

원자력발전소 주급수펌프구동용 증기터빈 제어시스템 현장 적용에 따른 초기 제어상수 결정

(Determinations of Initial Control Parameters According to the Application of Control System for Feed Water Pump Turbine into a Nuclear Power Plant)

최인규* · 우주희

(In-Kyu Choi · Joo-Hee Woo)

요 약

이 논문은 국내 원자력 발전소에서 급수펌프 구동용 소형 터빈의 아날로그 제어시스템을 디지털 방식으로 교체한 후 발전소를 기동하기 전에 최초 제어 파라미터를 설정하는 방법에 대하여 기술하고 있다. 기존 제어시스템의 제어상수가 알려져 있는 경우에는 초기 제어상수를 쉽게 결정할 수 있으나 보통은 아날로그 시스템의 제어상수를 파악할 수 없는 경우가 많으며 이 때 초기 제어상수와 최적 제어상수는 크게 차이가 날 수도 있다. 이런 경우에는 발전소 자체의 기동이 위험한 경우도 발생할 수 있다. 매우 간단한 실험이지만 제어기술자가 플랜트를 기동하기 위해서 매우 유용한 방법과 실제로 이를 적용한 사례에 대하여 기술한다.

Abstract

This paper describes one of the ways how to decide the initial control parameters after the analog type control system is changed to digital control system. If the old control parameters were already known, the initial control parameters for initial operation could be decided easily. But sometimes, it is very difficult for the control system developer to decide initial parameters before plant machine starts up. In that case, if there is a big difference between initial parameters and optimal parameters, the whole plant itself can be in very dangerous conditions. Here is a very simple experimental method which can be very easy but useful to engineers.

Key Words : Nuclear Power Plant, Control System, Initial Parameter, Feed Water Pump Turbine

1. 서 론

* 주저자 : 한국전력공사 전력연구원
Tel : 042-865-5412, Fax : 042-865-5304
E-mail : cik@kepri.re.kr
접수일자 : 2009년 1월 8일
1차심사 : 2009년 1월 9일, 2차심사 : 2009년 1월 23일
3차심사 : 2009년 2월 4일
심사완료 : 2009년 2월 12일

우리나라에서 운전 중인 원자력 발전소의 제어시스템은 장기 사용으로 인하여 고장요인이 상존하고 성능이 저하되고 있다. 따라서 제어시스템을 새롭게 교체할 필요성이 대두되고 있다[1].

원자력 발전소 2차 계통에서 중요한 설비인 급수 제어계는 원자로의 냉각장치로서 원자로 안전에도 중요한 요소이다. 급수제어계의 구성요소인 소형펌프의 제어 시스템은 종래에는 보통 연산증폭기와 트랜지스터를 이용한 아날로그식 제어 시스템이었으며 근래에 새롭게 설치되는 제어기는 보통 디지털 제어시스템이다.

그런데, 기존에 정상운전 중이던 제어시스템을 교체한 경우에 신규 시스템의 초기 제어상수를 운전 가능한 수준으로 결정해야 한다. 아날로그 시스템을 디지털 시스템으로 교체한 경우에 기존 제어계의 제어 파라미터가 알려져 있으면 교과서적인 변환기법을 활용하여 디지털 제어시스템의 비례이득과 적분 이득을 설정할 수 있다. 그런데, 제어상수가 알려지지 않은 경우에는 많은 어려움이 있다. 최초 제어상수가 최적의 상태에서 많이 이탈되어 있으면 플랜트가동이 불가능해지는 경우가 있으므로 주의해야 한다[3].

본 논문에서는 국내의 원자력발전소에서 운전 중이던 급수펌프구동용 소형 터빈(FWPT: Feed Water Pump Turbine)의 아날로그 제어시스템을 디지털 제어시스템으로 교체하고 최초 제어상수를 결정하는 기법을 소개한다. 제어상수를 조정하는 방법은 Ziegler와 Nichols의 한계이득법(Ultimate Gain Method), 공정반응곡선법(Process Reaction Curve) 등 여러 가지가 있다[7]. 이러한 방법은 계단입력을 인가하거나 진동을 유발하는 등 운전 중인 원자력발전소에 적용하면 대단히 큰 외란으로 원자로가 불안정하게 되고 출력감발 등 경제적 손실이 예상된다. 따라서, 발전소 정지 중 현장시험을 통한 상기의 방법은 매우 유용하다. 즉, 초기 제어상수는 위와 같은 방법으로 결정하여 플랜트를 기동하고 점차 운전을 수행하면서 시행착오(Trial and Error)에 의하여 최적의 상수를 찾아서 설정하면 큰 외란을 발생하지 않음은 물론 경제적 손실도 없이 제어시스템을 교체할 수 있다. 본 논문에서 제안한 실험적 방법으로 초기 제어상수를 결정한 후 원자력 발전소에 실증 적용하여 성공적으로 운전되고 있으므로 이에 대한 타당성이 입증되었다.

2. 기존 시스템 구성

2.1 원자력 발전소와 급수제어

원자력발전소에서 핵분열에 의하여 발생된 에너지는 일종의 대형 열교환기인 증기발생기에 전달된다. 증기발생기에는 급수가 유입되어 열에너지를 흡수한 후 증기로 변화되고 이 증기는 터빈에 유입되어 발전기를 구동한다. 원자력 발전소가 안정성을 유지하려면 발생된 열에너지와 소비되는 전기에너지가 균형을 이루어야 하며 이를 위해 에너지 전달 매체인 급수가 안정적으로 제어되어야 한다. 우리나라의 원자력 발전소는 보통 1차 계통의 안정성을 고려하여 전력계통 운용상 기저부하로 운전되고 있다. 따라서 보통의 경우 입출력 에너지는 거의 불균형이 없으나 기동 정지 및 계통 외란 시에는 불균형이 발생할 수 있다. 이 때 안정성을 신속하게 회복하기 위해서는 급수펌프의 제어성이 특히 중요하다.

2.2 증기발생기 수위제어

대상 원자력 발전소의 증기발생기 수위 제어의 개요를 그림 1에 나타내었다. 증기 유량이 증가하면 증기량과 급수량의 편차가 발생하고 증기발생기의 수위가 변동한다. 수위제어기는 수위의 변동을 검출하여 주급수제어밸브(MFCV: Main Feedwater Control Valve)의 개도를 변동시키도록 개도제어기에 제어신호를 보낸다. MFCV의 개도 증가에 따라 급수량이 증가하므로 급수헤드의 압력이 감소한다. 따라서, 증기발생기 압력과 헤드 압력의 편차가 증가하므로 이를 상쇄하기 위하여 펌프와 직결된 터빈의 속도를 증가시킨다[4].

2.3 FWPT 제어기

기존의 운전 조작은 유점점식 푸시버튼과 전위차계 등으로 수행하고, 운전상태 감시는 다이얼식 지시계, 지시램프 등을 이용하였으며 주제어기는 전자 회로카드, 전원공급기, 계전기 등의 구성 부품이 지나치게 많고 복잡한 아날로그 설비로서 연산증폭기,

원자력발전소 주급수펌프구동용 증기터빈 제어시스템 연장 적용에 따른 초기 제어상수 결정

트랜지스터 등으로 구성되어 있었다. 따라서, 교정에 많은 시간이 필요하며 정상운전 중 제어신호에 드리프트가 간헐적으로 발생하는 등 제어회로의 고장이 빈번하게 발생하였으며 다중화 미흡으로 단일고장에 의한 출력 감소를 초래하였다. 또한, 고장진단 기능이 미비하여 설비에 고장이 발생한 경우 원인 파악이 곤란하였다.

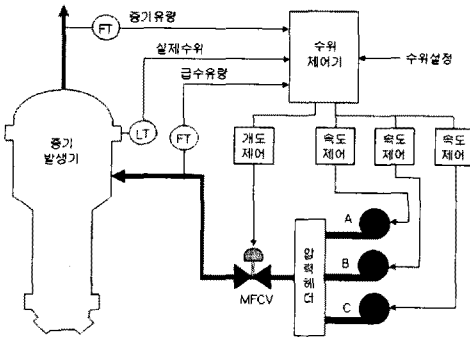


그림 1. 증기발생기 수위제어 개요
Fig. 1. Overview of Steam Generator Level Control

3. 신규 제어기 하드웨어

현재까지 상업용으로 개발된 디지털 제어기의 하드웨어는 제작사에 따라 여러 가지가 있으나 원자력 발전소와 같이 대용량 터빈에는 우선 신뢰성이 높고 충분한 용량을 갖추어야 한다. 또한, 고속으로 회전하는 터빈의 속도를 제어하고 과속도를 검출하며 동시에 유압구동 증기밸브를 원만히 제어하기 위해서는 실행시간이 5[m/sec] 정도로 충분히 빨라야 한다.

3.1 주제어기

주제어기로 사용한 하드웨어는 우드워드사의 삼중화 제어기인 마이크로넷으로 삼중화 기술을 이용한 내고장성 제어장치로서 그림 2에 나타난 바와 같이 하나의 시스템 내부에 3개로 분리된 병렬 제어시스템과 광범위한 자기진단 기능을 집적화하고 있으며, 단일 부품의 고장으로 인한 과급 확산을 방지하도록 삼중화 회로로 설계하여 오류를 방지할 수 있

고 공정제어의 지속성을 유지할 수 있다[2].

3.2 중앙처리장치

각각의 개별제어기(Kernel)에 모든 모듈의 입출력을 제어하고 터빈 제어용 응용 프로그램을 구동시키며 VME 버스를 통해 다른 개별제어기의 중앙처리장치 2대와 항시 신호를 주고 받는다. 그림 2에 나타난 바와 같이 삼중화로 구성된 입력신호는 서로 비교하여 중간값을 채택한다[2].

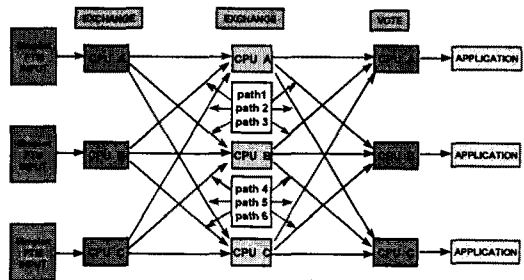


그림 2. 마이크로넷 하드웨어 CPU 연산
Fig. 2. CPU Calculation of MicroNet Hardware

4. 제어 프로그램

제어 프로그램을 구현하기 위해 사용한 소프트웨어 패키지는 마이크로넷에 프로그래밍이 가능한 동일 회사의 제어로직 작성기(GAP: Graphical Application Program)으로서 현장 터빈에 적용할 속도증감, 제어상수 조정, 수동운전, 자동운전 등의 터빈제어 프로그램을 작성하였다. 이러한 프로그램은 기존의 아날로그 제어기의 기능을 완벽하게 구현하고 추가적으로 과속도 비상정지 등의 새로운 기능을 추가하였다.

4.1 급수펌프터빈 속도 제어

그림 2에 급수펌프 구동용 터빈의 속도제어 회로를 나타내었다. 급수펌프터빈 속도제어의 목표는 급수유량을 가감하는 것이다. 이를 위해서는 수위제어기로부터 속도설정치가 입력되고 승속율을 고려하면 속도기준값으로 된다. 속도기준값과 실제속도의 편차에 비례적분제어를 적용하여 밸브개도 기준신

호가 발생된다. 속도 설정치는 속도 기준값이 추종하는 최종 목표값으로서 최초 기동시에는 600[rpm]으로 설정되고 이후 운전원의 푸시버튼으로 가감되며 운전이 진입하여 급수유량을 제어하는 경우에는 증기발생기 수위제어기로부터 발생된다.

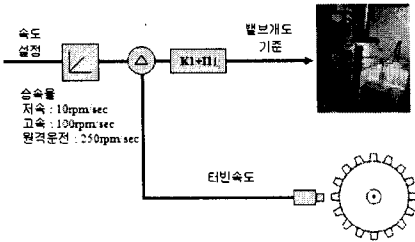


그림 3. 속도제어 개요
Fig. 3. Overview of Speed Control

승속율은 저속율(10[rpm/sec])과 고속율(100[rpm/sec])로 구분되고 펌프가 2500[rpm]에 도달하면 자동운전으로 전환되고 250[rpm/sec]로 설정된다. 이는 수위제어기의 신호를 즉시 반영하여 급수제어의 응답성을 향상시키는 효과가 있다.

4.2 증기밸브제어

아래의 그림 4는 원전 급수펌프 구동용 터빈의 증기밸브 제어 방식을 나타낸 것이다.

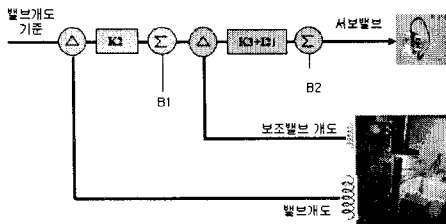


그림 4. 밸브제어 개요
Fig. 4. Overview of Valve Control

유압 서보밸브는 작은 유량으로 보조밸브의 개도를 조절하고 보조밸브는 유압 증폭기로 되어 큰 유량으로 주밸브의 개도를 직접 조절하므로 즉, 이중적분 구조이다.

개도 설정치와 밸브개도가 일치되어 있는 상태이면 보조밸브와 서보밸브는 중립점(보통 50[%]개도)

에서 운전된다. 이 때, 수위제어기에서 입력되는 밸브개도 기준신호가 변동되면 편차신호에 의하여 보조밸브 개도 설정치가 변동되고 이에 따라 서보밸브의 전류가 변동되어 보조밸브의 개도가 변동한다. 이에 따라 변동된 주밸브의 개도가 개도 설정치와 일치하면 보조밸브의 개도는 중립점으로 복귀하고 서보밸브 스펙도 중립점으로 복귀한다[5].

5. 기존 제어계 조사

급수펌프터빈 속도제어의 목표는 급수유량을 가감하는 것이다. 이를 위해서는 수위제어기로부터 속도설정치가 입력되고 승속율을 고려하면 속도기준값으로 된다. 아래 그림을 참고하면 알려져 있지 않은 제어상수는 다음과 같으며 발전소 기동전에 반드시 결정해야 한다.

- K1, I1, K2, K3, I2

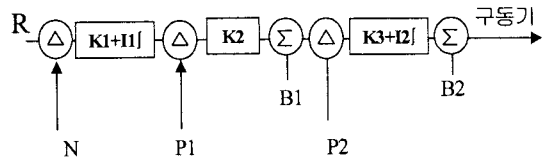


그림 5. 급수펌프구동용 터빈제어 회로
Fig. 5. Turbine Control Circuit of Feed Water Pump

상기 제어상수를 결정하기 위하여 다음과 같은 시험을 수행한다.

- 가. N 신호를 모의로 입력한다.
- 나. R을 조절하여 P1을 조절한다.
- 다. P1이 원하는 값에 도달하면 R을 조절하여 N과 같게 한다.
- 라. R을 10[%] 상향 조절한다.
- 마. P1의 변동을 기록계로 기록한다.

위와 같이 시험한 결과 그래프는 다음과 같다

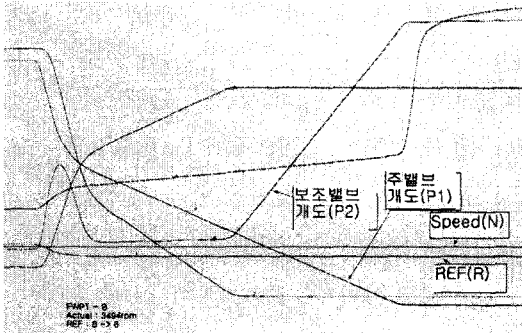


그림 6. 기존 제어시스템 파형
Fig. 6. Waveform of the Old Control System

6. 신규 시스템 초기 제어상수 설정

신규 시스템을 설치하고 제어상수를 결정하기 위하여 다음의 그림 7과 같은 순서도에 의하여 시험을 수행한다.

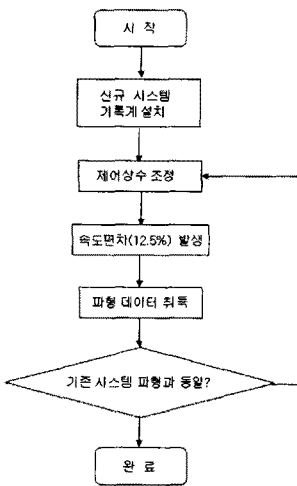


그림 7. 제어상수 결정 시험 순서도
Fig. 7. Flowchart of Control Parameter Determination

그림 6의 기존 제어시스템 파형과 최대한 근접한 파형이 되도록 신규 시스템의 제어상수를 조정하여 최종적으로 결정된 내용을 정리하면 다음과 같다.

- K1 : 8.0 ○ I1 : 0.4
- K2 : 1.0 ○ K3 : 9.0

○ I2 : 0.3

기존 시스템과 신규 시스템은 제어루프가 동일하다. 기존 시스템에 있어서 12.5%의 일정한 편차에 대한 응답을 시험하여 제어 변수의 파형을 얻은 다음, 신규 시스템에서도 12.5%의 동일한 편차에 대하여 기존 시스템과 동일한 파형이 나오도록 신규 제어상수를 조정하여 검증하므로 시험방법의 안정성과 검증성은 확인된 것으로 판단된다. 신규 시스템에서 최종 결정된 제어상수를 적용하면 제어변수의 거동이 기존에 운전 중이던 제어시스템과 동일하다. 그런데, 기존의 제어계는 안정했으므로 15년 동안 운전해 왔다. 따라서, 동일한 효과를 보여주는 신규 제어계도 또한 안정할 것으로 판단되며 이는 실제 운전을 통해서도 확인되었다. 즉, 제어시스템 교체 후 무부하 운전과 부분부하 운전 및 전부하 운전 그리고 병렬운전에서도 아무런 이상징후 없이 운전되었다. 또한, 급수펌프 구동용터빈 1대가 불시에 정지되어 33.3%의 급수유량을 상실하는 외란이 발생하여도 안전하게 운전되었다.

7. 제어시스템 현장 적용

대상 원자력발전소의 FWPT는 정상운전 중 3대가 부하를 분담하여 운전하는 방식이다. 신규 제어 시스템을 설치하여 발전소 기동시 70% 출력까지 FWPT-A와 FWPT-B의 기동한 결과를 기술한 후, 전부하 운전상태에서 FWPT-A가 고장으로 정지되어 급수계통에서 분리된 내용에 대하여 기술하면 다음과 같다.

7.1 FWPT-A의 운전

그림 8의 전반부는 원자로 출력이 2%에서 FWPT-A를 최초로 기동한 후, 원자로 출력이 5%에 도달하자 FWPT-A를 원격제어 운전(증기발생기수위 자동제어)으로 전환하여 속도가 일정하게 제어되고 있는 모습이다. 이 상태에서 FWPT-B를 수동으로 3500[rpm] 정도로 승속하여 증기발생기에 급수가 유입되자 FWPT-A의 속도가 소폭 변동하며 감소하고 있다. FWPT-B의 속도가 더욱 증가하여

3,700[rpm](FWPT-A의 밸브개도=50[%])에서 원격 제어 운전으로 전환되자 FWPT-A의 밸브개도는 23[%], 속도는 3727[rpm]으로 감소하였다. 이 상태에서 속도 편차는 5[rpm]이내로서 매우 안정된 운전을 보여주고 있다.

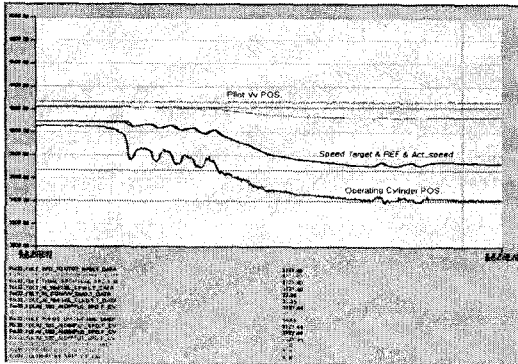


그림 8. FWPT-A 운전(FWPT-B 원격전환)
Fig. 8. FWPT-A Operation(FWPT-B Remote to Transfer)

7.2 FWPT-B의 운전

그림 9의 전반부는 FWPT-B를 수동으로 승속하는 그래프이다. 증기발생기 수위 제어기의 원격제어 신호(CFWS: Customer Feed Water Signal)는 일정하게 유지되다가 속도기준과 실제속도가 2,900[rpm] 정도에 도달하자 실제속도를 추종하고 있다. 후반부는 터빈의 속도가 3,700[rpm] 정도(그림 9의 P1)에서 원격운전으로 전환하여 운전되는 모습이다. CFWS 신호와 실제속도가 일치되어 양호하게 제어되고 있다.

그림 10은 FWPT-B 운전 데이터 중 보조밸브와 밸브의 개도를 나타내고 있다. 보조밸브개도(Pilot Vv Pos)는 70[%]를 중립점으로 운전되고 있으며 밸브개도(Operating Cylinder POS.) 속도와 비례하여 증가하고 있다.

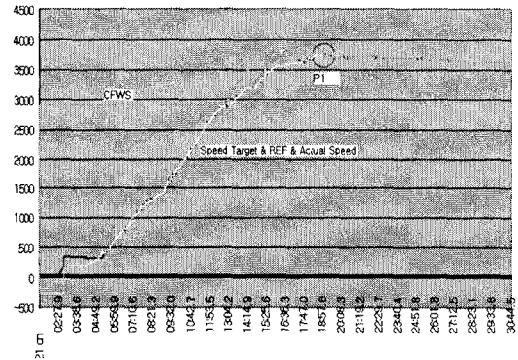


그림 9. FWPT-B 기동 및 원격운전(속도)
Fig. 9. FWPT-B Startup and Remote Operation (Speed)

후반부에서 밸브개도가 일정한 것은 속도 변동이 없기 때문이다.

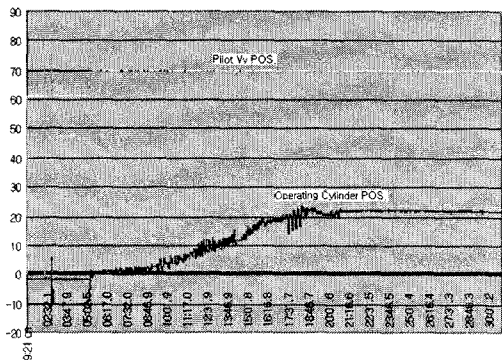


그림 10. FWPT-B 기동 및 원격운전(밸브개도)
Fig. 10. Startup and Remote Operation (Valve Position)

7.3 FWPT-A 고장 정지

그림 11은 FWPT-A, FWPT-B, FWPT-C 3대가 자동 운전으로 발전소 전부하 상태에서 FWPT-A의 고장 정지로 인한 과도상태를 나타내는 파형이다. 파형을 고찰하면 FWPT-A의 증기제어밸브가 수직으로 닫히고 증기에 의한 구동력이 없으므로 속도는 자연감속하고 있다. 이에 따라 급수량이 부족하여 증기발생기 수위가 변동하고 있으나 FWPT-B와 FWPT-C의 증기밸브 개도가 증가하고 이에 따라

각각의 속도가 증가하여 발전기의 전기출력은 거의 변동하지 않는 것을 확인할 수 있다. 급수계통에서 급수펌프 1대가 탈락하는 큰 과도상태에서도 발전기 출력은 변동하지 않고 급수제어계는 안정한 것을 알 수 있다.

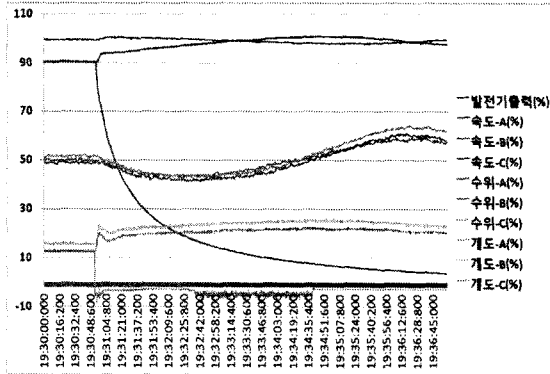


그림 11. FWPT-A의 고장시 운전 파형
Fig. 11. Waveform at fault of FWPT-A

실제 발전소의 제어시스템이 변경될 경우, 본 논문에서 제안한 방법에 의하여 결정된 상수는 최적 제어상수는 아니지만 최초 기동을 위해서는 매우 유용한 방법이다.

8. 결 론

원자력 발전소의 증기발생기는 원자로에서 발생하는 열에너지를 냉각하는 중요한 역할을 한다. 증기발생기는 수위제어가 중요하며 이를 위해서는 급수펌프 구동용 터빈 조속기의 성능이 중요하다. 이 논문에서는 국내에서 개발하여 국내 원자력 발전소에 실증 적용하여 운전중인 주급수펌프 구동용 터빈의 조속기를 소개하였으며 현장시험에 의한 초기 제어상수 결정기법에 대하여 고찰하였다. 기존 아날로그 제어 시스템 제어 파라미터가 알려져 있지 않은 경우에는 간단하면서도 매우 유용한 방법이다. 제어시스템 교체 후 초기 제어상수는 운전의 성패를 좌우하는 중요한 파라미터로서 초기 제어상수가 결정되더라도 정상운전에서는 공정 제어계통의 응답이 만족하지 못한 경우가 있다. 이런 현상은 실시간 아

날로그 제어시스템이 이산시간의 디지털 방식으로 변경되었기 때문에 나타나는 현상이다. 즉, 디지털 제어기의 특징인 샘플링으로 인하여 제어기의 상태가 달라졌으므로 초기 운전시 제어의 질이 불량한 경우에는 미세조정을 다시 수행할 필요가 있다.

장기 사용한 원자력 발전소의 제어시스템을 교체한 후 신뢰성을 확인하는 것은 특히 중요하다. 이번 연구개발 및 실증시험을 토대로 신뢰성과 성능이 확인된 펌프터빈제어 시스템을 화력발전소 등 여러 가지 플랜트에 확대 적용이 가능하다.

References

- (1) 송성일, 정창기, 김종안, 최인규, 우주희, "원전 FWPT 제어시스템 개발" 최종보고서, 전력연구원.
- (2) Woodward Governor Company, "Installation and Operation Manual, MicroNet Digital Control", pp.65-117, 2000.
- (3) 최인규, 정창기, 김종안, 우주희 "제어시스템 교체시 초기 제어상수 결정 기법에 관한 연구", 제어자동화시스템 심포지엄 논문지, pp.654-656, 2007.
- (4) 최인규, 김종안 "원전 급수펌프구동용 터빈제어시스템 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1885-1886, 2006.
- (5) "보일러터빈 제어", 한국발전교육원, 2004.
- (6) 안병주 "원자력발전소 주급수펌프터빈 디지털 제어시스템 성능시험" 충남대학교 석사학위논문, 2005.
- (7) 박선원, 양대륙, 이관순, 이지태 "공정동특성 및 제어" 희중당, 1989.

◇ 저자소개 ◇

최인규 (崔仁圭)

1967년 1월 26일생. 1993년 전북대 전기공학과 졸업. 2004년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전전력연구원 선임연구원.

우주희 (禹周希)

1970년 2월 24일생. 1993년 경북대 전자공학과 졸업. 1995년 동대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 한전전력연구원 선임연구원.