

차세대 원자력 발전소에서의 발전소보호계통 Prototype 기능의 구현

° 박종범*, 김창호**, 조황***

*한국전력공사 전력연구원 **한국전력기술 ***광운대학교 제어계측공학과

Prototype Development for KNGR Plant Protection Systems

° Jong Beom Park*, Chang Ho Kim**, Whang Cho***

*Korea Electric Power Research Institute **KOPEC ***Control & Instruments Eng., Kwangwoon Univ

Abstract - Plant Protection Systems(PPS) are those systems that initiate safety actions to mitigate the consequences of design basis events by sending signals to Reactor Trip Switch Gear System(RTSS) and Engineered Safety Features-Component Control Systems (ESF-CCS). This paper illustrates distinctive features and improved design concepts of Korea Next Generation Reactor(KNGR) based on the experience obtained through prototyping of PPS.

1. 서론

현재 국내에서 운전중인 대부분의 원자력 발전소 보호계통은 아날로그 제어방식을 적용한 관계로 계통설계의 한계성을 갖고 있으며 계통의 유지, 보수시 제품의 생산 중단 혹은 대폭 감소로 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이의 해결 수단으로 최근에는 설계의 표준화, 단순화 및 유지보수에 매우 유리한 디지털 계통의 설계 기술이 산업체는 물론 원전에서도 폭넓게 적용되고 있는 추세이며 디지털 기술이 발전하고 그 신뢰도가 향상됨에 따라 기존의 아날로그 회로로 구성된 원자력발전소 계통의 기능을 PLC(Programmable Logic Controller) 및 디지털 기기를 사용하여 그 기능을 디지털화 하고 있다. 차세대 원자력 발전소에서는 디지털 기술과 더불어 DCS(Data Communication System)기술을 원자력발전소 전 계통에 적용함으로써 계통의 이용도와 신뢰도를 증가시키고 운전원의 발전소 운영 편의성을 향상시킬 수 있도록 함을 설계 목적으로 한다.

원자력발전소의 안전계통중 하나인 발전소보호계통(Plant Protection System : PPS)은 발전소 이상상태 발생시 이러한 신호들을 받아 동시에 발전소보호계통 하부에 있는 공학적안전설비작동계통(Engineered Safety Features - Component Control System : ESF-CCS)과 원자로스위치기어(Reactor Trip Switchgear System : RTSS)로 신호를 보내 원자력 발전소가 안전상태로 운전할 수 있도록 하는 기능을 제공한다. 본 논문에서는 발전소보호계통 Prototype으로 구현하는 기능과 기존 호기설계와의 비교분석을 통하여 새로이 적용된 기술 및 설계 개선사항등을 논의하고자 한다.

2. 발전소보호계통의 기능 및 목적

발전소보호계통은 원자로트립스위치기어계통과 공학적 안전설비작동계통으로 구성되어 있다. 발전소보호계통은 원자로트립 스위치기어계통에 비상정지를 위한 트립신호를 제공하기 위한 것이다. 원자로보호계통은 핵증기공급 계통의 상태들을 감시하며 운전변수중 하나가 정해진 안전계통 설정치에 도달하면 정확하고 신속하게 원자로를 정지시키는데 필요한 감지기, 연산기, 논리회로 및 기타

기기로 구성되어 있다. 계통의 기능은 중간빈도사건 및 희귀빈도사건시에 노심핵연료설계제한치 및 원자로냉각재계통의 압력경계를 보호하고 제한사건시에 사고완화를 보조하기 위한 것이다.

제어봉집합체의 위치측정 채널을 제외하고는 트립신호를 발생시키기 위하여 각각의 변수에 대하여 전기적이고 물리적으로 격리된 4개의 측정채널이 제공된다. 원자로 트립신호를 발생하기 위해서는 4개의 측정채널중 2개 이상의 채널이 트립설정치를 넘어야 한다. 4개의 채널 중에서 한 채널을 우회시켜 2/3 논리를 유지시킬 수 있도록 한 개의 예비채널이 제공되고, 원자로 트립신호는 모타-발전기세트(MG-Set)로부터 출력제어계통(Power Control System)으로 제공되는 전원을 차단하여 제어봉구동장치의 코일을 비여자시킴으로써 모든 제어봉들이 중력으로 노심하부로 떨어지게 한다. 측정채널은 센서, 측정되어지는 공정변수(압력, 수위, 유량, 출력 등)를 비교논리(Bistable)프로세서의 입력신호로 변환해 주는 신호변환장치등으로 구성되어 있다. 발전소보호계통은 노외핵계측기(Ex-Core Detector)계통, 노심보호연산기계통(CPCS) 그리고 보조공정캐비넷(APC)등으로부터 안전변수신호를 받아서 원자로정지 및 공학적안전설비작동신호를 원자로정지차단기 및 공학적안전설비작동계통에 보낸다.

한 개의상의 변수에서 비교논리(Bistable) 출력신호가 2/4 상태로 동시논리(Local Coincidence Logic)에 입력될 때 원자로트립 및 공학적안전설비작동 개시신호가 발생하게 된다. 한 개의 채널이 우회(Bypass)되었을 때 계통논리는 2/3 논리회로로 변경된다. 두개의 수동트립스위치기 주제어실에 제공되며 이두개의 수동트립스위치를 누름으로서 원자로정지차단기계통이 보호동작을 개시하게 된다. 발전소보호계통은 각각 구별된 4개의 기기실에 분리되어 위치하게 된다. 각 캐비넷은 프로세서 논리제어기(PLC) 단위의 프로세서 와 PC 프로세서 그리고 4 채널의 연계를 담당하는 관련 연계장비로 구성되어 있다. 발전소 보호계통의 주요 기능은 다음과 같다.

1) 비교논리(Bistable)

트립변수의 측정신호가 보호(Protection) 프로세서의 진단에 도달하게 되면 A/D 변환기를 통해서 아날로그 신호가 디지털 신호로 변환되어 비교논리 알고리즘으로 입력되게 된다. 이 신호는 트립설정치 알고리즘과 비교하여 트립설정치에 도달하게 되면 각각의 채널연결(Cross Channel Communication) 프로세서 및 동시논리(LCL) 알고리즘으로 트립신호를 제공하게 된다.

2) 동시논리(LCL)

보호(Protection) 프로세서 내의 동시논리 알고리즘은 해당채널에서 트립신호와 다른 채널에서 제공되는 트립신호를 비교한 다음 4개의 보호채널에 가능한 조합을 만들면 AB, AC, AD, BC, BD 그리고 CD등 6개의 동시논리조합이 형성된다. 즉, 2/4 논리가 만족되면 트립신호를 보호프로세서의 출력모듈을 통해 개시회로로 출력하게 된다.

3) 개시회로(Initiation Circuits)

개시회로는 원자로정지를 위한 개시 릴레이 및 공학적 안전설비작동계통을 위한 릴레이가 설치되어 있으며 원자로정지신호는 두 개의 트립출력신호를 원자로정지차단기계통으로 출력한다. 공학적안전설비작동계통 개시신호는 세 개의 광섬유 신호분배기(Fiber-optic Splitter)를 통하여 네 개의 ESF-CCS 계통으로 또는 두 개의 광신호분배기(Fiber-Optic Splitter)를 통하여 두 개의 공학적안전설비작동계통으로 작동신호를 출력하게 된다. 이 신호는 광섬유 케이블을 통하여 공학적안전설비작동계통의 그룹제어기(Group Controller)로 각각 제공되어 2/4 로직을 구성하게 된다. 아래 그림1은 차세대원전 발전소보호계통 구성도를 나타내고 있다.

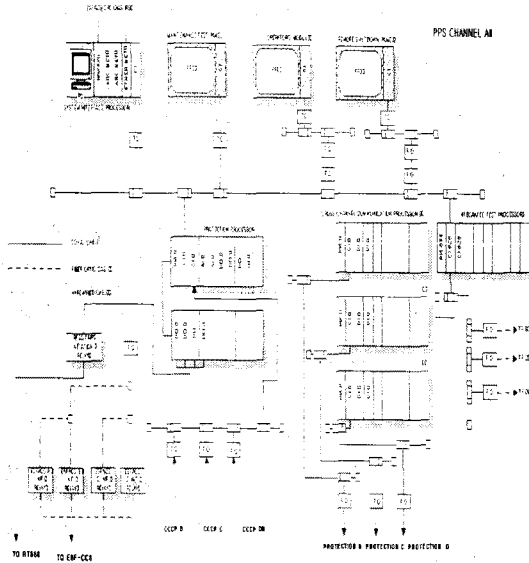


그림 1. 발전소보호계통 구성도

3. Prototype 설계개선 및 기능구현

3.1 Prototype 설계개선

3.1.1 단일 및 이중 비교논리 및 동시논리프로세서 표 1. 단일/이중 비교논리/동시논리 프로세서 비교

	2중비교논리/동시논리 프로세서(Nuplex 80-)	단일비교논리/동시논리 프로세서(UCN 5&6)
장점	1. 공통모드고장에 유리 2. 한 개의 PPS 채널안에 다중화 제공	1. 단일 공급자, 예비부품적 필요 2. 설계가 USNRC에 의해 검토, 승인됨 3. 단일 S/W 설계 4. PPS 한 채널안에 부분 다중화 제공
단점	1. 두 배의 S/W 설계업무 2. 운전원모듈 및 MTP와의 연계설계 복잡성 증가 3. 시험 복잡성 증가 4. 예비부품 증가	1. 공통의 프로세서가 CMF 영향 받는 사항임 2. 한 프로세서 고장이 1/2 채널고장을 일으킴

위의 표1에서 차세대 보호계통 비교논리 및 동시논리 프로세서는 울진 5&6호기와 동일한 개념으로 채택할

것이다.

3.1.2 비교논리와 동시논리프로세서 통합 및 분리

비교논리 및 동시논리 프로세서의 분리개념은 보호계통을 아날로그타입의 릴레이 소자를 사용하여 설계할 때 릴레이를 적절하게 사용하기 위한 개념이었다. 그러나 현재 S/W를 사용한 비교논리 및 동시논리 프로세서 설계에서는 위에서 비교한 바와 같이 두 개의 프로세서를 사용한 UCN 5&6설계와 다르게 차세대 발전소보호계통설계에서는 통합된 비교논리 및 동시논리 프로세서를 "보호(Protection) 프로세서"라고 이름하며, 그 기능을 전부 수용하여 설계할 예정이다. 이러한 장·단점을 표2에서 비교하였다.

표2. 비교논리와 동시논리프로세서 통합 및 분리 비교

	분리 비교논리/동시논리 프로세서	통합 비교논리/동시논리 프로세서
장점	1. 설계가 인허가기관에 의해 검토되고 승인됨 2. PPS 한 채널안에 부분적인 다중화 제공	1. 더작은 구성, 평균고장율 개선 2. S/W 설계 단순화됨 3. 시험요건이 단순화됨 4. 열/부하 & 전원요건 개선
단점	1. 추가적인 H/W 사용에 따른 고장율 증가 2. 복잡한 S/W 설계업무 3. 예비부품 증가 4. 케이블 크기 증가	1. 설계가 인허가 해결사항 없음

3.1.3 게이트웨이(Gateway) 설계

표3. 게이트웨이 비교

	장점	단점
PC형 이중 게이트웨이	1. 장비선택폭이 큼 2. 독립성보장(안전 및 비안전 구분)	1. 평균고장율증가 2. 가격 및 크기
PC형 단일 게이트웨이	1. 장비선택폭이 큼 2. 가격/크기	1. 독립성(안전 및 비안전 구분)
PC형 Hot Standby 게이트웨이	1. 장비선택폭이 큼 2. 정보전송 신뢰도 증가	1. 추가적이 가격 2. 복잡성 증가
PLC형 게이트웨이	1. 가격/크기	1. 장비선택 제한 2. 통신노드 제한 3. 독립성

차세대 발전소보호계통은 시험 및 정보표시를 위한 전달을 위해 여러 다른 계통과 통신을 해야한다. 이런 계통은 CPC, ESF-CCS, QIAS(Qualified Indication and Alarm System), RTSS 그리고 IPS(Integrated Test Processor)이다. 이런 계통과의 연계를 위해 사용되는 것이 게이트웨이이다. 차세대 보호계통에서는 이 게이트웨이를 계통연계프로세서(System Interface Processor: SIP)라고 이름하였다. CPC, ESF-CCS 그리고 RTSS는 같은 채널에서 이루어지는 연계이므로 특별한 격리요건이 필요치 않으나 IPS 및 QIAS와의 연계는 격리요건을 필요로 한다. 몇 가지 게이트웨이 구성이 표3에서 비교되었다. 이 비교를 바탕으로 PPS 통신의 기능등을 검토한 결과 PC형 단일 게이트웨이를 사

용하기로 잠정 결정하였다.

3.2 Prototype 기능구현

3.2.1 계통기능(System Function) 검토

차세대 발전소보호계통은 감시되는 변수가 미리 설정된 값에 도달할 때 마다 원자로정지 및 공학적안전설비 작동을 위한 신호를 자동적으로 제공한다. 또한, 운전원에게 계통의 상태를 감시할 수 있는 수단을 제공하며 원자로정지와 공학적안전설비작동동작에 개입할 수 있는 수동동작을 위한 설비를 제공한다. 발전소보호계통은 자동 및 수동시험설비의 시험을 통해 자체계통을 감시할 수 있다. 발전소보호계통의 기능은 전반적으로 기존의 한국표준원전의 기능과 동일하게 설계될 것이다.

3.2.2 설계근거(Design Basis) 검토

발전소보호계통 설계는 프로그래머블 논리제어기(Programmable Logic Controller : PLC)를 기본으로 하는 디지털설계를 채택하여 높은 정밀도와 신뢰도를 갖는 계통이며, 시험은 모든 트립 및 작동기능에 대하여 연속적인 자동 하드웨어시험 및 수동개시 자동 기능시험을 포함한다. 자동시험으로 수행되지 않는 부분에 대하여는 중첩하여 수동시험이 수행된다.

3.2.3 응답시간(Response Time) 검토

보호계통동작의 응답시간은 발전소 안전해석 및 가정에 기준하여 정해진다. 전체 허용응답시간은 계통/기기 성능에 바탕을 두고 분석하여 계통에 중요한 기기(Protection, CCC Processor 등)에 허용되는 응답시간을 만족시켜야 한다. 전체적인 요건은 안전해석에서 주어지는 전반적인 보호응답시간이다. 주어진 보호응답시간에서 설계진행동안에 기기에 대한 실제적인 응답시간을 고려하여 다양한 기기 설계에 대한 고려가 진행되어야 한다. 발전소보호계통의 응답시간은 입력신호에서 출력신호까지 300msec 미만이 되어야 한다.

3.2.4 PLC 프로세서에 대한 요건

프로세서요건 그 자체만으로 PLC 장비를 선택하는데 충분하지 않고 계통기능 요건이 프로세서선택에 반드시 고려되어야 한다. 프로세서 선택에 중요한 요점이 아래와 같이 고려되어졌다.

- PLC 프로세서
- 장비 물리적/기계적 장점
- 소프트웨어
- 입,출력 모듈
- 통신요건

위에서의 분석외에도 중요한 장비선정의 요건으로 기존 호기에서의 사용이력등이 요구되어지는데 울진5&6호기의 발전소보호계통 디지털화에서 사용된 장비들이 참조가 되어졌다. 이와 같은 프로세서 및 통신망에 대한 검토결과 차세대 보호계통에서 사용되는 프로세서로서 잠정적으로 ABB사에서 제공하는 Advant 110로 선정하게 되었다.

3.2.5 소프트웨어 디자인 요건

차세대 발전소보호계통에서 소프트웨어설계를 위해 아래와 같은 순서로 진행한다.

- ① 요건단계(Requirement Phase)
- ② 디자인 단계
- ③ 구현단계(Implementation Phase)
- ④ 시험단계
- ⑤ 설치 및 확인단계
- ⑥ 운전 및 보수단계
- ⑦ 제거단계

3.2.6 전원 요건

발전소보호계통(Operator's Module..등 포함)에 제공되는 전원은 필수전원공급계통(Vital Instrument Bus Power)에서 공급되는 120VAC 이다. 한 개의

PLC를 위해 2개(Redundancy)의 24VDC 전원이 공급된다. 그림2는 Prototype 구성도를 나타내고 있다.

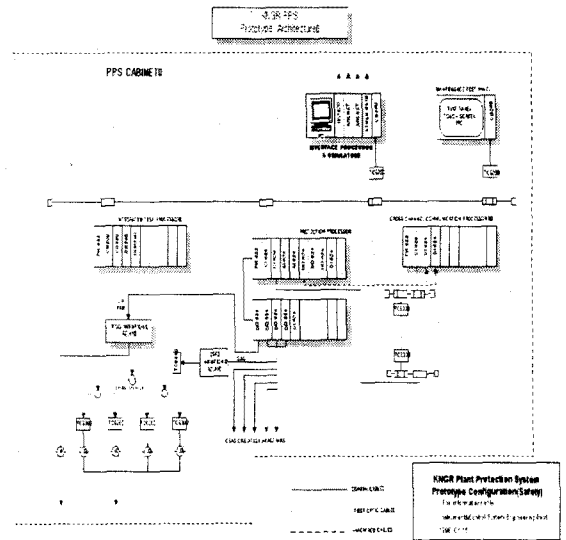


그림 2. Prototype 구성도

4. 결 론

차세대원전(KNGR)은 한국형원전(KSNP) 및 ABB-CE Nuxex 80⁺ 설계 개념을 활용하고, 차세대원전의 Advanced Design Feature를 반영한 독자적인 개념 설계와 기본 설계를 통합하여 발전소 전체를 디지털 기기를 사용하여 구성하였다. 또한 계통간의 연계 신호도 기존 원전의 실패선에 의한 방법이 아닌 통신망을 사용하여 이루어진다. 기존 원전의 아나로그로 설치된 비교논리, 동시논리 및 개시회로..등 차세대원전 발전소보호계통에서는 PLC(Programmable Logic Controller)로 프로그램화 되어야 한다. 본 논문에서는 차세대원전에서 PLC를 사용하여 프로그램화 되어야 할 부분을 기존원전과 비교하여 정의하였고, 실제 연구원에서 우리기술을 가지고 독자적으로 Prototype을 구현하여 기술자립하려고 노력하고 있다. 향후에 Prototype 구현이 성공하였을 때는 우리나라도 원전 선진국에 진입 할 것으로 생각되며, 또한 Prototype을 수행하며 하드웨어 기능을 분석하여 일부 기능들을 PLC로 프로그램화 하는 등 계통을 재구성하는 작업이 이루어져야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- (1) "Criteria for Protection Systems for Nuclear Power Generating Stations", IEEE 279, 1971.
- (2) "Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations", IEEE 323, 1983.
- (3) "Standard Criteria for the Periodic testing of Nuclear Power Generating Station Safety Systems", IEEE 338, 1987, Upgrade Plan", EPRI, 1992
- (4) "Nuxex 80⁺ Advanced Control Complex", ABB-CE, 1993
- (5) "Consulting Report for KNGR Plant Protection System", Work Order No.N-038, ABB-CE, 1997
- (6) "Consulting Report for KNGR Plant Protection System", Work Order No.N-039, ABB-CE, 1997
- (7) "Consulting Report for KNGR Engineered Safety Features Actuation Control System", Work Order No.N-040, ABB-CE, 1997.
- (8) "한국형 표준원전 계통실무", 한국원자력연구소, 1996