

Control Performance Assessment 기법을 적용한 제어 시스템 최적화

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

Control Optimization using Control Performance Assessment Methodology

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

Abstract - 주기적으로 제어 성능을 평가하고, 평가 결과에 따라서 제어 시스템의 제어기 상수를 최적화하거나 제어 밸브와 같은 제어기기의 문제점들을 사전에 개선하고자하는 노력이 있어왔다. 제어성능 평가방법은 제어 목표 값에 대한 추종성을 평가하는 Set Point Analysis 방법을 주로 사용한다. 평가 지표는 Integral Absolute Error(IAE)와 같은 Error Integral 값과 Minimum Variance 방법이 실용적으로 사용된다. 본 논문에서는 평가 대상 시스템으로 원자력발전소의 수위 제어시스템중 하나를 선정하고 Control Performance Assessment를 수행하였다. 이를 기반으로 대상 시스템의 제어 모델링을 바탕으로 한 Minimum Integral Error를 만족하는 제어기 상수를 구하였으며 새로운 상수를 제어기에 설정한 후 다시 성능을 평가하였다. 평가 결과, 제어시스템의 제어 성능 평가 지표를 사용한 제어 루프의 평가와 예방 조치가 실제로 발전소의 안정적 운전에 유용하다는 것을 입증하였다.

작은 것이 가장 우수한 제어 성능으로 평가하는 Minimum Variance를 사용한 평가 지표이다. 통계 값을 사용한 지표로는 Variance, Standard Deviation, Maximum, Minimum 값 등을 사용하며, 여기에서는 다음의 Harris Index를 지표로 사용하였다.

$$I_H = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{mv}^2}$$

여기서, σ_y^2 는 제어 값의 분산, σ_{mv}^2 는 분산 기준 값이다. 만약, 제어 값이 흐트러짐이 없이 일정 하다면 Harris Index는 0이 된다. 그러나 제어 값이 일정하고 설정 값과 제어 값에서 발생하는 Offset 값이 일정할 경우에는 Harris Index는 0이지만 실제로 Offset의 발생 유무와 크기는 평가에 포함되지 못한다. 따라서 제어 성능 평가 시에는 Integral Error 방법과 이와 다른 몇 가지 지표를 동시에 표기하여 실제적인 성능을 평가하도록 하고 있다.

1. 서 론

실시간으로 제어 성능을 감시하여 성능이 낮은 제어루프를 판별하고 사전에 예방 조치를 하고자하는 노력이 해외의 여러 제어루프에 대해서 시도되고 있다. 제어 성능을 최적으로 유지하는 것은 생산 제품의 품질을 향상시킬 뿐만 아니라 정비 비용을 절감하는 효과가 있다. 본 논문에서는 제어 성능을 평가하는 방법과 평가 지표, 국내 원자력발전소의 수위 제어루프에 적용한 사례를 소개한다.

2. 본 론

2.1 제어 성능 평가 방법 개요

제어 성능을 평가하는 방법은 일반적으로 제어 설정값에 대한 제어 결과 값의 추종성을 평가하는 Set Point Analysis 방법을 사용한다. 이 방법은 제어 결과가 설정 값에 얼마나 잘 추종하는지를 설정 값과 제어 값과의 오차 혹은 제어 값의 데이터 분산도등으로 평가를 하는 방법이다. 평가 지표를 만드는 방법으로는 설정 값과의 오차를 지속적으로 감시하고 누적 계산하여 지표를 만드는 Integral Error Index 방법과 추정값의 분산 정도를 평가하는 Variance Index 방법, 기타 Standard Deviation 값과 Minimum, Maximum 값을 사용하는 방법 등이 있다. 실시간 제어 성능 평가는 실제 제어 결과를 사용하여 성능 지표를 만들고 미리 특정 제어루프에 적합하게 설정된 평가 지표를 기준으로 비교 평가하게 된다. 만약 실시간으로 평가한 결과가 평가 기준을 상회할 경우에는 해당 제어루프는 제어 상수 혹은 제어 기기의 점검을 통하여 현재의 제어 상태가 적정한지를 평가하여야한다. 본 논문에서 사용한 평가 지표로는 Integral Error Index 와 제어 값들의 Variance Index를 사용하였다.

Integral Error Index 식은 다음과 같은 형식이 있다.

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt$$

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt$$

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)| dt$$

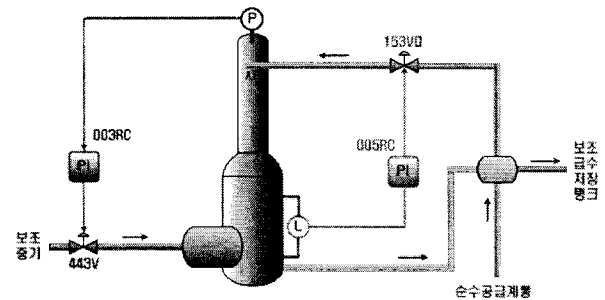
$$ITSE = \int_0^T te^2(t) dt$$

Integral Squared Error(ISE) 지표는 큰 오차를 보다 더 크게 반영하므로 매우 예민한 평가 결과를 나타낸다. Integral Time Absolute Error(ITAE)는 과거의 오차를 보다 크게 반영하므로 현재를 실시간으로 평가하기에는 적합하지 않다. Integral Absolute Error(IAE) 지표는 가장 많이 사용하는 지표로 위의 4가지 방법 중 실시간으로 평가하기에는 가장 적합하다.

다른 지표로는 제어 값들을 통계 처리하고, 값 분포의 퍼진 정도가 가장

2.2 제어 성능 평가 대상 계통

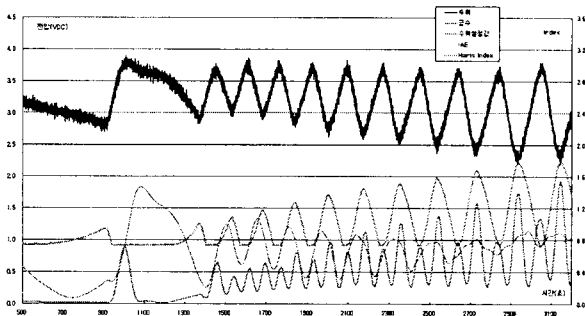
실시간 제어 성능 평가는 <그림 1>과 같이, 원자력발전소의 수위 제어시스템중 하나에 적용하였다. 대상 시스템은 보조증기를 사용하여 탱크 내부의 압력을 제어하면서 급수로 일정 수위를 제어한다. 탱크의 내부 유체는 기포와 물이 혼재된 이상(Two-Phase) 상태에서 운전되므로 급수에 대해서는 수위가 순간적으로 Shrink하는 Non-Minimum Phase 특성을 가지고 있다. 따라서 본 시스템은 제어가 어렵고 제어기기의 특성 변화와 보조증기의 열 교환 성능 등에 제어 성능이 민감한 영향을 받는다.



<그림 1> 제어 성능 평가 적용 제어루프

2.3 제어 난조시의 제어 성능 평가

<그림 2>는 운전 중인 수위 제어루프에서 100초 연속 구간의 성능을 IAE Index 와 Harris Index를 적용하여 감시한 결과이다. 운전 초기에는 수동 운전에서 자동 운전 전환으로 인해 제어 과도가 나타난다. 자동화가 어느 정도 안정되는 시점에서 운전 값은 수위 설정 값, 3V(50%)를 중심으로 주기적으로 진동을 나타내고 있으며 Normalized IAE 지표와 Harris Index 도 주기적인 진동을 나타낸다. 자동 운전 중에는 IAE 지표는 약 0.8, Harris Index는 는 약 1.0을 나타낸다.



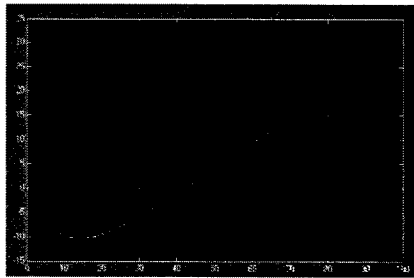
〈그림 2〉 제어 난조에서의 성능 평가 지표

2.4 제어 모델을 이용한 제어 최적화

〈그림 1〉의 수위 제어 거동에서 유체역학 식과 운전 데이터를 이용하여 FOPDT(First Order plus Dead Time) 형태의 모델 식을 구하였으며 급수 10% 유입 시 수위 거동은 〈그림 3〉과 같다.

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

여기서, $G_1=0.005371\%/%$, $G_2 = -2.04\%/%$ 이다.



〈그림 3〉 급수 10% 계단 유입에 따른 수위 거동

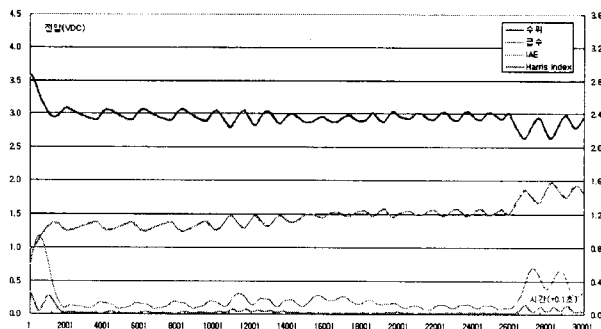
수위는 차가운 급수가 유입됨에 따라 약 15초 후에 10%의 수위 Shrink 현상을 나타내는 Non-Minimum Phase 특성을 나타낸다. 수위 제어 모델을 사용하여 IAE 제어 성능 지표가 최소가 되는 최적의 비례 이득과 적분 시간을 구하였으며 각 값은 다음과 같다.

〈표 1〉 제어 최적화 전후 제어 상수

| | 튜닝 전 | 튜닝 후 |
|---------|------|------|
| 비례이득 | 1.04 | 0.9 |
| 적분시간(초) | 28.3 | 150 |

2.5 제어 최적화 후의 제어 성능 평가

〈그림 4〉는 모델기반으로 구한 제어 최적 상수 값을 적용하여 운전하면서 감시한 결과이다.



〈그림 4〉 제어 최적화 제어 성능 지표

제어 최적화 전과 동일한 운전 조건에서도 제어 성능 지표는 매우 작은 값을 나타낼 수 있다. 제어 과도기가 아닌 안정된 경우에는 Normalized IAE 값은 약 0.2 정도이고, Harris Index는 0.1 미만이다. 실시간 제어 성능 평가를 위해서는 각 제어 루프마다 정상 운전 상태의 표준 성능 지표가 있어야 한다. 본 제어 루프에는 정상 운전시의 지표와 제어 난조시의 지표

비교하여 IAE 지표 기준 값은 500, Harris Index 기준 값은 100을 사용하였다. 〈그림 2〉와 〈그림 4〉로부터 실제 운전 시에 제어 루프 점검이 필요한 지표 값은 Normalized IAE는 0.4, Harris Index 는 0.2 가 적합할 것으로 판단된다. 실시간 운전 중의 감시 하에서 만약 제어 성능 지표가 상한 값을 상회 할 경우에는 현장 엔지니어는 제어 루프의 비정상 운전에 대해서 검토하고 예방 조치를 하는데 유용하게 사용할 수 있다.

3. 결 론

원자력발전소는 약 200개의 제어 루프로 운전되고 있으며 발전소의 안정적인 운전을 위해서는 제어 루프의 성능과 안정도가 매우 중요하다. 제어 성능은 대부분 운전 중의 현장 제어기기의 부적절한 동작으로 기인하는 수가 많다. 따라서 세계적으로 많은 공정 제어 시스템에서 실시간으로 제어 성능을 평가하고 사전에 개선하고자 하는 시도가 있어왔다. 본 논문에서는 원자력발전소에서 Non-Minimum Phase 거동 특성으로 인해 제어가 어려운 수위 제어시스템의 제어 성능을 평가하고 제기 최적화를 통하여 개선한 사례를 정리하였다.

제어 평가 방법으로는 Set Point Analysis 방법을 사용하였으며 성능 평가 지표로는 Integral Absolute Error (IAE) Index, Minimum Variance 방법을 사용하는 Harris Index를 적용하였다. 제어 모델링과 IAE 방법에 의한 제기 상수 최적화 후, 제어 성능 평가 지표는 매우 작은 값을 나타냄을 확인하였으며, 실시간으로 제어 성능을 감시하는 시스템을 구축할 경우에는 매우 효율적인 성능 감시 방법을 입증하였다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] Mohieddine Jelali, "An overview of control performance assessment technology and industrial applications", Control Engineering Practice 14, pp.441-466, 2006
- [2] Bernardo Soares Torres, Fabio Barros de Carvalho, "Performance assessment of control loops - case studies", International Federation of Automation Control, 2006
- [3] Alan J. Hugo, "Process Controller Performance Monitoring and Assessment", Control Arts Inc, 2005
- [4] Lucio Fabio Passos, Bernardo Soares Torres, "Methodology for reducing the control loops oscillation at iron processing plant", International Meeting of Instrumentation, Systems and Automation, 2005