

### 3상 초전도케이블의 불평형 부하운전시 열·전류 저항에 의한 운전특성연구

이근준\*, 황시돌\*\*, 이현철\*\*\*  
 충북과학대학\*, 한국전력연구원\*\*, (주)그린넷파워\*\*\*

#### A Study on the operational characteristics of Thermal · Current Resistance of 3 phase HTS Cable under Unbalanced load operation

Geun-Joon Lee\*, Si-Dole Hwang\*\*, Hyun-Chul Lee\*\*\*  
 Chungkuk Provinaial University of Science Technology\*, KEPRI\*\*, GreenNetPower\*\*\*

**Abstract** - A high temperature superconducting(HTS) power cable is available for high capacity current in normal condition. But resistance was appeared to operate unbalance load by thermal-current characteristic. This characteristic of HTS power cable used to design for unstated condition. And than, It used to understand and analyze characteristic of power cable thermal and critical current. This study appeared that quench resistance reason from shield and former current rise to superconductor(SC) current. The resistance of SC occurred that the cable temperature rise to fault current after decreased critical current. The quench resistance of SC increased in temperature or decreased in critical current. So the quench resistance of SC correlated with resistance of both shield and former current. It need to sufficiently influenced the parameters of HTS cable design.

그림 1은 초전도케이블의 내부구조이다. 초전도케이블의 인덕턴스는 전송전류를 통과하는 초전도체로 구성된 HTS conductor, 도체를 배열하는 Former, 자기차폐를 하는 HTS return부의 형상 및 각 부를 구성하고 있는 재질에 의해 결정된다. 표 1은 초전도케이블의 규격이다[6].

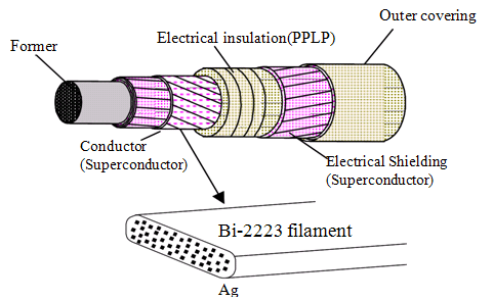
### 1. 서 론

최근 산업의 발달로 전력수요가 비약적으로 증가하였다. 이러한 전력수요를 충족시키기 위한 전력전송용량 또한 대형화 되고 있다. 그러나 증가되는 전력량을 활용할 변전소 및 전력수송설비인 송·배전선로의 신설 또는 증설이 필요하다. 그러나 추가적으로 발생하는 문제점으로 도심의 교통난과 과도한 건설비용 및 환경적 측면의 제약이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 다양한 방안으로 초전도케이블은 다양한 기술력 대안 중에서 친환경, 경제적, 기술적 관점에서 유력한 대안의 하나로서 평가되고 있다 [1]. 대용량의 케이블을 실 계통에 투입하기 전 반드시 사전 시뮬레이션의 해석이 필요하다. 또한, 초전도 케이블은 일반 상도체 케이블과는 달리 정상상태에서는 전기적인 저항이 없어 대용량의 전류를 투입할 수 있지만, 고장상태에서는 고장전류로 인한 퀸치현상으로 저항이 발생하여 전류의 상승을 막는 특성을 가지고 있다[2-5].

본 논문에서는 초전도케이블을 계통적으로 모델링하고, 이를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 불평형상태를 해석하였다[6-7]. 불평형 고장상태의 초전도케이블에 미치는 영향평가로서 1선 지락 고장과 부하의 불평형율(100%, 60%, 30%)을 모의 하였다. 초전도케이블에 고장전류의 유입으로 인한 저항의 발생과 그로인한 퀸치현상 여부를 알아볼 수 있으며, 이는 배전계통 운용기준에 적합한 고장전류 저감대책을 제안한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 초전도케이블의 모형화



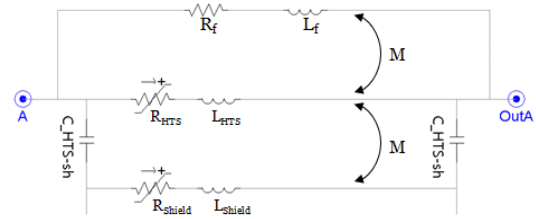
〈그림 1〉 초전도케이블의 내부구조

〈표 1〉 초전도 케이블의 규격

Item	Specification
Former	Stranded copper
Conductor	Bi-2223, 2 layer
Shield layer	Bi-2223, 1 layer
Electrical insulation	PPLP, 4.5 mm
Cable core diameter	35 mm
Superconductor/shield	Bi-2223 tape
Thermal insulation	Double corrugated pipe, MLI, Vacuum
Oversheath	PE
Cable outer diameter	130 mm

#### 2.1.1 초전도 케이블의 등가화

그림 2의 HTS 케이블의 내부모형을 통해 등가화한 것이다. 정상상태의 경우에 전류는 초전도체를 통해 흐르지만, 고장일 경우 초전도체에 저항의 발생으로 인한 퀸치현상이 나타나면, 순간적으로 전류통로가 Former 및 쉬스로 분류된다. 이때 초전도 케이블의 인덕턴스는 이들 각 경우에 따라 달라진다. 그림2는 Bi도체와 Ag 쉴드의 상호인덕턴스(Mutual)의 값을 고려한 SC와 Shield, 그리고 Former를 등가화하여 간략화 하였다.



〈그림 2〉 초전도 케이블의 모형의 등가화

초전도케이블에서 불평형부하로 인한 저항의 변화는 식(1)의 열평형방정식으로 전류와 온도에 대한 식으로 변환하여 온도·전류 저항의 특성을 식(2)로 나타내어 이용하였다[8-9].

$$\int_0^t I^2 \frac{\rho_{cu}}{A_{cu}} dt - h^{LN_2}(T - T_n)p = \int_{T_o}^T (m_{HTS}c_{HTS} + m_{Ag}c_{Ag}) dt \quad (1)$$

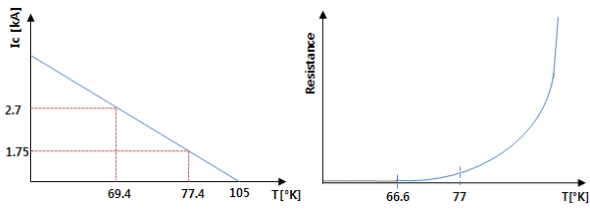
$$\Delta T = \frac{\rho_{cu} I^2 \Delta t}{A_{cu}(m_{HTS}c_{HTS} + m_{Ag}c_{Ag})} - \frac{h^{LN_2}(T - T_n)p}{(m_{HTS}c_{HTS} + m_{Ag}c_{Ag})} \quad (2)$$

식(3)은 실험식으로서 온도변화에 따른 임계전류의 특성이며, 식(4)는 전류의 변화에 따른 케이블의 저항특성을 나타내었다[6-7].

$$I_c = \left( \frac{T_{st} - T}{T_{st} - T_o} \right) \times \sqrt{2} I_{rated} + \sqrt{2} I_{rated} \quad (3)$$

$$r_{quench} = r_c \times \left( \frac{I_{HTS}}{I_c} \right)^{n-1} \quad (4)$$

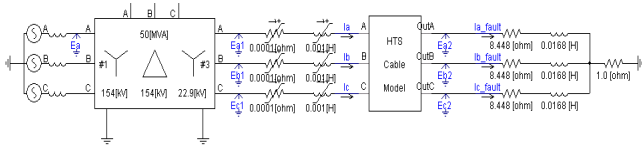
식(1-4)의 전류의 변화에 따른 온도변화와 임계전류의 변화를 통해 초전도케이블의 저항특성곡선을 그림 3과 같이 나타내었다.



(a) 온도 · 임계전류 특성곡선 (b) 온도 · 저항 특성곡선  
 <그림 3> 온도와 전류에 의한 저항특성

## 2.2 시뮬레이션 결과

표 2는 초전도케이블의 사양을 나타낸 것이고, 그림 4는 표 2를 이용하여 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시스템회로를 나타낸 것이다[6].



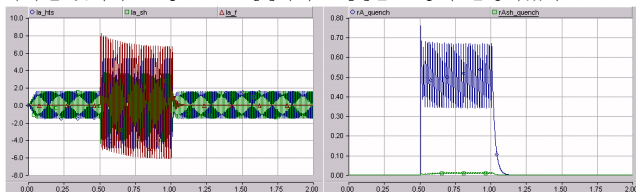
<그림 4> 초전도케이블 시스템의 시뮬레이션 회로

<표 2> 초전도케이블의 사양

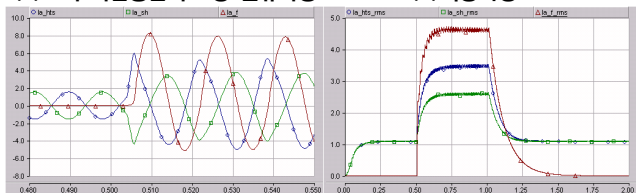
Item	Specification
정격전압	22.9 kV
정격 전류	1,250 A
용량	50 MVA
길이	100 m
케이블 형태	3 cores in one cryostat
유전 형태	Cold dielectric
케이블 크기	Applicable for 175 mm duct

### 2.2.1 1선 지락 고장 모의실험

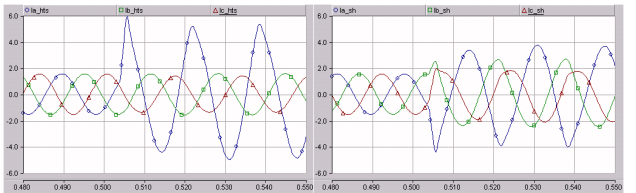
초전도케이블의 A상의 1선 지락에 대한 특성을 그림5에 그 결과를 나타낸 것이다. 고장은 0.504[s]에서 0.5[s]간 고장이 발생하였다.



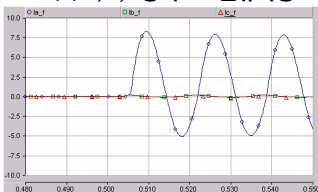
(a)모의 시간동안의 A상 전류파형 (b)저항특성



(c)고장시작점의 A상 전류파형 (d)RMS 전류파형



(e)A,B,C상의 SC전류파형 (f)A,B,C상의 Sh전류파형



(g)A,B,C상의 Former전류파형  
 <그림 5> 1선 지락고장시 전류특성

그림5의 (a)는 1선지락고장에서의 초전도케이블의 A상 전류파형을 나

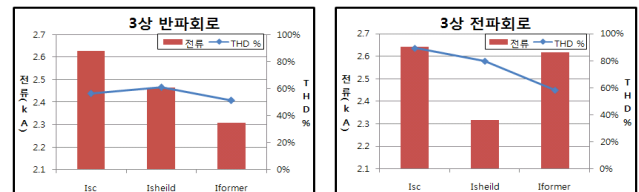
타낸 것이고, (b)는 저항을 나타내었다. (c),(d)의 파형에서 고장전 Former에 전류가 거의 흐르지 않지만, A상의 지락고장시 SC의 전류보다 Former에 큰 전류가 흐르는 것으로 나타난다. 고장시 전류의 크기와 위상의 변화로 (e),(f),(g)는 상의 SC, Sh, Former의 파형을 나타낸 것으로 변화하는 것으로 나타났다.

### 2.2.2 불평형 모의실험

불평형에 대한 모의실험으로 표3은 불평형에서의 고조파왜곡율을 나타낸 것으로 A상의 부하값을 변경하여 모의한 결과 Fomer전류가 미소하게 증가하였다. 그러나 비선형부하(3상 반파, 전파회로)에서는 고조파와 Fomor의 전류가 크게 나타났다.

<표 3> 불평형 모의실험에서의 Former전류

부하	A상의 임피던스 부하			비선형부하	
	Za	0.6Za	0.3Za	3상반파	3상전파
Iformer [kA]	0.01926	0.0407	0.0793	2.0379	2.6166



<그림 6> HTS의 부하 불평형

## 3. 결 론

초전도케이블 시스템에서 켄치현상은 고장전류가 유입되어 발생하는 전류를 저감시키는 작용을 한다. 케이블의 특성곡선에서 산출되는 특성값과 케이블의 온도로 저항이 결정된다. 고장전류는 켄치특성으로 제한되며 켄치시 스위스 및 Former에 전류가 분류된다. 전류의 분류는 초전도체 켄치특성과 은스위스 및 Former의 특성에 상당히 좌우되므로, Former 설계시 켄치특성을 충분히 반영할 필요가 있다. 또한, 불평형 고장에서 안정적인 계통을 운용하기 위해서는 초전도 한류기와 같은 신속한 고장전류 억제 시스템과 기존 시스템 보호기기와의 보호협조가 우선시 되어야 한다고 사료된다.

### 감사의 글

이 연구는 2008년도 산업자원부의 전력산업연구개발사업 전력선행기술에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Ladie Pierluigi, Mansoldo Andea, "HTS Calbe application studies and technical/economical compariesion with conventional technologies", PES-WM, 2002.
- [2] Jeonwook Cho, Ki-Chul Seong, et, el., "A Design and Tests of HTS Power Cables and Feacibility Study of HTS Power Transmission System in Korea", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.10, No.1, pp1150-1153, March 2000
- [3] Jon Jipping, Andrea Mansoldo, "The impact of HTS cables on Power Flow distribution and Short-Circuit currents within a meshed network", IEEE 2001 O-7803-7285-9/01.
- [4] Diego Politano, Marten Sjostrom, Gilbert Schnyder and Jakob Rhyner, "Technical and Economical Assessment of HTS Cables", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp1150-1153, 2477-2480, March 2001.
- [5] K. C. Seong, S. B. Choi, J. W. Cho, et. el., "A Study on the Application Effects of HTS Power Cable in Seoul", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp2367-2370, March 2001.
- [6] "초전도케이블 전력계통 적용 기반기술 연구", 최종보고서, 산업자원부, 2006. 7.
- [7] "22.9kV 중성점 다중접지계통에 CD형 초전도케이블을 적용한 경우의 지락전류변화", 이종매, 황시돌, 손승호, 이근준, Trans. KIEE. Vol. 56, No. 6, JUNE, 2007.
- [8] A.L. Rakhmanov, V.S. Vysotsky, Yu.A.Ilyin, T.Kiss, M.Takeo, "Universal scaling law for quench development in HTSC devices", Cryogenics, Vol.40, N.1, pp.19-27, 2000.
- [9] 현옥배, 황시돌, 김태림, 최효상, "초전도 사고전류 제한 기술 개발", 전력연구원, 2002.