

원전 증기발생기 간이 수위제어 시스템 구현

한상재, 오상헌, 황동환
 충남대학교 전자공학과, 충남대학교 정보통신공학부

Implement of a Nuclear Power Steam Generator Simple Control System

Sang Jae Han, Sang Heon Oh, Dong-Hwan Hwang

Department of Electronics Engineering, Division of Electrical and Computer Engineering, Chungnam University

Abstract - 본 논문에서는 원전 증기 발생기의 간이 수위 제어를 제안하고 이를 검증하였다. 제안한 수위 제어 시스템은 범용의 I/O 인터페이스를 내장하고 있으며 임의의 제어 알고리즘의 적용이 가능하도록 설계하였다. 수위 제어 시스템의 성능을 검증하기 위하여 제어기와 동일한 구조의 H/W를 이용하여 원전 증기 발생기를 모사하고 설계한 수위 제어 시스템의 성능을 검증하였다.

1. 서 론

원자력 발전소의 증기 발생기는 터빈의 구동에 필요한 증기를 생성하고 원자로 냉각재의 열을 제거하는 기능을 가진다. 그런데 수위가 높아져서 증기의 습기 함유량이 많아지면 터빈 날개가 손상될 가능성이 있고, 수위가 낮아져 원자로 냉각재의 열을 제거하는 기능이 떨어지면 원자로의 온도가 상승하여 원자로에 치명적인 영향을 준다. 따라서 원자력 발전소의 안정적인 운전 및 이용률 향상의 측면에서 증기 발생기의 수위를 안정하게 제어하는 것은 매우 중요한 문제로 알려져 있다[1][2]. 현재 가동되고 있는 원전의 증기 발생기 수위 제어는 대부분 PI 제어기를 사용하고 있는데 원자로 출력이 20% 이하인 저출력 운전 구간에서는 효과적인 수위제어를 수행하지 못하므로 숙련된 운전원에 의한 수동 운전에 의존하고 있다[1][2]. 한편, 최근에는 컴퓨터 및 정보통신 기술의 발달로 각종 화학 공장, 화력 발전소 등에는 최신의 제어 계측 설비를 투입하여 운전중에 있는데 특히 최근에 국내 원자력 발전소의 설비 교체를 시작하면서 전체적으로 원전 제어 설비의 디지털화가 추진 중에 있다[3]. 본 논문에서는 증기 발생기의 수위를 효과적으로 제어하기 위한 간이 수위 제어 시스템을 설계하고 이를 검증하기 위하여 간이 모의 플랜트 및 네트워크 기반의 모니터링 시스템을 포함한 전체 시스템을 구현하였다.

2. 전체 시스템 구성

그림 1에 본 논문에서 구현한 원전 증기 발생기 수위 제어 시스템의 전체 구조를 나타내었다. 시스템은 크게 증기 발생기의 동특성을 모사하기 위한 모의 플랜트와 제어 알고리즘 구현을 위한 제어기 및 전체 시스템의 운용을 위한 모니터링 시스템으로 구성된다. 모의 플랜트와 제어기는 플랜트 모델 및 제어 알고리즘의 구현을 위하여 상용의 CPU 및 실시간 운영 체제 환경에서 구현한다. 그림 1에서 보듯이 수위 제어 시스템은 이더넷 방식의 네트워크 인터페이스를 포함하고 있으므로 웹을 기반으로 원격 시스템에서도 시스템의 모니터링을 수행할 수 있다.

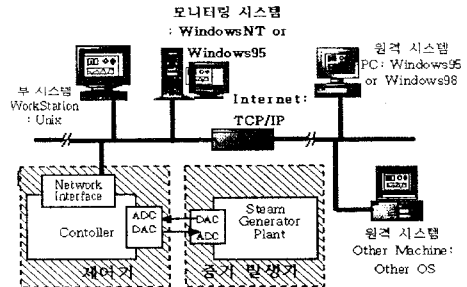


그림 1. 원전 증기 발생기 수위 제어 시스템 구성도

3. 각 부 시스템 설계

3.1 증기 발생기 수위 제어기

3.1.1 제어기 H/W

디지털 방식의 제어기 H/W는 제어 알고리즘 연산을 위한 CPU 모듈, 외부 시스템과 통신을 위한 I/O 인터페이스, 제어 신호 출력 및 플랜트의 아날로그 신호를 처리하기 위한 D/A-A/D 변환기로 구성된다. 그림 2에 CPU 모듈 및 I/O 인터페이스를 나타내었다.

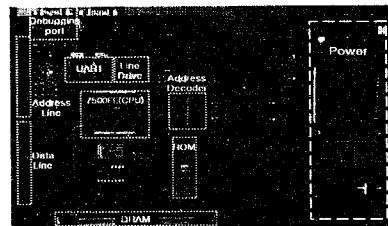


그림 2. CPU 모듈 및 I/O 인터페이스

CPU 모듈은 상용의 32-bit CPU를 이용하여 설계하였으며 I/O 인터페이스는 다수의 UART(Universal Asynchronous Receive Transmit)를 구현하여 외부 시스템과의 통신 및 제어 알고리즘의 디버깅 인터페이스로 사용한다. 그림 3에 아날로그 신호 처리를 위한 4채널의 AD-DA 변환 모듈을 나타내었다.

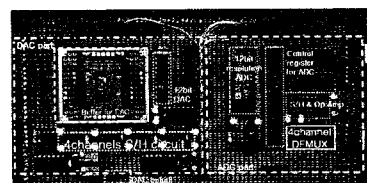


그림 3. 4 채널 AD-DA 변환 모듈

AD-DA 변환 모듈은 각각 12 비트의 분해능을 가지는 Analog Device 사의 AD674B과 DAC312H를 사용하여 설계하였다. DA 변환 부분은 4개의 아날로그 입력을 요구하는 증기 발생기의 구조를 고려하여 단일 출력의 DAC321H를 Sample & Hold 방식을 적용하여 4 채널의 아날로그 출력을 가지도록 설계하였다. 그림 4에 제어기에 사용한 네트워크 인터페이스 모듈을 나타내었다. 네트워크 인터페이스는 Crystal사의 이더넷 컨트롤러인 CS8900A를 사용하여 설계하였다. 제어기는 모니터링 시스템으로부터 네트워크를 통해 시작, 정지 및 재시작, 운전 시나리오 변경 등과 같은 운용에 관한 여러 가지 명령을 수신할 수 있으며 또한 상태를 전송한다.

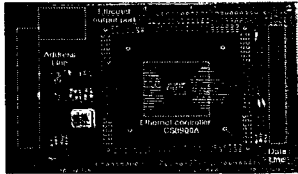


그림 4. 네트워크 인터페이스 모듈

3.1.2 제어기 S/W

증기 발생기 S/W는 제어 알고리즘과 이를 운용하기 위한 실시간 운영 체제로 구성된다. 원전 증기 발생기의 수위 제어 알고리즘에 관한 다양한 결과를 볼 수 있는데 구체적으로 살펴보면 Irving[2] 등은 적응 제어 기법을 제안하였으며, 강인 제어 기법[1]이나 일반화된 예측 제어(GPC : Generalized Predictive Control) 기법[4] 등에 관한 연구 결과들도 볼 수 있다. 그 외에도 퍼지 제어 기법[3], 고장 허용 알고리즘[3]에 관한 연구 결과도 볼 수 있다. 본 논문에서는 우선 초기 결과로서 디지털 제어기에 적용 가능한 PI 및 PID 제어 알고리즘을 적용하였다 [7]. 증기 발생기의 수위는 메인(Main) 밸브와 바이패스(Bypass) 밸브를 통하여 제어하는데 증기 발생기의 특성에 의하여 저출력 구간과 정상 출력 구간을 나누어 제어한다. 원자로 출력이 20% 이하인 저출력 구간의 경우에는 바이패스 밸브를 제어하고 원자로 출력 20%를 초과하면, 메인 밸브 제어한다[7]. 메인 밸브의 제어는 2개의 PI 제어기를 Cascade된 형태로 구성하며, 바이패스 밸브 제어는 PID 제어기와 PI 제어기를 Cascade된 형태로 구성한다. 본 논문에서는 각각의 제어 알고리즘을 상용의 실시간 운영 체제 내에서 동작하도록 설계하였다. 그림 5에 제어기 S/W의 전체 태스크 구조를 나타내었으며 각각의 태스크의 기능을 표 1에 정리하였다.

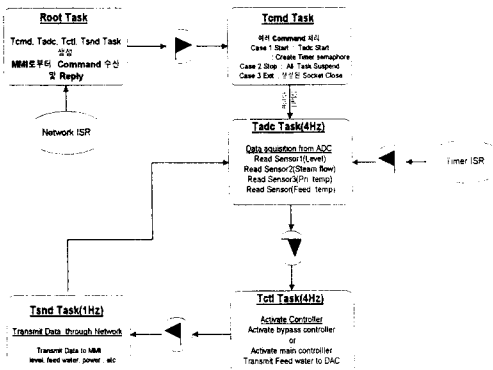


그림 5. 제어기 S/W 전체 태스크 구조

표 1. 제어기 전체 태스크 기능 정리

명칭	기능
Root	전체 태스크 및 세마포어를 생성 및 모니터링 시스템 명령의 수신과 응답 처리
Tcmd	Root 태스크에서 수신한 명령을 해석하여 각각의 태스크의 수행을 제어
Tadc	4채널의 AD 변환기로부터 데이터를 수신
Tctl	제어 알고리즘을 수행하여 DA 변환기를 통해 플랜트로 주급수량을 출력
Tsnd	모니터링 시스템에 데이터를 전달
NI ISR	네트워크를 통하여 모니터링 시스템으로부터 명령을 수신
Timer ISR	4Hz마다 세마포어 생성하여 Tcmd 태스크를 구동

여기서, 각각의 태스크는 데이터 입·출력 또는 제어 알고리즘의 연산을 담당하며 태스크간의 동기는 실시간 운영 체제에서 제공하는 세마포어(Semaphore) 기능을 사용하였다.

3.2 증기 발생기 모의 플랜트

원자력 발전소 증기발생기에 대한 모델 중 많이 이용되는 것은 프랑스 원전 모델, Irving 모델, Westinghouse 모델 등이 있다[3]. 본 논문에서는 증기 발생기의 출력 수위에 영향을 주는 1차측 냉매온도와 주급수 온도의 영향에 의한 저출력 구간에서 수위 변화를 고려한 Westinghouse 모델을 사용하였다[. 증기 발생기의 입력 변수로서 주급수유량, 증기유량, 1차측 냉매 온도, 주급수 온도와 출력 변수로서 증기 발생기 수위를 고려하면 증기 발생기 모델은 그림 5와 같은 MISO(Multi-Input Single-Output)시스템으로 나타낼 수 있다[1,3].

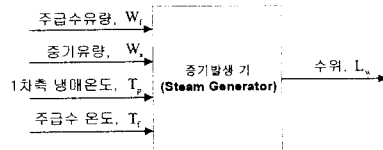


그림 6. 원전 증기발생기 모델

증기발생기 수위는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(s) = [G_1(s) \ G_2(s) \ G_3(s) \ G_4(s)] \begin{bmatrix} W_f(s) \\ W_s(s) \\ T_p(s) \\ T_f(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, W_f , W_s , T_p , T_f 는 각각 주급수유량(kg/sec), 증기유량(kg/sec), 1차측 냉매온도(K), 주급수온도(K)를 나타내며 L 은 증기발생기의 수위(%)를 나타낸다. 식(1)에 각각의 전달 함수는 다음과 같이 나타낸다.

$$G_1(s) = \frac{k_1}{s} + \frac{k_2 \omega_m^2}{s^2 + 2\zeta_1 \omega_m s + \omega_m^2} \quad (2)$$

$$G_2(s) = -\frac{k_1}{s} + \frac{0.05k_3}{s + 0.05} \quad (3)$$

$$G_3(s) = \left[\frac{k_4(a_3 - b_3)s}{(s + a_3)(s + b_3)} + \frac{c_3 k_5}{s + c_3} \right] e^{-d_3 s} \quad (4)$$

$$G_4(s) = \frac{k_6 \omega_m^2}{s^2 + 2\zeta_4 \omega_m s + \omega_m^2} \quad (5)$$

각각의 전달 함수의 계수는 출력의 변화에 따라 실험 데이터로부터 유도하는 값이다 [1]. 그림 7에는 모의 플랜트의 전체 태스크 구조를 나타내었으며 표 2에 각각의 태스크의 기능을 나타내었다. 모의 플랜트의 H/W 및 S/W 구조는 제어기의 구조와 동일하다.

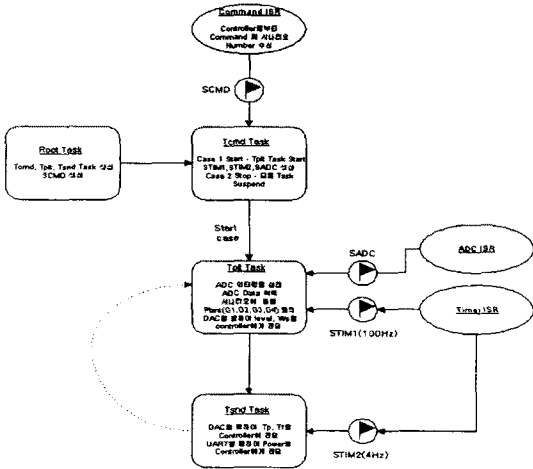


그림 7. 모의 플랜트 S/W 전체 태스크 구조

표 2. 플랜트 Task 및 ISR 기능

명칭	기능
Root	전체 태스크 생성 및 플랜트 시나리오 변경
Tcmd	제어기로부터 수신한 명령 처리
Tplt	주급수량, 증기유량, 1차측 냉매온도, 주급수 온도를 입력으로 하여 수위를 계산하고 주급수량 및 수위정보를 DA 변환을 통하여 제어기에 전달
Tsnd	DA 변환기를 통하여 냉각재 온도 및 주급수 온도를 제어기에 전달
Adc ISR	제어기로부터 주급수량 신호 수신
Timer ISR	세마포어를 생성하여 Tplt 및 Tsnd 태스크 구동
Command ISR	제어기로부터 플랜트 시나리오를 수신

3.3 모니터링 시스템

모니터링 시스템은 자바 언어로 구현하였으며 클라이언트/서버 구조를 취하므로 원격지에서도 모니터링이 가능하다[6]. 서버측은 제어기와 직접 연결되어 공정 데이터나 명령을 송수신하고, 클라이언트 측은 공정 데이터를 서버를 경유하여 모니터링을 수행한다. 클라이언트는 프로그램의 기능상 서버와 차이는 없지만 제어 시스템의 안정적인 동작을 위해서 제어기의 명령은 서버로부터 제한을 받을 수도 있다.

4. 실험 결과

구현한 간이 수위 제어 시스템의 성능을 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 그림 1과 같이 제어기, 증기 발생기 모의 플랜트 및 모니터링 시스템을 구성하고 수위 제어를 수행하였다. 그림 7에 증기 발생기 수위 제어 시스템 모니터링 프로그램의 메인 화면을 나타내었으며 그림 9는 증기 발생기의 시간에 따른 수위의 변화를 나타내었다.

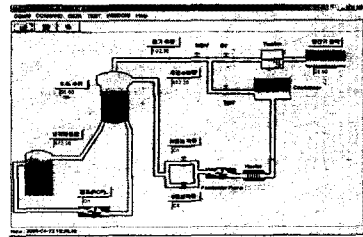


그림 8. 모니터링 시스템 메인 화면

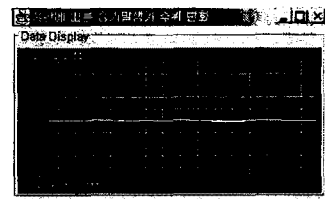


그림 9. 시간에 따른 증기 발생기 수위 변화

6. 결 론

본 논문에서는 증기 발생기의 수위를 효과적으로 제어하기 위한 간이 수위 제어기를 제안하고 이를 검증하였다. 제안한 수위 제어 시스템은 범용의 I/O 인터페이스를 내장하고 있으며 임의의 제어 알고리즘의 적용이 가능하도록 설계하였다. 실험 결과 구현한 제어 시스템이 증기 발생기에 효과적으로 적용할 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 구현한 제어 시스템은 각각의 기능을 모듈화 방식으로 구현하였으므로 새로운 제어 알고리즘 및 대상 시스템의 적용 시에도 효과적으로 응용할 수 있을 것이다.

[참고 문헌]

- [1] 윤상준, 증기 발생기 수위 제어를 위한 강인 제어기 설계, 충남대학교 전자공학과석사 학위 논문, 1994. 2.
- [2] E. Irving, et al., "Toward Efficient Full Automatic Operation of the PWR Steam Generator with Water Level Adaptive Control", Proc. 2nd Int. Conference on Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Stations, pp 309-329, 1979.
- [3] 이상정 외, 디지털 제어 시스템 이용률 향상을 위한 고장 허용 제어 알고리즘 개발에 관한 연구, 한국 원자력 연구소 위탁연구 최종 보고서, 충남대학교 전자공학과, 1996. 7.
- [4] 김창희, 입력제약과 선행신호를 고려한 일반형 예측 제어 기법, 충남대학교 전자공학과 박사 학위 논문, 1996. 8.
- [5] 이상정 외, 계층적제어구조를 이용한 원격제어계통 적용기술개발에 관한 연구, 한국 원자력 연구소 위탁 연구 보고서, 충남대학교 전자공학과, 1994. 6.
- [6] 김성태 외, "자바언어를 이용한 개방형 구조 웹 기반 모니터링 시스템 구현", 2000한국자동제어학술회의, 2000, 10. 19-21.