

전문가 지식과 퍼지 논리를 이용한 과도상태에서의 가압경수로 증기발생기 수위제어

한호민, *최대원, *우영광, *배현, *김성신
(주)한국수력원자력, *부산대학교
전화 051-921-6855 / 핸드폰 011-9554-6855

Water Level Control of PWR Steam Generator using Knowledge Information and Fuzzy Logic at Low Power

Ho-Min Han, *Dae-Won Choi, *Young-Kwang Woo, *Hyeon Bae, *Sungshin Kim
Ko-Ri Nuclear Power Plant #2, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd
*School of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University
E-mail : airhan92@hotmail.com

Abstract

The steam generator level in a PWR is very difficult to control particularly at low power. And the constant control gain and time value are not adaptive in steam generator level controller. In normal operation constant control gain and time value have no problem. But there is problem at low power. So variable control gains based on the temperature are required. The best control gain is decided by the experienced knowledge. A fuzzy gain tuner is used for the gain tuning. In the design of fuzzy gain-tuner processing, the experienced knowledge is employed for making fuzzy rules.

I. 서론

증기발생기의 수위제어는 원자력발전소를 안정적으로 운전하는데 있어서 중요한 요소이나 급수유량 및 온도, 증기유량, 냉매온도 등에 따라 응축과 팽창 현상이 발생하여 제어하기가 매우 어려운 공정이다[1]. 이러한 현상은 출력이 낮을수록 더욱 심하여, 발전소의 기동과 같은 저출력에서 불필요한 발전소 강제정지를 유발시키는 원인이 되기도 한다. 이러한 강제정지는 발전소의 경제성은 물론 안전성에도 영향을 미치게 된다[2]. 저출력 운전에서의 증기발생기 수위제어의 어려움은 가압경수형 원자로의 공통적인 문제이며 지속적으로 많은 연

구가 진행되고 있다. 이러한 문제와 관련하여 본 논문에서는 감발시 기존의 발전소 운영중인 증기발생기 수위제어기보다 성능이 우수한 제어기를 구현하고자 한다 [3-5].

II. 원자력발전소와 증기발생기 개요

2.1 원자력발전소 개요

원자력발전소는 원자로 속에서 우라늄-235의 핵분열 연쇄반응을 지속시키고, 이 때 우라늄 봉 속에 생기는 열로 증기를 만들어 터빈발전기를 돌려 발전한다. 가압경수로(PWR)의 냉각재인 경수는 순환펌프로 압출되어 원자로에서 가열된 후 증기발생기에서 2차측의 급수를 증기로 변화시킨다. 증기발생기와 펌프, 이를 이어주는 배관이 1조로 되어 있다. 증기발생기의 2차측에서 발생한 증기는 터빈발전기를 회전시키고, 복수기에서 물로 응축된 후, 다시 증기발생기로 되돌아간다.

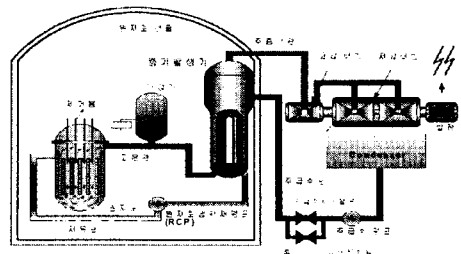


그림 1. 원자력발전소의 주요 계통.

2.2 증기발생기 개요

증기발생기는 원자로 냉각재 계통으로부터 터빈-발전기를 구동하기 위한 포화증기를 생산하기 위해 고온 고압의 물을 사용하며, 또한 원자로 냉각재 계통과 2차 계통사이의 경계부가 된다. 고온 고압의 원자로 냉각재는 증기발생기의 2차측 물을 가열한다. 증기발생기를 떠난 물은 원자로 냉각재 펌프에 의해 원자로 내로 되돌아와서 재 가열된다. 발생된 증기는 습증기로서 2단의 습분분리기를 통해 99.75%의 건도를 가진 증기가 주증기 계통으로 송출된다.

III. 증기발생기 수위 제어

3.1 증기발생기 수위 제어 개요

증기발생기내에는 하부의 물과 상부의 증기가 존재하는데 하부의 물의 높이를 증기발생기 수위라 한다. 증기발생기 수위는 일정 범위 내에서 유지되어야 하는데 수위가 낮아지면 열교환 부분이 수면위로 노출되어 1차계통의 열부하 상실로 인한 원자로 과열을 막기 위해 원자로를 정지시키며 수위가 높아지면 습분이 많이 포함된 증기가 터빈에 공급되므로 터빈 날개 손상을 막기 위해 터빈을 정지시켜야하기 때문이다.

주급수 제어계통은 출력 15~100%에서 주급수 밸브를 자동으로 제어하며, 주급수 우회제어계통은 출력 0~20%에서 주급수 우회밸브를 자동으로 제어한다. 주급수 펌프속도제어계통은 출력 15% 이상에서 주급수 펌프의 속도를 자동으로 제어한다.

3.2 증기발생기 수위 모델링

증기발생기의 제어 입력은 급수유량이 되고 출력은 증기유량이 된다. 일반적인 상태에서는 두 값의 관계를 통해 수위가 제어된다.

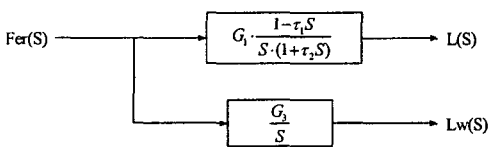


그림 2. 증기발생기 수위 모델.

3.3 증기발생기 과도상태 제어

(1) 보상기를 이용한 피드포워드 제어 개선

급수온도가 낮을 때에는 K_p 를 작게 하여 제어해야 하나 속응성이 늦어서 외란 발생시 수위제어가 불안정해진다. 증기발생기 수위 제어계통이 안정성과 속응성을 갖기 위해서 수위에 영향을 주는 파라미터를 이용하여 피드포워드 항을 추가하여 사용한다[3].

- Q_n : 원자로 출력(Rx. Power)
- F_s : 증기유량(Steam Flow)
- F_w : 급수유량(Feed-Water Flow)
- L_w : 대역 수위(Wide Range Level)

$$FF = f(Q_n) + f(F_s) - f(F_w) - f(L_w) \quad (1)$$

저출력 제어시스템에서는 급수온도에 따라 PI 값 가변시킨다. 저온 시 비례 게인을 감소시키는데, 낮은 게인으로 인한 늦은 속응성 보상을 위해 Feed Forward 신호를 사용하여 속응성을 향상시킨다. 원자로 출력, 증기유량, 급수유량 및 광역수위비를 고려하여 보상기 출력을 위한 식을 구성하여 속응성을 향상시킨다.

(2) 가변 PI 제어를 이용한 수위 제어

Nyquist 안정도 판별에 의한 방법과 제어성능 평가 방법에 따라 결정된 제어기 제어변수를 다음과 같은 함수로 계산하여 사용한다[3]

$$K_p = K(T_w) \times K_v \quad (2)$$

K_v 는 FCBV(Feedwater Control Bypass Valve)의 정격용량 C_v 와 밸브차압(ΔP)의 함수로 차압(ΔP)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 적용할 수 있다[3].

$$K_p = K(T_w) \times K(\Delta P) \quad (3)$$

$$T_i = T(T_w)$$

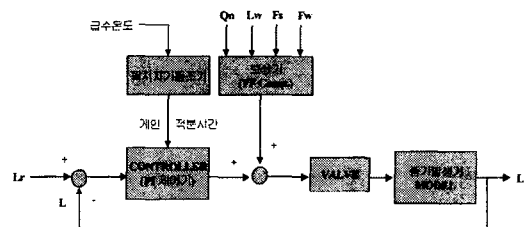


그림 3. 저출력 수위제어를 위한 시스템 구조도.

IV. 퍼지 논리

4.1 운전자 모델

운전자 모델의 구성은 지식을 획득, 획득한 지식의 표현, 표현된 지식의 적용, 그리고 마지막으로 실제 제어의 과정으로 나뉜다. 숙련된 운전자가 기본적인 지식을 획득하고, 상위의 지식 획득은 공정 기술자나 제어 기술자에 의한 획득된다. 이렇게 획득한 지식은 시스템 개요, 특성, 규칙 등으로 표현 가능하다. 지식의 적용은 불확실한 시스템에 대하여 입력에 대한 출력 규칙으로 표현 가능하다. 여기서 수학적 모델이 존재하지 않고 실험 데이터와 경험적 지식을 사용 가능하여야 한다. 퍼지의 경우 아래와 같은 규칙이 여기에 해당한다.

If x_1 is A_1^i and ... and x_k is A_k^i Then $y^i = P_0^i$

V. 실험 및 결과

5.1 보상기를 이용한 속응성 개선

(1) 발전소 감발 시 측정 데이터

본 절에서는 수위제어기의 시뮬레이션에 앞서 실제 저출력시의 증기발생기의 데이터 중 수위데이터의 변화를 살펴보고자 한다. 그림 4는 원자로출력 20%에서 6.5%로 감발 시 측정된 증기발생기 수위 그래프이다.

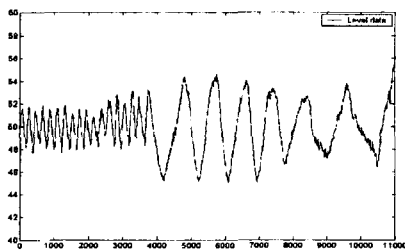


그림 4. 증기발생기 수위 그래프.

(2) 보상기를 이용한 제어 성능 향상

저출력의 경우 급수온도가 낮아지므로 수위제어를 위하여 새로운 기법이 적용되어야 한다. 실제 현장에서는 Bypass 제어를 사용하여 10%정도 이하의 저출력에 대한 제어를 수행하고 있다. 본 논문에서는 실제 발전소에서 사용하고 있는 보상기의 특성을 고려하여 제어 특성을 개선하기 위한 보상기를 구현하여 적용하였

다. 그림 5는 저출력 시 제어 명령치를 보상하여 속응성을 향상시킨 결과를 보여준다.

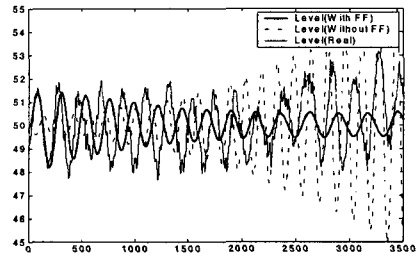


그림 5. 보상기를 통한 속응성 향상 결과.

5.2 가변 제어를 이용한 수위 제어

(1) 급수온도에 따른 계인 조정 결과

가변적인 제어변수를 산출하기 위하여 급수온도에 따라서 계인을 달리하여 적용하는데, 이는 제어계통을 안정상태로 유지시키기 위해서는 상황에 따라 제어변수를 바꾸어 주어야 하기 때문이다. 전문가 지식과 Nyquist 안정도 판별법을 바탕으로 작성된 표 2를 바탕으로 퍼지를 이용하여 급수온도를 기준으로 가변 제어변수를 적용하는 수위제어기를 설계할 수 있다. 온도와 출력은 직접적인 관계를 가지고 있기 때문에 감발 시 온도를 기준으로 계인을 조정하는 것이 효율적인 제어를 위해서 필요하다. 전반적으로 출력이 높아질수록 계인과 적분 시간이 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 정상상태로 갈수록 출력의 변화가 적으므로 급수유량도 점점 줄어들게 된다. 이러한 표를 실제 사용함에 있어서 단계적인 값으로 사용되기 때문에 연속적인 성능 결과를 얻기가 어렵다. 이에 본 논문에서는 퍼지 논리를 이용한 퍼지 자기동조기를 구현하여 연속적인 계인을 조정하고자 한다.

표 2. 온도에 따른 계인 및 시간 변화표.

T_w	G_2	τ_1	τ_2	K_p
40	9.7	48.0	118.7	1.97
60	9.5	46.9	116.0	2.01
80	9.2	45.9	113.3	2.06
100	7.7	38.14	94.0	2.46
120	4.7	23.7	58.0	3.86
140	2.7	13.9	33.5	6.31
160	1.7	8.7	20.6	9.50
180	0.6	3.5	7.6	19.88
200	0.6	3.1	6.6	21.94
220	0.5	2.7	5.5	24.57

5.3 Kp 조정을 위한 자기동조기 적용

그림 6은 실제 발전소의 저출력시 측정된 데이터인 출력에 따른 단계적인 값과 함께 측정 데이터를 이용한 퍼지 자기동조기의 출력값을 함께 보여주고 있다. 데이터의 표현은 실제 데이터이므로 x축은 데이터의 개수를 의미하고 y축은 개인 K_p 의 값을 의미한다.

그림 7은 실제발전소 플랜트 수위와 퍼지 자기동조기를 이용한 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 그림에서 보는 것처럼 자기동조기를 사용하지 않은 것에 비하여 성능이 향상됨을 알 수 있다. 실제 발전소 상황과 시뮬레이션 상황이 완전히 일치하지는 않지만 성능이 향상된다는 것을 확인할 수 있다.

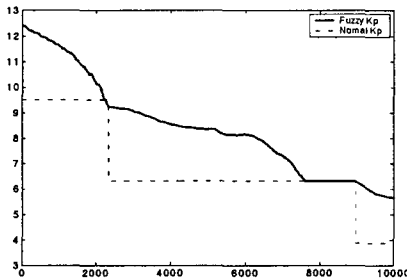


그림 6. K_p 의 실제값과 자기동조기 비교.

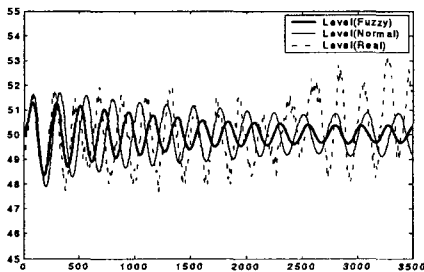


그림 7. 자기동조기를 이용한 성능 향상 결과.

V. 결론

본 논문에서는 발전소의 정지와 같은 저출력시의 증기발생기 수위를 최적조건으로 제어하기 위한 방안으로써 저출력의 상태를 고려할 수 있는 변수들을 이용하여 보상기를 설계하여 제어의 속응성을 높이고자 하였다. 실제 시뮬레이션의 결과를 볼 때 보상기를 이용할 경우 그렇지 않은 경우에 비해 속응성이 향상됨을 보여준다.

출력 가변시, 정상상태의 제어를 위한 고정된 제어변수 개인으로는 증기발생기의 수위를 제어하는 것이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 실제 현장에서 사용되는 수위제어기를 위한 가변 제어변수를 사용하였다. 이를 퍼지 논리를 이용하여 급수온도변화에 따라 연속적으로 적용 가능하도록 하였다. 왜냐하면 실제 현장에서는 이러한 가변 값들을 단계적인 변화로 적용하고 있는데 이는 연속적인 온도나 출력의 변화에 민감할 수 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 퍼지 논리를 이용한 퍼지 자기동조기를 설계하여 적용하였다. 퍼지 자기동조기를 적용한 시뮬레이션에서 제어 특성이 향상됨을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] 한진욱, "증기발생기 수위제어를 위한 실시간 자기동조 FUZZY-PID 제어기 개발," 전북대학교 전기공학과 석사학위 논문, 1999.
- [2] 이윤준, "원자력발전소 증기발생기의 저출력 수위조절에 대한 연구," 서울대학원 원자핵공학과 박사학위 논문, 1991.
- [3] 증기발생기 수위 종합 디지털 제어시스템 개발 및 적용 연구. 기술보고서, 한국전력공사 전력연구원, 1998.
- [4] 정애주, "Neuro-GA를 이용한 증기발생기 수위 제어 알고리즘 개발," 서울대학교 원자핵공학과 석사학위 논문, 1998.
- [5] 이상경, "신경회로망을 이용한 증기발생기의 저출력 수위제어에 관한 연구," 서울대학교 원자핵공학과 석사학위 논문, 1994.