

### 송전급 초전도 케이블의 신뢰성 시험평가 방법

양병도, 김대웅, 박준우, 이승엽, 석광현, 김재승, 김형호, 강지원,  
한국전력공사

### Reliability Test Evaluation in Transmission level HTS Cable

B.M Yang, D.W Kim, J.W Park, S.Y Lee, K.H Suk, J.S Kim, H.H Kim, J.W Kang  
Korea Electric Power Corp.

**Abstract** - 고온 초전도 전력케이블은 기존 케이블에 비해 많은 전력을 공급할 수 있기 때문에 대용량 신규부하 밀집지역이나 노후 전력케이블 교체시 대용량 송전을 가능하게 하는 대안으로 관심이 많아지고 있다. 그러나 고온 초전도 케이블은 전기적인 특성이나 냉각시스템을 필요로 하는 등 기존 케이블과 다른 많은 특성을 가지고 있기 때문에 실제 적용에 투입하기 이전에 초전도 케이블의 신뢰성 검증 및 평가가 새롭게 검토해야 할 사항들로 받아들여지고 있다. 이를 위해서는 국내외적으로 진행된 많은 고온 초전도 전력케이블에 시험 데이터 및 경험을 근거로 실제 적용에 적합한 새로운 신뢰성 평가방법을 제시되어야 한다. 본 논문에서는 국내외적으로 진행된 고온 초전도 케이블의 신뢰성 평가 방법을 검토하고 국내에서 개발중인 세계최고의 전압인 154kV 고온 초전도 전력케이블에 대한 신뢰성 평가방법을 제시하고자 한다.

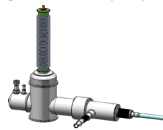
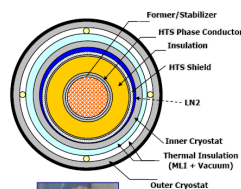
#### 1. 서 론

고온 초전도 전력케이블 시스템은 액체질소를 냉매로 이용하여 냉각 비용 절감과 에너지 절약이 가능하면서도 콤팩트한 사이즈로 대용량의 전력전송을 가능하게 하는 시스템으로 기존의 전력케이블에 비해 단위 면적당 송전용량이 3~4배에 달하며 케이블의 전기저항에 의한 손실이 거의 없다는 장점을 가지고 있다. 이 때문에 날로 심각해져가는 송전용량 제약 및 부지확보의 문제와 친환경 부하 급증지역 등의 해결책으로서 고온 초전도 전력케이블에 대한 관심이 고조되고 있다. 그러나 고온 초전도 케이블은 전기적인 특성이나 냉각시스템을 필요로 하는 등 기존 케이블과 다른 많은 특성을 가지고 있기 때문에 실제 적용에 투입하기 이전에 초전도 케이블의 신뢰성 검증 및 평가가 새롭게 검토해야 할 사항들로 받아들여지고 있다. 이를 위해서는 국내외적으로 진행된 많은 고온 초전도 전력케이블에 시험 데이터 및 경험을 근거로 실제 적용에 적합한 새로운 신뢰성 평가방법에 대한 규격화를 위하여 많은 노력이 필요한 시점이라고 할 수 있다.

현재까지 초전도 케이블의 신뢰성 평가는 기존 XLPE 혹은 절연지 케이블에 적용되고 있는 특정 전압에 대하여 실행하고 있는 임펄스 시험을 포함한 절연내력 시험방법 및 규격이 그대로 적용하여 시험하고 있다. 그러나 초전도 케이블이 기존 XLPE 혹은 절연지 케이블과 비교하여 서로 차이점이 존재하는 AC 내압시험, PD, 기타 필요한 시험요구 기준에 대해서는 아직 결정되지 못하고 모호한 상태로 되어 있으며 이 조건에서는 케이블의 Thermal Cycle이 포함되어 있지 않다. 또한 추가적으로 초전도 케이블의 특성 때문에 존재하는 임계전류, 운전 온도 및 압력조건에서의 열적 안정도, 단말이나 극저온 용기의 압력유지 및 안정 조건등에 대한 신뢰성 시험기준 및 방법등이 제시되지 않고 있다. 그리고 현재까지 많은 노력을 기울이고 있음에도 불구하고 실제 적용을 위해서 가장 필수적인 초전도 케이블에 대한 시험규격은 IEEE, IEC, AEIC, JEC KS등에서 공식적으로 제시되고 있지 않다.

- **Electrical Characteristics**
  - Rated Voltage : 154 kV ( $U_r, U_m = 89, 170$  kV)
  - Rated Current : 3.75 kA
  - BIL : 750 kV
  - Design Fault Current : 50 kA, 1.7s

- **Physical Characteristics**
  - Cold Dielectric Design (Single Phase in One Cryostat)



〈그림 1〉 국내 개발중인 송전급(154kV) 초전도 케이블 시스템

그러나 고온 초전도 케이블 기술이 진화되고 보다 많은 실제 적용 연구

가 시작되면서 안정적인 성능을 가진 초전도 케이블 실제 적용을 위한 시험규격제정 필요성을 국내뿐만 아니라 초전도케이블 선진국을 중심으로 국제규격기구(IEEE, IEC, CIGRE) 등에서 크게 인지하고 있으며, 초전도케이블의 국제표준시험규격화를 위한 활동이 본격적으로 진행되고 있기 때문에 조만간 좋은 결과가 공시될 것으로 믿는다.

본 논문에서는 국내외적으로 진행되고 있는 고온 초전도케이블의 신뢰성 평가 시험방법을 소개하고 국내에서 개발 중인 세계최고의 송전전압인 154kV 고온 초전도 전력케이블에 대한 신뢰성 시험평가방법을 제시하고자 한다.

#### 2. 본 론

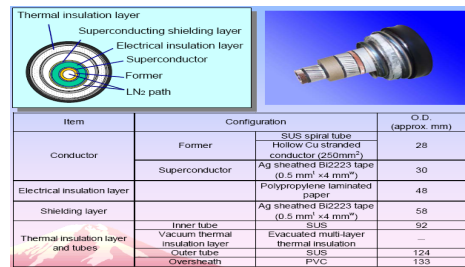
##### 2.1 초전도케이블에 대한 국외 신뢰성 시험방법

국외 초전도케이블에 대한 시험은 배전급에서 시작하여 현재 송전급(138kV) 초전도케이블까지 다양한 신뢰성 시험경험 및 결과를 가지고 있다. 본 논문에서 검토하고자 하는 것은 국내 송전급 초전도케이블 신뢰성 시험평가 방법이기 때문에 송전급 초전도케이블로 현재 가장 성공적으로 평가받고 있는 것은 일본 NEDO 77kV 초전도케이블과 미국 LIPA 138kV 초전도케이블의 시험평가 방법에 대하여 검토하고자 한다.

##### 2.1.1 일본 송전급(77kV) 초전도케이블 신뢰성 시험평가

일본 중앙전력연구소(CRIEPI)는 500m 77kV 초전도케이블에 대한 규격 및 실증시험을 기존 XLPE 혹은 절연지 케이블의 시험방법을 근간으로 초전도케이블에 대한 특성시험을 그림 3과 같이 수행하여 성공적으로 마쳤다.

특히 초전도케이블이 극저온상태에서 AC 내압특성이 매우 우수하게 나오므로써 절연두께를 더욱 줄일 수 있다고 판단하였으며 냉각기 부동작에 따른 초전도케이블 비상 운전 가능시간[1시간]을 확인하였다.



〈그림 2〉 일본 77kV 초전도 케이블 구조

	2003		2004										2005			
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
1. Laying test	█															
2. Basic property test																
3. Rated loading test																
4. Load fluctuation test																
5. Overloading test																

〈그림 3〉 일본 77kV 초전도 케이블 신뢰성 시험 일정

- 가. Laying test : 포설시험, 지중 duct 사용
- 나. Basic property test : 냉각, 열 응축, 열 침투, 압력누수, 내전압, 임계 전류, 열 팽창 등
- 다. Rated loading test : 부하 시험(1개월)
- 라. Load fluctuation test : 부하주기 시험
- 마. Overload test : 과부하 시험

### 2.1.2 미국 송전급(138kV) 초전도케이블 신뢰성 시험평가

미국 LIPA(Long Island Power Authority)에서는 AMSC, Nexans, Air Liquide 공동으로 세계최초로 2008년 봄에 600m 송전급 초전도케이블을 상업운전에 성공하여 현재까지 운전중에 있다. 세계최초의 송전급 초전도케이블의 안정적인 실계통 적용을 위하여 기존 초고압 XLPE 혹은 절연지 케이블에서 수행한 시험규격을 기반으로 아래와 같이 시행하였다.

#### 가. 인정 및 규격 시험(Qualification and Type tests)

- 초고압 절연시험 : AC 내압, BIL, PD, tan δ, 유전용량
- 고전류 시험 : 임계전류, n-value
- 수압 시험 : 압력, 압력손실, He 누설
- 부하주기 : AC 전류와 전압 인가
- 손실 측정 : AC loss, 열 손실, 유전손실
- ※ 위의 시험들은 초전도케이블이 생산하기 전에 수행되어야 함
- 포설시험 : 70m 샘플길이

#### 나. 샘플 시험 (sample test, 파괴시험)

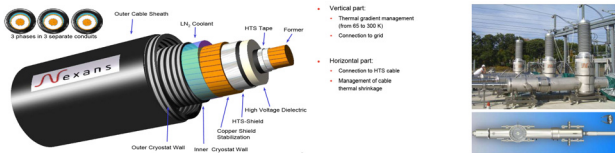
- 케이블 굴곡 : 육안 검사
- 초고압시험 : AC, BIL, Tan δ, 정전용량, PD
- 임계전류, n-value
- 극저온용기 압력시험 (burst pressure까지)

#### 다. 루틴 시험(Routine test)

- 초전도케이블 액세서리에 대한 초고압 시험
- 극저온 용기 누설시험 : He-leak test(부품별, 전체 극저온용기)
- 초전도케이블 액세서리에 대한 압력 시험

#### 라. 설치 후 시험 (After installation test) : 냉각 후

- AC 초고압 시험 : 1.5U<sub>0</sub>, 1시간
- 부분방전(PD) 시험



〈그림 4〉 송전급(138kV) 초전도 케이블 구조

### 2.2 초전도케이블에 대한 국내 신뢰성 시험방법

국내 초전도케이블에 대한 시험은 배전급(22.9kV) 초전도케이블의 성공적인 신뢰성 시험평가 및 실증시험을 근거로 하여 국내 실계통 적용을 위한 정부지원과제('08 ~ '11)가 그림 5와 같이 진행되고 있다. 기 개발된 배전급(22.5kV) 초전도케이블에 대한 신뢰성 시험평가방법에 대하여 검토하고 현재 개발 중인 세계최고의 송전급 전압인 154kV 초전도케이블의 신뢰성 시험평가 방법에 대하여 제시하고자 한다.

- Korean First HTS Cable Project in Live Grid
- Period : 2008. 11 ~ 2011. 10
- KEPCO, LS Cable, KEPRI
- Location : substation of KEPCO's Network near Seoul
- Volt & Capacity : 22.9kV/1.26kA 50MVA HTS cable
- Type : Cold Dielectric, 3 core 1 cryostat cable
- Length : 500m long with 1 joint



〈그림 5〉 배전급(22.9kV) 초전도 케이블 실계통 적용

#### 2.2.1 배전급(22.9kV) 초전도케이블 신뢰성 시험평가

##### ◆ Initial Tests

- Heat Loss, AC Loss, Tanδ, DC Ic
- PD, AC(80kV: 6U<sub>0</sub>) / Imp.(170kV) withstand, Pressure test
- Cryogenic system test (Cooling capacity etc.)

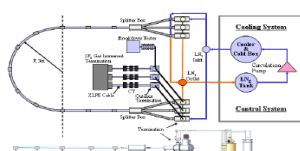
##### ◆ Long term cool down & load cycle test

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul
Initial Tests							
Long term test							
1st Cool down							
2nd Cool down							
3rd Cool down							

##### ◆ Residual test

- Heat Loss, AC Loss, DC Ic, Cooling Capacity
- Emergency test of cryogenic system
- PD, AC/Imp. breakdown test etc.

##### ◆ Test Configuration



〈그림 6〉 배전급(22.9kV) 초전도 케이블 신뢰성 시험

국내에서 개발완료된 22.9kV 초전도케이블에 대한 신뢰성 시험을 그림 7과 같이 실시하였다. 배전급(22.9kV) 초전도케이블에 적용한 시험방법은 기존 XLPE 혹은 절연지 케이블에서 적용하고 있는 시험을 준용하였으며, 케이블의 초전도 특성과 관련된 시험으로 2회의 Thermal Cycle, 열손실, AC loss, DC Ic, 냉각성능, 극저온 냉각시스템의 비상상태 시험 등을 추가하였으며, 시험결과는 성공적이었다.

Item	Reference				LS Cable's Proposal
	IEC60841-2	CIGRE WG21.20	IEC60055-1	KS C IEC 60055-1	
Voltage Range (kV)	~275	-	~30	~30	22.9kV
Configuration	Cable/Acc.	System	Cable/Acc.	Cable/Acc.	System
Dielectric Type	WD	CD/WD	WD	WD	CD
Dielectric Material	Oil/Paper	LN2/Paper	MI/Paper	MI/Paper	LN2/Paper
Dielectric Loss (Cable)	0(U <sub>0</sub> )	←	-	←	@ U <sub>0</sub> (LN2)
Dielectric Security* (Cable/Acc)	2.5U <sub>0</sub> _24hr / U <sub>0</sub>	←	4U <sub>0</sub>	←	2.5U <sub>0</sub> _24 hr (33kV)
Lightning Impulse (Cable/Acc)	IEC238 (±10 shot)	←	17kV for 18kV/U <sub>0</sub>	←	BIL_±10shot (150kV)
Load Cycle	-	Discussing	1.5U <sub>0</sub> _21days	←	1.5U <sub>0</sub> _30days (20kV)
Thermal Cycle	-	Discussing	-	←	2 times
Shrinkage	-	Discussing	-	←	0.3%
Cooling circuit & Cryostat	-	Discussing	-	←	0.3MPa
DC Ic	-	-	-	←	1uV/cm @ 77.3K
Partial Discharge	-	-	-	←	@ 2.5U <sub>0</sub>
Loss (thermal / dielectric)	-	Discussing	-	←	Reference

〈그림 7〉 배전급(22.9kV) 초전도 케이블 규격시험 항목

#### 2.2.2 송전급(154kV) 초전도케이블 신뢰성 시험평가

국내에서 개발 중인 세계 최고 송전급 전압인 154kV 초전도케이블의 신뢰성 시험평가 방법을 국외 송전급 초전도케이블의 성공적인 시험방법을 근거로 하여 아래와 같이 제시하고자 한다.

항목	Type Test	PQ Test	(모의 실험실)*	비고	
목적	주로 전기적요소 설계 주요 이상 확인	전기/기계/열적으로 사용 수명 성능 확인	실제 사용 경험		
적용되는 Case	널리 사용되어야 Type 형태, 재료 반영시	신규 전압 Level 혹은 최초 사용시	-	400kV XLPE 케이블 최초 사용과 동	
일반성능	내전압 성능	AC 2.5U <sub>0</sub> / Imp BIL x ±10회	←	AC U <sub>0</sub> / Imp x	
	장기과중전	20 ~ 30 Cycle (1달 이하)	180 Cycle 이상	-	PQ는 주로 열적인 특성 등 실사용 조건
	수명지수	통상 K1 x K2 x K <sub>3</sub> = 2.0 혹은 2.5	수명지수 n에 의한 시험연장/기간 결정	-	K1 = 불확실성, K2 = 온도 Factor 등
	시료길이	통상 결속항 사이 15m 이상 (30m ~ 100m)	통상 80m 이상 (100m)	-	
초전도 특성	포설조건	지상	지상, 콘크리트벽구 등 실제 사용될 환경 모사	←	
	Thermal Cycle	1회	6회	1회	← 6회는 30년 수명 조건 (0.4주기 5년)
	DC Ic 측정	2회	7회	1회	열화 확인
	열신속	1회	6회	1회	
진공도	1회	6회	1회		

〈그림 8〉 배전급(22.9kV) 초전도 케이블 실계통 적용

### 3. 결 론

본 논문에서 송전급 초전도케이블의 신뢰성시험평가를 검토해 본 결과, 전 세계적으로 초전도 케이블의 실계통 적용연구를 진행해 오면서 AC 내압, BIL, PD, 기타 다른 시험기준등을 제시하고자 많은 노력을 하였고 많은 관련 시험 데이터가 축적되었다고 생각된다.

그래서 지금은 전세계적으로 초전도케이블 제작, 개발, 실계통 적용에 관여했거나 관련된 기관이나 전문가들이 상호 협조하여 초전도 케이블의 조기 상용화 및 안정적인 실계통 적용을 위한 규격시험(Qualification test), 실증성능시험(plant test), 설치시험(Install test)에 대한 합의점 도출이 필요한 시기라 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 21C 프론티어사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 조진욱, "Field Test Experience and State of the HTS Cable in Korea", CIGRE Workshop on Test Techniques and Procedures for HTS Power Applications, 2009.5
- [2] Toshinori Takahashi, "NEDO HTS cable project in Japan", CIGRE Workshop on Test Techniques and Procedures for HTS Power Applications, 2009.5
- [3] Frank Schmidt, "LIPA HTS Cable Project in the USA", CIGRE Workshop on Test Techniques and Procedures for HTS Power Applications, 2009.5