

고온 초전도 케이블 시스템 시험 및 평가 기준(안)

최형식, 황시돌, 손승호, 임지현
한국전력공사 전력연구원

The Standard of test and evaluation for HTS cable system

Choi Hyungsik, Hwang Sidole, Sohn Songho, Lim Jihyun
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - Based on the real field test of 22.9kV HTS cable, which is installed in Gochang Power Testing Center located in Chonbuk Province, the standard for the performance test and the quality evaluation have been established. This work will be applied to the development of HTS cable and the purchase process as a practical material. In particular, new items for the cable evaluation such as the measurement of critical current and the heat loss, which was not dealt with in conventional cable, are specified in detail.

시험환경을 특별히 주문하는 경우를 제외하고는 초전도체가 액체질소 안에서 초전도현상을 시험하도록 규정한 환경 속에 초전도 케이블이 놓여 있어야 한다.

1. 서 론

주지하는 바와 같이 2005. 7월부터 2006. 5월 현재까지 전북 고창 전력시험장 내에 22.9kV급 고온 초전도 케이블을 설치하여 시험 운전 중에 있는 바, 우리 연구진은 이 귀중한 경험이 향후 초전도 분야 발전에 밑거름이 될 수 있도록 하기 위하여 모든 데이터를 정리하고 있는 중이다. 위 데이터를 종합하여 발표하기 전에 우선 타 연구기관이나 기업들이 연구 확대 또는 실계통 적용을 위하여 이를 제작하거나 구매할 경우에 준용할 수 있는 초전도케이블 시험 및 평가기준을 제시함이 큰 의미가 있을 것으로 사료된다.

2.4 시험종류별 시험방법

중요한 사항만 밝혀하여 설명한다.

2.4.1 공장 검수 시험

2.4.1.1 일반시험 (설명 생략)

2.4.1.2 시험편(샘플) 시험 (중요사항 발췌)

2.4.1.2.1 임계전류 측정

각각의 길이 5m인 초전도케이블 코어 샘플 3개를 상온의 대기 중에 놓인 액체질소 용기 안에 넣은 후 직류전류를 공급하여 상별로 임계전류를 측정한다.

2. 본 론

2.1 기준(안) 작성 목적

연구기관 및 기업들이 22.9kV급 고온초전도케이블(이하 '초전도 케이블'이라 한다)에 대한 연구확대 또는 실계통 적용을 위하여 이를 구매하거나 제작할 경우에 근거할 수 있는 시험 및 평가 기준(안)을 제시하고자 한다.

2.2 기준(안) 적용범위

22.9kV-Y 다중접지 지중배전선로용으로서 초전도 현상을 시험하기 위하여 극저온 환경 속에서 운전되며 도체부가 다수의 Bi-2223 또는 YBCO tape로 병렬 결합된 초전도 케이블과 그 부속 설비에 대하여 이 기준(안)을 적용한다.

2.3 시험 및 평가 대상 초전도케이블과 그 부속설비의 기본 구비조건

2.3.1 3상 일괄 내장

초전도 케이블은 하나의 cryostat(저온유지장치) 안에 3상이 일괄 내장된 구조이어야 한다.

2.3.2 여유 공간

초전도케이블의 코어가 극저온 하에서 상호 간에 기계적 스트레스를 주지 않도록 적절한 여유 공간을 두어 3상을 배열하여야 한다.

2.3.3 외경

초전도케이블의 최대 외경은 135mm 이하이어야 한다.

2.3.4 냉매 유통, 순환 구조

초전도케이블이 지속적으로 초전도현상을 유지할 수 있는 저온 환경을 조성하기 위하여 초전도케이블 내부 및 외부로 냉매(액체질소)가 유통, 순환하는 구조이어야 한다.

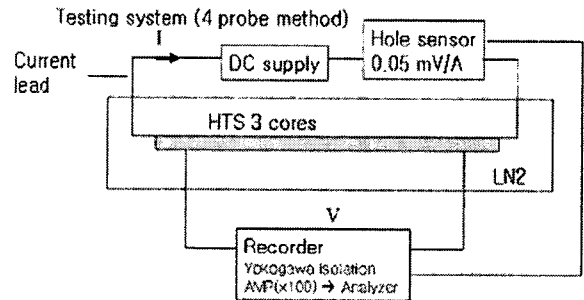
2.3.5 Cooling system 연결

초전도케이블 내부 및 외부로 냉매를 유통, 순환시키는 능력을 갖춘 cooling system이 초전도케이블에 연결되어야 한다.

2.3.6 CD type

초전도 케이블은 코어를 액체질소에 함침시켜 외부와 열적으로 절연(thermal insulation)하는 구조인 CD(cold dielectric) type이어야 한다.

2.3.7 시험환경



<그림 1> 임계전류 측정 개념도

○ 임계전류 정의 : 시료 양단간의 전압이 $1\mu\text{V}/\text{cm} \times$ 시료의 길이(5m), 즉, $500\mu\text{V}$ 에 도달할 때의 전류를 발함.

○ 측정환경 : 액체질소 온도 77K, 압력 0.1MPaG(ambient pressure)

○ 측정방법 : <그림 1>의 4단자법 또는 이에 준하는 방법.

2.4.1.2.2 교류손실 측정

길이 5m인 초전도케이블 코어 1개를 임계전류 측정의 경우와 마찬가지로 상온의 대기 중에 놓인 액체질소 용기 안에 넣은 후 주파수 60Hz의 교류전류를 공급하여 손실을 측정한다.

○ 측정방법 : <그림 2>와 같은 <Lock-in Amplifier>법 또는 이에 준하는 방법으로 교류손실을 측정하는데 이 때 초전도체와 초전도 차폐층을 직렬 연결한 후 Current Transformer로 교류전류를 공급한다.

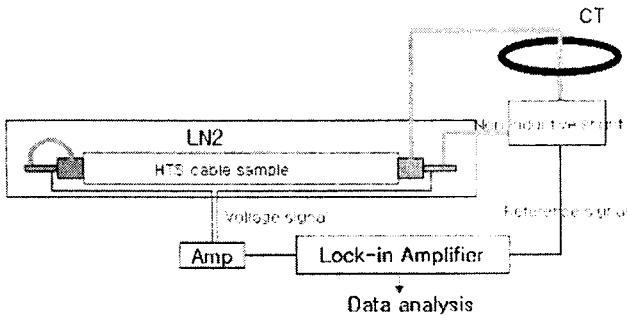
○ 측정환경 : 2.4.1.2.1 임계전류 측정 시와 동일

○ 교류손실 계산식 :

$$- V = V_x + iV_y \text{ (Lock-in Amplifier의 출력)}$$

(V_x : 유효분, V_y : 무효분)

- 교류손실(W/m) = $I \times V_x / \text{Amp} / 5\text{m}$ (이 교류손실 값을 1000A 교류전류 공급 시의 손실 값으로 환산하여 기록한다.)

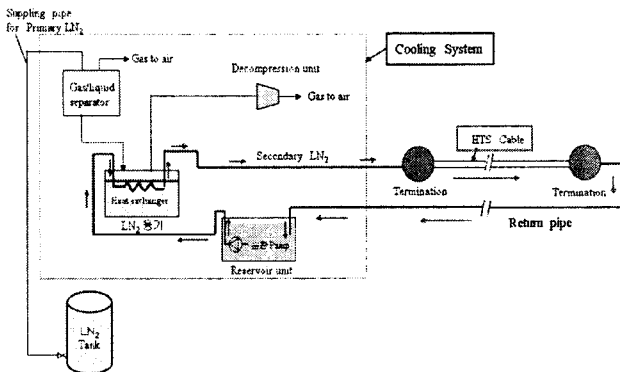


〈그림 2〉 교류손실 측정 회로도

2.4.2 현장 시험 (중요 사항 발췌)

2.4.2.1 냉각설비 가동시험

냉각설비를 초전도케이블에 연결하기 전에 냉각설비 자체만의 가동시험을 시행하여 성능을 점검한다.



〈그림 3〉 냉각설비 예시도(□부분의 냉각설비를 초전도케이블에 연결 전 가동 시험)

○ 시험방법(예) : 초전도케이블시스템 설계 열손실 값(kW)에 해당하는 히터를 그림 3의 Reservoir unit 내부에 삽입한 후 냉각설비를 가동하여 성능점검과 동시에 각 개소 온도 및 열손실을 측정한다.

2.4.2.2 진공도 측정

초전도케이블과 냉각설비를 연결한 후 시스템의 각 부위가 규정 온도 범위를 유지하게 되면 초전도케이블, 단말처리장치(Termination), 기타 필요개소의 진공도를 측정한다.

2.4.2.3 온도측정

초전도케이블 시스템 전체 및 초전도케이블 양단 온도와 열손실을 측정한다.

2.4.2.4 임계전류 측정

초전도케이블에 직류전류를 공급하여 각 상별 임계전류를 측정한다.

○ 임계전류 정의 : 초전도케이블 양단간의 전압이 $1\mu\text{V}/\text{cm} \times \text{초전도케이블 길이(m)}$ 에 도달할 때의 전류. 단, 초전도케이블 양단에 접속된 Current lead의 전압을 감한 후 임계전류 값을 산출하여야 한다. (그림 4 참조)

2.4.2.5 교류 통전시험

정격 최대전류의 50, 75, 100% 전류를 각 48시간씩 통전

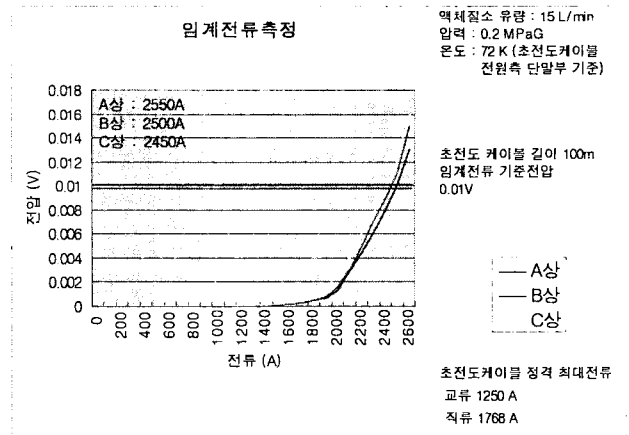
2.4.2.6 성능시험(Performance test)

초전도케이블 정격전압과 정격 최대전류를 동시에 48시간 동안 인가한다.

2.4.2.7 열손실 및 통전손실 측정

2.4.2.5 교류 통전시험 또는 2.4.2.6 성능시험 시에 초전도케이블시스템 전체 및 초전도케이블 양단간 열손실을 산출한 후 2.4.2.3 온도측정 시의 열손실을 비교하여 시스템 전체 및 초전도케이블의 통전손실을 산출한다.

- 산출공식 $Q = m C_p (\Delta T)$ [kW]
- (Q : 열손실 또는 통전손실(kW))
- m : 액체질소 유량(kg/sec)
- C_p : 액체질소 비열 (2015)/kg-K)
- ΔT : 측정 구간 온도 차(K) }



〈그림 4〉 임계전류 측정 오실로그래프 (예시)

2.5 시험 항목별 평가기준

〈표 1〉 초전도케이블시스템 평가기준 (중요사항 발췌)

시험항목		평가기준	시험항목번호	
공장 검수	샘플 시험	임계전류 (Ic)	$I_c > \sqrt{2} a$ (a: 초전도케이블 정격 최대 전류)	2.4.1.1
	교류손실	1000A 기준 1W/m 이내	2.4.1.2	
현장 시험	냉각설비 가동	열손실, 설계값 이내 유지	2.4.2.1	
	진공도	10^{-5} torr 이하	2.4.2.2	
	임계전류(Ic)	$I_c > \left(\frac{77-t}{77-65}\right) \sqrt{2} a + \sqrt{2} a$ (t : 임계전류 측정 시의 초전도케이블 전원측 단말부 온도[K]에 해당하는 수 (범위 77 ~ 65)) a : 초전도케이블 정격 최대전류) 계산공식 설명 * 참조	2.4.2.4	
	Performance test	정상 상태 유지	2.4.2.6	
	열손실 및 통전 손실	열손실: 설계 값 이내 유지 초전도케이블 통전손실 : 1000A기준 1W/m이내 유지	2.4.2.7	

* 임계전류 계산공식 설명 : 액체질소 온도범위 77~65K에서 온도가 1K 감소함에 따라 임계전류는 $\frac{\sqrt{2}a}{12}$ [A] 증가한다. 그에 의해서 위 공식을 도출하였다.

3. 결 론

초전도 케이블 시험 및 평가 기준을 제정하기 위하여서는 당연히 관련 전문가들의 장시간 토론과 심의를 거쳐야 하는 바, 본 (안)은 그러한 토론과 심의를 유도하기 위한 최초의 제안서이다. 도심지의 지하에 매설된 기존 케이블을 초전도 케이블로 교체할 경우 5배 이상의 전력을 공급할 수 있다는 획기적 연구 성과를 조기에 현장 적용하려면 우선 초전도 케이블 시스템 시험 및 평가 기준을 마련하여 관련 기술 향상에 기여하여야 함이 연구인의 의무라고 생각하면서 본 (안)을 작성하였다. 전문가들의 적극적인 검토 및 활용을 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 전력산업 기반기금과 한국전력공사의 자금 지원에 의해 수행되었습니다.

〈참고 문헌〉

- [1] 황시돌 외, "초전도 전력케이블의 교류손실 측정" 대한전기학회 제 36회 하계학술대회 논문집 A권 524페이지, 2005
- [2] 최형식 외, "고온초전도케이블시스템 설치 및 운전을 위한 연구" 대한전기학회 제 36회 하계학술대회 논문집 A권 653페이지, 2005