초전도 변압기의 절연 설계에 관한 연구

정종만, 백승명, 김영석, 곽동순, 김상현
경상대학교 전기공학과(공학연구원)

A Study on Insulation Design of HTS Transformer

Joung Jong Man, Baek Sung Myeong, Kim Yeong Seok, Kwqk Dong Soom, Kim Sang Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.
(Engineering Research Institute)

shkim@nonage.gsnu.ac.kr

Abstract - To realize the development of HTS power apparatus, various breakdown test of LN_2 should be carried out and the mechanism should be understood more. Moreover the dielectric design technology that the basic dielectric experimental data applied to the HTS poswer system should be developed. In this paper, the electric fields for the insulation design were calculated for example with the analysis of Weibull distribution. And V-t characteristics of LN_2 were discussed. Around the breakdown voltage the n values were less than 1.

1. 서 론

고온초전도 선재의 제작기술 발달과 더불어 초전도전력기기 개발연구가 널리 이루어지고 있다. 이러한 고온초전도 응용 전력기기를 개발하기 위해서는 냉매 및 절연물로 사용되는 액체질소의 절연파괴기구의 규명과 더불어 절연설계 기법 개발이 선행되어야 할 것이다.

최근 액체질소에 대한 절연파괴기구에 대한 연구로 액체질소 중의 기포 특성, 불순물의 영향, 과냉각(〉63.2K) 액체질소의 절연특성 등이 이루어져 오고 있다[1-3]. 하지만 절연설계를 위한 절연파괴기구에 대한 연구는 여전히 미흡한 편이며 응용기기의 절연설계 적용연구 또한 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기초 절연특성 연구를 통해 얻어진 데이터를 이용하여 절연 설계에서 사용되어지는 기본적인 분석을 통하여 초전도 변압기 코일에 대한 절연 설계에 적용하였다.

2. Weibull 분포

절연파괴실험을 통해 얻어진 실험 데이터는 절연변수에 따른 경향을 살펴보기 위해 평균값으로 대표하여 그 변화를 살펴본다. 하지만 일반적으로 한 변수에 대한 절연파괴 전압은 일정한 값을 나타내지 않고 산만하고 흐트러져 있는데 이러한 절연파괴전압 데이터는 와이블(weibull) 분포가 가장 많이 적용된다[4, 5]. 따라서 와이블 분포를 이용하여 통계적 처리를 통해 주어진 변수에 대한 정량적인 값으로 평가할 수 있다.

와이블 분포는 최약점 파괴확률분포라고도 부르며 누적확률 값 $P(\%)$와 절연파괴치 $V(\mathrm{V})$로 하여 다음과 같이 나타낸다.

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

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

인가한 전압 V와 절연 파괴가 발생한 시간 t 사이의 실험 데이터는 인가 전압이 임펄스와 같은 단시간의 파형과 교류나 직류와 같은 장시간 파형에 대한 실험으로 구분되는데 전자와 같은 단시간 V-t특성은 과도 과전압에 대한 절연성능 평가에 사용되며, 후자와 같은 장시간 V-t특성은 장시간의 운전에 견딜 수 있는지의 판정자료로 이용하고 있다. 수명특성 또한 절연파괴치 V를 시간 t로 대치하여 와이블 분포로서 평가할 수 있는데 이때 m〈1, m=1, m〉1의 각각에 대하여 초기고장형의 수명분포, 우발사고형의 수명분포, 마모고장형의 수명분포라고 부른다.

위와 같은 절연데이타의 분석을 통해 설계되어진 초전도 변압기의 최종성능시험은 절연 관점에서는 크게 상용주파 내전압 시험, 상용주파 유도전압 시험, 임펄스 내전압 시험 등을 들 수 있다. 이러한 시험 중에서 먼저 상용주파 내전압 시험의 성능을 기준으로 한 절연성능을 만족시키기 위한 액체질소의 정량적인 설계전계를 정하고 그 적용 예를 고찰하였다.

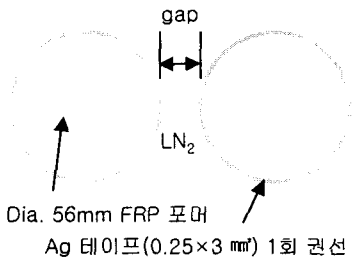
3. 실험 방법 및 절차

고온초전도 응용기기의 도체는 은피복 Bi-2223가

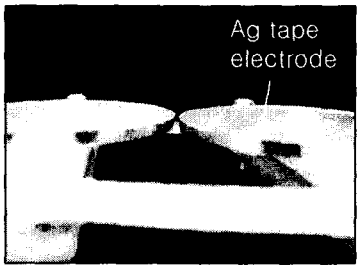
일반적으로 사용되며 기계적인 보강을 위해 은 피복 대신 합금 피복을 사용하기도 하고 얇은 스테인레스 스틸을 덧대어 사용하기도 한다. 하지만 Bi-계 초전도체는 판상 구조로서 얇은 테이프 형상으로 가공하여 제작되므로 기초 실험 데이터를 취득하기 위한 전극 재료로서 은(Ag)을 두께 0.25mm, 폭 3mm로 가공하여 사용하였다. 그리고 은 테이프를 직경 56mm의 FRP 원형 포머에 1회 권선 하고 고전압과 접지를 연결하여 전압을 인가하였다. 그림 1에 전극계의 개략적인 구성도와 사진을 나타내었다.

구성된 전극계는 최대 출력 전압 100kV, 용량 120VA인 AC 고전압 발생장치(BAUR DTA 100E)를 사용하여 전극계의 절연파괴가 일어날 때까지 1kV/s의 속도로 상승시켰다.

시료로는 상용의 액체질소이며 대기압 하의 개방된 저온 용기에 담아 실험하였다. 따라서 외부의 열침입에 의한 열기포가 존재한 상태로 비등 기포의 영향을 고려하였다.



(a) Schematic of the electrodes



(b) Photograph of the electrodes

Fig. 1. Shcmatic and Photograph of electrodes

4. 실험 결과 및 고찰

그림 2는 액체질소의 절연파괴전압을 나타낸 그림이다. 각 점들은 10번의 실험을 통해 얻은 데이터를 평균하여 나타내었으며 각 점에 최대값과 최소값의 에러바를 표시하였다. 전극간 거리 g의 증가에 따른 절연파괴 전압 V_{BD}는 다음 실험식과 같은 경향을 나타내지만 각 점들은 절연파괴가 일어나는 값으로 절연설계 시 직접적으로 적용하게되면 신뢰성을 확보하기 어렵게 된다.

$$V_{BD}=21.082\times g^{0.6632}$$

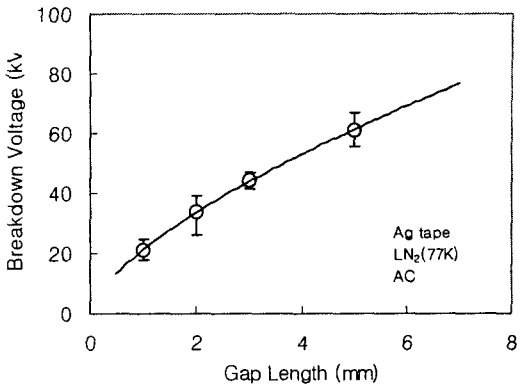


Fig. 2. Breakdown characteristics of LN_2

따라서 각 점들의 데이터를 이용해 누적확률 값에 따른 와이블 분포로 나타내고 척도계수와 형상계수를 구한 후 식(1)을 전압 V에 대한 확률 p의 다음 식(2)와 같이 다시 나타내어 요구되는 허용파괴확률에 대한 허용인가전압을 구할 수 있다.

$$V=V_0\times\left[\ln\left(\frac{1}{1-p}\right)\right]^{1/m} \quad \text{----------(2)}$$

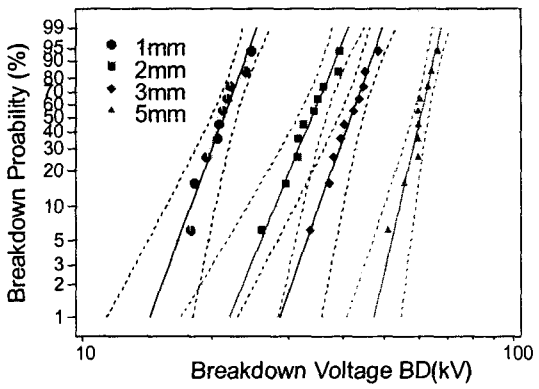


Fig. 3. Weibull distribution of breakdown data

그림 3은 각 점들의 데이터를 이용하여 와이블 분포로 나타내었으며 그림에서 각각의 전극간 거리에 따른 형상계수 m과 척도계수 V_0은 다음 표와 같다.

예로 설계전압이 50kV라고 할 때 파괴확률 0.1%로 하는 설계전계를 구하면 전극간 거리가 5mm일 때 척도계수가 51.7kV인 갭에서 파괴확률 0.1%에 해당하는 인가전압이 39.13kV이므로 설계전계는 39.13/5=7.8kV/mm로 구할 수 있을 것이다.

Table 1. Shape and scale parameter of Weibull distribution of the breakdown voltages.

g(mm)	1	2	3	5
m	10.7	9.7	26.3	24.8
V_0(kV)	21.9	35.1	45.2	51.7

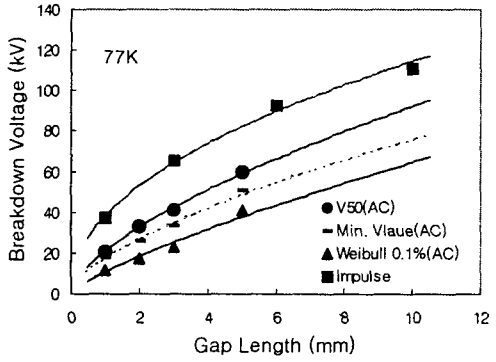


Fig. 4. Comparison between Impulse and AC breakdown voltage.

임펄스 및 AC 절연파괴 값을 평균치, 최소치, 파괴확률 0.1%에 해당하는 값을 그림 4에 나타내었다. 파괴확률 0.1%의 값은 절연파괴 데이터의 최소값보다 훨씬 큰 신뢰성을 확보할 수 있음을 알 수 있으나 최적의 절연설계 전계를 구하기 위해서는 보호기기와의 절연연계를 고려한 적정한 파괴확률을 결정해야할 것이다.

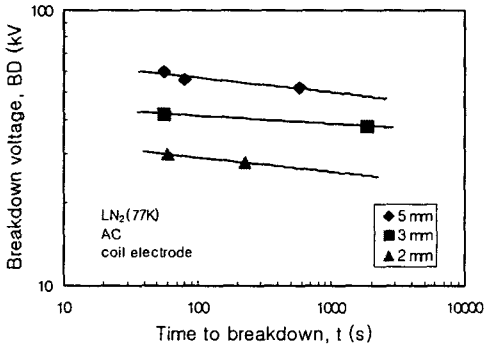


Fig. 5. V-t characteristic of LN_2 with the electrode gap.

장시간 수명(V-t)특성에서 전압인가 시간이 길어짐에 따라 파괴전압이 감소되는 것은 방전개시나 절연파괴로의 진전에 시간이 필요하기 때문이며, 약점에서의 파괴확률이 증가하는 것과 절연물이 노화되는 것으로 생각할 수 있으며, 장시간 V-t 특성은 다음과 같은 실험식(3)으로 나타낼 수 있다.

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

그림 5는 액체질소의 장시간 V-t 특성을 나타낸다. 이때 전극간 5, 3, 2mm 갭에 따른 n값은 각각 19.3, 29.08, 18.7이다.

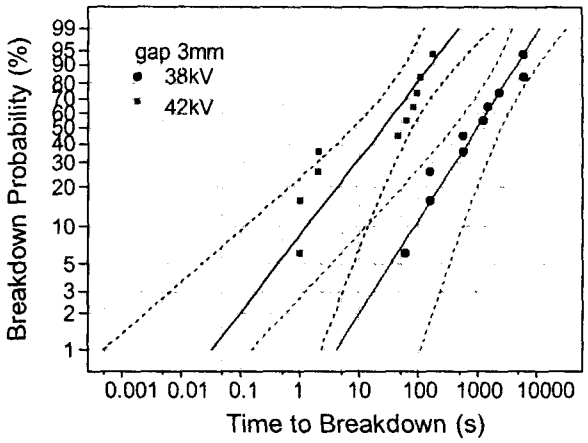


Fig. 6. Weibull distribution of V-t data.

그림 6은 전극간 거리 3mm 인 경우의 V-t특성의 와이블 분포를 나타낸다. 그림의 와이블 분포에 대한 형상계수 m과 척도계수 t_0는 표 2에 정리하였다. 각 인가전압에 대한 형상계수 m<1로 인가전압에 대한 절연파괴까지의 시간이 매우 넓은 범위에서 측정되었는데 이는 시료에 내재된 결함에 의해 극히 우발적인 경우에 의해 초기에 절연파괴되는 경향이 큰 것으로 생각할 수 있다. 따라서 초전도체의 퀜치나, 열적외란에 의해 액체질소중의 기포가 존재할 시에는 절연의 신뢰도가 크게 저하될 것이다.

Table 2. Shape and scale parameter of Weibull distribution of the V-t data.

인가전압	42kV	38kV
m	0.63	0.77
t_0(s)	43.4	1581.2

표 3은 와이블 분포를 이용하여 정격이 22.9kV인 초전도 변압기 권선에 대한 절연모델을 제작하기 위한 AC 설계전계를 구한 예이다. 액체질소 절연파괴전압과 FRP 연면방전 전압을 고려하였으며 최종 절연모델은 1, 2차 각 1단의 더블팬케이크 코일로 구성하였다. 최종 권선의 사양 및 크기는 표 4와 같다.

그림 7은 표 4와 같이 조립된 절연모델 권선 사진을 나타내고 있다. 권선된 절연모델 상, 하부의 더블팬케이크 코일 단말에 AC 50kV의 고전압을 1분간 그리고 임펄스(0.2×50μs) 150kV를 인가하여 절연성능 시험을 행하였다. AC 인가전압에 대해서는 절연파괴가 일어나지 않았지만 임펄스 시험에서는 보빈의 접착을 위한 접착제를 통해 절연파괴가 발생하였다. 이는 설계치가 AC

절연파괴 데이터를 기준으로 하였으며 이는 액체질소의 임펄스 절연파괴치와 AC전압 절연파괴치의 비가 비교적 낮은 것으로 사료된다.

Table 3. Calculated AC electric field for the insulation design using Weibull distribution.

	액체질소	FRP 연면방전
간극(거리)	5mm	14mm
형상계수	24.8	14.9
척도계수	51.7kV	50.9kV
0.1%값	39.13kV	32.02kV
설계값	7.8kV/mm	2.3kV/mm

Table 4. Specification of the model windings assembled using the calculated electric field.

권선수	7×2회/17×2회
도체(Cu)	0.3×3.3㎟
절연지(Kapton)	0.07×10㎟
권선내경(보빈외경)	지름 64mm
권선외경	지름74.2/87mm
Bobbin두께	두께 3mm
Spacer 두께	두께 3mm
Bobbin 상/하 판	두께 3mm
전체 높이(2단)	35.4mm

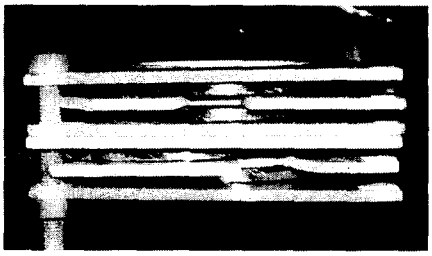


Fig. 7. Model windings.

5. 결 론

와이블 분포를 이용하여 AC 절연설계를 위한 설계전계를 정량적으로 결정하였으며 이를 이용한 절연모델의 절연내력이 설계기준에 적합하였지만 임펄스 절연설계를 위한 보완이 요구된다.

고온초전도 선재와 유사한 규격의 Ag tape를 전극으로 사용하였을 경우 0.1%의 파괴확률 값에 대한 액체질소의 절연파괴 설계전계는 7.8kV/mm 그리고 액체질소 중 FRP 연면방전 전계는 2.3kV/mm로 계산되었다.

액체질소의 장시간 수명특성에 있어 인가전압이 절연파괴전압보다 n값이 1이하로 초기절연파괴 특성을 나타내었으며 전극갭 간의 기포에 의한 우발적인 절연파괴가 자주 발생하여 절연 신뢰도가 크게 저하하였다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

[1] M.Hara and H.Okubo, "Electrical insulation characteristics of superconducting power apparatus", Cryogenics, Vol.38, pp.1083-1093, 1998.

[2] 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.

[3] J.Gerhold, "Properties of cryogenic insulants", Cryogenics, Vol.38, pp.1063-1081, 1998.

[4] H.Goshima, N.Hayakawa, M.Hikita, 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.

[5] C.Chauvet, C.Laurent, "Weibull Staticstics in Short-term Dielectric Breakdown of Thin Polyethylene Films", IEEE trans on Electrical Insulation, Vol.28, No.1, pp.18-29, 1993.