

초전도변압기 턴간 절연재료의 V-t 특성

정종만, 류엔반동, 백승명, 이창화, 김상현
경상대학교 전기공학과 및 공학연구원

V-t characteristics of turn insulator of HTS transformer

Joung J.M., Nguyen Van Dung, Baek S.M., Lee C.H., Kim S.H.
Dept. of Electrical Eng., Gyengsang Nat'l Univ. and Engineering Research Center

shkim@nongae.gsnu.ac.kr

Abstract - In the response to increasing the demands for electrical energy, much effort aimed to develop and commercialize HTS power equipments have been made around the world. Among them HTS transformer is one of very promising one. For the development, the cryogenic insulation technology should be established. In this paper V-t characteristics of turn insulator, Kpaton, among insulation components of HTS transformer was discussed with Weibull distribution and n-value. V-t tests of Kapton were conducted using Cu tape electrodes shaped HTS tape depending on wrapping number. The n-values of 2 and 3 times wrapped tape are 27.54 and 30.58. Although breakdown strength of the 3 times one is higher than the 2 times the 3 times one have more weak points with overlapping so it have higher probability of incidental accidents.

1. 서 론

최근 에너지 소비의 증가, 환경 문제, 에너지 위기 등에 대처하기 위한 고 용량, 고 효율의 전력기기의 개발 필요성이 더욱더 증가 하고 있다. 이에 고온초전도 응용기기 개발 연구가 전 세계적으로 활발하게 이루어지고 있으며 [1, 2], 고온 초전도 선재의 임계전류 특성 향상, 기계적 특성 개선 등과 더불어 개발 연구가 더욱더 가속화 되고 있다. 그 중에서 고온초전도변압기는 동선을 대신해 초전도 선재를 사용하여 변압기의 효율 향상 및 소형화, 경량화의 이점이 있으며 또한 변압기유를 사용하지 않아 친환경적으로 응용이 유망한 기기의 하나로 여겨지고 있다.

고온초전도변압기가 개발되기 위해서는 성능이 우수한 초전도선재 제작, 초전도선재의 특성 해석, 효율적인 냉각시스템 설계, 초전도 권선 제작기술 등과 극저온에서의 절연설계가 이루어져야 한다. 특히 극저온에서의 절연설계는 변압기의 소형화, 안정성, 전력공급에 대한 신뢰성 확보를 위한 핵심기술이라 할 수 있다.

최근 액체질소에 대한 절연파괴기구에 대한 연구로 액체질소 중의 기포 특성, 불순물의 영향, 과냉각(>65K) 액체질소의 절연특성 등이 이루어져 오고 있다 [3, 4]. 하지만 절연설계를 위한 절연파괴기구에 대한 연구는 여전히 미흡한 실정이다.

절연파괴 실험을 통해 얻어진 실험 데이터는 일반적으로 평균값으로 대표하여 나타내지만 절연파괴 전압은 일정한 값으로 나타나지 않고 산만하게 분포되어 있다. 이러한 절연파괴 데이터는 와이블(weibull) 분포 [5, 6]가 가장 많이 적용되고 와이블 분포에 따르면 평균값으로 나타낸 시료의 절연파괴 치는 그 값의 전압이 인가되었을 경우 확률적으로 50% 이상으로 나타난다. 따라서 장시간 절연신뢰성을 확보하기 위한 수명특성(V-t)에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

본 실험에서는 고온초전도변압기의 턴간 절연재료로 유력한 Kapton 절연지로 절연한 도체의 절연파괴 전압에 대한 와이블 분포와 수명특성 그리고 수명특성에 대한 와이블 분포에 대하여 논의하였다.

2. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 크게 저온 용기, 전극계, 고전압 발생장치 등으로 구성되어져 있다.

저온용기는 내조와 외조의 이중 구조로 구성되어 있다. 각 내, 외조의 용기는 진공 층을 가지고 있으며 복사열을 차단하기 위한 은 코팅을 하였으며, 또한 저온 용기에는 관측 창을 두어 방전 형상 및 액체질소의 거동을 육안으로 관찰할 수 있게 했다.

고온초전도 변압기의 도체로 BSCCO 선재가 사용되며 스테인리스 테이프를 기계적인 보강을 하기도 한다. Bi계 초전도체는 판상 구조로서 얇은 테이프 형상으로 제작된다. 따라서 전극으로 초전도 선재와 유사한 형태의 Cu 테이프를 제작하여 사용하였다. 그리고 Kapton으로 절연된 Cu 테이프를 FRP 원형 포머에 1회 권선 하여 원형 코일 2개를 제작하고 각각의 원형 코일은 고전압과 접지 전극으로 사용하였다. 그림 1 (a)는 전극

계의 사진을 나타내었다. FRP 원형 포머의 직경 d 는 66mm이다. (b)는 모의 제작된 Cu tape 단면의 모서리 부를 나타낸다. 두께 t 는 0.3mm이고 폭은 4mm이다.

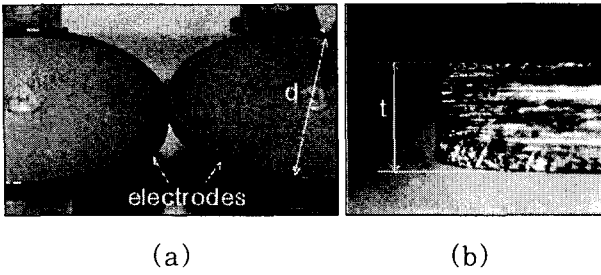


Fig. 1. (a) Photograph of electrodes and (b) edge of simulated Cu tape.

구성된 전극은 고전압 발생장치를 사용하여 인가전압을 1kV/s의 속도로 상승시켜 절연파괴가 일어날 때까지 1kV/s의 속도로 상승시켰다. 고전압 발생장치(BAUR社: DTA 100E)의 용량은 120VA이며 최대 발생 전압은 100kV이다. 그리고 수명특성 시험 시에는 인가전압까지 1kV/s의 속도로 상승 후 전압을 유지하여 절연파괴 시까지의 시간(수명)을 측정하였다.

Kapton은 턴간 절연재료로 유력하며 그림 2는 도체 절연을 위한 절연지 권선의 개념을 나타낸다. 각 층의 권선은 절연지 폭의 10%가 겹치(overlap)도록 하고, 2층의 절연지는 1층 절연지 폭의 중간에서 같은 방향으로 권선한다. 그리고 3층의 절연지는 1, 2층의 절연지와 반대 방향으로 권선한다. 절연지의 폭은 10mm이고 두께는 0.04mm이다. 도체 절연은 도체의 단락 방지 및 절연지 자체의 보호 역할도 겸해야 하므로 2층 이상의 절연이 요구된다.

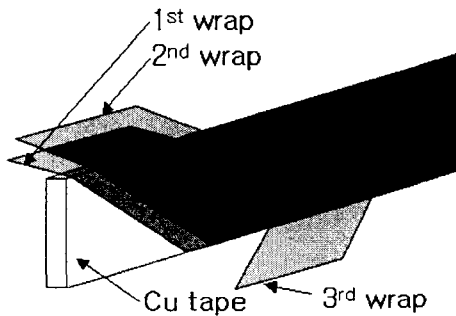


Fig. 2. Schematic of turn insulation.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 3은 Kapton 절연지의 절연권수에 따른 절연파괴특성을 나타낸다. 그림 2의 개념 도에 따라 모의 Cu 도체를 1회, 2회 3회 절연하여 두 도체를 그림 1 (a)와 같이 접촉시켜 절연파괴 하였다. 각 데이터는 10회 이상의 절연파괴 시험 후 평균값을 나타냈으며 상, 하부의 수평선은 최대 값과 최소 값의 에러 바를 나타낸다.

절연파괴 전압 V_{BD} 와 절연 권선 수 N 에 대한 실험식으로 나타내면 다음과 같다.

$$V_{BD} = 11.28 N^{0.32} \text{ -----(1)}$$

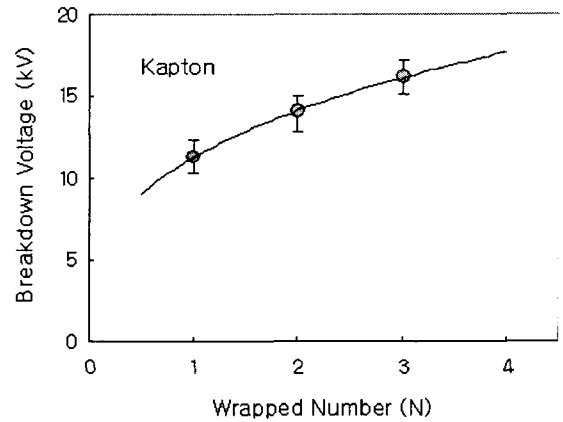


Fig. 3. Breakdown characteristics of Kapton insulator depending on wrapping number.

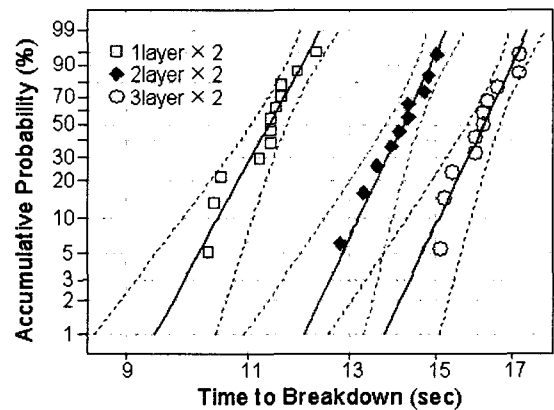


Fig. 4. Weibull distribution of the breakdown data.

그림 4는 Kapton 절연지의 절연권선 수에 따른 절연파괴 특성에 대한 와이블 분포를 나타낸다. 와이블 분포는 최악점 파괴확률분포라고도 부르며 누적확률 값 $P(\%)$ 와 절연파괴치 $V(V)$ 로 하여 다음과 같이 나타낸다.

$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V - V_l}{V_0}\right)^m\right] \quad (V \geq V_l) \\ = 0 \quad (V < V_l) \text{ -----(2)}$$

여기서 V_l , V_0 , m 은 각기 위치(location)계수, 척도(scale)계수, 형상(shape)계수라고 부르고, 일반적으로 $V_l=0$ 으로 하여 두 개의 계수에 대한 분포로 간단하게 나타낸다.

절연권선 수 1, 2, 3회에 대하여 각각 형상 및 척도 계수 (m, V_0)는 (22.53, 11.56), (26.06, 14.38), (25.61, 16.45) 이다.

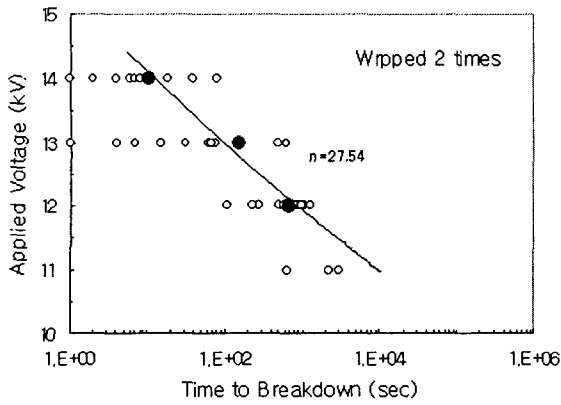


Fig. 5. V-t characteristics of Cu tape wrapped 2 times.

그림 5는 Kapton 절연지를 2회 절연하였을 경우의 수명특성을 나타낸다. 10회 이상의 수명 시험을 통하여 각 수명은 작은 원으로 평균값은 큰 원으로 표시하였다.

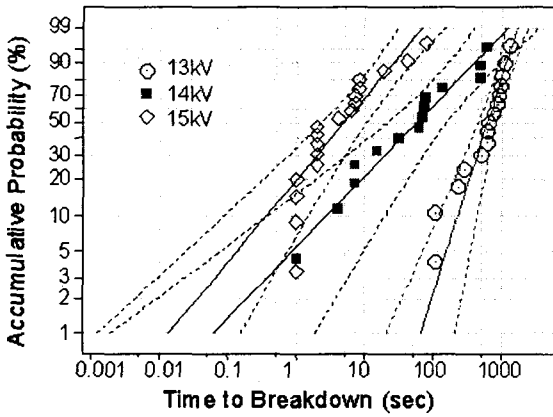


Fig. 6. Weibull distribution of V-t characteristics of the wrapped 2 times.

수명 특성에서 인가 전압이 감소함에 따라 수명이 증가하는 것은 방전개시나 절연파괴로의 진전에 시간이 필요하기 때문이며, 약점에서의 파괴확률이 증가하는 것과 절연물이 노화되는 것으로 생각할 수 있으며, 다음과 같은 실험식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$V^n t = \text{constant} \quad \text{또는} \quad V \propto t^{-1/n} \quad (3)$$

인가전압이 감소함에 따라 수명은 지수적으로 증가하는데 값 n 을 결정하여 충분한 시간동안 절연 신뢰성을 가지는 절연강도를 결정할 수 있다.

그림 6은 Kapton 절연지를 2회 절연하였을 경우의 수명특성에 대한 와이블 분포를 나타낸다. 수명특성에서는 절연파괴 전압 V 를 시간 t 로 대치하여 와이블 분포로서 평가할 수 있는데 이때 $m < 1$, $m = 1$, $m > 1$ 의 경우에 대하여 초기고장형의 수명분포, 우발사고형의 수명분포, 마모고장형의 수명분포라고 부른다. 그림 5, 6에서의 실험

계수들을 정리하면 표 1과 같다. 인가전압에 따른 절연수명의 n 값은 27.54이며 인가전압이 12kV 일 경우 와이블 분포의 형상계수가 1.8로서 절연 열화에 따른 마모형 특성을 나타낸다.

Table 1. Parameters of Cu tape wrapped 2 times.

인가전압(kV)	14	13	12
파괴확률(%)	39	6.9	0.9
평균수명(sec)	10.5	146.4	654.4
척도계수(sec)	8.1	101.4	733.2
형상계수 m	0.7	0.6	1.8

그림 7과 8은 Kapton 절연지를 3회 절연하였을 경우의 수명특성과 수명특성에 대한 와이블 분포를 나타낸다. 실험 계수들은 표 2에 정리하였다.

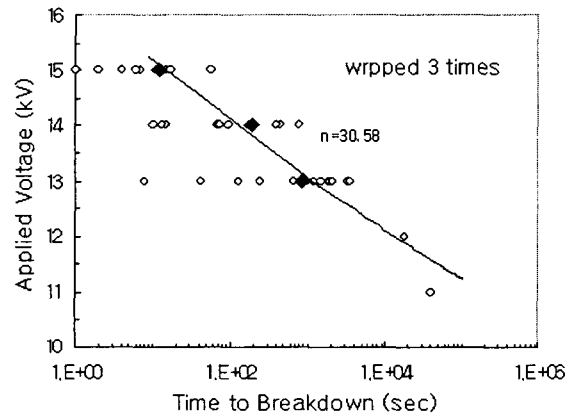


Fig. 7. V-t characteristics of Cu tape wrapped 3 times.

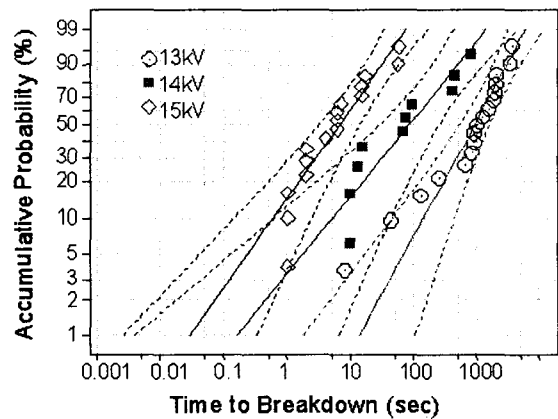


Fig. 8. Weibull distribution of V-t characteristics of the wrapped 3 times.

Table 2. Parameters of Cu tape wrapped 3 times.

인가전압(kV)	15	14	13
파괴확률(%)	8.9	1.6	0.2
평균수명(sec)	12.4	191.9	861.6
최도계수(sec)	10.5	144.7	1310.7
형상계수 m	0.8	0.7	1.0

Kapton이 3층 절연된 도체의 수명특성은 n값이 30.58이며 인가전압이 13kV 일 경우 와이블 분포의 형상계수가 1.0이다. 이는 2층 절연된 도체에 비하여 절연파괴확률이 더 낮은 값을 가지지만 마모형의 형상계수를 가지지 못하고 있다. 이는 절연지의 권선 층수가 많아짐에 따라 절연 내력은 높아지지만 절연지의 overlap시 미소 갭들이 더 많이 생기게 되어 절연물의 내부 void로서의 작용하기 때문으로 사료된다.

그림 9 (a)는 수명특성 실험 후 시료 표면의 열화 및 절연파괴 홀 사진을 나타내고, (b)는 그 위치의 개념도를 나타낸다. 2중 절연 도체, 인가전압 12kV, 수명 525초의 시료이다.

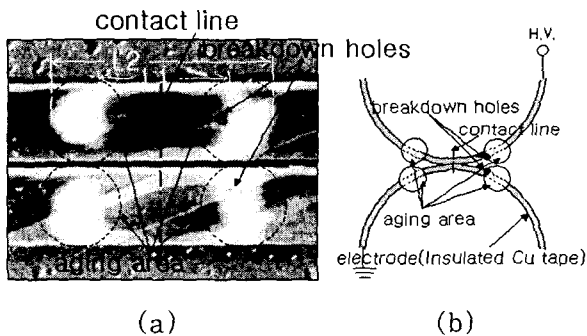


Fig. 9. (a) Photograph of aging surface and breakdown holes and (b) its schematic of locations.

2중 절연도체에 대하여 대부분의 시료에서 방전에 의한 열화 현상인 백화(白化) 현상 및 절연파괴 홀(hole)이 두 전극의 접촉 부위를 벗어난 L1=7mm, L2=13mm의 범위에서 관찰되었다. 또한 절연파괴 홀은 절연지의 overlap 부위의 가장자리에서 관찰할 수 있었다.

3. 결 론

고온초전도 변압기의 턴간 절연재료로 유력한 Kapton 절연지의 수명특성을 고온초전도 도체와 유사하게 제작된 Cu 도체를 전극으로 사용하여 살펴보았다.

Kapton 절연지를 2중 절연한 도체간의 절연파괴 전압은 14.1kV이고 수명특성의 n값은 27.54 그리고 절연파괴 확률 0.9%에서 마모형 수명특성

을 나타내었다. 그리고 3층 절연 도체의 절연파괴 전압은 16.1kV이고 n값은 30.58 그리고 절연파괴 확률 0.2%에서 우발형 수명특성을 나타내었다.

절연지의 층수가 많아짐에 따라 절연파괴 전압은 높아지나 절연지의 overlap에 의한 내부 void의 증가로 인한 절연 약점이 증가하게 되어 낮은 절연파괴 확률에서도 우발형 수명특성을 나타내었다.

백화 현상 및 절연파괴 홀(hole)이 두 전극의 접촉 부위를 벗어난 L1=7mm, L2=13mm의 범위에서 관찰되었다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] S.W. Schwenterly, S.P.Mehta, M.S.Walker and R.H.Jones, "Development of HTS power transformer for the 21st century:Waukesa Electric Systems/IGC-SuperPower/RG&E/ORNL SPI Collaboration", Physica C: Superconductivity, Vol. 382, pp. 1-6, 2002.
- [2] V.Cavaliere, M.Cioffi, A.Formisano, R.Martone, "Shape optimization of high Tc superconducting magnets", IEEE trans. on Magnetics, Vol.38, pp.1129-1132, 2002.
- [3] J.Gerhold, "Cryogenic Liquids - a Prospective Insulation Basis for Future Power Equipment", IEEE trans on Dielectric and Electrical Insulation, Vol.9, No.1, pp.68-75, 2002.
- [4] J.Gerhold, "Properties of cryogenic insulants", Cryogenics, Vol.38, pp.1063-1081, 1998.
- [5] H.Goshima, N.Hayakawa, M.Hikira, H.Okubo, "Weibull Statistical Analysis of Area and Volume Effects on the Breakdown Strength in Liquid Nitrogen", IEEE trans on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2, No.3, pp.385-393, 1995.
- [6] C.Chauvet, C.Laurent, "Weibull Statistics in Short-term Dielectric Breakdown of Thin Polyethylene Films", IEEE trans on Electrical Insulation, Vol.28, No.1, pp.18-29, 1993.