# 22.9kV/50MVA급 고온초전도 전력케이블의 DC Ic 측정 및 교류손실에 관한 연구

**최석진***, 이상진*, 심기덕**, 조전욱**
위덕대*, 한국전기연구원**

# The study on the DC Ic measurement and AC loss in the 22.9kV, 50MVA HTS power cable

**Sukjin Choi***, Sangjin Lee*, kideok Sim**, Jeonwook Cho**
Uiduk Univ*, Electrotechnology Research Institute**

**Abstract** - 22.9kV 50MVA HTS power cable has been developed and tested by Korea Electrotechnology Research Institute and LS Cable Company and it was supported by a grant from Center for Applied Superconductivity Technology of the 21st Century Frontier R&D Program. In this paper, DC Ic of 100m HTS cable which is installed at Kochang testing station was measured and analyzed. A measurement technique of DC Ic used by resistance and inductance removal method is established. The HTS power cable is composed of 2 layers for transmission and 1 layer for shield. For the analysis of AC losses in an HTS power cable, 2-dimensional numerical calculation was carried out to define the magnetic field distribution. We calculated the magnetization losses in the HTS core of that cable from these fields. These calculated results are in accordance with those of experiment.

## 1. 서 론

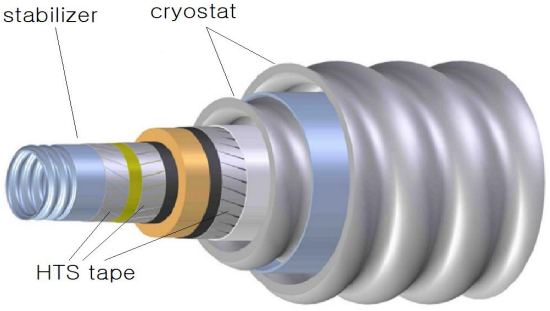
고온초전도 전력케이블은 기존 케이블의 구리 도체 대신 고온초전도 도체를 사용하여 전기저항이 없어지는 초전도현상을 이용하여 저손실·대용량 전력수송이 가능한 전력케이블로서 대도시의 전력공급 문제를 해결할 수 있는 환경친화적 신개념의 전력케이블이다. 미국, 유럽 및 일본에서는 초전도 케이블을 개발하여 시험 중이며, 우리나라에서도 21세기 프론티어 사업의 일환으로 22.9kV급 고온 초전도 케이블을 한국전기연구원과 LS 전선(주)이 공동으로 개발중에 있으며, 현재 고창에 있는 한전실증시험장에서 100m의 22.9kV, 50MVA급 초전도 전력케이블을 설치하고 시험 운전중에 있다. 초전도 케이블의 개발 및 실제 계통에 적용을 위해서는 임계전류특성, 교류 손실, 냉각시스템, 절연시험 등 여러 가지 시험을 거쳐야 한다[1].

본 논문에서는 고창에 설치된 100m급 케이블의 DC Ic를 현장에서 측정하고 획득된 데이터를 분석하였다. 또한, 고온 초전도 케이블을 설계한 내용을 바탕으로 22.9kV/50MVA급 고온 초전도 케이블에 발생하는 교류손실을 계산하였다. 이 계산된 결과와 실험 결과를 비교함으로써 교류손실 계산에 대한 신뢰성을 검증하고, 고온 초전도 케이블의 교류손실에 대한 계산방법을 확립고자 하였다.

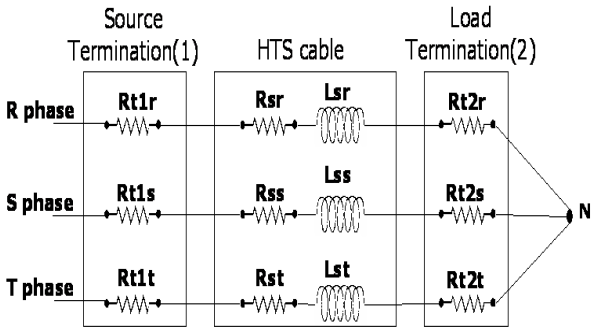
## 2. 본 론

### 2.1 DC Ic 측정

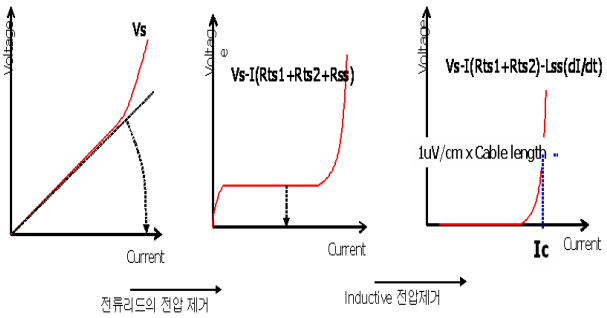
초전도전력케이블 시스템은 일반적으로 다음과 같은 구조를 가지게 된다. 먼저 여러 층으로 이루어진 전력 전송을 위한 초전도코어, 사고 발생시 전송전류를 바이패스 시키는 stabilizer 그리고 최외각의 질소 및 진공을 위한 2층의 cryostat으로 이루어진다. 초전도 케이블 시스템의 형상은 <그림 1>에 나타나 있다.




<그림 1> 초전도 케이블 시스템 형상

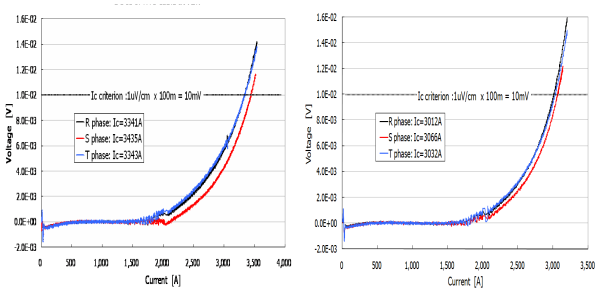



<그림 2> 100m급 케이블의 등가회로도




<그림 3> 측정 data의 후처리과정

<그림 2>는 100m급 케이블의 등가회로도를 나타낸다. 실험방법은 2개의 상을 서로 직렬로 연결하여 전류를 통전한다. 전류는 초당 100A정도로 선형 증가시키며, power supply의 구성상 2000A근처까지 하나의 power supply로 전류를 인가하고 전류 hold 상태에서 다른 하나의 power supply를 사용하여 추가의 전류를 공급한다. SCXI를 사용하여 전압을 측정하고 측정된 전압에서 전류리드의 저항부분, 인덕턴스 부분을 제거하여 순수한 V-I 곡선을 얻는다. V-I 곡선에서 케이블 길이를 고려하여 기준(1uV/cm)에 따라 Ic를 계산하며, 케이블 온도 72K와 75K에 대해 반복하여 Ic를 측정한다. <그림 3>은 측정된 데이터의 후처리 과정을 나타내며, <그림 3>의 과정을 거쳐 V-I곡선을 얻게 된다.

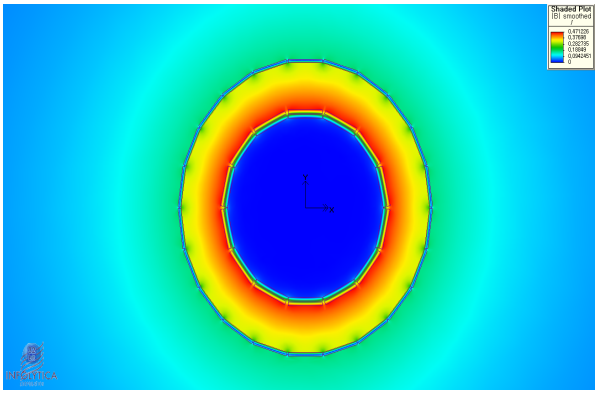



(a) (b)

<그림 4> DC Ic 측정 결과 (a) 72K일 때 (b) 74K일 때

〈표 1〉 DC Ic 측정 결과

| | | DC 임계전류 (Ic) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 설계 @ 75K | 측정결과 | |
| | | | 72K | 75K |
| 케이블 | Phase R | 3 kA | 3.34 kA | 3.01 kA |
| | Phase S | 3 kA | 3.43 kA | 3.06 kA |
| | Phase T | 3 kA | 3.34kA | 3.03 kA |



〈그림 5〉 고온 초전도 전력케이블의 자장 분포

〈그림 4〉는 실험결과를 나타내며, <표 1>은 실험결과를 정리한 내용이다. <표 1>에서와 같이 고창케이블의 DC Ic는 설계치 3000A @75K을 만족하였다. 본 실험과 분석을 통해 실제 케이블에서의 DC Ic를 측정하는 기법(저항제거, Inductive성분 제거등)을 확립하였다.

### 2.2 고온 초전도 전력케이블의 교류 손실

#### 2.2.1 전자장 해석 및 교류 손실 계산

고온초전도 전력케이블은 전력의 전송을 위한 2층의 통전층과 자장차폐를 위한 1층의 차폐층으로 구성되며, 한국전기연구원에서 개발중인 22.9 kV급 고온초전도 전력케이블의 통전전류와 차폐전류는 모두 1260 Arms이다. 각 도체에 동일한 전류가 흐른다고 가정할 때, 통전층과 차폐층의 도체 한 개에 흐르는 전류는 각각 45 Arms, 57.27 Arms가 된다[2]. <그림 5>는 고온초전도 전력케이블의 자장분포이다. 고온 초전도 선재를 이용하여 제작한 권선을 초전도 케이블에 설치하였을 때 초전도 권선에 흐르는 전류에 의해 발생되는 자장은 권선 내 각각의 선재에 외부 인가 자장으로 작용하여 초전도 선재의 교류손실을 발생시킨다. 전자장 해석결과와 다음과 같은 식을 사용하여 교류손실 값을 계산하였으며, 그 결과는 <표 2>에 나타내었다[3].

$$Q_{tot} = \frac{2B_p^2}{3\mu_0}(i^3 + 3\beta^2 i) \qquad \text{for } \beta < i \qquad (1)$$

$$= \frac{B_p^2}{3\mu_0}((i+\beta)^3 + (i-\beta)^3)$$

$$\text{if } \beta = 0, \rightarrow B_i = 0 \qquad = \frac{2B_p^2}{3\mu_0} i^3$$

$$Q_{tot} = \frac{2B_p^2}{3\mu_0}(i^3 + 3\beta^2 i) \qquad \text{for } i < \beta < 1 \qquad (2)$$

$$= \frac{B_p^2}{3\mu_0}((\beta+i)^3 + (\beta-i)^3)$$

$$\text{if } i = 0, \rightarrow I_t = 0$$

$$= \frac{2B_p^2}{3\mu_0}\beta^3 = \frac{2B_i^2}{3\mu_0}\beta$$

$$Q_{tot} = \frac{2B_p^2}{3\mu_0}(\beta(3+i^2) - 2(1-i^3) + 6i^2\frac{(1-i)^2}{(\beta-i)} - 4i^2\frac{(1-i)^3}{(\beta-i)^2}) \qquad (3)$$

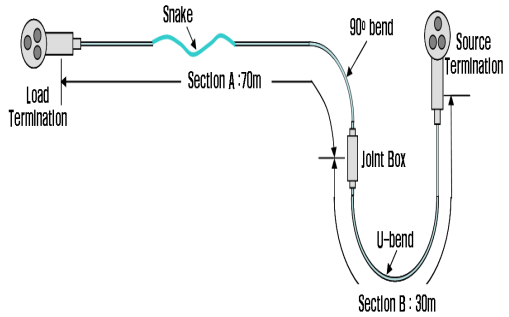
$$\text{for } \beta > 1$$

$$\text{if } i = 0, \rightarrow I_t = 0$$

$$= \frac{2B_p^2}{3\mu_0}(3\beta - 2) = \frac{2B_i^2}{\mu_0}(\frac{1}{\beta} - \frac{2}{3\beta^3})$$

〈표 2〉 고온초전도 전력케이블의 교류손실 계산

| layer | 교류손실[W/m] |
|---|---|
| 통전 1층 | 0.253 |
| 통전 2층 | 0.395 |
| 실드층 | 0.161 |
| 총 자화손실 | 0.809 |




〈그림 6〉 100m 고온 초전도 케이블의 개략도

〈표 3〉 교류손실 계산 결과와 측정결과의 비교

| Section of HTS cable | Expectation | | Measurement | |
|---|---|---|---|---|
| | AC loss | | AC loss | |
| | Total [W] | W/m/ phase | Total [W] | W/m/ phase |
| A:70m | 169.9 | 0.809 | 255.2 | 1.21 |
| B:30m | 72.8 | 0.809 | 113.2 | 1.25 |

여기에서 $I_c$ 는 케이블의 임계전류, $I_t$ 는 케이블의 임계전류, $i = I_t/I_c$, $t$는 초전도 선재의 두께, $a = t/2$, $B_p = \mu_0 J_c a$, $\beta = B_i/B_p$ 이다.

#### 2.2.2 교류 손실 측정

계산된 교류손실 결과와 실제 교류손실 결과를 비교하기 위하여 한국전기연구원에서 개발하여 고창에 설치된 22.9 kV급 100m 고온초전도 전력케이블의 교류 손실을 측정하였다. 열량법을 사용하여 고온 초전도 케이블의 교류손실을 측정하였으며, 고온 초전도 케이블의 시스템의 개략도는 <그림 6>과 같고, 교류손실 측정결과와 계산결과의 비교는 <표 3>과 같다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 고창에 설치된 100m급 케이블의 DC Ic를 현장에서 측정하고 획득된 데이터를 분석하였다. 그리고, 고온 초전도 케이블의 설계 내용을 바탕으로 22.9kV/50MVA급 고온 초전도 케이블에 발생하는 교류손실을 계산하고, 그 결과를 측정결과와 비교하였다. 계산 결과보다 실험결과가 높게 나왔으며, 그 이유는 초전도 케이블을 설치하는 중 기계적인 케이블의 이동과 손실 계산 중 수직자장을 고려하지 않았기 때문이라고 추측된다.


**감사의 글**

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.


## [참 고 문 헌]


[1] 김해준 외. "고온 초전도 케이블의 굽힘 직경에 따른 임계전류 저하 특성", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.

[2] J.W.Cho, et al., "A Design and Test of HTS Power Cables and Feasibility Study of HTS Power Transmission System in KOREA," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 10, pp 1150 - 1153, 2000.

[3] M. Wilson, Superconducting Magnet, Clarendon Press, New York, 1983