2011년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2011. 7. 20 - 22

한국 표준형 원자력 발전소 원자로 제어에 관한 고찰

최인규, 우주희, 변승현
전력연구원

A Review on the Reactor Contol System of Korea Standard Type Nuclear Reactor

Inkyu Choi, Joohee Woo, Seunghyun Byun
Korea Electric Power Research Institute

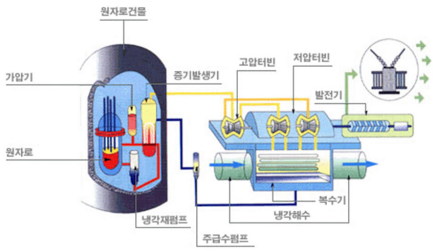
1. 서 론

최근 녹색성장의 화두와 함께 우리나라는 연구용 원자로를 요르단에 수출하고 한국형 원자력발전소인 1400MW 용량의 APR1400을 아랍에미레이트 연방에 수출하는 등 어느 때보다도 원자력에 관한 관심이 커지고 있다. 발전용 원자로는 가압 경수로형 원자로와 가압 중수로형 원자로, 비등수형 원자로, 고속 증식로 등 여러 가지가 있으나 이 논문에서는 우리나라 뿐만 아니라 세계적으로 대부분을 차지하는 가압 경수로형 원자로 중 한국 표준형 원전(OPR1000)의 제어에 관하여 고찰한다.

2. 본 론

2.1 가압 경수로형 원자력 발전소 개요

그림 1은 우리나라에서 운전중인 1,000MW 용량의 가압 경수로형 원자력 발전소의 구성도이다. 그림 1에서 격납건물 내부에 존재하는 부분을 1차 계통(NSSS:Nuclear Steam Supply System), 터빈을 통과하는 급수를 2차 계통이라 하며 1차와 2차 계통은 증기 발생기의 튜브 다발을 경계로 엄격하게 구분된다. 1차 측은 원자로, 증기발생기, 가압기, 냉각재 펌프로 구성되고 2차 측은 터빈, 발전기, 복수기로 구성된다. 핵분열이 이루어지는 원자로에 설치된 제어봉은 중성자를 잘 흡수하는 물질이고 제어봉이 원자로에 인출되면서 중성자 활동이 활발해져 핵분열이 발생하여 열에너지를 발생시킨다. 발생된 열에너지는 원자로 내부를 통과하는 냉각재(경수)에 열을 전달한다.

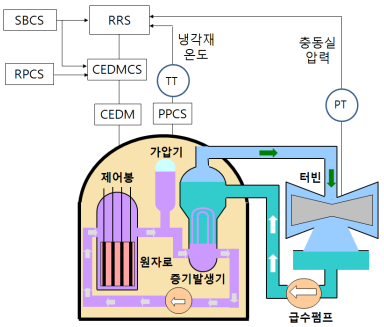


<그림 1> 가압 경수로형 원자력 발전소 구성도

냉각재 펌프는 원자로에서 발생된 핵분열 에너지로 가열된 냉각재를 증기발생기로 보내 2차 측 급수계통에 열을 전달시킨다. 증기발생기에서 열을 전달시키고 냉각된 냉각재를 다시 원자로로 이송시켜 재순환되게 한다. 증기발생기는 가열된 냉각재를 증기발생기 튜브 다발로 통과시키면서 튜브 외측의 2차 측에 열을 전달한다. 열을 전달받은 2차 측 급수는 증기가 되어 원자로 격납건물을 빠져 나와서 터빈을 회전시키고 터빈은 발전기를 구동하여 전력을 생산한다. 가압 경수로 원자력 발전소는 핵연료는 2~4%의 저농축 우라늄을 사용하며 감속재와 냉각재를 구분하여 사용하지 않고 경수(H_2O)를 같이 사용한다.[1]

2.2 경수로형 원자력발전소 1차 계통 제어

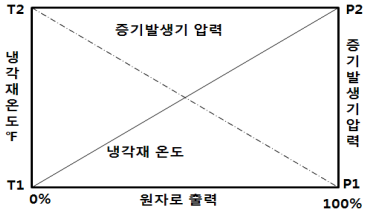
가압수형 원자로에서의 원자로 제어는 원자로 고유의 특성인 자기제어성과 각각의 파라미터에 대한 제어기의 동작으로 이루어진다. 운전 중에 어떤 원인으로 원자로출력이 증가하여도 그 출력 변동을 억제하는 방향으로 작용하는 노심 고유의 특성을 원자로의 자기제어성이라 한다. 출력이 증가하여 연료온도가 상승하면 제어봉 구성 물질(붕소, 은, 인, 카드뮴 등)이 중성자를 흡수하는 비율이 증가하기 때문에 반응도는 저하한다. 또 냉각재의 온도가 상승하면 냉각재의 밀도가 감소하여 반응도는 저하한다. 이러한 자기제어성에 의하여 운전원이 조작하지 않아도 출력상승이 억제된다. 원자로 운전 중에 생기는 작은 외란(반응도 변화)에 대하여, 이 원자로의 자기제어성이 작동하며, 또 출력 상승이 급격히 일어난 경우에도 제어기 보다 자기제어성이 선행하여 작동한다. 원자로 1차 계통을 구성하고 있는 주요 설비는 원자로(Rx:Reactor), 원자로 냉각재 펌프(RCP:Reactor Coolant Pump), 증기발생기(SG:Steam Generator), 가압기(PZR:Pressurizer) 등이 있다. 원자력 발전소 1차 계통의 주제어로는 원자로 출력제어(RRS:Reactor Regulating System), 제어봉 구동장치 제어(CEDMCS:Control Element Driving Mechanism Control System), 가압기압력 제어(PPCS:Pressurizer Pressure Control System) 및 가압기 수위제어(PLCS:Pressurizer Level Control System) 등이 있다. 또 보조 제어 설비로는 증기우회제어(Steam Bypass Control System), 원자로출력 급감발 제어(RPCS:Reactor Power Cutback System), 화학 및 체적 제어(CVCS:Chemical Volume Control System)이 있다.[1] 그림 2에 1차 계통 주제어의 개요도를 나타내었다.



<그림 2> 1차 계통 제어 개요

2.2.1 원자로 출력제어

원자로 출력제어계통은 터빈 출력에 따라 원자로 출력을 추종시키기 위한 제어계통으로 주요 파라미터는 냉각제 평균온도와 터빈 출력이다. 원자로 출력은 원자로 온도인 냉각재 실측평균온도(Tavg: Coolant Average Temperature)를 주요 파라미터로하여 제어되며 출력에 따른 냉각재 평균온도의 커브와 증기발생기 압력은 그림 3과 같다. 터빈 출력은 고압터빈 입구 증기압력인 충동실 압력을 측정하여 사용한다.



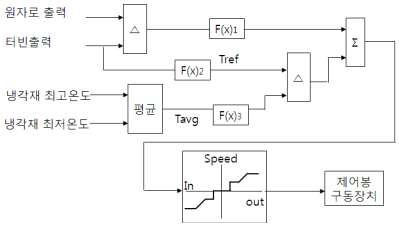
<그림 3> 원자로 출력과 제어파라미터

운전원이 터빈 출력을 조절하면 터빈 충동실 압력이 증가하여 이 신호가 원자로 제어계통으로 전달된다. 충동실 압력신호를 터빈 부하지수(TLI:Turbine Load Index)라 한다. 터빈 부하지수는 정해진 함수에 따라 냉각재 기준온도(Tref)로 변환된 후 냉각재의 실측평균 온도(Tavg)와 비교하여 냉각재 기준온도가 실측온도보다 큰 경우는 제어봉 제어계통에 제어봉 집합체를 인출시키는 신호를 보낸다.

2.2.2 제어봉 제어

제어봉 제어계통의 목적은 반응도를 조절하여 원자로 냉각재 온도를

설정치와 일치시키는 것이다[4]. 즉, 터빈 출력이 증가하는 경우 원자로 제어계통의 명령에 따라 제어봉을 인출하여 반응도를 증가시킨다. 반응도가 증가하여 발생한 열에너지 증가에 따라 온도가 상승한 냉각재가 증기발생기와 열교환하면 증기 발생량이 증가한다. 제어봉 제어를 위한 신호는 그림 3에 나타낸 바와 같이 제어봉의 삽입과 인출을 결정하는 방향신호와 속도신호로 되어 있으며 온도편차 신호와 출력편차 신호를 합한 종합편차 신호를 이용하여 발생한다. 온도편차 신호는 원자로 기준온도(Tref)와 실제 원자로 평균온도(Tavg)로 연산하고 출력 편차신호는 원자로 출력과 터빈 출력의 변화율을 연산하여 발생한다.[1]



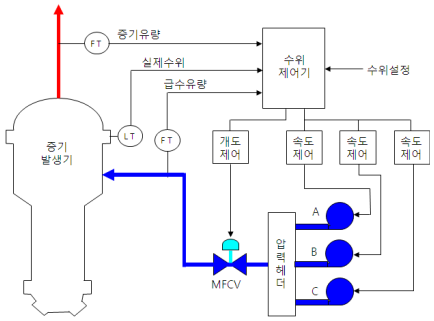
<그림 4> 원자로 제어 간략도

2.2.3 화학 및 체적 제어

냉각재 중에는 중성자를 잘 흡수하는 붕산이 용해되어 있다. 붕산수 제어는 원자로 계통의 붕산농도를 제어하여 반응도를 조정함으로서 원자로 출력을 제어하는 것이다. 이것을은 화학적 조정제어라고도 한다. 제어봉 제어는 단기적이고 즉각적인 원자로 출력제어이고 붕산수 제어는 핵연료 연소에 따른 핵분열 반응도를 보충하기 위한 것으로 장기적인 원자로 출력제어이다. 화학적 조정제어는 1차 냉각계통의 화학 및 체적 제어설비에 의해 수행되며, 연료연소에 수반하여 반응도를 변화하거나 천천히 출력을 변화시키고 싶은 경우 등에 사용된다. 또 붕소는 원자로 전체에 균일하게 분포되어 있기 때문에 노내 출력 분포가 평준화된다. 사고시에 안전주입계통에도 붕산수가 사용된다. 제어봉을 전혀 사용할 수 없는 경우에도 원자로를 저온 정지할 수 있는 능력을 가지고 있다.

2.2.4 주급수 제어

주급수 제어는 증기발생기 수위 제어로서 화력발전소의 드럼수위 제어와 거의 동일하다. 원자로 출력 20% 이상의 고부하 운전 시 주급수 제어의 개요를 그림 5에 나타내었다. 3요소 제어로서 증기발생기 수위와 증기유량 및 급수유량을 고려한다. 터빈 출력 증가로 증기 유량이 증가하면 증기량과 급수량의 편차가 발생하고 증기발생기의 수위가 변동한다. 증기발생기의 수위 제어기는 수위 변동을 검출하여 급수제어 밸브(MFCV:Main Feedwater Control Valve)의 개도를 증가시키도록 개도제어기에 제어신호를 보낸다. 동시에 급수펌프의 속도를 증가시켜서 압력헤더의 압력을 증가시킨다[3]. 그러나 출력 20% 이하에서는 증기발생기 수위만으로 제어하는 1요소 제어이다.



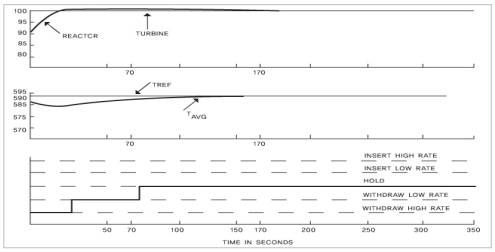
<그림 5> 증기발생기 수위제어 개요

2.3 동특성 소개

가압 경수로에서는 터빈발전기의 부하에 따라 원자로 출력을 추종시키는 제어방식을 채용하고 있다. 발전소 전체는 기본적으로는 원자로 고유의 자기제어성과 원자로 제어설비에 의하여 제어되고 있다. 다음은 1차 측과 2차 측의 평형운전 상태에서 출력 조정으로 원자로 제어의 응답을 고찰한 내용이다.

2.3.1 부하 증가(10% 계단 응답)

90 % 부하에서 에서 100 %로 계단상으로 부하가 급증한 경우의 플랜트 응답을 그림 6에 나타내었다.

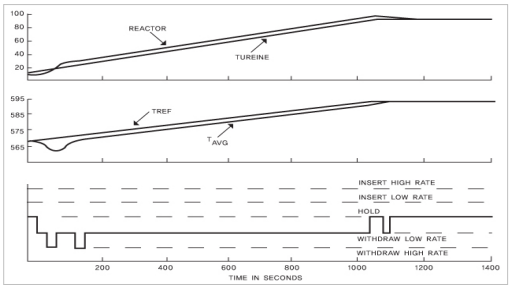


<그림 6> 부하 계단 증가시 출력과 온도, 제어봉 방향

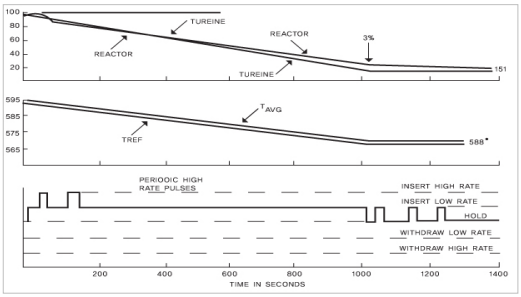
그림 6에서 부하의 증가에 대응하여 제어봉이 자동 인출되어, 원자로 출력이 초기에는 상승하나 냉각재 평균온도가 안정되면 일정하게 된다. 냉각재 평균온도는 원자로 출력과 부하와의 차에 의해 초기에는 저하하나, 상승한 부하에 대응하는 온도로 정정된다. 냉각재 온도가 초기에 저하함에 따라 냉각재 압력이 저하하는데 가압기 살수와 가열기의 작동으로 제어되어 정격압력으로 안정된다.

2.3.2 부하 증가 및 감소(15 ⇒ 100%, 5%/min 경사 응답)

최대변화율 분당 5%로 15 %에서 정격부하까지 부하가 경사상으로 천천히 증가한 경우의 응답을 그림 7에 나타내었다. 10% 계단 응답과 같이 제어봉의 자동조작과 가압기의 작동으로 최종적으로는 부하에 대응한 정격 원자로 출력, 정격 냉각재 온도 및 정격 냉각재 압력으로 안정된다. 그림 8과 같이 부하가 감소한 경우에는 반대로 된다.



<그림 7> 부하 경사 증가시 출력과 온도, 제어봉 방향



<그림 8> 부하 경사 감소시 출력과 온도, 제어봉 방향

3. 결 론

근래에 우리 나라는 원자력을 육성하여 국민 경제에 기여하려는 정책을 추진하고 있다. 그런데 원자로 냉각제 펌프를 제외한 원자로, 증기발생기 등의 기계부분은 자체 생산이 가능한 수준이나 1차 계통의 계측제어는 아직 선진국의 설비를 도입하여 운영하는 수준에 있다. 그런데 2차 계통의 터빈 발전기 제어설비는 이미 국산화하여 가동원전에 다수 실증 적용하고 있다. 따라서, 원자로를 직접 제어하는 제어봉 제어장치 등 1차 계통의 핵심 제어 장치도 기술개발을 완료하여 선진국의 영향력에서 하루 빨리 탈피해야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] “발전제어분야 고급기술자 실무향상을 위한 특별강좌” 1992년 한전 기술연구원
[2] “원전 급수펌프 구동용 터빈 제어시스템 개발” 2006년 대한전기학회 하계학술대회 논문집
[3] “원자로 제어계통 운전”, 한국수력원자력 원자력교육원
[4] “원자로 제어 및 보호 설비”, 한국전력공사 원자력연수원