

고온초전도 SMES의 절연특성

Electrical Insulation Characteristics of HTS SMES

천현권¹, 최재형¹, 곽동순¹, 김해중², 성기철², 윤문수², 김상현^{1,a}

(Hyeon-Gweon Cheon¹, Jae-Hyeong Choi¹, Dong-Soon Kwag¹, Hae-Jong Kim², Ki-Chul Seong², Mun-Soo Yun², and Sang-Hyun Kim^{1,a})

Abstract

Toward the practical applications, on operation of conduction-cooled HTS SMES at temperatures well below 77 K should be investigated, in order to take advantage of a greater critical current density of HTS and considerably reduce the size and weight of the system. Recently, research and development concerning application of the conduction-cooled HTS SMES that is easily movement are actively progressing in Korea. Electrical insulation under cryogenic temperature is a key and an important element in the application of this apparatus. Using multi wrapped copper by Polyimide film for HTS SMES, the breakdown characteristics of models for turn-to-turn, that is surface contact model, were investigated under ac and impulse voltage at 77 K. A material that is Polyimide film (Kapton) 0.025 mm thickness is used for multi wrapping of the electrode. Statistical analysis of the results using Weibull distribution to examine the wrapping number effects on breakdown voltage under ac and impulse voltage in LN₂ was carried.

Key Words : HTS SMES, Turn-to-turn, Electrical breakdown

1. 서 론

최근 전력 에너지 소비 급증에 따라 대용량전기 에너지를 공급할 수 있는 기술의 필요성이 강하게 대두되고 있다. 송·변전계통은 에너지 소비의 급증과 밀집화로 인해 전력설비의 증설과 부지확보가 시급하나 어려움을 겪고 있으며 특히 환경문제 [1,2]가 부각되어 기기의 효율개선과 대체에너지 개발이 요구되고 있다. 이에 초고압, 대전류의 에너지 변환이 가능한 초전도 기기의 개발 연구가 활발하게 이루어지고 있다[3-5]. 그 중 초전도 SMES는 초전도 코일을 이용하기 때문에 효율이 높고, 고속으로 충·방전이 가능하므로 예측 불가

능한 순간 정전 및 순간 전압강하에 효율적으로 대응할 수 있을 뿐만 아니라 유효·무효전력에 대한 독립적인 제어가 가능하기 때문에 Flicker, Voltage Sag, Voltage Well등과 같이 종합적인 전력품질 보상용으로 매우 적합하므로 많은 관심을 모으고 있다[6,7].

초전도 SMES의 중요한 요소기술로서는 초전도 선재기술, 코일 보호기술, 전류도입선, 냉각기술, Cryostat기술, 입·출력 변환장치기술, 극저온 전기 절연기술 등이 있다. 이 중에서 특히 극저온 절연기술은 SMES의 소형화, 안정성, 경제성, 전력공급에 대한 신뢰성 확보를 위한 핵심기술이라 할 수 있다. 따라서 초전도 SMES의 전기절연기술은 반드시 선행되어야만 한다. 그러나 일부 연구가 진행되고 있으나 아직 극저온 절연기술의 확립을 위해서는 매우 미비한 상태이다.

초전도 SMES의 절연구성은 턴간, 층간, 섹션간, 대지간 및 전류리드 절연 등으로 구성된다. 권선 절연중 고분자 절연재료를 이용한 턴간(turn-to-

1. 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원
(경남 진주시 가좌동 900)
2. 한국전기연구원 초전도응용연구그룹
a. Corresponding Author : shkim@gsnu.ac.kr
접수일자 : 2005. 9. 13
1차 심사 : 2005. 11. 17
심사완료 : 2006. 5. 18

turn) 절연은 크게 코팅법과 절연지 권선법이 있다. 코팅법의 경우는 고분자 절연재료의 용융점 이상에서 작업하므로 열에 의한 특성 변화에 주의해야 한다. 또한 절연지 권선법은 고온초전도체의 취성이 크므로 권선 작업시 주의해야 한다. 초전도 SMES의 턴간에 걸리는 전압은 1권선당 유기되는 전압을 의미하며 실제 설계에서는 전압/권선수에 권선수가 결정된다. 운전상태에서는 매우 낮지만 켄치시에는 매우 높은 전압이 걸리므로 턴간절연 기술의 확립이 필요하다. 그러나 기초적인 데이터가 충분치 않아 초전도 SMES의 절연설계를 위해 반드시 선행되어야 한다.

이 같은 관점에서 본 연구는 최근에 관심을 끌고 있는 은 피복 고온초전도(HTS) 선재의 구조를 살펴보고 이와 유사한 모의 도체를 제작하여 액체 N₂중에서 턴간 절연과피 전압에 미치는 권선법, 단부의 곡률반경의 영향 등에 대하여 살펴보았다.

2. 실험

Kapton을 감는 방법은 평권과 중권으로 하였다. 절연 테이프의 겹침이 없는 평권은 butt gap이 없는 경우와 butt gap이 있는 경우로 하였다. butt gap이 있는 경우는 도체에 1회 권선 후 1 mm 간격을 두었으며, 절연 테이프가 겹치는 중권의 경우는 중권율을 10~30 %로 1, 2 및 3층으로 권선하였다. 턴간 절연모델은 고온초전도 선재를 모의하여 평각 구리 테이프 선재에 절연물을 권선하여 제작하고 극저온 절연 특성을 살펴보았다. 그림 1은 면접촉식 턴간 절연모델을 나타낸다. 액체 N₂중에서 선재를 회전하여 수차례 측정이 가능한 점접촉식의 경우는 직경 60 mm인 GFRP봉에 Kapton으로 절연된 구리 테이프를 감고 한 점에서 접촉되도록 하였다. 면접촉식 턴간 절연모델은 구리 테이프 선재(두께 0.3 mm, 폭 4 mm)에 Kapton 절연 테이프(두께 0.025 mm, 폭 10 mm)를 감고 2개의 구리 선재를 접합시켰다. 접합길이는 100 mm로 하였으며 면접촉을 좋게 하기 위하여 중앙과 양단을 Kapton 테이프로 압착시켜 묶었다. 또한 선재의 양쪽 끝은 단부에서 전계가 집중되는 것을 방지하기 위하여 곡률반경을 50 mm로 하고 각각 고전압측과 접지측 전원에 연결하였다.

국내외에서 연구 개발되고 있는 고온초전도 선재의 단부 곡률반경을 측정하였다. 그리고 이러한 선재와 유사한 단부의 곡률반경을 압연기를 사용하여 모의 제작하고 턴간 절연과피전압에 미치는 곡률반경의 영향을 조사하였다. 곡률반경은 그림 2

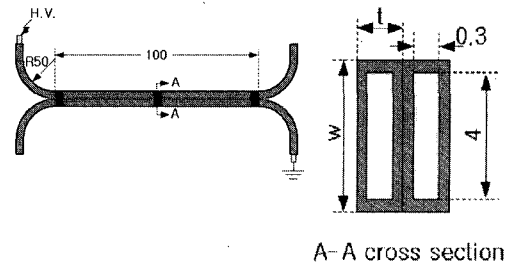


그림 1. 턴간절연 모델.

Fig. 1. Model for turn-to-turn insulation.

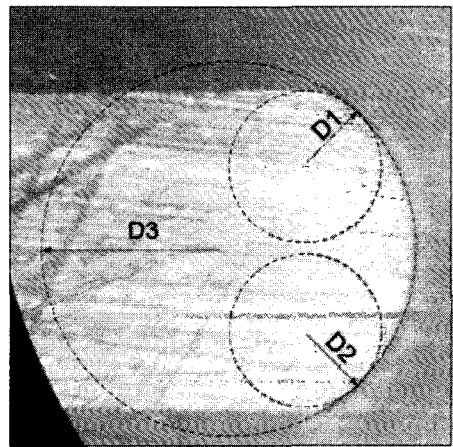


그림 2. 곡률반경이 다른 제작된 고온초전도 선재.

Fig. 2. Different curvature radius of wire edge.

와 같이 선재 모서리의 상·하부 및 중앙의 곡률반경을 각각 D1, D2 및 D3로 하였으며 예폭시료 선재를 몰딩한 후 현미경으로 측정하였다.

선재의 곡률반경은 D1은 0.0625~0.1513, D2는 0.0625~0.1513 및 D3는 0.1875~0.4690 mm이다. 제작된 3가지 종류의 선재에 Kapton 테이프를 감고 면접촉식으로 턴간절연을 하고 절연특성을 조사하였다.

GFRP 시험용 용기에 턴간절연 모델을 장착한 후 상용 액체 N₂(77 K)를 주입하고 열적으로 충분히 안정시킨 후 교류(ac) 및 임펄스(impulse) 전압을 인가하였다. AC전원은 최대전압 100 kV이며, 전압상승률은 1 kV/sec이다. 또한 임펄스전원은 1.2 x 50 μsec의 표준 너임펄스(부극성)이다. 실험횟수는 각각 8-10회 정도이며 Weibull 확률 분포로 처리하였다. 절연과피 흔적은 절연과피 후 절연모델을 건조시키고 Kapton을 제거하여 확인하였다.

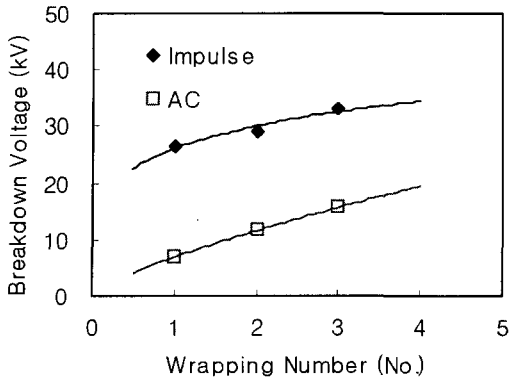


그림 3. 면접촉식 절연모델의 절연과피 특성.
 Fig. 3. Breakdown characteristic of the surface contact model.

표 1. 턴간 절연모델의 Weibull 통계치.
 Table 1. Weibull statistical data for turn-to-turn breakdown.

Model	Voltage	Layer(s)	Parameter	
			Shape(m)	Scale(V ₀)
Surface contact	AC	1	6.27	7.44
		2	11.26	12.08
		3	20.29	16.14
Surface contact	Impulse	1	9.88	27.65
		2	12.70	30.12
		3	16.30	33.99

3. 결과 및 고찰

그림 3은 면접촉식 절연모델에 Kapton을 중권으로 감은 경우 권선수에 따른 ac 및 임펄스 절연과피전압 특성을 나타낸다. 그림에서 점들은 평균과피전압을 나타낸다. 임펄스 전압을 인가한 경우가 ac 전압의 경우보다 높으며, 어느 경우나 절연과피 전압은 턴간 권선수의 증가에 따라서 증가하다가 포화하는 경향을 나타내고 있다. 전극의 접촉 면적이 넓어 전기적으로 약한 지점이 많이 발생하기 때문에 절연과피 전압이 낮다고 생각된다.

표 1에 측정된 턴간 절연모델의 Weibull 통계치를 나타낸다. Vo는 Weibull 척도 파라미터이며, m는 형상 파라미터를 나타낸다. 턴간 절연횟수가 1에서 3으로 증가함에 따라서 척도 파라미터도 증가하는 경향을 나타내고 있다. Ac 및 임펄스 전압하에서 면접촉식 절연 모델의 Weibull 형상 파라미터는 약 6~20으로 9~16으로 각각 나타났다.

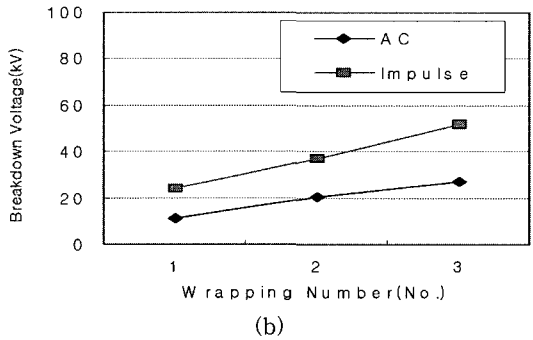
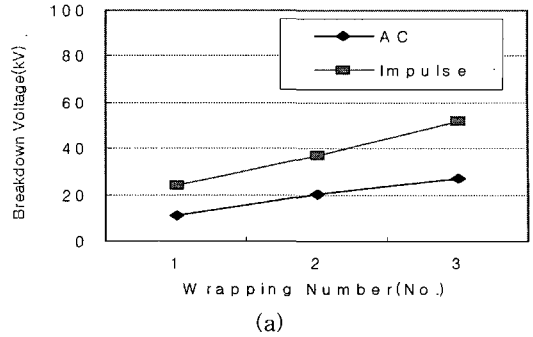


그림 4. 절연과피 특성; (a) butt gap이 존재하지 않는 경우 (b) butt gap이 존재하는 경우.
 Fig. 4. Breakdown characteristics : (a) without butt gap (b) with butt gap.

그림 4는 평권의 경우의 ac 및 임펄스 절연과피 전압 특성을 나타낸다. 절연과피전압은 butt gap이 없는 경우(그림 (a))가 butt gap이 1 mm인 경우(그림 (b))보다 약간 전압이 높게 나타났다. 이것은 권선 턴간에 고분자만의 단독 절연계를 형성하는 overlap 권선법의 경우가 고분자와 액체 혹은 기포의 복합절연계를 형성하는 butt gap의 경우보다 약점이 적기 때문에 절연과피 전압이 비교적 높다고 생각된다. 그러나 접착제가 부착된 Kapton을 권선하는 경우에는 단부에서 기체층이 존재하고 그 부위에서 절연과피 흔적이 많이 발견되어 주의할 필요가 있다.

한편 butt gap이 존재하는 경우의 절연과피 흔적을 조사하면 그림 5와 같다. 즉 1층 절연의 경우 중앙의 butt gap에서 ac 절연과피 흔적이 나타나고 있으나 층수가 증가할수록 중앙에서 모서리 부위로 이동하는 것을 확인하였다. 임펄스의 경우는 층수에 관계없이 주로 중앙의 butt gap에서 절연

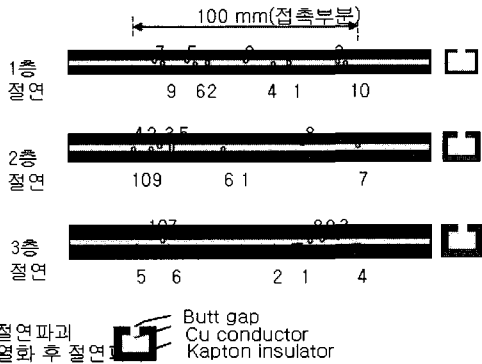


그림 5. 절연파괴 흔적.
Fig. 5. Breakdown traces.

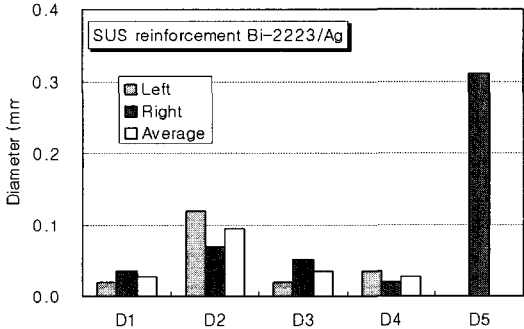


그림 6. 국내외 HTS 선재의 왼쪽과 오른쪽면의 곡률반경.
Fig. 6. Curvature radius of HTS wire at home and aboard.

파괴되는 것을 확인하였다. 그러나 3층 이상 층수가 증가하면 AC의 경우와 유사하게 중앙에서 모서리 부위로 이동할 가능성이 있다. 이러한 사실은 절연층수의 증가로 인하여 단부의 전계집중이 턴간의 절연설계에 있어서는 중요한 사실을 시사하며 단부의 불평등전계를 극력 완화해야 함을 제시하고 있다. 전계완화를 위해서는 단부를 금속 혹은 절연물로 처리하는 방법이 생각된다. 금속으로 처리하는 방법은 전기분해, 분무기법, 용접법 등이 있으며, 절연물로 처리하는 방법은 Kapton 같은 절연물로 권선하든지 에폭시로 몰딩하는 방법이 생각된다. 현재 이러한 방법들을 연구 검토 중에 있다.

표 2. 제작된 선재.

Table 2. Manufactured wire.

wire No.	Thickness (mm)	Width (mm)	D1	D2	D3
1	0.348	3.332	0.1513	0.1535	0.4690
2	0.227	3.328	0.1135	0.1135	0.3567
3	0.125	3.562	0.0625	0.0625	0.1875

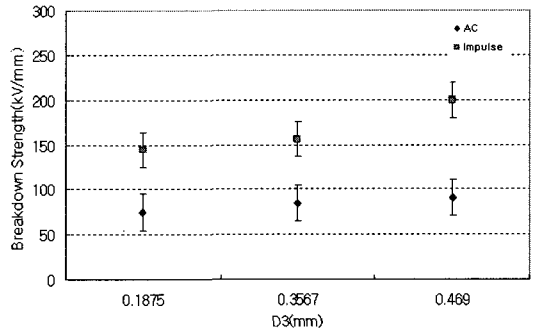


그림 7. 절연파괴전계의 곡률반경(D3) 의존성.
Fig. 7. Dependence of breakdown strength on curvature radius(D3).

대표적인 고온초전도 선재제작회사인 미국의 AMSC사 제품의 Bi계 고온초전도 선재의 단면을 살펴보면 그림 6과 같다. 수직 단면의 두께와 너비가 0.3×4.3 mm²이고 기계적인 강도를 보강하기 위하여 SUS 테이프가 도체의 양면에 붙어 있다. 따라서 변압기의 턴당 전압(V/t)이 작더라도 도체의 가장자리 단부가 날카로워 전계집중이 우려된다.

다른 선재를 살펴본 결과 CC선재, SUS 보강 Bi 선재 그리고 Bi계 선재의 순으로 단부의 곡률반경이 커지고 있으며 특히 2세대 선재인 CC선재는 Bi계 선재보다 단부의 곡률반경이 1/10 수준으로 낮아 턴간의 전계집중이 우려된다. 그러나 Bi계 고온초전도 선재의 경우 길이 방향으로 장착의 선재를 측정해 보면 그림 (b)와 같이 곡률반경의 편차가 심하여 CC선재와 같은 수준의 곡률반경의 경우도 나타나고 있다. 특히 D3의 편차가 심하여 Bi선재 일지라도 안심할 수는 없음을 알 수 있었다. 이와 같은 점을 고려하여 압연기를 사용하여 단부의 곡률반경을 변화하여 모의로 제작된 구리 선재의 사양을 표 2에 나타낸다.

그림 7은 제작된 모의 선재에 Kapton을 중편으로 감고 ac 전압을 인가한 경우의 절연파괴전계

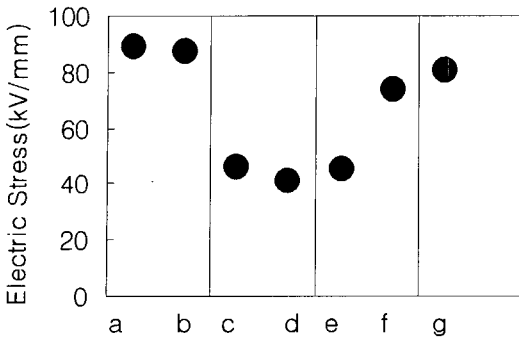


그림 8. 절연파괴전계의 재료 의존성.
Fig. 8. Dependence of breakdown strength on material.

특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 곡률반경이 작아질수록 절연파괴 전계는 감소하며 특히 D3의 경우에는 편차가 심하여 절연파괴가 일어날 확률이 증가하므로 실용상 주의를 해야 한다. 그림 8은 재료에 따른 절연파괴전계의 비교를 나타낸다. 재료는 본 실험실에서 개발한 Polyimide-epoxysilane의 전계강도와 상용 Kapton tape, kraft paper를 비교하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Polyimide-epoxysilane의 PDMS함량이 30 wt%가 되었을 때의 전계강도는 Kapton tape와 비슷하다는 것을 알 수 있으며, PDMS함량을 더 변화시키면 현재 상용화되어있는 Polyimide인 Kapton tape보다 높은 절연내력을 갖는 턴간 절연물을 얻을 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 고체 절연재료 중 Kapton을 이용하여 overlap 및 평권으로 도체를 절연하여 면접촉식으로 절연모형을 제작하고 턴간절연 특성을 고찰하였다. 절연파괴 전압은 면접촉식 절연모델에서 ac 및 임펄스 전압에서 모두 낮게 나타났다. CC선재는 Bi계 선재보다 단부의 곡률반경이 1/10 수준으로 낮아 턴간의 전계집중이 우려된다. 그러나 장척의 Bi계 고온초전도 선재는 곡률반경의 편차가 심하며 CC선재와 같은 수준의 곡률반경의 경우도 나타나고 있다. 압연기를 사용해 단부의 곡률반경을 변화하여 모의로 제작된 구리 선재의 절연파괴전압에 미치는 곡률반경의 영향을 조사하면 곡률반경이 작아질수록 절연파괴 전계는 감소하며

특히 D3의 경우에는 편차가 심하여 Bi선재 일지라도 안심할 수 없다. 현재 개발 중인 PDMS함량이 30 wt%인 Polyimide-epoxysilane의 절연파괴전계는 Kapton 테이프와 비슷하나 PDMS함량을 더 변화시키면 Polyimide인 Kapton tape보다 높은 절연내력을 갖는 턴간 절연물을 얻을 가능성이 높아 현재 검토 중이다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

- [1] B. W. McConnell, "Transformers-A successful application of high temperature superconductors," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, p. 716, 2000.
- [2] H. M. Chang, "Cryogenic cooling temperature of HTS transformers for compactness and efficiency", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, p. 2298, 2003.
- [3] 김영석, 광동순, 한철수, 김해중, 김동욱, 김상현, "Mini-model 초전도 케이블의 유전손실 특성", 전기전자재료학회논문지, 16권, 10호, p. 946, 2003
- [4] 광동순, 김영석, 김해중, 조진욱, 김상현, "고온 초전도 케이블의 절연파괴 특성에 미치는 Butt-gap의 영향", 전기전자재료학회논문지, 17 권, 3호, p. 333, 2004.
- [5] 백승명, 정종만, 이현수, 한철수, 김상현, "Double pancake coil형 고온초전도 변압기의 전기적 절연특성", 전기전자재료학회논문지, 16권, 2호, p. 151, 2003.
- [6] Boom, R. W. and Peterson, H. A., "Superconducting energy storage for power system", IEEE Trans. MAG-8., Vol. 8, No. 1, p. 701, 1972.
- [7] Buckles, W. E., Daugherty, M. A., Weber, B. R., and Kostecki, E. L., "A commercial application of magnetic energy storage", IEEE Transactions on Applied Superconductivity., Vol. 3, No. 1, p. 328, 1993.