

원자력 발전소 1차계통 계측제어시스템의 디지털화에 관한 연구

° 박 종범*, 양 승권*, 조 황**
 *한국전력공사 전력연구원 **광운대학교 제어계측공학과

**Study on Digitalization of Nuclear Steam Supply System
 in Korea Nuclear Power Plant**

° Jong Beom Park*, Seung Kwon Yang*, Whang Cho**
 *Korea Electric Power Research Institute **Control & Instruments Eng., Kwangwoon Univ

Abstract - Analog I&C hardwares in most of nuclear power plants in operation are aging since they were installed 1950's or 1960's. Thus, the replacement of such systems with digital computer-based systems is currently a new trend in nuclear area. This paper will discuss such transition occurring in nuclear I&C area. Comparative study on the digital technique adopted in leading nuclear industries. Its advantage and performance evaluation will be illustrated as well.

1. 서 론

국내의 원자력 발전소는 물론이고 대부분의 원전은 원자로를 감시하고 제어하는 시스템들이 50년대 후반부터 60년대의 제어계측 기술을 바탕으로 개발하였으나 새로운 원전에 대한 개발 욕구가 없었던 관계로 기술의 개선이 없어왔다. 그러나 일반 산업계에서는 디지털 제어시스템의 적용이 일반화 되어 있고 그 범위가 급속도로 확장되고 있으며 원자력 산업계에서는 비안전계통을 중심으로 사용범위를 서서히 넓히고 있다. 원자력 선진국인 미국과 프랑스에서는 기존 원전의 인간공학적 운전성과 유지보수성 등을 획기적으로 개선할 수 있는 개량형(Advanced) 원전 개발을 80년대초부터 수행해오고 있다. 개량형 원전 설계 특징중 가장 중요한 분야는 디지털 기술을 이용한 인간공학적 정보 제고와 디지털 제어 시스템 및 통신망을 이용한 통합화이다. 개량형 원전중 가장 최근에 추진되고 있고 국내에서 개발중인 차세대 원전은 92년 12월부터 1단계 개념 설계에 이어 95년 1월부터 2단계 기본 설계를 수행중에 있으며, 한국표준형 원자로 제어 기술 기반이 아날로그인데 비해 차세대 원자로로는 전체가 디지털 기술과 데이터 통신망을 기반 기술로 하고 있다.

본 논문에서는 기존 원전에서의 아날로그 시스템의 문제점과 디지털화하였을 때의 장점, 디지털 평가 방법 및 선진 원자력 발전소의 디지털화의 추세에 대해서 논의하고자 한다.

2. 본 론

2.1 원전에서의 아날로그와 디지털의 비교

원자력발전소 1차계통의 계측제어 설비들이 개선되어야 할 필요성을 크게 나누면 두가지로 나눌 수 있다. 첫째는 기존 아날로그 장비와 설비들의 노후화로 인해 교체부품과 장비들의 부족 문제가 발생하며, 원전산업의 정체로 인해 품질 보증된 필수 부품의 생산 중단되어 가고 있으며 기기의 수명 연한이 타 분야의 부품보다 길기 때문에 교체 부품의 공급 부족으로 인한 발전소 운전과 신뢰도에 심각한 문제를 주고 있다. 둘째는 50년대지 60년대에 설계된 아날로그 부품들은 기능이 우수하지

못하므로 시험과 보수시에 많은 시간과 인력이 투입되어야 한다. 그렇지 못할 경우에는 발전소 전체의 이용률과 신뢰도를 저하시키고 있다. 90년도의 미국의 운영자료에 의하면 전체 740번의 장치중 전기적 문제가 246번(33%), 계측의 문제가 88번(12%), 제어시스템의 문제가 66번(9%)으로 나타났다. 모두 종합하면 전체 발전장치중 53%를 차지하며 이는 발전정지의 반 이상을 차지한다.

디지털 시스템의 채택을 통해 기존 아날로그 시스템의 문제점들을 해결함과 동시에 많은 잇점들을 활용할 수 있다. 디지털화 하였을 때의 장점들을 서술하면 다음과 같다. 첫째로는 자체 진단 기능들을 통해 보다 신뢰성 있는 제어가 가능하며, 이는 시험 및 보수로 인한 발전정지를 줄이고 또한 보수 인력수를 줄일 수 있으므로 이 용률을 향상시킬 수 있다. 둘째로는 복잡한 기능을 제어할 수 있다. 따라서 시간이 많이 걸리는 수동운전들을 자동운전으로 대체할 수 있고 이에 따른 효과는 운전원의 인적실수로 인한 불시정지를 낮출수 있다. 셋째는 부품을 모듈화된 프로세스로 대체함으로써 노후화문제를 해결할 수 있고, 소프트웨어를 활용하는 마이크로 프로세서들은 교체가 용이하고 설계가 모듈화 되어 있으므로 기술의 발전에 따른 설계변경이 용이하다. 넷째로는 복잡한 시스템을 간단하게 축소하고 시스템의 용적을 줄일 수 있으며 계통 설계를 체계화 함으로써 케이블 사용 길이를 줄이게 되고 보다 경제적인 계측제어 시스템을 만들 수 있고 신호전달 체계의 신호 오차가 적고 다중 신호전달체계를 이용할 수 있으므로 잘 분석된 상태 정보들을 제어실에 제공할 수 있다. 이와 같은 장점들을 이용하여 이미 2차계통 및 비보호계통에서는 적용하고 있으며 실제로 운전원에게 많은 도움을 제공하고 있다. 다음 표1은 현재 원전의 계측제어계통의 설계 경향을 나타내고 있다

표1. 계측제어 설계 경향

구 분	과 거	현 재
계 통 구 성	중앙제어 방식	분산제어 방식
신 호 처 리	아날로그 방식	디지털 방식
논리회로구성	Solid State Logic	Computer Logic
시험 및 보수	주기적 수동점검	주기적 자동점검
정 보 지 시	아날로그 지시계	디지털 지시계
회 로 설 계	개별계통설계	표준화된 모듈설계

2.2. 디지털 시스템 평가 방법

모든 원자력발전소의 규제는 50년대지 60년대에 설계된 아날로그를 중심으로 규정들이 만들어져 있어 디지털 시스템에 적용하려면 아래에 열거하는 평가원칙들을 만족하게 설계되어야 한다.

- 1) 디지털 제어 시스템은 활용할 때 소프트웨어의 성능이 시스템의 성격을 좌우하게 될 것이므로 소프트웨어는 가능한 최고의 품질이 보증되어야 한다. 품질기준, 사양, 시험평가방법등이 확립되었을때 개발한 소프트웨어를 검증한 다음에 사용되어야 한다.
 - 2) 디지털 제어계측 부품은 입증되지 않은 기능이 추가되지 않도록 설계하여 다 산업에서 많이 사용되는 상용부품을 사용할 수 있도록 설계하여야 하며 이는 개발 및 조달 비용을 줄이고 설계 보증성을 높이기 위함이다.
 - 3) 원자력발전소 공급회사간에 기본 부품의 표준화를 지기되 소프트웨어와 경제조건들을 변경함으로써 원하는 기능을 갖게하며 기능적으로 소프트웨어도 표준화하여 기술을 공유한다.
 - 4) 제어계측은 단순 반복적 작업은 자동화하고, 운전원의 인적실수로 인한 오동작으로 사고로 파급되지 않도록 고장극복(Fault Tolerant)개념을 도입하여야 한다.
 - 5) 디지털 시스템은 원자로 운전자에게 운전전에 필요한 상황과 정보를 제공하도록 설계되어야 한다.
 - 6) 신기술의 도입으로 발전소를 콤팩트(Compact)하게 설계되어야 한다.
 - 7) 개발된 제어계측 시스템의 설계 개념은 기존 원전과 개발된 원전에 적용 가능하도록 설계변경에 따른 인허가 문제가 없어야 한다.
- 위에서 열거한 것들 보다도 더 많은 평가와 규제가 있으며 이러한 평가와 규제를 만족시키지 못하면 설계한 것들을 적용할 수 없다. 다음 표2는 개발 단계를 개략적으로 나누고, 그 특징을 나타낸 것이다.

표2. 세대별 분류

단 계	주제어실 설계	제어 및 보호계통설계	비 고
제 1세대	전통적인 계기 배열	아나로그 시스템	과거의 원전설계
제 2세대	보조적인컴퓨터 감시화면 주 계기감시, 조작 장치는 아나로그	일부장치는 디지털 시스템	월성 1호기
제 3세대	주제어실 디스플레이를 컴퓨터 화면화 제어조작 장치는 아나로그	디지털 제어계통 아나로그 보호계통안전계통의 디지털 시험기능 부분적 다중신호전달체제	프랑스 일부 CANDU 일본일부
제 4세대	완전 컴퓨터화된 감시화면과 제어 조작	디지털 제어 보호계통 다중신호전달체제	System 80+ AP-600 N4

2.3 세계 원전 디지털 시스템 적용현황

2.3.1 미국의 경우

일반 산업계에서 디지털화 기술의 보급은 다른 나라에 비하여 선구자적인 위치에 있었음에도 불구하고 원자력발전소 설계분야에 디지털 컴퓨터가 최초로 도입된 것은 70년대 후반에 Combustion Engineering(CE) 사에 의해 개발된 Arkansas Nuclear One 원전 2호기(ANO-2)에 적용된 노심보호연산기(Core Protection Calculator System)이다. 이 노심보호연산기(CPCS)는 원전 설계 안전성 측면에서 미국 원자력 산업계 뿐 아니라 세계 원자력 산업계의 최대 관심사였다. 미국의 원자력규제위원회(NRC)에서는 약 3년에 걸친 심사를 수행하여 그 성능의 우수함을 입증하였다. 이를 계기로 미국 원자력 산업계는 원자력발전소의 설계분야에 디지

털화를 적극적으로 채택하게 되었다.

이를 계기로 80년대 초반부터 거론되기 시작한 차세대 원자력발전소 설계는 미국 내 대부분의 원자력발전소 설계사가 발전소 제어계통 및 보호계통 구성을 전산화하는 방향으로 설계를 추진중에 있다. C-E사의 차세대 원전 모델인 Nuplex 80+ 설계의 경우 완전 전산화된 계통 설계를 개발 완료하여 원자력규제위원회의 설계인증을 취득하였으며, Westinghouse 사에서도 이와 유사한 개념의 Eagle 21이라는 종합화된 디지털 제어 및 보호계통을 개발하여 설계인증을 취득한 바 있다. 이러한 원전 사업자들의 디지털 계통설계 움직임에 대응하여 원자력규제위원회에서는 안전관련 디지털 컴퓨터의 규제지침 Reg. Guide 1.152를 제정하였다.

2.3.2 캐나다의 경우

CANDU 원전의 설계개념은 초기 모델부터 컴퓨터 제어개념에 의한 계통 설계를 추진하여 왔으나 안전기능을 수행하는 계통의 디지털화는 80년대 초기 CANDU 600 원전에 적용된 PDC(Programmable Digital Comparator)계통이 최초라 할 수 있다. PDC의 기능은 각종 원자로 운전변수를 감시하여 사전에 설정된 안전운전 제한치를 초과시 원자로 정지 및 각종 안전장치의 구동신호를 발생시키는 것으로 2개의 독립적인 원자로 정지계통 즉, SDS-1과 SDS-2에 각각 설치되어 있다.

이후 Ontario Hydro사에서는 원자로 정지계통 설계를 보다 개선하여 원자로 정지 기능 이외에도 자체 시험 및 고장 진단기능, 운전상태 지시기능 등을 보장하여 90년대 초에 Darlington 원전에 설치하여 현재까지 운전중에 있다. 그러나 이후 원자로 안전계통의 설계는 다양성 설계(Diversity Design) 개념이 적용되어야 한다는 점과 컴퓨터 소프트웨어의 공통모드고장(Common Mode Fail)을 방지하기 위한 설계과정의 품질보증활동이 강화되어야 한다는 내용의 새로운 규제요건을 제정하게 되었다.

2.3.3 프랑스의 경우

60년대 초에 프랑스 원전인 개스냉각원자로(GCR)의 경우 제어계통 설계시 이미 디지털 제어계통 설계가 도입된 바 있으나, 현재 주종을 이루고 있는 가압경수형(PWR) 원전의 경우는 80년대 중반 Merlin-Gerin 사에 의해 개발된 디지털 원자로 계측 및 보호계통의 설계 적용이 최초라 할 수 있다. 이 계통의 주요기능은 원자로심과 1차냉각계통의 운전변수를 신호처리하여 필요시 원자로를 긴급 정지 시키기 위한 신호를 발생시키는 1E Class 보호계통으로 1300MWe급 원자력발전소 설계에 채택되어 현재 20기의 운전에서 사용되고 있다.

2.3.4 영국의 경우

기존 발전소의 노후화된 아나로그 시스템의 대체로서 적용한 경험이 있고 전체적인 규모로는 현재 상업운전중인 Sizewell B 원자력발전소에 제어실을 제외한 부분에 완전한 디지털 분산제어 시스템을 처음으로 적용하고 있으며, 제어실은 재래식 아나로그 시스템과 병용되고 있다.

영국 원자력 산업계에서는 그동안 건설, 운전 되어오던 개스냉각 방식의 원자력발전소를 지양하고 새로운 차세대 대형 원전의 모델로서 가압경수형 원전을 채택하였으며 Sizewell B 원전은 영국 최초의 가압경수형 원전이였다. 따라서 영국의 원자력 규제기관인 NII(Nuclear Installation Inspectorate)에서는 1979년에 디지털 계통설계에 대비한 안전성 평가원칙을 제정한 바 있으며 이를 통하여 원전사고로 인한 방사선 대량누출 가능성은 10^{-7} /Reactor Year 이하로 유지할 것과 발전소 보호계통의 고장확률은 10^{-7} failure/demand 이하로 유지할 것을 가압경수형 원전의 규제기준으로 설정한 바 있다.

또한 보호계통 구성은 중복성(Redundancy)과 다양성(Diversity) 원칙에 따라 설계하고 단일 채널의 고장확률은 10^{-4} failure/demand 이하로 설계할 것을 요구하였다.

2.3.5 일본의 경우

세계 전자 산업계에서 선두 주자로 알려진 일본의 경우에도 원자력 발전소 설계에 디지털 기술을 적용하는 문제는 매우 신중하고 보수적인 자세를 취하여 왔다. 그러나 80년대 초반부터 원전 불시정지의 주요 원인이 노후화된 아날로그 계측제어 설비에 기인한다는 여론이 증대됨에 따라 당시 산업계에 보편화 되어 있던 전산화 계통(Microprocessor Based System) 설계를 원전 제어 계통에 적용하기 위한 연구에 본격적으로 착수하게 되었다. 이에 따라 일본 원자력 산업계에서 최초로 디지털 제어계통의 적용된 원전은 1990년 상업운전을 개시한 Kashiwazaki-Kariwa 원전 2호기로서 이는 Ohi-2, 3 호기 등과 같은 후속 원전의 설계에 디지털 기술 적용영역을 점차 확대시키는 계기가 되었다. 또한, 최근 건설되어 상업운전을 준비중인 Kashiwazaki-Kariwa 원전 6, 7호기의 경우에는 발전소 제어기능 외에도 원자로 보호계통 설계를 디지털화 함으로써 일본 원전 설계의 새로운 전환점이 되고 있다.

일본 원자로 규제행정을 담당하고 있는 통산산업부에서도 이들의 기술개발 노력을 지원하고 원전설계의 안전성을 향상 시키기 위한 목적으로 관련 기술기준 즉, JEAG-4609 디지털 계통설계의 품질보증 기준과 JEAG-4101 디지털 계통 설계의 확인 및 검증기준을 새로 제정한 바 있으나 아직까지도 일본 원자력 산업계와 일본 규제기관 간에는 디지털 계통설계의 신뢰성 평가기준에 대한 이견이 조정되지 못한 상태이다.

3. 결 론

원자력 발전소에서 디지털 기술을 적용하려면 그 디지털 기술의 평가와 규제를 받도록 하여야 하며, 이미 선진 원전에서는 디지털 기술을 적용하고 있으며 기술의 발전 수준에 상응하는 인허가 및 검증 기술을 개발하고 있다.

본 논문에서는 선진 원전에서 디지털 기술의 개발과정과 평가 및 규제 방법에 대해서 논의 하였고, 앞으로 원전 계측제어시스템 디지털화 경향에 대해서 제시하였다. 현재 국내에서도 차세대원전에서 모든 계통을 디지털화 할 것이며, 또한 규제기관에서 인허가 및 검증 기술도 개발하여 나가야 할 것으로 생각된다.

(참 고 문 헌)

- [1] "Advanced Light Water Reactor Utility Requirement Document Vol.II ALWR Evolution" Plant", EPRI. 1990
- [2] "Advanced Light Water Reactor Utility Requirement Document Vol.III ALWR Evolution" Plant", EPRI.1991
- [3] "Integrated Instrumentation and Control Upgrade Plan", EPRI. 1992
- [4] "Nuplex 80" Advanced Control Complex". ABB-CE. 1993
- [5] "AP600 I&C and Control Board ", Westinghouse. 1993.
- [6] "N4The 1500Mwe PWR Nuclear Island". Framatome. 1993.
- [7] "CAN DU300 Distributed Control System", AECL. 1993.