

전도냉각형 HTS SMES 개발을 위한 미니모델의 절연성능평가

Insulation test of Mini model for the Development of the conduction cooled HTS SMES

최재형¹, 광동순¹, 천현권¹, 김해중², 성기철², 김상현^{3,*}

Jae-Hyeong Choi¹, Dong-Soon Kwag¹, Hyeon-Gweon Cheon¹,
Hae-Jong Kim², Ki-Chul Seong² and Sang-Hyun Kim^{3,*}

Abstract: The 600 kJ class high-temperature superconducting (HTS) SMES (superconducting magnetic energy storage) system is being developed by Korean Electrotechnology Research Institute (KERI). The system is operated in cryogenic temperature and high vacuum condition. The SMES magnet was cooled by conduction cooling method using a Gifford-McMahon cycle cryocooler. Thus, the electric insulation design at cryogenic temperature and high vacuum is a key and an important element. Because it accomplishes compact design that is a big advantage of HTS SMES. This paper describes the electric insulation design, fabrication and experimental results for a mini model of conduction cooled HTS SMES.

Key Words: electrical insulation, HTS SMES, breakdown, conduction cooled.

1. 서 론

임계전류가 높고 기계적 특성이 향상된 고온초전도 (HTS : High Temperature Superconducting) wire의 개발과 더불어 초전도에너지저장장치(SMES : Superconducting Magnetic Energy Storage)의 상용화에 대한 연구가 한국을 비롯한 일본, 미국 등에서 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 전력산업연구개발 사업의 일환으로 600 kJ급 전도냉각형 HTS SMES의 개발연구가 진행 중이다.

이를 개발하기 위해서는 600 kJ급 HTS 마그네트 개발, 쿨링 검출 및 보호대책, 600 kW 전력품질 제어기 개발, 800 A 전류리드부 개발, 극저온 용기 및 소형냉동기를 사용한 전도냉각(conduction cooled) 시스템 개발 등의 요소기술의 해결이 반드시 필요하다. 이 중에서 HTS 마그네트 개발에는 도체의 대용량화, 교류손실의 저감대책, 보빈(bobbin) 및 극저온에서의 고전압 절연기술, 대전류 통전에 의한 전자력 및 진동 대책 등을 해결해야 한다[1].

특히 HTS 마그네트에 저장된 에너지를 부하에 공급할 경우와 펄스출력을 얻기 위한 경우, 또는 쿨링 발생시에 단시간 내에 에너지를 방출시킬 경우에 코일 양단에 고전압이 발생하므로 상용화를 위해서는 이들 고전압을 고려한 최적절연설계가 필요하다[2-3]. 또한 SMES의 소형화(compact), 안정성, 경제성 및 전력공급에 대한 신뢰성 확보를 위해서는 반드시 확립되어야 할 핵심기술이라 할 수 있다[4-5].

이에 본 논문에서는 600 kJ급 전도냉각형 HTS SMES의 절연구성을 분석하였으며, 절연파괴 시험을 통하여 축적한 데이터를 이용하여 전도냉각형 HTS SMES의 절연설계를 하고 미니모델의 제작 및 절연성능평가를 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 절연 구성

600 kJ급 전도냉각형 HTS SMES의 절연구성을 Fig. 1에 나타낸다. 절연요소는 턴간(A), 층간(B), 냉동기-마그네트 간(C), 냉동기-전류리드 간(D), 대기간(E) 및 전류리드간(F) 절연 등으로 구성된다.

또한 절연설계를 하기 위하여 파악해야 할 주요 절연특성과 내전압을 Table 1에 나타낸다. 대기모드에서의 HTS SMES 마그네트는 초전도 코일에 의한 인덕턴스 성분이 거의 대부분이므로 코일 양단의 전압차가 거의 없으나, 충·방전모드의 경우에는 충방전 시간과 전력변환장치의 특성에 따라 코일 양단에 전압이 유기 된다. 본 논문의 모델이 되는 600 kJ HTS SMES에 적용되는 전력변환장치의 정격출력은 DC 1.5 kV이므로 여유치를 고려하여 2배값인 DC 3 kV를 내전압으로 설정하였다.

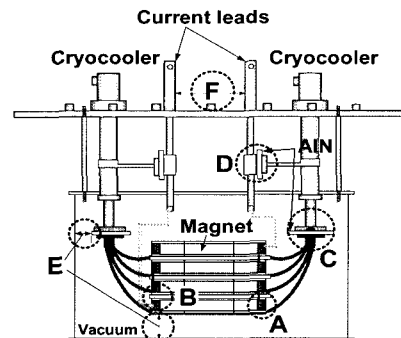


Fig. 1. The structure of insulation composition of conduction cooled HTS SMES.

¹학생회원 : 경상대 대학원 전기공학과
²정회원 : 한국전기연구원 초전도응용연구그룹
³정회원 : 경상대 전기공학과
*교신저자 : shkim@gsnu.ac.kr
원고접수 : 2007년 1월 4일
심사완료 : 2007년 2월 14일

Table 1. Insulation characteristics and withstand voltage of 600 kJ HTS SMES.

절연요소	절연특성	내전압 (kV)
턴간 (A)	관통파괴	0.025
층간 (B)	연면방전	1.5
냉동기-마그네트간 (C)	관통파괴, 연면방전	3
냉동기-전류리드간 (D)	관통파괴, 연면방전	3
대지간 (E)	관통파괴	3
전류리드간 (F)	관통파괴	3

2.2. 실험 장치

극저온 및 고진공에서의 절연특성을 연구하기 위한 실험장치는 크게 냉동기와 진공장치, 극저온 용기, 전압공급원, 시료 및 전극계 등으로 구성된다.

냉동기는 GM냉동기(model:AL300, Cryomech Co.)로 냉각판의 최대도달 냉각온도는 40 K 정도이다. 냉각판에 시료를 부착하고 냉동기를 작동하여 전도냉각 방식으로 시료를 냉각시킨다.

진공은 Noah Vacuum technology사의 진공장치로 배기하였으며, 최대 도달 진공도는 1.3×10^{-6} torr이다. 대기중에서부터 10^{-3} torr의 저진공의 경우는 진공장치에 부착된 Geissler관을 통해 확인하였으며, 고진공의 진공도는 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. 상부인 플랜지(flange)에는 냉동기, 진공 배기부 및 고전압 인가부가 연결되어 있다.

고전압 전원의 최대출력전압은 100 kV이며, 초당 1 kV 씩 상승시켜 전압을 인가하였다.

시료는 10^{-6} torr 이하의 고진공으로 진공배기한 후 냉동기를 작동시켜 40 K로 냉각하였다.

2.3. 시료 및 전극계

턴간 절연모델은 구리 테이프 선재(두께 0.3 mm, 폭 4 mm)에 Kapton 테이프(두께 0.025 mm, 폭 10 mm)를 30 % overlapping 한 후 두 구리 테이프 선재를 접합시켰다. 접합길이는 100 mm로 하였으며 면의 접촉을 좋게 하기 위하여 접합부의 중앙과 양단을 Kapton 테이프로 압착시켜 묶었다. 또한 선재의 양쪽 끝은 단부에서 전계가 집중되는 것을 방지하기 위하여 곡률반경을 50 mm로 하고 상·하부 반대쪽 양 끝단에 각각 고전압측과 접지측전원에 연결하였다.

냉동기와 마그네트 간의 연면방전 및 관통파괴 특성을 위한 모의전극계의 시료는 질화알루미늄(AIN : Aluminum Nitride) 플레이트(plate)를 사용하였으며 냉동기의 하부에 위치한 냉각판에 부착하여 전도냉각 시켰다. 접합부에서의 접촉저항 및 3중점을 줄이기 위하여 열전도도와 전기절연이 양호한 극저온용 콘 그리스(con-grease)를 사용하였다.

연면방전 특성을 파악하기 위한 전극계는 AIN 플레이트 표면 위에 알루미늄 테이프를 부착하여 고압부 및 접지부의 전극을 구성하였다. 고전압부인 삼각전극의 단부 곡률반경이 25 μ m이고 각도는 60°이다. 대향전극인 평판전극은 전극간 거리 d에 위치하며, 단부의

고전계 집중을 피하기 위하여 곡률반경을 10 mm로 하였다. 전극계는 냉동기의 냉각판과 접촉되어 냉각된다.

한편, 관통파괴용 전극계는 직경 10 mm인 SUS 재질의 구 전극과 직경 40 mm, 높이 15 mm, 단부 곡률반경 10 mm인 평판 전극을 사용하였으며 두 전극의 사이에 AIN을 삽입하여 그 특성을 조사하였다.

대지간(E) 및 전류리드간(F)의 절연특성은 SUS로 된 직경 10 mm인 구 전극과 직경 40 mm, 높이 15 mm, 단부 곡률반경 10 mm의 평판 전극계를 사용하여 2.0×10^{-6} torr의 진공 및 공기 중에서 전극간격을 변화시켜 관통파괴 특성을 조사하였다.

2.4. 실험 방법

전극표면과 스페이서는 연마기를 이용하여 표면거칠기 0.1 μ m 이하로 연마하고 에탄올 중에서 초음파 세척하여 경면처리 하였다. 극저온 및 고진공의 환경은 2.0×10^{-6} torr 까지 진공배기 한 후 진공도를 유지하면서 냉동기를 가동하여 상온에서 40 K까지 냉각하여 연면방전 및 관통파괴 특성을 조사하였다.

온도측정은 실리콘 다이오드를 사용하여 측정하였으며 극저온 용기 flange의 하부방향으로 각각 320 mm, 780 mm에 위치한 냉동기의 상부 및 하부 냉각판에 부착되어 있다. 온도의 조정은 냉각판에 부착된 열선을 사용하였다. 각 절연구성에 대한 실험결과는 10회 이상 단시간 파괴실험을 행하였으며 와이블(Weibull) 확률 분포를 통해 0.1 % 최대파괴확률전압을 구한 후 그 결과를 바탕으로 미니모델의 절연설계를 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

턴간 절연(A)은 초전도 도체를 감싸는 Kapton 절연지의 두께와 겹 수에 의존한다.

Fig. 2는 면접촉식 턴간 절연모델에 Kapton을 overlapping 방법으로 감은 경우 권선수에 따른 AC 절연파괴전압에 대한 와이블 확률 분포를 나타낸다. 30 % overlapping을 한 1턴의 Kapton 절연지의 두께는 0.06 mm이고, 두 도체를 접하였으므로 1회 권선의 총 Kapton 두께는 0.12 mm이다.

그림에서의 점들은 파괴전압을 나타내고 x-축과 만나는 직선은 0.1 %의 와이블 최대파괴확률전압을 표시한다. 그림에서 나타나는 바와 같이 권선수가 증가함에 따라 절연파괴 전압이 증가하는 경향을 나타내고 있다.

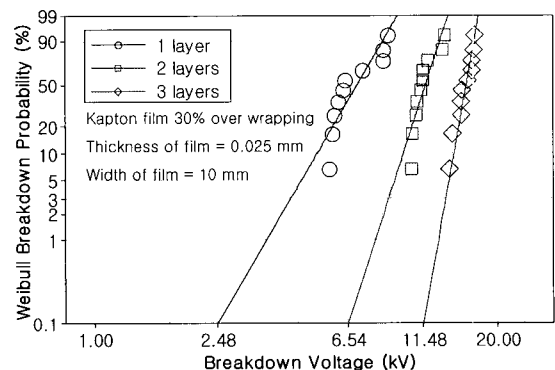


Fig. 2. Weibull probability distribution of breakdown properties of Kapton.

충·방전시의 턴간 내전압은 전체 코일 양단의 내전압인 DC 3kV에 대하여 2개의 더블펜케이크코일(DPC)에 대한 층간 전압을 1.5kV로 설정하였으며, DPC를 이루는 싱글펜케이크코일(SPC)의 턴수를 60턴으로 설정하여 턴간 내전압을 0.025 kV로 정하였다. 이에 대한 절연설계는 Kapton 절연지 1회 지권으로도 절연분담을 할 수 있음을 확인하였다.

냉동기와 마그네트 간의 절연(C)과 냉동기와 전류리드 간의 절연구조(D)는 서로 유사한 구조로 되어있다.

냉동기로부터 마그네트 및 전류리드를 냉각하기 위하여 열전도도가 우수한 무기절연재료를 사용하여 냉각효과를 극대화함과 동시에 전기적으로 우수한 절연특성을 가진 재료를 사용하여야 한다. 본 연구에 사용된 AlN은 열전도도가 150 W/mK로 우수하면서도 뛰어난 절연내력을 가진 무기절연재료이다[6]. AlN의 연면방전특성과 관통과피특성을 조사하고, 그 결과를 바탕으로 냉동기와 마그네트 및 전류리드 간의 절연설계를 행하였다.

Fig. 3은 AlN의 연면방전 및 관통과피 특성에 대한 와이블 확률분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 0.1 % 와이블 최대과피전압이 각각 4.55, 39.38 kV이고, 연면방전의 경우 전극간의 연면거리가 6 mm이므로 600 kJ급 에너지 용량의 운전 최고전압인 3 kV에 대한 연면절연거리는 3.95 mm가 된다.

한편 AlN의 관통과피 특성은 연면방전 특성과 함께 매우 중요하게 고려되어야 할 특성으로서 AlN 플레이트의 두께를 결정하기 위해 반드시 필요한 요소이다. 실험에 사용된 AlN 플레이트의 두께는 1 mm이고 본 SMES 시스템의 냉동기-마그네트 간의 내전압이 3 kV이므로 절연두께는 0.08 mm가 된다.

전도냉각 SMES의 극저온용기와 용기 내부의 기기들 사이에는 고진공으로 되어 있으며, 극저온 용기는 접지전위이므로 극저온용기와 내부 기기들 간의 절연(E)설계가 고려되어야 한다.

Fig. 4는 실제 SMES 장치의 내부 환경과 유사한 극저온 및 고진공 조건에서 DC 전압을 인가하였을 때 진공의 관통과피 전압을 와이블 통계처리 한 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전극간의 간격을 3, 5 mm로 변화시키기에 따라 0.1 % 최대과피전계값은 각각 15.49, 21.94 kV이므로 3 kV의 전압이 걸리는 마그네트 코일 또는 냉동기 등과 접지전위인 극저온 용기 간의 전기절연을 위해서는 1 mm의 이격거리를 필요로 한다.

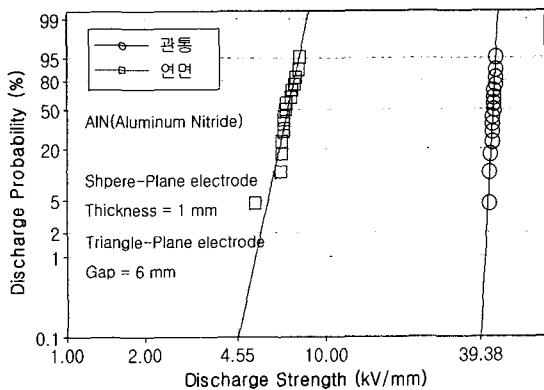


Fig. 3. Weibull probability distribution of surface flashover and breakdown properties of AlN.

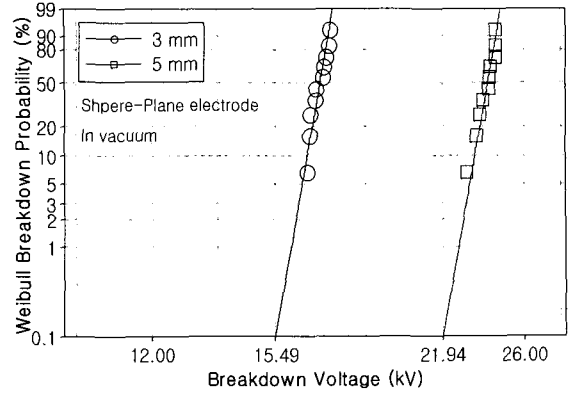


Fig. 4. Weibull probability distribution of breakdown properties in cryogenic temperature and vacuum.

Fig. 5는 외부에 노출되어 있는 전도냉각 HTS SMES의 전류리드 간의 절연(F)설계를 위한 DC 내전압을 인가한 경우의 공기의 관통과피 특성에 대한 와이블 확률 통계치를 나타낸다. 600 kJ급의 전도냉각 HTS SMES의 전류리드 양단에는 약 3 kV의 최고운전전압이 인가된다. 따라서 극저온 용기 내부의 전류리드 간의 절연설계는 대지간 절연과 동일하게 하며, 공기중의 외부 전류리드 간에는 공기에서의 관통과피 특성을 필요로 한다. 그림에서 알 수 있듯이 대기중에서의 공기의 0.1 % 최대과피전계값은 약 2.32~3.93 kV/mm이므로 전류리드 양단은 2 mm 이격거리가 계산되었다.

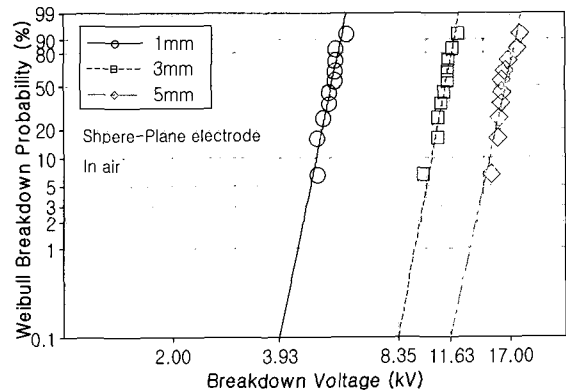


Fig. 5. Weibull probability distribution of breakdown properties in air.

4. 미니모델의 제작 및 성능평가

이상의 각 절연요소에 대한 절연특성 평가의 결과를 종합하여 600 kJ급 전도냉각형 HTS SMES의 개발을 위한 미니모델의 절연설계를 Table 2에 나타냈다.

또한 절연설계의 평가와 적용을 위해 턴수와 보빈의 크기를 축소한 미니모델을 제작하였다. Fig. 6은 미니모델을 위한 절연설계를 바탕으로 제작된 보빈의 형상과 치수를 나타낸다.

턴간 절연은 600 kJ급 모델과 동일하게 제작하였으며, 층간 절연은 전도냉각의 효과를 극대화 하고 턴간의 절연내력이 층간 절연을 분담할 수 있으므로 생략하였으며 냉동기와 미니모델 간의 절연재료인 AlN의 크기는 기계적인 특성으로 인해 두께 2 mm, 칼라길이 2 mm로 설계하였다. 턴의 횡수는 10회 권선하였으며, 실제 600 kJ급 SMES의 모델 크기의 약 40 %로 제작하였다. 미니모델을 냉동기의 냉각관에 부착한 후 실제 SMES의 운전조건과 유사한 극저온 및 진공의 환경에서 전기절연성능평가를 실시하였으며 약 9 kV의 절연파괴전압을 나타내었다.

Table 2. Insulation specification of mini model.

절연 요소	절연 재료	절연설계 사양	운전 환경
턴간	Kapton	2층, overlapping (두께 0.025 mm, 폭 10 mm)	10 ⁻⁶ torr
층간	-	턴간절연이 층간절연을 겸함	
냉동기- 마그네트간	AlN	두께 0.08 mm 연면거리 3.95 mm	40K
냉동기- 전류리드간	AlN	상동	
대지간	진공	절연이격거리 1 mm	대기
전류리드간	진공 공기	진공 절연이격거리 1 mm 공기중 절연이격거리 1 mm	

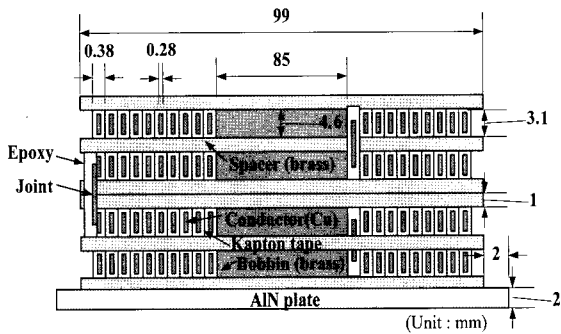


Fig. 6. Configuration and dimension of mini model.

5. 결 론

전도냉각형 고온 SMES의 절연요소들의 절연특성을 구분하고, 각 절연특성에 맞는 모의전극계를 제작하여 절연파괴시험을 하였다.

실험 결과를 바탕으로 0.1 % 와이블 확률분포를 통해 600 kJ급 용량에 대한 각 절연요소에 대한 최대파괴전계를 산출하고 미니모델을 제작하였다.

600 kJ급 HTS SMES의 내전압인 DC 3 kV의 0.1 % 최대파괴전계에 대한 절연성능시험의 결과는 약 DC 9 kV임을 확인하였다.

차후, 600 kJ급의 실제 모델 코일을 제작하고 전기적 특성뿐만 아니라 기계적, 열적 특성을 함께 고려한 절연성능평가를 계획 중이다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Kasahara, S. Akita, K. Tasaki, A. Tomioka, T. Hase, K. Ohata, N. Ohtani, and H. Sakaguchi, "Basic characteristic evaluation of cryocooler-cooled HTS coils," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 12, No. 1, pp. 766-769, 2002.
- [2] K. Nylund, and R. Schuler, "Insulation systems for synchronous machines," in Proceeding of the international conference SM 100, Zurich, part 1, pp. 182-188, 1991.
- [3] J. Gerhold, "Properties of cryogenic insulants," Cryogenics 38, pp. 1063-1081, 1998.
- [4] H.G. Cheon, S.M. Baek, K.C. Seong, H.J. Kim, S.H. Kim, "Insulation Characteristics for a Conduction-Cooled HTS SMES," Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 7, No. 2, pp. 39-43, 2005.
- [5] S. M. Baek, H. G. Cheon, D. S. Kwag, H. J. Kim, and S. H. Kim, "Experimental Study of Insulation Characteristics for a Conduction-Cooled HTS SMES," ICEMS 2004, pp. 191, 2004.
- [6] E. S. Dettmer, B. M. Romensko, H. K. Charles, B. G. Carkhuff, and D. J. Merrill, "Steady-state thermal conductivity measurements of AlN and SiC substrate materials," IEEE Trans. Components, Hybrids, and Manufacturing Tech., Vol. 12, No. 4, pp. 543-547, 1989.

저 자 소 개



최재형(崔在亨)

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



광동순(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.



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 초전도 응용연구그룹 선임연구원.



성기철 (成者哲)
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.