

KNGR MMIS 구현에 따른 기술적·경제적 효과

최 일 남

한국전력기술(주) 차세대원자로사업 부책임자

인

간-기계 연계 계통(Man-Machine Interface System : MMIS)은 차세대 원자로(Korean Next Generation Reactor : KNGR) 설계에서 가장 두드러진 설계 특징 중 하나이다.

이는 MMIS가 기존의 제어실 및 제어 계통과는 완전히 다른 새로운 기술 및 설계 방법을 적용하고 있기 때문이다.

기존 원전의 제어실은 현장 계기에서 제어실 구역에 설치된 관련 캐비닛까지 하드와이어(Hard-wired) 방식으로 연결된 수많은 계측 기기, 즉 제어 스위치, 지시기, 기록계, 경보창, 자동/수동 제어반 등이 설치된 대형 벤치 보드로 구성되어 있다.

기존 원전 제어실은 수많은 발전소 상태 정보를 체계적으로 분석 및 종합하여 운전원에게 제공하지 못하고 일시에 모든 정보를 제공함으로써, 특히 발전소 비상 운전시에 운전원들이 발전소 상황을 인지하여 효율적으로 대처하는 데 어려움을 경험하였다.

또한 대부분 하드와이어 방식으로 연결한 아날로그 계기로 설치된 기존의 제어 계통에서 예비 부품의 부족으로 인한 보수 문제가 대두되고 있다. 이러한 문제점들을 해결하고 운전성·보수성 및 경제성을 향상시키기 위하여 새로운 디지털 기술이 적용된 KNGR MMIS 설계를 개발중에 있다.

착석식 워크스테이션 형태의 운전원 콘솔은 제어실 운전원에게 편리한 작업 환경을 제공하며 발전소 상태 정보를 쉽게 인지하도록 함으로써 운전성 및 신뢰성을 개선할 수 있고 인적 오류율(Human Error Rate)을 크게 감소시킬 수 있다.

또한 원격 신호 다중화 기기(Remote Signal Multiplexers)를 제어 계통에 적용한다.

제어 및 감시 신호를 광통신 데이터 링크(Fiber Optic Data Links)를 통하여 전송함으로써 많은 계측 제어 관련 케이블 수를 줄일 수 있으며, 이에 따른 케이블 가격 및 케이블 설치비를 현저히 절감할 수 있다.

KNGR MMIS 설계를 위한 접근 방법은 다음과 같이 요약된다.

① HFE 및 사용자를 위한 새로운 그래픽 연계 기술을 적용함으로써 운전원의 작업 반경, 물리적 및 인지적 업무량(Physical and Cognitive Work Loads)을 줄이는 착석식 워크스테이션 형태의 운전원 콘솔 설계

② 신뢰성·운전성 및 보수성을 향상시키는 디지털 제어 계통 및 보호 계통 설계

③ 기존의 하드와이어 연결 방식에 비하여 케이블 수, 케이블 설치비 및 설치 시간을 줄일 수 있는 원격 신호 다중화 기기 적용

④ HFE 및 안전 등급 소프트웨어의 확인 및 검증(Validation and Verification : V&V)을 포함한 최근의 인허가 요건을 만족시킬 수 있는 설계

KNGR MMIS 설계 특성

1. 주제어실

KNGR 주제어실(MCR)에는, 2대

는 서로 붙어 있고 2대는 각각 떨어진 형태로 설계된 총 4대의 착석식 워크스테이션 형태의 운전원 콘솔, 1대의 대형 표시 패널(Large Display Panel : LDP) 및 1대의 Backup 패널이 설치된다.

〈그림〉은 KNGR MCR의 개략적 배치도이다.

가. 운전원 콘솔

운전원 콘솔(Operator Console)은 CRT, 소프트 제어기(Soft Controller), 평면 패널 표시기(Flat Panel Display : FPD), 트랙 볼(Track Ball)로 구성된다.

발전소 컴퓨터 계통에 의해 구동되는 CRT들은 그래픽 계통 흐름도, 경보 표시, 발전소 안전 변수 요약 표시 및 전산화된 운전 절차서(Computerized Operating Procedures)를 운전원에게 제공하여 발전소 상태 정보를 파악하게 한다.

기존의 전용 푸시 버튼을 대신하는 소프트 제어기는 운전원에게 수동 제어 기능을 제공한다.

운전원이 한 CRT화면에서 트랙 볼(Track Ball)로써 어떤 기기를 선택하면 선택된 기기의 제어판(Control Template)이 소프트 제어기에 표시되고, 운전원이 소프트 제어기 평면 패널 표시기에서 제어판을 터치한 후 소프트 제어기 옆에 설치된 확인 버튼을 누름으로써 제어를 수행할 수 있다.

CRT 위에 설치된 FPD는 사고 후

감시 지시 및 주요 변수 추이 표시용으로 사용된다.

이들 FPD들은 USNRC R.G.-1.97을 따름으로써 품질 보증된다.

운전원 콘솔은 NUREG-0711, -5908, -0700 Rev. 1에서 지시된 인간 공학(Human Factors Engineering : HFE) 원리에 따라 설계된다.

최근의 한국인 표준 체형치가 운전원 콘솔 설계시 사용된다.

발전소 정상 운전시에는 동일한 운전 기능을 가진 2대의 제어용 워크스테이션에서 운전이 수행된다.

운전 편이성 및 업무량 분산을 위하여 1대의 운전원 콘솔은 원자로 운전원(RO)에게, 다른 운전원 콘솔은 터빈 운전원(TO)에게 할당된다.

발전소 상태 감시용으로만 사용되는 또 다른 2대의 운전원 콘솔은 각각 CRS(Control Room Supervisor) 및 STA(Shift Technical Advisor)용으로 할당된다.

이들 운전원 콘솔들은 발전소의 정상 운전 및 비정상 운전에 사용된다.

RO와 TO에 지정된 2대의 제어용 워크스테이션이 고장(Malfunction)일 경우 발전소 상태 감시용으로 CRS와 STA에 할당된 콘솔이 RO와 TO에 의하여 제어 기능이 수행될 수 있도록 전환된다.

또한 5번째의 정보 콘솔이 발전소 비상 운전시 사고 해석용으로 제공되며 기술지원실 내에 설치된다.

MCR에 설치된 4개의 운전원 콘솔로써 발전소를 운전하거나 감시할 수 있다.

운전원 콘솔의 운전 상태는 다음과 같이 정해질 수 있다.

- ① 운전 상태 1 : 감시 및 제어 운전
- ② 운전 상태 2 : 감시 및 대화(Dialog) 운전
- ③ 운전 상태 3 : 감시 운전

제어실 중앙에 나란히 붙여진 2개의 운전원 콘솔에는 계통 구동 수준인 공학적 안전 설비 구동 및 원자로 정지 스위치가 설치되며 운전 상태 1로 지정된다.

CRS 및 STA가 사용하는 3번째 및 4번째의 콘솔은 운전 상태 2로 지정된다.

기술지원실에 설치되는 5번째의 콘솔은 운전 상태 3으로 지정된다.

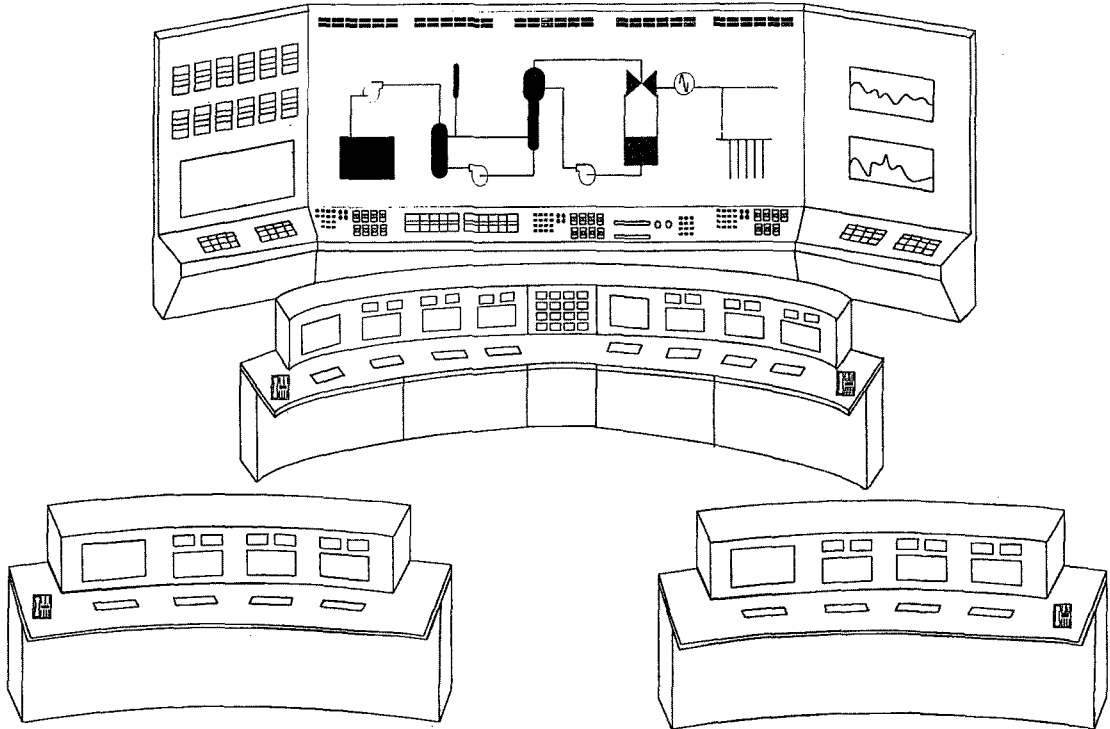
이들 콘솔들은 착석식 운전 형태로 설계되며, 표시 및 대화(Dialog)용 장비들은 적당한 위치에 설치된다.

나. 대형 표시 패널

대형 표시 패널(LDP)은 운전원 콘솔 전면의 MCR 벽면에 설치되며 발전소 운전 및 안전에 관한 전반적인 상태 정보를 MCR 운전원에게 상시 제공한다.

LDP 중앙에는 계통 흐름도, 주요 기기의 상태 및 변수 지시가 포함된 발전소 개관(Overview)을 제공하는 Mimic이 설치된다.

주요 기기의 상태 및 변수 지시는



〈그림〉 KNGR 주제어실 구성 개념도

발전소 컴퓨터 계통으로부터 전송된다.

LDP 상부의 고정된 전용 공간에서 계통상의 이상을 경보하는 계통 경보가 위치한다.

이들 계통 경보는 MCR 운전원들에게 발전소 비정상 상태 정보를 즉시 제공한다.

상세한 경보 정보는 각 운전원 콘솔에 위치한 CRT에서 제공된다.

또한 필수 안전 기능 상태 정보 및 주요 변수 추이 표시 정보가 LDP에서 제공된다.

다. Backup 패널

Backup 패널(Pannel)은 운전원 콘솔 전면 LDP 아래쪽에 붙여 설치된다.

Backup 패널에는 안전 계통들을 수동으로 구동할 수 있는 각각의 안전 관련 제어 기능이 제공된다.

따라서 4대의 운전원 콘솔이 모두 고장일 경우에도 Backup 패널을 통하여 MCR 운전원은 발전소를 안전한 상태로 유지하거나 사고를 완화시킬 수 있다.

2. 제어 계통 설계 특성

KNGR 제어 계통은 최신의 디지털 제어 기술을 전반적으로 적용하여 계통의 기능성·신뢰성·보수성 및 경제성을 향상시키도록 설계된다.

제어 계통은 안전 제어 계통 및 비안전 제어 계통으로 구성되며, 공통 원인 고장(Common Mode Failure)을 방지하기 위하여 안전용 및 비안전용의 하드웨어와 소프트웨어가 구별되어 사용된다.

On-Off 및 조절 제어 계통, NSSS 제어 계통, BOP 및 T/G 제어 계통

은 안전 제어 및 비안전 제어를 위하여 다양성 설계 개념이 적용된 두 종류의 PLC 계통으로 표준화된다.

제어 계통 설계 특성은 다음과 같이 요약된다.

① 안전 및 비안전 신호 입·출력 처리를 위하여 현장용 원격 신호 다중화 기기를 사용하며 PLC를 기본으로 한 분산형 제어 계통

② 공통 원인 고장을 방지하기 위하여 안전 제어용 및 비안전 제어용 각각의 서로 다른 하드웨어 및 소프트웨어를 사용한 두 종류의 PLC 계통으로 구성되며 다양성 개념이 적용된 계통 구조

③ 계통의 처리 능력(Throughput) 요건, 신뢰성 요건 및 공통 원인 고장 요건들을 만족하는 개방형(Open) 데이터 통신망

④ 제어 카드 수 및 제어 캐비닛 수를 감소시키는 다중 루프 제어 구조

⑤ 안전성 및 이용률에 중요한 제어 루프들에는 이중화된 제어기

⑥ 자동 자기 진단 기능 및 Tech. Spec.의 정기 점검 기능(Surveillance Function)

⑦ 다중 루프 제어 구조를 지원하기 위한 구획화된(Segmented) 제어 계통 구성

KNGR MCR 및 제어 계통의 설계 특성과 국내의 다른 원자력발전소의 계측 제어 계통 설계 특성 비교는 <표>와 같다.

기술적 효과

1. MCR

KNGR MMIS 설계시 전범위의 인간 공학(Full Scale HFE) 업무가 수행된다.

운전원들의 업무량을 분석하고 정상 및 비상 운전시 업무량을 적절히 지원하도록 MMIS가 설계되기 위하여 기능 분석, 업무 분석, 인간 신뢰도 분석, 운전 경험 검토·확인 및 검증 등의 여러 가지 HFE 활동이 MMIS 설계와 병행하여 수행될 것이다.

NUREG-0711 및 NUREG-0700 Rev.1은 MMIS 설계시 HFE를 위한 주요한 설계 지침이다.

예비 MCR의 적합성 분석을 위하여 동적 모형(Dynamic Mock-up)을 개발하며, MCR 및 KNGR 계통 설계가 확정된 후 MCR의 확인 및 검증을 위하여 전범위 모의 제어반(Full Scope Engineering Simulator)을 설치할 것이다.

확인 및 검증은 전범위 모의 제어반을 사용하여 운전원들을 실제 운전 위치에 배치하여 기동 운전, 정상 운전 및 비정상 운전을 수행함으로써 이루어진다.

운전원들의 업무량 및 지적 사항들(Comments)을 분석하여 최종 MGR 설계에 반영할 것이다.

착석식 워크스테이션 형태의 MCR 설계에서 수행된 HFE 업무

수행 결과는 다음과 같이 기대된다.

가. 물리적 작업 부하 감소

MCR 운전원들은 운전원 콘솔에 착석하여 발전소 운전을 수행하기 때문에, 작업 반경은 기존의 MCR에 설치된 벤치 보드에서의 서서 걸어나는 운전(Walking around Operation)에 비하여 크게 감소될 수 있다.

나. 인지적 작업 부하 감소

운전원 콘솔에 설치된 CRT에는 전산화된 운전 절차서가 구현되기 때문에 운전원들은 기존의 책(Hard Copy) 형태의 운전 절차서에서 절차를 기억하고 찾는 행위가 필요하지 않으므로 운전원의 편이성이 크게 향상된다.

경보가 발생한 경우에 한 CRT에 관련 경보에 대한 절차들이 표시된다.

또한 그 경보를 완화하는 데 필요한 기기들도 경보 절차들과 함께 표시되어 운전원들이 트랙 볼과 소프트웨어를 사용하여 관련 기기를 선택하여 운전할 수 있다.

다. 인적 오류율 감소

인적 오류는 원자로 정지 및 원전 사고의 주요한 원인들 중 하나이다.

CRT 및 LDP에서 표시되는 체계화된 정보 표시와 운전원 지원 설비, 예를 들면 전산화된 운전 절차서, 주요 기능(Critical Function) 감시 계통, 성공 경로(Success Path) 감시 계통은 특히 발전소 비상시 운전원들의 업무량을 상당히 감소시킬 수 있다.

(표) 국내 PWR 계속 제어 계통 설계와 KNGR MMIS 설계 비교

발전소		운전중인 PWRs	한국형 표준 원전 (울진 3·4호기)	KNGR	
MCR	MCB 구조	벤치 보드	벤치 보드	착석식 워크스테이션 형태의 운전원 콘솔	
	기록계	펜 잉크 형태	도트 프린트 형태	CRT 및 FPD	
	지시기	아날로그 칩 형태	LED바 그래프 형태	CRT 및 FPD	
	On-Off 스위치	기존의 On-Off 스위치	기존의 On-Off 스위치	소프트 제어기	
	수동/자동 제어반	아날로그 형태	LED바 그래프 형태	소프트 제어기	
	경보창	경보창	기존의 경보창	기존의 경보창	CRT 및 LDP상의 계통 구동 경보 타일
		논 리	전자-기계식 혹은 반도체 릴레이*	마이크로프로세서를 기본으로 한 디지털 계통(독자 설계)	마이크로프로세서를 기본으로 한 디지털 계통(발전소 컴퓨터 계통과 통합)
Mimics		MCB Mimic	MCB Mimic	LDP Mimic	
제어 계통	제어기	On-Off 제어	전자-기계식 혹은 반도체 릴레이*	마이크로프로세서를 기본으로 한 디지털 제어기(다중 루프 제어)	
		조절 제어	전자식 아날로그 PID 제어기*	제어기(각각의 전용 제어)	
	원격 신호 다중화 기기	비적용	비안전계통 적용 서로 다른 NSSS,	안전 및 비안전 계통 적용	
계통 표준화		서로 다른 NSSS, BOP 및 T/G 제어 계통	BOP 및 T/G 제어 계통	표준화 및 동일한 형태의 NSSS, BOP 및 T/G 제어 계통	

주 : * 영광 3·4호기에는 마이크로프로세서를 기본으로 한 경보 계통 및 각각의 전용 디지털 제어 계통이 적용됨.

2. 제어 계통

PLC를 기본으로 한 분산형 디지털 제어 계통은 다음과 같이 원자력 발전소의 신뢰성, 이용률, 운전 및 보수 수시 편의성을 향상시킨다.

가. 신뢰성 및 이용률 향상

적절히 구획화된 다중 루프 제어 구조는 기존의 단일 루프 제어 계통에 비하여 훨씬 적은 수의 제어 카드 및 캐비닛을 필요로 한다.

이 때문에 고장(Malfunctions) 원인들이 줄일 수 있으며 평균 고장 간격(Mean Time Between Failures : MTBF)을 늘릴 수 있다.

정상 운전 동안 주기적으로 수동으로 수행되는 정기 점검은 부주의로 인한 원자로 정지를 야기하는 주요한 원인이 되었기 때문에 운영 기술 지침서의 정기 점검 시험을 자동화함으로써 수동 시험에 따른 인적 오류를

크게 감소시킬 수 있다.

또한 소프트웨어에 의해서 수행되는 자동 자기 진단 기능도 계통 고장을 감소시킬 수 있으며 운전원에게 고장 발생 위치 및 고장 상세 내역을 통보할 수 있으므로 평균 수리 시간(Mean Time To Repair : MTTR)을 줄일 수 있다.

증가된 MTBF와 감소된 MTTR은 발전소 이용률을 증가시킨다.

나. 보수 감소

구획화된 다중 루프 제어기 및 저열 발생 전자 기기(Low Heat Generating Electronics)를 사용함으로써 줄어든 제어 카드 수 및 전자 부품 수는 고장의 발생 원인을 그만큼 감소시키므로 제어 계통 보수의 필요성이 감소될 수 있다.

경제적 효과

1. 케이블 가격 절감

현장 계기에서 주제어실 근처에 위치한 제어 캐비닛까지 설치된 기존 원자력발전소의 계측 제어용 케이블은 KNGR에서는 소량의 광통신 케이블과 안전 및 비안전 계통 모두에 적용된 현장용 원격 신호 다중화 기기들로 대체된다.

또한 케이블 트레이, 전선로, 단자 접속 및 케이블 설치 작업 시간이 크게 절감될 수 있다.

케이블 절감 예비 검토에 의하면 50% 이상의 계측 제어용 케이블과

30% 이상의 케이블 트레이 및 단자 접속이 절감되는 것으로 예상되었다.

2. 건설 공기 단축

다중 루프 제어기, 착석식 워크스테이션 형태의 운전원 콘솔, 원격 신호 다중화 기기를 사용함으로써 MCR 크기, 전자 기기실(Electrical Equipment Room)의 크기, 제어용 캐비닛 수가 크게 감소된다.

따라서 패널 및 케이블 설치 작업, 케이블 포설 및 단자 접속 작업에 요구되는 시간이 상당히 감소될 수 있으므로 발전소 건설 주공정(Plant Construction Critical Path)에서 케이블 관련 업무가 감소된다.

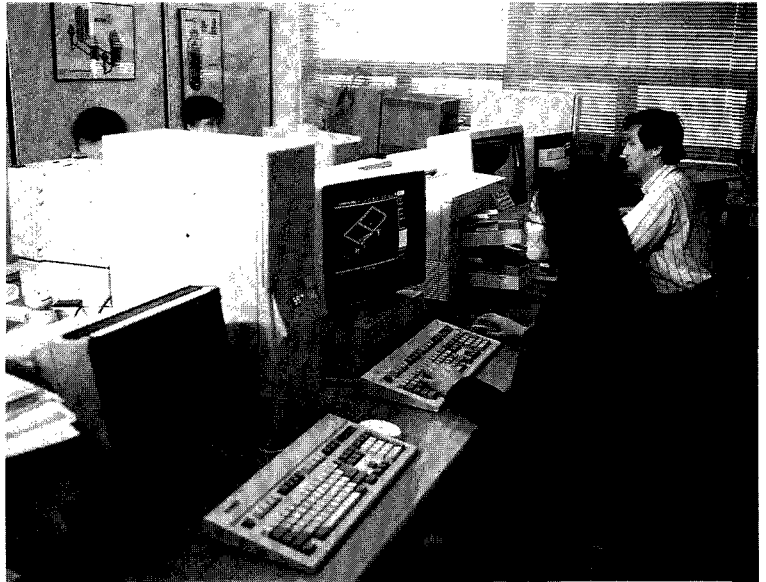
또한 MMIS는 공장에서 원전 조립 및 시험이 수행되므로 선적 전에 제어 기능 및 통신 기능이 보장된다.

이 때문에 현장의 예비 시운전 시험 및 관련 업무가 감소된다.

KNGR 건설 공기는 한국형 표준 원전(KSNP)의 건설 공기보다 더 단축시킬 것을 목표로 하고 있는데, 이는 상기에서 기술된 설치 및 시험 관련 업무의 감소 요소들에 의하여 건설 공기의 단축을 가능하게 한다.

3. 운전성 및 보수성에 의한 절감

기존의 원자력발전소에 사용된 다양한 종류의 계측 제어 기기들과는 다르게 MMIS는 발전소 전체에 걸쳐 표준화되며, Compact한 구조로 설계되므로 예비 부품, 보수 훈련비, 보



원자로 계통 설계. MMIS는 기존의 제어실 및 제어 계통과는 완전히 다른 새로운 기술 및 설계 방법을 적용하고 있기 때문에 KNGR 설계에서 가장 두드러진 설계 특징 중의 하나이다.

수 인원 수를 줄일 수 있다.

자동 자기 진단 기능, 자동화된 Tech. Spec.의 정기 점검 주기 시험, 증가된 MTBF와 감소된 MTTR, MCR 운전원 콘솔의 개선된 운전성 및 편이성으로 인하여 발전소의 신뢰성 및 이용률을 크게 증진시킬 수 있다.

결론

KNGR은 기존의 원자력발전소에 비하여 안전성 및 경제성을 증진시킬 것을 목표로 하여 설계중에 있다.

KNGR MMIS에 사용된 디지털 기술은 사용자들에게 친근하고 편리한 MCR 환경과 신뢰성 있고 크기가

축소된 제어 계통을 제공한다.

이와 같은 MMIS 설계 특성은 발전소 총 건설비 및 공기를 상당히 감소시킬 수 있다.

새로이 개발된 디지털 MMIS 설계는 최근의 원자력 규제 요건, 특히 안전 계통에의 소프트웨어 적용을 위해 규제 요건을 만족하는 것이 요구된다.

따라서 체계화된 소프트웨어 개발 계획 작성, 문서화, 설계, 시험, 확인 및 검증을 통하여 신뢰성 있는 소프트웨어가 되도록 할 것이다.

MMIS 설계는 KNGR의 안전 목표 및 경제성을 확실히 향상시킬 것이다. ☞