

600 kJ 전도냉각 고온초전도 SMES의 전기절연 설계

The Electrical Insulation Design of 600kJ Conduction Cooled HTS SMES

최재형¹, 광동순¹, 천현권¹, 민치현¹, 김해중², 성기철², 김상현^{3,*}Jae-Hyeong Choi¹, Dong-Soon Kwag¹, Hyeon-Gweon Cheon¹, Chi-Hyun Min¹,
Hae-Jong Kim², Ki-Chul Seong² and Sang-Hyun Kim^{3,*}

Abstract: The electrical insulation design of 600 kJ conduction cooled high-T_c superconducting magnetic energy storage (SMES) have been studied in this paper. The high voltage is applied to both ends of magnet of high-T_c SMES by quench or energy discharge. Therefore, the insulation design of the high voltage needs for commercialization, stability, reliability and so on. In this study, we analyzed the insulation composition of a high-T_c SMES, and investigated about the insulation characteristics of the materials such as Kapton, AlN, Al₂O₃, GFRP and vacuum in cryogenic temperature. Base on these results, the insulation design for 600 kJ conduction cooled high-T_c SMES was performed.

Key Words: SMES, insulation design, conduction cooling.

1. 서 론

최근 고온초전도 선재가 높은 임계전류와 우수한 기계적 특성을 갖도록 개량되어 다양한 고온초전도 마그네트가 설계·제작 되고 있다[1-2]. 저온초전도체보다 고자장 특성을 가지는 고온초전도체를 사용함으로써 마그네트 크기와 용량을 감소시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다[3]. 이에 따라 고온초전도 전력기기의 개발을 위한 연구가 세계적으로 활발하게 진행되고 있으며[4-5], high-T_c superconducting magnetic energy storage (SMES) 시스템은 그 중 하나이다. SMES는 전력시스템 안정화, 부하 및 전압변동의 보상, 주간 부하 평준화 등을 위해 개발되고 있다[6]. 한국에서는 2004년부터 고온초전도 SMES의 설계와 제작에 관한 핵심기술을 위한 연구가 이루어지고 있다.

SMES는 반드시 극저온 장치를 필요로 하는데 두 가지의 냉각 방법을 사용하고 있다. 하나는 초전도 코일을 한제 안에 침적하는 방식이고 다른 하나는 냉동기로 전도냉각 시키는 방식이다. 전도냉각 방식은 침적 방식에 비해 작고 가볍고, 설치 장소나 각도에 구애 없이 유연한 구성이 가능하다. 일반적으로 2단 GM 냉동기를 사용하여 냉각하게 되며, 첫째 단의 냉각판은

전류리드의 냉각, 전도판과 편조선에 의한 복사 차폐를 위해 사용되고 둘째 단의 냉각판은 고온초전도 코일의 냉각에 사용되어진다[7].

한편, SMES의 마그네트에 에너지를 충·방전할 경우에 코일 양단에 고전압이 인가되어진다. SMES의 상용화와 안정성, 신뢰성 확보를 위해서 이 고전압의 최적 절연설계가 필요하다. 이와 같은 관점에서 저자들은 선재의 곡률반경 특성, 연면방전에 미치는 돌기물의 특성, 진공도의 영향, 절연재료에 대한 영향 등의 여러 가지 절연구성요소에 대한 기초 절연특성을 연구하였다[8-10]. 본 논문에서는 실용적인 관점에서 600kJ 전도냉각 SMES의 주요 절연요소를 분석하고 각 요소들의 절연특성에 관해 연구하였다. 특히, 냉동기의 전기적 보호를 위한 절연에 있어 AlN 플레이트를 사용한 기존의 방법뿐만 아니라 냉각구조 및 기계적 특성을 고려한 새로운 절연방법에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과를 바탕으로 600kJ 전도냉각 SMES의 절연설계를 행하였다.

2. 절연구성 및 특성

Fig. 1은 600kJ급 전도냉각형 high-T_c SMES의 절연구성을 나타낸다. 주요 절연요소는 턴간 및 층간, 냉동기-마그네트간, 냉동기-전류리드간, 대지간 절연 등으로 구성된다. 또한 각 절연요소들의 구조와 특성을 Table 1에 나타내었다. 각 요소들의 절연구조와 방전특성에 따라 적합한 절연재료를 선택하고, 절연구조를 모의한 전극계를 제작하여 전기적 특성을 조사하였다. 600kJ급 SMES용 전력변환기의 최대 출력전압은 DC 3,000 V이고, 절연설계 목표전압은 1.5배의 여유치를

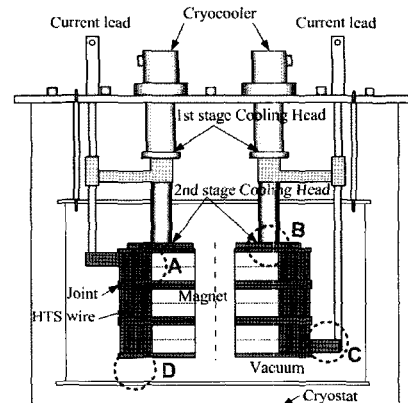


Fig. 1. Schematic diagram of insulation composition for conduction cooled HTS SMES.

¹학생회원 : 경상대 대학원 전기공학과

²정 회 원 : 한국전기연구원 초전도기기연구그룹

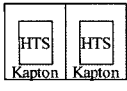
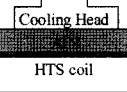
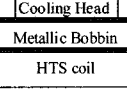
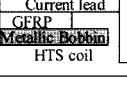
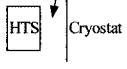
³정 회 원 : 경상대 대학원 전기공학과

*교신저자 : shkim@gsnu.ac.kr

원고접수 : 2007년 8월 9일

심사완료 : 2007년 9월 5일

Table 1. The structure and characteristics of insulation composition of 600 kJ conduction cooled high-Tc SMES.

Insulation composition	Insulation structure	Breakdown characteristics	Design voltage
Turn-to-turn Layer-to-layer		puncture	2 V (turn) 200V (layer)
Cryocooler -magnet		puncture flashover	4,500 V
		puncture	4,500 V
Cryocooler -current lead		flashover	4,500 V
Magnet-ground		puncture	4,500 V

고려하여 4,500 V로 설정하였다. 마그네트는 22개의 더블 팬케이크 코일(DPC)로 이루어져 있으며, 각 DPC은 초전도선이 100회 권선되어 있다. 또한 마그네트와 전류리드는 전도냉각을 위해 냉동기의 냉각판과 물리적으로 직접 접촉되어 있다. 따라서 Table 1에서 나타내는 바와 같이 턴간 전압은 약 2 V, 층간 전압은 200 V이고, 냉동기-마그네트간 전압, 냉동기-전류리드간 전압 및 대지간 전압은 4,500 V로 설정하였다.

3. 실험장치 및 방법

극저온 및 고진공에서의 AlN의 전기절연특성을 연구하기 위한 실험 장치는 크게 냉동기와 진공장치, 극저온 용기, 전압공급원 등으로 구성된다. 냉동기는 GM냉동기(model:AL300, Cryomech Co.)로 냉각판의 최대 도달 냉각온도는 40 K 정도이다. 진공장치의 최대 도달 진공도는 1.3×10^{-6} torr이고, Balzers사(PKR 250)의 진공도센서를 이용하여 측정하였다. 극저온 용기는 높이 900 mm, 내경 300 mm인 스테인레스강(SUS) 용기로 제작되었으며 열의 침입을 막기 위하여 진공으로 된 열절연층으로 구성된다. DC 고전압 전원의 최대 출력전압은 100 kV이다. 본 연구에 사용된 모의전극의 표면은 표면 거칠기 $0.1 \mu\text{m}$ 이하로 연마하고 에탄올 중에서 초음파 세척하여 경면처리 하였다. 전극계의 온도측정은 실리콘 다이오드를 사용하였으며 극저온 용기 플랜지의 하부방향으로 780 mm에 위치한 냉각판에 부착되어 있다. 온도의 조절은 냉각판에 부착된 열선을 사용하였다. 실험 순서는 모의전극계가 설치된 극저온용기 내부를 10^{-6} torr 이하의 고진공으로 진공배기한 후 냉동기를 작동시켜 40 K까지 전도냉각방식으로 냉각시킨 후 고전압전원을 초당 1 kV 씩 상승시켜 전압을 인가하였다. 각 절연구성에 대한 실험결과는 와이불(Weibull) 확률 분포를 통해 0.1% 최대 파괴확률전압을 구하고, 그 결과를 바탕으로 절연설계 목표전압에 대한 600kJ급 전도냉각형 high-Tc SMES의 절연설계를 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 턴간 및 층간 절연

턴간 및 층간 절연(part A)은 초전도선을 감싸는 Kapton 필름의 두께와 권수에 의존한다. 따라서 구리 테이프 선재(두께 0.3 mm, 폭 4 mm)에 Kapton 필름(두께 0.025 mm, 폭 10 mm)를 30% 중첩하여 권선하고 두 구리 테이프 선재를 접합시킨 후 각 반대편에 고전압과 접지에 연결하였다. Kapton 필름의 권수가 1, 2, 3장의 경우에 대한 관통절연과파 특성을 조사하였다. Fig. 2는 턴간 및 층간 절연을 위한 Kapton 필름의 권수에 따른 DC 관통절연과파전압에 대한 와이불 확률분포를 나타낸다. 0.025mm Kapton 필름을 30% 중첩하여 권선하였으며 1장 권선의 Kapton 필름의 두께는 0.05 mm이고, 절연된 두 선재를 접하고 각 고전압과 접지에 연결하였다. 그러므로 1장 권선의 총 Kapton의 두께는 0.1 mm이다. 그림에서의 점들은 파괴전압을 나타내고 x-축과 만나는 직선은 0.1%의 와이불 최대 파괴확률전압을 표시하며 각각 7.6, 12.8, 15.9 kV이다. 절연과파 전압은 권수의 증가에 따라서 증가하는 경향을 나타내고 있으며 본 논문의 모델이 되는 600 kJ급 에너지 저장 용량의 턴간 및 층간 내전압인 200 V에 대해서는 0.025 mm 두께의 Kapton 필름 1장을 30% 중첩하여도 높은 절연분담을 할 수 있으나 절연지의 기계적 특성을 고려하여 절연지 보호 및 결함 등을 보완할 수 있도록 50%의 중첩이 적절할 것으로 사료된다.

4.2. 냉동기-마그네트간 절연

냉동기와 마그네트간의 절연 (part B)은 냉각구조에 따라 두 가지 방법으로 나눌 수 있다.

첫번째 방법은 냉동기로부터 마그네트 코일을 냉각하기 위하여 열전도도가 우수한 무기절연재료를 냉각판과 마그네트 보빈 사이에 삽입하는 방식이다. 본 연구에서는 냉각효과를 극대화함과 동시에 전기적으로 우수한 절연특성을 가진 AlN 플레이트를 사용하였다. AlN은 열전도도가 $150 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로 우수하면서도 뛰어난 절연내력을 가졌다. AlN 플레이트의 두께와 크기를 결정하기 위하여 연면방전 특성과 관통과파 특성을 조사하고, 그 결과를 바탕으로 절연설계를 하였다. 실험은 직경 10 mm의 스테인레스강(SUS)으로 된 구 전극과 직경 40 mm, 높이 15 mm, 단부 곡률반경 10 mm인 SUS 평판 전극계 사이에 AlN을 삽입하여 관통

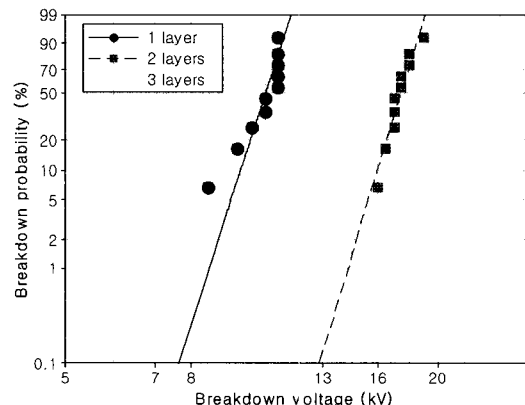


Fig. 2. The Weibull probability distribution curves of the puncture breakdown of Kapton film.

파괴 특성을 조사하였으며, 알루미늄 테이프로 된 단부의 예각이 60°, 곡률반경 25 μm 인 삼각전극과 길이 30 mm, 곡률반경 10 mm인 평판 전극을 AlN 플레이트 표면에 접착하여 연면방전 전압을 측정하였다. Fig. 3은 냉동기와 마그네트간 절연을 위한 AlN의 연면방전 및 관통파괴 특성에 대한 와이블 확률분포 곡선을 나타낸다. 연면방전 실험에 사용된 전극계의 전극간 거리는 6 mm이고, 관통파괴 실험에 사용된 AlN 플레이트의 두께는 1 mm이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 x-축과 만나는 연면방전 및 관통파괴 0.1% 와이블 최대 파괴전계는 각각 1.16, 39.4 kV/mm이다. 600 kJ SMES의 절연설계 목표전압이 4,500 V이므로 연면절연거리는 3.9 mm 이상이어야 한다. 한편, 관통절연파괴전계로부터 절연두께를 산출하면 0.12 mm이다. 그러나 냉동기의 냉각판과 마그네트 보빈은 전도냉각을 위해 큰 압력으로 접촉시켜야하므로 0.12 mm의 AlN 플레이트만 사용하여 절연하기에는 곤란할 것으로 사료된다. 그래서 본 연구에서는 다른 냉각구조에 따른 절연방법을 적용하였다.

두번째 방법은 마그네트 보빈의 표면에 얇은 절연체를 코팅하여 절연하는 방식이다. 이 방식의 절연은 마그네트 보빈에 코팅된 절연체의 관통절연파괴 특성에 의존하므로 두께를 변화시켜가며 관통절연파괴 특성을 조사하였다. Fig. 4는 마그네트의 코팅절연을 위한 Al_2O_3 의 관통절연파괴 특성에 대한 와이블 확률분포 곡선을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 코팅된 절연체의 두께가 두꺼워 짐에 따라 관통파괴 전압도 상승하는 것을 알 수 있다. 냉동기와 마그네트간의 절연설계 전압이 4,500 V이므로 절연파괴전계로부터 절연체의 두께를 구하면 0.13 mm가 된다.

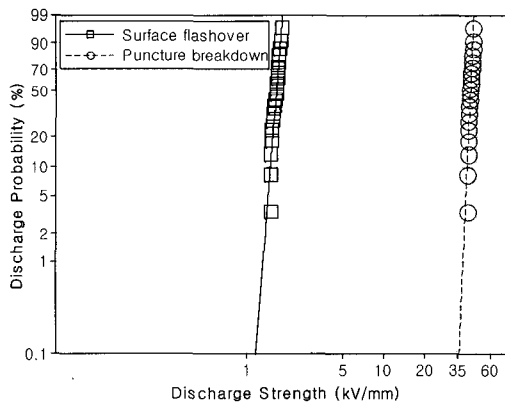


Fig. 3. The Weibull probability distribution curves of the surface flashover and puncture breakdown of AlN plate.

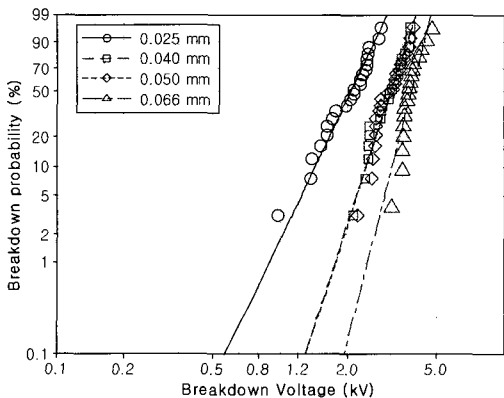


Fig. 4. The Weibull probability distribution curves of the puncture breakdown of Al_2O_3 plate.

4.3. 냉동기-전류리드간 절연

냉동기-전류리드간 절연 (part C)은 초전도 코일과 전류리드의 접합부분이 마그네트 보빈에 직접적으로 접촉되는 것을 방지하기 위해 필요하다. 마그네트 보빈은 전도냉각을 위해 냉동기와 물리적으로 접촉되어 있으므로 냉동기를 보호하기 위해 전류리드와의 절연이 필요하다. Table 1의 냉동기-전류리드간의 절연구조와 같이 절연재료의 연면방전 특성에 의존한다. 한편, 연면방전은 고체절연물의 형상, 전극의 표면처리, 절연물의 재료, 인가되는 전압의 형태 등에 의해 다양한 특성을 나타낸다. 본 연구에서는 극저온에서도 수축률이 낮으며 기계적 특성과 전기 절연 특성이 양호하여 극저온 절연재료 및 구조물로 널리 사용되고 있는 GFRP를 사용하여 냉동기와 전류리드간의 절연을 행하였다. GFRP 플레이트 표면에 AlN 플레이트의 연면방전특성 시험에 사용된 것과 동일한 삼각-평판 전극으로 전극간 거리를 3, 5, 7 mm로 변화시켜가며 연면방전 특성을 조사하였다.

GFRP의 연면방전 특성의 와이블 확률분포 곡선을 Fig. 5에 나타낸다. 연면길이를 변화시킬 때 연면방전 전압은 연면길이의 증가함에 따라서 증가하다가 포화하는 경향을 나타내었다. Fig. 5의 0.1% 최대 파괴확률 전압으로부터 냉동기-마그네트간의 절연설계 목표전압 4,500 V에 대한 연면거리는 2.3 mm 이상 되어야 절연 분담을 할 수 있음을 알 수 있다.

4.4. 대지간 절연

전도냉각형 high- T_c SMES의 극저온용기 내부는 10^{-6} torr 이상의 고진공이다. 극저온용기와 그 안에 위치한 마그네트 코일, 냉동기 및 전류리드 등 내부 기체들과의 절연요소인 대지간 절연 (part D)은 진공의 관통절연파괴 특성과 밀접한 관련이 있다. 그러므로 대지간 절연설계를 위해 AlN의 관통파괴특성 시험에 사용된 것과 동일한 전극계를 사용하여 2×10^{-6} torr의 진공도에서 전극간격을 변화시켜가며 진공의 관통파괴 특성을 조사하였다.

Fig. 6은 1.5×10^{-6} torr에서 진공의 관통절연파괴 특성에 대한 와이블 확률분포곡선이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 0.1% 최대 파괴전압은 전극간격이 3, 5 mm 일 때 각각 15.5, 21.94 kV 이다. 600 kJ SMES의 대지간 절연설계 목표전압인 4,500 V에 대하여 최대 파괴확률전계로부터 극저온 용기와 내부의 주요기기들 간의 절연거리는 1.1 mm가 된다.

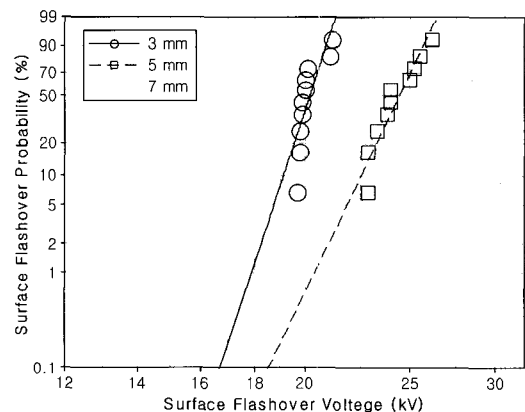


Fig. 5. The Weibull probability distribution curves of the surface flashover of GFRP plate.

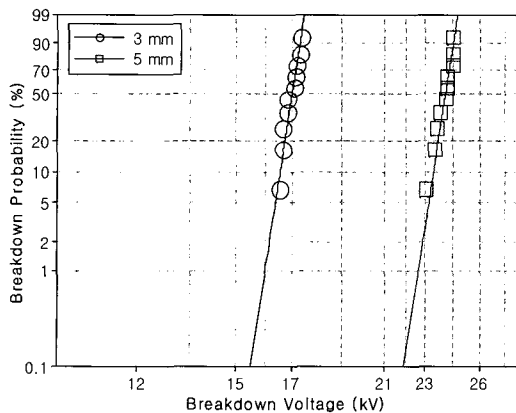


Fig. 6. The Weibull probability distribution curves of the puncture breakdown of vacuum.

그러나 이는 모의실험에 의한 정량적인 계산값이므로 실제 운전시의 극저온 용기 외부의 충격이나 진동 등의 기계적 특성과 내부기기들의 불평등 전계의 형상 등을 고려하여 절연이격거리가 결정되어야 할 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 600kJ 전도냉각 SMES의 주요 절연요소를 제시하고 각 요소들의 절연특성에 관해 연구하였다. 마그네트 코일간의 턴간 및 층간 절연, 냉동기-마그네트 간 절연, 냉동기-전류리드간 절연, 대지간 절연 등으로 각 절연요소들을 구분하고, 각 요소들의 절연재료인 Kapton, AlN/Al₂O₃, GFRP, Vacuum 에 대한 절연 파괴 특성을 조사하였다. 절연설계를 위한 목표전압은 600 kJ SMES에 사용되는 전력변환기의 출력전압인 DC 3 kV를 참고하였으며, 일반적인 전력기기의 여유치인 1.5배를 고려하여 4.5 kV로 설정하였다. 특히, 냉동기-마그네트간 절연에 있어 AlN 플레이트를 사용한 기존의 방법뿐만 아니라 마그네트 보빈의 냉각구조 및 기계적 특성을 고려한 새로운 절연방법에 관한 절연특성에 관해 연구하였다. 측정된 결과들을 와이בל 확률통계처리를 통해 0.1%의 최대 파괴전계를 구하고 이를 바탕으로 600kJ급 전도냉각 high-T_c SMES의 각 절연요소들의 절연설계를 하였으며 그 결과는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. The insulation design for 600 kJ conduction cooled high-T_c SMES.

Insulation composition	Materials	Insulation specifications
Turn-to-turn Layer-to-layer	Kapton	One layer, 50% overlapping (Thickness: 0.025mm, Width: 10 mm)
Cryocooler -magnet	AlN	Thickness: 0.12 mm Collar length: 3.9 mm
	Al ₂ O ₃	Thickness: 0.13 mm
Cryocooler -current lead	GFRP	Collar length: 2.3 mm
Magnet-ground	Vacuum	Insulation length: 1.1 mm

턴간 및 층간 절연은 0.025 mm Kapton 필름을 50% 중첩하여 1회 권선하여 절연하고, 냉동기-마그네트간 절연은 AlN 플레이트를 사용할 경우에는 연면거리 3.9 mm, 두께 0.12 mm 이고, Al₂O₃의 코팅 된 마그네트 보빈을 사용할 경우는 코팅두께 0.13 mm이다. 냉동기-전류리드의 절연은 GFRP를 사용하여 연면거리 2.3 mm로 하며 대지간 절연은 10⁻⁶ torr 이상의 고진공에서 절연이격거리가 1.1 mm가 된다.

차후, 냉동기-마그네트 절연에 있어 본 논문을 통해 제시된 두 가지 절연방법 중 전기절연뿐만 아니라 기계적 특성 및 열적 특성을 고려한 절연특성을 비교·연구하고, 마그네트 모델의 제작과 시험을 통한 검증 을 계획 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] M. Ono, S. Hanai, K. Tasaki, M. Hiragishi, K. Koyanagi, C. Noma, T. Yazawa, Y. Otani, T. Kuriyama, Y. Sumiyoshi, S. Nomura, Y. Dozono, H. Maeda, T. Hikata, K. Hayashi, H. Takei, K. Sato, M. Kimura, T. Masui, "Development of a 1 MJ cryocooler-cooled split magnet with Ag-sheathed Bi2223 tapes for Si single-crystal growth applications," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 10, pp. 499-502, 2000.
- [2] K. Funaki, M. Iwakuma, K. Kajikawa, M. Takeo, J. Suehiro, M. Hara, K. Yamafuji, M. Konno, Y. Kasagawa, K. Okubo, "Development of a 500 kVA-class oxide-superconducting power transformer operated at liquid-nitrogen temperature," Cryogenics 38, pp. 211-220, 1998.
- [3] K. Tasaki, Y. Sumiyoshi, M. Tezuka, H. Hayashi, K. Tsutsumi, K. Funaki, M. Iwakuma, "Design Study of a 3.6 MJ HTS-SMES Compact magnet design," Physica C 357-360, pp. 1332-1335, 2001.
- [4] Q. Wang, S. Song, Y. Lei, Y. Dai, B. Zhang, C. Wang, S. Lee, K. Kim, "Design and Fabrication of a Conduction-Cooled High Temperature Superconducting Magnet for 10 kJ Superconducting Magnetic Energy Storage System," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 16, pp. 570-573, 2006.
- [5] A. Ichinose, H. Kasahara, H. Sakaki, S. Akita, A. Ishiyama, A. Maruyama, S. Koso, "Research and development of high-T_c SMES," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 15, pp. 1947-1950, 2005.
- [6] H. Hayashi, K. Tsutsumi, K. Funaki, M. Iwakuma, K. Tasaki, Y. Sumiyoshi, M. Tezuka, "Design study of a 1 GJ class HTS-SMES (1) Conceptual design of a magnet system," Physica C 357-360, pp. 1327-1331, 2001.
- [7] American Superconductors Inc., "Revolutionizing the Way the World Manages Energy," 1997, Annual Report.

- [8] 천현권, 최재형, 곽동순, 김해중, 성기철, 윤문수, 김상현, "고온초전도 SMES의 절연특성," 한국전기전자재료학회논문지, 19권, 6호, pp. 574-578, 2006.
- [9] 최재형, 곽동순, 천현권, 김상현, "전도냉각 고온초전도 SMES 시스템의 기초절연 특성," 대한전기학회논문지, 55C권, 8호, pp. 404-410, 2006.
- [10] 최재형, 곽동순, 천현권, 김해중, 성기철, 김상현, "전도냉각형 고온초전도 SMES의 냉동기와 마그네트 간의 절연 특성," 한국초전도저온공학학회논문지, 8권, 3호, pp. 45-48, 2006.



민치현(崔在亨)

1979년 6월 3일생, 2006년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 현재 동대학원 전기공학과 석사과정.



김해중(金海鍾)

1965년 11월 25일생, 1993년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1996년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원.



성기철(成耆哲)

1956년 2월 20일생, 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1983년 동대학원 전기 공학과 졸업(공학석사), 2002년 창원대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹장, 책임연구원.



김상현(金相賢)

1950년 2월 7일생, 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1986년 일본 오사카대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1986년~1989년 한국전기연구원 초전도연구실 실장, 1999년~2001년 경상대학교 공과대학 학장, 2000년~2002년 한국초전도·저온공학회 회장, 1989년~현재 경상대 공대 전기공학과 교수.

저 자 소 개



최재형(崔在亨)

1979년 6월 3일생, 2005년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 현재 동대학원 전기공학과 석사과정.



곽동순(郭東洵)

1975년 9월 3일생, 2002년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



천현권(千賢權)

1978년 6월 2일생, 2004년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.