

발전소 시뮬레이터를 위한 고압 터빈 바이패스 압력 제어 모델 개발

변승현^{1†} · 이주현¹ · 임익현¹

Development of a High Pressure Turbine Bypass System Pressure Control Model for Power Plant Simulator

Seung-Hyun Byun · Joo-Hyun Lee · Ick-Hun Lim

ABSTRACT

It is required that a developed control system should be verified using simulator in terms of functionality and reliability prior to application to a power plant that is a very critical facility in the industry. In this paper, the control model for turbine bypass system was developed for power plant simulator. In order to develop the control model for turbine bypass system, the tool that can be used to implement turbine bypass control logic was developed based on the turbine bypass control system manual. The developed tool was merged into the simulator development environment. The functionality of the developed tool was verified via the simulation based on the each function block specification. The HP turbine bypass pressure control logic was implemented using the developed tool and was integrated with process models and other control models such as boiler control model, turbine control model and boiler feed water pump turbine control model for 500 MW korean standard type fossil power plant. Finally, the validity of the developed control model was shown via simulation result under the integrated simulation environment.

Key words : Power plant, Simulator, Turbine bypass control

요 약

국산 개발 분산 제어시스템의 발전 설비에의 적용을 위해서는 시뮬레이터를 이용한 제어 시스템의 기능 및 신뢰성 등의 검증이 선행되어야만 한다. 본 논문에서는 제어 시스템 검증용 시뮬레이터를 개발하는데 있어서, 제어 모델 중 발전소 기동 초기에 보일러 압력을 조절하고, 정상 운전 중 보일러의 과대 압력 상승을 방지하기 위해 보일러에서 발생한 증기를 복수기로 방출하는 터빈 바이패스 계통의 제어 모델을 개발하였다. 제어 모델 개발을 위해, 통합 시뮬레이션 개발 환경에서 활용가능한 제어 로직 구현 툴을 개발하였다. 또한 개발한 툴의 기능은 개별 기능 블록의 설계 사양에 기반한 시뮬레이션에 의해 검증을 하였으며, 개발한 툴을 이용하여 고압 터빈 바이패스 계통의 압력 제어 로직을 구현하였다. 500 MW급 표준 석탄화력 발전소 공정 모델과 보일러 제어 모델, 터빈 제어 모델 등 타 계통의 제어 모델과의 연계를 통한 통합 시뮬레이션을 통해 개발한 제어 모델의 효용성을 확인하였다.

주요어 : 발전소, 시뮬레이터, 터빈 바이패스 제어

1. 서 론

한 나라의 기간산업으로서 중요한 전력산업은 사회 발전과 더불어 증가되는 전력 소비량과 양질의 전력 요구에 의해 지속적으로 발전되고 있다. 양질의 전력을 안정적으로 공급하기 위해서는 발전소를 고장 없이 효율적으로 운영하는 것이 요구되며, 제어 시스템의 역할의 중요성이 부각되고 있다. 이러한 상황에서 발전 용량 500 MW 이상의 기력 발전소 제어 시스템의 국산화 개발이 진행되고

*본 논문은 지식경제부 전력산업연구개발사업에 의하여 수행 중인 화력발전용 통합 감시 제어 시스템 성능 검증 및 실증시험 기술 개발 결과임.

접수일(2011년 7월 12일), 심사일(1차 : 2011년 10월 12일), 게재 확정일(2011년 11월 22일)

¹⁾ 한전전력연구원

주 저 자 : 변승현

교신저자 : 변승현

E-mail; little@kepco.co.kr

있으며, 발전 설비의 중요성으로 인해 실증 적용을 위해서는 개발 단계에서 발전소 실증적용 전 단계까지 개발한 제어 시스템의 기능 및 신뢰성 검증이 요구되고 있다. 한편, 시뮬레이터는 전 범위로 개발되어 원자력 발전소의 디지털 제어 시스템 업그레이드 적용 전 훈련과 사전 시험을 통한 시행착오를 줄이기 위한 테스트 베드로서 이용되어지고 있으며^[1], 적용되어질 디지털 제어 시스템의 적용 전 제어 로직 시험과 인터록 시험 그리고 HMI 등 소프트웨어 검증용으로 활용되어지고 있다^[2]. 국내에서도 시뮬레이터를 이용하여 제어 시스템의 검증이 이루어지고 있다. 화력의 경우 국내에서는 2000년에 국산 개발 발전소 보일러 주 제어 시스템을 대상으로 전 범위는 아니지만 중용량 화력발전소를 대상으로 열수력 모델을 이용한 시뮬레이터를 개발하여 보일러 제어용 분산 제어 시스템의 신뢰성과 기능 검증을 하여 국산 개발 제어시스템을 석탄 화력 발전소에 최초로 실증 적용한 사례가 있다^[3]. 또한 500 MW급 석탄 표준화력 발전소의 실증적용을 목표로 개발한 제어 시스템을 대상으로 전 범위 시뮬레이터를 이용하여 기능 검증을 수행하고 있다^[4]. 원자력의 경우도 신규 원전에 적용 예정인 국산 개발 분산 제어 시스템에 대해서 전 범위 시뮬레이터를 이용하여 기능과 신뢰성 검증을 수행하고 있다^[5].

시뮬레이터는 크게 발전소 공정을 모사하는 공정 모델과 제어 시스템을 모사하는 제어 모델 등으로 구성되어진다. 전력연구원에서는 500 MW급 석탄 표준화력 발전소의 실증적용을 목표로 개발한 제어 시스템을 검증하기 위한 발전소 시뮬레이터를 개발하였다^[6]. 제어 모델 중 터빈 바이패스 계통의 제어모델은 발전소 기동 초기에 보일러 압력을 조절하고, 정상 운전 중 보일러의 과대 압력 상승을 방지하기 위해 보일러에서 발생한 증기를 복수기로 방출하는 계통을 담당한다. 터빈 바이패스 계통 제어 모델을 개발하기 위해서, 시뮬레이션 통합 환경에서 활용가능한 제어 로직 구현 툴을 개발하고, 개발한 툴을 이용하여 제어 로직을 구현하였다. 특히 발전소에서는 기존의 고압 바이패스 제어기에 SCO(State Controller with Observer)를 채용하고 있는데, 향후 제어 시스템에의 확장 적용과 튜닝의 용이성을 고려하여 SCO 뿐만 아니라 PI(Proportional Integral) 제어를 동시에 구현하고, 제어기를 선택하여 운전할 수 있도록 구현하였다. 본 논문에서는 고압 바이패스 계통의 압력 제어 모델 구현 사례를 소개한다. 2절에서는 터빈 바이패스 계통의 개요에 대해 기술하고, 3절에서는 터빈 바이패스 제어 로직 구현 툴 개발 내용과 고압 바이패스 계통의 압력 제어 로직 구현에 대해 설명한다. 4절에서는

시뮬레이터 통합 환경에서의 시뮬레이션을 통해 개발한 제어 모델의 효용성을 보여주고, 5절에서 결론을 기술한다.

2. 터빈 바이패스 계통의 개요

본 논문에서 대상으로 삼은 발전소는 500 MW급 표준 석탄화력 발전설비로 초임계압 관류보일러, 재열 재생식 직렬배열 복수터빈 및 직접 여자 방식의 발전기로 구성되어 있다. 보일러는 옥내형, 평형통풍방식의 미분탄 전소용으로 되어 있으며, 보일러의 증기조건은 과열기 출구에서 압력 255 kg/cm², 온도 541°C, 재열기 출구에서 압력 40.8 kg/cm², 온도 541°C이다.

터빈 바이패스 계통은 그림 1의 사용자 인터페이스에서와 같이 보일러 과열기 출구 헤더에서 나오는 과열증기를 고압 터빈을 바이패스 시켜 저온 재열관으로 보내는 고압 바이패스 계통과 재열기 출구 증기를 중압/저압 터빈을 바이패스 시켜 복수기로 배출하는 저압 바이패스 계통으로 구성된다. 바이패스 계통은 발전소 기동시 터빈 통기 전 보일러에서 발생된 증기를 재열기를 통해 복수기로 방출하여 터빈 기동시 보일러 압력을 조절하며, 급격한 온도 변화에 의한 증기 온도와 터빈 금속 온도의 차를 신속하게 최적으로 유지함으로써 터빈 열응력을 최소화한다. 또한 정상 운전 중 보일러의 과대 압력상승을 방지하며, 부하 특성 향상과 고�형 입자에 의한 터빈 블레이드 침식 방지, 발전소 비상안전시 보일러에서 발생된 증기를 터빈을 통과시키지 않고 바이패스 시킴으로써 보일러를 터빈의 상태와 관계없이 독립적으로 운전할 수 있도록 하는 기능을 한다^[7].

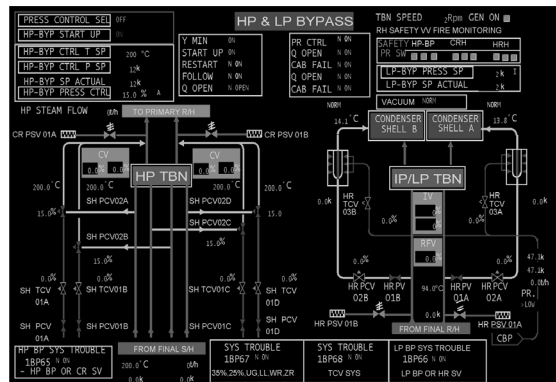


그림 1. 터빈 바이패스 계통의 사용자 인터페이스

2.1 고압 바이패스 계통

고압 바이패스 계통은 과열기 출구에 설치된 4개의 고압 터빈 바이패스 밸브를 이용하여 고압 과열증기를 재열기로 바이패스 시킨다. 보일러 기동시 주증기 압력은 고압 바이패스 밸브에 의해 조절되며, 터빈 롤링 요구 압력이 될 때까지 고압 터빈 바이패스 밸브를 제어한다. 고압 바이패스 계통은 과열 저감기를 내장하고 있으며, 바이패스 되는 온도를 제어한다. 고압 바이패스 밸브는 안전 밸브 기능을 겸비한 100% BMCR(Boiler Maximum Continuous Rating) 용량으로, 주증기 압력에 따라 바이패스 밸브의 설정값이 변하는 변압 운전 방식을 채택하고 있다. 고압 바이패스 계통의 압력운전 곡선은 그림 2와 같으며, 기동 모드, 정압 제어 모드, 추종 모드로 구분되어진다.

2.1.1 기동 모드

기동 모드는 보일러의 압력이 터빈의 기동 압력까지 상승되도록 조절하여 과열기 및 재열기에 충분한 증기 유량을 형성시켜 튜브의 과열을 방지시켜 주는 모드로 최초 밸브 개도는 15%, 보일러 압력 설정값은 12 kg/cm²이며, 보일러 연소율이 계속 증가하면서 바이패스 밸브는 25% 까지 열고, 주증기 압력이 계통 병입 조건인 84 kg/cm²에 도달하면 증기 압력을 계통 병입 압력으로 유지하는 정압 제어 모드로 전환된다.

2.1.2 정압 제어 모드

정압 제어 모드는 증기 압력을 84 kg/cm²로 일정하게 유지하도록 밸브를 제어하는 모드로 정압 제어 모드에서 계통 병입이 이루어지며, 터빈이 Forward Flow가 되면 터빈 통과 유량이 증가하여 주증기 압력이 감소하므로, 고압 바이패스 밸브는 압력 유지를 위해 점점 닫히게 되

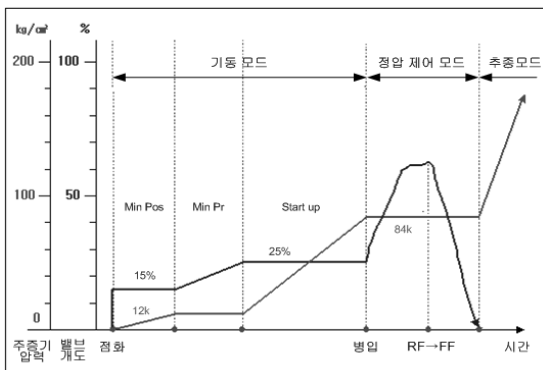


그림 2. 고압 바이패스 계통의 압력 운전 곡선

며, 밸브 개도가 2% 이하가 되면 추종 모드로 전환된다.

2.1.3 추종 모드

추종 모드는 정상 운전 중 보일러의 과도한 압력 상승을 방지하기 위한 모드로 밸브 압력 설정값은 실제 운전 압력값보다 자동적으로 일정 압력 상향조정 되며, 바이패스 바이어스 기능과 모니터 바이어스의 두 가지 기능을 가진다. 바이패스 바이어스 기능은 급격한 부하 감발 등에 의해 과열기 출구 증기 압력이 정해진 상승률을 초과하여 정상 변압 운전 압력보다 15 kg/cm² 이상 높아질 경우 바이패스 밸브를 개방하여 과잉증기를 바이패스 하여 정상 압력을 회복시키는 기능이며, 모니터 바이어스 기능은 터빈 트립 등 큰 외란에 의하여 과열기 출구 증기 압력이 정해진 상승률을 초과하여 정상 운전 압력보다 20.65 kg/cm² 이상 높아질 경우 바이패스 밸브를 완전히 개방하여 정상 압력을 회복시키는 기능이다

2.2 저압 바이패스 계통

저압 바이패스 계통은 재열기 출구에 설치된 2개의 저압 바이패스 밸브를 이용하여 재열증기를 중압/저압 터빈을 바이패스 시켜 복수기로 배출하며, 압력 제어와 온도 제어를 담당한다.

3. 고압 터빈 바이패스 계통 제어 모델 개발

발전소 시뮬레이터는 발전소 공정을 모사하는 공정모델과 제어 시스템을 모사하는 제어 모델, 공장모사/원격시험 등을 가능하게 하는 강사조작반, 제어모델과 연계하여 발전소 운전을 가능하게 하는 오퍼레이터 콘솔, 공정 변수 모니터링과 알람창 기능을 가지며, 일부 조작이 가능한 소프트웨어 패널 등으로 구성되어진다. 본 논문에서는 오퍼레이터 콘솔과 제어 모델을 emulation하여 구현한 emulated 타입의 시뮬레이터를 개발하였다. 공정 모델, 제어 모델, 강사조작반, 오퍼레이터 콘솔, 소프트웨어 패널 등은 객체 지향 환경을 제공하는 실시간 시뮬레이션 환경을 이용하여 개발하였다. 시뮬레이션 환경은 WSC사의 3KEYMASTERTM로 윈도우즈 운영체제를 기반으로 동작하며 그래픽 시뮬레이션 환경에서 개발 및 실행을 제어하는 시뮬레이션 소프트웨어이다. 본 논문에서는 터빈 바이패스 계통 제어 모델을 개발하기 위해서, 시뮬레이션 통합 환경에서 활용 가능한 제어 로직 구현 틀을 개발하고, 개발한 틀을 이용하여 제어 로직을 구현하였다.

3.1 바이패스 계통 제어 로직 구현 툴 개발

터빈 바이패스 계통의 제어 시스템 매뉴얼에 기반하여 제어에 사용된 기능 블록을 분석하고, 분석한 내용을 토대로 시뮬레이션 개발 환경에서 활용가능한 제어 모델 구현 툴을 Visual C++ 6.0 환경에서 개발하였다^[8]. 시뮬레이션 개발 환경의 아키텍처는 그림 3과 같다^[9].

시뮬레이터는 프로젝트 단위로 개발되며, 본 논문에서는 바이패스 제어 모델 개발을 위해 Type과 Task 등으로 구성되는 툴을 개발하였다. Type은 각 모델에서 사용하는 객체를 정의하는 헤더파일이며, Task는 Type에서 정의한 객체의 함수의 실행파일로, 개발한 모델을 실행할 수 있게끔 한다. 헤더 파일에 선언된 구현하고자 하는 함수의 입력/출력/내부 파라미터 변수 등 로직 툴의 객체 정보를 이용하여 해당 함수의 알고리즘을 구현하여 task를 생성하였다. 또한 drag & drop 방식의 GUI로 제어 로직 구현을 가능하게 하기 위해 기능 블록의 외관을 bmp 형식의 그림 파일로 생성하고, 객체를 선언하는 헤더 파일에 그림 파일 정보를 링크시켰다. 그림 4는 바이패스 계통의 제어 모델을 위해 Visual C++ 6.0 환경에서 개발한 제어 로직 구현 툴의 프로젝트 파일을 보여주고 있다.

개발한 툴에서 구현한 기능블럭 리스트를 나열하면 표 1과 같다. 표 1에서 입력/출력의 의미는 기능블럭 관점에서

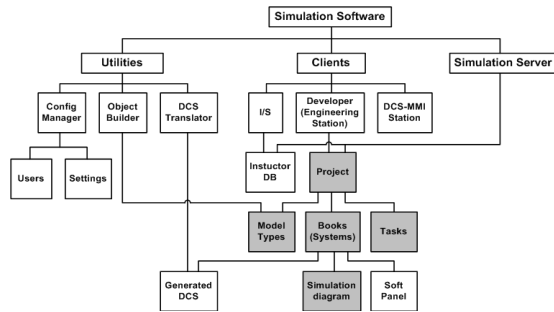


그림 3. 시뮬레이션 개발 환경의 아키텍처

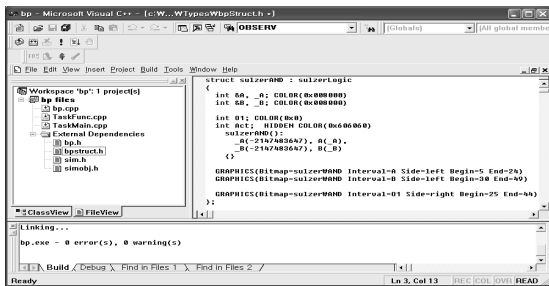


그림 4. 바이패스 계통 제어 로직 툴 개발 프로그램

표 1. 구현한 제어 로직 툴의 기능 블럭 목록

기능블럭명	설명	인자 갯수		
		입력	출력	파라미터
ABSVAL	Absolute Value	1	1	-
ABUF	Analog Buffer	1	1	-
AIN	Analog Input	-	1	-
AMEMPV	Remotely Controllable Analog Memory	10	1	3
ANASWI	Analog Value Switch	4	1	
AND	Logical AND with two inputs	2	1	
AND3/4/5	Logical AND with 3/4/5 inputs	3/4/5	1	3/4/5
ANLOGI	Analog Digital Converter	1	1	
COMPRS	Converter -1...+1/0...+1	1	1	
CUBEQU	Cubic Equation	1	1	4
DBUF	Digital Buffer	1	1	-
DIN	Digital Input	-	1	-
DIV	Divider	2	1	
FNCG04/08/16	Function Generator	1	1	5/9/17
FXN	General Function Generator	1	1	19
IMEMPV	Remotely Controllable Impulse Memory	6	2	
INTEGR	Integrator	3	1	3
LIMITM	Limit Indicator	3	2	5
LINEQU	Linear Equation	1	1	2
MAX2/4	Maximum Selection	2/4	1	
MIN2	Minimum Selection	2	1	
MONHYS	Monitor with Hysteresis	2	2	2
MSC	Manual Set Constant	-	1	1
MUL	Multiplier	2	1	
NOT	Logical Inverter	1	1	
ONESHT	Monostable Multivibrator	2	1	1
ON/OFF	Manual Set Boolean	-	1	1
OR	Logical OR with 2 inputs	2	1	
OR3/4/5	Logical OR with 3/4/5 inputs	3/4/5	1	3/4/5
PDFNC	Dynamic Function	3	1	5
PICONT	PI Controller	6	1	2
RTE LIM	Rate Limiter	7	1	2
SLIMIT	Signal Limiter	1	1	2
SQRT	Square Root	1	1	1
SUM/SUM3	Adder	2/3	1	2/3
TDELAY	Switch On/Off Delay	6	2	2
CALC4HPP	Calculation Routine for HPPB Pr Con	2	9	5
SCOCTC	Control module to State Controller	9	4	1
OBSERV	Observer	12	1	4
STCONT	State Variable Controller	12	1	12

서의 입력과 출력을 의미하며, 파라미터는 내부 파라미터 중 튜닝가능한 상수 파라미터를 의미한다.

3.2 개발한 제어 로직 구현 틀 검증

바이패스 제어 시스템 매뉴얼을 토대로 한 분석결과에 따른 사양을 기반으로 한 시뮬레이션을 통해 표 1에서 개발한 기능블럭의 기능을 검증하였다⁸⁾.

본 논문에서는 진상/지상 보상기로 이용되어지는 dynamic function인 PDTFNC 블럭과 PI(Proportional Integral) 제어기인 PICONT 블럭 검증사례에 대해서만 기술한다.

3.2.1 PDTFNC 기능 블럭의 검증

PDTFNC 블럭은 입력 파라미터로 아날로그 입력 신호인 A, 트랙 스위치 신호인 부울 입력 TS, 트랙 신호인 아날로그 입력 TR을 가지고 출력 파라미터로 아날로그 출력인 O1을 가지며, 내부 파라미터로는 표 2와 같은 인자를 가진다.

트랙 스위치 입력인 TS가 논리 1일 경우에는 출력 O1은 TR·VN이 되며, 트랙 스위치 입력인 TS가 논리 0일 경우에는 전달함수 식 (1)에 의해 출력 O1이 결정되어진다. PDTFNC 함수의 블럭 다이어그램은 그림 5와 같으며, 전달함수 식 (1)의 스텝응답은 그림 6과 같다.

$$O1(s) = A(s) \cdot V \cdot \frac{1 + \frac{H \cdot T_0}{LS} s}{1 + \frac{T_0}{LS} s} \quad (1)$$

표 2. PDTFNC 블럭의 내부 파라미터

파라미터 명	기본값	타입	설명
H	0	실수	입력 이득
LS	1	실수	시간 관련 상수
T ₀	0	실수	기준 시간
V	1	실수	입력 상수
VN	1	실수	트랙 관련 상수

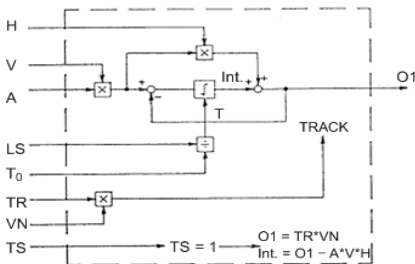


그림 5. PDTFNC의 블럭 다이어그램

그림 7은 PDTFNC 블럭에 대한 기능 검증을 위한 로직 다이어그램을 보여주고 있다. 그림 8은 그림 7의 로직 다이어그램에 대해 입력 A와 트랙 신호 TR, 트랙 스위치 TS 값에 변화를 주면서 시뮬레이션 한 결과를 보여준다. 그림 8의 시뮬레이션 결과는 트랙 신호 입력 TR은 0인 상태에서, 아날로그 입력 A와 트랙 스위치 입력 TS 값에 변화를 주면서, 내부 파라미터 V, LS, VN은 1로, T₀는 20으로 고정된 상태에서 H 파라미터만 수정해가면서 시뮬레이션 한 결과를 보여준다¹⁰⁾.

그림 8의 시뮬레이션 결과는 그림 6의 스텝 입력에 대한 입력 이득 H에 따른 응답 곡선과 같은 결과를 보여주며, 트랙 스위치 입력 신호 TS가 1인 경우에는 출력이 트랙 신호인 TR값인 0을 추종함을 볼 수 있다.

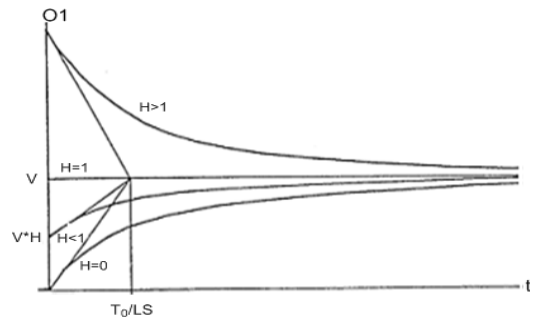


그림 6. PDTFNC의 스텝 응답

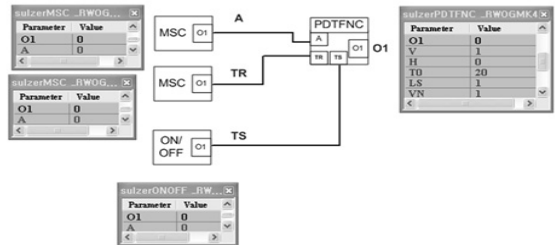


그림 7. PDTFNC 기능 블럭 검증용 로직 다이어그램

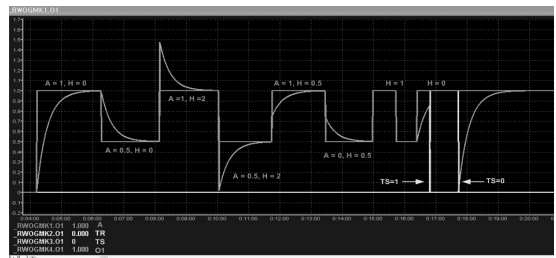


그림 8. PDTFNC 기능 검증 시뮬레이션 트랜드

3.2.2 PICONT 가능 블럭의 검증

PICONT 블럭은 입력 파라미터로 여러 입력인 아날로그 그 신호 E, 트랙 스위치 신호인 부울 입력 TS, 트랙 신호인 아날로그 입력 TR, 선행 신호인 아날로그 입력 FF, 상한 신호인 아날로그 입력 HL, 하한 신호인 아날로그 입력 LL을 가지고, 출력 파라미터로 아날로그 출력인 OI을 가지며, 내부 파라미터로는 실수 값인 비례이득 Kp와 적분 시간 Ti를 갖는다. 트랙 스위치 입력인 TS는 부논리 입력으로 값이 논리 0일 경우에는 출력 OI은 TR값을 추종하며, 트랙 스위치 입력인 TS가 논리 1일 경우에는 식 (2)에 의해 출력 OI이 결정되어진다. 출력 OI의 최종값은 내부 파라미터 상한인 HL과 하한인 LL에 의해 제한되어진다.

$$OI(t) = K_p [E(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t E(p) dp] + FF \quad (2)$$

그림 9는 PICONT 블럭에 대한 기능 검증용 로직 다이어그램을 보여주고 있다. 그림 10은 그림 9의 로직 다이어그램에 대해 제어기의 설정값인 SP와 선행신호인 FF 신호값에 변화를 주면서 시뮬레이션 한 결과를 보여준다. 제어기 출력인 CO와 공정값인 PV간의 관계는 편의상 흔히 사용하는 방법인 1차 필드 함수를 이용하였

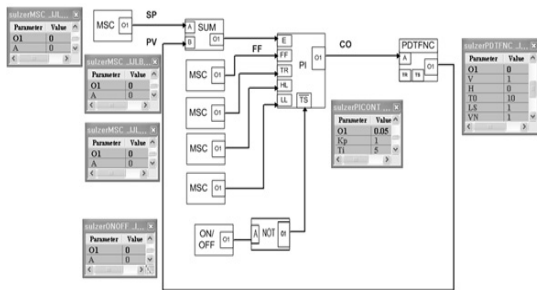


그림 9. PICONT 기능 블럭 검증용 로직 다이어그램

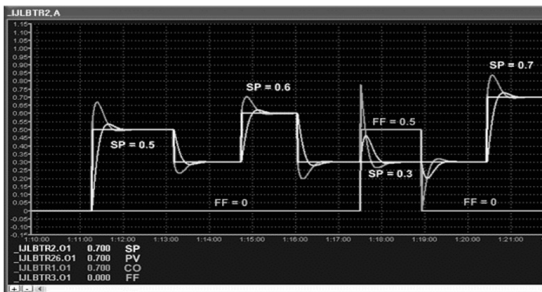


그림 10. PICONT 기능 검증 시뮬레이션 트랜드

다. 그림 10은 설정값 변경과 선행 신호 변경에 따라 PI 제어기가 잘 응답함을 보여주고 있다.

3.3 고압 바이패스 압력 제어 로직 구현

기존 발전소의 제어로직을 분석하고, 개발한 제어 로직 구현 툴을 이용하여 그림 2의 고압 바이패스 계통의 압력 운전이 가능한 제어 로직을 구현하였다^[11]. 분석한 제어로직을 도시하면 그림 11, 그림 12, 그림 13과 같다.

고압 바이패스 계통의 압력 제어 설정 요구값 생성로

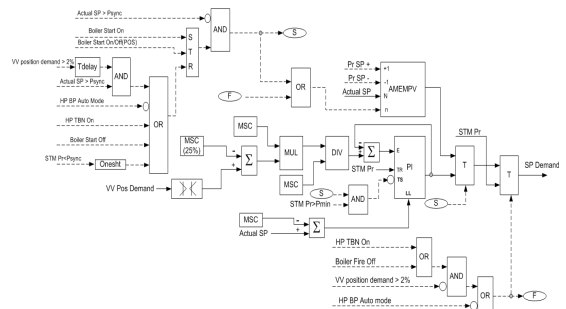


그림 11. 분석한 고압 바이패스 계통의 압력 설정 요구값 생성 로직

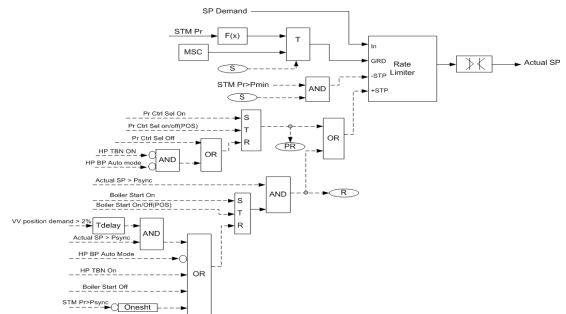


그림 12. 분석한 고압 바이패스 계통의 압력 설정값 생성 로직

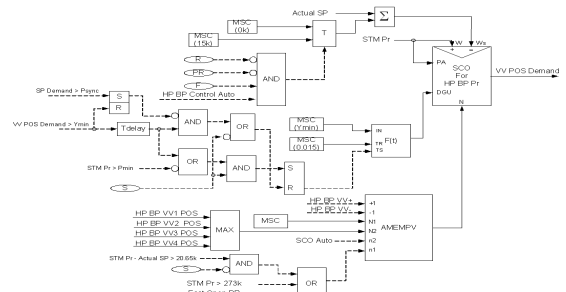


그림 13. 분석한 고압 바이패스 계통의 압력 제어 로직

작은 그림 11과 같으며, 이 제어 로직의 출력인 설정 요구값(SP Demand)은 그림 12의 압력 제어 설정값 생성 로직의 속도 제한기(Rate Limiter 블록)를 거쳐 압력 제어 설정값(Actual SP)으로 작용한다. 속도 제한기의 출력은 그림 13의 압력 제어기의 설정값으로 작용하여 압력을 제어한다. 바이패스 운전 초기, 즉 보일러가 기동되고, 주증기 압력이 12 kg/cm²(Pmin) 미만일 경우에는, 그림 11의 기동모드 조건인 디지털 로직 S 신호가 논리 1이 되고, 그림 13의 제어기인 SCO의 하한 입력 신호로 작용하는 1차 지연 필터의 출력으로 최소 개도(Ymin, 15%)가 됨에 따라 그리고 그림 12의 속도 제한기의 신호 제한에 따라 압력 설정값은 12 kg/cm²를 유지하고, 밸브 개도는 15%를 유지한다. 주증기 압력이 증가하여 12 kg/cm²에 도달하면, 그림 12의 속도 제한기의 -STP 신호 입력 로직이 논리 1이 되어 속도 제한기의 출력, 즉 Actual SP가 감소하지 않으며, 그림 11의 PI 제어기 출력이 밸브 개도 25%에 도달하기 전까지 압력 설정값은 12 kg/cm²으로 유지되어, 연소율 증가에 따라 밸브 개도는 그림 2에서 보듯이 25%에 도달하게 된다. 밸브 개도 디맨드가 25%를 넘어가면 그림 11의 PI 제어기 출력의 증가로 인해 압력 설정값도 계통 병입 압력값인 84 kg/cm²까지 상승하게 되는데, 주증기 압력도 연소율의 증가에 따라 증가함에 따라 제어기 출력인 밸브 개도 디맨드는 25%정도에서 유지하게 된다. 그러나 계통병입 압력인 84 kg/cm²에서의 밸브개도는 운전원에 의한 연소율에 의해 달라질 수 있으며, 제어기는 압력 84 kg/cm²를 유지하기 위해 밸브개도를 조정하게 된다. 주증기 압력이 증가하여 84 kg/cm²에 도달하면, 그림 11의 기동모드 조건인 로직 S는 논리 0이 되고, 정압 제어 모드가 되어, 그림 11의 아날로그 스위치(T 블록) 로직에 의해 이전의 Actual SP, 즉 84 kg/cm²가 압력 설정값으로 유지되며, 그림 12의 속도 제한기의 -STP 신호도 논리 0이 된다. 압력 제어의 결과로 밸브 개도 디맨드가 2%이하가 되면, 그림 2의 추종 모드로 전환되어, 그림 11의 추종모드 조건인 로직 F가 논리 1이 되어 주증기 압력 신호가 SP Demand가 되며, 그림 13의 제어기인 SCO의 설정값에 작용하는 아날로그 스위치(T 블록) 로직에 의해 현재의 주증기 압력에 15 kg/cm²이 가산되어 (주증기 압력 + 15 kg/cm²)의 값이 제어기의 설정값으로 작용하게 된다. 이렇게 함으로써 압력 설정값이 주증기 압력보다 항상 15 kg/cm²이상 유지도록 하여 바이패스 밸브를 닫혀있는 상태로 유지하게 된다. 주증기 압력이 설정값(주증기 압력 + 15 kg/cm²)보다 커질 경우에는 밸브가 열리고 정압 제어 모드로 전환 되어 압력 제어가 이루어진

다. 압력 제어 동작에도 불구하고 주증기 압력이 계속 상승하여 주증기 압력이 압력 설정값보다 20.65 kg/cm²이상 커질 경우에는 고압 바이패스 밸브를 Quick Open하여 주증기 압력을 감소시킨다. 그림 13에서 제어기로 SCO를 채용하고 있는데, 제어시스템 메뉴얼에 나와 있는 제어기의 구조는 그림 14와 같다.

그림 11, 그림 12, 그림 13, 그림 14에서 소개한 제어 로직 분석 결과를 토대로 그림 15, 그림 16과 같이 제어 로직을 구현하였다. 그림 15는 압력 설정값을 생성하고, 압력 공정값과 비교하여 제어기 입력으로 작용하는 에러를 계산하는 로직 다이어그램을 보여주고 있다. 압력 제어 설정값은 그림 2의 압력 운전 곡선을 구현하기 위해 운전 모드와 운전 조건에 따라 자동 설정되며, 사용자 인터페이스에 의해서도 조정가능하도록 구현하였다.

그림 14를 보면 고압 바이패스 압력 제어기인 SCO는 관측기인 OBSERV 블록과 상태변수 제어기인 STCONT 블록, 제어기 수동/자동모드 전환을 위한 SCOCTC 블록,

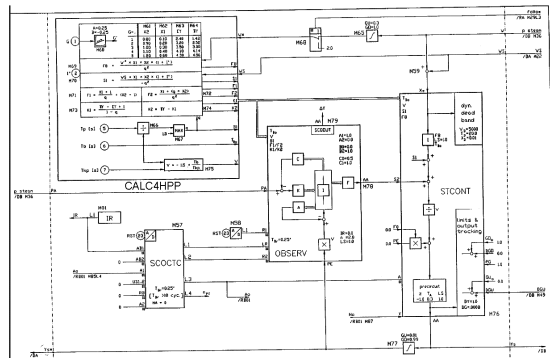


그림 14. 고압 바이패스 계통의 압력 제어에 사용된 상태 제어기 구조

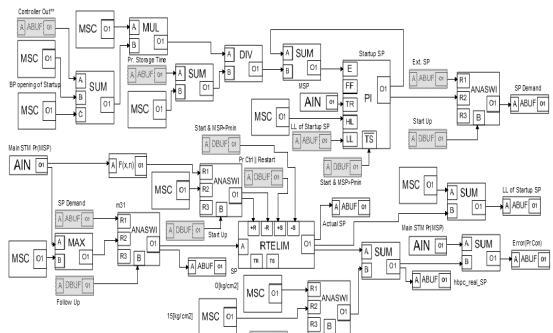


그림 15. 구현한 주증기 압력 설정값 및 제어기 입력 에러 생성 로직

상태변수 계산 블록인 CALC4HPP 블록으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 그림 14의 기존 상태 제어기 뿐만 아니라 향후 제어 시스템에의 확장 적용과 튜닝의 용이성 등을 고려하여 PI 제어기도 동시에 구현하고, 상황에 따라 스위치에 의해 제어기를 선택하여 운전할 수 있도록 그림 16과 같이 고압 터빈 바이패스 압력 제어 로직을 구현하였다. 그림 16은 에러를 입력으로 받아들여 제어기 출력을 계산하는 제어 로직 다이어그램을 보여주고 있다. SCO의 STCONT 블록은 입력 A가 1일 경우 자동모드로 동작하며, 0일 경우는 입력 Y를 추종하며, PI 제어기는 입력 TS가 1일 경우는 자동모드로 동작하며, 0일 경우는 입력 TR을 추종하게 된다. 제어기 선택 스위치를 통해 SCO가 제어를 담당할 경우에는 PI 제어기가 SCO 출력을 추종하게 하고, PI 제어기가 제어를 담당할 경우에는 SCO가 PI 제어기 출력을 추종하도록 구현하였다. 이렇게 함으로써 제어기 선택에 의한 제어기 절환시 범프가 발생하지 않도록 로직을 구현하였다. SCO는 그림 14의 기존 제어 로직을 해석하여 구현하였으며, PI 제어기는 식 (2)의 이상적인 PI 제어기를 backward difference method에 의해 이

산화하여 구현하였다. 그림 16의 AND 블록은 내부 파라미터로 입력 반전용 파라미터를 가지고 있어서 제어기 선택 스위치가 SCO와 PI 제어기의 트랙 스위치를 생성하는데 있어서 반대 입력을 수용하도록 구현하였다.

그림 16에서 구현한 압력 제어 로직에서 제어기 선택 스위치에 의한 제어기 절환시 범프의 발생 여부를 시험하기 위한 시뮬레이션 결과는 그림 17과 같다. 그림 17은 주증기 압력 설정값을 변화시킨 상태에서 제어기를 절환해가며 시뮬레이션 한 결과를 보여주고 있다. 그림 17에 도시된 변수들은 엔지니어링 단위에 대해 0-100[%]의 정규화된 값으로 변환하여 도시하였다. 도시된 변수 중 제어 모드는 이진 값이지만, 디스플레이상의 편의를 위해 SCO 운전일 경우에는 50의 값을 갖고, PI 제어기 운전일 경우에는 0의 값을 갖도록 트렌드 상에서 도시하였다. 그림 17에서 볼 수 있듯이 주증기 압력 설정값 변화에 대하여 SCO와 PI제어기가 응동하여 설정값을 잘 추종하며, 제어기 절환시에도 범프 없이 잘 제어됨을 볼 수 있다.

4. 시뮬레이션

개발한 터빈 바이패스 제어 모델의 효용성 확인을 위해 개발한 바이패스 제어 모델을 시뮬레이션 개발환경의 프로젝트 내에서 개발된 공정 모델과 보일러 제어 모델, 터빈 제어 모델 등 타 계통 제어 모델, 강사 조작반, 소프트웨어 등과 통합하였다¹⁶⁾. 통합 시뮬레이션 환경은 그림 18과 같다.

그림 18과 같은 통합 시뮬레이션 환경에서, 점차부터 주증기 압력이 계통병입 압력에 도달하기까지의 고압 바이패스 계통의 제어 시뮬레이션 결과는 그림 19와 같다.

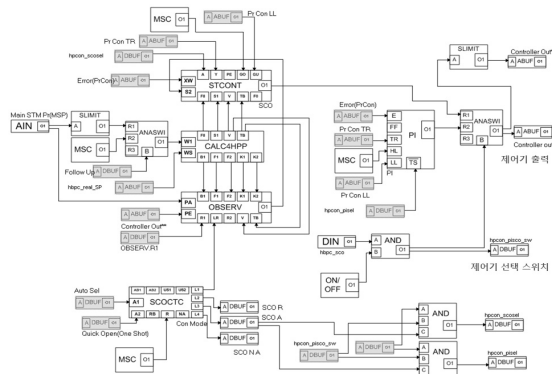


그림 16. 구현한 바이패스 압력 제어 로직

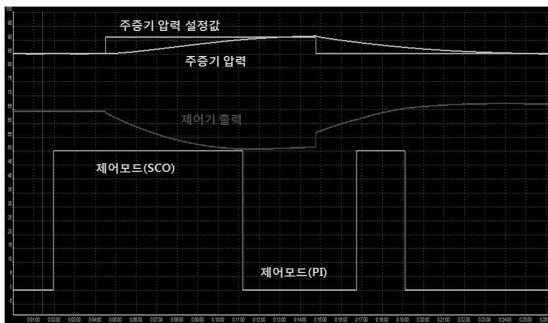


그림 17. 바이패스 압력 제어기 선택 절환 로직 시뮬레이션

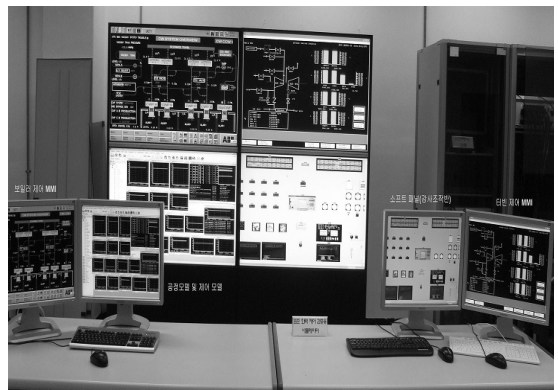


그림 18. 터빈 바이패스 계통 제어 모델의 시뮬레이션 환경

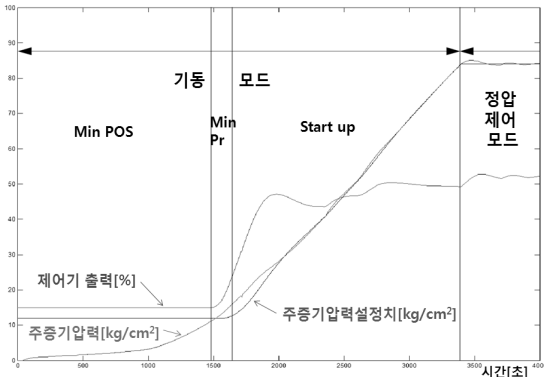


그림 19. 고압 바이패스 계통 압력 제어 시뮬레이션 트렌드

그림 19의 시뮬레이션 결과를 보면, 고압 바이패스 계통의 압력 설정값과 압력값 그리고 제어기 출력을 보여주고 있다. 그림 19의 트렌드를 보면 압력 설정값 12 kg/cm^2 , 밸브 개도 15%의 최초 기동 모드에서 연소율이 증가함에 따라 밸브 개도가 25%이상 열리면서 압력 설정값도 계통 병입 압력인 84 kg/cm^2 까지 증가함을 볼 수 있다. 주증기 압력 설정값이 연소율 증가에 따라 그림 2의 운전 곡선과 같이 생성되어지고, 바이패스 제어기의 출력에 의해 주증기 압력이 주증기 압력 설정값을 추종함을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 제어 검증용 발전소 시뮬레이터를 개발 하는데 있어서, 제어 모델 중 발전소 기동 초기에 보일러 압력을 조절하고, 정상 운전 중 보일러의 과대 압력 상승을 방지하기 위해 보일러에서 발생한 증기를 복수기로 방출하는 터빈 바이패스 계통의 제어 모델을 개발하였다. 제어 모델 개발을 위해 시뮬레이션 개발 환경에서 활용 가능한 제어 로직 구현 툴을 개발하고, 개발한 로직 구현 툴을 이용하여 고압 터빈 바이패스 압력 제어 로직을 구현 하였다. 특히 바이패스 압력 제어기에 SCO 뿐만 아니라 향후 제어 시스템의 확장 적용과 튜닝의 용이성을 고려하여 PI 제어기도 동시에 구현하고, 제어기를 선택하여 범용 없이 운전할 수 있도록 구현하였다. 개발한 제어 로직 구현 툴은 개별 기능 블럭의 설계 사양에 기반한 시뮬레이션에 의해 검증을 하였으며, 개발한 제어 모델은 발

전소 공정 모델과 보일러 제어 모델 등 타 계통 제어 모델과의 연계를 통한 시뮬레이션을 통해 개발한 제어 모델의 효율성을 보였다. 본 논문에서 개발한 고압 터빈 바이패스 계통 제어 모델은 향후 개발 제어 시스템의 발전소 실증 적용시 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 논문은 지식경제부 전력산업연구개발사업에 의하여 수행 중인 화력발전용 통합 감시 제어 시스템 성능 검증 및 실증시험 기술 개발 결과임.

참 고 문 헌

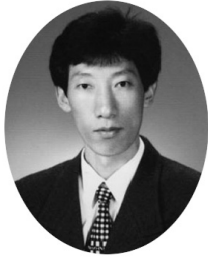
- Burkhard Holl, Helmut Probst and Wolfgang Wischert (2004), "Digital I & C Systems Pre-Tests using Plant Specific Simulators", 4th ANS International Topical Meeting, Columbus, USA.
- Chia-Kuang Lee, Chin-Mao Lee and Kin W. Wong (2009), "Digital System Validation Testing in the Lungmen Project", 6th ANS International Topical Meeting, NPIC&HMIT 2009, Knoxville, Tennessee, USA.
- 박두용 외(2001), "발전소 보일러용 디지털 분산제어시스템 개발", 최종보고서, 전력연구원.
- 임익현 외(2010), "통합감시제어시스템 성능검증 및 실증 시험 기술개발", 전력연구원.
- 이명수 외(2010), "통합 성능 검증 설비용 원전 시뮬레이터 개발", 전력연구원.
- 변승현, 황도현(2010), "발전소 제어 검증용 시뮬레이터 개발", 한국시뮬레이션학회 논문지, Vol. 19, No. 1, pp. 41-51.
- 신상철 외(2007), "모의화력실무, 한국서부발전(주) 태안발전본부 교육훈련센터.
- 변승현(2009), "바이패스 계통 제어 모델 개발 툴 구현보고서", 전력연구원.
- Robert Felker et al. (2009), 3KEYMASTER™ ANALYST AND DEVELOPER GUIDE, WSC.
- 변승현, 김문수, 홍진혁, 이명수(2009), "발전소 시뮬레이터를 위한 터빈 바이패스 계통 제어로직 구현 툴 개발", 한국시뮬레이션학회, '09추계학술대회 논문집, pp. 138-143.
- 변승현 (2009), "발전소 제어 검증용 시뮬레이터를 위한 바이패스 계통의 제어 로직 구현", 2009년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1634-1635.



변 승 현 (little@kepco.co.kr)

1992 연세대학교 전기공학과 학사
1994 KAIST 전기및전자공학과 석사
1994~현재 한전전력연구원 선임연구원

관심분야 : 제어시스템 설계, 제어 시뮬레이션



이 주 현 (jhlee@kepco.co.kr)

2000 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사
2011 충남대학교 대학원 전기공학과 공학박사
1993~현재 한전전력연구원 책임연구원

관심분야 : 제어시스템 설계, 발전기 제어



임 익 현 (imikhy@kepco.co.kr)

1980 건국대학교 전기공학과 학사
1996 홍익대학교 대학원 전기공학과 공학석사
2002 홍익대학교 대학원 전기공학과 공학박사
1988~현재 한전전력연구원 수석연구원

관심분야 : 제어시스템 설계, 전력전자 제어