

고온 초전도 케이블의 절연 특성

김해준*, 김재호*, 심기덕*, 김해종*, 조전욱*, 성기철*, 곽동순**, 김상현**

* : 한국전기연구원, ** : 경상대학교

Insulation Characteristics of High Temperature Superconducting Cable

H.J Kim*, J.H. Kim*, K.D. Sim*, H.J Kim*, J.W. Cho*, K.C. Seong*, D.S. Kwag**, S.H. Kim**,

* : Korea Electrotechnology Research Institute, ** : KyeongSang University

Abstract - The electrical insulating design is important to realize a HTS power cable because the cable is operated under the high voltage environment. For the insulation design of a HTS power cable, it is necessary to investigate the AC, impulse breakdown and partial discharge(PD) inception stress of liquid nitrogen/LPP composite insulation system. Based on these results, the electrical insulation of a HTS power cable is designed and Mini-model cables are manufactured. The manufactured Mini-model cables are evaluated that AC, impulse withstand voltage, breakdown and partial discharge inception stress and analyzed characteristics insulation of HTS cable bending condition according to this paper. From these tests, the AC, impulse withstand voltage test and partial discharge inception stress is satisfied (standard technical specification of KEPCO) in Korea and the breakdown voltage was 120kV.

1. 서 론

저전압, 대전류 통전과 교류손실이 작고 소형화 할 수 있는 고온 초전도 케이블은 지중으로 대 도시의 전력 수송으로 적합한 이점을 갖고 있다. 이에 미국, 유럽 및 일본에서는 케이블을 개발하여 시험중이며, 우리나라에서도 21세기 프론티어 사업의 일환으로 3상 22.9kV급 고온 초전도 케이블을 한국전기연구원과 LG전선이 공동으로 개발하여 장기성능평가 시험 중에 있다.[1-3]

고온초전도 케이블의 절연강도에 영향을 미치는 인자로서는 절연지와 액체절소의 비율을 결정하는 절연구성 과 중첩율과 Butt-gap을 위한 지면방법, 유체의 위치와 체적, 절연지 두께와 위치, 측정온도, 유체의 압력, 충격전압의 극성효과, 전극 형상 등 여러 가지 요소들이 있다. 또한 고온초전도 케이블의 절연은 송전용량 및 경제성, 운전신뢰성 등에 영향을 미치고, 액체절소온도 (77 K)의 극저온에서 운전되기 때문에 절연에 대한 연구는 더욱 중요한 부분을 차지하게 된다.

고온초전도 케이블의 전기절연 방식은 크게 두 개의 방식으로 분류될 수 있다. 하나는 OF-케이블과 아주 유사한 구조를 가지는 액체절소와 절연지로 구성된 복합절연 방식이고, 다른 하나는 XLPE 케이블과 같은 solid 절연방식이 있다. 복합절연방식은 도체를 여러 개의 얇은 고분자 절연테이프로 적층하여 절연을 하기 때문에 냉각에 의한 수축 및 열적인 손실을 줄일 수 있고, 기존 OF-케이블의 절연방식을 응용할 수 있기 때문에 현재 기술상으로 적용 가능성이 가장 높은 절연방식이라 할 수 있다.[4]

절연방식에 따라 상온절연 고온초전도케이블, 저온절연 고온초전도케이블로 구분할 수 있다. 상온절연 고온초전도케이블은 초전도 도체위에 전기 절연층이 없으며,

냉각을 위한 cryostat위에 전기절연을 한 구조의 초전도케이블로서 이 케이블의 전기절연재료는 상온에서 사용되기 때문에 기존의 절연재료를 그대로 쓸 수 있는 장점이 있다. 그러나 상온절연 고온초전도케이블은 이미 검증된 절연재료를 사용할 수 있기 때문에 전기절연 측면에서의 신뢰성은 어느 정도 보장되지만, 교류자계를 차폐해 극저온판로와 같은 도체 이외의 부분에 있어서의 와류손을 억제하는 고온초전도도체 shield layer를 설치할 수 없기 때문에 cryostat의 와전류에 의한 온도상승으로 시스템의 손실이 증가하기 때문에 대용량의 시스템에 적용은 곤란하다.[5] 그러나 저온절연방식 고온초전도케이블은 전기절연층이 극저온판로내에 있는 구조의 케이블로서 고온초전도 도체위에 전기 절연층을 놓고 그 위에 다시 HTS 절연층을 설치한 케이블 코어를 극저온 판로 내에 설치하는 구조의 초전도케이블로서 shield layer와 도체층의 적용이 가능하여 cryostat에서 와전류의 발생을 억제할 수 있으며, 하나의 cryostat에 3상 케이블 코어를 모두 설치할 수 있어 각 상마다 cryostat를 설치하는 상온절연방식과 비교해서 단위길이 당의 열절연층의 표면적이 작게 되기 때문에 외부로부터의 침입 열이 적고 콤팩트하다는 장점이 있다.[6]

본 연구에서는 위와 같은 저온 절연형 절연방식을 채택하여 고온초전도 케이블의 운전 시에 발생하게 될 전기적 절연 특성들에 대하여 연구 검토하였다. 설계되어진 케이블의 절연두께와 종단부의 보강절연 값을 통하여 실험용 mini-model 케이블을 제작하여 내전압 시험, 임펄스 전압 시험, 부분방전 시험을 통해 종래의 22.9kV급 XLPE 케이블의 『한전표준구매시방서』와 각 시험값을 비교하였다. 또한 케이블이 굽혀질 때 절연 특성을 조사하였다. 실제 제작되어진 초전도 케이블은 대형 보빈에 감겨져서 보관, 운반이 되고, 실 계통에 적용 시에 케이블이 굽혀서 설치해야하는 구간도 있으므로, 본 연구를 통하여 케이블이 감겨지는 보빈의 직경, 최소 곡률 반경을 확인하고자 한다.

2. 본 론

2.1 22.9kV급 mini-model 케이블의 절연시험

현재까지 국내뿐만 아니라 다른 어떤 나라에서도 초전도 케이블에 대해 규정된 시험법 같은 것은 알려져 있지 않다. 그러므로 “22.9kV 동심중성선 전력케이블”의 「한전표준구매시방서(ES126-650-664)」 규정에 따라 mini-model 케이블의 절연성능을 시험하였다. 시험 방법은 AC, 임펄스, PD 등 3가지 전원으로 이루어졌다. 모든 시험은 케이블이 안정한 상태를 유지하게 하기 위해서 액체절소에 4시간 이상 침적시켜 충분히 냉각시켰으며, 시험은 대기압 하에서 이루어졌다. AC 내전압 시험은 80kV에서 1시간을 견디면 합격이며, 임펄스 시험은 BIL 기준에 따라 도체와 차폐간에 1.2 × 50μs 파형의 충격전압 150kV를 정극성, 부극성 각 10회 인가하

였다. 각 10회의 시험에서 절연파괴가 일어나지 않으면 합격이다. 마지막으로, 부분방전 시험기준은 도체와 차폐간에 교류전압 23kV를 인가하여 방전 전하량이 5pC 이하면 합격이다. 시험에 앞서 케이블의 단부에는 코로나가 발생하지 않도록 충분한 쉴드 처리를 하였으며, 주위 노이즈(back noise)는 1pC 이하로 거의 free한 조건에서 시험이 이루어 졌다.

그림 1은 절연 시험용 mini-model 케이블이다. 각 도체와 차폐간에 AC 및 임펄스 전압을 인가하였으며, 케이블을 액체질소에 침적시킨 후 4시간 이상 충분히 냉각하여 시험을 하였다. 실험에 사용된 mini-model 케이블의 전체길이는 1300mm이며 유효길이는 100mm이다. Noise를 줄이기 위해 케이블 단부는 쉴드 처리를 하였다.

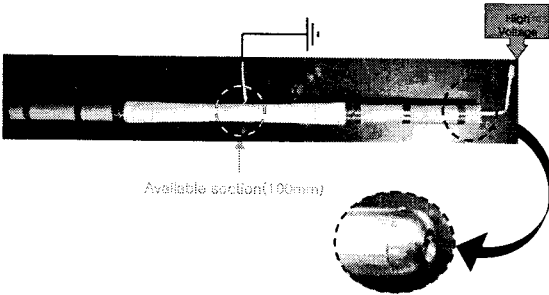


그림 1. 절연 시험용 mini-model cable

2.1.1 AC 내전압 시험 및 절연파괴시험

그림 2는 AC 내전압 및 절연파괴 시험방법을 보여준다. AC 내전압 시험기준은 60초 동안 80kV 까지 상승시킨 후 60분 동안 절연파괴가 일어나지 않으면 합격이며, 전압 상승은 약 1분간 80kV까지 상승 후, 1시간 동안 과전을 하였다. 내전압시험 합격 후, 1분마다 10kV씩 절연파괴가 일어날 때까지 전압을 상승시켰다. 시험에 사용된 AC 전원은 'Tokyo transformer 300kV/1A' 고전압인가 장비를 사용하였다.

시험 결과로써, 도체와 차폐층 간에 80kV로 60분 동안 인가한 결과 절연파괴는 일어나지 않았으며, 「한전 표준구매시방서」의 장시간 시험방법의 허용치에 만족하였다. 또한 교류내전압 시험 후, 10kV/5min씩 상승시켜 절연파괴 시킨 결과 120kV에서 파괴가 일어났다.

이는 시방서의 장기과통전시험 교류내전압 160kV/5min이 될 때까지 견뎌야 된다는 조건에 만족하지 못하나, 본 시험조건이 대기압 상태에서 수행되어 실제 케이블의 운전조건인 3~5기압의 조건에서는 충분히 만족할 것으로 사료된다.

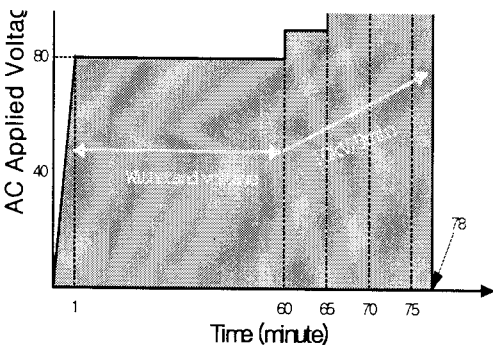


그림 2. 교류 내전압 및 절연파괴시험

2.1.2 임펄스 전압 시험

표 1과 표 2는 mini-model 케이블의 임펄스 내전압 시험 및 절연파괴 시험 결과를 보여준다. 임펄스 특성은

150kV의 임펄스 전압에서 정·부극성으로 각각 10회 실시하였으며, 임펄스 시험 역시 「한전 표준구매시방서」의 충격시험 기준에 만족하였다. 임펄스 시험장비는 1.2×50μs 파형의 표준 임펄스파를 가지며, 최대용량 700kV의 충격내전압 시험기를 사용하였다. 충격내전압 시험 후, 절연파괴 현상을 조사하기 위해 5kV씩 상승시켰으며 190kV에서 절락이 발생하였다. 이것은 절연파괴값이 「한전 표준구매시방서」의 장기과통전시험의 부극성 310kV에서 3회이상 견뎌야 한다는 조건에는 만족하지 못하였다. 이때의 절연파괴 흔적을 살펴보았을 때, 유효부분에서 파괴가 일어난 것이 아니라 케이블 종단부에서 연면방전이 발생하였다. 임펄스 시험의 경우 절연파괴 시험시에는 시료의 충분한 길이를 확보해야 함에도 불구하고 본 연구에서 제작된 mini-model 케이블의 경우는 1300mm로 차폐층과 도체의 연면길이가 너무 짧아서 이같은 현상이 발생한 것으로 사료된다.

그림 3은 임펄스 내전압 및 절연파괴가 일어난 파형을 보여준다. 150kV 정극성·부극성 모두 견디고 있음을 보여주며, 190kV에서 절연파괴가 발생하였음을 알 수 있다.

표 1. 임펄스 내전압 시험 결과

Voltage	Polarity	Number of times	Test result
150kV	positive	10 times	pass
	negative	10 times	pass

표 2. 임펄스 절연파괴시험 결과

Voltage	Polarity	Test result
160kV	negative	pass
165kV	negative	pass
170kV	negative	pass
175kV	negative	pass
180kV	negative	pass
185kV	negative	pass
190kV	negative	breakdown

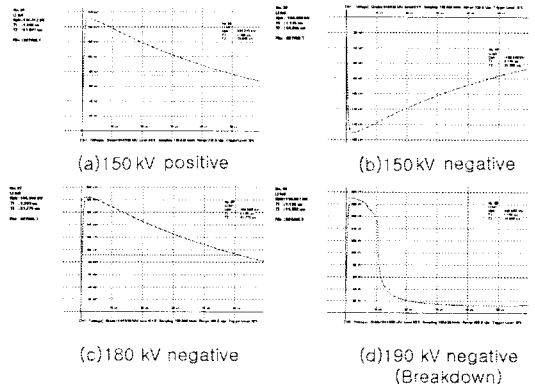


그림 3. 임펄스 내전압 및 절연파괴파형

2.1.3 부분방전 시험

세번째로 mini-model 케이블의 부분방전 특성을 표 3에 나타낸다. 코로나 및 noise의 발생을 억제하기 위하여 모든 접속부는 쉴드 처리하였으며, 액체질소 속의 시료를 설치한 후 back noise를 측정된 결과 1pC 이하로 거의 free한 조건이었다. 부분방전 시험기준은 케이블 단말부에서 코로나가 발생치 않도록 충분한 처리를 한 후, 각 도체와 차폐간에 교류전압 23kV에서 방전

전하량이 5pC 이하이면 합격이다.

시험결과 mini-model 케이블의 부분방전은 28~30kV 사이에서 발생하기 시작하였으며, 30kV 이상의 전압에서의 부분방전은 급격하게 증가하였다. 그러므로 도체와 차폐간에 교류전압 23kV에서 방전전하량이 약 2pC 정도이므로 「한전표준구매시방서」의 조건에 만족하였다. 부분방전 시험장면 및 부분방전 개시 파형을 그림 8에 나타낸다.

표 3. 부분방전 시험 결과

Voltage	방전전하량	평가
under 23kV	under 2pC	pass
23kV	2pC	pass
25kV	2pC	pass
27kV	2pC	pass
28kV	2-5pC	pass
30kV	2-5pC	pass
over 30kV	over 50pC	intermittent PD occurrence



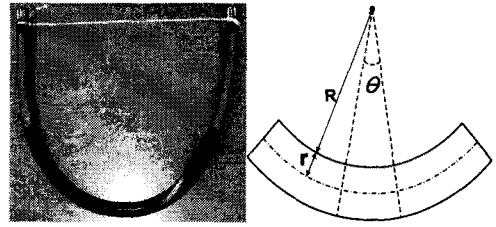
그림 4. 부분방전 시험 장면

2.2 초전도 케이블의 굽힘에 따른 절연특성

2.2.1 실험방법

본 연구에서 개발 중인 고온초전도 케이블은 케이블코아 및 극저온관로에 모두 유연성이 부여된 flexible형 케이블이므로, 케이블 포설시 및 운반을 위해 대형 보빈에 감기 위해서는 일정한 곡률반경에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 절연지의 중첩율을 30%로 하여 제작한 미니모델 케이블을 사용하여 다양한 곡률반경에 대한 전기적 절연특성들을 연구하였다.

그림 5는 고온초전도 케이블의 곡률반경을 결정하기 위하여 다양한 반경을 가지는 드럼을 이용하여 굽힌 미니모델 케이블의 사진 및 구성도를 (a), (b)에 각각 나타낸다. 그림에서 r은 케이블 반경(15 mm)으로써 항상 일정한 값을 가지고, R은 케이블 곡률반경을 나타내며, θ 는 하나의 절연자폭(25 mm)에 대한 곡률각을 나타낸다. 또한 케이블 반경 r과 곡률반경 R을 이용하여 케이블의 곡률반경 배수 R/r을 10배, 15배, 20배, 25배, straight(굽히지 않은 경우)의 5가지 경우로 하여 케이블을 제작하였으며, R/r이 작은 값일수록 심한 굽힘을 나타낸다. 또한 케이블 최대 굴곡시의 Butt-gap 크기를 살펴보면, 케이블 바깥쪽은 Butt-gap 만큼 늘어나고, 안쪽은 Butt-gap 만큼 줄어들게 된다.



(a) photo (b) Schematic
Fig.5 Schematic of the banded mini-model cable.

2.2.2 AC, Impulse 및 부분방전 실험결과

그림 6은 제작된 곡률반경 시험용 미니모델 케이블의 곡률반경 배수에 대한 AC 및 임펄스 절연파괴 전압을 나타낸다. 가로축은 굽히지 않은 straight의 경우부터 10배까지 변화시킨 곡률반경 배수 R/r을, 세로축은 절연파괴 전압을 나타내며, AC 및 임펄스 전압을 각각 ● 및 ■로 표시하였다. 그림에서 임펄스 특성이 AC의 경우보다 높은 절연파괴 특성을 나타내고 있으며, 어느 경우든지 다음과 같은 유사한 경향을 보이고 있다. 굽히지 않은(straight) 케이블과 곡률반경 배수 R/r이 25배인 케이블의 경우는 거의 비슷한 절연파괴 전압값을 보이고 있으나, R/r이 감소할수록 점차 낮은 값을 보이며, 약 10배인 경우에는 굽히지 않은 케이블과 비교해서 약 2배 정도로 급격하게 감소하고 있다.

이와 같이 케이블의 곡률반경이 작아질수록 절연파괴 전압이 낮아지는 이유는 절연지에 가해지는 기계적 스트레스와 인장력을 받게 되는 케이블의 바깥쪽 Butt-gap의 면적이 넓어지면서 더 많은 약점이 존재하게 되기 때문이라고 생각된다.

케이블 절연부의 절연파괴는 Butt-gap에서 항상 출발하게 되고, Butt-gap의 면적이 넓어지게 되면 부분방전이 일어나게 될 확률이 그만큼 높아지게 되는 체적 효과에 기인한 것이라 사료된다.

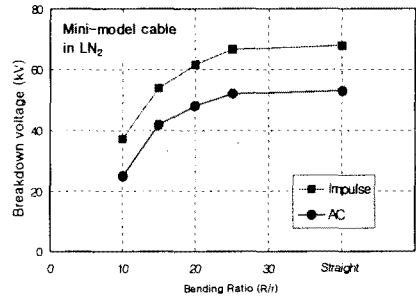


Fig.6 AC and impulse breakdown voltage by bending ratio of model cable

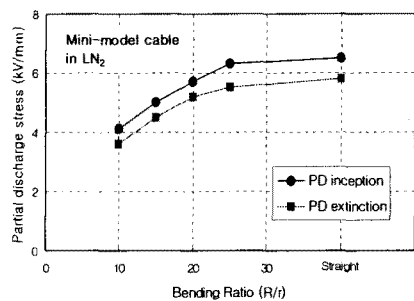


Fig.7 Partial discharge by bending ratio of model cable

그림 7은 미니모델 케이블의 곡률반경 배수에 대한 부분방전 개시 및 소멸 전계를 나타낸다. 그림에서 굵지 않은(straight) 케이블의 경우 곡률반경 배수 R/r 이 25배인 경우의 부분방전 개시전계와 거의 비슷한 값을 보이고 있으며, R/r 이 25배 미만인 경우에는 곡률반경이 감소할수록 부분방전 개시 전계값도 점차 낮아지고 있다. 따라서 고온초전도 케이블의 곡률반경에 따른 부분방전 특성도 절연과피 특성과 유사한 경향을 나타내고 있으며, 앞에서 언급한 Butt-gap 면적에 따른 체적효과에 기인한 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 22.9kV급 고온초전도 케이블의 절연 시험을 위하여 mini-model 케이블을 제작하였으며, 「한전표준구매시방서」의 시험조건에 따라 절연 시험을 행하였다. 이들 절연시험에서 제작된 mini-model 케이블은 대기압 액체질소 조건에서 AC 내전압시험, 임펄스 시험 그리고 부분방전 시험은 「한전표준구매시방서」의 시험조건을 만족하였지만, 장기 과전전 시험에서는 실제 케이블의 운전조건이 설정되지 않아 절연시험은 제약을 많이 받았다. 하지만, 현재까지 고온 초전도 케이블의 시험조건이 확립되어있지 않은 상태에서 기존 케이블의 시험조건에 의한 케이블의 절연성능의 판단은 신중함을 요구할 필요가 있다. AC 및 임펄스, 부분방전, 케이블 Bending시험 등의 mini-model 케이블의 절연시험 결과를 정리하면 다음과 같다.

① 교류내전압 및 절연과피 실험에서 80kV 1시간 과전했을 때 절연과피가 일어나지 않아 내전압시험은 합격하였으며, 절연과피는 120kV에서 발생하였다. 충격내전압 및 절연과피실험에서 150kV 정·부극성의 충격전압 10회에서 절연과피가 일어나지 않아 합격하였으며, 절연과피는 190kV에서 발생하였다. 그리고 부분방전 실험에서 AC 23kV에서 방전전하량이 2pC이하로서 합격하였다.

② 곡률반경 배수가 작아짐에 따라 케이블 바깥쪽의 절연층에서는 인장력이 작용하여 찢어져 크랙이 생기거나 백화현상이 발생하였고, 안쪽이 수축력이 작용하여 서로 접치거나 구김이 생겼다. 이에 따라 곡률반경이 작은 케이블일수록 낮은 절연내력을 보였으며, 곡률반경배수가 약 25배 이상이 되면 straight 상태의 케이블과 유사한 값을 나타내었다.

앞서의 실험결과를 근거로 하여, 현재 Prototype 케이블을 제작 중에 있으며, 이를 통해 실제 고온초전도 케이블이 운전될 때 절연에서 발생할 수 있는 많은 문제점들을 개선할 수 있을 것이라고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] N.Steve et al, "High Temperature Superconducting cable field demonstration at Detroit Edison", Physica C 354, p49, 2001
- [2] M.Nassi, "HTS Prototype for Power Transmission Cable: recent result and future programmes", Supercon. Sci. Technol:13, 2000
- [3] 성기철 외, "배전급 초전도 전력케이블 개발", 차세대 초전도 응용기술개발 사업단 연차보고서, 2002
- [4] Mujiba. M. Rahman and Marco Nassi, "High-capacity cable's role in once and future grids", IEEE spectrum p31-35. 1997
- [5] Von Dollen D, Metra P and Rahman M, "Design Concept

of a Room Temperature Dielectric HTS Cable" Proc. 1993 American Power Conf. Vol. 55-II p1206-1211. 1993

[6] Aldo Bolza, "Recent Developments in HTS Power Cable Applications", IEEE Trans. on Appl. Supercond, Vol. 7, No. 2 p339-344. 1997

[7] 한전 표준 구매시방서, 2001. 11. 9. 개정, 22.9kV 동심중성선 전력케이블(ES126-650~664).

[8] 광동순 외, "고온초전도 케이블의 절연과피 특성에 미치는 Butt gap의 영향", 한국전기전자재료학회, Vol17, No3, p333~349, 2004