

원전 기동 운전 자동화를 위한 자동 제어 운전 모드 개발

정철환, 박재창, 김정수, 김창희, 함창식

한국원자력연구소

요약

본 연구에서는 원자로의 충수 및 배기가 완료된 상태에서부터 원자로 출력 2%까지의 운전을 자동으로 운전하는 자동기동 시스템 개발에 필요한 자동 제어 운전 모드를 개발하였다. 이를 위하여 종합 운전 절차서를 분석하고 원전 시뮬레이터를 운전하여 자동화에 필요한 운전 절차와 자동 제어 범위를 도출하였다. 자동기동 시스템 설계를 위하여 4개의 운전 모드를 정의하고 운전원의 개입이 필요한 7개의 운전 유지대를 설정하였다. 각 운전 모드 자동화에 필요한 자동 제어 알고리즘을 개발하기 위하여 운전에 필요한 제어 변수 및 제어 대상 기기를 선정하였다.

1. 서론

대부분의 가압경수로형 원전은 정상 운전시 원자로 충수 및 배기가 완료된 상태에서 고온 대기 상태까지의 가열 운전 모드, 고온 대기 상태에서 터빈 병합 전까지의 저출력 운전 모드, 터빈 병합 후부터 원자로 출력 100%까지의 고출력 운전 모드, 그리고 발전소 정지시 원자로 냉각재 온도를 상온으로 유지하는 냉각 운전 모드로 크게 나눌 수 있다. 이들 운전 모드 중 저출력 운전과 고출력 운전 모드는 많은 부분이 자동으로 운전이 가능하도록 설계되어 있지만, 가열 및 냉각 운전은 자동화가 이루어져 있지 않아서 수동으로 운전하고 있다. 이 가열 및 냉각 운전 모드에서는 수동 운전에 따른 운전원의 업무 부담이 크다. 그 원인으로는 긴 운전 시간 동안 운전원이 빈번한 운전 행위와 기기들의 상태 및 발전소 운전 상태를 계속 감시해야 하는 경우, 어떤 한 변수를 조절하기 위한 여러 가지 제어 수단이 존재하는 경우, 동일한 시간에 여러 변수에 대한 제어 행위를 수행해야 하는 경우 및 기술 지침서에서 요구하는 안전 계통의 정기 점검과 발전소 유지 보수 등을 위해 필요한 기기 배열과 감시 등을 수행해야 하기 때문이다. 일본의 개량형 경수로인 Ohi 3 & 4호기 발전소에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 이들 운전 구간에 대한 자동 제어 시스템을 개발하여 수동 운전 에 비해 조작 빈도 60%, 감시 빈도 75% 정도의 운전원 업무 부하를 줄였다[1].

본 연구에서는 발전소 기동 운전시 수동 운전 에 따른 운전원의 업무 부담을 줄이며, 발전소 상태

및 조건에 따라 최적의 운전으로 신뢰도와 이용률을 향상시키기 위한 원전 자동기동 시스템의 개발에 필요한 개념설계를 수행하였다. 자동기동 시스템을 개발하기 위하여 고리 3 & 4호기 발전소를 모의화한 CNS(Compact Nuclear Simulator)를 이용하여 운전원이 수행하고 있는 수동 운전행위를 분석하였고, 고리 3 & 4호기 일반운전절차서[2] 등을 분석하였다. 이들 분석을 통하여 자동기동 시스템의 개발전략과 자동제어 범위를 설정하였다. 그리고 자동기동 시스템 구현을 위한 운전모드 구분, 운전원의 개입이 필요한 운전유지대 설정과 운전모드 자동화에 필요한 제어변수와 제어기기를 선정하고 자동제어 알고리즘 개발을 개발하였다. 자동기동 시스템의 개발을 위한 개발환경을 디지털 제어시스템인 Foxboro I/A(Intelligence Automation) 시스템, VXI 입/출력 데이터 인터페이스 시스템 및 시험검증설비 등으로 구성하였다[3].

2. 본 론

2.1 종합운전절차서 분석

저온정지 상태에서 고온정지 상태로의 운전은 운전절차에 따라 50℃ 내지 60℃ 정도의 원자로 냉각재 온도를 176.6℃까지 가열하고, 원자로냉각재계통 압력을 25-28kg/cm²로 일정하게 유지시킨다. 고온정지 상태에서 고온대기 상태로의 운전은 원자로냉각재계통 온도를 176.6℃에서 291+1℃ 또는 291-3℃까지 가열하고, 원자로냉각재계통 압력을 157 kg/cm²까지 증가시키는 운전을 수행하게 된다. 이때, 온도 및 압력증가는 원자로냉각재계통 압력 대 온도곡선의 제한범위내에서 이루어져야 한다.

고온대기에서 2% 출력까지에는 원자로가 무부하이고, 온도는 고온대기 상태의 온도를 유지하고, 압력은 157 kg/cm² 을 유지하는 미임계 상태이다. 이 상태에서는 예상임계표를 이용하여 정확한 예상임계점을 계산하고, 예상임계점에서 제시한 제어봉 스텝과 봉산 농도를 맞추어 임계 상태가 되게 한 후 제어봉을 인출하여 출력을 2% 까지 올린다.

1차 계통이 가열되어 가면 2차계통도 이와 보조를 같이하여 예열 및 증기발생기 수위제어 등을 수행한다.

2.2 자동화를 위한 제어대상계통

원전 자동기동 운전을 위한 자동기동 시스템의 제어 대상 계통은 원자로 냉각재계통과 직접 연결된 계통 즉, 화학체적제어계통, 잔열제거계통 및 2차측 증기발생기계통이다. 그러나 원자로 냉각재계통을 중심으로 고유 기능을 가지고있는 작은 계통들은 현장 수동조작 밸브 및 스위치들 때문에 자동화하기가 어렵기 때문에 원자로에 열유체학적으로 연결된 계통은 자동화에 포함되나 이들 이외의 계통들(기기냉각수계통, 해수냉각계통 등)은 운전이 가능한 상태까지 운전원이 전원 공급 및 밸브배열을 완료하였다고 가정한다. 한편, 원자력 발전소 안전 및 계통에 큰 영향을 미치

는 기기의 운전이나 행위는 즉, 원자로 냉각재 펌프의 기동 및 제어봉인출 등은 운전원이 수동으로 조작하도록 하되 운전에 필요한 정보를 제공토록 한다.

2.3 자동기동 운전모드 개발

자동기동 시스템의 개발 범위는 원자로 냉각재의 온도가 50°C에서 292°C까지의 가열운전과 원자로출력 2%까지의 운전으로 하고 다음과 같은 기술개발 기준을 수립하였다.

- 발전소 안전과 관련된 설비는 기존의 설계개념에 따른다.
- 안전에 관련된 기기나 대형펌프는 수동운전 한다.
- 운전원 판단에 따라 수동 전환이 가능토록 한다.
- 가능한 기존의 원전설비에 적용할 수 있는 기술을 개발한다.

원자력 발전소의 운전모드는 노형과 공급회사에 따라 차이는 있으나 국내에 건설 중이거나 운전되고 있는 원자력 발전소의 경우 반응도 조건, %정격열출력 및 냉각재 평균온도에 따라 출력 운전, 기동운전, 고온대기, 고온정지, 저온정지 및 핵연료장전 등의 운전모드로 나누어진다. 각 운전모드에서는 원자력발전소 기동 및 운전을 위하여 중요한 기기의 기동이나 정지, 기술지침서에서 요구하는 안전기능점검 및 주기점검과 같은 중요한 운전행위 및 점검이 이루어지고 있으므로 자동기동 시스템에서도 그림 1 과 같이 운전모드 및 현 상황을 유지하는 운전 유지대(break point)들을 두어 기존의 기술지침서와 각종 규제사항을 점검하도록 하였다. 운전 유지대에서는 운전 중에 운전원의 확인이 필요한 사항이나 발전소의 안전과 관련된 계통을 운전 해야 하는 경우에는 운전원의 조치가 있을 때까지 상태유지에 필요한 운전변수를 운전조치전의 상태로 유지시키기 위한것이다. 그리고 어떤 운전 상태에서도 운전원의 판단에 따라 수동운전이 가능하도록 수동운전 전환 기능을 갖도록 하였다.

운전절차서 분석을 통하여 설계된 자동기동 시스템의 운전모드 및 운전유지대는 다음과 같다.

■ 자동기동 운전모드

- 가열모드 I: 60°C에서 176°C까지 운전
- 가열모드 II: 176°C에서 292°C까지 운전
- 임계모드: 원자로 임계 운전
- 2차 운전모드: 2%까지 필요한 2차 운전

■ 운전 유지대

- 운전모드 시작점(4개)
- 가압기 기포 생성 확인 및 RHR 격리
- P-6 확인
- 원자로 임계 확인

자동기동 시스템의 주요 제어대상 기기는 그림 2와 같으며, 각 모드의 주요 수행운전 및 제어 기기를 살펴보면 다음과 같다. 가열모드 I에서는 원자로 냉각재 펌프를 이용한 원자로 냉각재 가열, 가압기 전열기를 이용한 기압기내 기포 생성 및 원자로 냉각재 압력을 조절하기 위한 운전이 수행된다. 이 가열모드에서는 온도-압력곡선에 따라 과냉각여유도를 유지하도록 잔열제거계통 열교환기 출구밸브(HV-603)를 이용한 가열을 제어와 잔열제거계통 유출밸브(HV-142)를 이용하여 원자로 냉각재 압력을 설정치로 제어하도록 하였다.

가열모드 II에서는 가열모드 I의 운전이 연속적으로 이루어지며, 가열을 제어는 잔열제거 계통의 열교환기 출구밸브(HV-603)를 이용하던 것을 2차측 증기발생기 압력보호밸브(PORV)를 이용하도록 하였고, 가압기에 기포가 형성되면 원자로 압력제어는 잔열제거계통 유출밸브(HV-142)를 이용하여 압력 제어하던 것을 가압기 살수밸브(PV-444)를 이용하여 설정된 압력으로 제어토록 하였다. 가압기 수위제어는 충전유량 조절 밸브(FV-122, HV-1/2/3)를 이용하도록 구성하였다.

임계모드에서는 원자로가 임계로 가는데 필요한 예상임계 제어봉 위치를 계산하는 알고리즘을 개발하여 임계제어에 사용하고 2차 예열모드는 1차운전에따라 필요한 2차측 운전에 필요한 증기 발생기 수위를 위하여 배수는 취출수밸브(HV-304)를 이용하고 급수는 보조급수 펌프 및 보조급수 급수밸브를 이용하여 제어기를 구성하고 air eject와 진공펌프를 이용하여 진공형성 제어를 하도록 하였다.

2.4 자동기동 시스템 구성

자동기동 시스템의 개발환경은 자동제어시스템인 Foxboro I/A 시스템, VXI 입/출력 데이터 인터페이스 시스템, 그리고 시험검증설비 등으로 구성하였다. 디지털 분산제어 시스템인 Foxboro I/A 시스템은 입출력 모듈, 통신 및 제어 프로세서, 응용프로세서로 구성되어 있어 자동기동운전을 위해 구현된 소프트웨어들이 실장된다. 시험검증설비는 HP 715 워크스테이션을 사용하여 구현한 원전 시뮬레이터로서 자동기동시스템 개발에 필요한 모든 발전소 열역학적 현상과 데이터를 제공해 준다. 그리고 VXI 시스템은 신호변환 및 신호처리기능을 갖고 있어, 시험검증설비인 HP 715 워크스테이션과 자동기동시스템인 Foxboro I/A series 간의 데이터 교환에 필요한 인터페이스를 제공해 준다.

자동기동 시스템 소프트웨어는 감독자시스템을 위한 소프트웨어 블록, 예상임계점 계산을 위한 블록, 데이터베이스 블록, 펌프 제어루프 및 디지털 개루프 제어블록 등으로 구성된다. 감독자 시스템을 위한 소프트웨어 블록은 저온정지에서 2% 출력운전까지의 운전절차에 대한 로직과 발전소 상태 정보에 따라 각 제어알고리즘 블록을 감시하고 제어하는 기능을 수행한다. 발전소 정보를 위한 데이터베이스 블록은 필드버스 I/O 모듈에서 취득한 현장데이터, 시험검증설비에서 직접 네트워크를 타고 들어온 발전소 상태 데이터, 그리고 제어알고리즘 블록에서 계산된 제어량이나 설정치 등 자동기동운전중 필요한 데이터를 저장하고 추출해 주는 기능을 갖고 있다. 임계

점 계산블럭은 기존 원전에서 운전원이 수작업으로 임계점을 계산하던 것을 운전원이 임계점 계산에 필요한 변수들만 입력시키면 자동으로 임계점을 계산할 수 있도록 한 것이다. 제어알고리즘 블럭은 냉각재 온도 및 압력제어, 가압기 및 증기발생기 수위제어와 같은 펌프제어와 디지털 개루프 제어 등을 수행한다.

3. 결 론

본 연구에서는 원자력 발전소의 기동운전시 운전원의 작업부담을 줄이고 판단 오류로 인한 발전소의 정지 및 기동시간을 줄이기 위하여 저온정지 운전모드에서 임계형성 운전모드까지의 운전을 자동화하는 원전 자동기동 시스템의 개발에 필요한 자동제어운전모드를 개발하였다.

자동기동 시스템을 개발하기 위하여 종합운전절차서를 분석하고 원전 시뮬레이터를 운전하여 주요 운전절차 및 운전행위를 도출하였다. 또한 자동기동 시스템의 운전 제어모드를 정의하고 운전원의 개입이 필요한 운전유지대를 설정하였다. 각 운전모드에서 자동운전에 필요한 제어변수를 도출하고 제어대상 기기를 선정 후 자동 제어 알고리즘을 개발하였다.

앞으로 이 연구를 기반으로 하여 자동기동 시스템의 상세제어알고리즘의 구현과 사용자 연계화면을 개발할 것이다.

참고 문헌

1. Y. Inazumi and M. Takashima, "Automatic control system for clant heatup and cooldown operations in Japanese PWR plants," International Symposium on NPP I&C, Tokoy, 1992.
2. 고리 3 & 4호기 일반운전절차서, 고리원자력발전소, 1984.
3. 함창식 외, 첨단 계측제어기술 개발/계측제어 기반기술 개발, KAERI/RR-1503/94, 과학기술처, 1995.

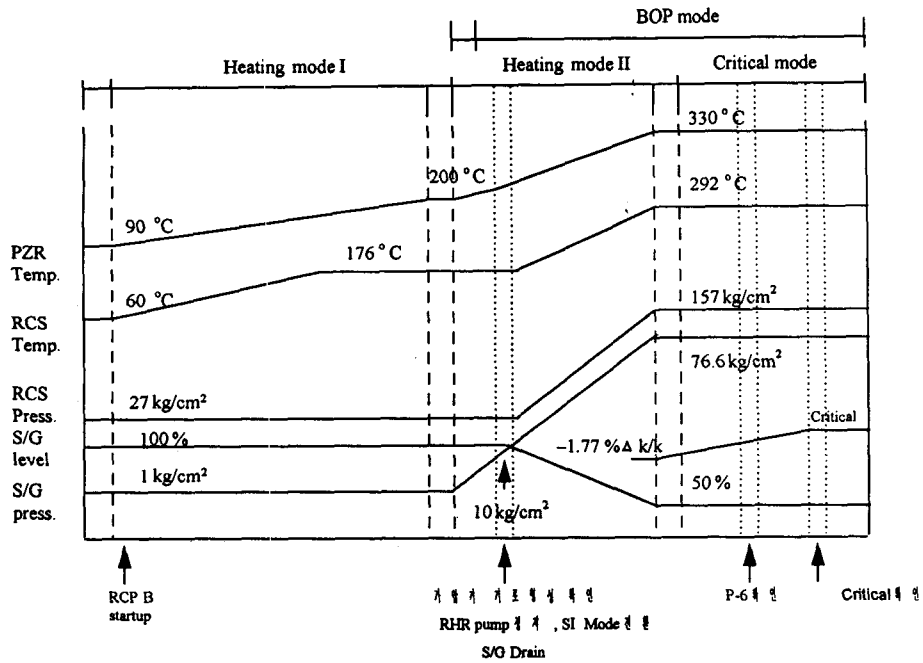


그림 1. 자동기동 시스템의 운전모드별 제어변수

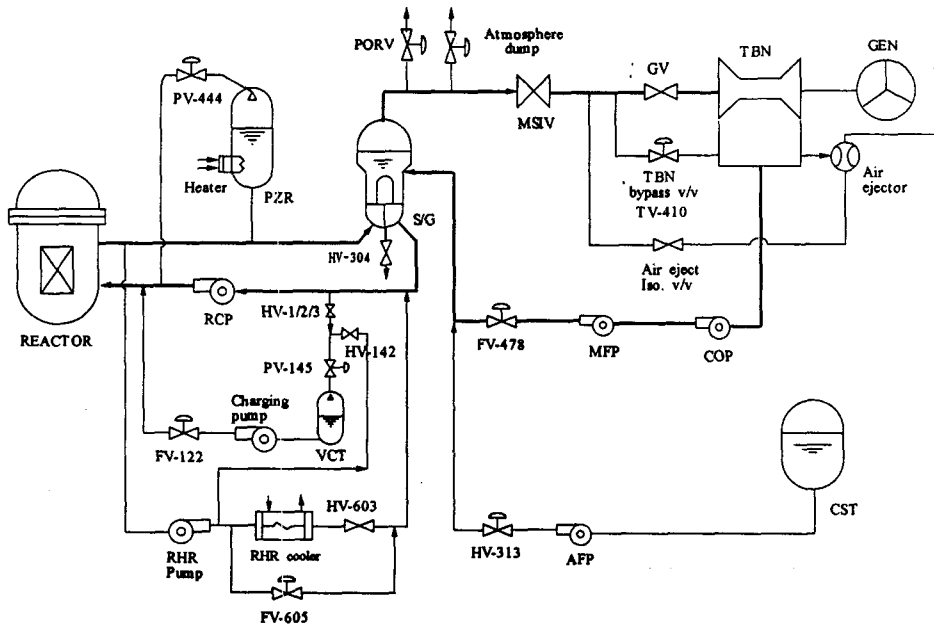


그림 2. 자동기동을 위한 주요 제어기기