민감부하 보상용 1 MJ 초전도 에너지저장 시스템 제작 및 시험

Fabrication and Test of a 1 MJ Superconducting Energy Storage System for the Sensitive Load

성기철*, 유인근**, 한성룡***, 전희종#

K.C.Seong*, I.K.Yu**, S.R.Hahn***, H.J.Jeon#

Abstract : For several decades researches and developments on superconducting magnetic energy storage (SMES) system have been done for efficient electric power management. Korea Electrotechnology Research Institute (KERI) have developed of a 1MJ, 300kVA SMES System for improving power quality in sensitive electric loads. It consists of an IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) based power conversion module, NbTi mixed matrix conductor superconducting magnet and a cryostat with HTS current leads. We developed the code for design of a SMES magnet, which could find the parameters of the SMES magnet having minimum amount of superconductors for the same stored energy, and designed the 1 MJ SMES magnet by using it. And we have design and fabricated cryostat with kA class HTS current leads for a 1 MJ SMES System. This paper describes the design, fabrication and test results for a 1 MJ SMES System.

Key Words : superconducting magnet energy storage, HTS current leads, cryostat.

1. 서 론

초전도 에너지저장 시스템은 단순히 에너지를 저장하기 위한 기능뿐만 아니라, 전력품질 보상 및 계통의 주파수 및 안정화제어와 같은 여러 가지 용도로 활용할 수 있는 새로운 기술로 선진국을 중심으로 최근 수 MJ급 저장시스템이 상용화되어 운전되고 있다[1].
이 장치는 에너지를 저장하기 위한 초전도 마그네트, 극저온을 유지시켜 주는 Cryostat, 상온부와 초전도 마그네트를 연결하여 대전류를 통전하기 위한 전류리드 및 에너지를 충·방전하기 위한 전력변환기로 구성된다. 본 연구에서는 1 MJ급 저장용량의 초전도에너지저장 시스템을 설계·제작하였으며 이에 대한 각종 요소기술 및 평가 결과를 소개한다.

* 정 회 원 : 한국전기연구원 초전도응용연구그룹
** 정 회 원 : 국립창원대학교 공대 전기공학과 교수
*** 정 회 원 : 한국산업기술평가원 성과관리실장
\# 정 회 원 : 숭실대학교 공대 전기공학과 교수
원고접수 : 2001년 10월 17일
심사완료 : 2001년 11월 08일

2. SMES 시스템

2.1. 초전도마그네트

SMES용 초전도 도체는 Pulse운전에 의한 교류손실을 줄이기 위하여 표 1에서와 같이 극세 다심구조의 초전도도체를 사용하였다.

표 1. SMES용 도체 및 케이블의 주요사양
Table 1. Specifications of the Rutherford cable

도 체	비율(NbTi/CuNi/Cu)	1/0/1.8
	직경	0.65 ㎜
	필라멘트 직경	6 ㎛
	필라멘트 Twist Pitch	13 ㎜
	RRR	50
케이블	도체 수	30
	크기	1.25 ㎜×10.2 ㎜
	Wire Transposition Pitch	55 ㎜
	절연체 (Kapton)	25 ㎛ × 10 ㎜

에너지저장을 위한 SMES용 마그네트에 대한 설계 결과를 요약하면 표 2와 같다[2].

표 2. SMES 마그네트의 주요사양
Table 2. Specifications of SMES magnet

내측 반경	535 ㎜
외측 반경	749 ㎜
높이	512 ㎜
전체 턴수	2,400
인덕턴스	2.48 H
정격전류 at B_{max}	900 A at 3.9 T
저장용량	1 MJ

제작된 SMES 마그네트의 특성을 시험하기 위해 DC Power Supply를 사용하여 퀜치전류를 측정한 결과, 그림 1에서와 같이 SMES 마그네트의 퀜치전류는 정격 운전전류(900 A)보다 약 40 %가 높은 1,250 A에서 초기 퀜치가 발생하였으며, 반복시험 결과 training효과에 의해 퀜치전류가 증가하여 정격 운전전류보다 65 %가 높은 약 1,500 A까지 운전할 수 있었다.[2]

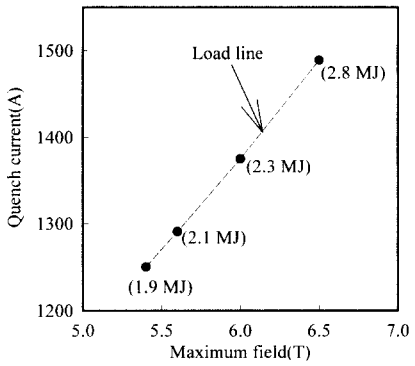


그림 1. 1MJ 초전도마그네트의 퀜치전류
Fig. 1. Quench currents of the 1 MJ superconducting magnet.

제작된 SMES용 마그네트의 성능을 비교·분석하기 위하여 현재까지 제작·평가된 외국의 SMES용 마그네트의 운전 전류밀도를 비교하면 그림 2와 같다. 그림에서와 같이 정격 운전전류 밀도가 Kyushu(0.6 MJ), Russia(0.5 MJ) 및 Jungbu(1 MJ)의 경우 보다 약 20 % 정도 높게 나타나, 본 연구에서 제작된 마그네트가 외국의 제작 사례와 비교하여 성능이 우수함을 알 수 있었다.

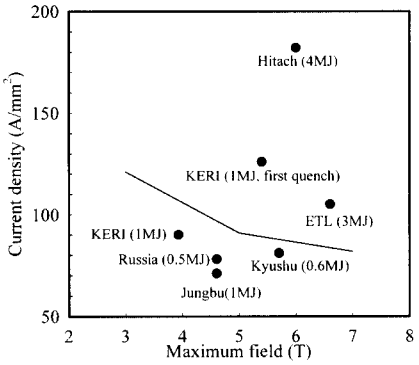


그림 2. SMES용 마그네트의 최대 자장에 따른 전류밀도 비교
Fig. 2. Current density vs. maximum magnetic field of the SMES magnets.

2.2. Cryostat

Cryostat는 초전도마그네트의 안정적 운전과 액체헬륨의 증발을 최소화하기 위한 냉각 및 단열 설계기술이 중요하며, 특히 이동형 Micro-SMES에서는 지지 및 단열구조 설계 및 제작이 매우 어려운 기술이다.

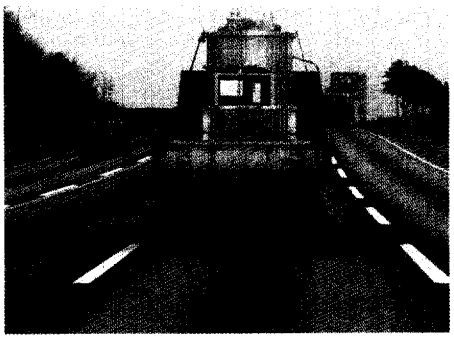


그림 3. 이동 중 Cryostat 실험
Fig. 3. Test of cryostat during the road running.

따라서 본 연구에서는 이동형 SMES를 개발하기 위하여 시험용 Cryostat를 시 제작(그림 3)하여 이동시 발생할 수 있는 지지구조를 설계하기 위하여 응력변화 실험을 수행하였다.

그림 4는 cryostat를 차량에 탑재하여 주행 중 응력에 대한 측정결과이다. 이 결과에 의하면 support bar의 응력은 최대 인장강도 이하로 충분한 안전성이 있는 것으로 확인되었다.

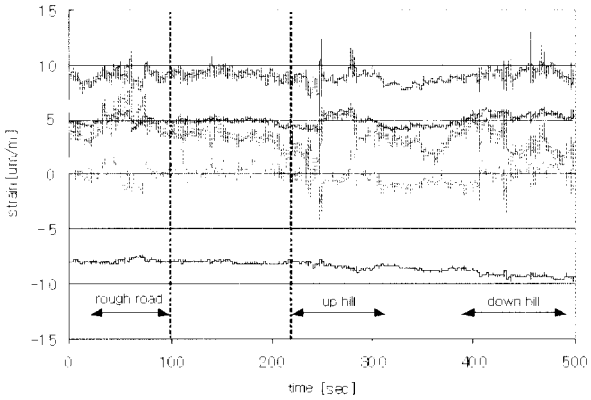


그림 4. 이동 중의 cryostat 지지 bar에서의 응력측정 결과
Fig. 4. Measured strain at several points in the cryostat during the road running

다음 그림 5는 최종 완성된 SMES의 사진으로 증발하는 헬륨가스를 재 응축시키기 위한 2 stage 4K 냉동기를 설치하여 LHe의 재 공급 기간을 최대한으로 연장할 수 있도록 제작하였다.

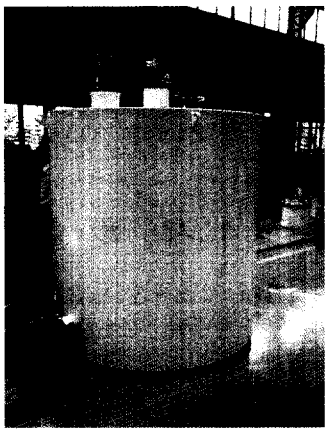


그림 5. 제작된 cryostat
Fig. 5. The fabricated cryostat

2.3. HTS 전류리드

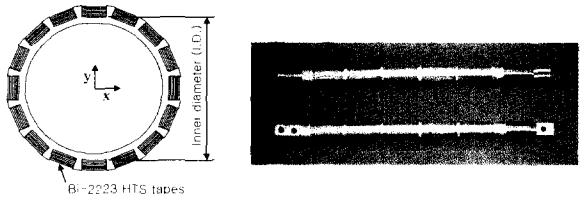
액체헬륨을 냉매로 사용하는 저온초전도 마그네트 시스템에서 전류리드에 의한 열손실이 전체 냉각 시스템에 큰 영향을 끼친다. 전류리드에 의한 열손실을 줄이기 위해서는 가스냉각형 구리리드와 HTS 전류리드를 함께 사용하는 hybrid형 전류리드가 일반적으로 많이 사용되며, 리드의 형상 최적화 설계가 매우 중요하다.[3]

본 연구에서는 SMES용 마그네트의 전류용량과 냉각시스템을 고려하여 HTS 전류리드의 임계전류는 자

기자장 하에서 1.5 kA이상, 전류리드에 의한 열손실은 리드 하나 당 0.4 W 이하가 되도록 설계하였다. 표 3 및 그림 6은 각각 HTS 전류리드에 대한 주요사양 및 단면/측면 형상이다.[4]

표 3. HTS 전류리드의 주요사양
Table 3. Specifications of the HTS current lead

임계전류	1,625 A at 77.3 K
고온초전도 선재 수	112 (7×16)
Segment I.D.	23 mm
길이	350 mm
Former	Stainless steel
Terminal	OFC (Cu)
열손실(Qin)	0.35 W/lead



(a) (b)

그림 6. HTS 전류리드. (a)단면과 (b)측면형상
Fig. 6. The HTS current leads. (a) cross-sectional drawing and (b) side view

HTS 전류리드의 특성시험 결과는 그림 7에서와 같다. 즉, 전류리드의 저온단부가 액체 헬륨에 닿아 있을 때(4.2 K) 고온단부의 온도는 65 K이었으며, 이 때 전류리드를 통해 액체헬륨으로 유입되는 침입열은 0.395 W/lead 로 나타났다. 그리고 고온초전도 전류리드의 고온단부가 80 K 일 때 측정된 전류리드의 자기자계 하에서 임계전류는 고온부가 약 1.6 kA로서,

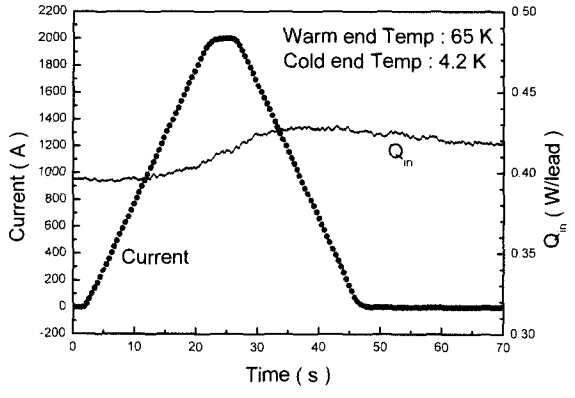


그림 7. 운전전류와 침입열
Fig. 7. Heat leakage into liquid helium during one ramp up and down cycle

전류리드 전체가 77 K라고 가정하고 계산된 설계사양과 매우 잘 일치하였다.

2.4. 전력변환기

SMES시스템은 직류로 에너지를 저장하기 때문에 교류계통에 연계하기 위해서는 전력변환기가 필요하다. 전력변환기는 계통에 직렬로 삽입하는 직렬형과 병렬형으로 구분할 수 있으며, 직렬형은 계통이 개방되었을 때 보상이 힘들고, 병렬형은 반대로 계통이 단락 되었을 때 보상이 어려운 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 그림 8에서와 같이 두 가지 방식을 결합한 직-병렬방식을 채택하였다.

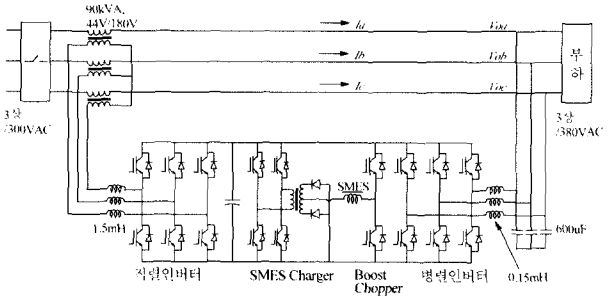


그림 8. 전력변환회로 구성
Fig. 8. Topology of the power conversion module and the SMES

설계된 전력변환회로 및 제어기의 성능을 검증하기 위해서 컴퓨터 simulation을 수행한 결과는 그림 9에서와 같다. 즉, 계통이 갑자기 정전되면, 전력변환기가 동작하여 출력은 일정한 전압으로 보상되며 계통을 흐르던 전류는 정전과 함께 영(zero)이 되고, 대신에 전력변환기에서 전류를 공급하며, 정전이 끝나고 나면 전력변환기 전류는 점점 작아지고 계통전류는 점점 증가하여 정상상태로 돌아가는 것을 알 수 있다.

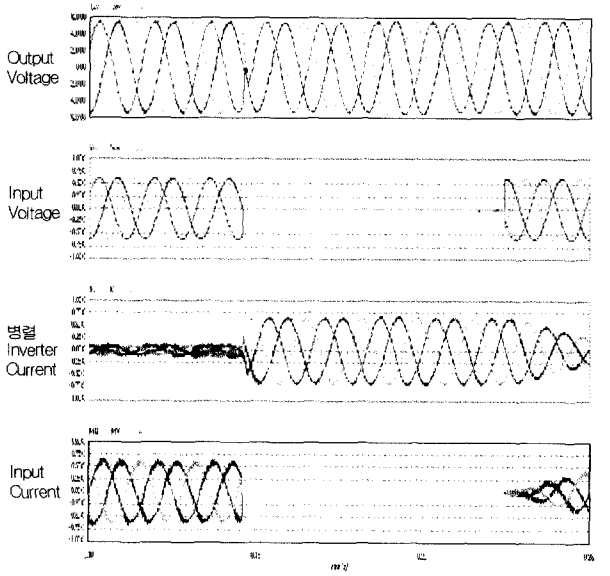


그림 9. 전력변환장치의 Simulation 결과 파형
Fig. 9. Simulation results of the power conversion module

그림 9는 제작된 전력변환기의 사진으로 변압기 및 reactor, 인버터 및 quench protector의 3개의 cubicle로 구성하였다.

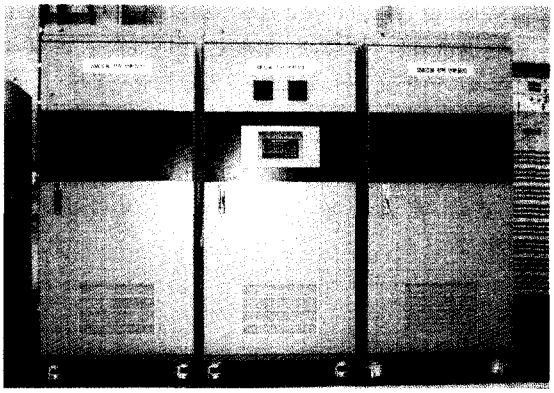


그림 9. 전력변환기 Cubicle
Fig. 9. Cubicle of power conversion module

3. 특성실험

제작된 SMES 시스템의 동작특성을 확인하기 위해서 아래의 그림 10에서와 같이 UPS동작 시험회로를 제작하여 응답특성을 시험하였다. 즉, 인위적으로 정전을 만들고 SMES에 저장된 에너지를 이용하여 순간정전이 보상이 되는지 확인한 후, 전력변환기가 목표한 사양을 만족하는지에 대해서 검증하였다.

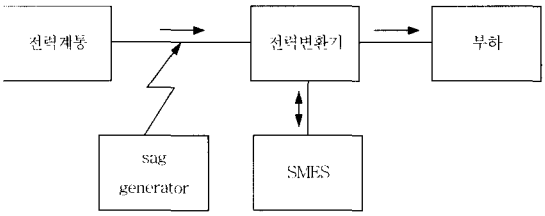


그림 10. UPS 동작 시험회로
Fig. 10. Experimental circuit of UPS operation mode

그림 11은 정격입력전압 (380 VAC)과 정격부하 (300 kVA)에서의 입력 전압 및 전류, 출력전압 파형이다. 즉, 입력전압은 380 VAC 정격전압이므로 출력전압과 같은 크기이며, 직렬보상기의 작용에 의해서 입력전류가 제어되므로 입력전류는 입력전압과 동상이며, 완전한 정현파가 된다는 것을 알 수 있다.

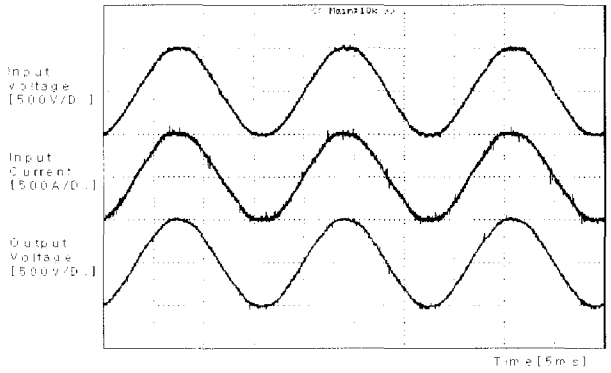


그림 11. 정상상태에서의 입력전압, 입력전류, 출력전압 파형
Fig. 11. Experimental waveforms at normal operation condition.

측정 분석결과, 운전효율은 97.5%, 입력전류의 THD (Total Harmonic Distortion)는 3.5%, 역률은 0.99로 나타났다.

그림 12는 3초간의 순간정전 발생시의 입력전압, 입력전류, 출력전압 파형을 보여준다. 정전이 되면 입력전압과 전류는 영이 되지만 출력전압은 SMES에 저장된 에너지를 이용하여 일정하게 유지되어 순간정전이 효과적으로 보상이 됨을 알 수 있다.

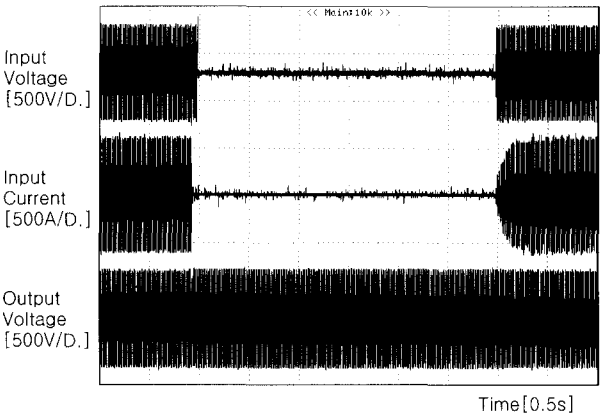


그림 12. 순간정전 시 입력 전압 및 전류, 출력전압 파형
Fig. 12. Experimental waveforms of the power line compensation during short time power interrupt

아래 그림 13은 정전이 시작되는 시점 주위를 확대한 파형이다. 정전이 시작되면 입력전압과 전류가 영으로 떨어지지만 출력전압에는 약간의 순간적인 왜곡만 있을 뿐 정격전압을 그대로 유지하고 있는 것을 볼 수 있다.

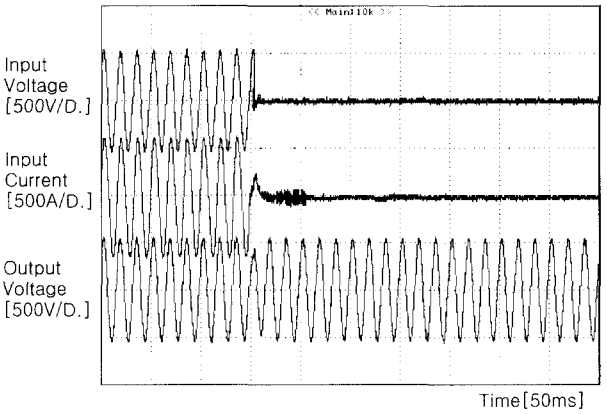


그림 13. 순간정전시의 입력 전압 및 전류, 출력전압 확대 파형
Fig. 13. Enlarged waveforms at the starting of short time power interrupt

그림 14는 정전에서 복귀되는 시점 주위를 확대한 파형을 보여준다. 복귀 시 입력전압은 살아나고 계통전류는 서서히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 순간에도 출력전압에는 아무런 왜곡없이 잘 조정되었다.

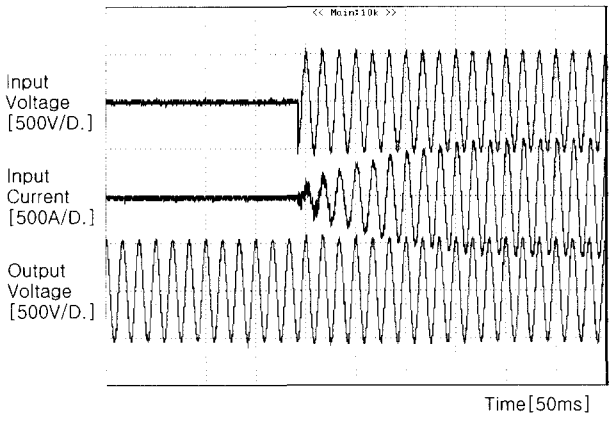


그림 14. 정전 복귀시의 입력 전압 및 전류, 출력전압 확대 파형

Fig. 14. Enlarged waveforms at the end of short time power interrupt

4. 결 론

본 연구는 민감한 부하 보상용 1 MJ급 초전도 에너지저장 시스템을 개발하기 위하여 요소기술 설계, 제작하고 이를 종합하여 최종 시스템을 시험 평가하였다.

시험 결과, 개발된 1 MJ 초전도 에너지저장 시스템은 초전도마그네트에 저장된 에너지를 이용하여, 전압 Sag를 포함한 순간정전을 보상함은 물론 계통전류를 부하에 상관없이 역률 1로 보상할 수 있어 고조파 및 저 역률 문제를 완전히 해결할 수 있었으며, ±25%이내의 전압강하나 상승도 보상할 수 있는 다기능 품질 보상 장치로 손색이 없었다. 따라서 민감한 중요부하에 대해 양질의 무정전 전원공급이 가능한 새로운 개념의 UPS 시스템을 개발하였다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의해 수행한 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

[1] 성기철, 김해종, 조전욱, 권영길, 류강식 "초전도 에너지저장(SMES)시스템의 개발동향", 초전도와저온공학, Vol.2, No.1, pp10~18, 2000.

[2] 김해종, 성기철, 조전욱, 이언용, 권영길, 류강식, 류경우, "μSMES 마그네트용 Model coil의 제작 및 특성시험", 2001년도 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 89~91, 2001.

[3] T. Isono et al. "Test Results of High Temperature Superconductor Current Lead at 14.5 kA Operation", IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, Vol.9,No.2, pp.519~522, 1999.

[4] 장현만, 오상수, 조전욱, 조영식, 하홍수, 하동우, 성기철, 권영길, 류강식, "SMES 마그네트용 고온초전도 전류 도입선 설계", 한국초전도저온공학회 논문지, 2권, 2호, pp.6~10, 2000.

저 자 소 개

성기철(成耆哲)

1956년 02월 20일생, 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1999년~현재 국립창원대학교(박사과정), 1986년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임연구원

유인근(劉仁根)

1983년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1986년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년 6월~1988년 2월 한국전기연구소 선임연구원(지중송전연구실장), 1990년 12월~1992년 2월 University of Texas at Arlington(Post-Doc.) 1996년 12월~1998년 2월 Brunel University,UK(Visiting Scholar), 1988년 3월~현재 창원대학교 공과대학 전기공학과 교수

한성룡(韓聖龍)

1959년생, 1993년 연세대학교 산업대학원 전자공학과 졸업(석사), 1998년~현재 숭실대학교 대학원 전기공학과(박사과정), 1983년 8월~1990년 4월 LG전자 근무, 1990년 5월~1999년 2월 생산기술연구원 선임연구원(기반조성실장), 1999년 3월~현재 한국산업기술평가원 수석연구원(성과관리실장)

전희종(田喜鍾)

1953년생, 1975년 숭실대학교 공대 전기공학과 졸업, 1977년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1987년 중앙대학교 전기공학과 졸업(박사), 1995년 9월~1996년 8월 University of Victoria 객원교수, 1981년 9월~현재 숭실대학교 공과대학 전기공학과 교수, 1997년 3월~현재 중소기업청 심의위원