2005년도 정보 및 제어 학술대회(CICS 05) 논문집

원전 증기발생기 수위제어를 위한 퍼지 논리 시스템 설계

Design of Fuzzy Logic System for the Steam Generator Water Level Control of Nuclear Power Plants

송 은 지*, 권 대 환*, 정 빈*, 류 석 환**, 최 병 재**
(Unji Song, DaeHwan Kwan, Zheng Bin, Seog-Hwan Yoo, Byung-Jae Choi)

Abstract - Most of the water level controllers of the actual plant are PID controllers. But they have limitations in appling for tracking the set point and getting rid of disturbances, so there are some defects to apply in the actual ground even though many research works represented the resolution to solve it. In this paper, we design a fuzzy logic system (FLS) for controlling the steam generator water level in nuclear power plants. Some computer simulations reveal similar performance with the conventional PID controller.

Key Words : Steam Generator Water Level, Nuclear Power Plant, Fuzzy Logic System

1. 서론

원자력발전은 에너지 수급의 측면에서 매우 경제적인 발전 기법으로 현재 우리나라는 발전량의 50%이상을 원자력 발전에 의존하고 있다. 그러나 그 이면에는 어느 정도의 위험성이 내재되어 있어, 발전공정의 세밀한 운전 및 제어가 절실히 요구된다. 그 중 증기발생기 내부의 열역학 복잡성 및 비선형성에 의해 저출력에서의 수위 제어는 매우 어려운 문제로 알려져 있다. 증기 발생기 내부 수증기의 수축(shrink)과 팽창(swell) 현상은 증기 발생기 내부 수위의 정확한 측정을 어렵게 한다. 더불어 수위 제어 시 고려되어야 할 사항은 급수유량 및 온도, 증기유량, 냉매온도 등 외란의 영향을 최소화하는 강인성이다.[1-4] 특히, 저부하 운전시에 원자로 출력을 안전하게 추종하면서 적정 수위를 유지하는 것이 중요하며 숙련된 운전원의 지식이 필요하다. 증기발생기의 수위제어를 위한 제어기로 PID 제어기가 널리 사용되고 있으나 저출력에서 수위변동 폭 차이로 급격한 성능저하를 보인다.

최근 20여년간 원자력 발전기의 증기 발생기의 모델링 및 제어기법에 대하여 많은 연구들이 진행되었다. E. Irving은 파라미터 가변 모델을 사용함으로써 급수량과 증기량의 변화, 그리고 수위와의 관계로부터 시스템의 수학적인 모델을 제시하였다.[2] 이 모델은 모델이 단순화한 관계로 프로그램화가 편리하고 증기발생기의 특성을 잘 나타내고 있다. 여기서는 E. Irving 모델을 선정하여 제안한 FLS를 이용하여 제어함으로써 기존의 PID보다 나은 결과를 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서 본 논문에서 선정한 증기발생기 모델에 대한 전달함수로 부터 모델의 특성 및 결과를 살펴본다. 이를 통해 3장에서 제안한 FLS를 설명하고, 4장에서 30%의 저출력에 기존 PID제어기와 제안한 FLS의 결과를 시뮬레이션을 통해 비교한다. 5장에서 제시한 FLS가 기존의 PID제어기와 비슷한 성능을 보임을 확인하고 제안한 FLS의 문제점과 앞으로의 연구방향에 대해 논의한다.

2. 증기발생기 수위 계통 모델

본 논문에서 선정한 증기 발생기 수위 계통 모델은 주 급수유량, 증기량 두 가지를 입력으로 하는 단순화된 전달 함수 모델인 E. Irving 모델이다. 이는 가압형의 증기 발생기에 대해 원자로의 출력에서 증기 유량과 주 급수 유량의 계단변화에 따른 증기 발생기 수위의 응답특성을 이용하여 주 급수유량과 증기량 그리고 수위에 대한 전달 함수로 증기발생기를 모델링하였다.

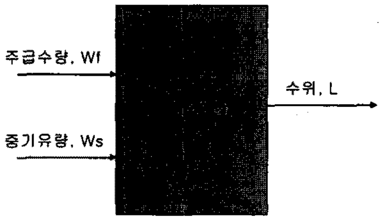


그림 1. E. Irving model의 입출력 변수

그림 1은 주급수량(W_f), 증기유량(W_s) 등과 같이 다중 입력 단일 출력의 관계를 가진다.[1] 이 시스템의 전달함수 관계식은 아래의 식(1)과 같다.

저자 소개

* 大邱大學校 情報通信工學科 碩士課程
** 大邱大學校 電子工學部 教授

$$P_1(s) = \frac{k_1}{s} + \frac{k_2\omega_{n1}^2}{s^2 + 2\zeta_1\omega_{n1}s + \omega_{n1}^2}$$

$$P_2(s) = -\frac{k_1}{s} + \frac{0.05k_3}{s+0.05} \qquad (1)$$

여기에서, 각 계수의 값은

$$k_1 = 1.1\times10^{-4}$$

$$k_2 = -0.012097\exp(-0.09067p) - 0.001$$

$$t_{p1} = 196.37\exp(-0.1245p) + 30$$

$$\zeta_1 = 0.1985\exp(0.03p)$$

$$\omega_{n1} = \frac{\pi}{t_{p1}\sqrt{1-\zeta_1^2}}$$

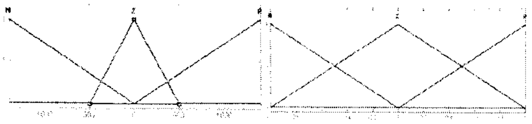
$$k_3 = 0.0196\exp(-0.0735p) + 0.007$$

이다.

3. 퍼지 논리 시스템

원자력 발전소의 증기 발생기는 급수유량, 증기유량 및 1차측 냉매온도 변화에 따른 역 동특성을 지니며 특히, 저출력으로 운전할 때에 역 동특성이 커져 원하지 않는 제어동작으로 인하여 발전소 정지사고로 이어지는 경우가 많다. 이로 인해 저출력 영역에서는 대부분 수동으로 수위를 조절하는 등의 조치를 취하고 있는 실정이다.[5] 본 장에서는 이러한 PID제어기를 대신할 FLS 설계에 관하여 설명한다.

제안한 FLS의 입출력 값들은 Negative, Zero, Positive 3영역으로 나누어서 PID의 입출력 관계와 유사하도록 구성하였다. 그리고 Zero 영역의 범위를 그림 2의 (a)입력 멤버십 함수와 같이 줄여주었다. 이렇게 함으로써 Zero 영역의 범위가 넓어 PID보다 덜 미세하고 값이 전반적으로 불확실한 문제를 해결해 주었다.



(a) 입력 (b) 출력

그림 2. 입출력 멤버십 함수

입력은 수위변화량 $\Delta L_{level}(L_{ref}-L_{level})$, 출력은 급수변화유량 ΔW_f로 입력에 대한 비례관계를 나타낸다.

표 1. 주 급수량 룰베이스

$L_{ref}-L_{level}$	N	Z	P
ΔW_f	N	Z	P

4. 시뮬레이션 및 결과

본 시뮬레이션은 출력이 30%일 때를 기준으로 하였으며, 시뮬레이션 방법은 기존의 30% 출력일 때 가지는 특징 값들을 시스템 값으로 미리 주고 이 값을 통해 안정화되어 있는 상태에 출력을 5% 이내로 가감함으로써 수위의 변화를 비교하는 방식을 사용하였다. 이런 수위의 변화를 기존의 PID 제어기를 통해 얻은 결과와 비교한다.

그림 3은 기존의 PID 수위제어기의 블록 다이어그램이다. 이를 이용하여 비교 대상인 기존의 PID 제어기를 시뮬레이션 한다.

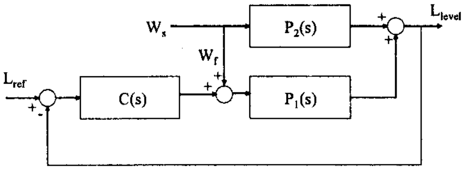


그림 3. PID 수위제어기

위의 PID 수위 제어기의 전달함수는 아래와 같다.

$$C(s) = \frac{100s^2 + 7.4583s + 1.0770}{s^3 + 2.1145s^2 + 0.22772s + 0.022505} \qquad (2)$$

아래의 그림 4는 기존의 PID와 제안한 FLS의 P_2입력으로 들어갈 증기유량이다.

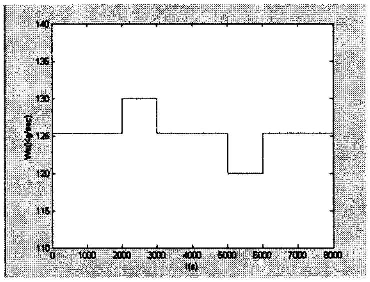


그림 4. 증기유량 비율(30%)
(초기조건: 125.28 Kg/sec)

그림 5는 그림 4의 입력, 증기유량에 대한 기존의 PID 제어기를 이용하여 제어했을 때의 주 급수유량의 변화를 보여주고 있다. 그림 6은 수위의 변화를 보여주고 있다.

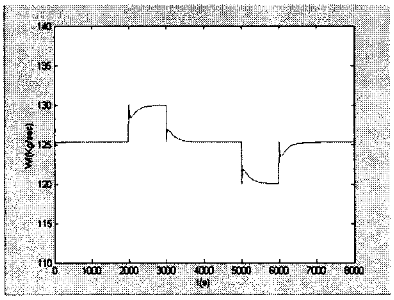


그림 5. 주 급수유량(30%)
(초기조건: 125.28 Kg/sec)

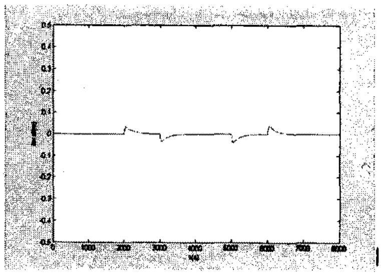


그림 6. 수위 변화량

아래 그림 7은 위의 PID 수위제어기를 본 논문에서 제안한 FLS로 대체한 블록 다이어그램이다. 이를 시뮬레이션한 결과를 살펴보고 비교해 본다.

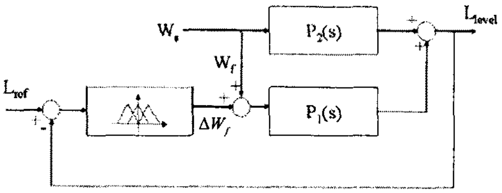


그림 7. fuzzy 수위제어계

동일한 입력 그림 4의 증기유량을 사용하여 제안한 FLS를 시뮬레이션한 결과를 그림 8과 그림 9를 통하여 보여주고 있다.

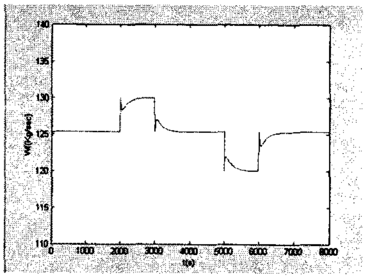


그림 8. 주 급수유량 (30%)
(초기조건: 125.28 Kg/sec)

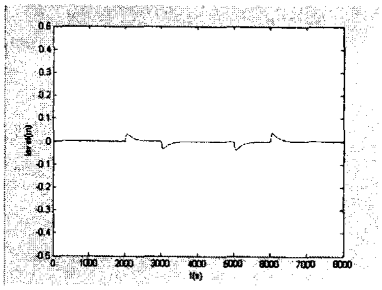


그림 9. 수위 변화량

5. 결론

앞의 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 FLS를 이용한 수위제어의 성능이 PID 제어 시스템과 유사한 결과를 나타냄을 확인하였다. 하지만 본 논문에서 제안한 FLS는 30%의 저출력에서만 시뮬레이션 했으며, 추후 전 출력 범위에 걸쳐서 향상된 성능을 보이는 제어 시스템의 설계가 요구된다.

참 고 문 헌

[1] 이윤준, "원자력발전소 증기발생기의 저출력 수위 조절에 대한 연구", 서울대학교, 공과대학 원자핵공학과 박사학위논문, 1991.2

[2] E. Irving, et al. "Toward efficient full automatic operation of the PWR steam generator with level adaptive control", Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Station2, British Nuclear energy Society, 1980.

[3] 박상현, "증기발생기 수위제어기 설계 및 성능평가에 관한 연구", 충남대학교, 전자공학과 석사논문, 1996.

[4] 주영훈, 조광래, 김주원, 박진배, "원전 증기발생기의 수위제어를 위한 지능형 퍼지 모델링 및 강인한 디지털 퍼지 제어기 설계", 한국 퍼지 및 지능시스템 학회, vol. 12, no. 4, pp. 311~316, 2002.

[5] 한진욱, 이창구, 한후석, "증기발생기 수위제어를 위한 자기동조 퍼지 PID제어기 개발", 전기학회논문지, 10호, 제48A권, 1999.10.

[6] 정길도, 박종호, "원자력 발전소 증기 발생기의 인공지능 모델링에 관한 연구", 전북대학교, EESRI, 1999.

[7] Byung-Hee Moon, Kyung-Chul Kim, "A study on the Development and Application of a Steam Generator evel Digital Control System for Nuclear Plants", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Engineers vol. 16, No. 3, pp. 101~109, May. 2002.

[8] 한재복, 전시채, 유준, "저 출력시 증기발생기 수위의 자동제어논리 개발", Proceedings of the 11th, KACC, October. 1996.

[9] 김성수, 이재기, 최진영, "신경회로망을 이용한 원자력 발전소 증기발생기의 지능제어", Journal of Control, Automation and Systems Engineering. vol. 6, no. 2, February, 2000

[10] 김주식, 김민환, 유정웅, "유전 알고리듬을 이용한 개선된 QFT의 루프 형성법 및 원전 증기발생기 수위제어계의 설계", Journal of Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers vol. 12, No. 4, pp. 106 ~ 113, November. 1998.