

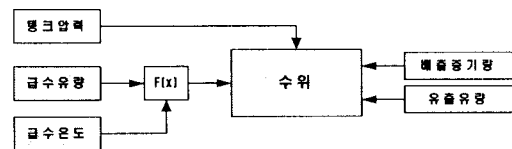
탈기 계통의 제어최적화를 위한 제어 모델링

이광대, 오응세
 한국전력공사 전력연구원
 김종원, 전당희, 허정원
 한국수력원자력(주) 울진원자력본부

Control Modelling for Control Optimization of Gas Stripper System

Lee Kwang-dae, Oh Eung-se
 Korea Electric Power Corporation, Korea Electric Power Research Institute
 Kim Jong-won, Jeon Dang-hee, Hur Jung-won
 Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD, Ulchin Nuclear Power Division

Abstract - 원자력발전소의 탈기 계통(Gas Stripper System)은 약 25℃의 순수를 1.2기압, 105℃ 상태를 거쳐서 가스가 없는 상태(탈기)로 만들어 주는 계통이다. 탈기 상태를 유지하면서 지속적으로 순수를 만들기 위해서 본 계통에는 수위와 압력 제어루프가 있다. 탈기 상태에서는 탈기 탱크 내의 유체 상태가 이상(Two Phase)이기 차가운 급수를 사용한 수위와 압력 제어가 어렵다. 본 논문에서는 모델 기반으로 제어 최적화를 하기 위하여 제어 구성 요소들에 대한 제어 모델링 및 검증 과정을 기술한다. 제어 모델링은 일반적으로 Parameter Identification 기법을 적용하지만, 유체역학 수식 모델, 운전 데이터, 탱크와 배관의 설계 자료 등을 이용한 경험적 방법을 적용하였으며 운전 데이터를 사용하여 검증하였다.



<그림 2> 탈기 수위와 상관 변수 관계

제어 범위의 체적은 1.323m³, 급수 제어 밸브의 용량은 60m³/사이므로 1% 제어 밸브 개도에 대한 수위 증가율은 0.05371m³/초 이다. 또한 대기 방출 증기밸브를 통한 배출량은 900kg/시 이므로 이에 따른 수위 감소율은 -0.01889%/초가 된다. 유출수에 의한 수위 감소율은 급수에 의한 증가율의 값과 같다.

차가운 급수의 유입에 따른 수위의 Shrink 특성을 나타내는 동적 거동 모델을 구하기 위하여, 유입되는 급수 유량 F_w, 과도 상태 수위 변화 상수 G, 과도 상태 수위변화 시정수 τ 로 표기한 수위의 Shrink 변화율은 다음과 같다.

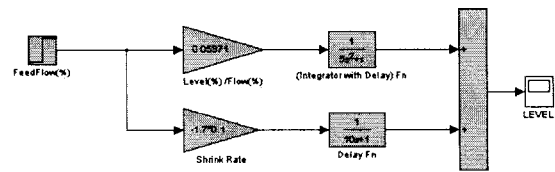
$$\frac{dL_s}{dt} = -\frac{1}{\tau}(G F_w - L_s)$$

위의 식을 Laplace 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$L_s(s) = -\frac{G}{1 + \tau s} F_w(s)$$

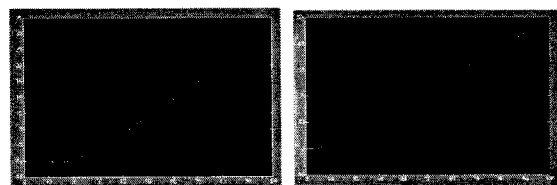
위의 G, τ 값은 운전 데이터를 이용한 비교 검증방법으로 구하였으며 G는 -1.77%, τ는 10초이다.

급수 유입에 따른 정적인 수위 변화와 차가운 급수에 의한 동적인 수위 변화를 통합한 급수-수위 모델은 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 급수/수위 모델 블록도

위의 모델을 이용하여 25℃와 85℃ 급수가 10% 유량의 계단형식으로 유입되었을 때의 수위 변화는 <그림 4>와 같다. 급수 온도가 25℃일 경우, 탱크 내부의 기포 수축으로 인하여 수위는 17.5초 후에 약 10%가 감소하였다가 서서히 증가하지만 급수 온도가 높을 경우에는 약 5초의 시간 지연 후 서서히 증가하게 된다.



<그림 4> 급수온도 25℃/85℃에 대한 수위 거동

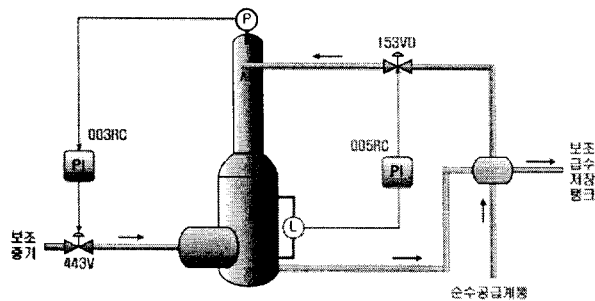
1. 서 론

원자력발전소의 탈기 계통은 순수한 물을 가스가 없는(탈기된) 순수로 만들어주는 수처리 계통으로서 압력 및 수위 제어를 통하여 지속적으로 탈기수를 생산가능하게 한다. 탈기 제어 최적화를 위한 제어 구성 요소의 모델링에는 유체역학 모델 식을 먼저 작성하였으며 운전 데이터와 기기의 설계 자료를 참조하여 FOPDT(First Order plus Dead Time) 형식으로 정형화하였다. 제어 모델링은 탈기 수위 모델과 압력 모델, 기타 구성기기 모델링으로 구성된다. 탈기 탱크 수위 모델은 수위에 영향을 줄 수 있는 급수 유량과 급수 온도, 배출 증기 등의 다수 요소들과의 상관관계를 나타낸다. 압력 모델은 수위 모델과 유사한 과정으로 개발하였으며 각 모델은 실제 운전 데이터와의 비교를 통하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 원자력발전소 탈기 계통 개요

원자력발전소 탈기 계통은 순수공급계통으로 공급받은 약 25℃의 급수를 1.2기압, 105℃의 포화 상태를 거치게 하여 순수로부터 기체를 분리해내는 계통이다<그림 1>. 탈기기 탱크 내부는 포화 상태를 유지하기 위한 압력 제어 루프와 지속적인 탈기수 생산을 위한 수위 제어 루프가 있다.



<그림 1> 탈기 계통 제어루프 블록도

2.2 탈기 탱크 수위 모델 개발

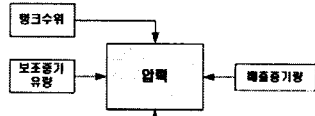
탈기 탱크 수위는 정적 거동 모델과 동적 거동 모델로 나눌 수 있다. 정적 모델은 급수와 유출수, 상부 배출 증기 유량에 대한 적분 공정(Integral Process)으로 나타낼 수 있으며 유량에 따라서 수위는 선형적으로 변화한다. 동적 모델은 탱크 내부의 이상(Two Phase) 유체에 차가운 급수 유입, 상부 압력 변화에 따른 Shrink/Swell 현상을 반영한다. 수위 변화에 영향을 주는 상관 변수는 <그림 2>와 같다.

수위 정적 거동 모델의 입력 요소는 급수, 유출수와 상부 배출증기 유량에 대한 수위의 선형 거동 모델이다. 먼저, 탈기 탱크와 제어 밸브의 설계 자료로부터 제어 범위의 탱크 용량을 계산하고 급수 제어 밸브 용량, 유출수 및 배출 증기설계 값으로부터 모델 상수를 구하였다.

탱크 압력에 대한 수위의 변화는 탱크 내부가 이상(Two Phase) 유체 상태이므로 압력에 따른 기포의 체적 감소에 기인한다. 만약 압력이 증가한다면 내부 기포 체적은 감소할 것이므로 수위는 감소하는 것으로 나타나고 압력이 감소할 경우에는 반대 현상이 나타난다. 수위 변화율의 정도는 운전 데이터로부터 구하였으며 -0.113%/%의 변화율로 정의하였다.

2.3 탈기 탱크 압력 모델 개발

밀폐된 탱크의 압력은 <그림 5>와 같이, 열원인 보조증기의 유량과 온도에 가장 큰 영향을 받으며, 수위가 변화한다면 밀폐된 상부 공간이 줄어들게 되므로 압력은 증가하게 된다. 또한, 탱크 상부의 배출 증기량에 의해서도 압력은 영향을 받는다.

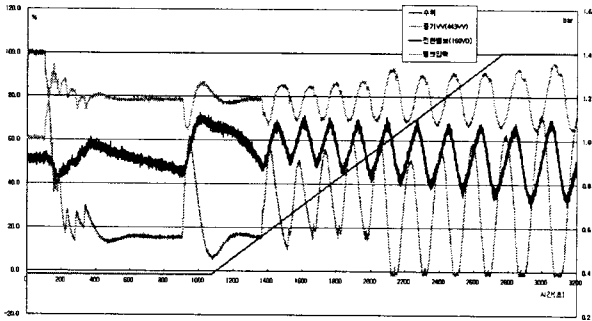


<그림 5> 탈기 탱크 압력과 상관 변수 관계

배출 증기량은 탈기수가 50%까지 생산될 때까지는 완전 열림 상태이고 100% 생산 단계에서는 닫힘 상태에서 운전이 되므로 이로 인한 압력의 변화는 크지 않다. 또한 보조 증기 온도의 경우에도 약 200°C로 일정하므로 온도 변화로 인한 압력 변화는 무시할 수 있다.

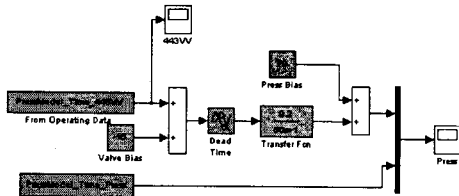
<그림 6>은 운전 중의 압력 제어 신호들을 나타내며, 모델은 다음과 같은 FOPDT 식으로 나타내었다.

$$\frac{P(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-\tau s}}{\tau s + 1}$$

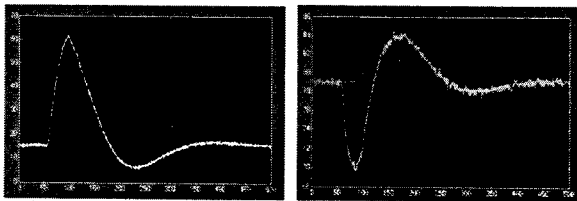


<그림 6> 탈기 탱크 압력 제어 신호

모델 식의 이득(K), Dead Time(τd)과 시정수(τ)는 <그림 6>의 운전 데이터와 모델 식의 비교 검증을 통하여 구하였으며 각각 0.2, 25초, 50초이다. 구한 탈기 탱크 압력 모델은 <그림 7>, 압력 모델에 실제 보조 증기 신호를 입력 신호로 하였을 때의 모델 출력 값과 실제 운전 결과의 비교는 <그림 8>과 같다. 모델 출력과 실제 운전 압력과는 초기 과도 상태에서는 약간 상이하지만 거시적인 거동에서는 잘 일치함을 알 수 있다.



<그림 7> 탈기 탱크 압력 모델 블록도



<그림 8> 실제 운전 압력과 모델 출력 비교
(좌:입력 우:모델 압력(노랑)/실제 압력(보라))

밀폐된 탱크에서 수위 증가에 따라 상부 기체의 압력은 증가하게 된다. 수위 증가에 대한 압력 변화율은 탱크 내부 기체가 공기이므로 이상 기체 방

정식과 탱크의 설계 자료로부터 계산으로 구하였다. 운전 압력에서 수위 1% 증가는 상부 기체 공간이 줄어들게 되므로 이상 기체 방정식을 이용하면 압력은 0.113% 만큼 증가하게 된다. 수위 변화에 대한 압력 변화 시정수는 운전 데이터로부터 2초로 정의하였다.

3. 결 론

원자력발전소의 탈기기 계통은 순수한 물을 포화상태를 유지하는 탈기 탱크를 거치게 하여 탈기수를 생산한다. 탈기수를 생산하기 위해서는 탈기 탱크 내부의 압력과 수위를 일정하게 제어할 필요가 있다. 탈기 탱크는 전체적으로는 포화상태로 운전되지만 내부 열교환기를 중심으로 국부적인 이상(Two-Phase) 상태로 운전된다. 수위 제어를 위하여 차가운 급수가 공급이 될 경우에는 내부 기포의 수축으로 인해서 수위가 오히려 감소(Shrink)하는 Non-Minimum Phase 특성을 나타낸다. 본 논문에서는 제어 최적화를 위하여 탈기기 압력과 수위 모델을 개발하였다. 모델 개발에는 일반적으로 Parameter Identification 기법을 사용하나, 본 논문에서는 유체역학 식과 운전 데이터, 설계 자료를 사용하여 모델 파라미터를 구하고 실제 운전 데이터와의 비교를 통하여 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] James B.Riggs, "Chemical Process Control", 아진출판사, pp.96-97, 2001
- [2] Lennart Ljung, "System Identification", Prentice Hall, pp.56-57, 1987
- [3] Bahram Shahian, "Control System Design Using Matlab", Prentice Hall, pp.171-177, 1993
- [4] Rolf Johansson, "System Modeling and Identification", Prentice Hall, p.149-1152, 1993