

### 고온초전도 전력케이블의 개념설계

조전욱, 성기철, 김해중, 이언용, 류강식  
(한국전기연구소, 초전도응용연구사업팀)

### Conceptual Design of HTS Power Cable

J.W.Cho, K.S.Seong, H.J.Kim, E.Y.Lee, K.S.Ryu  
(Korea Electrotechnology Research Institute, Applied Superconductivity Lab.)

**Abstract** - In recent years the large capacity underground power transmission systems have been required gradually with the increasing demand of electric power, the increasing electric power system and the environmental limitations of an overhead transmission line in the city. But it is difficult to get the space for the underground power transmission lines because of complicated distributions of underground public facilities. But as the superconducting power cables have the large power transmission capacity, the high power transmission density, and low loss characteristics in comparison with a conventional cable, the necessity for their development are increasing. In this paper, the results of the conceptual design of HTS power cable is described.

의 케이블과 비교하여 경제성이 있는 것으로 예측하기도 한다.

본 논문에서는 이와같은 고온초전도 전력케이블의 개념 설계 결과에 대하여 기술한다.

## 2. 본 론

### 2.1 고온초전도케이블의 구성

#### 2.1.1 고온초전도 케이블의 기본구조

본 개념설계에서 대상으로 한 고온초전도케이블의 구조는 3상케이블코어를 하나의 극저온단열관로에 넣는 구조로 POF 케이블과 유사한 구조를 갖는다. 고온초전도케이블 코어는 액체질소의 통로인 former와 통전도체(초전도도체), 전기절연층, 쉴드도체(초전도도체)로 구성되며 그 기본구조를 그림1에 나타내었다.

## 1. 서 론

산업의 급격한 성장과 지속적인 국민의 생활수준 향상에 따라 전력에너지 수요는 해마다 꾸준히 증가하고 있다. 특히 전체 전력부하중 약 23%를 서울지역에서 소비하고 있으며, 전력 부하밀도도 타지역에 비해 높아 '91년도 평균 5.6MW/km<sup>2</sup> 에서 '96년에는 8.3MW/km<sup>2</sup>, 2010년에는 15.1MW/km<sup>2</sup>이 될 것으로 예측되고 있다. 이중에서도 명동지역이 가장 높아 2010년에는 252.8MW/km<sup>2</sup>로 예측되고 있다. 이에 따라 장래 전력공급 측면에서 고밀도화 및 고신뢰도화를 실현하지 않으면 안되는 중요한 시점에 와있다. 이에 부응하기 위한 방안으로 계통을 확충, 보강하여 급격히 증대될 전력수요를 감당하기 위해 765kV계통을 현재의 계통에 중첩으로 신설하기로 결정하여 격상사업을 추진하고 있다.<sup>(1)</sup>

도심지 내에서의 급증하는 전력수요를 감당하기 위하여 지중케이블을 확충하고 있으나 지하철, 통신, 수도, Gas 등 조밀화된 지하공간에 새로운 케이블 전력구를 건설하는 것은 곤란하리라고 예측되고 있다. 또한 지중케이블의 추가 건설로서는 용량면이나 경과지면으로 볼 때 머지 않은 장래에 한계점에 도달할 것이 분명해지고 있어 대용량 고밀도의 전력수송이 가능한 새로운 방식에 의한 해결책이 강력히 요망되고 있다. 이러한 요구에 대한 대처 방안으로 고온초전도전력케이블의 적용을 들수 있다.

고온초전도케이블은 현재의 케이블에 비해 대전류를 흘릴 수 있을 뿐만 아니라, 교류손실이 종래 케이블에 비하여 1/20로 극히 작으며 송전용량 또한 현재보다 수배 이상 증가시킬 수 있어 일본, 미국 등의 외국에서 많은 연구개발이 진행되어<sup>(2)</sup> 1GVA의 송전용량에서도 기존

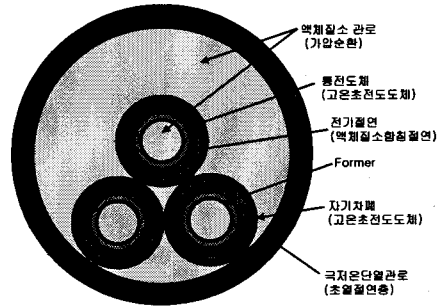


그림 1. 고온초전도 케이블의 단면구조

#### 2.1.2 초전도 도체

초전도케이블용 도체는 임계전류밀도가 높고, 장축화가 가능하고 기계적특성이 우수하여야 하며 전기적, 화학적으로 안정하여야 한다. 현재 초전도케이블용 도체로서 제일 유력한 선재는 Bi계 2223 Ag sheath로서 1km이상의 생산도 가능하며 Jc 또한 2X10<sup>4</sup> A/cm<sup>2</sup> 정도이며<sup>(3)</sup> Ag Sheath에 Mg나 Mn 등을 첨가하여 고강도화도 가능하다. 임계전류밀도 Jc가 1x10<sup>5</sup> A/cm<sup>2</sup> 이상에서는 케이블의 직경에 큰 영향이 없으며 통전도체 층과 shield층에서 발생하는 교류손실에 따라 결정된다. 교류손실의 주성분은 히스테리시스손실로서 교류자계가 초전도체 내부에 침투하여 pinning mechanism에 의한 자화이력현상이다.

실험치와 이론치가 잘 일치하는 Bean Model을 이용하여 손실을 다음식으로 계산할 수 있으며<sup>(4)</sup> 식에서 보

는 바와 같이 임계전류밀도가 큰 초전도체의 교류손실이 적어 유리하다.

$$W = \frac{4\sqrt{2} \mu_0 I_c^3 f}{3P_e^2 J_c} \quad [W/m] \quad (1)$$

여기서  $I_c$ 는 통전전류[A],  $f$ 는 계통주파수[Hz],  $P_e$ 는 도체주위길이[m],  $J_c$ 는 임계전류밀도[A/m<sup>2</sup>]이다.

### 2.1.3 전기절연층

고온초전도 케이블의 전기절연방식은 액체질소와 절연지에 의한 복합절연방식이 유력하다. 그러나 액체질소의 기화에 따른 기포발생에 의해 절연성능의 저하를 초래할 수 있기 때문에 액체질소를 과냉각상태로 유지하기도 한다. 상온에서 코아를 제작하기 때문에 저온수축의 영향을 고려하여 테이핑각도의 변화분을 가산할 필요가 있다. 상온에서 액체질소온도까지 냉각될 때 도체와 절연테이프의 열팽창률차이에 의해 도체에 기계적응력이 가해져 도체의 특성열화가 발생하지 않도록 하여야 한다. 전기절연층의 두께를 계산하기 위하여 설계최대전계는 77K, 1kg/cm<sup>2</sup>G에서 케이블의 부분방전소멸전계값에 마진을 두고 다음식에 의해 계산하였다.

$$E_{max} = \frac{V}{r \ln(R/r)} \quad (2)$$

$E_{max}$  : 최대전계 (kV/mm),  $V$ :인가전압(kV),  $r$ :절연내반경(mm),  $R$ :절연외반경(mm)

### 2.1.4 차폐도체층

초전도체의 임계전류는 자장에 대하여 이방성을 나타내며 결정C축에 평행방향의 자장이 인가되면 임계전류가 저하된다. 케이블 코아에서의 SZ배열의 도체구조에서는 도체의 자기자장은 C축에 수직이기 때문에 임계전류의 저하는 작지만 본 개념설계에서 검토한 3상의 경우는 다른 상에서 유기되는 자장에는 C축성분이 포함되어 있기 때문에 임계전류를 크게 저하시킨다. 또한 초전도케이블은 대전류를 통전시키기 때문에 단열관로서의 와전류가 크게 발생하여 열손실이 커지게 된다. 이와같은 이유로 각각의 케이블코아에 차폐도체층을 두어 케이블코아 밖으로의 누설자계를 차폐하여야 한다.

### 2.1.5 열절연층

상온으로부터 냉매로 침입하는 열은 냉동기의 부하로 작용하므로 침입열을 최소화하여야 경제적으로도 유리하다. 따라서 초열절연방식(Superinsulation)의 채용이 초전도케이블의 열절연방식으로 유리하며 이 방식은 열전도율이 매우 작다는 장점이 있지만 전구간을 적어도 10<sup>-4</sup> Torr정도의 진공도를 유지하여야 하는 어려움이 있다. 단열관로의 단열두께는 열침입량의 설계치를 1W/m로 하여 다음식을 이용하여 설계하였다.

$$W_{in} = \frac{2\pi k \Delta T}{\ln(R/r)} \quad (3)$$

$W_{in}$ : 열침입량(W/m),  $k$ : 단열재등가열전도율,  $\Delta T$ : 온도차,  $r$ : 단열관로내반경,  $R$ : 단열관로외반경

## 2.2 케이블코아의 개념설계

초전도케이블 코아는 내부에 통전용 초전도도체와 외부에 shield용 초전도도체를 나선형으로 감아 유연성을 갖는 구조로 설계하였으며, 케이블시스템은 냉동기와 펌프 등을 설치하여 액체질소를 강제순환시키는 closed-loop형태의 시스템으로 검토하였다. 케이블시스템이 운전되는 온도와 압력에 대해서는 허용최고온도를  $T_{max}$ , 허용최저압력을  $P_{min}$  이라고 설정하고 냉동시스템에서 나와 케이블시스템을 순환한 액체질소는 도체의 교류손실 및 외부의 열침입 등에 의해 온도상승

( $\Delta T$ )하며 냉매의 유효길이에 비례하여  $\Delta P$ 의 압력손실이 발생한다. 즉 냉동시스템 시작점에서의 온도와 압력을  $T_{in}$ ,  $P_{in}$ , 냉동시스템으로 돌아온 액체질소의 온도와 압력을  $T_{out}$ ,  $P_{out}$  이라고 하면 식(4)가 성립한다.

$$\begin{aligned} T_{out} &= T_{in} + \Delta T \\ P_{out} &= P_{in} - \Delta P \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 액체질소의 상태에 대한 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{out} &< T_{max} \\ P_{out} &> P_{min} \end{aligned} \quad (5)$$

이상의 액체질소의 조건과 함께 송전전압은 154kV로 설정하고 국내에 포설된 관로의 직경인 200mm  $\phi$  내에 설치 가능한 케이블의 사이즈와 용량을 검토하였다. 기본구조는 그림1과 같이 3상일괄형으로 하고 도체는 Ag 시스 테이프전체를 나선형으로 감고 임계전류밀도는 직류에서 1X10<sup>-5</sup> A/cm<sup>2</sup>로 가정하고 임계전류가 정격전류의 1.5배 이상으로 하였으며 개념설계조건을 요약하면 표1과 같다.

표1. 주요개념설계조건

항 목	내 용
기본구조	3상일괄형
송전전압	154kV
선재	Ag sheath 테이프 $J_c = 1 \times 10^{-5}$ A/cm <sup>2</sup>
도체설계전류	정격전류x 1.5
내전압레벨 <sup>(1)</sup>	기준충격전압 : 750kV 설계스트레스 55kV/mm
절연	액체질소함침 복합절연 PPLP + LN <sub>2</sub>
단열방식	초열절연방식
냉각거리	2.5km (OF cable 참조) <sup>(6)</sup>
최대온도상승	15K (65K → 80K)
허용압력손실	14atm(20atm→6atm)
단열관로의 최대외경	국내포설관로 기준이하 (200mm $\phi$ ) <sup>(7)</sup>

케이블코아의 나선형 도체는 I/P의 크기를 갖는 축방향자계를 발생하며 쉴드도체와 통전도체에 의해 발생하는 자계의 합  $H_z$ 는 식(6)과 같다.

$$H_z = I_1/P_1 + I_2/P_2 \quad (6)$$

여기서 1은 통전도체, 2는 쉴드도체를 나타내며,  $I$ 는 전류,  $P$ 는 피치를 나타낸다. 식(4)에서  $I_1/P_1 = -I_2/P_2$  이면  $H_z = 0$ 이 되며, 통전도체와 쉴드도체사이의 크기가  $I_2/P_2$ 인 원주상의 자계가 발생하여 나선형의 자계가 형성되어 former에 eddy current를 유기시키며 이는 열발생에 의한 손실을 나타내며 단위면적당의 손실은 식(7)과 같다

$$W = R_s (I_1/P_1 + I_2/P_2)^2 \quad (7)$$

여기서  $R_s = \rho / \delta$  ( $\Omega$ )로서 표면저항을 나타내며  $\rho$ 는 former의 저항율,  $\delta = \sqrt{2\rho/\mu_0\omega}$  로서 skin depth를 나타낸다. 식(4)는 former의 두께  $t \geq \delta$ 이고 도체폭  $\gg \delta$ 일 때 적용되며 만일  $t < \delta$ 이면 단위면적당의 손실은 식(8)과 같다

$$W = \frac{4}{3} \left(\frac{t}{\delta}\right)^3 R_s (I_1/P_1 + I_2/P_2)^2 \quad (8)$$

쉴드도체에 의해 싸여진 코아의 총자계는 쉴드전류와 코아전류에 의한 자계의 합으로 다음식과 같다.

$$\Psi_z = \mu_0 (A_1 I_1/P_1 + A_2 I_2/P_2) = I_1 F_1 + I_2 F_2 \quad (9)$$

여기서  $A = \pi d^2 / 4$ 로 면적을 나타내며  $d$ 는 직경.

$F = \pi\mu_0 d^2 / 4P$ . 그리고 이자속은 원주상의 emf를 유기시켜 금속제 극저온관로에 전류를 흐르게하여 열을 발생시킨다. 따라서 단위길이당의 손실  $W'$ 는 식(10)과 같다.

$$W' = \frac{t}{\pi\rho d^3} - (I_1 F_1 + I_2 F_2)^2 \quad (10)$$

여기서  $\rho$ 는 원통형 극저온관로의 저항율이며,  $d_3$ 는 직경, 도트는 시간함수를 나타낸다. 만일 통전전류와 셸드 전류가 동일하지 않고 반대이면, 셸드의 외부에 방위각을 갖는 자계가 존재하게 되며 이는 극저온관로에 eddy current를 유기시키거나 코아외측의 금속부분에 전류를 흐르게 된다.

### 3. 결 론

그림1에 나타난 케이블의 기본구조를 대상으로 154kV 고온초전도케이블을 개념 설계하였다. 액체질소의 온도와 압력의 조건과 변화에 따라 케이블의 크기와 손실을 계산하여 그 결과를 표2에 나타내었다.

표2. 송전용량별 케이블의 크기

송전용량 (GVA)	케이블외경 (mm)	교류손실 (W/m)
0.5	150	0.2
1	145	0.8
3	180	6
6	220	20

표2에서 알 수 있는 바와같이 현재의 전력계통에 사용 중인 관로의 크기를 기준으로 하여 200mm  $\phi$ 이내에 적용가능한 케이블은 154kV, 3GVA 까지 고려할 수 있으나 0.5GVA는 현재의 케이블로도 가능하기 때문에 1~3GVA급 케이블의 포설이 가능할 것이다.

이후 이에 대한 상세설계를 진행할 계획이며, 빠른 시일 내에 국내에서도 케이블코아 및 단말, 접속부 등 초전도 케이블개발에 필요한 요소기술을 개발하여 고온초전도케이블의 실계통적용과 미래의 전력수요증가에 대비하여야 할 것이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사, 전력연구원 연구보고서 KEPRI-93S-J03, 161, 1995
- [2] International Workshop on High-Tc Superconducting Power Transmission Cables, IEA Workshop, April 1997
- [3] K.Sato, et al., Ext. Abstr. Int. Workshop on Superconductivity, 234, 1995
- [4] T.Hara, et al., "Feasibility study of compact high-Tc superconducting cables", IEEE Tran. on Power Delivery, Vol.7, No.4, 1745, 1992
- [5] 電氣協同研究會, 絶縁設計合理化専門委員會: 絶縁設計の合理化, 電氣協同研究, 第44卷 第3號, 225-258, 1988
- [6] 飯塚喜八郎 電力ケーブル技術ハンドブック, 543, 1989
- [7] 한국전력공사, 지중송전선설계기준-1610, 1997