

135MVA 수력 발전기의 전력 시스템 안정화 장치 적용 효과 분석

논문
58-6-7

An Analysis of Power System Stability(PSS) Effect with 135MVA Hydro Generator

옥연호[†] · 이은웅^{*} · 변일환^{**} · 오석영^{***}
(Yeon-Ho Ok · Eun-Woong Lee · Ill-Hwan Byun · Sueg-Young Oh)

Abstract - As national power consumption every year increases, the power plant which is in the process of planning tries to establish high-capacity generator. The power system tends to become a large size. With the progress of electronic components, the control systems of the generator have been digitalized and rapid-response control system is possible. However, the minute frequency vibration of grid occurred with the effect of rapid-response control system. To solve these problem, PPS(Power System Stability) has been introduced since 2004, and it has being installed and applied to the thermal and nuclear power plant which are high-capacity, over 800MVA. However the minute frequency vibration is gradually changed to the bigger frequency vibration by fast-action control system, and this regional frequency fluctuation might be diffused wide area. Therefore, it is applied to the hydro generator which is small with fast-action governor system, and it is necessary to control the minute frequency vibration to prevent to diffuse. In this paper, the effect will be proved by establishing PSS on the Hydro-Generator which has both digital excitation and governor system for the first time in Korea.

Key Words : PSS, Excitation System, Test, Protection, Frequency

1. 서론

우리나라의 전력 소비가 매년 증가함에 따라 계획중인 신설 발전소는 가능한 대용량 발전기를 설치하려 해서 전력시스템이 대형화되는 추세이고, 전력 전자 부품의 혁신적인 기술 발달로 신설 발전기나 시설 대체를 하는 발전기의 제어 시스템이 디지털화 되어 초 속응 제어를 구현하게 된다. 그런데 초 속응 제어시스템은 지역적인 계통의 작은 부하 변동시나 事故時에 계통의 동요가 발생한다.

그래서 그 원인을 분석하고 대책을 마련하는 연구 결과, 기존의 아날로그 여자방식에서는 계통의 주파수 변동에 따른 여자시스템의 신속한 응답이 되지 않았으나 속응성이 뛰어난 정지형 여자시스템이 개발되고 디지털화된 현재는 계통의 저 주파수 변동에도 초 속응 제어가 가능해지므로 계통의 작은 주파수 변동에도 계통에 연결된 많은 발전기가 동시에 다발적으로 응답하여 초기 발생 주파수 동요를 가중시킬 수 있게 되고 전 계통으로 파급되고 최악의 경우 블랙다운(Black-Down)으로 진행될 수도 있음을 알았다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 2004년부터 우리나라에서는 전력시스템 안정화 장치(PSS : Power System Stability)를 도입하여, 800MVA 이상 대용량의 화력·원자력 발전기

에 설치·적용하고 있다. 그런데 지역적인 요소가 많은 미세 주파수 진동이 초 속응 제어의 영향으로 점차 큰 주파수 진동으로, 광역적으로 확대될 수 있다. 따라서 용량은 작지만 조속기 응답이 빠른 수차 발전기에도 적용하여 지역적인 미세 진동을 초기에 제어하므로 동요가 확산되는 것을 방지할 필요가 있다고 판단된다.

본 논문에서는 디지털화 된 여자시스템과 조속기를 가진 수차 발전기에 국내 최초로 PSS 를 설치하여 실증을 통한 그 효과를 증명하고자 한다.

2. 전력 계통에서의 PSS 기능

2.1 저주파 동요 현상 발생

발전기 계통에서 외란이 발생하면 발전기 단자전압 V_t 가 변하여 발전기 설정전압 V_{ref} 와의 오차 Δe 가 발생하여 자동전압조정장치(AVR)에 가해져 여자의 여자전류가 그림 2-1와 같은 회로에 의해 제어된다.

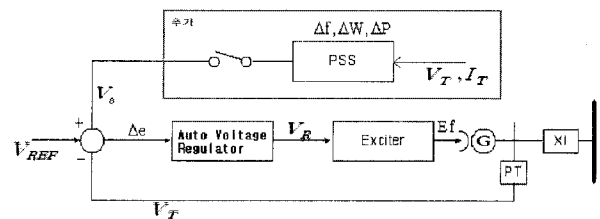


그림 2-1 PSS 구성도

Fig. 2-1 PSS component diagram

* V_{ref} : 발전기 설정 전압, V_s : PSS 출력 전압
 V_T, I_T : 계통 전압 전류, V_R : AVR 출력 전압

† 교신저자, 정회원 : 한국 수자원 공사

E-mail : yhok@kwater.or.kr

* 정 회원 : 충남 대학교 교수

** 정 회원 : 한국 수자원 공사

*** 비 회원 : 한국 수자원 공사 댐유역 관리처

접수일자 : 2009년 3월 12일

최종완료 : 2009년 5월 18일

그런데 발전기 계자권선의 인덕턴스 L_f 에 의해 계자전압 E_f 을 변화시키기는 자속의 응답이 지연되어 위상지연이 발생하게 되고, 자동전압조정기(AVR)의 작용력이 불완전하게 되면 발전기의 기계적 진동이 크게 증가하는 현상, 즉 전기적 시스템인 여자의 전압 제어 속응성과 기계적 시스템인 조속기의 속도제어의 속응성이 상이한 不制動 현상이 발생한다. 이러한 현상은 발전기 여자제어 방식의 시정수를 작게 하여 응답 속도를 향상시켜서 계통의 부하급변사고에서의 전압변화를 보상하여 정상전압을 유지시키는 속응 제어 방식의 구현으로 더욱 확대 되었다.

* AVR 속응 제어 기준(IEEE421) : “발전기의 어떠한 상태에서도 0.1초 이내에 Ceiling 전압의 95% 까지 상승시킬 수 있어야 한다”

2.2 전력시스템의 안정화 장치(PSS)의 기능

수차 발전기의 제어는 크게 주파수(출력) 제어와 발전기 단자 전압 제어로 구분된다. 주파수 제어는 계통이 방대해짐에 따라 자동 출력 조정 장치(Automatic Generator Controller), 조속기 프리(Governor Free), 不感帶(Dead Band), 감발율(Ramp Down Rate), 증발율(Ramp Up Rate), 부동시간(Dead Time) 등 여러 가지 제어 요소를 추가하여 운영한다. 발전기 단자전압 제어는 부하 변동, 주파수 변화 등 외란에 관계없이 발전기 단자전압을 기준 설정값(V_{ref})과 일치하도록 제어하는 것이 자동전압조정장치(AVR)의 기본이기 때문에 계통의 전압 변동 요소가 증가함에 따라 무효전류 보상장치 (Reactive Current Compensator), 자동 역률 조정장치(Automatic Power Factor Regulator), 자동 무효전력 조정장치(Automatic Var Regulator), 역률 제어장치(Power Factor Regulator), 난조 방지회로, 부족 여자제한기(Under Excitation Limiter), 과여자 제한기(Over Excitation Limiter), 자동 추종 제어기(Automatic Follow-Up Controller)등의 제어 장치가 필요하게 되었다. 이러한 각종 장치들의 제어시스템 구현이 전력전자의 혁신적인 기술 발달로 디지털화됨으로써 제어 속도가 단위 발전기별로 매우 빨리 수행되어 사고시 발생하는 과도상태 안정도는 개선할 수 있는 반면에 미세한 외란에도 속응 제어함으로 정상상태 안정도에는 악영향을 가져온다.

이와 같이 속응 제어가 정상상태 안정도에 악영향을 미치는 문제를 해결하기 위해 그림 2-1 같이 전력시스템안정화 장치(PSS)을 도입하였다. PSS 에서는 기존 시스템에 계통 주파수, 유효전력, 회전자의 회전속도, 계통 전압, 계통 전류 등을 연속적으로 검출하고 발전기 설정 전압(V_{ref})과 비교하여 저주파수, 지역적인 주파수 진동, 전력 동요에 충분한 제동력을 공급하는 동력 전달 한계 기능을 증대시켜 제동 능력을 상승시켰다. 그래서 이 PSS 는 부하차단시험등의 정상 조작상태에서 발생하는 작은 요동에 작용하여 계통 안정에 기여하며, 특히 전력계통이 미세 진동 상태에서 큰 부하로 변할 때 효과가 크다.

그리고 이 PSS 는 현재 설치되어 있는 계통에서는 0.1Hz 와 1.0Hz 범위의 주파수 진동(Δf)에서 역할을 하며, 실측에 의해 대부분의 주파수 진동이 0.3Hz이므로 이 진동 주파수에 최적의 효과가 되도록 설정되어 있다.

본 논문에는 그림 2-2의 “1992 IEEE type PSS2A dual-input signal stabilizer model” 을 적용했다.

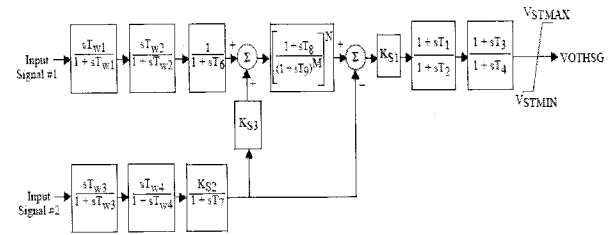


그림 2-2 PSS2A 이중화 입력의 안정화 모델
Fig. 2-2 PSS2A dual-input signal stabilizer model

그림 2-2를 기준으로 실제 구성한 Block Diagram은 그림 2-3과 같으며

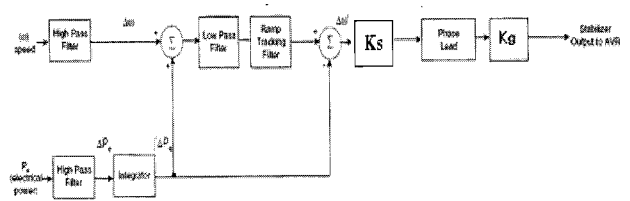


그림 2-3 설치한 PSS 블럭도
Fig. 2-3 PSS block diagram installed

그리고 그림 2-3 Block Diagram에서 PSS 의 전달 함수 식 (2-1) 와 같다.

$$\frac{PSS_{Input}}{PSS_{Output}} = \frac{3.452e007s^2 + 3.452e010s + 1.208e009}{s^4 + 1e007s^3 + 1e010s^2 + 1.792e010s + 2.365e008} \quad (2-1)$$

계산 조건) 유효출력 : 85,000kW, 무효출력 : 32,846kVar

3. 적용 효과 분석

3.1 실험 대상 발전 설비와 결론

PSS 를 설치한 수차 발전기와 발전기와 연결된 여자 변압기의 사양은 표 3-1과 같고 그림 3-1과 같이 결선 했다.

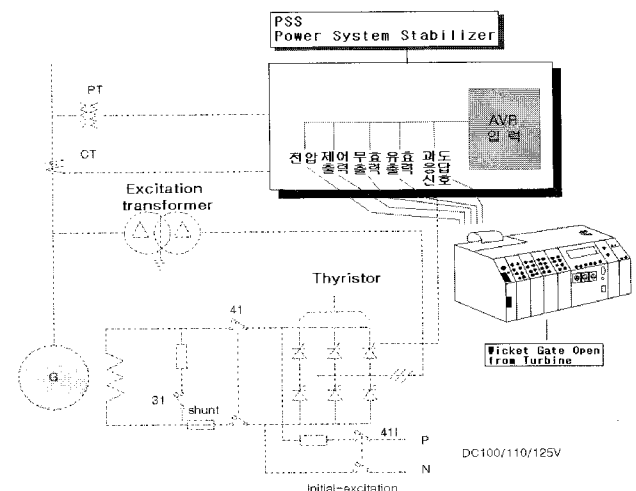


그림 3-1 실험 결선도
Fig. 3-1 The test connecting diagram

표 3-1 실험 대상 발전 설비의 사양

Table 3-1 Specification of test generator

돌극 수력 발전기	
Description	Value
Base Power (MVA)	135
Base Voltage (kV)	13.8
Rated Speed (rpm)	128.5
Field Current at Rated MVA, P.F (A DC)	4921
Air-Gap Line Field Current (A DC)	677
Field Winding Resistance (Ω @ 75 $^{\circ}$ C)	0.1727
Generator Base Field Voltage (V DC)	310
Stator resistance (pu)	0.1987
D-Axis Synchronous Reactance (pu)	X _{du} =0.9631 at Unsat. X _{ds} =0.8523 at Sat.
Q-Axis Synchronous Reactance (pu)	X _{qu} =0.6973 at Unsat. X _{qs} =1.737 at Sat.
D-Axis Transient Reactance (pu)	0.3447
D-Axis Sub-Transient Reactance (pu)	0.2857
Q-Axis Sub-Transient Reactance (pu)	0.3007
D-Axis O.C. Transient 시정수 (sec)	1.940
Q-Axis O.C. Transient 시정수 (sec)	7.18
D-Axis O.C. Sub-Transient 시정수 (sec)	0.058
변압기	
Full load ratings (OA/FOA)(MVA)	89.6/149.3
Transformer base (MVA)	149.3
Tap positions (kV)	157.5
Rated high side voltage base 154kV Delta or Wye	Wye
Rated low side voltage base 13.8kV Delta or Wye	Delta
Neutral solidly grounded?	yes
V1/V2(kV)	154/13.8

3.2 실험 조건 및 방법

계통 주파수는 변동시킬 수 없으므로 그림 3-1과 같이 결선하여 다음과 같은 순서로 여자시스템의 출력 전압에 과도 응답 신호를 입력하여 PSS 를 부착한 경우와 하지 않은 경우의 유효 전력의 변동 폭 및 안정 시간 등의 PSS 효과를 분석한다.

- ① 수차발전기를 기동하여 계통에 연계한다.
- ② PSS 를 OFF 한다.
- ③ 전압 조정기로 실험 전압(13.5kV)으로 조정한다.
- ④ 출력 조정기로 실험 출력(80MW)까지 조정한다.
- ⑤ 발전기 여자시스템 제어기에 $\pm 2\%$ 과도 응답 실험을 한다.
- ⑥ 안정후 PSS 를 ON 한다.
- ⑦ PSS Gain Ks(그림 2-3 참조)를 임의 값으로 설정한다.
- ⑧ 발전기 여자시스템 제어기에 $\pm 2\%$ 과도 응답 실험을 한다.
- ⑨ PSS Gain Ks 를 변화(0~50)시키면서 최적의 Ks 값을 찾는다.

3.3 PSS의 한계 설정

PSS 의 한계 설정 값은 실험을 통하여 설정하며 적용 발전소의 설정 값은 표 3-2와 같다.

표 3-2 PSS 설정 값

Table 3-2 PSS Setting data

구분	설정 범위	설정 단위	설정 값
PSS Output Limiting (Kg)	Upper	0~0.5	0.001
	Lower	0~-0.5	0.001
Stabilizer Gain (Ks)	0~50	0.01	5

3.4 실험 결과 분석

3.4.1 PSS 적용하지 않는 경우

PSS를 적용하지 않았을 때의 발전 상태는 다음과 같고 실험 결과는 그림 3-2, 3-3과 같다.

- % 과도 응답 신호 : 2% Up-Down
- 발전기 전압 : 13,447 ~ 13,628 V
- 유효 출력 : 80,272 ~ 79,298 kW
- 무효 출력 : 8,800 ~ 10,600 kVar

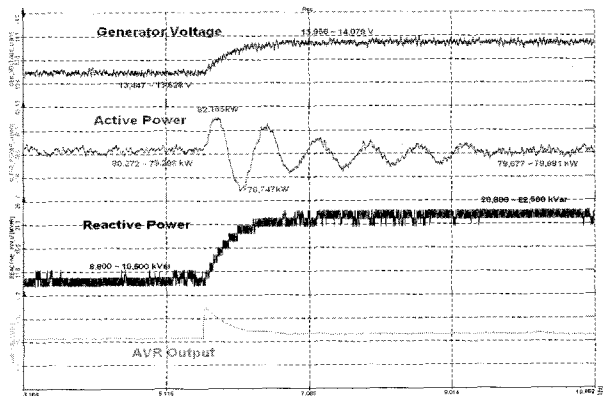


그림 3-2 2% Up 과도 응답

Fig. 3-2 2% Step-up transition response

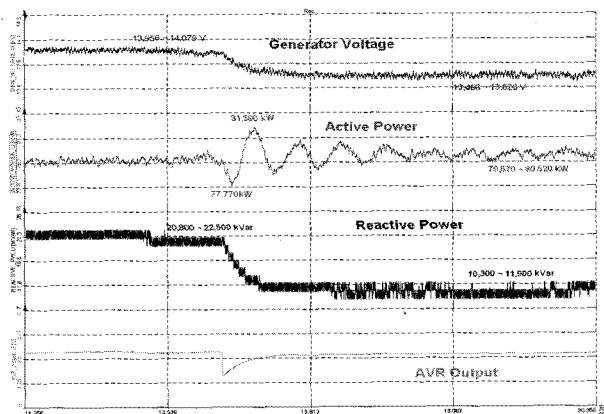


그림 3-3 2% Down 과도 응답

Fig. 3-3 2% Step-down transition response

PSS 를 적용하지 않고 정상적인 계통에서 주파수 진동(실험에서는 유효 전력)이 발생되었을 때 발전기가 얼마나 신속히 안정되는 가를 판단하는 2% 과도 응답 실험을 실시한 결과 2% 높은 실험에서 안정시간이 약 4.458[sec] 이며 과도 기간중 유효 출력의 진폭은 5,418[kW] 이고 2% 내린 실험에서는 안정시간이 4.188[sec] 이며 과도 기간중 유효 출

력의 진폭은 3,847[kW] 이었다. 이러한 2% 과도 응답실험에서 진동의 초기 주파수는 低 주파수부터 시작(유효 출력이 상승)하는 것이 高 주파수로 시작하는 것보다 안정시간이 많이 소요된다.

3.4.2 PSS 적용(Ks:5)한 경우

PSS를 적용했을 때의 발전 상태는 다음과 같고 실험 결과는 그림 3-4, 3-5와 같다.

- % 과도 응답 신호 : 2% Up-Down
- 발전기 전압 : 13,433 ~ 13,565 V
- 유효 출력 : 79,154 ~ 79,987 kW
- 무효 출력 : 8,900 ~ 10,500 kVar

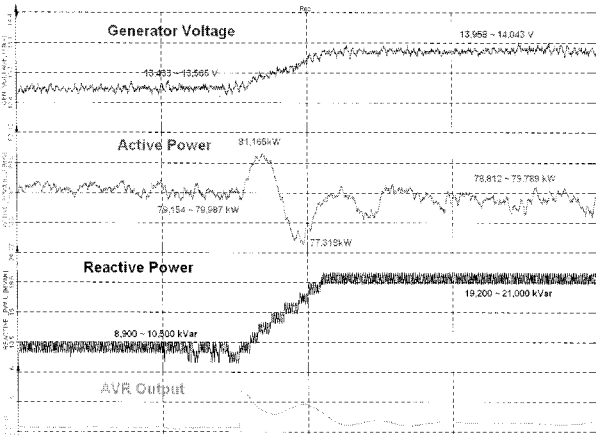


그림 3-4 2% Up 과도 응답
Fig. 3-4 2% Step-up transition response

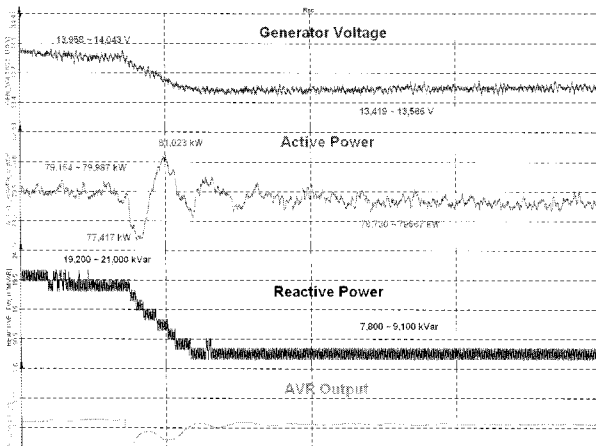


그림 3-5 2% Down 과도 응답
Fig. 3-5 2% Step-down transition response

PSS 를 적용하고 2% 과도 응답 실험을 실시한 결과 2% 높은 실험에서 안정시간이 약 1.926[sec] 이며 과도 기간중 유효 출력의 진폭은 3,820[kW] 이고, 2% 내린 실험에서 안정시간이 2.795[sec] 이며 과도 기간중 유효 출력의 진폭은 3,606[kW] 이었다. 진동의 초기 주파수가 저 주파수부터 시작(유효 출력이 상승)하는 것이 고주파수로 시작하는 것보다 신속하게 안정 되는 것을 나타낸다.

3.4.3 PSS 적용 유무에 따른 출력과 안정시간 비교

1) 2% 과도 현상시 출력(kW)

표 3-3 출력[kW]
Table 3-3 Output[kW]

구 분	PSS 미사용		PSS 사용	
	2% ↑	2% ↓	2% ↑	2% ↓
실험1 유효전력 진폭(kW)	5418	3847	3820	3606
실험2 유효전력 진폭(kW)	4638	4110	3811	3989
실험3 유효전력 진폭(kW)	5571	4890	4173	3944

실험 결과는 표 3-3와 같고 PSS 를 적용 했을 경우 출력의 진폭이 작으므로 계통의 미세 진동시 빠른 안정에 기여한다.

2) 안정시간

표 3-4 안정 시간[sec]
Table 3-3 Stable time[sec]

구 분	PSS 미사용		PSS 사용	
	2% ↑	2% ↓	2% ↑	2% ↓
실험1 안정시간(sec)	4.458	4.188	1.926	2.795
실험2 안정시간(sec)	4.340	3.535	1.610	2.265
실험3 안정시간(sec)	4.000	4.755	2.090	2.032

실험 결과 안정시간은 표 3-4와 같고 계통 미세 진동시 약 2초 이상 빠르게 안정에 기여한다.

3) 발전기 전압

발전기 전압의 변동 폭은 일정하므로 정상 상태에서 제어에 영향을 미치지 않는다.

4. 결 론

135MVA 수력 발전기의 여자시스템에 PSS를 적용하고 실험에 의하면 계통의 미세 진동 주파수에 대한 적용 효과는 탁월하다.

전력계통의 과도안정도 향상을 위해 속응 여자방식을 수력발전기에 적용하였을 때 계통에 미소 외란이 저주파 동요를 일으키며 계통 안정에 악영향을 발생시키는데 반해 PSS의 설치는 계통 안정에 기여할 수 있음을 확인 했다.

따라서, 화력이나 원자력에 비하여 상대적으로 용량이 적은 수력 발전기에도 PSS를 설치, 계통의 저주파 진동이 발생하는 문제점을 해결할 수 있음을 제한하고 최신 디지털 제어 설비로의 시설 대체의 필요성을 제시한다.

참 고 문 헌

- [1] '07 Water Power "Front End Analog Conversion to Digital Saves Cost for Upgrades of Excitation System" paper No. 73 By Joseph Wilson, EWEB, USA
- [2] "POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL", p315-373 P.KUNDUR
- [3] '07 Water Power "Improved Operation and Power Production of a Very Low Head Hydraulic Turbine" paper No. 161 By Philippe Lautier, eng. Ph. D., Envitech Energy Inc, Québec, Canada,
- [4] 두산중공업: Digital Excitation Manual Tab4 2001
- [5] 한국수자원공사: "발전기여자시스템 연구보고서" p33-40 2001
- [6] 한국수자원공사: "충주수력 PSS Commission Test" p3-21



변 일 환 (卞 一 煥)

1957년 7월 15일 생 1984년 영남대학교 전기 공학과 졸업. 2005년 충남대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 ~ 한국수자원 공사 녹색사업처장
 Tel : 042-629-2950
 Fax : 042-629-2999
 E-mail : bihwan@kwater.or.kr



오 석 영 (吳 錫 泳)

1959년 10월 2일생. 1996년 숭실대학교 기계공학과 졸업(박사). 1986년 ~ 한국수자원공사 발전설비팀
 Tel : 042-629-2771
 Fax : 042-629-2799
 E-mail : ohs@kwater.or.kr

저 자 소 개



옥 연 호 (玉 然 浩)

1960년 2월 2일생. 1982년 부산대학교 전기공학과 졸업. 2006년 충남대학교 전기공학과 대학원 졸업(석사). 현재 한국수자원공사 댐·유역 관리처 발전 설비팀
 Tel : 042)629-2798
 Fax : 042-629-2799
 E-mail : yhok@kwater.or.kr



이 은 응 (李 殷 雄)

1944년 8월 14일생 1971년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1982년~83년, 1984년~5년 캐나다 McGill 대학 방문교수. 1987년 ~ 현재 당 학회 평위원. 1995년 당 학회 편집 위원장 및 전기기연구회 간사장. 1995년~1997년 충남대 공대 학장 산업대 학원장('96~7), 1997년~2000년 당 학회 부회장. 2004년도 당학회 회장. 현재 충남대 전기 공학과 교수
 Tel : 042)821-5652
 E-mail : ewlee@cnu.ac.kr