

논문 2014-51-9-25

연구용 원자로의 출력제어기법 설계 및 적용사례

(Power Control Design and Application to Research Reactor)

방대인*, 이종복*, 서용석*

(Dane Baang[©], Jongbok Lee, and Yongsuk Suh)

요약

본 논문에서는 연구용 원자로의 출력제어기법 설계와 이를 실제 원자로에 적용하여 성능을 검증한 사례를 소개한다. 연구용 원자로의 출력제어를 위해 제안된 설계 원리는 오버슈트(overshoot)의 억제, 출력 증가율의 억제, 그리고 안전해석에 기반한 최대 출력치의 제한이라는 세 가지이며, 이를 만족키 위해 한국원자력연구원 내의 연구용 원자로인 하나로의 설계개념에 기반을 두어 제어 로직의 개념설계, 상세설계, 구현, 시운전을 통해 해외의 원자로에 적용하여 실제 제어 성능을 검증하였다.

Abstract

Study and application result of power controller to research reactor is presented. Considering safety-oriented design concept and other control environment, we developed a simple closed-loop controller that provides limiting function of power-change-rate as well as low-overshoot and fine tracking performance. The design result has been well-proven via simulation and actual application to a research reactor.

Keywords : 연구용 원자로, 출력제어, 출력 증가율, 오버슈트, 하나로

I. 서론

본 논문에서는 연구용 원자로의 출력제어기법 설계와 이를 실제 원자로에 적용하여 성능을 검증한 사례를 소개한다. 일반적으로 원자로는 크게 전력생산을 위한 발전로(상용로)와, 핵분열 과정에서 나오는 중성자를 이용하여 다양한 연구를 수행하는 연구용 원자로로 나눌 수 있다. 이 중 일반적으로 연구용 원자로에 적용되는 피드백 제어기법은 자동제어 모드에서 운전원이 입력한

출력 지령 값(Power Demand)을 실제 원자로 출력이 추종토록 제어봉들의 속도를 제어하는 원자로 출력 제어가 유일하며, 출력 제어의 방식은 핵분열을 일으키는 핵연료 중간에 삽입 혹은 인출할 수 있는 다수의 제어봉(CAR, Control Absorber Rod)들을 위치시키고 이 제어봉들을 모터 등으로 구동하여 이루어진다.

핵분열은 하나의 중성자가 핵분열물질(주로 우라늄-235)와 반응하여 에너지와 핵분열 생성물, 그리고 2개 이상의 중성자를 내어놓고, 이 중성자들이 다시 인근의 다른 핵분열물질과 반응함으로써 연쇄적으로 일어난다. 따라서 원자로의 출력제어란 이러한 핵분열 반응이 폭발적으로 증가하지 않고, 자연적으로 감쇄하지도 않게 원하는 출력 지령값 근처에서 유지하도록 제어하는 것이라 할 수 있다.

출력 제어기의 출력은 모터의 회전속도인데, 모터는 원자로 내에서 아래위로 움직일 수 있는 제어봉에 연결되어 있다. 제어봉의 재질은 중성자를 잘 흡수하는 물

* 정회원, 한국원자력연구원 연구로계통설계부
(Research Reactor System Design Department,
Korea Atomic Energy Research Institute)

© Corresponding Author(E-mail: dibang@kaeri.re.kr)

※ 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(신형연구로 계측제어설계, 2012M2C1A1026912)

접수일자: 2014년8월16일, 수정일자: 2014년8월26일

수정완료: 2014년9월03일

질로 되어 있으므로 모터를 구동하여 제어봉을 핵연료 근방으로 삽입하면 핵분열 반응에 필요한 중성자 수가 줄어들어 핵분열 수가 감소하며 원자로 출력도 감소하고, 반대로 제어봉을 인출하면 출력이 증가한다.

제어기에서 사용하는 피드백 신호인 원자로 출력은 핵분열 수에 비례하는데, 이 값은 중성자 계측기(Neutron Detector)를 통해 측정된다. 중성자 계측기에도 몇 가지 종류가 있는데, 본 결과에서는 광대역 핵분열 전리함(Wide-Range Fission Chamber)을 사용하였다.

본 논문에서는 원자로 출력제어기의 설계를 위한 요건과 설계결과, 그리고 제작, 설치, 시운전을 통해 얻어진 출력제어 성능을 소개한다^[7].

II. 제어기 설계

1. 원자로 출력제어기 설계요건

모든 원자로는 예상된 운전패턴을 벗어나 출력이 정격 출력의 100%이상 폭주하는 경우 등 다양한 사고 상황을 가정하여 사고 시 자동으로 원자로를 정지시키는 계통들을 별도로 설계, 적용하고 있다. 원자로 정지를 위한 계통은 서론에서 언급한 제어봉(중성자 흡수체)과 이에 연결된 기구부 사이에 설치된 전자석의 전원을 비상시에 차단하는데, 이로 인해 제어봉이 자유 낙하하여 원자로 내의 중성자를 흡수함으로써 신속히 출력을 낮추게 된다.

이러한 정지용 계통들은 엄격한 국제적 규제요건과 품질관리를 통해 거의 고장이 없는 고가의 장비를 사용하며, 혹시나 모를 고장에 대비하여 같은 종류의 장비를 2중, 3중으로 배치하고, 동일 기능을 구현하되 서로 다른 타입의 하드웨어를 사용하는 계통도 별도로 구비하며, 출력제어계통과는 일체의 간섭이 없도록 하드웨어, 네트워크이 완전 분리됨으로서 비상시 안전한 원자로 정지가 보장된다.

원자로 출력제어 논리도 이러한 정지용 계통들을 비롯하여 설계 전반의 내용을 반영하여 설계하되, 운전 중 원자로 정지계통 작동으로 인한 원자로 정지가 되도록 발생치 않도록 해야 하므로 아래와 같은 요건을 정하였다.

첫째, 원자로 출력이 정격출력의 110~120%(원자로

에 따라 다름)이상 상승하는 경우에도 정지용 계통들에 의해 원자로가 정지되므로, 출력 제어논리는 운전 중 원자로 정지가 발생하지 않도록 원자로 출력을 정격출력 내에서 잘 제어해야 한다. 따라서 원자로 출력제어용 제어기는 일단 정격출력 근방에서의 오버슈트가 적도록 설계되어야 한다.

둘째, 출력을 상승시킬 때에는 출력의 증가율(log-rate혹은 power change rate)이 일정 값 이상이 될 때에도 원자로가 정지되므로, 이를 일정 값 이하로 유지할 수 있는 논리도 포함되어야 한다. 이는 원자로 출력 값은 작더라도 증가율이 너무 크면, 경우에 따라 제한된 제어봉 이동 속도로는 원자로 출력을 충분히 빨리 감쇄시킬 수 없고, 따라서 지수 승 단위의 속도로 출력이 빨리 증가하는 상황이 발생할 수 있기 때문이다. 물론 정지 계통에도 출력증가율에 의한 정지기능이 있기 때문에 실제로는 이러한 상황이 방지되지만, 원자로 정지 없이 운전하기 위해 제어 논리 자체에서 출력의 증가율을 특정 값 이하로 억제시킬 필요가 있다.

셋째, 원자로의 여러 사고 상황에 대비하여 설계단계에서 수행하는 안전해석(safety analysis) 결과를 반영하여, 사전에 정해진 최대 속도 내에서만 제어봉을 구동하도록 설계해야 한다. 이를 위해 제어논리의 말단부에 포화(saturation) 논리를 포함하여 제어기를 설계한다. 즉, 만일 설계된 제어 논리가 실패하더라도 최소한 제어봉의 구동속도가 일정 값 이상을 넘지 못하도록 설계되어야 한다.

2. 설계 결과

상기한 3가지 요건을 만족하는 제어기법은 하나로 [2~3]의 제어논리를 근간으로 일부 수정된 형태이며 아래의 그림1과 같이 설계하였다. 하나로는 한국원자력연구원에서 자체 건조하여 1990년대부터 동위원소 생산 및 다양한 연구목적으로 활용하고 있는 국내 유일의 연구용 원자로이다. 모델 기반 설계가 아니기 때문에 제어기 입장에서 원자로를 black-box 형태로 인지되고, 원자로의 출력인 중성자 출력(원자로 출력에 비례)과 출력의 변화율만을 피드백 신호로 사용한다. 표기된 용어의 의미는 다음과 같다.

PDM: 운전원이 입력하는 출력지령치
(Power Demand)
N: 중성자 계측기가 검출한 원자로 출력
Log Rate: 원자로 출력의 변화율
G1~G4: 제어기의 이득(gain)
Reactor: 원자로
NMS: 중성자 계측기
(Neutron Measurement System)

이 제어기는 제어루프가 한번 수행되는 200ms마다 회전시킬 스텝모터의 스텝 각(step angle)의 개수를 출력한다. 즉 제어기의 출력은 200ms 동안의 스텝모터의 각 변화가 되며, 따라서 제어기는 거시적으로 스텝모터의 회전속도를 출력한다고 볼 수 있다. 스텝모터는 기어 부를 거쳐 제어봉에 연결되어 있으므로 결국 제어기의 출력은 물리적으로 제어봉의 상하 이동속도가 된다. 통상의 제어 로직 설계와 같이 이 제어기도 원자로 출력의 지령치 대비 현재의 출력간의 오차에 근거하여 속도제어를 수행한다.

그림 1에서 이 제어기는 기본적으로 *ERROR*이라는 오차 항을 사용하는데, 이 오차 항이 커질수록 제어봉을 큰 속도로 인출(윗방향)하고, 영이면 멈추고, 음으로 작아질수록 큰 속도로 삽입(아랫방향)하는 구조이다. 이후단의 필터와 적분 항은 노이즈 저감과 정상상태 오차를 줄이기 위해 추가한 것이다.

우선 가장 중요한 *ERROR*라는 오차 항을 계산하기 위해 (PDM/N) 항에 상용로그를 취하고 이득 G1을 곱한 후 [-1, 1]로 포화시키고(좌 항), 출력 변화율 항(우

항)에 이득 G2를 곱하여 감하는 구조로 구현하였는데, 원리는 다음과 같다.

먼저 원자로 운전을 시작할 당시 PDM은 큰 값이고, 현재 출력 N은 비교적 작은 값이므로 좌항은 매우 크게 되고 1로 포화된다. 이때에는 출력의 변화율이 작으므로 우항은 비교적 작기 때문에 결국 *ERROR*항이 크게 되어(약 1) 제어봉은 큰 속도로 인출된다. 제어봉이 인출됨에 따라 출력 N이 증가하여 출력 변화율이 상승하면 우 항도 커지고, 이에 따라 *ERROR*항이 작아져서 결과적으로 제어봉 인출 속도는 감소하게 된다. 이 때까지는 좌 항은 적절한 이득 G1에 의해 여전히 1로 포화되어 있으며, 우 항의 경우에는 G2의 값에 근거하여, 출력 변화율이 미리 정의된 값에 도달하면 우 항도 1이 되어 결국 *ERROR*는 영이 되고, 따라서 제어봉의 상승이 멈추는 구조이다. 이러한 논리를 통해 II.1에서 제시한 두 번째 요건이 만족된다(출력의 증가율 제한).

또한 좌항은 적절한 이득 G1에 의해, 출력 N이 지령치 PDM의 특정 비율만큼(예를 들어 80%) 커지면 비로소 1보다 작아지기 시작하는데, 이렇게 되면 상기한 출력의 증가율 제한치가 변하게 되는 효과를 낸다. 즉, 출력값이 지령치 대비 증가함에 따라 출력 변화율 제한을 더 강하게 하여 제어후반부에서는 출력이 거의 변하지 않게 제한하는 효과를 낸다.

이러한 논리를 기반으로 이후단의 이득 G3는 상기한 제어논리가 만족되는 한에서 제어기 전체의 이득을 조절하는 역할을 하며, 이를 통해 2.1의 첫 번째 요건인 저-오버슈트 특성을 얻어야 한다.

한편, II.1의 세 번째 요건을 만족시키기 위해 제어기의 말단에는 제어기 출력을 다시 일정 값으로 제한(saturation)하기 위한 UP/DOWN LIMITER가 구비되어 있다.

이후에 있는 Rod Selector 블록에서는 제어봉 인출 시에는 다수의 제어봉 중 가장 하위에 있는 것을 인출하고, 삽입 시에는 가장 상위에 있는 것을 삽입하는 방식으로 제어봉들 간 위치편차를 최소화하도록 설계하였고, 그 결과 4개의 제어봉은 거시적인 관점에서는 무리지어 상하 이동하며 원자로 출력을 제어한다. 이는 제어봉들 간의 위치가 비교적 비슷해야 노심 내에서 일어나는 핵분열 반응도 고르게 분포되어 출력의 일그러짐이 적기 때문이다.

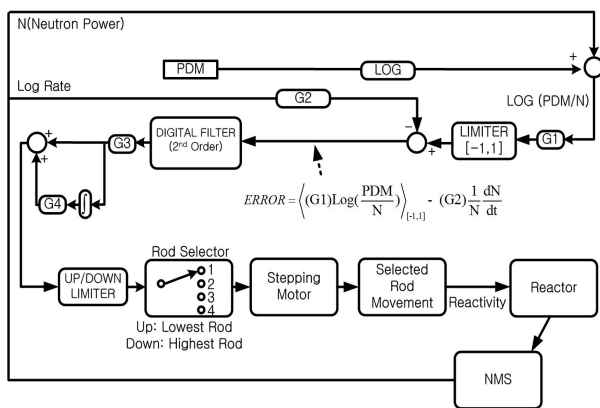


그림 1. 제시한 연구용 원자로 출력제어 논리
Fig. 1. Proposed Power Control Law for Research Reactor.

III. 원자로 적용 결과

제안한 제어 논리는 원자로 출력제어 및 계측계통의 소프트웨어/하드웨어 설계내용 중 일부로 포함되어, 원자로 제어실의 DCS(Distributed Control System) 급 컴퓨팅 기기에 구현되어 설치, 시운전 단계를 거쳤다.

이 기기와 현장의 패넬은 네트워크 통신을 하며, 현장패넬 내에도 인터페이스 역할을 하는 동급의 DCS가 내장되어 모터 드라이버와 연결되고, 모터 드라이버는 원자로 수조 근처에 설치된 제어봉의 모터와 연결되어 있다. 따라서 제어기에서 발생시킨 모터 구동 명령이 현장 패넬내의 DCS를 통해 모터 드라이버에 전송되고 모터가 구동되는 형태이다.

원자로 운전을 위해서는 먼저 냉각계통 펌프를 기동하는 등 유체적인 흐름을 운전에 맞게 안정화시킨 후 제어봉을 인출해야 하며, 원자로 운전 중 초기 임계위치(핵분열 반응에 의해 증가하는 중성자의 수가 자연 감쇄하는 수보다 많아져서 원자로 출력이 증가하기 시작하는 제어봉의 위치)까지는 운전원이 제어봉을 일일이 하나씩 선택하고 제어명령(방향, 속도, 이동거리)을 주어서 구동하는 수동운전을 수행한다.

이 원자로에서 제어봉은 최대 이동 거리의 반 정도의 위치에서 임계가 달성되는데, 이후 제어봉을 약간 더 들어 올려 일정 출력 이상이 되면 자동운전 모드로 전환되며, 이후부터는 운전원이 입력하는 출력지령값을 추종하기 위해 본 논문에서 다룬 제어논리가 적용되어 자동으로 제어봉의 상하 구동이 이루어진다.

지면상 미리 수행된 시뮬레이션 결과는 생략하였으며, 실제 원자로 출력제어(자동 운전 모드)에 적용한 결과는 그림2~4와 같다.

그림 2에서는 자동운전 모드에서 운전원이 순차적으로 출력의 지령 값(100%=1MW)을 증가시켰을 때의 실제 출력의 파형이며 전반적으로 오버슈트 없이 원활한 제어성능을 보여주고 있다. 출력의 지령값을 증가시킬 때에는 특정 값으로 증가시킨 후 충분히 정상상태(steady-state)에 도달 한 뒤 다음 값을 입력하며, 저출력에서는 입력값들간 비교적 큰 편차를 가지고 입력이 가능하나 전출력에 근접하면서 점차 입력값들간 편차를 줄이며 입력하여 과출력(110%)에 의한 원자로 정지가 발생하지 않도록 한다.

한편, 그림 3에서 전 출력(100%)운전시의 제어성능을

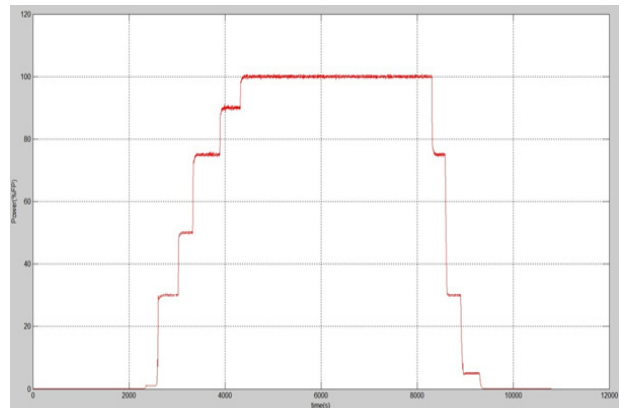


그림 2. 시운전시 제어성능(약 12000초)
(지령치 변화: 0.1%→1%→30%→50%→75%→90%→100%→75%→30%→5%→0.1%)

Fig. 2. Control Performance in Commissioning Test. (Variation on PDM)

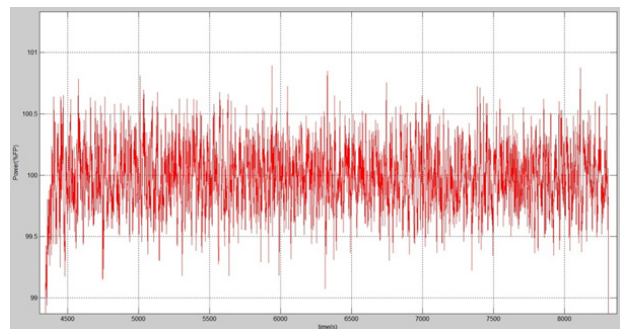


그림 3. 100%출력 근방 확대

Fig. 3. Control Performance around Full Power(100%FP) Operation.

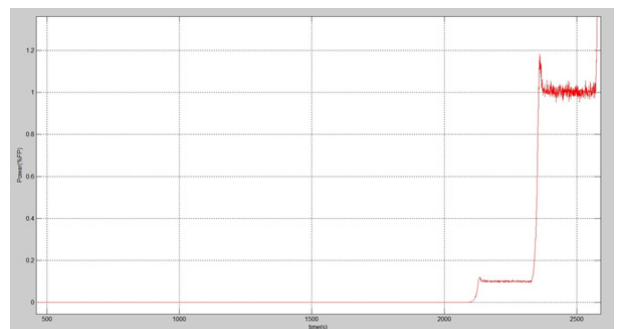


그림 4. 0.1%과 1%출력 근방 확대

Fig. 4. Control Performance around 0.1% and 1% of Full Power.

확대하여 보면 상하 1%이내에서 출력의 swing을 볼 수 있는데, 이는 중성자 분열의 증가/감쇄에 따른 진동 성분과 함께 계측기 특유의 노이즈 성분이 합산된 것이며, 순수 제어성능과의 분리, 분석은 힘드나 종합적으로 통상의 연구용 원자로 제어성능으로서는 만족할 만한

수준으로 평가하였다.

반면 그림4에서와 같이 저출력에서의 제어성능은 다소의 오버슈트를 발생하는데, 이 출력근방에서 중성자 계측기의 피드백 신호 역시 노이즈가 많으므로 제어기의 성능만이 반영된 결과로는 볼 수는 없다. 하지만 저출력 영역에서는 다소의 오버슈트로 인한 원자로 정지가 발생하지 않기 때문에, 이후의 제어에 무리가 없다면 이는 큰 문제가 되지 않는다.

또한 그림 외의 다른 실험에서 상승시간(rise-time)을 측정된 결과로는 0.001%에서 100%로 지령치를 크게 입력하였을 때 100%의 출력에 도달하기까지 1.5분 정도가 소요되었는데, 통상의 제어기 설계에서 고려하는 신속한 응답(fast rising time)은 원자로 제어에 일반적으로 요구되지 않는다. 이는 응답시간을 줄이기 위해 제어기의 이득을 크게 했을 때 일반적으로 오버슈트가 커지는 문제를 피하기 위해서이며, 보통 수 시간에 이르는 원자로 기동시간 중 제어응답의 상승시간으로 인한 시간 지연 부분은 효과가 미미하여 문제가 되지 않기 때문이다.

IV. 결론 및 향후 연구 방향

연구용 원자로의 설계, 건설, 시운전은 보통 수천억 원의 예산(상용로는 약 3조원)과 5년 이상의 기한으로 진행되는 대규모 과제이며, 이중 제어공학에서 의미 있는 피드백 제어기법의 설계내용이 시운전을 통해 실제 검증된 사례는 매우 드물다. 본 논문에서는 하나로 [2~3] 등 국산 연구로에서 제안, 적용되었고 이후 더욱 개선된 제어기법을 해외의 연구용 원자로에 실제 적용하여 성능을 얻은 결과를 간단히 도시하였으며, 이를 통해 국산의 제어기법이 해외 원자로에도 성공적으로 적용될 수 있음을 보였다.

향후에도 실제 적용할 수 있는 원자로의 출력제어기법은 측정가능 신호만을 사용하고 컴퓨팅 기기의 계산 부하를 고려, 실용적으로 간단히 사용가능한 형태로 도출되어야 할 것으로 보이며, 향후 [1,5~6] 등을 포함, 다양한 현대제어기법을 적용하여 외란과 불확실성에 더욱 강인한 형태의 제어기 설계가 필요하다.

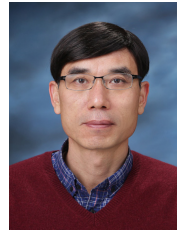
REFERENCES

- [1] D.Baang, et. al., "Adaptive Power Control for Nuclear Reactor", 18th Pacific Basin Nuclear Conference, 2012.
- [2] Noh, T.W., Sim, B.S., Rhee, B.W., and Oh, S.K., "Program Description of KMRRSIM, KAERI Technical Report", KM-031-400-01, 1989.
- [3] Noh, T.W., Sim, B.S., and Oh, S.K., "Functional Test Program for KMRR Programmable Controller, KAERI Technical Report", KM-031-400-02, 1989.
- [4] MATLAB/SIMULINK User's Guide, Mathworks, 2001.
- [5] Schultz, M.A., "Control of Nuclear Reactors and Power Plants", McGRAW-HILL, 1955.
- [6] Slotine, J.J.E. and Li, W., "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall International Press., 1991.
- [7] D.Baang, et. al. "Power Control Design and Application to Research Reactor", IEIE Summer Conference, pp.1144-1147, 2014.

저 자 소 개



방 대 인(정회원)
 1999년 고려대학교 전기공학과
 학사 졸업.
 2002년 고려대학교 전기전자전과
 공학부 석사 졸업.
 2007년 서울대학교 전기컴퓨터
 공학부 박사 졸업.
 2007년~2010 삼성전자 책임연구원,
 2010년~현재 한국원자력연구원 선임연구원
 <주관심분야 : 제어공학, 원자력공학>



이 종 복(정회원)
 1978년 충남대학교 계산통계학과
 학사 졸업.
 1994년 충남대학교 전산학과 석사
 졸업.
 2007년 충남대학교 컴퓨터공학과
 박사 수료.
 1987년~현재 한국원자력연구원 책임연구원
 <주관심분야 : 컴퓨터, 신호처리>



서 용 석(정회원)
 1987년 광운대학교 전산학과 학사 졸업.
 1996년 충남대학교 컴퓨터공학과 석사 졸업.
 2011년 충남대학교 컴퓨터공학과 박사 졸업.
 1987년~현재 한국원자력연구원 책임연구원
 <주관심분야 : 컴퓨터 및 계측제어공학>