

차세대원전의 지시 및 경보계통 개발 The Qualified Indication and Alarm System Development for Korean Next Generation Reactor

신재철, 김우근, 백광일, 한재복
한국전력기술(주)
대전광역시 유성구 덕진동 150

신영철, 오응세
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

차세대원전의 지시 및 경보계통은 안전관련 발전소 정보를 감시하고 발전소의 비정상시에는 운전원이 조치해야할 우선 순위에 따른 경보를 발생시킨다. 개선된 차세대원전의 운전개념을 지원하기 위해 개발된 지시 및 경보계통은 한국형표준원전과 다른 새로운 설계 특성을 적용하고 있으므로 프로토타입 개발을 통하여 변경된 설계 사항에 대하여 성능 검증 및 확인 작업이 필요하다. 본 논문에서는 차세대원자로기술개발 2단계에서 개발된 지시 및 경보계통의 설계 내용과 기능을 설명하고, 관련 기능 요건과 성능을 검증하기 위해 개발된 프로토타입에 대하여 기술하였다.

Abstract

The Qualified Indication and Alarm System(QIAS) for Korean Next Generation Reactor (KNGR) monitors the safety related plant parameters to be used by operators during both normal operation and accidents and provides prioritized alarms to operator during abnormal condition. To support the improved operation concept of the KNGR, the QIAS design needs verification and validation through prototype development because the design concept of QIAS for KNGR differs from the Korean Standard Nuclear Power Plant(KSNP) in many respects. This paper explains the design concept and functional characteristics of the QIAS and describes the prototype activities which are developed to verify the functional requirements and performance of the QIAS.

1. 서론

한국형 표준원자력발전소는 많은 경보창, 지시기 및 기록계를 통하여 동일한 정보를 다중으로 표시하고 있어 사고시 운전원이 신속한 조치를 필요로 할 때 혼란이 야기될 수 있다. 이것은 제공되는 정보가 중복적으로 산재되어 있고, 경보의 우선 순위가 없으며, 발전소의 상태를 고려한 부적절한 경보제거 단계가 없어 발전소 상태파악에 운전원의 판단이 많이 개입되어야 하므로 인적 오류의 가능성이 있다. 또한, 아날로그 지시계의 사용으로 인해 정보의 신뢰도가 다소 떨어질 수 있으며, 종합적인 정보 분석에도 어려움이 있다. 이러한 단점은 발전소의 안전운전 및 안전한 상태유지에 나쁜 영향을 끼칠 수 있으므로 디지털 계통을 이용한 정보표시체계를 채택하여 운전원

의 편의성을 최대한 고려할 것이 요구되고 있다[1]. 국내에서도 이를 극복할 수 있는 주제어실을 설계하여 차세대원전에 적용할 필요가 있다[2]. 본 논문에서는 차세대 2단계에서 설계된 지시 및 경보계통의 설계요건과 구조 및 필수기능을 기술하고, 관련된 요건과 기능을 검증하기 위한 프로토타입 개발 내용에 대하여 소개한다.

2. 본론

2.1 개선된 차세대원전 주제어실의 정보표시 및 경보계통 구조

차세대원전의 주제어실에서는 디지털 방식의 신호처리 및 정보제시, 다중구조의 통신망사용, 통합된 정보표시구조의 사용 등을 반영한 주제어실 구조를 채택하였다. 차세대원전의 정보표시체계는 주제어실 중앙벽의 대형정보표시판(Large Display Panel: LDP), 운전원작업대의 Cathode Ray Tube(CRT), 그리고 Safety Console의 평판형표시장치(Flat Panel Display: FPD)등으로 구성된다. 이 지시장치들은 각각 정보처리계통(Information Processing System: IPS)과 지시 및 경보계통(Qualified Indication and Alarm System: QIAS)에 의해 처리된 정보를 제공받아 표시한다.

정보처리계통은 대형정보표시판의 경보창과 운전원작업대의 CRT에 정보를 제공하나 지진 발생 시 기능을 유지하지 못한다. 지시 및 경보계통은 안전관련 발전소정보를 처리하고 발전소의 정지와 관련된 높은 우선 순위의 경보를 발생시키는 계통으로써 정보처리계통의 고장시에도 운전원작업대의 CRT와 대형정보표시판에 변수값과 경보정보를 계속 제공할 수 있도록 정보처리계통과 다른 하드웨어와 소프트웨어를 사용하여 구현되며, 발전소 정지기준지진에 견딜 수 있도록 내진 설계된다.

2.2 지시 및 경보계통의 기능과 구조

가) 기능

지시 및 경보계통은 사고후 감시계측(PAMI) 변수와 발전소의 출력운전 및 안전유지에 중요한 변수에 대하여 신호검증을 수행하여 중복된 유사정보 대신 신뢰성 있는 대표값을 운전원에게 제공하여 운전원 부담을 최소화하며, 검증된 대표값에 대하여 발전소의 상태를 고려하여 경보를 결정함으로써 불필요한 경보의 수를 줄이고, 발생된 경보의 중요도를 함께 평가하여 경보의 신뢰도를 높임으로써 운전원의 운전편의성을 극대화한다. 아울러, 정보처리계통이 고장날 경우 운전원작업대의 CRT에 정보를 제공하여 일정한 시간동안 지속적인 운전이 가능하도록 한다.

사고후 감시계측 범주 1 변수들은[3] 실패선을 통해 입력을 받아서 아날로그신호를 디지털 신호로 바꾼 후 공학단위로 변환하여 안전콘솔의 FPD에 연속적으로 지시하여 필요시 발전소를 안전하게 정지시킬 수 있는 최소한의 정보를 제공한다.

나) 구조

1) 하드웨어

지시 및 경보계통의 QIAS-P 채널은 QIAS-P 프로세서와 Display Generator(DG)로 구성되며 QIAS-N 채널은 Segment Processor(SP)와 DG로 구성된다. 지시 및 경보계통은 주제어실 정보계통의 신뢰도를 보장하기 위해 하드웨어와 컴퓨터 운영체계가 정보처리계통과는 다양한 방법으로 구현되고(다양성), 계통의 신뢰도를 보장하기 위해 이중으로 구성하며(다중성), 계통간 독립성을 보장하도록 구성된다.

o. QIAS-P

QIAS-P 프로세서는 PAMI 범주 1 변수 신호와 부적절노심병각 감시에 사용되는 노심 출구열전대 및 Heated Junction Thermocouple로 부터의 신호를 실배선(hardwire)을 통해 직접 입력받아 아날로그신호를 디지털 신호로 바꾼 후 공학단위로 변환하여 안전콘솔의 DG로 보내 주며 개별 노심출구열전대값은 QIAS-N SP에도 전송된다. DG는 PAMI 범주 1 변수와 노심출구열전대 대표값을 고정된 형태로 FPD에 표시한다.

o. QIAS-N

QIAS-N 채널은 여러 개의 SP를 가진다. 하나의 SP는 여러 개의 중앙연산장치(CPU)와 공유기억소자(Shared memory), 하드 및 플로피디스크, LDP와 정보처리계통 및 QIAS-N의 DG와 정보교환을 위한 네트워크 모듈로 구성되며, 모든 SP와 네트워크는 계통의 신뢰도를 높이기 위해 이중으로 구성된다. QIAS-N 채널의 SP는 참고문헌 [3]의 PAMI 범주 1과 2의 변수와 기타 주요 변수에 대한 대표값을 계산하며, 발전소가 정지상태로 진행되고 있음을 나타내는 우선 순위 1의 경보와 운전원의 대응조치가 없을 경우 발전소가 정지될 것 임을 나타내는 우선 순위 2의 경보 및 운전원의 조치가 없을 경우 우선 순위 2나 1로 전이될 가능성이 있는 우선 순위 3의 경보를 발생시킨다. 계산된 대표값과 경보는 LDP에 표시되며, QIAS-P 프로세서에서 개별 노심출구열전대 값들을 입력받아 안전콘솔의 QIAS-N 전용 FPD에 전송한다. 정보처리계통 고장시에는 운전원작업대의 CRT 및 안전콘솔의 전용 FPD에 정보를 제공하여 일정시간 발전소의 계속 운전이 가능하도록 한다. QIAS-N DG는 전용 FPD와 함께 안전콘솔에 위치하며, 중앙연산장치와 기억장치 및 통신장비로 이루어진다. DG는 SP에 의해 처리된 변수의 대표값과 QIAS-P에서 처리된 개별 노심출구열전대 값들의 노심사분면(Core quadrant) 별 정보를 전용 FPD에 표시한다. 또한, 경보목록을 표시하여 운전원작업대가 고장으로 사용이 불가능할 경우 경보처리와 관련된 운전원조치를 수행할 수 있게 한다. 그림 1은 지시 및 경보계통의 구성을 나타낸다.

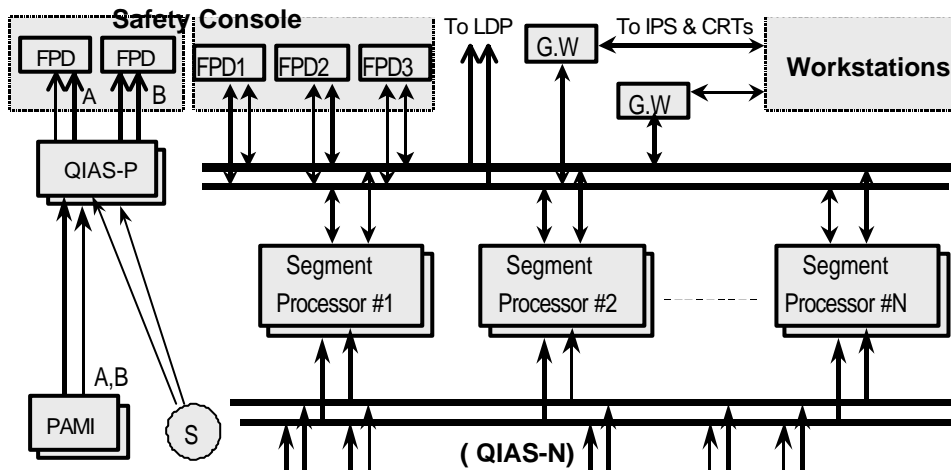


그림 1. 지시 및 경보계통 구성

2) 소프트웨어

지시 및 경보계통의 소프트웨어는 QIAS-P 소프트웨어 모듈과 QIAS-N 소프트웨어 모듈로 나눌 수 있다. QIAS-P 소프트웨어 모듈은 단순한 구조를 가지도록 구성되며, 안전에 중요한 등급으로 분류되어 소프트웨어 확인 및 검증 단계를 거친다. QIAS-N 소프트웨어 모듈들은 그림 2와 같이 구성된다. 제어모듈은 프로세서의 초기화 및 입력/출력의 통신을 담당하고, 신호처리 모

들은 각종 자료의 취합과 대표값 산출에 필요한 신호검증을 수행하며, 경보처리 모듈은 각종 신호에 대한 경보를 발생시키고, DG용 표시 모듈들은 운전원의 요구에 따라 원하는 정보를 표시해 준다. 또한, 각종 데이터베이스모듈들은 정보를 관리하며 다양한 형태의 FPD 표시형식을 제공하기 위한 저장기능을 담당한다.

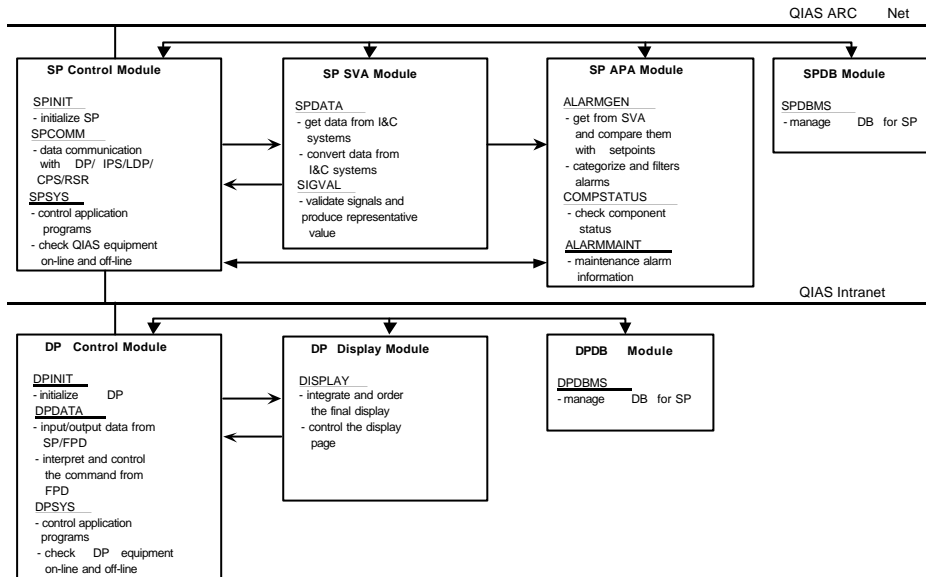


그림 2. QIAS-N 소프트웨어 모듈 구성

2.3 프로토타입 제작 및 설계요건 검증

가) 구성과 기능

1) 프로토타입을 위한 발전소 시나리오

발전소의 정상운전 중에 증기발생기 배관과단(SGTR) 사건이 발생하면 운전원은 관련 변수정보와 경보를 이용하여 발전소를 정지시켜 정지병각 상태로 유지한다. 구성된 프로토타입에서는 SGTR 발생후 발전소가 정지될 때까지의 변화 상태에 대한 신호검증과 경보처리를 수행하는 것으로 하며, 영광 3,4 호기 모의제어반의 SGTR 자료를 가진 workstation을 이용하여 주 SP와 부 SP로 2초 간격으로 발전소 자료를 전송한다.

2) 하드웨어 구성

하드웨어는 두 개의 독립된 캐비닛으로 구성되며, 각각의 캐비닛은 크게 SP 부분과 DG/FPD 부분으로 나뉜다. SP 부분은 여러 개의 CPU, 하드 및 플로피디스크, 공유기억메모리로 구성되며, SP/DG 간에는 통신망인 ARCNet이 이중으로 구성되어 있다(그림 3 참조).

3) 신호검증 및 경보처리 알고리즘 구성

지시 및 경보계통의 설계요건 검증을 위하여 신호검증과 경보처리를 위한 알고리즘을 그림 4와 같이 설계하였다[4][5]. 신호검증 및 경보처리 알고리즘의 자료흐름도(Data Flow Diagram:DFD)[6]는 그림 5와 같다.

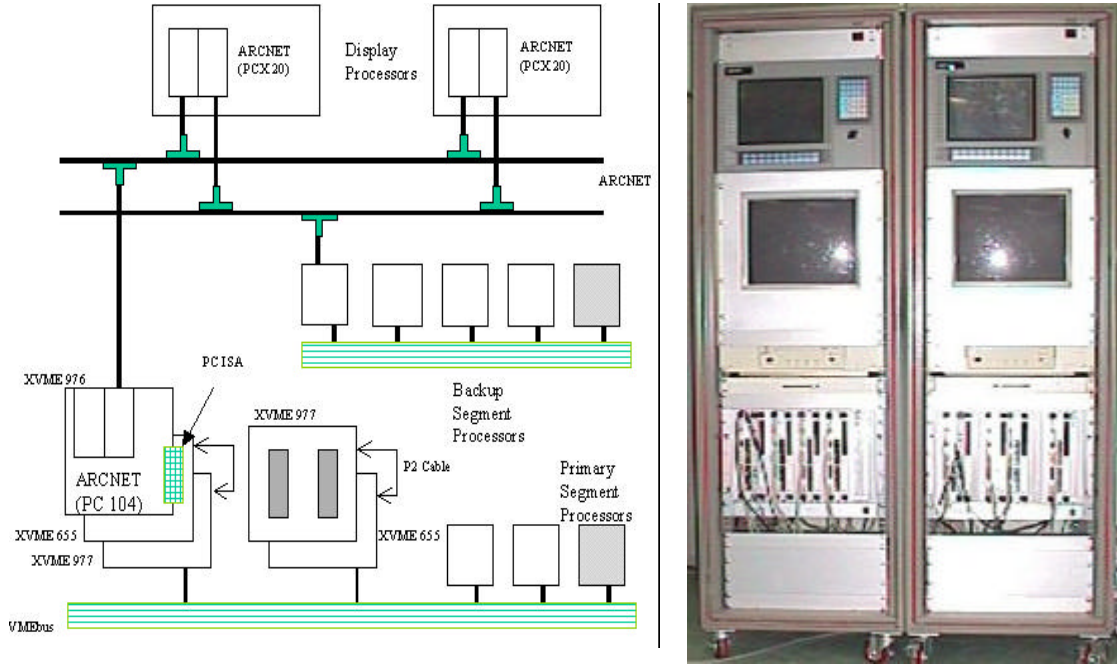


그림 3. 프로토타입 하드웨어 구성도

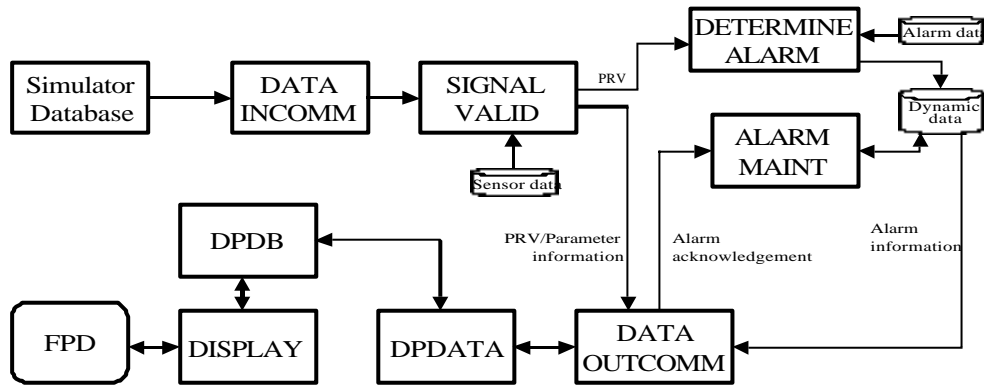


그림 4. 신호검증/경보처리 알고리즘 구조

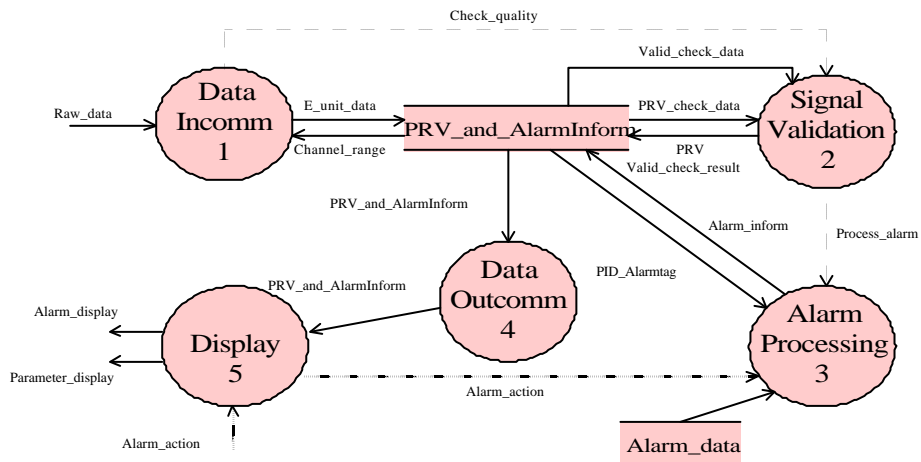
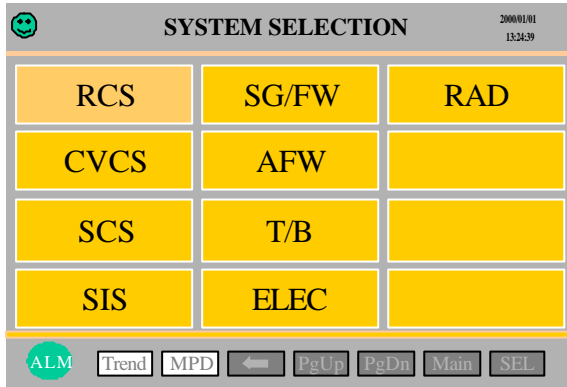


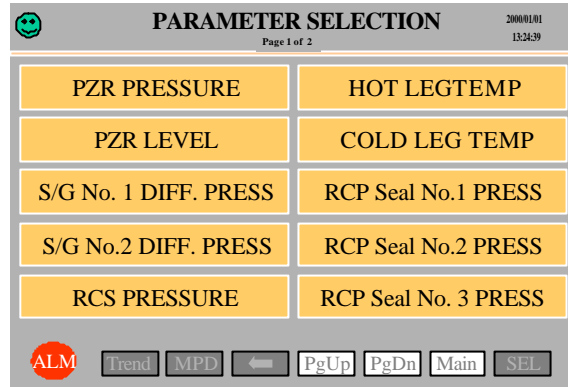
그림 5. 자료흐름도

4) 소프트웨어 개발

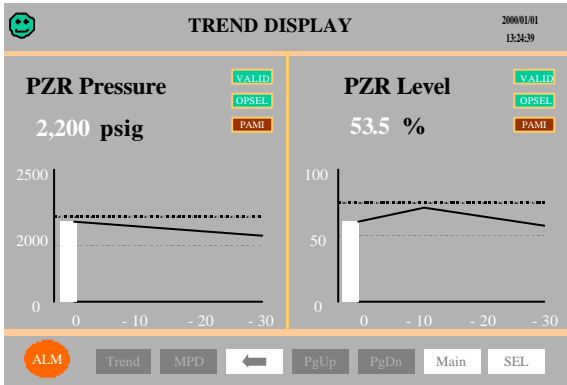
계통설계 요건의 기능을 구현하기 위하여 소프트웨어 구조도표, 사용되는 신호 및 경보자료에 대한 자료구조 구성 및 소프트웨어 모듈별 논리 흐름도를 작성하였으며, FPD 화면을 구성하여 운전원에게 제공되도록 하였다. 이를 위해 효율적인 인간-기계 연계특성을 고려하여 정보표시 화면과 이를 바탕으로 한 정보순항구조를 구성하였다. 구성된 FPD 화면은 그림 6과 같다.



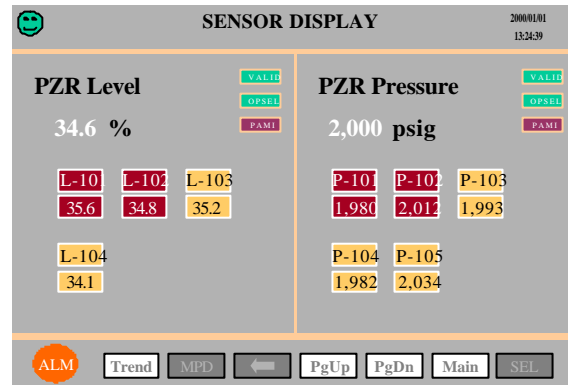
(a) System Selection Menu



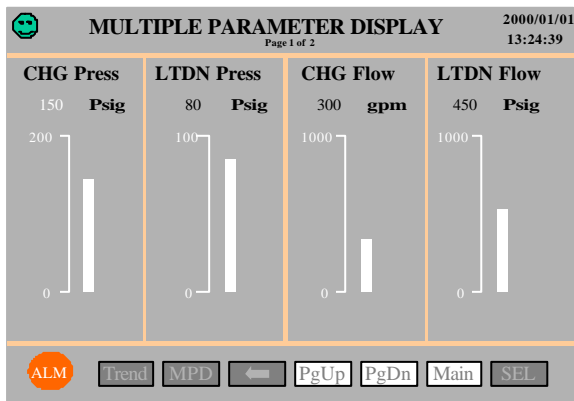
(b) Parameter Selection Menu



(c) Trend Display



(d) Sensor Display Menu



(e) Multiple Parameter Display

Priority	Alarm Description	Value	Setpoint	Unit	Time
1	RCS Hot Temp	336	335	°C	13:22:3
1	원동기 Pressure Hi	2450	2300	psig	13:22:36
2	RCS Hot Temp Hi	330	325	°C	13:22:34

The interface includes a status bar at the top with a smiley icon, date/time (2000/01/01 13:24:39), and a control bar at the bottom with an ALM indicator and navigation buttons (ACK, Trend, ST FLSH, Resume, PgUp, PgDn, Main, RSET).

(f) Alarm List Menu

그림 6. 정보표시화면

나) 프로토타입 평가 및 분석

프로토타입의 구현 결과를 평가 및 분석하면 다음과 같다.

1) 소프트웨어 구조

공정변수를 처리하기 위한 자료의 입출력과 변환, 신호검증과 경보처리, SP/DG 간의 자료통신, 데이터베이스관리 및 화면표시를 위한 모듈들은 응답시간과 성능요건을 고려하여 독립적으로 수행 가능하도록 구성하여 모듈 및 통합 시험을 수행하였다. 구성된 소프트웨어 구조는 유연성을 가지므로 많은 수정 없이 설계에 적용 가능할 것으로 추정된다.

2) 신호검증 알고리즘

신호검증 알고리즘은 각 변수별 신호와 채널의 수를 고려한 변수별 특성분석을 수행하여 변수를 형태별로 정의하고, 발전소의 운전상태별 신호 범위를 이용하여 대표값을 산출하며, PAMI 채널을 가지는 대표값의 경우는 PAMI 변수와 비교하여 검증되도록 구현하였다. 시험결과, 개발된 신호검증 알고리즘은 프로토타입에서는 좋은 특성을 보여주었지만, 발전소 적용을 위해서는 종합적인 평가를 수행하여 알고리즘의 보완이 필요하다.

3) 경보처리 알고리즘

변수별 대표값에 대하여 발전소의 운전모드를 고려한 경보를 설정하며 경보설정 및 해제시에는 불감대(deadband)를 두어 경보 설정치 부근에서의 경보 불안정상태를 방지하도록 구현하였다. 제한된 입력정보로 인해 경보에 관한 평가가 충분하지 못한 실정으므로, 경보처리 알고리즘의 발전소 적용을 위해서는 차후 많은 평가가 수행되어야 하며 알고리즘의 보완이 필요하다.

4) 자료구조

신호검증, 경보처리 및 처리정보의 표시를 위한 기본 자료를 구성하여 평가한 결과, 각 모듈간의 자료처리가 오류없이 전달되므로 설계에 적용하는 것이 가능하다.

5) 하드웨어 활용의 최적화

다중 중앙연산장치 구조로 구성하고 여러 개의 중앙연산장치와 공유자원의 효율적 활용을 위해 독립적인 입출력 모듈과 신호검증/경보처리 모듈들을 구현하여 평가하였다. 구현된 프로토타입은 계통의 응답시간 요건과 하드웨어의 성능 등을 고려한 유연성이 있는 설계가 가능하므로 목적에 따라 활용을 최적화 할 수 있다.

6) 정보검색구조 최적화

FPD를 통한 정보검색구조는 운전원이 사용하기 쉽도록 정보의 계층을 최소화하고, 고정된 자료와 운전원의 선택메뉴는 구별되도록 설계하였다. 구현된 정보검색구조 및 화면구성은 운전원이 쉽게 접근할 수 있고 혼란의 가능성이 적지만, 인간-기계연계 전문가의 검토가 필요하다.

7) 내부통신요건

여러 개의 SP와 DG간의 통신은 기본자료 입출력시간내에 이루어지며 다중의 통신망 중 하나의 통신망이 고장나면 건전한 통신망으로 자동 연결되도록 구현하였다. 기본자료 입출력시간을 2초로 설정하고 통신망의 고장을 시험한 결과, 자료의 손실없이 모든 정보를 정확히 전송하였으며 기본입출력시간도 초과하지 않았다.

8) 응답시간 요건

신호전송, 신호검증 및 경보처리, 화면의 자료 표시등은 기본자료 입출력시간내에서 이루어져야 하며 서로 다른 처리기에서 같은 시간내에 독립적으로 수행하도록 구성하여 총 모듈 수행시간이 각 모듈의 수행시간 중에서 가장 긴 시간이 되도록 구성하였다. 각 모듈을 적절하게 구성하여 독립적으로 수행되도록 함으로써 기본자료 입출력시간의 조절이 가능하므로 설정된 응답시간 요건을 충족시킬 수 있다.

3. 결론

차세대원전에 채택될 주제어실의 정보계통 특성과 운전개념에 따라 지시 및 경보계통의 프로토타입을 제작하여 입출력 모듈, 신호검증 및 경보처리 모듈을 개발하고 운전원 선택메뉴를 구성하였다.

개발된 지시 및 경보계통은 기존 발전소와는 달리 신호검증 알고리즘을 적용하여 중복된 정보를 최소화하면서 정확한 정보를 제공하고, 발전소 조건에 부합되는 경보 논리 및 설정치, 중요도 및 신속성에 따른 우선 순위 부여 등의 경보처리 알고리즘을 적용하여 운전원에게 우선 순위에 따른 경보를 제공함으로써 운전원의 운전부담을 줄일 수 있고 정보의 질적인 향상을 증대시킬 수 있다. 또한, 안전에 중요한 변수 및 그 변수에 대한 설정치를 총괄적으로 관리하고, 이를 이용하여 하부계통으로부터 오는 각종 정보를 처리하고 있으므로 필요시 변경이 가능하고, 다중의 통신망 구조로 고장난 기기는 온라인 상태에서 교체할 수 있기 때문에 고유기능의 상실이나 손실 없이 기기의 유지/보수가 용이하여 발전소의 가용성을 증대시킬 수 있다.

결론적으로, 개발된 지시 및 경보계통은 인간-기계 연계의 개선 및 디지털화에 따른 여러가지 성능 개선을 가져올 수 있으므로 기존 원전의 지시 및 경보에 비하여 운전 편의성 및 이용률이 향상되고 정보의 신뢰성이 크게 증대될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] ALWR Utility Requirements Document, Chapter 10, Man-Machine Interface System, 1995.
- [2] Korean Utility Requirements Document, Chapter 10, Man-Machine Interface System, 1998.
- [3] USNRC Reg. Guide 1.97, Instrumentation for Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants to Access Plant and Environs Condition During and Following an Accident, 1982.
- [4] ABB-CE, A Generic Alarm Generator Algorithm for Nuplex80+, July 1996.
- [5] ABB-CE, Generic Signal Validation Algorithm Design Report, July 1996.
- [6] 윤청, 패러다임 전환을 통한 성공적인 소프트웨어 개발 방법론, 1998.