

원자력발전소 증기발생기 수위 제어에 관한 연구

문 병희^{*}, 최 흥규^{**}

한국전력공사 전력연구원^{*}, 용의대학교^{**}

A Study on The Steam Generator Level Control for Nuclear Power Plant

Byung-Hee Moon^{*}, Hong-Kyoo Choi^{**}
Korea Electric Power Research Institute^{*}, Hong-Ik University^{**}

ABSTRACT

About a half of Electric power is generated by nuclear power plants in Korea. So, the stable operation of nuclear power plant is very important for supplying the essential national electric power.

A S/G(Steam Generator) level control is the most difficult system in PWR(Pressurized Water Reactor) nuclear power plant.

Because of the non-linear and the non-nominal response of S/G level control, it is very difficult to control the level by automatic mode or manual mode.

The goal of this study is to establish and verify a advanced control algorithm by analyzing, modelling, stability calculation, controller parameter calculation, simulation for S/G 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 상태로서 운전원에 많은 부담을 주고 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 증기발생기 수위특성을 분석하고 모델링하여 안정성이 보장되고 수학적으로 증명된 보다 나은 제어 알고리즘을 도출해서 증기발생기 수위 제어 계통의 제어 방법을 개선하고 제어 성능과 신뢰도를 향상시킬 수 있는 방안을 제시하는데 있다.

2. 원자력발전소 증기발생기 수위

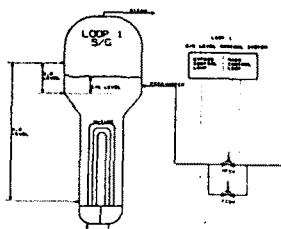
가. 증기발생기 (S/G: Steam Generator)

가압경수로형(PWR)의 원자력발전소에서는 원자로내의 우라늄이 핵분열시 발생되는 열로 1차계통의 물을 가열한 후 가열된 1차계통 물이 증기발생기내에서 2차계통인 금수를 가열하여 증기를 발생시키도록 되어 있다.

나. 증기발생기 수위 제어 현황

(1) 수위측정 및 유지

증기발생기 수위측정은 증기발생기 내부의 대부분을 측정 대상으로 하는 장역수위(Wide Range Level)과 주요 운전부분을 측정 대상으로 하는 협역수위(Narrow Range Level)로 나누어져며 장역수위 측정 범위는 약 1420[cm]정도이고 협역수위는 약 325[cm]정도이다. 일반적으로 증기발생기 수위 관리 힘은 협역수위를 말한다.



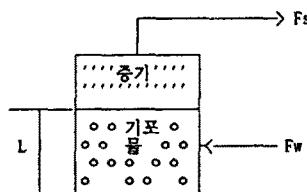
[그림 1] 증기발생기 수위 제어

(2) Swell 및 Shrink 현상

발전소 운전 중 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) 금수온도의 영향
증기발생기에 금수유량을 증기시켜도 수위가 증가하는 것이 아니라는 것은 온도의 금수가 증기발생기내의 물을 증기시켜 수위는 오히려 감소하며 계속된 금수의 증가에도 수위가 증가하지 않다가 공급된 금수가 가열된 후 수위가 증가하기 시작하여 금수유량을 감소시키더라도 수위는 이미 공급된 금수증기량 만큼 계속 증가한다. 즉 금수온도가 낮으면 조작기의 조작량과 제어변수의 용동이 비정상적인 물리현상을 보이므로써 제어가 어려운 제어 대상이다.

3. 증기발생기 수위 제어 모델링



[그림 2] 증기발생기 수위 Block Diagram

증기발생기의 금수유량 F_w 와 증기유량 F_s 차에 의한 물의 질량변화는

$$\frac{dL}{dt} = F_w - F_s$$

이고, 부피는 질량 M 과 기포량 V_s 에 따라 변하므로

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{p} \frac{dM}{dt} + \frac{dV_s}{dt}$$

이 된다. 수위변화는 부피변화에 비례하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dL}{dt} = K_s \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{dL}{dt} = \frac{K_s}{p} \frac{dM}{dt} + K_s \frac{dV_s}{dt}$$

이것을 정상상태의 수위 변화분과 기포에의한 과도상태의 수위 변화분으로 나누어 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dL_s}{dt} + \frac{dL_d}{dt}$$

질량변화에 의한 수위변화분 L_s 만 고려하면

$$\frac{dL_s}{dt} = \frac{K_s}{p} \frac{dM}{dt}$$

$$= \frac{K_s}{p} (F_w - F_s)$$

가 되고, 여기서

$$G_1 = \frac{K_s}{p}, \quad Fer = F_w - F_s \text{ 라 하면}$$

$$\frac{dL_s}{dt} = G_1 \cdot Fer$$

이 되고, 이것을 Laplace 변환식으로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$L_s(S) = \frac{G_1}{S} \cdot Fer(S)$$

제온 금수 및 기포에 의한 수위변화분 L_d 는

$$\frac{dL_d}{dt} = -\frac{1}{\tau_2} (G_2 \cdot Fer - L_d)$$

$$L_d(S) = -\frac{G_2}{1 + \tau_2 S} \cdot Fer(S)$$

전체적인 증기발생기 수위 변화는

$$L(S) = L_s(S) + L_d(S)$$

로 나타낼 수 있으므로

$$L(S) = \left(\frac{G_1}{S} - \frac{G_2}{1 + \tau_2 S} \right) \cdot Fer(S)$$

$$= G_1 \cdot \frac{1 - (\frac{G_2}{G_1} - \tau_2) S}{S \cdot (1 + \tau_2 S)} \cdot Fer(S)$$

이 된다.

여기서, $\tau_1 = \frac{G_2}{G_1} - \tau_2$ 라 하면

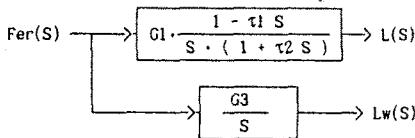
$$L(S) = G_1 \cdot \frac{1 - \tau_1 S}{S \cdot (1 + \tau_2 S)} \cdot Fer(S)$$

로 표현할 수 있다.

그리고 증기발생기 수위 변화는 질량변화에 비례하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dL_w}{dt} = G_3 \cdot Fer$$

$$L_w(S) = \frac{G_3}{S} \cdot Fer(S)$$

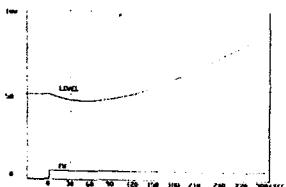


[그림 3] 증기발생기 수위 모델

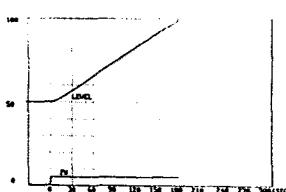
4. 증기발생기 수위 제어 특성

가. 증기발생기 수위 특성

발전소 기동시 계통별입전 금수온도가 낮을 때의 증기발생기 수위 응답과 계통별입후 금수온도가 증가했을 때의 증기발생기 수위 응답 특성 변화는 대개 다음과 같다.



[그림 4] 금수온도가 낮을 때의 수위 특성



[그림 5] 금수온도가 높을 때의 수위 특성

나. 증기발생기 수위 제어 LOOP 안정도 판별식

기동시에 사용되는 BYPASS VALVE CONTROL LOOP의 전달함수만 생각하면 Controller의 전달함수는 다음과 같다.

$$Co(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} \right)$$

$Co(s)$: Controller Output

K_p : Controller Proportional Gain

T_i : Controller Reset Time

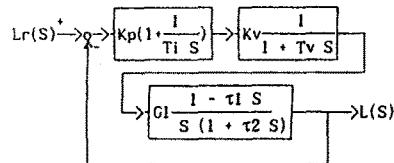
Bypass V/V의 변화에 대한 금수유량의 변화를 간단히 1차식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{Fw(S)}{Co(S)} = Kv \frac{1}{1 + Tv S}$$

Kv : 제어밸브의 유량계수

Tv : 제어밸브의 시정수

증기유량이 일정하다고 가정하고 금수유량에 의한 수위 변화만을 고려한 CLOSED LOOP BLOCK은 다음과 같다.



[그림 6] 증기발생기 수위제어 BLOCK DIAGRAM

이 CLOSED LOOP를 전달함수로 표현하면

$$\frac{L(S)}{Lr(S)} = \frac{G(S)}{1 + G(S)}$$

이 된다. 여기서 종합 전달함수 $G(S)$ 는 다음과 같다.

$$G(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} \right) \cdot Kv \frac{1}{1 + T_v S} \cdot G_1 \frac{1 - \tau_1 S}{S (1 + \tau_2 S)}$$

$$= K_p \cdot Kv \cdot G_1 \cdot \frac{(1 + \frac{1}{T_i S}) (1 - \tau_1 S)}{S (1 + T_v S) (1 + \tau_2 S)}$$

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

$$G(j\omega) = K_p \cdot Kv \cdot G_1 \cdot \frac{(1 + \frac{1}{T_i j\omega}) (1 - \tau_1 j\omega)}{j\omega (1 + T_v j\omega) (1 + \tau_2 j\omega)}$$

$$= K_p \cdot Kv \cdot G_1 \cdot \frac{(-\tau_1 - \frac{1}{\omega^2 T_i}) + j \frac{1 - \tau_1}{\omega T_i} - 1}{1 - \omega^2 T_v \tau_2 + j\omega (T_v + \tau_2)}$$

가 되어 주파수 전달함수는

$$G(j\omega) = K_p \cdot Kv \cdot G_1 \cdot (Re + jIm)$$

으로 표현할 수 있다.

다. 기존 증기발생기 수위 제어기의 안정도 분석

기동시부터 계통별입전 후에 운전되는 Bypass Control Loop에 대한 안정도를 분석한다.

금수유량 변화 수위변화 계수는

$$G_1 = 0.058 [\%/\text{Flow}]$$

FCBV변화에 대한 금수유량 변화 계수와 시정수는

$$Kv = 0.3 [\%/\text{Flow} / \%]$$

$$T_v = 3 [\text{Sec}]$$

PI Controller 상수는 설계값인

$$K_p = 4.8$$

$$T_i = 750 [\text{Sec}]$$

등으로 고정 상수로 하고 다른 파라미터는 금수온도에 따라서 다음과 같이 적용한다.

- 금수온도 $T_w = 40 [{}^\circ\text{C}]$ 일 때 :

$$\tau_2 = 118.7 [\text{Sec}], \tau_1 = 48.0 [\text{Sec}]$$

- 금수온도 $T_w = 180 [{}^\circ\text{C}]$ 일 때 :

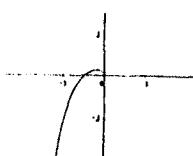
$$\tau_2 = 7.60 [\text{Sec}], \tau_1 = 3.48 [\text{Sec}]$$

위의 파라미터에서 제어기가 설계값으로 운전될 때 수위 제어 계통의 안정도를 분석하기로 한다.

주파수 ω 0에서부터 ∞ 까지 변화 시키면서 $G(j\omega)$ 의 쾌적을 그리면 다음과 같다.



[그림 7] 금수온도 $T_w = 40 [{}^\circ\text{C}]$ 일 때



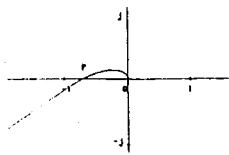
[그림 8] 금수온도 $T_w = 180 [{}^\circ\text{C}]$ 일 때

그림 7의 궤적에 나타나는 바와 같이 계통별입전 금수온도가 낮을 경우에는 현재의 제어 파라미터로는 불안정 상태가 되어 자동운전이 불가능함을 알 수 있다.

그러나 그림 8에서와 같이 금수온도가 증가하면 똑같은 제어 파라미터에서도 제어계통이 안정 상태임을 알 수 있다.

5. 제어 알고리즘 개선

가. 안정도 판별



[그림 9] 주파수 궤적

$\text{Im} = 0$ 일 때의 주파수 ω 를 구하여 P점의 실수값을 계산하여 안정도를 판별한다.

$$(1 - \omega^2 \tau_1 \tau_2) \cdot \frac{1}{\omega} \left(\frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} - 1 \right) + \left(\frac{1}{\omega^2 \tau_1} + \tau_1 \right) \cdot \omega (\tau_1 + \tau_2) = 0$$

이것을 다시 풀면

$$\omega^2 [\tau_2 \tau_1 + \tau_1 (\tau_2 + \tau_1) - \frac{\tau_1 \tau_2 \tau_1}{\tau_1}] - (1 - \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_1}{\tau_1}) = 0$$

가 된다. 여기서

$$A = \tau_2 \tau_1 + \tau_1 (\tau_2 + \tau_1) - \frac{\tau_1 \tau_2 \tau_1}{\tau_1}$$

$$B = 1 - \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_1}{\tau_1}$$

라 하면 다음과 같다.

$$\omega^2 A - B = 0$$

주파수 궤적선도는 주파수 ω 가 +일 때와 -일 때가 서로 대칭이므로 +값만 취하면 안정도 판별 주파수값은

$$\omega = \sqrt{\frac{B}{A}}$$

가 된다.

나. 안정된 제어변수 산출

안정도 판별 주파수 ω 를 안정도 판별식에 적용하여 실수 값 R_p 와 허수값 I_p 로 계산할 수 있으므로

$$G(j\omega) = K_p \cdot K_v \cdot G_i \cdot (R_p + j I_p)$$

$$= R_p + j I_p$$

제어이 실수축과 만나는 P점의 실수값 R_p 은

$$R_p = K_p \cdot K_v \cdot G_i \cdot R_e$$

가 된다.

안정도 판별법에 의해서 $R_p = -1$ 일 때 임계 안정상태이고, $R_p = -1 = 0$ 사이에서 제어계는 안정상태를 갖는다. 제어 뱡보의 특성상 급수유량계수 K_v 와 동작 시장수 T_v 가 비직선성을 가지므로 증기발생기 수위 제어 계통의 안정성을 확보하기 위해 R_p 의 적정값을 -0.7 즉, $R_{popt} = -0.7$ 로 하면 제어기의 운전 적정값 K_{popt} 값을 구할 수 있다.

$$R_{popt} = K_{popt} \cdot K_v \cdot G_i \cdot R_e$$

이므로

$$K_{popt} = \frac{-0.7}{K_v \cdot G_i \cdot R_e}$$

가 된다.

NYQUIST 안정도 판별법을 이용하여 급수온도 변화에 대한 증기발생기의 적정 K_p 값, 최소 및 최대값을 계산하면 다음과 같다.

[TW]	[G2]	[T1]	[T2]	[Kp]
40.0	9.67	48.00	118.67	0.554
60.0	9.45	46.93	116.00	0.572
80.0	9.23	45.86	113.33	0.591
100.0	7.66	38.11	94.00	0.754
120.0	4.74	23.68	58.00	1.307
140.0	2.75	13.87	33.52	2.229
160.0	1.70	8.67	20.56	3.388
180.0	0.64	3.48	7.60	6.998
200.0	0.56	3.07	6.57	7.703
220.0	0.48	2.65	5.54	8.601

$$* T_1 = 750 \text{ Sec}$$

다. 제어 알고리즘 개선

(1) 가변 제어변수 사용

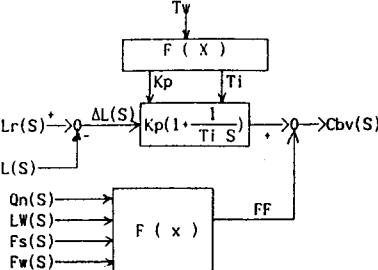
앞에서 계산한 바와 같이 증기발생기 수위 제어기의 적정 제어변수는 급수온도 (T_w)에 따라 바꿔므로 실제 운전하는 제어기의 제어변수를 이 값으로 사용하도록 하면 항상 안정된 제어를 이용할 수 있다.

(2) Feed Forward 제어

제어변수를 가변하여 사용할 경우 급수온도가 낮을 때에는 표 4-1과 같이 K_p 가 작아야 하며 이 때문에 제어기의 운동이 늦어서 외란발생시 수위제어 불안정 요인이 될 수 있다.

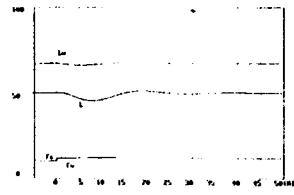
이런 단점을 보완하기 위해 증기발생기 수위에 영향을 주는 파라미터를 이용하여 Feed Forward 제어를 추가하여 사용한다.

$$FF = f(Q_n) + f(F_s) - f(F_w) - f(L_w)$$



[그림 10] 개선된 증기발생기 수위제어 BLOCK DIAGRAM

개선된 증기발생기 수위 제어 알고리즘을 적용하여 Simulation한 결과 급수온도가 낮을 경우에도 기존 제어 상태와 달리 수위제어가 매우 안정되었음이 나타났다.



[그림 11] 개선된 증기발생기 수위 제어 상태

6. 결 론

원자력발전소 증기발생기의 수위 특성과 수위 제어의 문제점을 분석하였으며 기존 제어변수에 대해 안정도 판별을 하여 불안정 상태로서 자동제어가 불가능임을 증명하고 안정도를 확보할 수 있는 제어변수를 산출하였다.

급수온도의 변화에 따라 수위제어 특성이 변화므로 수위 변화 파라미터에 따라 안정도를 계산하고 안정도가 확보된 제어변수를 도출하여 제어기 사용하는 제어 알고리즘을 적용하였다.

또한 낮은 급수온도시에 제어기 비례계들이 낮아 발생하는 높은 운동을 보완하기 위해 Feed-Forward 제어를 적용하였다.

이와 같은 방법으로 증기발생기 수위 제어 계통의 문제점을 분석하고 수학적 증명을 통한 안정도가 확보된 제어변수 산출 방법과 알고리즘을 개선하였다.

참 고 문 헌

- 고리 3,4호기 PROCESS CONTROL BLOCK DIAGRAM
- Towards efficient full automatic operation of the PWR steam generator with water level adaptive control
- E. IRVING, C. MIOSSEC and J. TASSART (1980)
- Automatic control of steam generator levels in EDF PWR unit
- C. MIOSSEC, J. TASSART and E. IRVING (1980)
- Application of multivariable frequency response methods to boiler control system design
- F. M. HUGHES and G. B. COLLINS (1980)
- Dynamic modelling of nuclear steam generators
- T. W. KERLIN and J. THAKKAR (1980)
- U-tube steam generator modelling, application to level control and comparison with plant data
- A. GAUTIER, J. F. PETETROT, A. ROULET, P. RUIZ (1980)
- U-tube steam generator dynamics modelling and verification
- N. W. S. BRUENS (1980)
- Pressurized Water Reactor Modelling for Long - Term Power System Dynamics Simulation
- EPRI EL-3087 (1983)
- Process Control Systems Application/Design/Adjustment
- F. G. SHINSKEY (1979)
- Control System Engineering
- M. E. El-Hawary (1984)
- 증기발생기 수위 종합 디지털 제어 계통 개발 및 적용 연구 중간보고자료
- 한국전력공사 전력연구원 (1995)