

탈기기계통의 제어성 평가와 튜닝

Controllability Evaluation and Tuning of Gas Stripper System

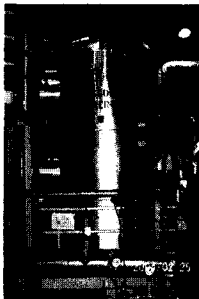
이광대*, 양승옥**, 오웅세***
(Kwang Dae Lee, Seung Ok Yang, and Eung Se Oh)

Abstract - The gas stripper system of a nuclear power plant provides gas-free water to a reactor and a turbine system. The gas tripper unit has two control systems to regulate pressure and level independently. Because the level and the pressure interact as a control disturbance each other, continuous operation of the system is difficult. In this paper, We describe the controllability evaluation of the gas stripper system and the results of the optimally tuned control gains.

Key Words : Nuclear, Tuning, Gas Stripper, Plant

1. 개요

원자력발전소의 탈기기 계통(Gas Stripper System)은 순수한 물을 가스가 없는(탈기) 상태로 원자로와 터빈 공급수로 제공하는 중요한 기능을 한다. 탈기 과정은 탈기 유닛[사진 1]으로 유입되는 물을 약 105℃로 가열하여 물속의 가스를 배출하게 하고 탈기된 물은 지속적으로 탱크로 이송하는 과정이다. 이때, 탈기 과정을 유지하기 위하여 수위와 압력을 제어하게 된다.



[사진 1] 탈기기 유닛

그러나 압력과 수위는 상호 제어 외란으로 작용하여 제어가 어렵게 된다.

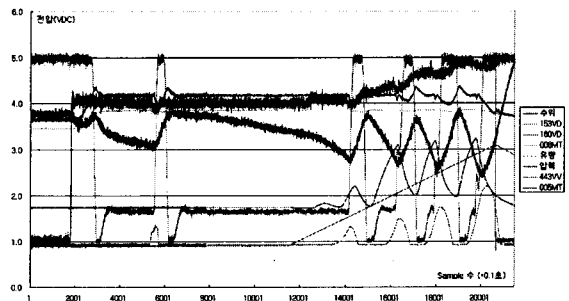
본 논문에서는 수위와 압력 제어 루프의 운전 거동으로부터 동적 모델을 구하고, 시뮬레이션을 통하여 제어성을 평가하고 최적 튜닝하는 방법과 과정을 기술한다.

저자 소개

- * 正 會 員 : 전력연구원 I&C그룹 선임연구원
- ** 準 會 員 : 전력연구원 I&C그룹 선임연구원
- *** 準 會 員 : 전력연구원 I&C그룹 책임연구원

2. 제어 현상 고찰

[그림 1]은 탈기기 유닛의 탈기수 생산 시작 시점에서의 제어 거동을 나타낸다.



[그림 1] 탈기기 운전시 제어 거동

탈기기 압력 및 수위 제어의 어려움은 독립된 두개 제어 루프 변수인 압력과 수위가 상호 연관되어 있다는 것이다. 또한, 제어에 직접적으로 사용되지는 않지만 탈기 유닛으로 공급되는 급수 온도와 급수 유량등 관련 변수가 제어에 영향을 미친다. 만약 수위 제어에서 수위를 상승 제어할 경우, 밀폐된 탈기기 유닛의 압력이 동반 상승하게 된다. 압력 제어를 통하여 압력을 상승 제어할 경우, 유닛 내부 물에 포함되어있는 기포의 수축으로 수위는 하강하게 된다.

탈기수가 가열에서 생산으로 전환되기 시작하면, 3-Way 밸브는 100% 재순환 유량의 일부를 생산 유량으로 전환하게 되고, 생산 유량으로 전환되는 유량만큼 급수 공급 밸

브를 통하여 보충 유량을 제어하여 탈기기 유닛 수위를 50%로 일정하게 제어하게 된다. 보충 유량의 온도는 전환 시작 시, 0% 개도에서는 약 27°C이나, 전환 밸브 개도가 약 50%에서는 약 65°C로서 탈기기 유닛 내부 온도인 105°C 보다 매우 차가운 물이 유입되게 된다. 따라서 보충되는 급수가 유입되어도 탈기기 유닛 내부의 열적인 수축 현상 때문에 수위는 유입 시점에서 상승하지 않고 오히려 감소하는 것으로 나타난다. 수위가 감소하므로 탱크 압력은 감소하게 되고, 압력 제어 루프에서는 압력 상승을 위하여 가열 증기 밸브를 개방 제어하게 된다. 개방 시점과 거의 동시에, 급수에 의한 수위는 이제야 서서히 상승하게 되고, 상승된 수위와 가열 증기 열전달에 의해서 압력은 상승하게 된다.

일반적인 수위 제어 시스템에서는 유입 유량이 있을 경우, 적분 공정 특성을 나타내며, 수위는 유량 유입과 동시에 선형적으로 증가하는 특성을 보인다. 그러나 탈기기 유닛은 내부 비등에 의한 기포를 포함하고 있으며, 재순환→생산 공정 전환 시, 차가운 급수가 수위 제어를 위하여 유닛으로 유입되게 된다. 차가운 급수 유입 시에는 유닛 내부 물속에 존재하던 기포가 수축하게 되므로 수위는 도리어 낮아지는 것으로 나타나고, 상당한 시간 지연 후, 수위는 원래의 제어 의도처럼 상승하게 된다. 또한, 탱크 상부 압력 변화가 탱크 내부 물 속의 기체 압축과 팽창에 영향을 주고, 이것은 수위 변화로 나타나 제어 외란으로 작용한다. 이러한 열유체적 특성으로 인하여, 탈기기 제어 시스템 튜닝이 어렵다.

3. 제어 모델 개발과 제어성 평가

탈기기의 운전 자료를 사용하여 수위 및 압력 거동 모델을 구하고, 제어성을 평가하였다.

3.1 수위 거동 모델 개발

탈기기 유닛의 거동 특성을 고려한 간략화 모델은 [그림 2]와 같다.



[그림 2] 탈기기 유닛의 간략화 모델

탈기기 유닛의 급수 유량에 의한 물의 질량 변화는 다음과 같다.

$$\frac{dM}{dt} = F_w$$

(M : 탱크 내 물의 질량, F_w : 급수 유량)

탈기기 유닛 하부 물의 부피는 순수한 물의 부피와 기포 부피의 합이므로 다음과 같다.

$$V = \frac{1}{\rho}M + V_s$$

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

(V : 내부 물 체적, ρ : 물의 비중, V_s : 물속 기포 체적)
수위 변화는 부피 변화에 비례하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

(L : 탱크 물 수위, K_s : 체적변화율 상수)

위의 식을 정리하면 다음과 같다.

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

수위 변화 분을 정상 상태 질량 변화분과 과도 상태 기포에 의한 변화 분으로 나타낸다.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dL_M}{dt} + \frac{dL_S}{dt}$$

(L_M : 정상상태 순수 물에 의한 수위)

정상 상태 수위 변화 분은

$$\frac{dL_M}{dt} = \frac{K_s}{\rho} \frac{dM}{dt} = \frac{K_s}{\rho} F_w = G_1 F_w$$

(G_1 : 정상상태 수위변화 상수)

이것을 Laplace 식으로 나타내면

$$L_M(s) = \frac{G_1}{s} F_w(s)$$

저온 급수 및 기포에 의한 수위 변화 분은

$$\frac{dL_S}{dt} = -\frac{1}{\tau}(G_2 F_w - L_S)$$

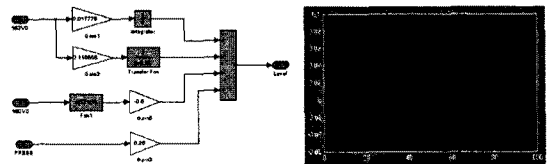
(G_2 :과도상태 수위변화 상수, τ :과도상태 수위변화 시상수)

Laplace 정리하면, $L_S(s) = -\frac{G_2}{1+\tau s} F_w(s)$

따라서, 탈기기 수위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(s) = L_M(s) + L_S(s) = \left(\frac{G_1}{s} - \frac{G_2}{1+\tau s} \right) F_w(s)$$

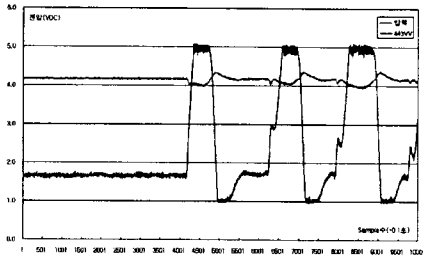
[그림 3]은 운전 데이터로부터 구한, 탈기기 수위 거동 모델과 거동을 나타낸다.



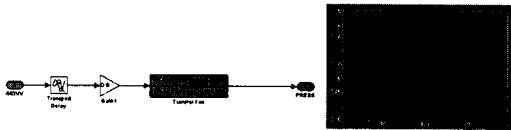
[그림 3] 탈기기 유닛 수위 거동 모델과 거동 특성

3.2 압력 제어 모델 개발

압력 거동 모델은 [그림 4]의 실제 운전 자료를 사용하여, 파라미터 인식 방법으로 모델링하였으며, 결과는 [그림 5]와 같다.



[그림 4] 압력 거동 모델링에 사용한 운전 데이터

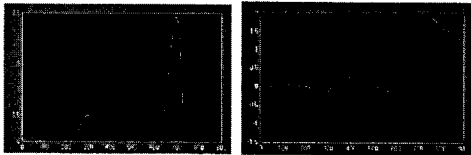


[그림 5] 압력 거동 모델과 거동 특성

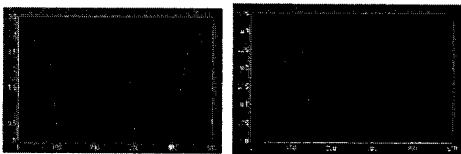
3.3 제어성 평가

수위와 압력의 제어성을 평가하기 위하여, 제어 모델에 운전 과도를 인가하여 제어 추적성을 평가하고, 거동 모델의 Pole 위치로부터 확인하였다.

[그림 6]은 수위 거동 모델, [그림 7]은 압력 거동 모델에 운전 조건과 유사한 운전 과도를 인가하였을 때의 제어 거동을 나타낸다. 수위의 경우, 급수 유량에 대해서 수위가 진동 발산 제어가 됨을 알 수 있고, 압력의 경우에는 가열 증기 온도에 따라 지속 진동하는 불안정 제어를 함을 알 수 있다.

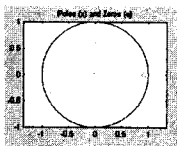


[그림 6] 수위 제어 거동[급수유량/수위]



[그림 7] 압력 제어 거동[가열증기온도/압력]

[그림 8]은 압력 거동 모델의 Pole-Zero 위치를 나타내며, 하나의 Dominant Pole이 안정 경계부근에 있어서, 제어가 불안정한 것으로 평가할 수 있다.



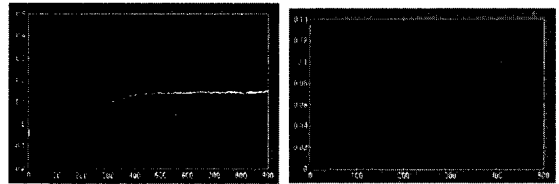
[그림 8] 압력거동 모델의 Pole-Zero 위치

4. 최적 제어 튜닝

위에서 구한 제어 및 압력 거동 모델을 사용하여, 경험적 방법으로 최적 제어 튜닝 값을 구하였으며, 결과 값은 [표 1], 시뮬레이션 결과는 [그림 9]와 같으며, 수위와 압력이 설정 값에 적절하게 추적 제어가 됨을 알 수 있다.

제어루프	제어변수	편리값	튜닝값
수위 제어	비례이득	1.04	1.0
	적분시간(초)	28.3	166.7
압력 제어	비례이득	3.58	2.5
	적분시간(초)	5.93	25

[표 1] 제어루프 튜닝 값



[그림 9] 튜닝후의 수위와 압력 제어 거동

5. 결론

원자력발전소의 탈기기를 제어하기 위하여, 수위와 압력 거동 모델을 개발하고, 이를 기반으로 제어성을 평가한 후, 최적 튜닝을 하였다. 새로운 제어 파라미터로 튜닝한 결과, 수위와 압력 제어의 설정치 추적성이 개선됨을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Ioan Dore LANDAU, "System Identification and Control Design", PRENTICE HALL, 1990
- [2] Lennart Ljung, "System Identification : Theory for the User", PRENTICE HALL, 1987