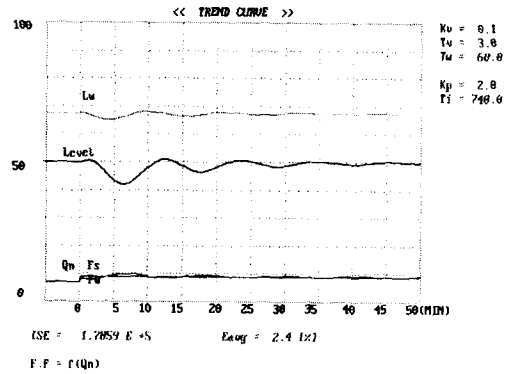


그림 14.  $FF = f(Q_n)$ ,  $FF = f(F_s)$ 일 때의 제어  
Fig. 14. Control with  $FF = f(Q_n)$ ,  $FF = f(F_s)$

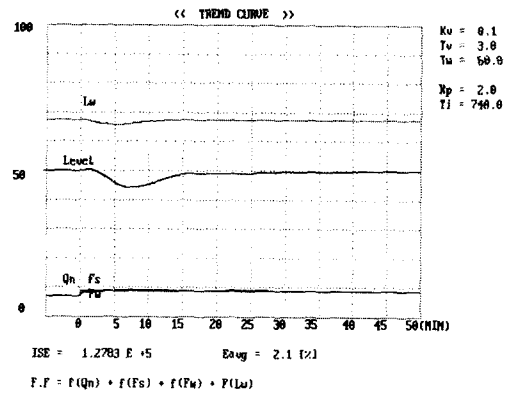


그림 15.  $FF=f(Q_n)+f(F_s)+f(F_w)+f(L_w)$ 일 때의 제어  
Fig. 15. Control with  $FF=f(Q_n)+f(F_s)+f(F_w)+f(L_w)$

### 5. 디지털 제어 시스템의 설계

증기발생기 수위 제어 계통의 안정성과 속응성을 확보하기 위해 제어기의 가변 비례이득과 Feed Forward 항목을 발전소 운전 조건에 맞추어 계산하여 사용해야 하는데 아날로그 제어 시스템의 기능에는 한계가 있기 때문에 보다 정밀한 제어를 위해 디지털 제어 시스템을 적용하였다. 또한 디지털 제어 시스템을 적용하면서 제어계통의 신뢰성 향상을 위해 신호 검증(Signal Validation)과 내고장성 제어 시스템(Fault Tolerant Control System) 구축과 함께 기존의 아날로그 제어시스템과 디지털 제어시스템을

병행 운전시켜서 상호 Back Up 기능을 갖도록 하였다.

### 5.1 바이패스 밸브와 주 밸브의 동시 자동 운전

DCS 운전모드에서는 바이패스 밸브와 주 밸브를 동시에 자동 운전할 수 있도록 설계하였는데 기존 ACS 운전모드에서는 상호 간섭으로 동시 자동운전이 불가능하였으나 DCS 운전모드에서는 제어상황에 따라 바이패스와 주 밸브를 자동으로 선택하여 증기 발생기 수위를 제어하고 나머지는 DCS에서 계산된 제어값을 추적하게 함으로써 동시에 자동운전이 가능하도록 하였다. 바이패스 밸브제어와 주 밸브제어의 ACS/DCS 및 AUTO/MANUAL MODE 선택에 따른 제어상태는 다음 표와 같다.

표 1. 운전 MODE 선택에 따른 제어상태  
Table 1. Control State by Operation Modes

Bypass	Main	ACS/DCS	수위 제어 상태
A	A	D	DCS에 의해 자동 선택
		A	Byp, Main 모두 자동제어 모드로 상호간섭
A	M	N/A	Byp 수위 자동제어
M	A	N/A	Main 수위 자동제어
M	M	N/A	운전원 수동제어

DCS에 의한 자동운전 형태에는 다음과 같은 것이 있다.

- 1) Bypass Control + Main Closed
  - 원자로 기동시 부터 저출력시 자동운전
- 2) Bypass Control + Main Tracking
  - 원자로출력 증발 및 계통병입 전후 자동운전
- 3) Main Control + Bypass Tracking
  - 계통병입후 자동운전
- 4) Main Control + Bypass Closed
  - 원자로출력 40% 이상시 자동운전

### 5.2 출력 증감발에 따른 자동제어

발전소 기동시 부터 전출력 운전까지의 출력 증발 및 전출력 운전부터 원자로 출력 감발에 따른 바이패스 밸브와 주 밸브에 의해 증기발생기 수위제어

가 완전 자동운전이 가능하다.

### 5.3 ACS/DCS 병행 운전

- M/A Station(수동/자동 제어기)이 정상 상태일 때 M/A Station의 입력 신호를 ACS 또는 DCS에서 수동 또는 자동으로 선택하여 사용한다.

- ACS 또는 DCS Mode 모두 M/A Station에서 AUTO/MANUAL 운전 가능하다.

- M/A Station에서 MANUAL 운전시 ACS, DCS 모두 Tracking Mode 상태이다.

- M/A Station에서 AUTO 운전시 ACS 상호 DCS Tracking Mode 상태이다.

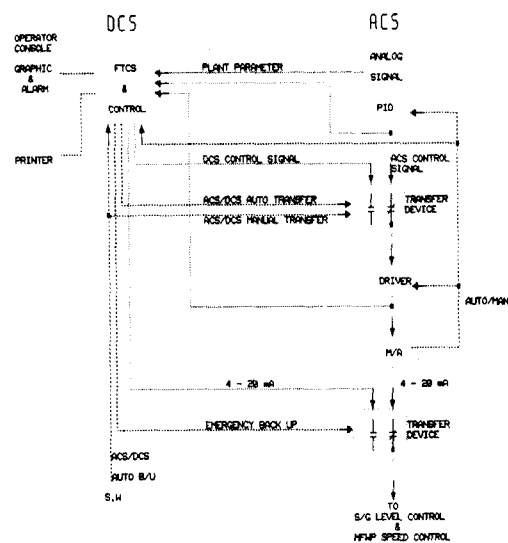


그림 16. ACS/DCS 병행운전 개요도  
Fig. 16. Block diagram for ACS/DCS Mode

### 5.4 내고장성 제어 시스템의 구축

#### 5.4.1 신호검증 및 내고장 제어

입력신호는 I/O Module을 2중화하여 CHA, CHB로 처리하여 정상 운전중에는 CHA를 사용하고 CHA가 고장시에는 CHB로 전환하여 사용하도록 하였다. 중요 신호는 3 CH Input 처리하여(ACS는 1 CH 선택사용) Median 신호를 제어에 사용하여 3 CH 중 어느 한 CH이 Fail 되어도 제어 신호에는 거의 영향을 주지 않게 되어 제어의 신뢰성이 크게 향상되었다. 신호가 2 CH인 경우에는 기타 변수를 이용하여 가상 신호를 계산하고 각각의 신호를 비교하여 제어

신호를 선택하도록 하였다.

## 7. 결 론

원자력발전소 증기발생기 수위 제어에 관해 수학적 분석과 Simulation을 통하여 제어 알고리즘을 개발하고 이를 디지털 제어설비를 이용하여 구현하고 실제 고리 원자력 1-4호기 및 영광원자력 1-2호기에 설치, 적용하였고 시험기간과 운전을 통하여 성능을 입증 받았다. 연구결과의 적용으로 발전소 기동중 수위 제어 자동화, 출력 증감에 따른 Bypass Valve와 Main Valve 절체 자동화, 계통병입후 전출력시 까지 수위 제어 자동화, 주급수 펌프 속도 제어 개선과 완전 자동화를 이루었으며, 기존 아날로그 제어 계통과 신설 디지털 제어 계통 병행 운전이 가능하게 되었다.

내고장성 제어 계통(FTCS: Fault Tolerant Control System) 구현으로 아날로그 제어 계통 감시하고 고장시 DCS로의 전환, 자동운전이 가능하게 되었다.

제어 설비의 제어 성능과 신뢰도 향상에 의해 원자력발전소 불시 정지를 감소시키고 안정적 운전을 통한 원자력발전소의 신뢰성 향상과 이미지 제고의 효과를 기대할 수 있다.

증기발생기 수위 제어와 주급수 펌프 속도 제어 계통을 기동시 부터 저출력, 전출력시 까지 완전 자동 운전하여 그 성능을 인정 받으므로써 원자력발전소 제어계측 설비의 디지털화에 기여하였다.

### 5.4.2 고장감지 및 AUTO BACK-UP 기능

아날로그 제어 시스템에서 선택되어 사용중인 증기 발생기 수위 신호등의 고장 및 제어기의 고장 등이 발생할 경우에는 디지털 제어시스템으로 자동 전환하여 Back Up 운전함으로써 증기발생기 수위 제어 불안에 의한 발전소 정지를 예방하도록 하였다.

### 5.4.3 EMERGENCY BACK-UP 기능

수동제어기(M/A Station)의 고장시 또는 출력신호가 상실되었을 경우에는 DCS 제어 신호가 수동제어기를 우회하여 직접 제어신호로 사용되며 운전 모드는 DCS Mode로 자동 전환 된다. 이 때에는 제어 신호가 수동제어기를 우회하기 때문에 AUTO/MANUAL조작이 불가능 하며 운전원 조작없이 DCS에 의한 자동 운전만 가능하다.

## 6. S/G LEVEL DCS 설치 및 시험

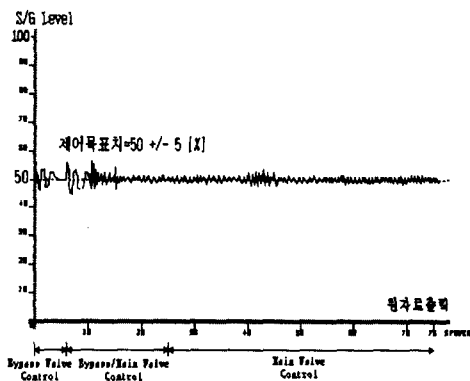


그림 17. DCS의 발전소 적용 결과 제어상태  
Fig. 17. DCS Control trend for Nuclear power plant

디지털 제어 시스템(DCS)을 실제 설치하고 시험한 결과 발전소 기동 초기시(원자로출력 0 [%]) 부터 계통병입후 100 [%] 출력시 까지 운전원의 조작없이 DCS에 의해 완전 자동 운전되어 대체로 양호하였으며 저출력에서 원자로출력이 5 [%] 이상 변화했을 때 바이패스 밸브와 주 밸브의 중첩 운전등 자동제어가 양호하였다.

## References

- (1) EPRI, "Pressurized Water Reactor Modelling for Long-Term Power System Dynamics Simulation" EPRI EL-3087, 1983.
- (2) A.GAUTIER, J.F.PETETROT, AROULET AND PRUIZ, "U - tube steam generator modelling, application to level control and comparison with plant data", 1980.
- (3) EIRVING, C.MOSSEC and J.TASSART, "Towards efficient full automatic operation of the PWR steam generator with water level adaptive control", 1980.
- (4) M.EI-Hawary, "Control System Engineering" Reston Publishing Company, 1984.
- (5) F.MHUGHES and G.B.COLLINS, "Application of multivariable frequency response methods to boiler control system design", 1980.
- (6) C.MOSSEC, J.TASSART and EIRVING, "Automatic control of steam generator levels in EDF PWR unit", 1980.
- (7) 문병희, "원전 증기발생기 수위 제어 디지털화 및 적용에 관한 연구" 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1993. 265~267.



[8] Microsoft, "Microsoft Quick Basic", 1989.

◇ 저자소개 ◇

문 병 희 (文炳熙)

1956년 12월 17일생. 1978년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1977-1988년 한전고리원자력근무. 1994-1996 홍익대학교 전기공학과 석사. 1997-현재 동 대학원 박사과정. 1988-2000 한전 전력연구원 원자력연구실 계전그룹 프로젝트리더 2000-현재 인벤시스코리아(주) 연구소장.

김 경 철 (金慶哲)

1954년 1월 20일 생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977-1982 국방과학연구소 연구원. 1982-1984 NMSU 전기공학과 석사. 1984-1988 UTA 전기공학과 박사. 1988-1991 한국전기연구소 선임연구원. 1991-현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터 공학부 부교수.