태양광에너지 시스템이 결합된 HTS 자속펌프의 제작 및 예비실험

Fabrication and Test of HTS Flux Pump Combined with Solar Energy System

김대욱[1], 정윤도[2,*], 조현철[3], 윤용수[4], 김현기[5], 고태국[6]

Dae Wook Kim[1], Yoon Do Chung[2,*], Hyun Chul Jo[3], Yong Soo Yoon[4], Hyun Ki Kim[5], Tae Kuk Ko[6]

Abstract: As new one of superconducting power supplies, we proposed an HTS flux pump utilized a solar energy system. As an eternal electric energy can be converted by the solar system, the solar energy system is promisingly applied as an energy source in the power applications. Especially, since the solar energy system played a role in conventional utility power, total power consumption of the flux pump system are provided by solar energy. That means its operating efficiency is remarkably improved compared with developed flux pumps. A solar energy system is comprised of solar panel, photo-voltaic (PV) controller, converter and battery. The HTS flux pump consists of an electromagnet, two thermal heaters and a Bi-2223 magnet. In this paper, we describe the possibility the fusion technology between superconducting power supply and solar energy system. As a fundamental step, the fabrication, structure and experimental results are explained.

Key Words: HTS Flux pump, Solar energy system, Superconducting power supply.

1. 서 론

신재생에너지가운데 태양광발전은 반도체소자인 태양전지의 광전효과를 이용하여 빛에너지를 전기 에너지로 변환함으로서 화석에너지를 사용한 기존의 화력발전방식과는 달리 무한정한 에너지원, 대기오염, 소음, 진동 등의 공해가 전혀 없는 깨끗한 청정에너지원이다. 또한 연료의 수송, 기계적 가동, 국부적 고온, 고압부가 없어 발전설비의 유지관리가 용이하고, 수명이 길며, 설비규모의 선택과 설치공사가 쉬운 장점을 가지고 있어 각광을 받고 있다[1]. 따라서 태양광에너지를 전기에너지로 이용한 전력기기 시스템의 개발은 시스템의 효율을 향상시키기 위한 하나의 좋은 모델로 여겨지고 있고 다양한 전력시스템에 적용되고 있다[2-4]. 태양광에너지를 고온초전도 자속펌프시스템의 전원 소스로 사용하게 되면 모든 전력을 태양광 에너지를 사용하므로 상용 전원장치가 필요가 없다. 따라서 시스템의 전력소비 효율을 향상 시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 상용전력이 필요하지 않으므로 기존의 자속펌프에 비해 이동성에 있어서 제약을 덜 받게 된다.

저온 초전도 선재에 비해 고온 초전도선재는 냉각비용이 경제적이기 때문에 다양한 전기기기시스템에 적용되어 많은 연구가 현재 진행되어지고 있다. 특히 핵자기공명장치(NMR), 자기공명영상장치(MRI), 자기부상열차(MAGLEV), 초전도에너지저장장치(SMES), 초전도핵융합발전장치(TOKAMAK) 등을 연구하는 분야에서는 고온초전도 선재를 이용한 연구가 활발히 진행중이다[5, 6]. 그러나 고온초전도 선재는 낮은 인덱스값(n-value)을 가지고 있어 임계전류에 가까울수록 인덱스 손실이 크며, 아직까지 고온초전도 선재의 초전도 접합 기술이 개발되지 않아 완전한 영구전류 상태를 형성하는데 어려움이 있다. 따라서 영구전류모드에서의 고온초전도 마그넷은 큰 전류 감쇄율을 가져 마그넷의 안정도를 저하시키는 결과를 초래한다. 이러한 이유로 고온초전도 마그넷 설계 시 반드시 자장의 의존성을 고려해야 하며, 고온초전도 마그넷이 영구전류모드에서 운전을 하기 위해서는 감쇄된 전류를 보상해줄 수 있는 플럭스 펌프 등과 같은 전원장치가 연계되어야 한다[7]. 접합기술의 향상으로, 제작되고 있는 마그넷의 Maglev용 마그넷의 경우 전류감쇄율은 동작전류 500A 저온초전도 마그넷의 경우 전류감쇄율이 0.1%/day 미만일 때 고온 초전도 마그넷은 1%/day [60 μA/s]미만의 감쇄율을 유지하게 된다[8].

우리는 태양광 발전시스템과 고온초전도 자속펌프 시스템을 융합하여 새로운 초전도전원장치를 제안하였다. 이와 같은 태양광에너지를 이용한 고온초전도 자속펌프는 시스템의 동작 효율을 극대화하고, 무한한 에너지원인 태양광에너지를 활용하기 위하여 개발되었다. 본 논문에서는 이러한 태양광에너지를 이용한 고온 초전도 전원장치의 기반연구로서, 각 요소의 기술요소를 설계하고 제작하여 기본적인 운전특성을 검증하고 실험적으로 수행하였다.

2. 본 론

2.1. 태양광에너지시스템의 구조와 제작 및 운영

[1]학생회원 : 연세대학교 수소연료전지협동 박사과정
[2]정 회 원 : 수원대학교 전기공학과 연구교수
[3]학생회원 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
[4]정 회 원 : 안산공과대학 전기과 부교수
[5]비 회 원 : 수원대학교 전기공학과 교수
[6]정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과 교수
*교신저자 : ydchung@suwon.ac.kr
원고접수 : 2010년 10월 08일
심사완료 : 2011년 03월 02일
게재확정 : 2011년 03월 02일

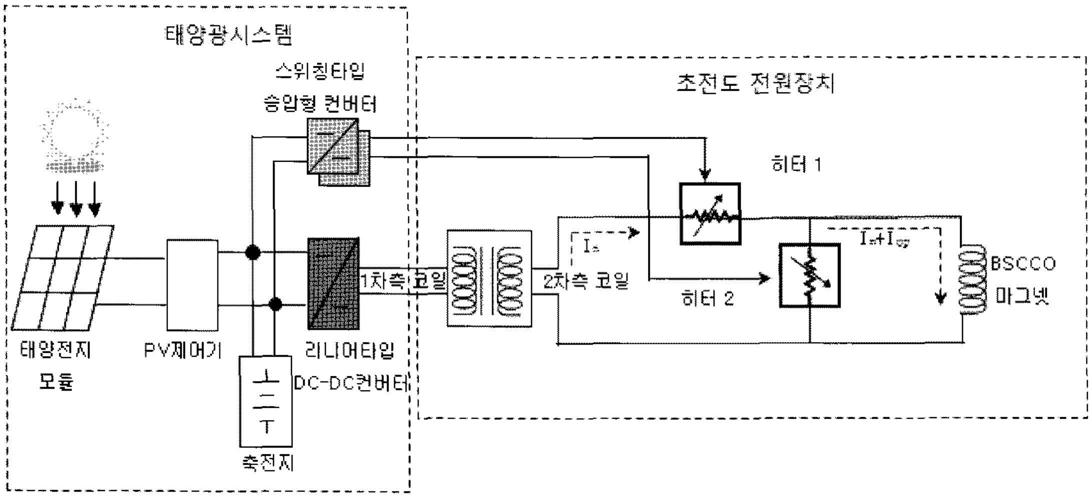


Fig. 1. Schematic diagram of superconducting power supply combined solar energy system.

본 논문에 사용된 태양광 에너지시스템은 고온 초전도 자속펌프의 마그넷에 에너지를 공급하기 위한 에너지원으로 사용된다. 태양광발전 시스템은 독립형 시스템과 계통연계형 시스템으로 나눌 수 있는데 본 논문에서는 독립형 시스템을 채택하였다. 독립형 태양광발전시스템은 주간에 태양전지에서 발전된 전기를 축전지에 저장하고 부하량이 발전량보다 큰 경우나 발전이 불가능한 야간에는 축전지에서 공급하게 된다.

그림 1은 태양광 시스템을 이용한 고온 초전도 자속펌프의 구조를 나타낸다. 태양광 시스템은 다음과 같은 4개의 요소로 구성되었다.

(1) PV(photo-voltaic) 모듈
(2) PV 제어기
(3) 축전지
(4) 컨버터.

본 시스템에 사용된 모듈은 독일 Conergy사의 Power Plus 210 모델을 사용하였으며, 2대를 병렬로 연결하여 사용하였다. 모듈설치방식에는 크게 고정식과 추적식으로 나누는데, 본 실험에서는 고정식을 사용하였다. 고정식으로 설치할 경우 태양광의 설치각도에 따라 발전용량이 크게 차이가 나는데 PV 모듈 경사각 30°에서 측정한 결과 값이 경사각 20° 및 40°일 때보다 발전효율이 12~17% 상승된다[9]. 따라서 모듈 설치는30°로 설치하는 것이 발전효율이 가장 좋음을 알 수 있다. 실제 설치 시에는 겨울에 눈이 쌓이게 될 경우에 경사각에 의해 빠르게 쓸려 내려갈 수 있도록 경사각을 35°로 설치하였다[9].

Table 1. Specifications of Solar cell.

항목	세부 사항
모델	Power Plus 210P®
제조사	Conergy
최대출력(Pmax)	210W
단락전류(Isc)	7.93A
개방전압(Voc)	36.4V
최대출력전류(Ipmax)	7.24A
최대출력전압(Vpmax)	29.1A
치수	1651*986*46 mm
중량	26kg

축전지는 12V 200Ah인 밀폐식 연축전지 2대를 직렬연결하여 24V로 구성하였으며, PV 제어기에 연결되어져 태양전지 모듈에서 생산된 전기를 축전하는 기능을 한다. 사용되는 부하 전류가 5A일 때 최대 45시간의 에너지를 공급할 수 있는 용량을 가지고 있다. 표 1은 태양전지 모듈의 규격을 나타내고 있다.

PV 제어기는 태양전지 모듈에서 생산된 에너지를 축전지에 충전시켜 주며, 과충전 및 과전류 보호기능이 있으며, 전지 모듈에서 생산되는 전압, 전류와 부하에서 사용되는 전류의 양을 모니터링 할 수 있는 에너지 메터를 내장하고 있다. 낮은 온도에서 태양광모듈의 MPP전압은 약 29.1V이며, 개방회로 전압은 최고 36.4V이다. 따라서 사용된 축전지의 충전 차단 전압이 초과 될 수 있다. PV제어기는 축전지 전압을 측정하고 축전지가 과충전 되는 것을 보호하는 역할을 한다. 또한 일사량이 낮을 때, PV 전압은 중단되며, 어레이를 통하여 축전지 방전이 일어나게 된다. 이것을 예방하기 위해 내부에 역전류 다이오드가 사용된다.

2.2. 컨버터

컨버터는 태양전지 모듈에서 발전된 전력을 HTS자속펌프의 마그넷 및 히터 1, 2에 공급하도록 설계되어져 있다. 또한 초전도 히터스위치 1, 2에 히터전원을 공급해주기 위해서는 30V이상의 전원이 공급되어져야 한다. 축전지에서 출력되는 전압은 24V 전압이므로 히터 스위치 전원을 공급해주기 위해서는 승압을 해주어

Table 2. Specifications of linear converter.

항목		세부 사항
동작모드		정전류/정전압
채널간 제어		병렬운전 가능
전압	제어범위	0-5000mV
	분해능	1mV
	정밀도	±0.04%(Full Scale)
전류	제어범위	0-±6000mA
	분해능	1mA
	정밀도	±0.1%(Full Scale)
시간	Rising Time	10msec 이내

Table 3. Specifications of boost converter.

항목	세부 사항
입력전압	20V-25V
출력전압	28-35V
출력전류	11A
동작모드	정전압
제어방식	포워드 타입
보호회로	과전압, 과전류

야 한다. 만약 축전지의 출력전압이 30V이상 출력되는 경우 히터전원 공급용 부스터 컨버터가 필요가 없지만, 향후 다양한 실험환경에서 시험시 필요요소가 있으므로 본 실험에 적용을 해보았다. 본 실험에는 2종류의 컨버터가 사용되어 졌는데, HTS 마그넷 전원용으로는 리니어타입의 컨버터(이하 컨버터 1)가 이용되었으며, 히터전원용으로는 스위칭타입의 부스터컨버터(이하 컨버터2)가 사용되어 졌다. 표2, 3에 컨버터의 규격을 나타내고 있다.

2.3. 초전도 자속펌프

초전도 전원장치의 구조가 그림 1에 나타나 있다. 컨버터1은 초전도 플럭스 펌프의 1차측 코일에 연결되어 진다. 초전도 전원장치는 2차측 권선과 철심으로 구성된 변압기, Bi-2223 솔레노이드, 2개의 반영구전류 스위치로 구성되어 있다. 히터 트리거 스위치는 히터에 전류를 인가하여, 이로 인해 발생한 열이 초전도 폐회로의 일부를 상전도화 시킴으로써 회로를 on-off 시키는 스위칭 역할을 한다. 히터에 전류를 인가하게 되면 open, 전류를 인가하지 않으면 단락과 같은 동작을 하게 된다. 동작원리 및 동작 진행순서는 참고문헌 [10]에서 볼 수 있다.

2.4. 실험장치 제작 및 실험

예비실험을 위해 태양광에너지를 결합한 플럭스 펌프의 구성은 그림 3과 같이 제작하였다. 2대의 병렬로 연결된 태양광모듈에서 발생된 전기에너지는 PV제어기를 통해 축전지에 충전된다. 축전지에 충전된 에너지는 HTS 마그넷 충전용 리니어타입의 컨버터(컨버터 1)와 히터전원구동용 부스터 컨버터(컨버터2)의 에너지원으로 작용한다. 컨버터 1의 출력은 변압기의 1차측 권선에 연결되어 진다.

그림 4에 초전도 자속펌프의 외관을 나타내었다. 본 실험에 사용된 DC-DC 컨버터의 제작된 형상을 그림 5에 나타내었다. 초전도 자속펌프의 제원은 표 4와 같다. 변압기형태의 전자석의 1차측 권선은 구리선으로 권선하였으며, 2차측 권선은 BSCCO 마그넷에서 나온 양단의 BSCCO 선재에서 한 단을 이용하여 솔레노이드 형태로 6회를 권선하여 제작하였다. 히터 트리거 스위치는 BSCCO 선재에 극저온 히터용 NiCr 선을 사용하여 직접 권선하였다.

충전되는 전류량을 측정하기 위해서 마그넷 중앙에 비접촉으로 측정이 가능한 홀센서를 설치하였고, 1차측 권선과 히터 스위치에 인가되는 전류의 측정은 각각 션트(shunt) 저항을 이용하였다. 실험은 액체 질소 환경에서 수행하였고, 온도를 포함한 모든 신호는 DAQ(Data Acquisition) 통해 PC에 전송된다. 태양광 에너지를 초전도 펌프에 자속을 공급하기 위해 태양광에서 변환된 DC 전류를 컨버터 1에서 변환하여 6A, 5A, 4A씩 증가시키면서 1차측 코일에 전류를 인가하

Table 4. Specifications of superconducting flux pump.

항목	세부 사항
HTS Magnet	
재질	Bi-2223/Ag
권선 수	130*2 layer=260
인덕턴스 값 [mH]	9.1
임계온도 [K]	약 110
임계전류 [A]	59
n 값	6
Heater 1 and 2	
재질	탄소강
직경	0.203
히터 1 저항 [Ω]	37
히터 2 저항 [Ω]	36.5
1차 코일	
재질	구리 권선
권선 수	256
총 저항	5.85 Ω @300 K
	0.45 Ω @77 K
2차 코일	
재질	Bi-2223/Ag
권선 수	6
임계 온도	약 110

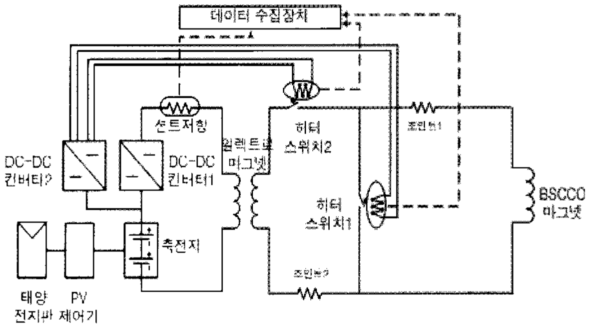


Fig. 3. Connection diagram of assembled superconducting flux pump.

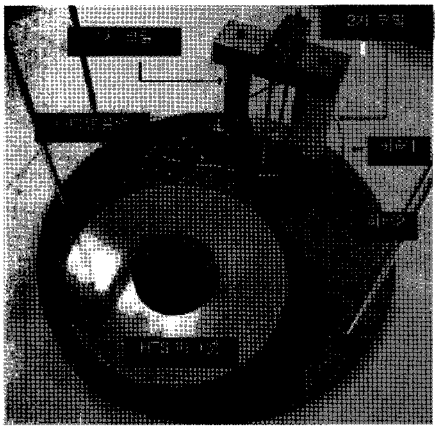
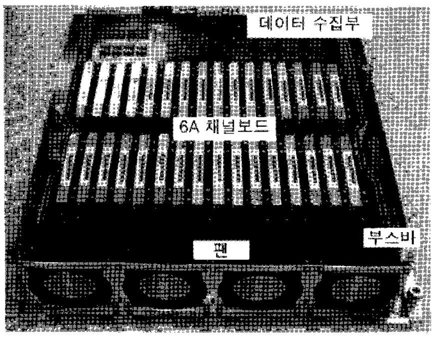
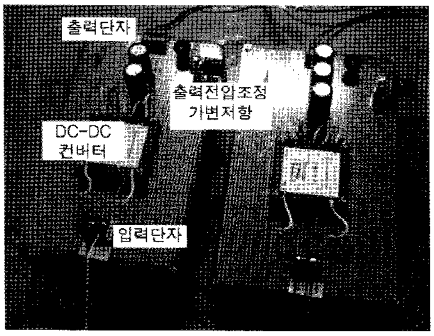


Fig. 4. Photograph of assembled superconducting flux pump.

여 충전 실험을 수행하였다. 또한 히터 스위치에는 30.2V를 인가하여 히터트리거 스위치의 온도를 110 K



(a) Photograph of assembled linear converter



(b) Photograph of assembled linear converter

Fig. 5. Photograph of assembled converters.

으로 설정하였다.

본 예비시험은 초전도 자속펌프가 태양광에너지를 이용하여 초전도 전원장치로서 안정적인 충전특성을 갖는지를 확인하였다. 그림 6은 컨버터 1에서 6A 정전류가 인가되었을 때 마그넷의 충전전류가 포화된 특성을 나타낸 결과이다. 그림과 같이 충전된 전류는 39.6A에서 포화되었고, 전류펌핑율은 11mA/s임을 알 수 있었다. 최근 접합기술의 발달과 선재의 특성이 향상되어 전류감쇄율을 크게 낮추었지만, 고온 초전도 마그넷의 경우 적어도 60μA/s이상의 전류감쇄가 발생하게 된다[8]. 따라서 본 논문에서의 시스템을 기반으로 하여 DC 컨버터와 2차측 코일의 용량을 안정적으로 크게 설계한다면 실제 고온 초전도 마그넷의 전류감쇄분을 보상하기에는 충분하다고 사료된다.

또한 본 시스템이 고온 초전도마그넷용 전류보상기로서의 안정적인 충전특성을 확인하기위해 동작전류

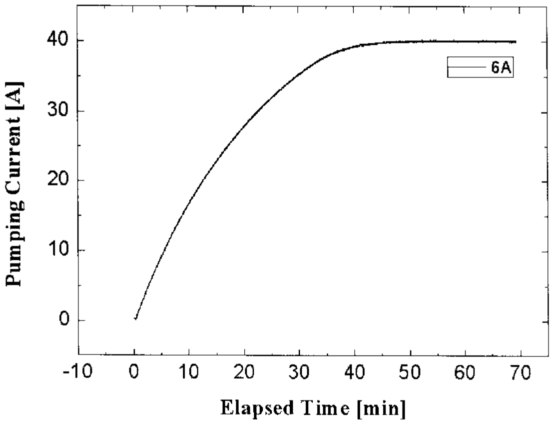


Fig. 6. Experimental result of pumping current of HTS magnet.

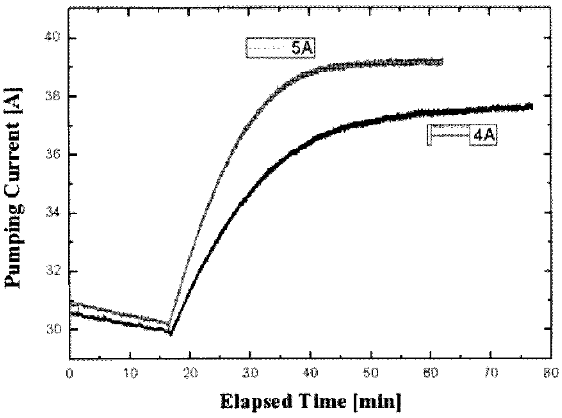


Fig. 7. Experimental result of pumping current in the operating current of 30A.

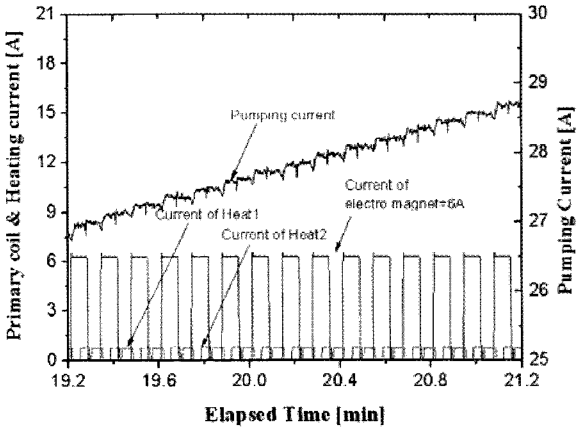


Fig. 8. Experimental result of pumping current and heating current with 6A of converter.

상태에서 충전특성을 조사하였다. 그림7은 제안한 시스템을 보상기로 적용하기위해 영구전류모드 30A에서 운전하였으며, 컨버터1에서 5A와 4A의 정전류가 인가되었을 때의 안정적인 충전특성을 확인하였다.

그림 8은 컨버터1에서 6A의 정전류를 인가하였을 때 히터 1과 히터2의 전류, 마그넷 전류와 펌핑전류와의 상관관계를 나타내었다.

3. 결 론

본 논문에서는 태양광에너지 시스템을 결합한 고온 초전도 자속펌프를 설계, 제작하여 영구전류모드에서의 충전전류 기초실험을 수행하였다. 초전도마그넷에 에너지를 공급하는 방법으로 태양광 시스템과 전력전자기술을 이용한 컨버터의 설계 및 실제 제작을 통하여 관련분야의 융합기술을 습득하였다. 그리고 태양광으로부터 공급된 전기에너지가 초전도 마그넷에 안정적으로 충전됨을 확인하였다. 이와 같은 기반기술은 태양광에너지를 초전도 마그넷에 저장하는 에너지 저장기술의 기반기술이 되며, 다양한 컨버터의 개발을 통해 대용량의 전류를 저장하는 저장장치로서의 가능성을 확인하게 되었다.

또한 기존의 자속펌프는 외부에서 DC 에너지원을 공급받는 반면에, 제안된 시스템은 태양광에너지를 이용함으로써 시스템의 전력효율을 극대화할 수 있음을

확인할 수 있었다.

추후 계획으로는 컨버터의 다양한 동작조건에서의 안정적인 충전 특성을 조사하게 되며, 태양광에너지를 초전도 마그넷에 저장하기 위한 대용량의 컨버터제작과 동작특성을 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2010년도 산학연공동기술개발사업(No.00043401)의 연구 수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

[1] 김보현, 문은아, 김현철, 채봉, 김용재, 조금배, 백형래,“태양광발전용. 축전지의 충방전제어에 관한 연구,” 전력전자학회 2008년도 학술대회 논문집 pp. 612~614. 2008.

[2] Yoon Do Chung, Dae Wook Kim, Hyun Chul Jo, Yong soo Yoon, Tae kuk Ko, "Fundamental performance of novel power supply for HTS magnet using solar energy," ACASC2009 (Asian Conference 2009 on Applied Superconductivity and Cryogenics), Matsue, Japan P-23, Dec. 2009.

[3] 변상필, 정훈영, 박정규, 채민영, “태양광발전을 통한 하이브리드 자동차의 전력 공급 시스템”, 전력전자학회지, 제 13권 제 4호, pp. 56~57, 2008.9.

[4] 갑병복, 차인수, 임중열, 윤정필, 박세준,“ 태양광을 이용한 정원등”, 전력전자학술대회 논문집(I), pp129~132, 2004.7.

[5] P. Tixador, M. Deleglise, A. Badel, K. Berger, B. Bellin, J.C. Vallier, A. Allais, C.E. Bruzek, “First tests of a 800 kJ HTS SMES”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity vol. 18, no. 2, pp. 774~778, 2008.

[6] D.W Hazelton, X.Yuan, H.W. Weijers, S.W. Van Sciver, "HTS insert coils for high field NMR spectroscopy," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 9, no. 2, pp. 956~959, June 1999.

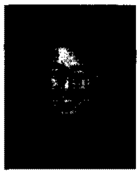
[7] 조현철, 장기성, 장재영, 김형준, 정윤도, 윤용수, 고태국, "BSCCO Magnet 제작 및 영구전류모드에서의 전류 보상운전 특성," 한국초전도저온공학회 논문지 12권 1호, 2010년 3월.

[8] Kaoru Nemoto et al, "HTS magnet for maglev applications (2)-magnet structure and performance," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 16, no. 2, pp. 1104-1107, June 2006.

[9] 최동진, "태양광 발전시스템에서 모듈 설치 각도와 어레이 간격의 비교 연구," 한국전기학회 논문지 vol.23, no.1, pp.162~168. 2009.

[10]조현철, 양성은, 김영재, 황영진, 윤용수, 정윤도, 고태국, "고온초전도 전원장치를 이용한 BSCCO Magnet의 충전 및 영구전류 운전특성," 한국초전도저온공학회 논문지 11권 1호, 2009년 3월.

저 자 소 개



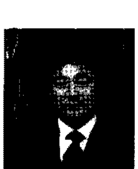
김대욱(金大旭)
1973년 2월 7일생, 1996년 경남대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동대학원 전기공학과(공학석사), 2007~2008 Conergy, Central Engineering팀 차장, 현재 연세대학교 수소연료전지 특성화대학원 수소연료전지협동 박사과정.

정윤도(鄭允道)
1972년 2월 16일생, 1999년 건국대학교 전기공학과 졸업, 2001년 연세대학교 전기전자공학과 졸업(공학석사), 2007년 京都(Kyoto)대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 수원대학교 전기공학과 연구교수.

조현철(趙賢哲)
1979년 11월 30일생, 2007년 동국대 공대 전기공학과 졸업, 2009년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.

윤용수(尹庸銖)
1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 연세대 공학석사, 2001년 동 대학원 공학박사, 1985~1998년 대우전자(주)개발팀장, 현재 안산공과대학 전기과 부교수.

김현기(金賢起)
1955년 2월 26일생, 1977년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학박사), 현재 수원대학교 전기공학과 교수, 산학협력단장, (사)한국산학연협회 회장, 국가과학기술위원회 정책전문위원.



고태국(高太國)
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP졸업(M.SC). 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP졸업(Ph.D). 1986년~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 2008년~2010년 한국 초전도 저온공학회 회장, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국 초전도 저온공학회 명예회장.