

초전도 전력케이블 기술개발 현황

조전욱

한국전기연구소 초전도응용연구그룹

1. 서론

초전도기술은 의료, 환경, 물리, 전기, 전자 등 현대사회의 전반에 걸쳐 그 응용이 기대되고 있으며, 더 이상 초전도란 단어도 전문가들만의 용어가 아닌 일반인들도 인식하고 있는 우리생활에 가까이 다가오고 있는 기술이다. 초전도기술의 많은 응용분야 중 전력분야에서의 응용은 전기적인 손실의 획기적인 저감과 고효율 및 환경 친화적인 장점을 갖고 있어 다른 분야보다 실용화에 대한 기대가 매우 크다.

전력응용 분야 중에서도 초전도 전력케이블은 초전도기술의 전력 응용분야 중 가장 기대되는 기술 중 하나로서 다른 초전도기기보다 가장 빠른 시일 내 실계통 적용이 이루어질 것으로 예상되고 있다. 따라서 미국, 일본, 유럽, 중국 등 세계 각국에서 실증시험운전 및 실계통 투입을 위한 준비가 진행되고 있다. 이 글에서는 초전도 전력케이블의 구성에 대해 간략하게 알아보았다.

2. 초전도 케이블 개요

초전도 전력케이블은 R. McFee에 의해 처음 제안되어[1], 이 이후부터 1980년대 초까지 미국, 일본, 유럽 등의 세계 각국에서 초전도 케이블에 대한 많은 연구개발이 진행되었다 [2],[3]. 그 중에서도 미국의 Brookhaven 국립연구소(BNL), 오스트리아의 Gratz 연구소, 일본의 전자기술총합연구소(ETL) 등에서는 실용화에 가까운 수준의 초전도 전력케이블을 개발하였으나 이 시기의 초전도케이블은 Nb, NbTi, Nb₃Sn과 같은 저온 초전도 도체를 사용한 시스템으로서 액체헬륨온도에서 운전되어야 하는 극저온 환경으로 인한 신뢰성 및 경제성의 한계로 실용화가 이루어지지 못하였다. 그러나 1987년 액체질소온도에서 사용가

능한 고온초전도체가 발견되고 1990년 중반 이후부터 실제 전력기에 적용이 가능한 실용성 있는 고온초전도선이 개발되면서 2000년대에 들어선 최근에는 세계적인 케이블 제조업체와 전력회사들이 경쟁적으로 가세하여 고온초전도 전력케이블의 상용화 개발에 박차를 가하고 있다.

고온초전도 전력케이블은 표 1과 같이 기존 케이블의 구리도체 대신 고온초전도 도체를 사용한 저손실·대용량 전력수송이 가능한 전력케이블로서 대도시의 전력공급문제를 해결할 수 있는 환경 친화적 신개념의 전력케이블이다. 또한 종래의 전력케이블에 비해 초전도 케이블은 765kV나 345kV의 초고압이 아닌 154kV 또는 22.9kV의 저전압으로 대용량 송전이 가능하기 때문에 종래 변전소의 고전압송전을 위한 주변기기를 간략화시킬 수 있다.

표1. 기존케이블과 초전도케이블의 비교

항 목	고온초전도 케이블	저온초전도 케이블	OF 케이블	CV 케이블
Former	Flexible Pipe or Spiral Tape	Flexible Pipe or Spiral Tape	Spiral Tape	없음
도체	고온초전도 도체	NbTi, Nb ₃ Sn	구리	구리
도체구조	Tape 형태의 적층	Tape 또는 극세다심연선	원형압축연선	원형압축연선
사용온도	77K (-196°C)	4.2K (-196)	상시최고 90°C	상시최고 90°C
냉매	액체질소	액체헬륨	OF 절연유	없음 (냉각수)
절연	냉매함침 복합절연방식	냉매함침 복합절연방식	OF 절연유함침	XLPE 압축
냉각계통	액체질소순환 및 냉동기부착	액체질소순환 및 냉동기부착	PT 등 유압조절장치	냉각수

초전도 전력케이블은 송전손실이 극히 작고 같은 용량의 구리케이블의 20% 수준의 크기로 송전이 가능하여 추가의 건설공사 없이 이미 설치되어 있는 도심의 전력구(케이블용 지하터널) 또는 관로를 사용할 수 있어 매우 경제적이며 도심의 부지, 전력공급 문제 등을 해결할 수 있다. 고온초전도 전력케이블은 그

림 1과 같이 세부적으로는 former, 초전도도체, 전기절연 등으로 구성된 케이블 코아와 열절연을 위한 cryostat, 등의 부품과 냉각시스템, Termination 등으로 구성되어 있다.

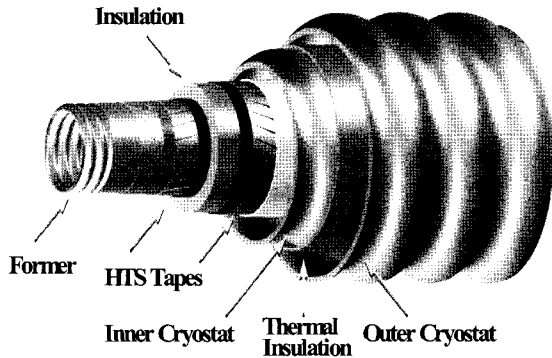


그림 1. 초전도케이블 구조 (단상, 저온절연방식)

2.1 초전도케이블 설계

초전도 전력케이블은 구분하는 기준에 따라 여러 종류로 분류할 수 있다. 전압의 종류에 따라 AC 케이블과 DC 케이블로 구분할 수 있으며, 절연방식에 따라 상온절연형 초전도케이블(WD, Warm Dielectric), 저온절연형 고온초전도케이블(CD, Cold Dielectric)로 구분할 수 있다.

상온절연 고온초전도케이블은 그림 2와 같이 초전도 도체위에 전기절연층이 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 교류자계를 차폐해 극저온관로와 같은 도체 이외의 부분에 있어서의 eddy current loss를 억제하기 위한 고온초전도 (High-Tc Temperature, 이하 HTS) shield층을 설치할 수 없기 때문에 cryostat의 eddy current에 의한 온도상승으로 시스템의 손실이 증가하기 때문에 대용량의 시스템에 적용은 곤란하다. 그러나 저온절연방식 고온초전도케이블은 그림 3과 같이 전기절연층이 극저온관로내에 있는 구조의 케이블로서 고온초전도 도체위에 전기절연층을 놓고 그 위에 다시 HTS shield층을 설치한 케이블코아를 극저온관로내에 설치하는 구조의 초전도케이블로서 shield 도체층의 적용이 가능하여 cryostat에서 eddy current의 발생을

억제할 수 있으며, 특히 배전급 전압에서는 하나의 cryostat에 3상 케이블 코아를 모두 설치할 수 있어 각상 마다 cryostat를 설치하는 상온절연방식과 비교해서 단위길이당의 열절연층의 표면적이 작게 되기 때문에 외부로부터의 침입열이 적고 compact하다는 장점이 있다.

또한 고온초전도 전력케이블의 설계시 AC Loss의 최소화과 도체 사용량의 최소화 등을 위한 설계가 이루어져야 하며 이를 위하여 다층 구조의 초전도도체의 taping pitch를 조절하여 층간의 간의 임피던스를 조절하여야 한다.

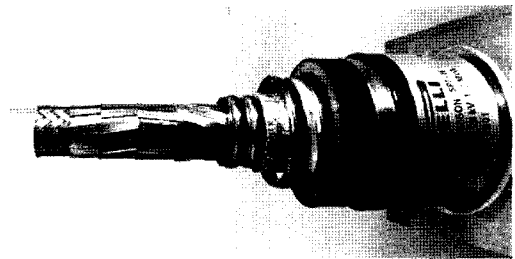


그림 2. 상온절연방식 초전도케이블

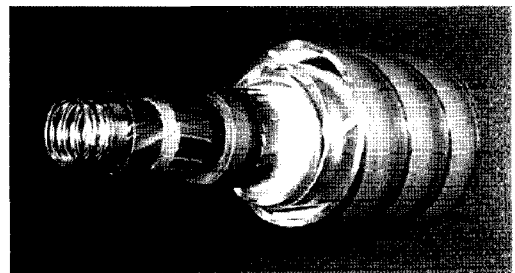


그림 3. 저온절연방식 초전도케이블

2.2 초전도케이블 코아의 구성

초전도케이블 코아는 그림 1과 같이 Former, 통전 및 실드용 초전도도체(저온절연방식), 절연층 등으로 구성된다.

Former는 초전도선을 감기위한 기계적 지지와 액체질소의 경로역할을 하며 케이블의 수송과 포설을 위해 유연한 구조의 스테인레스 스틸 등의 금속재질이 사용된다. 현재 초전도도체는 다심선의 Ag shield/Bi-2223 테이프가 사용되고 있지만, transposition 도체의 적용 등과 같은 AC Loss의 저감을 위한 노력과 함께 경제성 확보를 위하여 2세대 도체인 Coated conductor의 적용을 준비 하고 있다.



그림 4. 국내에서 개발 중인 고온초전도 전력케이블 시스템

초전도케이블에서 신뢰성에 영향을 주는 가장 중요한 부분 중의 하나가 전기절연이다. 전기절연은 초전도케이블의 형태에 따라 PE, XLPE 등의 플라스틱 압출 이용한 상온절연 방식과 Kraft Paper, PP Laminated paper를 이용한 극저온 냉매복합절연의 저온절연방식이 있으나 세계적으로 현재 추진 중인 모든 초전도케이블 프로젝트에서는 저온절연방식을 채택하고 있다.

2.3 초전도케이블 냉각시스템

cryostat는 케이블의 온도유지와 열손실의 저감을 위하여 진공과 MLI를 적용한 Super-insulation 방식이 적용되지만, 케이블이 장거리로 사용되기 때문에 고진공유지를 위한 감시, 제어 등 신뢰성 확보가 필수적이다. a) 3상 초전도 케이블초전도케이블에서 cryostat를 포함한 냉각시스템은 액체질소를 강제 순환시키기 위한 cryocooler, 극저온용 순환 펌프, transfer line, 제어판넬 등으로 구성되며 케이블을 최적 상태에서 운용하기 위하여 액체질소의 온도 및 압력을 적절한 조건으로 순환시키며 또한 열부하변동 등에 대하여 안정적으로 냉각할 수 있고 케이블 상태를 감시 및 자동제어가 가능하며 신뢰성 있는 냉각시스템을 구축하여야 한다.

3. 결 론

초전도 전력케이블은 케이블 코아 및 단말, 초전도도체, 전기절연, 냉각시스템 등이 복합된 첨단 전력기기 이지만 수년 내로 실용화될 전력기기이다. 현재 국내에서 2001년 21C 프론티어 사업의 차세대 초전도 응용기술 개발사업에서 한국전기연구원, 엘지전선(주) 기초과학지원연구원, 한국기계연구원,

전력연구원 등이 공동으로 초전도 전력케이블 개발을 진행하고 있으며, 그림 4는 현재 개발 중인 초전도케이블의 구성 및 설치 사진이다.

현재 세계 각국에서는 케이블 개발뿐만 아니라 조기 상용화를 위하여 장기 평가시험 등 신뢰성 확보에 많은 시간과 노력을 기울이고 있다. 이와 같이 초전도 전력케이블은 먼 미래기술이 아닌 우리 바로 앞에 와 있는 기술로서 우리에게 다가오고 있는 여러 난제들을 해결할 수 있는 기술이다.

참고문헌

- [1] R. McFee, "Superconductivity Cryogenic key to low-loss T&D?", Power Engineering, Vol.65, page 80, October 1961
- [2] E.B.Forsyth, J.A.Williams, "The Technical and Economical Feasibility of Superconducting Power Transmission : A Case study", Trans. on IEEE PAS-94, p161, 1975
- [3] E.B.Forsyth, "The 60Hz performance of superconducting power transmission cables rated for 333 MVA per phase", Trans. on IEEE PAS-103, No. 8, 1984

저자이력



조전욱(趙全旭)

1960년 3월 2일생 1983년 한양대학교 전기 공학과 졸업, 1985년 동 대학원 졸업 (공학석사), 2001년 연세대학교 대학원 졸업 (공학박사), 1984~1990, 엘지전선(주)기술연구소, 1990~현재 한국전기연구원 선임연구원