

## 교류손실 및 안정성을 고려한 22.9kV 초전도 케이블 설계

장현만, 이창영, 김춘동, 심기덕<sup>1</sup>, 조전욱<sup>1</sup>

LS전선(주), 한국전기연구원<sup>1</sup>

## Design of 22.9kV High Temperature Superconducting Cable Considering AC losses and Stability

H. M. Jang, C. Y. Lee, C. D. Kim, K. D. Sim<sup>1</sup> and J. W. Cho<sup>1</sup>

LS Cable Ltd., Korea Electrotechnology Research Institute<sup>1</sup>

**Abstract** - High temperature superconducting(HTS) power cable system consists of HTS cable, termination and cryogenic system. And the HTS cable consists of the former, HTS phase conductor, electric insulation, HTS shield and cryostat. Taking the advantage of HTS shield, the cold dielectric has been adopted. The phase conductor and the shield have been designed to minimize the AC loss below 1W/m/phase. The former has been designed to transport the fault current of 25kA, at fault condition.

This paper describes the design process of 22.9kV HTS cable considering AC losses at normal state and the stability at fault condition.

### 1. 서 론

고온초전도 케이블(이하 초전도 케이블)은 환경친화적 인 저손실·대용량 전력케이블로서 차세대 전력전송용 케이블의 후보로서 각광받고 있다. 미국 DOE 보고서에 따르면 2010년경에 고온초전도 전력케이블의 상용화 가능성이 크며 및 시장 진입 시기가 가장 빠를 것으로 기대되고 있다[1][2].

초전도 케이블의 상용화를 위해서는 기술적인 측면에서 신뢰성과 경제성 확보가 선결되어야 한다. 초전도 케이블은 액체질소 온도(77K) 이하로 냉각되어 운전되기 때문에 초전도 케이블의 성능 외에도 극저온 냉각시스템의 신뢰성과 경제성이 초전도 케이블의 상용화의 관건이라 할 수 있다. 냉각시스템의 신뢰성 확보를 위해서는 극저온 및 기계분야의 설계기술 향상이 요구되지만, 경제성 확보를 위해서는 냉각설비의 고효율화와 함께 초전도 케이블에서 열부하의 최소화가 요구된다. 초전도 케이블의 전체 솔루션 중 교류손실이 차지하는 비중이 약 50% 이상임을 감안하면 교류손실의 저감 기술이 케이블 설계기술 및 경제성 확보에 있어서 가장 핵심이 된다 할 수 있다.

본 논문은 22.9kV 초전도 케이블의 신뢰성 및 경제성 확보 측면에서 사고전류에 대한 케이블의 안정화 대책과 교류손실의 저감을 고려한 초전도케이블의 설계과정에 대해 기술하였다.

### 2. 초전도 케이블의 구조 검토

#### 2.1 초전도 케이블 타입과 그 선정

초전도 송전선로는 일반적인 지중송전선로와 마찬가지로 초전도 케이블과 중간 및 종단접속함(단말) 외에도, 그림 1에 나타낸 것과 같이 초전도 케이블을 극저온 상태로 유지시키기 위한 극저온 냉매의 순환장치와 극저온

냉동기를 포함하는 냉각시스템(Cryogenic system)으로 구성된다. 본 논문에서는 초전도 케이블 시스템의 구성 요소 중 초전도 케이블의 설계 기술에 대해서 중점적으로 기술하고자 한다.

초전도 케이블은 크게 초전도 도체 및 차폐, 전기절연과 열절연구조로 구성되어 있다. 초전도 케이블의 종류는 전기절연방식에 따라서 상온절연 (Warm Dielectric) 과 저온절연 (Cold Dielectric) 방식의 케이블로 구분되고 있다. 이 두 가지 절연방식의 선정에 따라 초전도 케이블의 구조, 냉각방식 및 송전용량에 차이가 있기 때문에 초전도 케이블의 기술적, 경제적인 면을 고려하여 선정 할 필요가 있다[3].

경제성 검토에 있어서는 송전용량 대비 케이블 시스템에 소요되는 자재가격뿐만 아니라 설계 목표 수명(예, 30년)까지의 운전비용까지 반드시 고려해야 하는데, 지중선로의 특성상 여기에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 '송전손실'이 된다. 한국의 경우, 서울을 비롯한 대도시를 중심으로 송배전선로에 부하가 60 ~ 70% 이상 집중되어 운영되므로, 대도시 용지난과 도시계획을 고려했을 때 저손실·대용량 송전이 가능한 저온절연방식이 보다 적합할 것으로 사료된다.

이상과 같은 검토결과를 토대로, 본 연구에서는 목표로 하는 22.9kV, 초전도 케이블 type은 laminated PP paper를 전기절연체로 하고 액체질소( $\text{LN}_2$ )를 이용하여, 코아를 극저온 상태로 유지시키는 저온절연 방식으로 선정하였다. 또한, 케이블 선심수는 22.9kV라는 배전전압과 송전용량 및 설치작업 용이성을 고려하여 그림 2와 같이 compact한 삼심 케이블(three core cable)로 하였다.

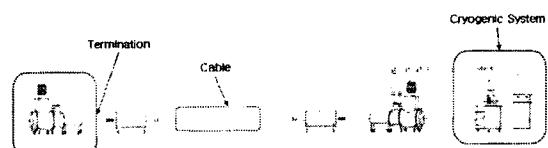


그림 1. 초전도 케이블 시스템 구성도

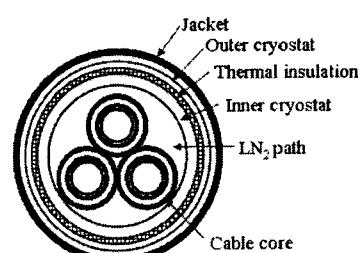


그림 2. 고온초전도 케이블의 단면 구조

## 2.2 초전도 케이블의 교류손실

전력케이블은 교류계통에 직접 연계하여 운용되기 때문에 도체에는 직접 교류전류가 통전된다. 기존의 상전도 케이블에서 발생되는 손실은 도체 저항손실, 유전체 손실 및 시스손실이 있다. 시스손실은 도체에서 발생된 교류자속으로 인해 도체 이외의 금속 재질에 유도되는 전류에 의한 Joule 손실을 말한다. 초전도케이블에 있어서는 초전도 차폐층이 교류자속이 외부로 유출되는 것을 막아주기 때문에 시스손실은 고려하지 않는다. 그렇지만 통전전류에 의한 교류자속은 초전도체 내부로 직접 침투하게 되어 초전도체에서는 저항손실과는 별개 개념인 교류손실 (AC loss)이 발생하게 된다. 초전도체의 교류손실은 초전도체의 교류저항에 의한 통전손실, 초전도체에 침투되는 교변자계에 의한 자화손실 및 와전류 손실 등이 있다. 그 교류손실은 열로서 방출되기 때문에 초전도 케이블의 설계단계에서 냉각시스템 용량 산정 시 주요한 인자로서 작용한다.

그림 3은 2004년 국내 최초로 개발된 22.9kV, 50MVA 초전도 케이블 시제품의 설계 및 평가결과를 바탕으로 도출된 저온 절연방식 초전도 케이블의 손실을 항목별로 분류하여 나타낸 도표이다. 개별 손실들은 수 km의 초전도 케이블 선로라고 가정하고 계산되었다. 그림 3으로부터 초전도 케이블 전체 손실 중 교류손실이 차지하는 비중이 50% 이상(1W/m/phase)임을 알 수 있다. 따라서 냉각시스템의 용량산정과 전체적인 경제성을 고려할 때 초전도 케이블의 설계에 있어 교류손실의 저감이 그 핵심기술이라 할 수 있다.

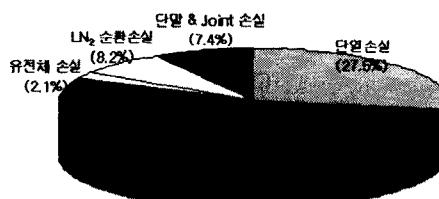


그림 3. 초전도 케이블의 손실

## 2.3 초전도 케이블의 안정화 대책

전력계통에서 단락 등의 사고가 발생하는 경우, 초전도 케이블에 정격전류의 수배에서 최대 수십배의 대전류가 흐르게 된다. 이러한 대전류에 대해서도 초전도 케이블이 송전기능을 안정하게 유지할 수 있는 안정화 대책이 필요하다.

사고전류가 흘렀을 때 초전도 케이블이 상전도로 전이되는 것(웬치)을 피할 수 없고, 초전도 케이블은 정상상태 보다 훨씬 큰 발열이 생겨 케이블 온도가 급격히 상승 할 수 있다. 이 온도의 상승은 냉매의 증발을 초래하고, 이로 인해 초전도 선재의 단선 및 과도한 압력상승을 유발 할 수 있다. 따라서 케이블의 온도상승이 냉매의 사용 압력 하에서 비등점 이하가 되도록 사고전류를 제어할 필요가 있다. 이 대책으로 저항이 낮은 상전도 금속을 사고전류에 대한 shunt로 사용하게 되면 케이블 내부의 발열을 감소시키고, 초전도체의 냉각효과를 높여 사고전류가 제거된 후 빠른 시간에 초기 운전상태로 회복 가능한 방법을 채용하였다.

## 3. 초전도 케이블 설계

### 3.1. 초전도 케이블 계통조건

22.9kV 초전도 케이블 시스템이 계통에 적용되기 위해서는 기존 전력기기 및 상전도 케이블 등과 연계되어 운전되어야 하며, 이들과의 상호 절연협조를 위해 기본적인 전압조건을 한전의 규격을 토대로 기존 시스템과 동일하게 하여 표 1과 같이 산출하였다.

표 1. 초전도 케이블 설계 조건

공칭전압, $U_0/U(\text{Um})$	13.2/22.9(25.8)kV
BIL	150kV <sub>p</sub>
송전용량(정격전류)	50MVA(1260A <sub>rms</sub> )
사고전류	25kA <sub>rms</sub>
케이블 최대외경	150mm 이하(175º 관로기준)
$\text{LN}_2$ 상시최대압력	10kg.f/cm <sup>2</sup>

## 3.2 22.9kV 초전도 케이블 설계

### 3.2.1 Former 설계

포머는 초전도 선재를 감기 위한 지지대 역할과 동시에 사고전류에 대한 shunt(안정화 도체)로서 역할을 할 수 있도록 설계하였다. 안정화 도체로서의 역할을 위해서는 사고전류 대비 적정 단면적 이상으로 설계되어야 한다. 본 연구에서는 고장순시 허용전류 관련규격 IEC 60949를 토대로 식 (1)에 의거하여 안정화 도체의 단면적을 산출하였다.

$$S = \sqrt{\frac{I_s^2 t}{K^2 \ln\left(\frac{T_f + \beta}{T_i + \beta}\right)}} \quad \text{--- (1)}$$

여기서  $S$ ,  $I_s$ ,  $t$ ,  $K$ ,  $\beta$ 는 각각 안전화 도체의 단면적, 사고전류 및 사고전류 지속시간을 나타내며,  $K$ 와  $\beta$ 는 각각 고장전류를 담당하는 재료의 계수(단위:  $\text{As}^{1/2}/\text{mm}^2$ )와 77K에서의 도체저항의 온도계수의 역수(단위: K)이며,  $T_i$ ,  $T_f$ 는 각각 초기온도와 허용온도를 나타낸다.

제통 사고 시의 사고전류는 25kA 고장전류의 지속시간은 0.25초로 하였고, 케이블 코아의 허용온도는 액체질소 압력 3bar에서 비동점인 87.9K로 설정하였다. 안정화 도체의 재질을 구리로 하였을 때, 식 (1)을 통해 안정화 도체의 단면적을 150mm<sup>2</sup>로 산정하였다.

반면 정상상태 통전 시 포머에서 발생할 수 있는 와전류 손실이 과다하게 발생 할 수 있다. 포머의 와전류 손실을 줄이기 위해서 구리 포머의 외각에 구리에 비해 상대적으로 저항이 높은 구리 합금도체를 연선하는 방식으로 설계하였다.

### 3.2.2 초전도 도체 및 차폐

초전도 케이블에서의 도체 및 차폐의 설계는 구리나 알루미늄을 사용한 상전도 케이블에서는 고려하지 않는 몇 가지 특징이 있는데, 대표적인 현상이 대전류 통전에 따른 '漏流現象'과 교류손실이다. 복수층으로 선재가 연선된 초전도 도체에 있어 각층의 퍼치 및 연방향이 동일하다면 중심에서 외층으로 갈수록 인더턴스가 작아지게 된다. 초전도체의 저항을 거의 "0"이라고 생각하면 인더턴스를 각 층의 임피던스로 생각할 수 있으며, 이 경우 외층은 전류가 내층보다 많이 흐르는 편류 현상이 발생하여 전류 용량을 감소시키게 된다. 따라서 중앙 인더턴스를 동일하게 하여 전체전류가 개별 선재에 균일하게 배분시켜주는 설계 조건이 필요하다[4].

교류손실 측면에서 볼 때, 초전도 도체 및 차폐층은 다수의 초전도 선재가 집합된 구조이기 때문에 초전도 케이블의 교류손실은 개별 초전도 선재의 자기자계(self-field, 수~수십Gauss) 손실 총합( $\sum Q_i$ ) 이상이 된다. 즉 케이블 상태에서 정격전류가 통전될 경우에는 각각의 초전도 선재들이 주변 선재에 의해 발생되는 자기장 영향으로 자기자계보다 높은 자기장(약 200Gauss)속에 놓이게 되어 자화손실(hysteresis loss,  $Q_H$ )의 현저한 증가가 예상된다. 따라서 교류손실( $Q_{AC}$ )을 정량적으로 예측을 위해서는 식 (2)와 같이 초전도 선재의 자기자계손실(그림 4)과 자화손실이 함께 고려되어야 한다.

$$Q_{AC} = \sum Q_H + \sum Q_i \quad \text{--- (2)}$$

본 연구개발에 사용된 AMSC사 초전도 선재의 자기자체 손실의 측정결과와 계산결과를 그림 4에 나타내었다. 손실 계산은 Norris 식(식 (3))을 [5] 이용하여 계산하였다. 식 (3) 및 측정결과로서 알 수 있듯이 초전도 선재의 교류손실은 실제 통전전류의 제곱에 비례하여 증가한다. 그러므로 다수의 초전도 선재로 구성된 도체에서 각각의 선재에 균일한 전류가 배분될 경우에 케이블의 교류손실이 최소화됨을 알 수 있다. 따라서 제한된 초전도 선재의 수량을 사용하여 케이블의 전류용량을 최대로 하고 교류손실을 최소화하기 위해서 각 도체층의 임피던스가 균일한 조건으로 각 층의 pitch와 연방향을 산정하였다. 또한 자속(magnetic flux)방향과 세기를 고려하여 자기장 발생을 최대한 억제할 수 있도록 설계하였다.

$$Q_i = \frac{\mu_0 I_{ci}^2}{2\pi} ((2 - F_i)F_i + 2(1 - F_i)\ln(1 - F_i)) \quad (3)$$

여기서  $F_i$ 는 통전전류의 피크치와 임계전류와의 비율이다.

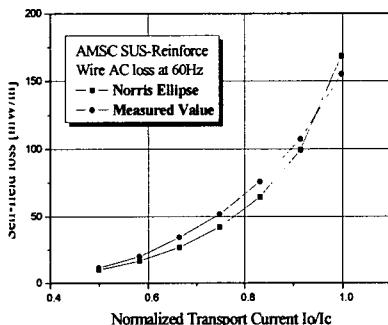


그림 4. 초전도 선재의 AC loss(AMSC社 BSCCO tape)

### 3.2.3 전기절연

케이블에 있어서 절연두께는 다음과 같은 기준으로 설계하였다.

i) 기준 AC 내전압치를 인가했을 때, PD(부분방전)가 발생하지 않을 것(실험적으로 24kV/mm).

ii) 기준 Imp.에 대해 절연파괴가 일어나지 않을 것.

절연지는 일반적인 kraft paper에 비해 그 특성이 월등히 우수한 laminated PP paper를 선정하였다. 쇠적의 절연 설계를 위하여 LN<sub>2</sub> 내에서 laminated PP paper의 AC 절연파괴 및 PD 시험 및 tanδ시험 등을 실시하였다. 그 시험결과로부터 22.9kV 초전도 케이블의 절연두께를 4.68mm를 산정하였다.

이상의 내용으로부터 설계된 22.9kV, 50MVA 초전도 케이블 core의 구조를 그림 5에 나타내었다. AC loss의 설계사양은 상당 1W/m 이하이다.

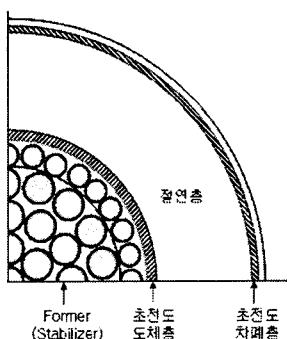


그림 5. 고온초전도 케이블 core 구조

### 3.2.3 Cryostat 설계

Cryostat의 설계에는 LN<sub>2</sub> 유동을 고려한 압력 손실, 내압력 및 외부 하중에 대한 기계적 특성, 재료의 진공 특성과 열손실 등이 복합적으로 고려되어야 한다. 본 논문에서는 AI를 대상으로 cryostat 설계를 진행하였다.

코어 설계에서 최종적으로 도출된 코어의 치수와 LN<sub>2</sub> 유량을 기준으로 내부 cryostat의 내경을 계산하였다. 자사 설비의 제작 기준을 만족하는 두께 및 주름 조건을 선택한 뒤, 최대 내압력을 유지할 수 있도록 LS전선(주)의 OF 케이블의 설계 기준과 cryostat의 설계 기준(식 (4))[6]을 동시에 비교하였으며, 이 중 두꺼운 두께를 선택 적용하였다.

$$t = \frac{p D_e}{2 S_a e_w - 1.2 p} \quad (4)$$

여기서  $S_a$ ,  $e_w$ ,  $D_e$ 는 각각 허용하중, 용접 효율 및 유효직경이다.

외부 sheath의 경우 내부 cryostat의 외경을 기준으로 MLI(multi-layer insulation)와 스페이서의 배치를 고려한 공간을 확보한 뒤 설계를 진행하였다. 외부 대기압에 의해 버클링을 예방할 수 있도록 아래의 식 (5)를 사용하여 구한 두께와, XLPE 케이블의 설계기준으로 구한 두께를 비교하여 더 큰 값을 선택 적용하였다.

$$p_c = \frac{2E(t/D_e)^3}{1 - V^3} \quad (5)$$

여기서  $E$ 는 탄성계수,  $p_c$ 와  $D_e$ 는 각각 외부 압력과 유효 외경이다.

열전열의 설계는 진공 단열 및 MLI에서 발생할 수 있는 내, 외부 cryostat간 보사 열전달, 대류 열전달, MLI를 통한 고체 전도 열전달을 고려하여 계산을 진행하였다. 진공도  $7.5 \times 10^{-5}$  torr, MLI 15~20매를 사용했을 경우 cryostat의 열손실은 1.5W/m 미만으로 계산되었다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 실용화를 목표로 LS전선(주)와 한국전기연구원이 공동으로 진행 중인 초전도 케이블의 개발과정 중, 22.9kV 케이블의 설계기술에 대해 소개하였다. 그 중 주요한 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 초전도 도체 및 차폐의 설계는 전류의偏流現象을 억제하여 교류손실의 저감(W/m/phase이하)을 위한 조건으로서 쇠적의 피치와 연방향을 설계하였다.

(2) 전력계통에서 단락 등의 사고가 발생하는 경우를 대비하여 초전도 케이블이 송전기능을 안정하게 유지할 수 있는 안정화 대책으로서 포머를 설계하였다. 사고전류 25kA, 0.25초를 고려한 구리 포머의 단면적은 150mm<sup>2</sup>로 산정되었다.

본 연구는 과학기술부주관 “21C 프론티어연구개발사업”的 연구비 지원에 의하여 수행 되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Haruhito Taniguchi, ‘Expectation of Superconductivity Application to Power system’, 平成 11년 電氣學生全國大會, 1999
- [2] Joseph Mulholland, Thomas P. Sheahan, Ben McConell, ‘Analysis of future prices and markets for high temperature superconductors’ DOE report draft, 2002
- [3] Superconducting cables impact on network structure and control - CIGRE Task Force 38.01.11, 2002
- [4] J. H. Joo, S. W. Kim et al., ‘Pitch Calculation of 4-layer HTS Power Transmission Cable for Balanced Sharing Current’ Journal of the KIASC, Vol.5, No.1, pp. 35-39, 2003
- [5] W.T. Norris, ‘Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying as isolated conductors and edges of thin sheets’, Journal of Physics D, Vol. 3, p.489, 1970
- [6] Randall F. Bron, ‘Cryogenic systems 2nd Edition, Chapter 7 Cryogenic-fluid storage and transfer systems’, 1985