

## 원전 가열운전 자동화시스템에 관한 연구

김창희, 박재창, 김정수, 정철환, 함창식, 박기용

한국원자력연구소

### 요 약

본 연구에서는 원자로의 충수 및 배기가 완료된 상태에서부터 원자로 출력 2%까지의 운전을 자동화한 원전 가열운전 자동화시스템을 개발하였다. 본 시스템을 개발하기 위해 운전절차서와 운전원 업무경험을 바탕으로 운전모드, 자동화 범위, 자동제어대상 등을 선정하였고, 이를 기반으로 지능형 감독자시스템, 디지털 분산제어시스템, 그리고 신호연계시스템으로 구성된 가열운전 자동화시스템을 개발하였다. 개발된 시스템의 성능을 확인하기 위해 993 MWe급 가압경수로를 모의화한 계측제어 시험검증설비와 연계하여 검증 실험을 수행하였다.

### 1. 서 론

현재 운전중인 가압경수로형 원전은 가열운전모드, 저출력운전모드, 고출력운전모드, 냉각운전모드 등으로 나누어 운전하고 있다. 이들 운전모드중 저출력 운전모드와 고출력 운전모드는 많은 부분 자동화가 되어 있지만, 가열운전모드와 냉각운전모드는 대부분 수동운전에 의존하고 있다. 특히, 원자로 충수 및 배기가 완료된 상태에서 원자로 출력 2%(고온대기상태)까지의 가열운전은 대략 20시간 정도의 운전시간이 소요되며, 이 기간동안 원자로냉각계통의 온도 및 압력제어 등에 필요한 기기의 빈번한 조작이나 감시, 기술지침서에서 요구하는 안전계통의 정기점검, 발전소 유지보수에 필요한 기기배열 및 감시 등의 업무를 수행하여야 한다. 따라서 긴 운전시간 동안 반복적으로 수행되는 업무로 인해 운전원 업무부하가 증가하고, 인적오류를 유발할 가능성이 높다.

본 연구에서는 충수 및 배기가 완료된 상태(저온정지상태)에서 원자로 출력 2%까지 운전을 자동화한 가열운전 자동화시스템을 개발하였다. 본 시스템을 개발하기 위해 고리 3&4호기 운전절차서와 운전원 업무경험을 바탕으로 운전모드와 운전유지대를 설정하였고, 자동화범위와 자동제어대상을 선정하였다. 개발된 시스템은 지능형 감독자시스템, 디지털 분산제어시스템, 신호연계시스템으로 구성된다. 개발된 시스템의 성능을 검증하기 위해 993 MWe급 가압경수로를 모의화한 계측제어 시험검증설비[권기준, '97]와 연계하여 발전소 상태에 따라 최적의 자동운전이 수행되는지를 확인하였다.

### 2. 가열운전 자동화시스템의 제어범위와 운전모드

가열운전 자동화시스템은 원자로 충수 및 배기가 완료된 상태에서 원자로출력 2%까지 원자로 냉각재 온도 및 압력제어, 가압기 수위제어, 증기발생기 수위제어 등의 페루프제어와 운전절차에

다른 시퀀셜 제어 등을 자동으로 수행한다. 그러나 본 시스템의 개발기준[정철환, '95]에 따라 발전소 안전에 관련된 설계는 기존의 방법을 사용하였고, 안전에 관련된 기기나 제어반에서 운전할 수 없는 기기들(예: 잔열제거 펌프, 원자로냉각재 펌프)은 수동으로 운전하도록 하였다.

고리 3&4호기 정상 운전절차서에 따르면 원자로 충수 및 배기가 완료된 상태에서 원자로 출력 2% 까지 가열운전은 크게 저온정지상태, 고온정지상태, 고온대기상태 등의 운전모드로 구분된다. 따라서 다음과 같이 운전모드를 구분하였다.

- 가열모드 I : 저온정지상태에서 고온정지상태까지 운전

이 모드에서는 원자로냉각재계통의 온도를 60°C에서 176.6°C까지 가열하고, 압력을 24kg/cm<sup>2</sup>으로 유지하는데 필요한 제어행위를 수행한다. 그리고 가압기 기포형성을 확인해야 한다.

- 가열모드 II : 고온정지상태에서 고온대기상태까지 운전

이 모드에서는 원자로냉각재계통의 온도를 176.6°C에서 292°C까지 가열하고, 압력을 24kg/cm<sup>2</sup>에서 157kg/cm<sup>2</sup>까지 상승하는데 필요한 제어를 수행한다. 또한, 가압기 기포형성이 이루어진 구간이므로 가압기 수위를 일정하게 유지하는 제어를 수행한다.

- 2차측 운전모드 : 원자로 출력 2% 까지 필요한 2차측 운전

이 모드에서는 1차측 운전에 따라 요구되는 2차측 예열운전과 만수상태의 증기발생기 수위를 50%로 유지하는 제어를 수행한다.

- 임계모드 : 원자로 임계 운전

이 모드에서는 원자로 임계에 필요한 예상 임계점을 계산하고, 필요할 경우 계산된 임계점에 따라 원자로냉각재 봉산농도를 조절하고 제어봉을 인출하는 절차를 수행한다.

각 운전모드를 시작할 때는 해당 운전모드에 따른 중요한 기기의 기동이나 정지상태 등의 초기조건을 점검해야 하며, 기술지침서에서 요구하는 안전기능 점검 및 주기점검 등을 수행하여야 한다. 이러한 운전절차는 운전원이 직접 개입해야 하므로 점검이 끝날 때까지 발전소 상태를 점검 조건에 맞게 유지해야 한다. 따라서 본 시스템에서는 다음과 같은 7개의 운전유지대를 설정하여 자동운전중 운전원이 개입하여 발전소 상태를 확인하거나, 발전소 안전과 관련된 계통을 직접 운전할 수 있도록 하였다.

- 각 운전모드 시작점(3개)

- 가압기 기포 생성 확인 및 RHR 격리

- P-6 확인

- 원자로 임계 확인

### 3. 자동기동 시스템의 구성

본 시스템은 그림 1과 같이 지능형 감독자시스템, 디지털 분산제어시스템, 신호연계시스템, 그리고 성능 검증 및 확인을 위한 계측제어 시험검증설비로 구성된다.

#### 3.1 지능형 감독자시스템

지능형 감독자시스템은 최상위시스템으로 가열운전 자동화에 따른 운전절차수행과 발전소 상태

를 실시간으로 감시하여 디지털 분산제어시스템으로 제어명령을 하달하는 기능을 수행한다. 이 시스템은 실시간 전문가시스템인 G2를 사용하였고, 제어규칙(rules)은 원자로출력 2%까지 정상 운전절차서와 숙련된 운전원의 운전경험을 기반으로 작성하였다. 그리고 자동운전중 원자로냉각재 온도 가열율이나 압력-온도곡선의 과냉각여유도 등과 같은 주의 및 제한사항 항목들을 감시하여 위배사항이 발생할 경우 경보 메시지를 운전원에게 제공해주는 기능을 갖고 있다. 또한, 초기조건 수행이나 운전유지대에서 운전원이 수동으로 수행하는 운전절차는 운전화면에 표시하여 운전원이 운전화면을 통해 절차를 진행하도록 하였다.

### 3.2 디지털 분산제어시스템

이 시스템은 가열운전중 원자로냉각재 온도 및 압력, 가압기 수위, 증기발생기 수위 등과 같은 폐루프제어를 수행하고, 운전절차에 따라 밸브나 전열기 등과 같은 기기를 온/오프(개/폐)하는 시퀀셜제어를 수행한다. 각 폐루프제어의 설정치와 시퀀셜제어의 시작점은 상위 시스템인 감독자시스템으로부터 이드넷(TCP/IP)을 통해 전송된다. 이 시스템은 미국 FOXBORO사의 Intelligent Automation Series인 디지털 분산제어시스템을 사용하여 구성하였고, 자동제어 대상은 그림 2와 같다.

#### 3.2.1 가열모드 I

이 모드에서는 가압기가 만수상태를 유지하고 있고, 원자로냉각재는 냉각재 펌프에 의한 강제 순환되고 있다. 따라서 원자로냉각재는 유로의 내벽과 마찰에 의해 가열된다. 이 모드에서의 온도제어는 잔열제거계통 열교환기 출구밸브(HV-603)를 통해 이루어지도록 제어기를 구성하였다. 온도가열율은 기술지침서 제한사항에서 시간당 27℃를 초과하지 않도록 제한하고 있다. 따라서 온도제어기의 가열 설정치는 냉각재온도 176.6℃까지 시간당 26℃로 선형 증가하도록 설계하였다. 그러나 기동된 냉각재펌프의 수에 따라 냉각재 온도의 가열율이 달라지기 때문에 발전소 운전상태에 따라 가열 설정치를 상위시스템에서 조절하도록 하였다. 이 모드는 가압기가 만수상태를 유지하고 있기 때문에 냉각재 압력은 충전유량과 유출유량에 따라 조절해야 한다. 따라서 압력제어기는 유출유량 조절밸브(HV-142)를 통해 압력을 24kg/cm<sup>2</sup>을 유지하도록 설계하였다. 그리고 냉각재 압력이 유출유량 조절밸브를 통해 조절되지 않을 경우 즉, 유출유량 조절밸브가 최대로 닫혔거나 열렸을 때도 압력이 증가 또는 감소할 경우 상위시스템인 지능형 감독자시스템에 의해 충전유량 조절밸브(FV-122)나 유출유량 오리피스밸브(HV-1/2/3)를 조절하도록 하였다.

#### 3.2.2 가열모드 II

이 모드는 가압기에 기포 형성이 완료되었기 때문에 원자로냉각재 압력은 가압기 전열기와 살수유량 조절밸브(PV-444)를 사용하여 조절하고, 냉각재 온도는 원자로냉각재 펌프를 통해 가열된다. 그리고 냉각재 온도 및 압력은 온도-압력곡선에 따라 과냉각여유도를 유지하면서 상승되어야 하므로 냉각재 온도가 과냉각여유도나 기술지침서 제한사항을 초과할 경우 원자로냉각재 펌프나 증기발생기 과압보호밸브를 이용하여 가열율을 조절하도록 하였다. 그리고 냉각재 압력은 온도-압력곡선에 따라 상승하도록 하기 위해 압력제어기의 설정치를 과냉각여유도로 설정하였고, 과냉각여유도에 따라 살수유량 조절밸브를 조절하여 압력을 제어하도록 하였다. 압력제어기 설정치인 과냉각여유도는 발전소 상태에 따라 지능형 감독자시스템에 의해 계산되어 전송된다. 또한,

가압기 전열기 및 증기발생기 과압보호밸브의 동작도 지능형 감독자시스템에 의해 제어된다.

### 3.2.3 2차측 운전모드

이 모드에서는 1차측 운전에 따른 2차측 예열과 만수상태인 증기발생기 수위제어가 수행된다. 만수상태의 증기발생기는 취출수밸브(HV-304)를 조절하여 배수하고, 2차측 운전에 따라 증기발생기의 급수가 필요할 경우 보조급수밸브(HV-313/314/315)를 사용한다. 따라서, 증기발생기 수위제어기는 취출수 밸브제어기와 보조급수 밸브제어기로 구성하였다. 그리고 2차측 운전에 필요한 시퀀설제어의 시작점은 감독자시스템에 의해 수행된다.

### 3.2.4 임계모드

원자로를 임계에 도달되도록 하기 위해서는 임계도달시간과 지논상태를 고려하여 예상임계 제어봉 위치를 정하고, 예상 임계점을 계산하여 필요할 경우 계산된 임계점에 따라 원자로냉각재 봉산농도를 조절하고 제어봉을 인출하는 절차를 수행한다. 본 연구에서는 예상 임계점 계산프로그램을 개발하므로써 운전원이 수작업으로 수행하던 절차를 전산화하였다[김정수외, '95].

## 3.3 신호 연계

가열운전 자동화시스템과 계측제어 시험검증설비간의 신호연계는 그림 1과 같다. 계측제어 시험검증설비는 웨스팅하우스형 993MWe급 가압경수로로 모의화한 시스템으로 가열운전 자동화시스템의 개발 및 성능검증시스템으로 사용된다. 지능형 감독자시스템은 발전소 상태를 감시하여 필요한 제어명령을 디지털 분산시스템으로 하달하는 기능을 수행하기 때문에 계측제어 시험검증설비로부터 이드넷을 통해 단방향으로 신호를 전송받는다[김정수, '97]. 디지털 분산제어시스템과 지능형 감독자시스템간은 이드넷을 통해 양방향 통신이 이루어진다. 이것은 디지털 분산제어시스템이 감독자시스템으로부터 제어명령(제어기설정치나 시퀀설제어의 시작시기 등)을 전송받을 수 있도록 하고, 감독자시스템은 현재의 제어기 설정치나 구성 등을 감시할 수 있도록 하기 위함이다. 디지털 분산제어시스템과 계측제어시험검증설비간에는 VXI를 통한 신호연계와 이드넷을 통한 신호연계 두 가지 방법을 사용하였다. VXI 시스템은 HP 워크스테이션으로 구성된 시험검증설비와 외부 계측제어설비간을 하드웨어적으로 연결하기 위한 시스템이다[권기춘 외, '97]. 그리고 FOXBORO I/A series는 현장신호와 연계하기 위해 FBM(Field Bus Module) 모듈을 사용한다. 따라서 펌프제어와 시퀀설제어에 관련된 아날로그 및 디지털신호들은 FBM 모듈과 VXI를 통해 연결하였고, 기타 감시에 관련된 신호들은 이드넷을 통해 연결하였다. 발전소 현장 환경을 고려하여 FBM 모듈과 VXI간의 신호연결시 아날로그 신호는 4~20mA 전류신호와 0~10VDC 전압신호를 사용하였고, 디지털신호는 접점신호를 사용하였다.

## 3.4 인간-기계 연계화면

본 시스템은 모두 4개의 운전화면으로 구성하였고, 윈도우 개념을 적용하였다. 4개의 화면중 2개의 화면은 지능형 감독자시스템에서 제공하는 화면으로 다음과 같은 기능을 제공한다.

- 운전모드 수행 및 진행상태 화면 : 각 운전모드 수행 및 현재 진행되고 있는 운전모드 확인
- 발전소 상태 감시 화면 : 가열운전중 각종 기기들의 상태(온/오프)나 변수들 확인
- 운전절차 및 경보 화면 : 진행되고 있는 운전절차, 경보, 주의 및 제한사항의 위배 등을 텍스트

트로 표시

- 추이 화면 : 원자로냉각재 온도나 압력과 같은 주요 변수들의 추이 표시

나머지 2개의 화면은 운전원이 직접 접근하여 필요할 경우 기기의 동작을 제어하기 위한 화면으로 이들 중 한 개는 터치스크린으로 구성하였다. 이들 화면이 제공하는 기능은 다음과 같다.

- Overview 화면 : 가열운전에 필요한 기기의 상태나 변수를 종합적으로 표시
- 모드 운전화면 : 각 운전모드에서의 제어기 동작상태 표시 및 각종 기기의 조작화면 제공
- 경보화면 : 각 변수들이 경보 설정치를 초과한 경우 초과한 정도나 중요도에 따라 색깔별로 표시
- 추이화면 : 각 제어기의 설정치, 제어변수, 제어기 출력 등의 추이를 표시

#### 4. 결론

본 연구에서는 원자력 발전소의 가열운전시 운전원의 업무부하를 줄이고, 판단 오류 등으로 인한 운전원 인적오류를 줄이기 위해 저온정지상태에서 원자로출력 2%까지의 운전을 자동화한 가열운전 자동화시스템을 개발하였다. 본 시스템을 개발하기 위해 먼저, 운전절차서 분석과 운전원 운전경험을 바탕으로 자동화 범위와 제어대상계통, 자동 운전모드, 운전유지대 등의 개발기준을 설정하였다. 그리고 이들 개발기준에 따라 지능형 감독자시스템, 디지털 분산제어시스템, 신호연계시스템으로 구성된 가열운전 자동화시스템을 개발하였다. 본 시스템을 계측제어 시험검증설비와 연결하여 개발된 각 제어기의 제어성능, 지능형 감독자시스템의 제어규칙, 이드넷과 VXI를 통한 신호연계 등을 검증하였다. 추후 연구로는 현장 운전원을 중심으로 개발된 시스템의 운전원 연계화면과 발전소 상태에 따른 감독자시스템의 최적 제어기능을 확인 검증할 예정이다. 그리고 이드넷과 VXI를 통한 통신시 동기를 맞추는 방안과 통신속도를 향상시키는 방안에 대해서도 연구할 예정이다.

#### 참고 문헌

1. Y.Inazumi and M.Takashima, "Automatic control system for plant heatup and cooldown operations in Japanese PWR plants," International Symposium on NPP I&C, Tokyo, 1992.
2. 함창식 외, 첨단 계측제어기술 개발/계측제어 기반기술 개발, KAERI/RR-1503/94, 과학기술처, 1995.
3. 권기춘 외, "원전 계측제어 시험검증설비 개발 및 응용," 한국원자력학회 '97 춘계학술발표회 논문집에 제출, 1997.
4. 김정수 외, "운전자동화를 위한 예상 임계점 계산 전산화," 한국원자력학회 '95년도 추계학술발표회 논문집, Vol. 1, pp. 135~140, 1995.
5. 정철환 외, "원전 기동운전 자동화를 위한 자동제어 운전모드 개발," 한국원자력학회 '95년도 추계학술발표회 논문집, Vol. 1, pp. 141~146, 1995.
6. 김정수 외, "자동기동 시스템에서 DCS와 G2간의 브릿지 프로그램 개발," '97 제어계측·자동화·로보틱스연구회 합동 학술발표회 논문집, pp. 106~109, 1997.

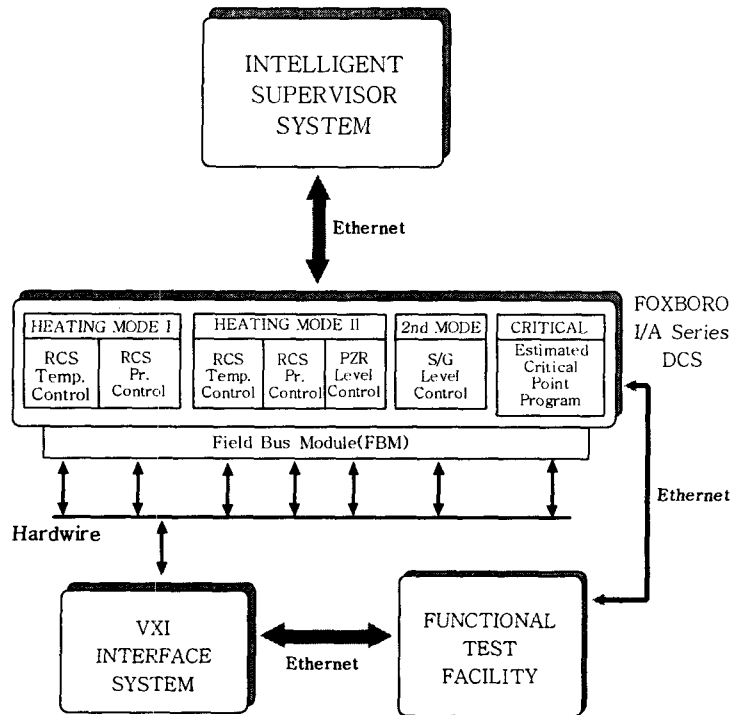


그림 1. 가열 운전자동화 시스템

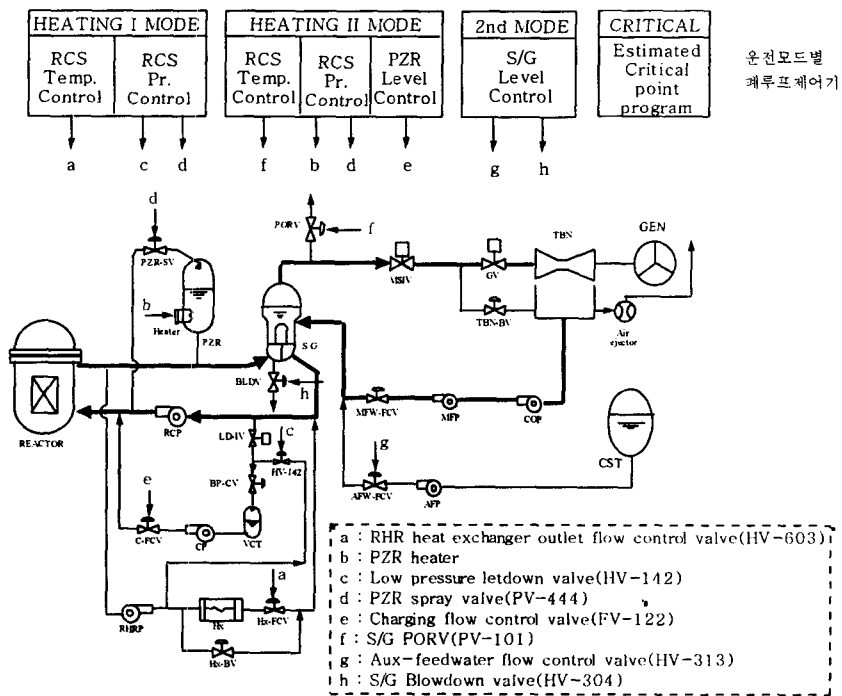


그림 2. 각 운전모드별 제어기 및 제어대상 계통