

노내 핵계측 계통 구동기기의 전자식 한계스위치 개발

(Development of Electronic Limit Switch for the Drive Unit of Incore Detector System Application)

박종범* · 양승권** · 이상호***

(Jong-Beom Park · Seung-Kwon Yang · Sang-Hyo Lee)

요 약

본 논문에서 원전의 핵연료 다발의 중성자속을 측정할 수 있는 노내중성자속 감시계통의 구동모터를 제어하기 위한 스위치의 오동작 원인 분석 및 이 문제를 해결하기 위한 방안을 제시하고자 한다. 노내중성자속 감시계통은 검출기 안내관을 통해 검출기가 노심으로 삽입되거나 인출될 경우 점접신호를 발생하는 기계식 스위치레버를 장착하고 있다 그러나 기계적인 열화나 환경적인 요인에 의해 기계식 스위치레버의 특성이 점점 변화되어 마침내 잘못된 점접신호를 발생하게 된다.

그러므로 이들 문제 해결을 위해 기계식 스위치 대신 전자식 스위치를 검출기 안내관 밖에 배치하였고, 공진효과를 이용하여 점접신호를 발생하는 회로개선과 소음 및 전기적 방해물 방지하기 위한 콘덴서를 전자회로 전원 입력측에 설치하였다. 이러한 개선을 완료한 후, 여러 조건하에서 이 향상된 스위치 제어회로를 반복적으로 시험하였는데, 결국 이를 통해 원하는 점접신호를 얻게되었을 뿐 아니라 발전소 정상운전 중에 관련시스템의 주기시험을 통해서도 검출기 점접 오동작 신호가 발생되지 않음을 확인할 수 있게 되었다.

Abstract

In this paper, we study a cause of malfunction of switch to control drive motor in DFMS(Digital Flux Mapping System) which can measure incore neutron flux of the nuclear plant, and develop a method to solve this problem. DFMS has the type of generating contact signal by mechanical switch lever, which is operated whenever thimble detector inserted or withdrawn through thimble Guide Tube. However the characteristics of the lever tend to be changed by mechanical degrade or bad environment and the lever finally generates erotic contact signal.

Therefore we installed electric coil ass'y in the outside of Guide Tube instead of mechanical switch ass'y. In addition, we applied resonance effect to control circuit and installed condenser in the input of power supply to protect noise and interference. After completion of this improvement, we tested this improved device repetitively under the various conditions. In conclusion, we identified the generation of the desired contact signal and the prevention of detector failure through plant surveillance test during normal plant operation.

*정회원 : 한전 전력연구원 선임연구원
**정회원 : 한전 전력연구원 선임연구원

***정회원 : 광운대학교 제어측공학과 교수
접수일자 : 2000년 1월 12일

1. 서 론

최근 우리의 생활과 산업이 급속도로 발전하고 새로운 문명의 이기들이 개발되어 사무실, 공장 그리고 각 가정에서 필요로 하는 전력은 이에 비례하여 증가하는 추세에 있다. 그러나 필요한 전력을 충당하기 위한 발전 설비의 확충은 설비의 규모(장소, 비용등) 때문에 장기 계획에 의해 이루어질 수밖에 없는 현실이다. 따라서 현재의 발전설비들을 효율적으로 이용하여 원활한 전력수급은 운영중인 모든 발전설비의 정상적인 가동여부에 달려 있다고 할 수 있다. 자원과 환경 등의 여러 가지 요인에 의해 원자력 발전은 점차 그 비중이 높아지고 있고, 국내에서도 원자력 발전은 기저부하를 담당하여 안정적인 전력 공급에 큰 몫을 담당하고 있다. 그러나 이와 같은 긍정적인 효과에도 불구하고 안전성을 우려하는 회의적인 시선이 끊이지 않고 있으며 방사선 관리구역 내에서의 작업원들의 방사선 피폭이라는 문제가 발생하고 있다.

원자력 발전소의 중요설비중의 하나인 노내 핵계측 계통(Incore Detector System)은 검출기 구동장치(Detector Drive Unit)와 제어반(Control Console)으로 구성되어 있으며 여러개의 마이크로 프로세스(Multiple Microprocessors)를 사용하여 노심내 3차원의 중성자속(Neutron Flux)분포를 자동적으로 측정할 수 있다. 검출기기의 구동장치는 고가의 중성자속 검출기를 안내관(Guide Tube)을 통해 노심 내에서 상하로 움직이게 하고 제어반은 검출기 구동장치의 중성자속 분포에 대한 자료 수집 및 처리를 담당한다. 또한 검출기는 노심으로 삽입·인출되면서 센서가 중성자와 반응하여 감지된 신호를 전기신호로 바꾸어 주제어반(Main Control Room:MCR)의 콘솔(Console)에 제공함으로써 노심운전상태를 감시하고 노외 핵계측 계통(Nuclear Instrumentation System)교정, 노심내핵연료 연소 부적합 여부 판정, 노심내 핵연료 장전후 잘못 장전된 핵연료 판정 및 실제 제어봉 위치와 스텝 계수기의 편차 추적등의 다양한 기능을 제공한다[1-4]. 아래 그림1은 발전소내의 노내 핵계측계통 개략도를 나타내고 있다.

본 논문을 통해 기존 경수로형 원자력발전소 기계식스위치의 문제점 및 결함원인을 고찰하여보고 그 원인을 해결하기 위한 전자식 한계스위치의 설계과

정을 제시하고자 한다[5]. 아울러 한계스위치의 동작 원리 및 내고장성 특성, 그리고 현장 적용을 통한 안전성 입증과정을 상세히 기술하고자 한다.

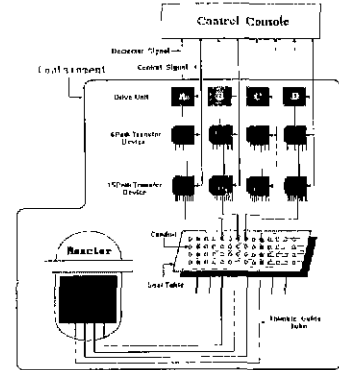


그림 1. 노내 핵계측계통 개략도
Fig. 1. Incore instrumentation system

2. 스위치 고장원인과 개발 원리

3.1 스위치 결함원인

기존의 중성자속 감시계통은 수동 혹은 자동운전시 검출기가 노심내로 삽입·인출될 때마다 검출기 레버접점을 단속하는 방식을 취하는데 이때 격납용기 내부의 진동과 열 등 환경적 요인 및 잦은 접촉으로 레버의 휘어짐 및 레버와 검출기와의 접촉위치(Contact Position)변경이 자주 발생하기 때문에 스위치 오동작 및 동작불능의 원인이 된다. 이와 같은 문제점을 해소하기 위해 레버 고정축 위치를 바꾸고 레버길이를 연장시켜 레버의 좌우 이동 폭을 확장시키는 등의 개선작업이 이루어졌으나 역시 근본 결함원인(스위치 오동작)은 제거되지 못했다. 그림2와 그림3은 각각 기존의 기계식 스위치 정면도와 측면도를 나타낸다

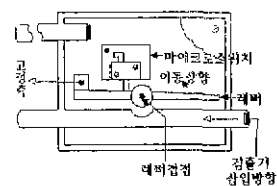


그림 2. 기계식 스위치 정면도
Fig. 2. The front plan of mechanical switch.

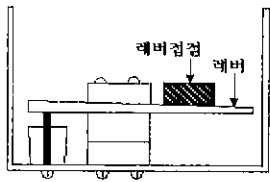


그림 3. 기계식 스위치 측면도
Fig. 3. The side plan of mechanical switch.

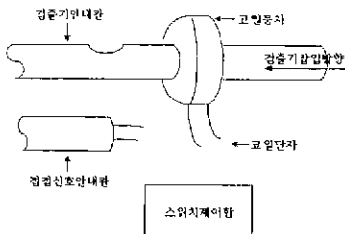


그림 4. 전자식 스위치 개략도
Fig. 4. Schematic diagram of electronic switch.

케이스는 제거한 상태임)

(전자식 한계스위치란 : 노내 핵계측기 계통 검출기 삽입/인출 시 상태변화를 코일로 감지하여 접점신호를 전송하는 장치)

2.2.1 동작원리

그림5에서와 같이 솔레노이드 코일 양단에 일정한 전압을 가할 때 흐르는 전류 및 인덕턴스 값을 각각 i_0, L_0 라고 하자. 그리고 검출기 시편(자화성 물질)의 코일봉치 내부를 관통시 코일에 흐르는 전류 및 인덕턴스를 각각 i_i, L_i 라 하자.

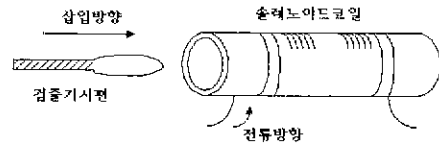


그림 5. 인덕턴스에 대한 변화측정 모형도
Fig. 5. A model picture of change measurement at inductance.

2.2. 스위치 개선 과정

기존의 기계식 스위치를 그림4와 같이 코일감지 전자제어방식으로 개선하였다.(기존의 기계식 스위치

이때 코일에 흐르는 전류값 변화(Δi)를 전압값 변화(ΔV)로 바꾸어 증폭시킬 경우 인출제한스위치 제어에 필요한 출력신호를 얻게 된다. 또한 이 코일에

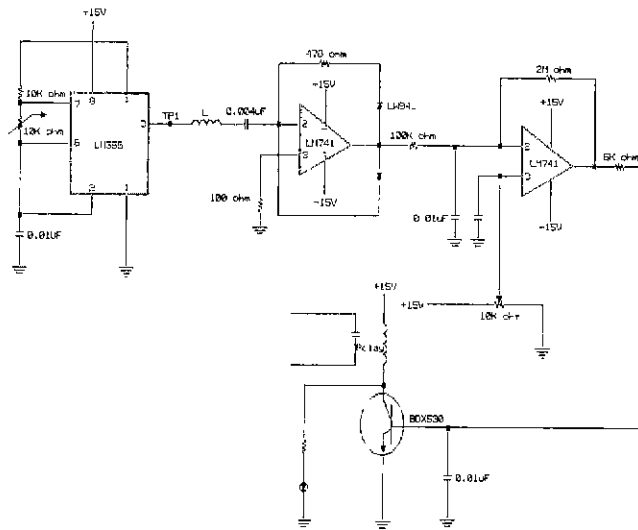
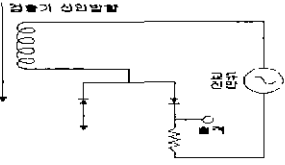
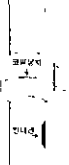
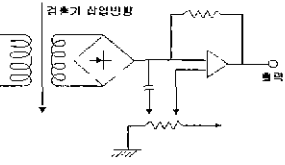

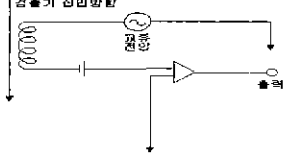



그림 6. 스위치 제어회로
Fig. 6. The switch-control circuit.

표 1. 코일모듈과 전압이득 비교
Table 1. Comparisons of Coil Module and Voltage Gain

전압이득비율	관련 회로	코일 모델
<p>a. 단일코일 풍치로 구성하여 코일, 저항에 의한 증폭회로 구성. 전압이득비율(삽입:인출) 약 1 : 2</p>		
<p>b. 이단코일 풍치로 구성하여 코일, 저항에 의한 증폭회로 구성. 전압이득비율(삽입:인출) 약 1 : 2</p>		
<p>c. 단일코일로 구성하여 코일, 저항콘덴서에 의한 공진증폭 회로 구성 전압이득비율(삽입:인출) 약 1 : 22.8</p>		

콘덴서를 연결하고 외부에서 필요한 주파수를 갖는 펄스를 입력하여 공진상태를 만들어줄 경우 그 전압 변화폭은 더욱 커지므로 이 효과를 직접 스위치 제어회로에 적용하면 경우 명확한 스위치 제어신호를 얻을 수 있게 된다.

2.2.2 스위치 제어회로

그림6은 설계한 스위치 제어회로를 보여준다. 검출기 인출 상태에서 회로의 발진기(LM555) 가변저항(10kΩ)을 조정하면서 발진주파수를 증가시키면 코일의 공진주파수(f_0)값과 발진주파수 값이 일치되는 점을 찾게 된다. 이때 LC회로에는 비 공진시의 전류보다 증가된 전류가 증폭기, 정류기를 통과하면서 릴레이회로를 구동시켜 접점이 떨어진다(Open상태). 반면에 검출기 삽입 상태에서는 비공진 상태가 되어 회로에 감소된 전류가 흐르게 되므로 릴레이 접점이 붙게된다(Close상태).

2.3 코일배치 모델에 따른 실험 및 적용

2.3.1 코일배치 모델에 따른 전압이득 비교
코일배치 모델의 측정 실험은 여러 형태의 모델로

실험되었으며, 대표적인 아래 표1과 같이 크게 3부분으로 나누어서 실험되었다. 표1에서 알 수 있듯이 가장 전압이득 효율이 큰 것으로 평가된 C를 모델로 선택하여 개발된 회로에 적용하였다.

2.3.2 코일 인덕턴스 측정 부분

코일 인덕턴스 측정은 그림5와 같이 시험용 코일을 만든 후 측정된 코일 내부저항값을 1072[Ω]으로 고정시키고 코일에 검출기 시편을 삽입시킨 상태에서 입력전압 102.3[V], 60[Hz]를 가한 경우에 측정하여 얻어진 전류값이 746[mA]였고, 인출 상태의 측정 전류값은 92[mA]였다. 따라서 검출기 시편 삽입시 전류값 i 을 구하기 위해 식(1),(2)에 대입하면 아래와 같다[6,7].

$$i = \frac{V}{Z} \quad (\text{단 } Z = R + j\omega L, \omega = 2\pi f) \quad (1)$$

$$i_i (\text{삽입시}) = \frac{V_i}{R + j\omega L} = 0.0746 [A] \quad (2)$$

(2)식에 입력전압값 $V_i = 102.3[V]$ 을 대입하여 Li(인덕턴스)값을 구하면 다음과 같다.

$$L_i = 2.2684[H]$$

동일한 방법으로 검출기 시편 인출시 전류값 i_0 를 구하면 식(3)과 같다.

$$i_0(\text{인출시}) = -\frac{V_i}{Z}$$

$$= \frac{V_i}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \angle -\tan^{-1} \frac{\omega L}{R} = 0.092[A] \quad (3)$$

식(3)에 입력전압값 = 102.3[V]를 대입하여 L_0 (인덕턴스)값을 구하면 아래와 같다.

$L_0 = 0.783[H]$ (단 L_0 는 공진(인출)시 회로인덕턴스, L_i 는 비공진(삽입)시 회로인덕턴스를 의미함)

3. 개발한 회로의 적용 및 전압이득 판정

3.1 회로의 적용

아래 그림7은 개략적인 스위치 제어 회로도이며 가변저항 R을 조정(RLC회로이므로) 시정수를 조정하여 펄스 변화 가능하면서 코일 "L"을 통해 검출기 시편이 인출된 경우에 공진되도록 설계한다. 여기서 총 임피던스를 표시하면 식(4),(5)와 같다.

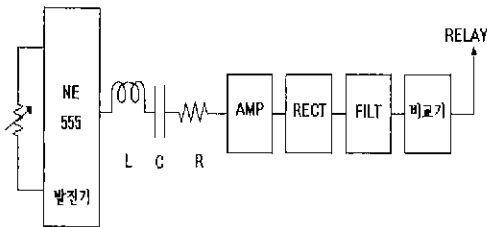


그림 7. 스위치 제어회로의 개략도
Fig. 7. Schematic diagram of the switch control circuit

$$Z_t(\text{총 임피던스}) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (4)$$

$$|Z_t| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (5)$$

위 식에서 공진조건 ($\omega L = \frac{1}{\omega C}$)을 만들어 주면 임피던스는 순저항R 성분만 남게되고 제어회로는 공진상태로 된다. 이때의 공진주파수(f_0)값을 구하면 아래와 같다.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C}} \quad (6)$$

식(6)에 대입하면 $\omega_0 = 16484$

단 L_0 : 공진시 인덕턴스

C: 콘덴서

f_0 : 공진 주파수

$$\therefore f_0 = \frac{16484}{2\pi} = 2.624[kHz]$$

검출기가 삽입된 상태에서의 주파수(f_i)값을 구하기 위해 동일한 방법으로 정리하면 식(7)과 같다.

$$\omega_i = \frac{1}{\sqrt{L_i C}} = \frac{1}{\sqrt{2.26841 \times 4.7 \times 10^{-9}}}$$

$$= 96847 \quad (7)$$

단 L_i : 비공진시 인덕턴스

$$\therefore f_i = 1.54[kHz]$$

따라서 $\frac{f_0}{f_i} = 1.7$ 이 되므로 $f_0 = 1.7 f_i$ 관계가 성립한다. 지금까지의 결과를 제어회로에 적용하면 기존의 기계식 스위치 구동에 의해 발생하는 신호와 동일한 신호를 얻을 수 있는데 릴레이 구동을 포함한 신호상태를 간략화하면 표-2와 같다.

표 2. 발생신호 상태
Table 2. State of the occurrence signal.

검출기상태	릴레이상태	LED상태	스위치상태
삽입 상태	ON	OFF	ON
인출 상태	OFF	ON	OFF

3.2 공진효과에 의한 전압이득

그림-8 처럼 공진회로의 개략도를 가지고 전압이득을 판정하기 위해 아래와 같이 분류하여 정리한다.

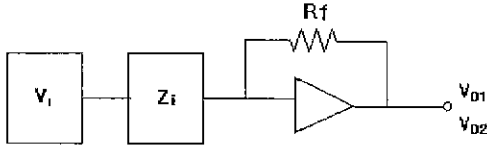


그림 8. 공진회로 개략도
Fig. 8. Schematic diagram of resonance circuit.

가. 공진시 전압 (V_{01})

$$i_0 = \frac{V_i}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{V_i}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$$

에서 공진 ($\omega L = \frac{1}{\omega C}$) 조건을 적용하면

$$i_0 = \frac{V_i}{R} \text{ 가 되어 결국}$$

$$V_{01} = i_0 R_f = \left(\frac{R_f}{R} \right) V_i \quad (8)$$

나. 비공진시 전압 (V_{02})

$$i_1 = \frac{V_i}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \text{ 이므로 } V_{02} \text{ 를 직접}$$

$$\begin{aligned} \text{구하면 } V_{02} &= \frac{V_i}{R + j(\omega L + \frac{1}{\omega C})} \\ &= \frac{R_f V_i}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 식(8)과 식(9)를 이용하여 공진시와 비공진시의 전압이득 효과를 비교하기 위해 다음과 같이 정리한다.

$$\begin{aligned} A_{v01}(\text{공진시 전압이득}) &= \frac{V_{01}}{V_i} = \frac{R_f}{R} \\ &= \frac{470}{1072} = 0.438 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{v02}(\text{비공진시 전압이득}) &= \frac{V_{02}}{V_i} \\ &= \frac{R_f}{R - (\omega L - \frac{1}{\omega C})} = \frac{470}{24459} = 0.0192 \end{aligned}$$

위의 데이터를 사용하여 주파수이득(dB)을 구하면

다음과 같다.

- 공진시주파수이득

$$20 \log |A_{V01}| = 20 \log |0.438| = -34.33$$

$$\therefore |Gain| = 34.33$$

- 비공진시 주파수이득

$$20 \log |A_{V-1}| = 20 \log |0.0192| = -7.3705$$

$$\therefore |Gain| = 7.3705$$

그림9는 공진과 비공진시의 전압주파수 이득곡선을 나타내며, 결론적으로 현재 적용된 공진회로는 비공진회로보다 27dB이상 향상된 이득 ($34.33 - 7.3705 = 27.16$)을 갖으며 22.8배의 전압이득 ($\frac{A_{v01}}{A_{v02}} = \frac{0.438}{0.0192} = 22.8$)을 갖는 것으로 평가되었다.

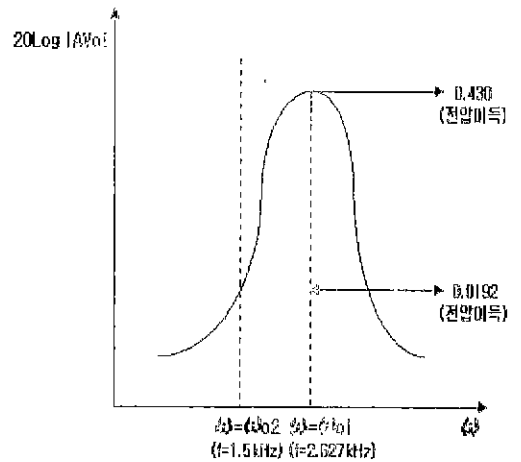


그림 9. 전압주파수 이득곡선
Fig. 9. Gain curves of the voltage frequency.

6. 결 론

지금까지 원자력발전소 노내 핵계측 계통 구동기기의 전자식 한계스위치 개발에 관해 검토해 보았다. 기존 워스팅하우스형 경수로 원전의 노내 핵계측 계통 구동기기의 기계식 스위치는 기술한파와 같이 교방사선, 진동, 열화 등 다양한 요인에 의해 검출기의 삽입과 인출 시 정확한 점접전호를 제공하지 못한 사례가 많아 운전 중 고장이 빈번히 발생하였다.

본 설비개선은 공진을 이용하여 점접신호를 발생시키는 제어방식으로 명확한 점접입력신호를 릴레이 구동회로에 제공함으로써 콘솔에서의 정상적인 제어가 가능토록 설계되었다. 무엇보다도 공진효과에 의한 전압이득의 현저한 차이를 이용하는 본 방식은 고조파 잡음에 기인한 노이즈(noise)의 영향 및 공진에 의한 상호간섭의 차단이 매우 중요하므로 전원 입력측에 콘덴서를 설치, 4개의 제어회로 각각이 상호 간섭 없이 독립적으로 동작할 수 있도록 설계하였다. 특히 구동기가 설치된 발전소 현장에는 각종 진동 및 방사 미립자 등에 의한 오동작 요인이 상존해있는 관계로 현장실험을 통한 건전성 확인과정은 매우 중요하다. 따라서 본 설비 개선 후 실제 운전에 적용하기 전에 현장에 설치한 후 수 차례에 걸쳐 모의 실험을 하였고, 이 과정에서 발생한 여러 가지 문제점들을 해소하여 보다 안전하고 신뢰성 있는 전자식 한계스위치로 완성도를 높였다. 개선된 본 전자식 한계스위치를 실제 주기시험(Increase Flux Mapping Test)에 적용, 검출기 삽입, 인출 시 정확한 점접신호를 릴레이 구동회로에 제공함을 확인하였다. 본 설비개선의 결과 기존 기계식 스위치의 근본 결함 원인의 해소가 가능하게 되었으며 설비운영의 효율성, 경제성 재고 및 상당한 관련 기술파급효과를 가져올 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

(1) TELREFLEX CO. "FLUX MAPPING SYSTEM".
 (2) 조병욱, "원자로 설비", 한국전력공사(1991)
 (3) 이광규 박재원 공저, "원자로 노심관리", 한국전력공사(1991).
 (4) 최정성, "노내핵계측설비", 한국전력공사(1991)
 (5) 박종범, 양승권, "영광 2호기 노내 중성자속 김시개봉의 인출제한스위치 설비 개선", '97춘계원자력학회 학술대회 논문지, 1권, pp.207~212, 1997.
 (6) David E. Johnson, John L. Hilburn and Johnny R. Johnson, "Basic Electric Circuit Analysis", Prentice-Hall (1991).
 (7) 裴明求 趙啟石 共著, "電氣學", 韓國理工學社(1990).

◇ 저자소개 ◇

박 종 범 (朴鍾範)

1968년 2월 15일생. 1992년 광운대학교 제어계측공학과 졸업. 1994년 동대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1991년-1995년 한전 월성원자력 발전소계측제어요원 1995년-현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원. 1996년-1999년 동대학원 제어계측공학과 박사수로.

양 승 권 (梁承權)

1962년 4월 18일생. 1985년 아주대 전자공학과 졸업. 1991년 조선대학원 전자과 졸업(석사). 1985년-1993년 영광원자력 발전소계측제어요원. 1993- 현재 한전 전력연구원 선임연구원.

이 상 효 (李相孝)

1941년 5월 23일생. 1969년 수도공과대학 졸업 1971년 연세대학교 전기과 졸업(석사). 1981년 연세대학교 전기과 졸업(박사) 1983년-1984년 버클리캘리포니아 대학교 객원교수 1987년-1988년 대한전기학회 제어계측연구회 간사장. 1989년-현재 광운대학교 제어계측공학과 교수.