

가동원전에서 공정모델링을 통한 PID 투닝 시뮬레이션 방법

A Simulation Method of PID Tuning with Process Modeling in Operating Nuclear Power Plants

민문기* · 정창규* · 이광현* · 이재기* · 김희제†

(Moon-Gi Min · Chang-Gyu Jung · Kwang-Hyun Lee · Jae-Ki Lee · Hee-Je Kim)

Abstract - PID(Proportional, Integral, Derivative) controller is the most popular process controllers in nuclear power plants. The optimized parameter setting of the process controller contributes to the stable operation and the efficiency of the operating nuclear power plants. PID parameter setting is tuned when new process control systems are installed or current process control systems are changed. When the nuclear plant is shut down, a lot of PID tuning methods such as the Trial and Error method, Ultimate Oscillation method operation, Ziegler-Nichols method, frequency method are used to tune the PID values. But inadequate PID parameter setting can be the cause of the unstable process of the operating nuclear power plant. Therefore the results of PID parameter setting should be simulated, optimized and finally verified. This paper introduces the simulation method of PID tuning to optimize the PID parameter setting and confirms them of the actual PID controller in the operating nuclear power plants. The simulation method provides the accurate process modeling and optimized PID parameter setting of the multi-loop control process in particular.

Key Words : Nuclear power plants, PID controller, Tuning, Process control system

1. 서 론

산업 플랜트의 계측제어설비에 사용되는 공정제어기(Process Controller)는 공정의 입력이 변할 경우 적절하지 못한 PID 설정으로 프로세스의 오버슈팅이나 언더슈팅의 발생 가능성을 내포하고 있다. 공정제어기의 투닝 최적화는 플랜트의 효율향상과 안정운전에 직·간접적인 영향을 준다. PID 공정제어기는 구현이 쉽고 성능과 신뢰도가 높아 산업계 전반에 널리 사용되고, 발전소의 공정제어기는 대부분 비례-적분-미분 제어기(PID 제어기)를 사용한다. 발전소에서 PID 공정제어기의 변수 설정은 새로운 공정 시스템이 설치되거나 공정시스템의 변화가 있을 때 수행한다. PID 공정제어기의 투닝은 발전소가 시운전단계에서는 엔지니어가 시행착오에 의한 방법, 한계이득과 한계주기를 이용하는 방법, 과도 응답법, 지글러-니콜스 방법, 주파수 응답법 등으로 공정제어기의 PID 변수 설정치를 조절해 가면서 공정시스템을 최적화 할 수 있으나[1-3], 운전 중인 발전소에서는 이런 투닝방법을 적용하여 정밀한 PID 투닝을 하기가 쉽지 않다. 따라서 플랜트 운전 데이터를 활용한 PID 투닝 방법이 필요해지고 있다[4].

본 논문에서는 공정시스템의 변화로 불안정한 공정 프로

세스를 안정화시키기 위하여 시뮬레이션을 통한 PID 투닝 최적치를 도출하여, 투닝 최적치를 운전 중인 발전소에 적용하여 실증하고, 특히 플랜트의 다중루프 공정프로세스에서 최적의 PID 투닝 설정치를 찾는 방법을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 발전소 공정프로세스의 불안정 현상 확인

최근 발전소 주급수펌프터빈계통의 기계적인 특성 변화로 운전 중 제어목표치가 스텝변화하면 속도신호(Speed Signal)가 사인파형의 불안정한 스윙현상이 발생되었다.

주급수펌프터빈계통의 제어로직은 이중제어루프로써, 1단계 제어루프에서는 속도 목표치(Speed Target)와 3개의 속도 신호 중간치와의 편차가 PID 제어기를 거친 이후에 EHPC(Electrohydraulics Power Cylinder) Position으로 출력하고, 2단계 제어루프에서는 EHPC Position 목표치와 2개의 구동기의 LVDT(Linear Variable Differential Transformer) Position과의 편차가 P 제어기를 거친 후 Servo Current를

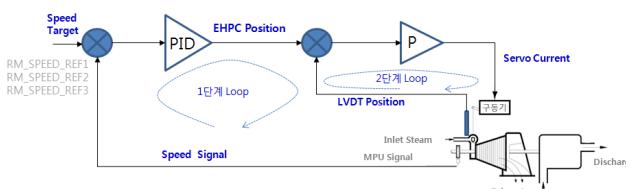
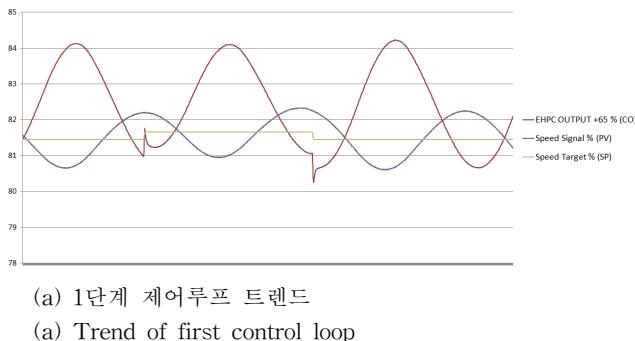


그림 1 주급수펌프터빈계통의 제어블록도

Fig. 1 Control Diagram of Main Feedwater Pump Turbine System

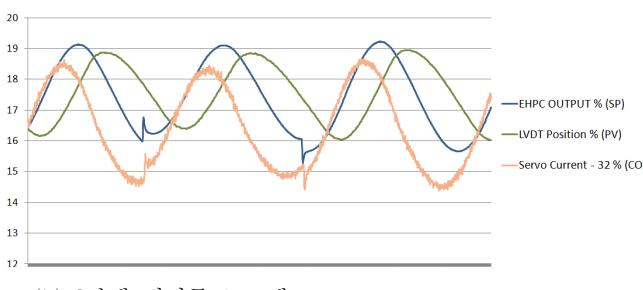
제어 출력치(CO: Control Output)로 출력되도록 구성되어 있다.

스윙현상에서 1단계 제어루프의 트렌드는 Speed Target이 0.2% 스텝으로 6초간 변화하고 Speed Signal이 1.5% 변화하면, PID 제어기를 거친 EHPC Position은 Speed Target보다 4초 이후에 4% 변화했다. 2단계 제어루프의 트렌드는 EHPC Position이 4% 변화하고 LVDT Position이 1초 이후에 3% 변화하면, 비례제어기를 거친 Servo Current는 사인파형으로 4% 변화하며, 모든 트렌드는 6초 주기의 반복적인 사인파 스윙을 가졌다.



(a) 1단계 제어루프 트렌드

(a) Trend of first control loop



(b) 2단계 제어루프 트렌드

(b) Trend of second control loop

그림 2 주급수펌프터빈계통의 불안정한 트렌드

Fig. 2 Unstable Trends of Main Feedwater Pump Turbine System

2.2 PID 투닝 시뮬레이션 방법

운전 중인 발전소의 PID 변수 설정은 PID 제어기에 변수를 적용하기 이전에 다양한 투닝 시뮬레이션으로 검증되어야 한다. PID 투닝 시뮬레이션 방법은 투닝 연산식 방법, PC 기반 투닝 전용 프로그램, Matlab 활용 투닝 방법이 있다[5].

2.2.1 투닝 연산식 방법

공정제어 현장에서 사용되는 제어기 투닝 방법은 크게 개루프 방법(Open Loop Method)과 폐루프 방법(Closed Method) 방법이 있고 대부분의 투닝 알고리즘은 개루프 방법을 사용되고 있다. 제어기 투닝은 공정의 전달함수를 추정하는 공정 확인(Process Identification)과 투닝 변수 연산의 두 단계를 거치게 된다. 공정 확인은 공정의 입력(또는 제어기 출력)에 변화를 인가하여 공정의 전달함수를 추정하는 것이다.

공정의 모델을 수식으로 정확하게 묘사하기 위해서는 공정의 입출력에 영향을 주는 변수에 대하여 미분방정식으로 나타내어야 하지만 고차의 미분 방정식으로 실제 공정에 가까운 모델을 구현해도 최적의 PID 제어기 투닝 변수를 찾기는 어려우며 미세 투닝 과정을 거쳐야 하므로, 현장에서 주로 사용되는 방법은 공정의 입출력 관계를 시간지연을 가지는 1차함수로 추정하는 방법으로 사용하고 있다. 따라서 정확한 고차원의 함수추정이 어려워 운전 중인 발전소 다중 제어루프의 정밀한 PID 투닝 시뮬레이션 방법으로 적합하지 않다 [6, 7].

2.2.2 PC기반 투닝전용 프로그램

PC기반 투닝전용 프로그램은 공정모델을 사용하는 모델 예측제어 알고리즘(Model Predictive Control)을 기반으로 한다. 모델예측제어 기술은 많은 계산을 요구하지만 컴퓨터 기술의 발달로 인해 산업 전반에 적용이 늘고 있는 추세이다. PC기반 투닝전용 프로그램은 수동 입력이나 직렬통신을 통한 자동입력으로 제어 명령 값(공정 출력의 오차)과 프로세스 현재 값 등의 데이터를 취득한다. 취득된 데이터로 PC기반 투닝전용 프로그램은 투닝 이전에 히스테리시스, 고착, 선형성, 변동성 적합성 판단한 후 그림 3과 같이 공정이득, 시간지연, 시정수를 계산하여 최적의 PID 값을 제공한다.

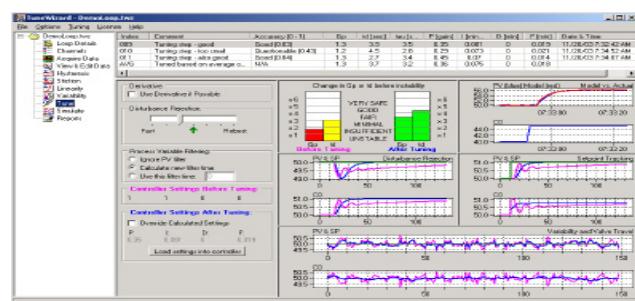


그림 3 PC 기반 PID 투닝 화면

Fig. 3 PID Tuning Display based on PC Tuning Program

계단응답, 램프응답 등 다양한 입력에 대한 PID 값을 자동 제공하는 우수함과 편리성이 있지만, PC기반 투닝 프로그램은 제어 대상의 공정의 전달함수를 사용자에게 제공하지 않아 공정 확인을 할 수 없는 단점이 있다. 더욱이 단일입력단일 출력(Single Input Single Output)에만 적용할 수 있어, 운전 중인 발전소 다중 제어루프의 PID 투닝 시뮬레이션 방법으로 적합하지 않다[8].

2.2.3 Matlab 활용 투닝 방법

Matlab을 활용한 투닝방법은 System Identification Toolbox를 이용한 공정함수의 확인, 공정 모델링, Simulink를 이용한 전체공정 모델링의 구성, 모델링을 통한 PID 변수 최적화를 제공한다. System Identification Toolbox는 공정의 제어 명령 값과 프로세스 현재 값으로 공정 전달함수를 모델링하는 기능을 제공한다. Matlab은 PID 값 자동계산, 공정의 전달함수를 추정하는 공정 확인뿐만 아니라 계단

입력, 경사입력, 임펄스 입력 등에 대한 제어시스템의 예상 응동 특성 등을 제공한다[9, 10].

2.3 주급수펌프제어계통의 공정 모델링

2.3.1 모델링의 구성

주급수펌프터빈계통의 공정의 모델링은 PID제어기의 설정치를 최적화하기 위해서 서보밸브, 밸브, 터빈, 로터 대상으로 전달함수로 표현했다[11]. 공정함수의 확인은 Matlab System Identification Toolbox를 이용했다. Matlab System Identification Toolbox에서는 계단응답, 임펄스응답, 주파수응답, Zero Pole Plots 등을 통해 그림 4와 같이 공정의 전달함수를 제공한다.

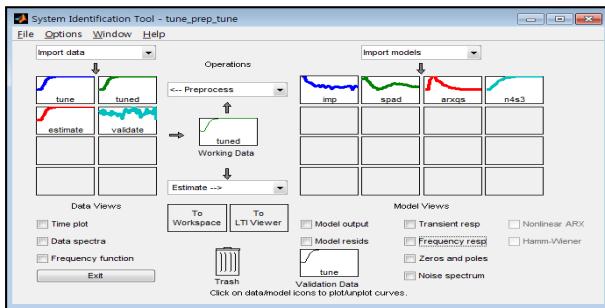


그림 4 System Identification을 통한 공정 전달함수 추정

Fig. 4 Assuming of process transfer function using System Identification

Servo Valve 공정 확인에서 입력은 Servo Current 트렌드를 출력은 LVDT Position 트렌드를 사용했고, Valve & Turbine, Rotor Inertia의 공정 확인에서 입력은 LVDT Signal 트렌드를 출력은 Speed Signal 트렌드를 사용했다. 공정의 전달함수를 결정할 때 그림 5와 같이 추정 공정 전달함수에서 가장 점수가 높은 최적합(Best Fit) 모델을 선택하여 최적의 공정 전달함수로 공정을 확인할 수 있다

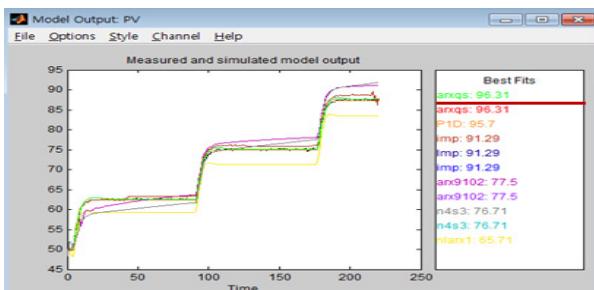


그림 5 Matlab의 System Identification을 통한 최적모델

Fig. 5 Best Fit model using system identification

공정을 확인 후에 공정 전달함수를 주급수펌프제어시스템에 적용시켜 그림 6과 같이 Matlab Simulink를 사용하여 구성했다. Matlab Simulink에서 목표 설정치, PID 변수 등을 변경하면서 제어 명령치, 제어 출력치 및 프로세스 현재치 등의 트렌드를 확인할 수 있다.

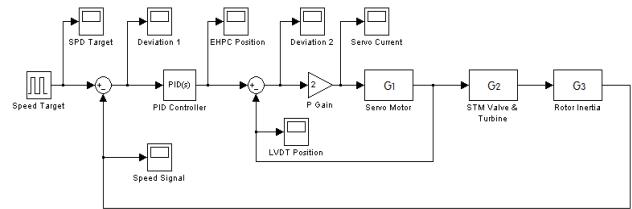


그림 6 주급수펌프제어계통의 모델링

Fig. 6 Modeling of Main Feedwater Pump Control System

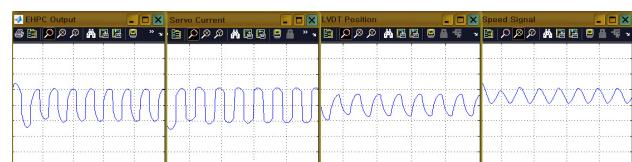
2.3.2 모델링의 확인

Matlab을 이용한 주급수펌프터빈계통의 공정 모델링의 정확도를 확인하기 위해서 속도 목표치에 6초 주기의 0.3%의 스텝변화폭을 인가했으며, 속도신호가 실제 트렌드와 유사한 폭으로 변화하는지 확인했다. 속도 목표치와 속도신호의 편차에 따른 EHPC Position값의 변화로 Servo Current까지 변화 하였고, LVDT Position 및 속도 신호는 6초 주기적인 사인 과형을 가졌다. 이는 실제 트렌드와 유사하므로 Matlab을 이용한 주급수펌프터빈계통의 공정 모델링의 정확도를 확인할 수 있었다.

2.4 모델링의 최적 PID 변수 값 도출

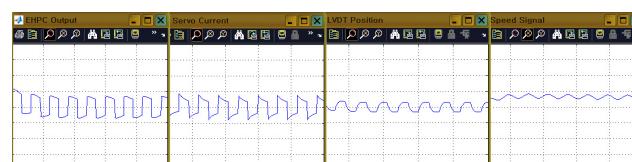
2.4.1 최적 PID 변수 값의 트렌트

주급수펌프터빈계통을 구현한 Matlab Simulink로 투닝을 하면 최적의 PID 설정치가 연산된다. 또한, PID 설정치의 변경으로 제어 명령 값에 따른 프로세스 현재 값의 변화를 시뮬레이션 할 수 있고 제어시스템의 성능과 강건함을 확인 할 수 있다. 1단계 제어 루프에서 PID 변수는 D값을 줄일수록 Servo Current가 안정화되고, I값을 줄일수록(적분시간을 늘일수록) LVDT Position 및 Speed Signal이 안정화되고,



(a) 현재 PID 설정에서의 트렌드

(a) Trend of Current PID Values



(b) 변경 PID 설정에서의 트렌드

(b) Trend of Changed PID Values

그림 7 주급수펌프제어계통 모델링에서 PID 최적 값

Fig. 7 PID Optimized value of Modeling on Main Feedwater Control System

P값을 줄이면 Servo Current가 안정화되었다. 2단계 제어루프에서 P Gain값을 줄일수록 Servo Current가 안정화되었다.

2.4.2 최적 PID 변수 값 결정

주급수펌프터빈시스템 모델링의 PID 변수를 운전 중인 발전소의 주급수펌프터빈시스템에 적용했다. 단, P값을 줄이면 발전소 과도상태에서 시스템의 응동이 지연될 수 있어 P값은 조정하지 않았다. 운전 중인 발전소의 주급수펌프터빈시스템의 PID제어기에 미분 값을 줄이고, 적분시간을 늘렸다. PID 변수 튜닝이후에 1.5%의 속도신호변화폭을 0.6% 변화폭으로 감소하여 속도신호를 안정화 시킬 수 있었다.

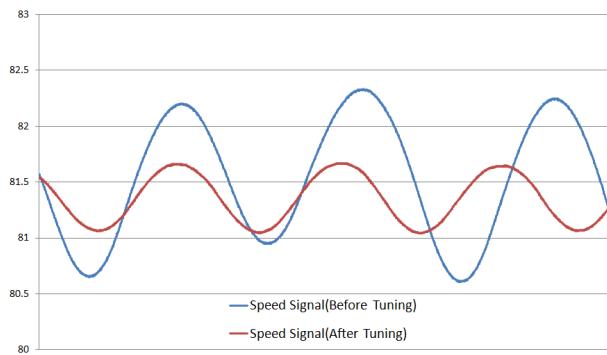


그림 8 주급수펌프제어계통 PID 최적화후 속도신호 트렌드
Fig. 8 Speed signal trend of Main Feedwater Pump Control System after optimized PID values

3. 결 론

본 논문에서는 운전 중인 발전소 현장에서 적용할 수 있는 시뮬레이션을 통한 공정제어기의 PID 튜닝 최적화 방법을 제시하였고, 최적화된 PID 튜닝 최적치를 가동 중인 발전소에 적용하여 검증하였으며, 특히 다중제어루프의 공정프로세스에서 최적의 PID 튜닝 값을 찾는 방법을 제시하였다.

가동 중인 플랜트 또는 발전소의 다중제어루프에서 제어명령 값의 변화가 적은 경우, 본 논문에서 제시한 Matlab System Identification Toolbox를 이용한 공정함수의 확인, Simulink를 이용한 전체공정 모델링의 구성, 모델링을 통한 PID 변수 치 최적화 등을 통해 PID 값을 모사 및 검증하여 실제의 프로세스에 최적의 PID 튜닝 치를 적용하면, 더 안정되고 신뢰성 있는 PID 설정치를 도출할 수 있을 것이다.

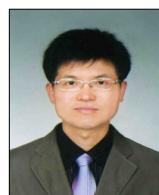
References

- [1] VDI-Handbuch, "Steam Temperature Control in Fossil Fired Steam Power Stations", VDI/VDE 3505, pp. 4-9 September 1996.
- [2] Ziegler, J. G. and N. B. Nicholes, "Optimum settings for Automatic Controllers", Trans. ASME, 64, pp. 759-768, 1942.
- [3] Jae-He Choi, "Trial and Error PID Controller

Tuning", Automatic Control, Vol.17, pp. 114-119, November 2004.

- [4] Yamamoto, Yugushida, "PID Tuning based on plant operating data", Automatic Control, Vol.292, pp. 72-76, March 2009.
- [5] Chan-Ho Sung, Moon-Gi Min, "A Method of Tuning Optimization for PID Controller in Nuclear Power Plants", KPVP Vol.10, No. 1, June 2014.
- [6] Young-Cheol Park, "Understanding Tuning & Control", Korea Instrument & Control Training Institute(KITI), pp. 60-71, March 2008.
- [7] In-Gyu Choi, Gwang-Myeong Yu, "Analysis Report of Calculation Algorithm for PID Controller Tuning Parameters", KEPRI, pp. 4-25, January 2013.
- [8] PAS, "PID Controller Tuning, Process Diagnostics, Control Loop Simulation", Tune Wizard, pp. 93-116, June 2005.
- [9] Lennart Liung, "Matlab System Identification Toolbox User's Guide", Mathworks, pp. 318-401, April 2011.
- [10] Matlab simulink, "Matlab Simulink User's Guide", Mathwork, pp. 68-161, April 2011.
- [11] M.A. Eggenberger, "Fundamental Explanation of Transfer Function for Control Systems", GE Power Systems Steam Turbine GEK 103794, pp. 61-66, June 1996.

저 자 소 개



민 문 기 (閔 文 基)

1971년 12월 6일생. 1997년 경상대학교 전기공학과 졸업. 2012년 부산대학교 전자전기공학과 박사수료. 산업계측제어기술사. 건축전기기술사. 1997년~2005년 LG전자 선임연구원. 2006년~2010년 화력발전소 근무. 2011년~현재 한국수력원자력 선임전문원
Tel : 042-870-5611
E-mail : macgaiver@khnp.co.kr



정 창 규 (鄭 昌 圭)

1965년 4월 18일생. 1997년 조선대 제어계측공학과 석사졸업. 1992년~현재 한국수력원자력 선임보전문원
Tel : 042-870-5615
E-mail : inc92@khnp.co.kr



이 광 현 (李 光 賢)

1972년 1년 29일생. 1996년 원광대학교
전기공학과 졸업. 1996년~현재 한국수력
원자력 차장
Tel : 042-870-5283
E-mail : 96109091@khnp.co.kr



이 재 기 (李 載 琦)

1963년 10월 11일생. 1994년 부산공업대
전기공학과 졸업. 1982년~현재 한국수력
원자력 책임전문원
Tel : 042-870-5610
E-mail : jaekilee@khnp.co.kr



김 희 제 (金熙濟)

1955년 10월 23일생. 1980년 부산대학교
공과대학 전기공학과 졸업. 1982년 부산
대학교 대학원 전기공학과 석사졸업.
1990년 규슈대학교 대학원 에너지공학과
박사졸업. 현재 부산대학교 전기공학과
교수 재직중