

영광3,4호기 Foxboro 제어시스템 모델링 및 시뮬레이션

Modeling and Simulation of Foxboro Control System for YGN#3,4 Power Plant

° 김동욱*, 이용관*, 이중근*, 유한성**

*전력연구원 시스템통신연구소 (Tel: 042-865-5737; Fax: 865-5748; E-mail: dongwook@hanbit.kepri.re.kr)

**삼성전자 정보통신시스템본부 (Tel: 0331-200-7947, Fax: 0331-200-7940, E-mail: hansyoo@sec.samsung.co.kr)

Abstracts : In a training simulator for power plant, operator's action in the MCR(Main Control Room) are given to plant process and computer system model as an inputs, and the same response as in real power plant is provided in real time. Inter-process communication and synchronization are especially important among various inputs. In the plant simulator, to simulate the digital control system such as FOXBORO SPEC-200 Micro control system, modification and adaptation of control card(CCC) and its continuous display station(CDS) is necessary. This paper describes the modeling and simulation of FOXBORO SPEC-200 Micro control system applied to Younggwang nuclear power plant unit #3 & 4, and its integration process to the full-scope replica type training simulator. In a simulator, display station like CDS of FOXBORO SPEC-200 Micro control system is classified as ITI(Intelligent Type Instrument), which has a micro processor inside to process information and the corresponding alphanumeric display, and the stimulation of ITI limits the important functions in a training simulator such as backtrack, replay, freeze and IC reset. Therefore, to achieve the better performance of the simulator, modification of CDS and special firmware is developed to simulate the FOXBORO SPEC-200 Micro control system. Each control function inside control card is modeled and simulated in generic approach to accept the plant data and control parameter conveniently, and debugging algorithms are applied for massive coding developed in short period.

Keywords : FOXBORO SPEC-200 Micro control system, simulation, ITI, CDS, full-scope replica

1. 서론(Introduction)

원자력발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터는 중앙제어실(MCR, Main Control Room) 패널(Panel)에서 행한 운전원의 운전결과를 수학적 모델을 통하여 구현된 발전소 계통 모델의 입력으로 받아들이고 이로부터 계산된 실제 발전소와 동일한 반응(Response)을 다시 중앙제어실 패널(Panel)을 통하여 운전원에게 피드백(Feedback)시킨다. 이 과정에서 운전원에게 실제 상황과 동일한 현장감을 제공하기 위해서는 모의제어반이 실시간 제어(Realtime Control) 시스템으로 구성되어야 하며 적절한 현장 음향효과(Sound Effect) 및 각종 계기의 노이즈(Instrument Noise)도 모의제어반에 포함되어 있다. 본 프로젝트에서 사용된 컴퓨터 시스템은 유닉스(UNIX) 시스템이며 원칙적으로는 유닉스 시스템의 성격상 실시간(Real-time) 제어가 불가능하나 시스템 성능 향상과 더불어 모의제어반을 위하여 특별히 고안된 환경(US: UNIX-based Simulation Support System)하에 다량의 수학적 연산과 입출력을 병행하여 처리되면서도 실시간 제어(Quasi-Realtime)가 가능하였다. 본 논문에서는 영광 3,4호기 제어시스템인 FOXBORO 제어시스템의 모델링 작업 및 모의, 그리고 모의제어반과의 통합(Integration)에 이르는 과정을 기술하고

자 한다. 아울러 모의제어반 제작에 사용된 시뮬레이션 환경에 대해서도 언급하고자 한다. 세부적으로는 영광 3,4호기용 모의제어반 제작을 위하여 FOXBORO 제어시스템을 모델링하고 중앙제어실 패널 인터페이스(Interface)를 위한 Indicator, Recorder, 그리고 특히 모의제어반에서는 기술적으로 별도 처리가 필요한 이른바 ITI(Intelligent Type Instrument)로 분류되는 CDS (Continuous Display Station)의 시뮬레이션을 소개하고 약 28개 부속 시스템으로 분류되어 각기 시뮬레이션된 소프트웨어의 통합작업에 필요한 시뮬레이션 환경에 대해서도 기술하고자 한다. 제어 시스템의 성격상 모의제어반 소프트웨어에 통합되기 위해서는 주어진 출력조건하에서 안정을 이룬 상태의 시뮬레이션 모델에 대하여 전체적인 안정을 흐뜨리지 않는 방법으로 제어 시스템 모델을 통합하여야 하며 PID 제어기 및 Lead/Lag 함수의 경우 상당히 긴 시정수(Time Constant)를 가지고 있어 이들을 통합하여 안정된 초기조건(IC: Initial Condition)을 구하기 위해서는 상당히 긴 시간을 필요로 한다. 이들 시정수를 갖는 제어함수를 실시간 제어를 필요로 하는 모의제어반용 소프트웨어로 구현하기 위해서는 최소한의 연산으로 근사된 알고리즘을 필요로 한다.

2. Foxboro SPEC-200 Micro 제어시스템

영광 3,4호기에 사용된 FOXBORO 제어시스템은 분산제어가 가능한 시스템으로써 원자로 제어(RRS: Reactor Regulating System), 주증기 제어(SBCS: Steam Bypass Control System), 주급수 제어(FWCS: Feedwater Control System), BOP(Balance of Plant) 제어 등을 각기 분산 수행함과 동시에 각 제어 시스템 간에 신호 및 정보를 교환함으로써 전체적으로 통합되어 대부분의 출력운전 조건에서는 발전소 자동운전이 가능하도록 설계되어 있다. Foxboro SPEC-200 Micro 제어 시스템에서는 발전소 제어 설계에 따라 제어 카드(CCC Control Card)를 배열하고 이들 제어 카드의 입출력 조건 및 제어 정보(연산 정보, 시정수(Time Constant), 바이어스 및 오프셋값 등)를 입력한다. 이들 입력 정보는 형상관리 터미널(Configuration Terminal)을 통하여 제어 카드에 입력된다. 대부분의 PID 제어기에서는 효율적인 제어를 위하여 시정수(Time Constant)등에 경험적인 최적치를 사용하고 있는데 이들에 대해서는 시뮬레이션을 통하여 효율적으로 검증될 수 있을 것이다.

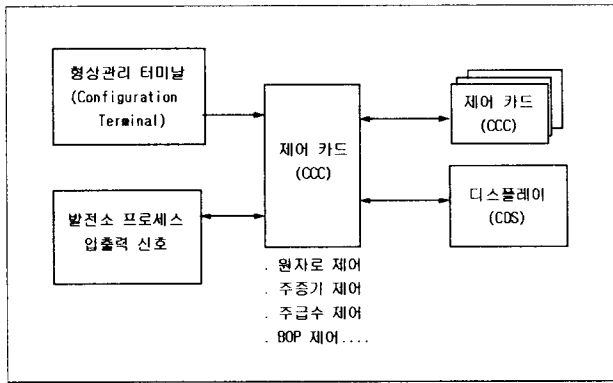


그림 1. Foxboro SPEC-200 Micro 제어시스템 개념도

Fig. 1 Configuration of Foxboro SPEC-200 Micro Control System for YGN#3,4

3. FOXBORO SPEC-200 Micro 제어 시스템 모델링

FOXBORO SPEC-200 MICRO 제어시스템에 대하여 모델링 및 시뮬레이션을 수행하기 위하여 영광 3,4호기용 FOXBORO 제어도면(이후 FD(FOXBORO Functional Drawing)라 부르기로 한다)을 입수하고 FD 도면으로부터 모델링 범위 및 모의방법을 검토하였다. 약 300여장에 이르는 방대한 양의 제어 시스템 시뮬레이션을 실시간에 모의하기 위해서는 기초 설계 단계로부터 생략 가능한 신호의 경우 최대한 제외시켜 나가는 작업이 필요하다. 이를 위하여 중앙제어실 이외의 패널에 부착되어 운전원의 조작이 불가능한 선택스위치 등으로부터의 입력처리가 생략(Simplification)되거나 고정된 값으로 가정(Assumption)되었다. FD 도면은 크게 발전소 프로세스로부터의 입출력 신호부와 제어 블록을 포함하는 FOXBORO 제어 시스템 내부로 구성되어 있다. 훈련용 모의제어반의 개발 범위가 주로 중앙제어실의 운전원에게 발전소 상태를 Feedback하여 주는 방향으로 설정되어 있으므로 발전소 프로세스 모델로부터 생성된 신호를 처리 및 연계하

기 위한 모든 Logic이 모의범위에 속하며 운전중인 패널을 통한 입출력 신호중 중앙제어실 이외의 패널로부터 발생하는 신호처리하는 일정한 규칙에 따라 생략 또는 가정을 하였다. 이들에 대한 개발 과정은 다음과 같다.

3.1 기초 설계 과정

입출력 신호부는 발전소의 각종 계측기로부터 신호를 받아 FOXBORO 제어 시스템 내부에서 사용할 수 있도록 신호를 변환(Signal Conditioning)시키는 부분까지를 포함하는데 시뮬레이션에 필요한 정보로는 다 시스템 및 FOXBORO 제어 시스템 내부적으로 연계 신호가 되는 부분이 이들 신호 변환과정과 함께 선택되었다. 대량의 신호에 대하여 시뮬레이션에 필요한 고유 변수명을 부여하기 위하여 도면 고유번호를 이용하였다.

(예)

fd():xxxby...

FD 도면 xxx의 제어 블록 y로부터의 출력 신호. Boolean 신호의 경우 이를 구별하기 위하여 “:” 를 삽입하여 변수명을 결정

fd():xxxtyyy...

FD 도면 xxx로부터 도면 yyy로 연계되는 신호의 변수명. 반드시 fd():yyytxxx.. 변수를 파트너 변수로 사용하여 도면간의 연계(Interface) 신호로 사용함과 동시에 완성된 소스 코드의 검증에 대비하였다.

제어 시스템 내부의 회로는 아날로그 및 Boolean 신호 각각에 대하여 인접 제어 블록의 ID를 이용하여 변수명을 설정하였으며 제어 블록 내부는 작업의 효율화를 꾀하기 위하여 되도록 서브루틴으로 처리하였다. FOXBORO 제어 시스템 이외의 발전소 시스템으로부터의 신호는 발전소 Logic 도면(Logic Drawing)으로부터 해당 트랜스미터로부터의 신호를 제어 시스템 내부에서 사용될 수 있도록 % 단위로 정형화(Normalize) 시켰다.

3.2 코우딩 및 소스 검증

기초 설계가 끝난 FOXBORO 제어 시스템의 상세설계(및 코우딩) 단계에서는 대량의 도면을 단기간내에 코우딩하는 과정을 거친다. 최대한 코우딩 작업을 단순화 시켰으며 사용되는 모든 변수에 대한 고유명 부여가 가능한 상태이며 또한 모의 방법이 이미 설정되어 있으므로 개발기간을 단축시킬 수 있었다. 이와 함께 검증을 위한 프로그램을 사용하였는데 UNIX 유틸리티(utility)인 nawk를 이용하여 작성한 소스 코드를 스캐닝함으로써 검증하였다.

3.3 제어 블록 : 제어 함수의 모의

Foxboro SPEC-200 Micro 제어시스템의 제어 블록의 코우딩은 서브루틴으로 처리되었는데 앞서 언급한 것처럼 실시간 모의 조건하에 제어 기능을 구현하기 위하여 PID 제어기나 Lead/Lag 함수 등에 사용되는 연속시간 전달함수는 오일러 근사화를 통하여 다음과 같은 이산시간 전달함수로 변환하여 모의하였다. 이것은 시뮬레이터에서의 컴퓨터 연산이 Discrete Time Interval로 수행되기 때문이다. 지면관계상 lead/Lag 함수에 대해서만 변환 과정을 소개하면 다음과 같다.

$$y(t) = \frac{1 + \tau_1 s}{1 + \tau_2 s} x(t), \quad (1)$$

여기서, 라플라스 연산자 'S' 와 Time Shift 연산자 'Z'의 관계식 $z = e^{-sh}$ 를 오일러 근사화 하면 $s \approx \frac{z-1}{h}$ 를 얻을 수 있

고, 이로부터 (1)식을 다음과 같은 이산시간의 전달함수로 바꿀 수 있다.

$$y(n) = \frac{h + \tau_1(z-1)}{h + \tau_2(z-1)} x(n) \quad (2)$$

따라서,

$$y(n+1) = y(n) - \frac{h}{\tau_2} (y(n) - x(n)) + \frac{\tau_1}{\tau_2} (x(n+1) - x(n)) \quad (3)$$

과 같이 컴퓨터 연산수행에 적합한 최종 관계식을 얻는다. 위 (1)-(3)식에서 예시한 바와 같이 제어 함수의 모의시에는 내부 메모리가 있으므로 이들에 대한 초기치는 발전소 모델과 제어 시스템 모델을 통합할 때 제어 블록으로부터의 일시적인 (Transient) 제어 신호를 생성하며 이들 시정수(Time Constant)들이 보통 분(Minute)단위의 값을 가지고 있으므로 이들이 발전소 모델과 통합되어 모의제어반이 안정된 상태에 도달하기 위해서는 보통 수 분 내지 수 십분이 소요된다. 한편 실제 발전소에서는 FOXBORO SPEC-200 Micro 제어 시스템이 5Hz로 수행이 되는 반면에 모의제어반에서는 4Hz의 주기로 제어함수가 수행되는데, 이들 제어 함수는 비선형 함수로써 약 50msec 정도의 오차는 제어기의 Tuning시 시정수(Time Constant)의 조절에 따른 효과에 비하면 무시할 만 하였다. 제어 블록이 내장되는 제어 카드(CCC)에는 다양한 제어 함수를 내장하고 있는데 모의 범위 및 방법을 기초 설계하는 과정에서 최대한의 공통 기능을 추출하여 최종적으로 선정된 제어 함수에 대하여 서브루틴 처리하였다. 즉, 대부분의 제어 카드 내장 함수는 FOXBORO 설계 도면으로부터 직접적인 정보를 얻어 이를 관련 계통 모델 소스 코드에 직접 반영하도록 하였으며 최종적으로 서브루틴 처리된 제어 함수의 종류는 다음과 같다(이들중 PID, AMB 제어 카드에는 CDS가 연결되어 있다);

- . PID(Proportional, Integral, and Derivative Control)
- . INT(Integral)
- . AMB(Auto, Manual, and Bias)
- . CHAR(Characteristic curve)
- . LLAG(Lead & Lag)
- . ALRM(Alarm)

3.4 CDS 시뮬레이션

FOXBORO SPEC-200 Micro 제어 시스템의 디스플레이에 사용되는 CDS는 자체 내장하고 있는 INTEL 계열 80C196의 16 bit 마이크로 프로세서에 의하여 운전원의 입력을 처리하고 제어정보를 디스플레이하는 이른바 지능형 계기이다. 모의제어반에서는 이러한 지능형 계기의 처리에 특별한 주의를 요하는데 훈련용 모의제어반에서 필요로 하는 일부 기능, 즉, Backtrack, Replay, Reset, Freeze 등이 제약을 받을 수 있기 때문이다. 앞에서 언급한 제어 카드(CCC)의 경우도 당초 하드웨어적으로 Stimulation 하는 방법을 고려하였는데 이 경우 제어 카드의 디스플레이인 CDS 역시 Stimulation되는 방법을 선택해야 한다(그림 2.a). 전력연구원은 본 모의제어반이 운전원 훈련용으로 제작되는 관계로 기능상의 제약을 없애고 모의제어반의 성능을 향상시키는 방법을 선택하기 위하여 Simulation 방법을 선택하였다(그림 2.b). (참고로

1988년 미국의 Northeast 전력회사에서는 CY(Connecticut Yankee) 모의제어반에서 FOXBORO SPEC-200 Micro 제어 시

스템의 제어 카드중 ALARM, PID, TUNE, LLAG, AMB 및 CALC의 6가지 제어 블록에 대해서 Stimulation 방법을 사용하고 이를 'Hybrid Simulation/Stimulation'이라 하였다.) 그림 2.에서와 같이 영광 3,4호기에서는 최초로 FOXBORO SPEC-200 Micro 제어 시스템을 Simulation에 의하여 모의제어반에 구현하였으며 Backtrack, Reset, Replay, Freeze의 모든 기능을 만족하고 훈련용 모의제어반의 성능 향상에 성공하였다. CDS는 이를 위하여 변형시켰는데 내부적으로 제어카드와의 입출력을 대신하

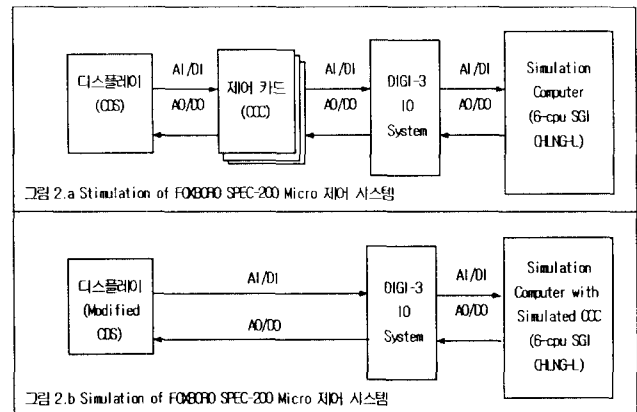


그림 2. 스티뮬레이션 과 시뮬레이션
Fig. 2 Stimulation vs. Simulation

는 Simulation Computer로부터의 변수 입출력 및 CDS Configuration에 따른 Alphanumeric 디스플레이를 위하여 별도의 Firmware를 제작하고 마이크로 프로세서를 이용하여 처리하였다. Simulation Computer와 변형된 CDS(Clone이라 부르기로 한다)간에는 전력연구원에서 자체 제작한 드라이버를 통하여 연계시켰다.

3.5 NIST(Non-Integrated System Test)

코딩이 완료된 제어 시스템 모델에 대한 실행 모듈을 컴파일하고 관련 라이브러리에 링크한 다음에 Stand-alone Test를 수행한다. 모의제어반 제작 공정상 이를 NIST라고 부르는데 주어진 발전소 출력조건하여 연계된 신호값을 가정한 다음 FOXBORO SPEC-200 Micro 제어 시스템 모델에 대한 Test를 수행한다. 특히 PID 제어기나 LLAG 회로의 성능을 시험하기 위하여 다양한 입력을 통하여 일차적으로 모델 자체에 대한 V&V(Validation and Verification)을 수행하고 모의제어반 제작 공정의 다음 단계인 통합(Integration) 단계를 위하여 제어 시스템 모델의 내부 변수에 대한 안정된 초기 조건을 찾아야 한다. FOXBORO SPEC-200 Micro 제어 시스템이 영광 3,4호기의 주요 시스템인 원자로 제어(RRS), 주증기 제어(SBCS), 주급수 제어(FWCS) 및 BOP 제어를 담당하고 있으므로 발전소 프로세스 모델에 절대적인 영향을 주게 되기 때문이다. 개별 모듈 검증을 위하여 IEXEC(Interactive Executive)을 생성하고 ISD(Interactive Symbolic Debugger)를 통하여 이와 같은 작업을 수행하였다. 훈련용 모의제어반에서 제공하는 MF(Malfunction) Test를 이용하여 PID 제어기의 P-제어, I-제어 및 D-제어 성능을 시험하고 안정된 값으로 제어가 되는지에 대한 Test를 수행하였다. 특히 LLAG 회로의 경우 측정/제어 대상 프로세스와 측정/제어 신호간의 지연 효과를 보상하기 위한 것이므로 발전소 프로세스 모델과 시정수의 차이가 발생하며 이에 따른 Tuning이 불가피하였다.

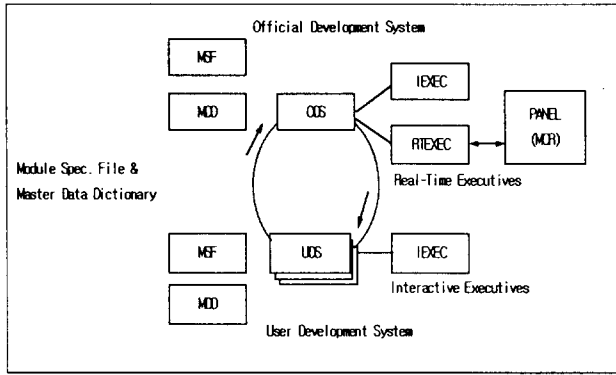


그림 3. Simulation 개발 환경
Fig. 3 Development Environment of Simulator

그림 3은 본 프로젝트에서 사용된 Simulation Environment인 US3(UNIX-based Simulation Support System, GSE사, USA) 개념도이다. 모의제어반은 발전소 서브시스템 별로 다수의 개발 담당자가 소스를 개발하고 자신의 개발환경(UDS :User Development System)하에서 검증작업을 거친후 다수의 사용자에게 Access가 허용되는 ODS로 등록된다. 기존의 ODS 모듈과 통합되어 Test시 기존의 ODS 모듈이 불안정해지면 다시 UDS로 보내어 보완작업을 수행하도록 한다. ODS에 통합된 모듈은 RTEEXEC(Real Time Executive)을 통하여 PANEL 하드웨어와 연동하여 4Hz로 모의제어반을 작동하도록 한다. ODS 통합(Integration) 과정에서 사용자, 즉, 개별 모듈의 개발자가 UDS에서 사용된 모듈(MSF)과 변수(MDD)가 ODS용 MSF 및 MDD에 등록된다.

4. 결론

영광 3,4호기 시뮬레이터에는 최초로 FOXBORO SPEC-200 Micro 제어 시스템의 제어 카드 및 CDS가 Simulation 방법으로 구현되었다. 제어 시스템의 성능은 발전소의 다양한 사고 상황을 MF(Maifunction)으로 Test하는 과정에서 전체적으로 검증되었으며 Backtrack, Reset, Freeze, Replay등 훈련용 모의제어반에서 요구하는 성능 조건을 모두 만족시킬 수 있었다. 발전소 운전원 훈련용 모의제어반 제작 기술의 국산화가 완료되었고, 모의제어반 유지보수 및 성능향상이 국내 기술에 의하여 가능해졌다.

참고문헌

- [1] "Simulation of SPEC-200 Micro Controllers on the Connecticut Yankee Simulator", Jiunn-Guo Lin & George Huang, Simulator Technical Support Branch, Waterford, CT06385(to be published)
- [2] "Stimulation of FICHER & PORTER Digital Process Control Stations for WOLSONG Plant Simulator", Tony El-Chakieh, Yvon Rousseau, Claude Vincent, CAE Electronics, '97 SCS Conference