

차세대원전 공정제어계통 설계 개발

A Development of Component Control System of KNGR

양승권, 박중범, 박현신, 정학영

한국전력공사 전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

차세대원전은 기존 발전소와 달리 통신망을 근간으로한 제어계통의 완전 디지털화를 목표로 설계하고 있다. 한국 표준형 발전소는 공정제어계통에 릴레이를 이용한 순차제어 방식을 채택하였으나 차세대원전에서는 분산제어방식과 구획화(Segmentation)개념을 적용함으로써 케이블 감소 등 경제성 향상 및 계통의 신뢰성 향상이 기대되고 있다. 아울러 제어계통과 연계된 Gateway를 이용한 정보인터페이스, 그리고 주제어실 워크스테이션으로부터의 Softcontrol 채택 등은 인간공학적 측면에서도 상당한 개선이 이루어 지고 있다. 하지만 기존 발전소의 미적용 첨단 설계 개념의 도입에 따른 설계 Risk 등을 극복하기 위해 공정제어계통의 다각적인 설계 검증 및 보완작업은 지속적으로 이루어져야 할것이다

Abstract

Full digitization of instrumentation and control(I&C) system is one of the distinguished design characteristics of Korean Next Generation Reactor(KNGR). One example is the component control system(CCS) of KNGR that adopts the new design concept, which is superior in many respect to that of previous Korea Standard Nuclear Power Plant(KSNP). The adoption of the distributed control system and segmented architecture can increase cost-effectiveness and system reliability. Moreover, the use of softcontrol by workstation located in main control room provides effective man-machine interfaces by taking into account of economics. This paper accounts for such design concept of CCS, attempting to confirm its advantages.

1. 개 요

차세대원전의 공정제어계통은 기존 발전소와 상당히 다른 설계개념을 적용하고 있다. KSNP를 비롯한 선행 발전소의 경우 공정제어계통은 발전소 현장의 많은 기기(Component)들을

어하기 위해 Interposing Logic System(ILS)라 불리는 릴레이 제어회로를 사용하였는데 이 비는 많은 릴레이들을 내장하기 위한 공간 확보 및 릴레이 고장에 따른 설비의 신뢰성측면에 여러 가지 문제점을 안고 있다. 하지만 차세대원전의 경우 전면적으로 Programmab Controller(PC)를 채택 할 뿐 아니라 그 설계 개념도 기존발전소의 ILS에서 벗어나 Gro Controller(G/C)와 Loop Controller(L/C)의 적용으로 기기 고장률 및 Cable 감소 그리고의 디지털화를 통한 계통의 신뢰성 제고를 기할 수 있게 되었다. 본 논문에서는 차세대원전 공정제어계통의 설계 개념 및 표준형원전과의 차이점을 소개하고 설계관련 주요개선 내용 및 현안사항에 대해 논해 보고자 한다.

2. 계통의 구성 및 기능

차세대원전의 공정제어계통은 발전소 배전반에서 제어되는 펌프(Pump), 밸브(Valve), (Fan), 히터(Heater), 차단기(Breaker)등 모든 발전소 공정(Process)기기들을 제어하는 의미한다. 공정제어계통은 연속(Continuous)혹은 비연속(Discrete) 신호를 갖는 기기들을 할 수 있도록 설계된다. 아울러 본 계통은 발전소 기기(Component) 상태(Status)및 다양한 정 변수(Process Parameter) 정보들을 상위 정보계통인 Information Processing System 및 Qualified Indication Alarm & System(QIAS)에 제공하는 기능을 갖는다.

2.1 공정제어계통(CCS)의 구성

차세대원전의 공정제어계통 중 NSSS(Nuclear Steam Supply System)에 해당되는 계통 다음과 같이 구성되어있다.

- 주급수제어계통(Feedwater Control System)
- 증기우회제어계통(Steam Bypass Control System)
- 가압기 압력 및 수위제어계통(Pressurizer Pressure & Level Control System)
- 붕산제어계통(Boron Control System)

2.2 공정제어계통의 기능 및 특성

차세대원전 공정제어계통은 발전소 기기의 제어는 물론 현장기기 데이터의 취득 기능도 함께 보유하도록 설계되고 있는데 본 계통 들의 운전기능 및 특성을 소개하면 다음과 같다

2.2.1 주급수제어계통(FWCS)

본 계통은 주급수제어밸브(FW Control Valve) 위치와 주급수 펌프속도 요구신호(FW Pump Speed Demand)에 의한 펌프속도제어에 따라 증기발생기 수위를 효율적으로 제어하는 계통

다. 주급수 제어계통은 15%-100% 발전소 출력범위내에서 10%의 Step 부하변화를 감당 할 있도록 설계되어야 하며, 15%-100%범위 내에서 $\pm 5\%$ 부하변화를 수용할 수 있도록 설계되어야 한다. 주급수제어계통은 20%-100% 발전소 출력범위에서 다운코마수위(Downcomer Level) 수위, 증기량 등의 3요소 제어신호를 사용하여 제어밸브 위치와 펌프속도 요구신호를 제공하는 3요소 제어방식을 채택하고 있다.

2.2.2 증기우회제어계통(SBCS)

본 계통은 원자로 1차측(NSSS)에서 100% 원자로 출력부터 터빈 트립까지의 운전기간 동안 원자로 트립 없이 신속한 부하제거가 가능하도록 하는 기능을 갖는다. 이 계통은 최소한 55% 이상의 부하제거 용량을 갖추어야 하며, 터빈 우회밸브(TBN Bypass V/V)에 요구신(Demand Signal)을 제공하여 발전소의 가열(Heatup)이나 냉각(Cooling)동안 원자로 냉각도의 수동제어가 가능해야 하며, 고온대기(Hotstandby) 동안 주증기 헤더(Steam Header)의 자동제어 기능을 갖추어야 한다.

2.2.3 가압기 압력 및 수위제어계통(PPCS&PLCS)

본 계통은 발전소 정상운전동안 원자로 냉각재 압력과 체적을 유지하는 기능을 갖는다. 이 제어계통은 가압기 히터와 분무밸브(Spray Valve), 충전제어밸브(Charging Valve), 배수오스(Letdown Orifice) 등을 사용하여 특정 한계치 이내로 유체의 압력과 수위를 제어하기 위 공급된다. 그런데 발전소 전출력 운전기간 동안 본 계통의 가압기 내부 절반은 포화수로, 그 나머지는 포화증기로 차있는 상태를 유지하며 열손실 보충을 위해 계통의 비레운전 모드상태에서 가압기 히터는 약간씩 동작되고 있다.

2.2.4 붕산제어계통(BCS)

Chemical Volume Control System(CVCS)의 하나인 붕산제어계통은 원자로 냉각수(RC)의 붕산 농도를 감시하고 제어하는 기능을 갖는다. 본 계통은 원자로 냉각수내의 필요한 붕산 농도를 유지하기위해 체적제어 탱크내의 내용물을 수동 혹은 자동으로 운전한다. 운전원이 원자로 냉각수(RCS)내의 적절한 붕산 농도를 유지하기 위해 QIAS와 IPS 화면의 Trend상 해당 지시치(ppm단위)를 나타나도록 해야 한다.

3. 계통 설계 내용

차세대 원전 공정제어계통은 한국표준형원전(KSNP)를 근간으로하여 보다 향상된 설계개념을 도입할 예정인데 계통에 PC를 전면적으로 채택함 따라 설계유연성(Flexibility)이 상당히

향상되어 다양한 제어기능 구현이 가능하게 되었다.

3.1 한국 표준형 발전소(KSNP)와 차세대원전(KNGR) 비교

제어방식에 있어서 KSNP는 디지털과 아날로그를 혼용한 방식을 채택하고 있으나 KNGR은 PC를 사용한 디지털 분산제어 방식을 적용하였고, KSNP에서 현장신호 Multiplexing의 경비안전급 BOP제어계통에 Multiplexing을 적용한 반면, KNGR에서는 안전 및 비안전 등급히 현장 신호 Multiplexing을 적용하였다. 제어 Loop 개념에 있어서도 KSNP가 단일 Loop(슬라이스)를 적용한 반면 KNGR은 다중 Loop제어기(MLC)를 적용함으로써 고장발생률을 저하 감소시켰다. 다중 Loop제어기는 SLC에 비해 하나의 Processor가 Segmented된 유체로의 독립성을 보존하기위해 이에 관련된 여러 Loop를 제어하기 때문에 여러개 중 하나의 Processor 고장에 의해 경로를 차단하는 SLC보다 신뢰성이 매우 향상된다. 다양화(Diversification) 설계 및 심층 방호 개념(Defense-in Depth)에서도 KSNP의 경우 비안전 계통으로도 원자력 지능가능토록 심층방호 개념을 적용했으나 H/W 및 S/W의 다양화 설계는 미적용 상태인 반면 KNGR에서는 안전 및 비안전 계통에 S/W 및 H/W 심층 방호개념을 적용하였고, 기기제어의 그룹핑(Grouping) 및 구획화(Segmentation)를 적용하였다.

전반적으로 KSNP에 비해 KNGR은 심층방호 및 다중 Loop개념 적용, 모듈화, 분산화 Grouping, Segmentation 등을 통해 제어 계통의 신뢰성(Reliability)을 크게 향상시켰다 수있다.

3.2 계통 설계 구조

KNGR의 공정제어계통(CCS) 설계의 세부적인 내용을 상세히 기술하기는 지면상 어렵지만 대략적으로 KNGR CCS설계의 기준을 살펴보면 다음과 같다.

CCS는 크게 ESF-CCS(Engineering Safety Feature Component Control System)와 P-CCS(Process Component Control system)로 구분된다. 비안전급 CCS는 BOP의 P-CCS와 NSSS의 NPCS(NSSS Process Component Control System) 두개로 나누어 지지만 기계 혹은 전기적으로 본 비안전 제어계통들이 분리된 것은 아니다. CCS는 비연속 제어신호(Discrete State)와 연속제어신호를 공급하는 기능을 갖는다. CCS는 Redundancy 개념이 적용되므로 Group Controller는 이중화로 설계하며 보호계통(Protection System)과 다른 H/W 및 S/W를 적용하므로써 다양성(Diversity)개념을 충족 시키고 있다. 본 제어계통은 단일고장(Single Failure)에 의해 계통의 건전성을 잃지 않도록 설계 되는데 특히 발전소 계통의 정상경로(Normal Path)와 긴급경로(Critical Path) 각각에 해당하는 제어시 제어기능의 건전성을 유지하기 위한 다양성을 충족하기 위해 심층방호개념(Defense-in-Depth Measure)이 계통 설계에

적용되었다. CCS는 Group Controller에서 제어 알고리즘 및 신호검증(Signal Validation)을 수행하고 Loop Controller에서는 기존 발전소의 ILS기능인 기기제어논리(Component Control Logic)을 수행토록 하는 분산제어방식(Distributed Control System)으로 설계된다. 그런데 Loop Controller는 제어기능과 데이터 취득(Data acquisition)기능을 함께 갖고 있으며 케이블 감소 및 제어 효율성을 위해 현장 기기에 가장 근접한 위치에 Loop Controller Cabinet을 설치하도록 설계가 진행 중이다.

CCS는 A,B,C,D(ESF-CCS), N1,N2,N3(P-CCS) 등 7개의 Division으로 구분되어 있으며 A,B,C,D와 N1,N2,N3는 서로 물리적, 전기적 독립성이 유지되고 있다. CCS는 하나의 CCS division내에 상위 정보계통과의 정보 Interface를 위한 두 개의 Gateway와 주제어실로 부터의 Softcontrol을 위한 하나의 Control Channel Gateway를 갖도록 설계한다. 통신망의 관점에서 보면 크게 3가지로 구분 되는데 Group Controller내부의 데이터 통신을 위한 Group Network, Division내의 데이터 Interface를 위한 Intra-division Network, 시스템간 혹은 Division간의 데이터 Interface를 위한 Interdivision Network 등이 이에 해당된다. 본 계통에서는 또한 계통의 시험 및 유지 보수를 위해 Maintenance & Test Panel(MTP)가 설치된다.

캐비넷 PLC 모듈에 공급되는 전원(Power Supply)의 경우 각 CCS계통의 건전성을 유지하기 위해 동일한 그룹제어기 내에서도 Grouping과 Segmentation에 따라 전원공급원을 달리 함으로써 전원공급기 고장으로 인해 제어계통 동작불능 및 발전소 불시정지를 초래하지 않도록 설계 된다.

최종적으로 CCS설계의 건전성 및 설계 Risk 제거를 위해 CCS의 Prototype을 제작하였고, Prototyping을 통한 시험결과가 설계에 Feedback되도록 함으로써 설계 구조의 적합성을 확인할 수있도록 하였다.

3.3 주요 설계특성

차세대원전 공정제어계통은 계통의 디지털화에 따라 다음과 같은 설계개념들을 적용하고 있다.

3.3.1 주요 설계특성

차세대원전 CCS에 적용된 주요 설계 특성을 정리하면 다음과 같다.

- 안전 및 비안전 계통에 Remote Signal Multiplexer를 채택
- Multi-Loop Control Control 채택
- NSSS 및 BOP I&C 계통의 설계 일원화
- NSSS 및 BOP계통을 통합하여 PC(Programming Controller)적용

- 공통모드사고(Common Mode Failure) 대비를 위하여 안전계통과 비안전 계통에 서로 다른 소프트웨어 및 하드웨어 적용
- Network Gateway를 통한 상호 정보 전송의 다양성(Diversity) 충족을 위하여 안전등급 및 비안전 정보처리계통에 다른 방식의 정보 전송 Network 구성
- Workstation을 활용한 정보처리 계통 구성
- Grouping 및 Segmentation 체계분석 및 계통 Throughput 분석을 통한 신뢰성 및 응답속도를 보장하는 설계추진

3.2.2 주요 설계 개선사항

1) Group Controller 이중화 및 단일 L/C

제어계통은 FWCS1, FWCS2, SBCS Main, SBCS Permissive, PLCS, PPCS, CVCS(BCS등) 등으로 구성이 되는데 FWCS의 경우를 검토해 볼 때 이 계통은 한개의 G/C에 할당되도록 설계된다. 하나의 G/C내에 위치한 FWCS1, FWCS2는 각각 Loop Controller 단위로 분리되도록 설계 된다. 여기서 출력감발계통(RPCS)이 동작 중일 때 FWCS1, FWCS2중 하나가 Fail 될 경우에 Plant Trip은 발생되지 않는다. 여기서 설계상의 근본적인 단일고장전제(Single Failure Assumption)는 FWCS1, FWCS2 두 개가 동시에 Fail 되지 않는다는 것이다. 따라서 발전소정지(Plant Trip)를 유발 할수 있는 단위인 G/C는 이중화 하여 한 개의 G/C가 Fail되더라도 발전소 정상운전을 유지토록 구성하며, FWCS1, FWCS2로 분리된 각 L/C는 단일화 할경우 설계 최적화가 가능하게 된다.

2) Multi-Loop Controller(MLC)

기존 발전소의 Single Loop Control(SLC)방식은 각 Component별로 Dedicated 된 전용 Processor를 가지고 제어하는 방식으로, Grouping과 Segmentation개념이 적용되지 않는 방식을 취하고 있다. 따라서 1개의 Processor만 Fail된다고 해도 해당 Processor에 관련된 Function을 모두 Fail시키게 되나 KNGR에서는 1개의 Processor(L/C)가 Function에 관련된 Grouping된 Component들을 제어하는 MLC 방식을 채택하므로써 SLC에 비해 Processor Failure에 의한 Function 불능 가능성을 대폭 감소, 발전소 이용률(Availability)을 크게 향상시킬 것으로 기대된다.

3) Functional Segmentation

KSNP에서 제어계통에 대한 기본 전제는 제어계통의 단일 고장이 여러개의 설계기준 과도 상태를 만들지 말아야 한다는 것이다. 이것은 결국 제어계통의 고장에 의한 주급수 상실 및

과도 증기유량 발생사고를 막는다는 점이다. 이러한 점을 대비하여 CCS 설계에 있어서 Control Logic은 기능적으로 구획화(Segmented)되었고 이 분석 결과들은 Multiple PC Processor에 적용되었다. 이것은 물리적으로 작은 PC Processor 단위 들이 여러개 합쳐진 상태에서 여러개 PC Processor가 종합되어 Segmentation기능을 수행하도록 하기 위한 목적을 갖고 있다.

4. 결론

지금까지 차세대원전 공정제어시스템의 기능과 설계 특성, 표준형발전소와 비교하여 설계 개선된 내용에 대하여 살펴보았다. 차세대원전 공정제어시스템은 기존 발전소와 달리 통신망을 근간으로한 제어시스템의 완전 디지털 화를 목표로 설계하고 있기 때문에 새로운 설계 개념이 상당부분 도입되고 있다. 이에 따라 기존 발전소에서 경험하지 못했던 디지털화에 따르는 공통 모드고장에 대비한 심층방호 개념도입이나 Workstation에서 운전원이 직접제어하는 Softcontrol방식의 도입에 따른 설계 구조 변화 등은 불가피한 상황이다. 아울러 공정제어시스템에 새로 도입되는 Grouping에 의한 다중제어방식채택 및 G/C, L/C에 의한 분산제어 방식도입도 새로운 설계 개념이다. 향후 차세대원전 공정제어시스템의 설계 최적화를 위해 개발되는 설계 개선 내용을 Prototype을 통해 검증, 보완해 나갈 예정이며 이를 통해 신뢰성과 효율성이 향상된 제어시스템 구현이 가능할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] 한국전력공사 영광원전훈련센터, "표준경수로 계통설비(하)", Rev.0, pp.34-40, 1996.4
- [2] 원전 DCS 설계 기준서 개발, EPRI URD CH.10, 1996.9
- [3] National Instruments, Lookout Process Control Software System, 1996. 5
- [4] 양승권, "차세대 I&C P-CCS 기능 및 설계 특성 연구보고서", KEPRI Technical Memo, 1-44, 1997
- [5] KEPRI, 차세대 원자로 기술개발(II) Development of Software Verification and Validation(V/Technique & Quantitative Evaluation Methodology of Digital I&C System, pp.33-37, 1996.7