

## 불확도를 고려한 22.9kV, 50MVA급 초전도 전력케이블의 직류 임계전류 측정방법에 관한 연구

### A Study on the DC Critical Current Test Method for 22.9kV/50MVA Superconducting Power Cable Considering the Uncertainty

최석진<sup>1</sup>, 이상진<sup>2\*</sup>, 심기덕<sup>3</sup>, 조전욱<sup>3</sup>, 이수길<sup>4</sup>, 양병모<sup>5</sup>, 고태국<sup>1</sup>

S.J. Choi<sup>1</sup>, S.J. Lee<sup>2\*</sup>, K.D. Sim<sup>3</sup>, J.W. Cho<sup>3</sup>, S.K. Lee<sup>4</sup>, B.M. Yang<sup>5</sup>, T.K. Ko<sup>1</sup>

**Abstract:** A 3-phase 100m long, 22.9kV class HTS power transmission cable system was developed by Korea Electrotechnology Research Institute (KERI) and LS cable Ltd. those are participated in the 21st Century Frontier project R&D Program of Korea. It is important to test the DC critical current related with its power capacity before applying to the real power grid. In 1995, several international standards organizations including International Electrotechnical Commission (IEC), decided to unify the use of statistical terms related with 'accuracy' or 'precision' in their standards. It was decided to use the word 'uncertainty' for all quantitative (associated with a number) statistical expressions. In this paper, we measured DC critical current of 22.9kV/50MVA superconducting power cable with several voltage tap and analyzed the uncertainty with these results.

**Key Words:** DC critical current, Superconducting power cable, Uncertainty.

#### 1. 서 론

산업문명의 고도화와 에너지 사용에 따른 환경오염 문제로 기존의 전력케이블의 한계를 극복할 수 있는 기술에 대한 요구가 증대되면서, 고온 초전도 케이블의 개발이 긴급히 요구되는 실정이다. 세계 각국에서 고온 초전도 케이블에 대한 연구가 진행되면서, 현재 개발완료 단계 및 실증 시험 단계이다[1].

초전도 전력케이블은 기존 전력케이블과 구조, 부대설비, 전기적·기계적 특성이 매우 상이하다. 따라서, 초전도 전력케이블이 기존 전력케이블을 대체하기 위해서는 기존의 전력케이블의 특성 시험과 더불어 초전도 전력케이블만의 특성 시험도 병행하여야 한다. 기존의 전력케이블과 다른 초전도 전력케이블만의 특성

시험으로는 교류 손실 측정 시험, 사고 전류 시험, 냉각 특성 시험, 직류 임계전류 측정 시험 등이 있다[2]. 본 논문에서는 초전도 전력케이블의 성능 평가에 매우 중요한 시험 중 하나인 직류 임계전류 측정 시험을 다루었다. 초전도 전력케이블에 여러 가지 방법으로 전압탭을 설치하여 직류 임계전류를 측정하고 비교하였다. 측정결과와 신뢰성을 나타내기 위하여 지금까지는 오차, 정확도, 정밀도, 불확도 등의 여러 가지 용어들이 사용되어 왔으나, 분야에 따라 표현방법이 달라서 통일된 지침이 필요하게 되었고, 국제 표준화 기구들은 통계 용어의 사용을 통일하기로 결정하였다. 불확도는 측정에서 발생하는 측정 오차의 일부분으로, 그 크기는 측정의 도량학적 품질에 대한 척도라고 할 수 있다. 본 논문에서는 초전도 전력케이블에 대하여 직류 임계전류를 측정하고 그 결과를 이용하여 불확도를 산출하였으며, 이러한 불확도 산출을 이용하면 측정결과에 대한 신뢰성을 판단할 수 있다[3].

#### 2. 본 론

##### 2.1. 초전도 케이블의 직류 임계전류 산정 방법

초전도 전력케이블 시스템은 일반적으로 여러 층으로 이루어진 전력 전송을 위한 초전도코어, 사고 발생 시 전송전류를 우회(bypass) 시키는 안전화 도체층(stabilizer), 그리고 최외각의 절소 및 진공을 위한 2층의 저온용기(cryostat) 등으로 이루어진다. 실험에 사용된 초전도 전력케이블은 코어가 80개의 초전도선으로 이루어져 있으며, 길이가 2m이고, 구리로 된 전류접촉 블록을 통하여 전류를 통전하게 된다.

초전도 전력케이블의 직류 임계전류는 직류 전류가 초전도 전력케이블에 흐르는 상태에서 초전도 전력케이블의 일정 길이에서 발생한 전압(V)을 측정함으로써 결정한다.

초전도 전력케이블에서 직류 임계전류를 측정할 때 나타나는 전압은 초전도 선재의 저항에 의한 전압 이외에도 전류 도입선에서의 저항 성분과 전류 도입선 및 전력케이블의 유도 성분에 의한 전압을 포함한다. 따라서 초전도 전력케이블 시스템의 전압을 측정하면 그림 1과 같이 임계전류의 70% 이하에서 전류에 따라 선형적으로 증가하는 곡선을 얻게 된다. 이렇게 선형적으로 증가하는 곡선에서 식 (1)과 같이 전류 도입선의 저항 성분에 의한 전압과 전력케이블의 유도 성분에 의한 전압을 제거하면 그림 2와 같이 순수하게 초전도 전력케이블의 저항 성분에 의한 전압 곡선을 얻을 수 있다.

$$V = V_s - I \times (R_{cl}) - L \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

<sup>1</sup>정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과  
<sup>2</sup>정 회 원 : 위덕대학교 에너지전기공학부  
<sup>3</sup>정 회 원 : 한국전기연구원  
<sup>4</sup>정 회 원 : LS전선(주)  
<sup>5</sup>정 회 원 : 한전 전력연구원  
\*교신저자 : sjlee@uu.ac.kr  
원고접수 : 2009년 07월 20일  
심사완료 : 2009년 08월 28일  
게재확정 : 2009년 08월 28일

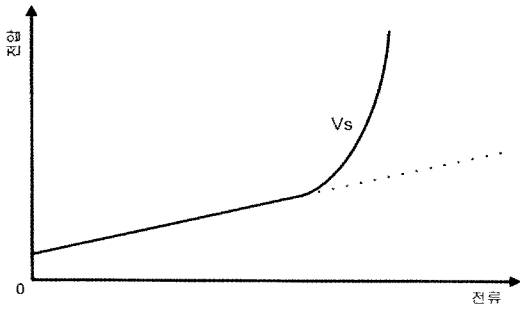


Fig. 1. Measured I-V curves of a superconducting power cable.

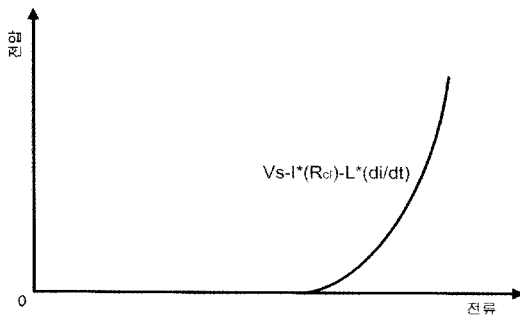


Fig. 2. After removal of the inductive component by the cables and the voltage due to the current leads from the measured I-V curves.

여기에서,  $V$  : 순수 전압,  $V_s$  : 측정된 전압,  $R_{ci}$  : 전류 도입선에서의 저항,  $L$  : 초전도 전력케이블의 인덕턴스,  $I$  : 초전도 전력케이블에 흐르는 전류이다. 그림 2의 곡선에서 기준( $1 \mu W/cm$ )을 적용하여 직류 임계전류를 산정하게 된다.

### 2.2. 전압탭의 방법에 따른 직류 임계전류 측정

초전도 전력케이블에 그림 3과 같이 여러 가지 방법으로 전압탭을 설치하였다. 초전도선에 직접 전압탭을 설치한 경우(실험 1), 구리 접촉블록에 원형으로 전압탭을 설치한 경우(실험 2), 그리고 구리 접촉블록에 점접촉으로 전압탭을 설치한 경우(실험 3) 등 세 가지 방법으로 전압탭을 설치하였다. 이렇게 설치한 전압탭을 이용하여 초전도 전력케이블의 직류 임계전류를 측정하였다. 측정시 전류 증가는 초당 300A, 600A, 1000A로 하였으며, 각 전압탭의 설치 방법에 따라 총 10회씩 측정하였고, 측정결과는 다음 표 1, 표 2 및 표 3과 같다.

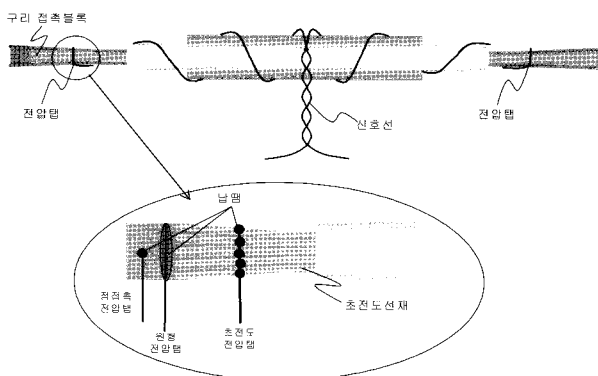


Fig. 3. Installation method of the several voltage tap.

Table 1. Experiment 1 (installation the voltage tap to the superconducting wire).

실험 회수	300A/sec	600A/sec	1000A/sec
1	9161.08	9190.89	9156.5
2	9183.09	9147.33	9131.27
3	9222.07	9126.23	9123.48
4	9167.5	9159.25	9049.65
5	9106.97	9122.1	9138.15
6	9225.74	9210.61	9167.04
7	9188.14	9173.46	9124.85
8	9116.6	9114.31	9096.88
9	9147.78		9128.06
10	9219.78	9135.4	9110.64

Table 2. Experiment 2 (installation the round-type voltage tap to current block).

실험 회수	300A/sec	600A/sec	1000A/sec
1	9152.37	9170.25	9201.44
2	9159.25	9191.35	9184.93
3	9124.4	9218.4	9236.75
4	9178.51	9249.13	9192.72
5	9214.74	9194.1	9208.77
6	9148.7	9232.62	9214.74
7	9139.99	9215.19	9230.79
8	9128.52	9168.42	9208.77
9	9195.93	9183.55	9238.12
10	9135.86	9229.41	9210.61

Table 3. Experiment 3 (installation the point-type voltage tap to current block).

실험 회수	300A/sec	600A/sec	1000A/sec
1	9070.74	9160.17	9210.15
2	9184.47	9166.13	9131.73
3	9151.45	9186.3	9167.5
4	9086.33	9186.76	9182.18
5	9223.91	9197.77	9173.46
6	9137.70	9184.47	9197.31
7	9211.07	9188.14	9186.3
8	9142.74	9153.75	9152.83
9		9098.72	9193.64
10		9216.57	9184.01

### 2.3. 불확도 산출

측정결과의 불확도는 측정량의 값을 정확하게 알 수 없다는 사실을 반영하고 있다. 측정결과는 이미 알고 있는 계통효과를 적절하게 보정하여도 역시 추정값에 불과하다. 반복성 조건을 유지하면서 측정하여 얻은 데이터의 모평균에서 측정량의 참값을 뺀 값이 계통오차이며, 이러한 계통오차를 일으키는 정량화된 효과를 계통효과라 한다. 계통효과에 대한 완전한 보정이 불가능하고 우연효과가 있기 때문에 측정결과에는 항상 불확도가 존재하기 때문이다. 불확도의 요인은 다음과 같다.

- 측정량에 대한 불완전한 정의
- 측정량의 정의에 대한 불완전한 실현
- 대표성이 없는 표본추출
- 측정 환경의 효과에 대한 지식 부족 및 환경 조건에 대한 불완전한 측정
- 기기의 분해능과 검출 한계

Table 4. Measurement data.

실험 회수	측정 저항( $\Omega$ )
1	1.08679E-10
2	1.08874E-10
3	1.08263E-10
4	1.08782E-10
5	1.08592E-10
6	1.08522E-10
7	1.08333E-10
8	1.08592E-10
9	1.08247E-10
10	1.0857E-10

새로운 측정불확도 표현 지침서(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)에 의한 불확도 표현 방법은 불확도 성분의 분류와 합성에 있어 기존의 방법과는 많은 차이를 나타내고 있다. 불확도 성분의 분류방법을 보면 과거에는 그 발생 요인에 따라 각각 우연오차와 계통오차로 분류하였으나, 새로운 방법에서는 평가방법에 따라 A형 불확도와 B형 불확도로 분류한다. A형 불확도는 일반적으로 정규 분포 형태로 표현되는 실험실에서 반복된 측정값을 의미하며, B형 불확도는 균일 분포 형태로 제공되던 이전의 실험, 문헌 데이터 등이다[4,5].

2.3.1. 측정값

불확도 산출 방법에 대한 제시를 위하여, 전류 접촉 블록에 원형으로 전압탭을 설치하고 1000A/sec으로 전류를 인가한 실험 결과에 대해서 불확도를 산출하여 보았다.

측정되는 전압이 1 $\mu$ V일 때의 전류를 임계전류로 산정하였으므로, 저항 측정값을 계산하면 표 4와 같다.

2.3.2. 측정 모델

측정의 수학적 모델은 식 (2)와 같다.

$$I=f(X_1, X_2)=f(V, R)=\frac{V}{R} \quad (2)$$

이 식에서 I는 측정하고자 하는 전류, V는 측정되는 전압, R은 저항이다.

2.3.3. 불확도 산출 수식

입력량들 간의 상관 관계가 없으므로, 식 (3)이 된다.

$$u_c(I)=\sqrt{\sum_{i=1}^N(\frac{\partial f}{\partial x_i})^2 u^2(x_i)}=(\frac{\partial I}{\partial V})^2 u^2(V)+(\frac{\partial I}{\partial R})^2 u^2(R) \quad (3)$$

이 식에서  $u_c(I)$ 는 합성표준불확도이며,  $u(V)$ 는 전압에 대한 불확도,  $u(R)$ 은 저항에 대한 불확도를 의미한다. 또한 감도 계수를 구하여 보면 식 (4),(5)와 같이 된다.

$$c_1 \equiv \frac{\partial I}{\partial V} = \frac{1}{R} = 9.21 \times 10^9 (\Omega^{-1}) \quad (4)$$

$$c_2 \equiv \frac{\partial I}{\partial R} = -\frac{V}{R^2} = -8.48 \times 10^{13} (V\Omega^{-2}) \quad (5)$$

2.3.4. 불확도 성분의 분석

2.3.4.1. 전압에 대한 불확도 평가

전압계의 측정 범위는 5mV이며, 분해능은 2<sup>16</sup>이고, percent of reading은 0.2478%이다.

$$a = \frac{5 \text{ mV} \times 0.2478 \times 10^{-2}}{2^{16} \times 2} = 9.452 \times 10^{-11} \quad (6)$$

이고, 직사각형 분포로 가정하면, 전압계의 분해능에 대한 표준불확도는 식 (7)과 같다.

$$u(V) = \frac{a}{\sqrt{3}} = 5.45 \times 10^{-11} \quad (7)$$

2.3.4.2. 저항에 대한 불확도 평가

반복관측으로부터 얻어진 표준불확도를 구하면, 다음과 같이 계산되어 진다.

$$\text{평균값} : \bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n R_k = 1.08 \times 10^{-10} \quad (8)$$

실험표준편차 :

$$s(R_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (R_k - \bar{R})^2} = 2.11 \times 10^{-13} \quad (9)$$

$$\text{평균 표준편차} : s(\bar{R}) = \frac{s(R_i)}{\sqrt{n}} = 6.67 \times 10^{-14} \quad (10)$$

반복 관측에 의한 저항의 표준불확도 :

$$u(\bar{R}) = s(\bar{R}) = 6.67 \times 10^{-14} \quad (11)$$

$$\text{자유도} : \nu_1 = n - 1 = 9 \quad (12)$$

2.3.5. 전류 계산

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1 \times 10^{-6}}{1.08 \times 10^{-10}} = 9212.73 (A) \quad (13)$$

2.3.6. 합성표준불확도

측정결과가 여러 개의 다른 입력량으로부터 구해질 때 이 측정결과의 표준불확도를 합성표준불확도라 한다. 합성표준불확도는 각 입력량의 변화가 측정결과에 미치는 영향에 따라 가중된 분산과 공분산의 합의 양의 제곱근과 같으며, 입력 함수의 불확도를 합성하여 합성표준불확도를 구하게 된다.

측정결과의 합성표준불확도를 구하면 식 (14)와 같다.

$$u_c(I) = \sqrt{(c_1^2 \times u^2(V) + c_2^2 \times u^2(R))} \\ = [(9.21 \times 10^9)^2 \times (5.45 \times 10^{-11})^2 + (-8.48 \times 10^{13})^2 + (6.67 \times 10^{-14})^2]^{\frac{1}{2}} \\ = 5.686 (A) \quad (14)$$

2.3.7. 확장불확도

측정량의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정결과 주위의 어떤 구간을 정의하는 양을 확장불확도라 한다. 확장불확도는 불확도의 추가적인 척도이며, 합성표준불확도에 포함인자 k를 곱하여 결정된다. 확장불확도를 계산하는 경우 한국표준과학연구원에서는 요구조건이 설정되어 있지 않거나, 문서화되어 있지 않은 경우에는 포함인자 k값으로 2를 권장하고 있다. k=2라고 가정하면, 확장불확도는 식 (15)와 같이 된다.

$$U = k u_c(I) = 2 \times 5.686 = 11.37 \quad (15)$$

따라서, 전류 접촉블록에 원형으로 전압탭을 설치하고 1000A/sec으로 전류를 인가한 실험결과는 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$I = 9212.73 \pm 11.37 (A) \quad (16)$$

Table 5. Uncertainty Calculation of experiment results.

비고	300A/sec		600A/sec		1000A/sec	
	평균	확장불확도	평균	확장불확도	평균	확장불확도
실험 1	9173.69	26.75	9153.18	21.99	9122.54	20.74
실험 2	9157.73	18.85	9205.16	17.53	9212.73	11.37
실험 3	9150.76	42.40	9173.77	20.46	9177.85	14.47

2.4. 실험결과에 대한 불확도 산출

각 실험결과에 대해, 앞에서 제시한 불확도 산출 방법을 사용하여 불확도를 계산하였고, 그 결과는 표 5와 같다. 전압탭의 연결 방법에 따라 비교할 때, 구리 접촉블록에 원형으로 전압탭을 설치한 경우가 다른 경우보다 확장불확도가 가장 작았다. 확장불확도는 신뢰도에 따른 분포구간으로, 확장불확도가 가장 작다는 것은 재현성이 더 좋다는 것을 의미할 수 있다. 전류 증가율에 따라서는 초당 1000A로 전류를 증가시킬 때 가장 표준편차가 작아졌으며, 전원의 한계 때문에 더 이상의 상한은 확인하지 못하였다.

3. 결 론

여러 가지 전압탭의 연결 방법과 전류 증가율을 바꿔가며 초전도 전력케이블의 직류 임계전류를 측정하였다. 전압탭은 초전도선에 직접 전압탭을 설치한 경우, 구리 접촉블록에 원형으로 전압탭을 설치한 경우, 그리고 구리 접촉블록에 점 접촉으로 전압탭을 설치한 경우 총 세 가지 방법으로 전압탭을 설치하였다. 실험 결과의 분석을 위해 불확도의 개념 및 불확도 산출방법에 대해 제시하였고, 불확도 산출을 통하여 측정 결과에 대한 신뢰성 있는 추정값 및 척도를 표현할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 성기철 외, "배전급 초전도 전력케이블 개발", 차세대 초전도 응용기술개발 사업단 연차보고서, 2002.  
 [2] M.Nassi, "HTS Prototype for Power Transmission Cable : recent result and future programmes", Sci. & Technol., Vol. 13, pp. 460-463, 2000.  
 [3] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC and OIML, International vocabulary of basic and general terms in metrology, 1993.  
 [4] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC and OIML, Guide to the expression of uncertainty in measurement, 1995.  
 [5] 한국표준과학연구원, "측정불확도 표현 지침", 1999.

저 자 소 개



**최석진(崔錫鎭)**  
 1974년 6월 10일생, 1998년 연세대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정.



**이상진(李相鎭)**  
 1962년 3월 3일생, 1988년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수.



**심기덕(沈基德)**  
 1973년 2월 1일생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원.



**조전욱(趙全旭)**  
 1960년 3월 2일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구센터 책임연구원.



**이수길(李秀吉)**  
 1970년 2월 2일 생, 1992년 광운대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 공학박사 수료, 1996년~ 현재 LS전선(주) 중앙연구소 수석연구원.



**양병모(梁炳模)**  
 1969년 4월 24일생, 1995년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



**고태국(高太國)**  
 1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 석사 졸업(M.Sc), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 박사 졸업(Ph. D), 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수.