

## 22.9kV 50MVA 초전도 케이블 시스템 개발 및 향후전망

조 전 옥  
한국전기연구원

### 1. 서 론

고온초전도체의 발견과 함께 고온초전도 케이블의 꾸준한 연구개발이 진행되어, 2000년 2월부터 미국 Southwire의 Carrollton 공장에 12.5kV, 1250A, 3상, 30m급 고온초전도 케이블을 설치하여 공장 내의 전력공급용으로 30,000시간 이상의 성공적인 운전과 덴마크의 NKT와 NST는 30m, 36kV, 103MVA급 상온절연방식 3상 고온초전도케이블을 제작하여 2001년 5월 코펜하겐의 Amager 변전소의 36kV급 실계통에 설치하여 약 50,000 가구에 2년 동안 사고 없이 전력을 성공적으로 공급하였다. 또한 중국의 Innopower가 2004년 6월부터 33m, 35kV, 2kA급 상온절연방식의 3상 고온초전도 케이블을 운남전력 변전소 내에 설치 및 성능시험이 진행 중이다.

그러나 현재 미국에서 DOE의 지원을 받아 SPI (Superconductivity Partnership with Industries) 프로그램의 일환으로 진행 중인 LIPA project, AEP Ohio project, 및 Albany project 등 3대 고온초전도 케이블 프로젝트는 실계통에 적용운전을 목적으로 진행되고 있다<sup>(1)</sup>. LIPA (Long Island Power Authority) Project는 AMSC가 주관으로 세계 최초의 송전전압 및 최장 길이의 138kV, 620m, 3상 고온초전도 전력케이블을 East Garden시의 변전소에 설치 중으로 2007년 실 계통운전을 할 예정이며, Ohio Project의 일환으로는 미국의 Southwire와 덴마크의 NKT가 합작, 설립한 벤처기업인 Ultera 주관으로 200m, 13.8kV, 3상 동축 고온초전도 케이블을 Ohio 전력계통에 설치하여 2006. 7월부터 운전 중이다. 또한, Albany Project는 Superpower社 주관으로 Sumitomo 정공이 케이블을 제작하여 2006년까지 350m, 34.5kV, 3상 고온초전도 케이블을 허드슨 강변에 신규 설치될 송전선 중 고속도로와 겹치는 일부를 초전도 전력케이블로

설치하여 2006년 7월부터 실계통 투입이 시작되었으며, 특히 마지막 30m 부분은 coated conductor를 사용한 초전도케이블이 제작되어 기존의 Bi-2223로 제작된 케이블과 교체 작업 중으로 2007년 하반기부터 재투입예정이다. 이와 같이 초전도케이블의 세계동향은 연구개발단계에서 실계통 시험 등 실계통 적용 단계로 전환되고 있다.

이 글에서는 DAPAS 2단계 사업의 일환으로 진행한 100m급 22.9kV, 50MVA 초전도 케이블 제품화 개발 결과 및 향후 전망에 대해서 기술하였다.

### 2. 100m급 22kV, 50MVA 초전도케이블 시스템 개발

DAPAS 1단계부터 한국전기연구원과 LS전선이 공동으로 22.9kV, 50MVA, 3상 초전도케이블을 개발하여, 2005년 장기실증시험을 성공적으로 수행한 후<sup>(2)</sup>, 2단계부터 22.9kV, 50MVA급 초전도케이블의 실용화를 위한 개발 과정으로 초전도케이블 코아 및 3상 일체형 단말, 냉각시스템, 케이블의 상용화를 위하여 매우 중요한 중간접속함을 포함하여 초전도케이블 제품화 개발을 추진하였다.

초전도케이블 코아는 정격 운전시 발생하는 교류손실을 최소화하여 냉각비용을 최소화하고, 통전용량이 극대화 되도록 설계, 제작하였으며, 1단계 중 개발한 초전도 케이블과 비교하여 도체의 수를 20%이상 감소시키고, 외경을 12% 감소시켜 케이블 가격경쟁력 확보 및 열 손실을 감소시킨 제품화 수준으로 개발하였다. 특히 계통운전 중 발생할 수 있는 고장 전류에 대비하여 25kA, 15cycle의 고장전류가 발생하여도 정상운전이 가능하도록 설계, 제작하였다. 그림 1에 개발된 케이블의 단면 사진을 나타내었다.

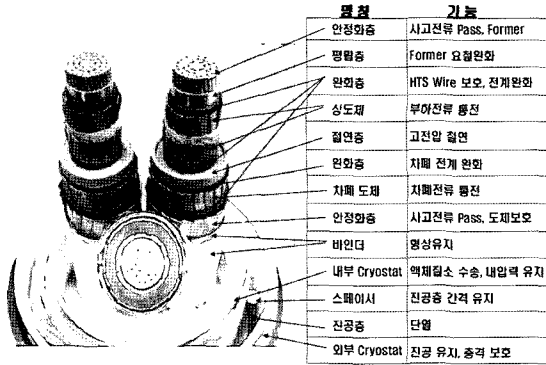


그림 1. 개발된 케이블의 단면사진

초전도 케이블용 단말은 케이블과 동등 이상의 특성을 유지하여야 함은 물론이며, 초전도 케이블 시스템은 초전도 특성을 유지하기 위해 전체 시스템을 극저온 냉매인 액체질소 (LN<sub>2</sub>)를 사용하여 액체질소온도로 냉각하는 방식을 채택하고 있기 때문에 효율적인 냉각 구조를 고려하여 설계되어야 한다. 초전도 케이블에 유입되는 열 침입량을 최소화 하기 위한 구조를 채택하였으며, 그 구조를 바탕으로 열설계와 전기적 설계를 병행하여 사전 평가 되고 제작되었다. 그림 2는 최적화 설계를 위한 Prototype 단말 및 CAE 해석 결과이다.

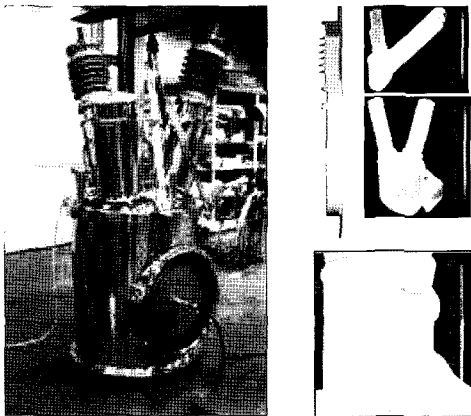


그림 2. Prototype 단말 및 CAE 해석 결과

개발된 3상 일괄형 단말은 1단계에서 개발한 분리형 단말보다 표면적을 1/3로 줄임으로서 약 20%의 열손실을 감소시켰으며 설치공간을 대폭 줄일 수 있는 제품화 수준으로 사료된다. 그림 3에서는 1단계에서 개발된 단말과 2단계에서 개발된 단말을 비교하였다.

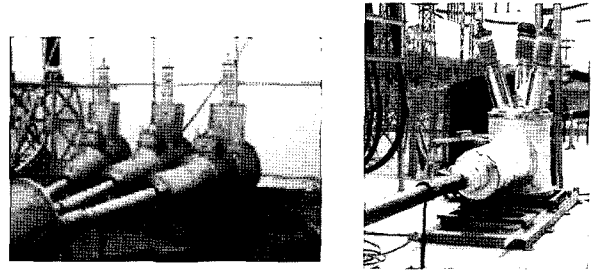


그림 3. 단말 개선 전/후 사진

초전도 케이블의 전력손실을 최소화하기 위해서는 초전도 케이블의 접속에 기존 전력케이블의 접속 방법을 적용할 수 없기 때문에 접속작업 및 케이블 운전 시 접속부에 위치한 고온초전도 도체들이 전기적, 기계적으로 안정한 구조를 갖고 초전도 특성을 유지할 수 있도록 초전도 케이블에 적합한 접속방법을 개발하였다. 중간접속기술은 기술의 난이도가 높으며 제품의 신뢰성이 강조되는 부분이지만 초전도케이블의 상용화를 위하여 필수구성 요소 중 하나로서, 현장 접속기술과 접속함을 개발하였다. 그림 4는 개발된 3상일체형 중간접속함의 개략도이다.

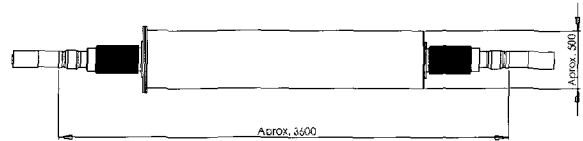


그림 4. 3상일체형 Termination

초전도 케이블 시스템의 설계 및 제작에 있어서 또하나의 중요한 요소로 자리잡고 있는 냉각시스템은 그림 5에서와 같이 3가지 타입의 극저온 냉동기 및 감압형 냉각기로 구성하였다.

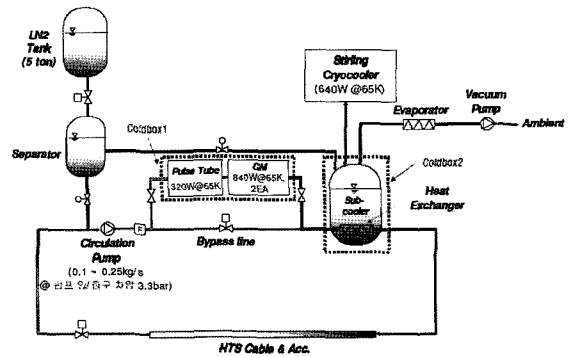


그림 5. 냉각 시스템 및 계통도

# 차세대초전도응용기술개발사업 2단계 성과 특집

표 1. 22.9kV 50MVA 초전도 케이블 시스템 평가 규격 (안)

Item	Method								Proposal	ETC	
Reference	IEC60141- 2	CIGRE WG21.20	IEC60055- 1	KS C IEC 60055- 1	SEI	Ultera <sup>1)</sup>	Furukawa	22.9kV CNCV (KEPCO)	22.9kV 3core 50MVA HTS Cable		
Voltage Range (kV)	~ 275	-	~ 30	~30	66	13.2	77	22.9	22.9kV		
Configuration	Cable/Acc.	System	Cable/Acc.	Cable/Acc	Cable/Acc	Cable/Acc	Cable/Acc	Cable/Acc.	System		
Dielectric Type	WD	CD/WD	WD	WD	CD	CD	CD	WD	CD		
Dielectric Material	OS/ Paper	LN2/ Paper	MV/ Paper	MV/ Paper	LN2/ Paper	LN2/ Paper	LN2/ Paper	XLPE	LN2/ Paper		
Type test	Dielectric Loss (Cable)	@U <sub>0</sub>	←	-	←	~ 3.25U <sub>0</sub>	-	-	0.3%@U <sub>0</sub> (R.T)	@U <sub>0</sub> (LN2)	For Ref.
	Dielectric Security* (Cable/Acc)	2.5U <sub>0</sub> _24hr (10min) / U <sub>0</sub>	←	4U <sub>0</sub>	←	3.25U <sub>0</sub> _3h (Japanese OF spec.)	3U <sub>0</sub> (IEEA S 94- 649- 2000)	2U <sub>0</sub> _10min (JEC)	6U <sub>0</sub> _1 hr / 4U <sub>0</sub> _6 hr	2.5U <sub>0</sub> _24 hr (33kV)	
	Lightning Impulse (Cable/Acc)	IEC230 (± 10 shot)	←	170kV for 18kVU <sub>0</sub>	←	385kV_3shot (BILx1.1; sample)	95kV to 110kV (IEEA&IEA)	440kV_3shot (BILx1.1; Sample)	150kV→ - 310kV / BIL	BIL ± 10shot (150kV)	
	Load Cycle	-	Discussing	1.5U <sub>0</sub> _21day	←	U <sub>0</sub> _30Day (Cycle)	-	1.5U <sub>0</sub> (70kV)_30days	3U <sub>0</sub> _14Day (Cycle)	1.5U <sub>0</sub> _30Day (20kV)	
	Thermal Cycle	-	Discussing	-	←	4 times	-	1 time	8hr ON, 16hr OFF	2 times	
	Shrinkage	-	Discussing	-	←	0.3%	-	0.3%	-	0.3%	For Ref.
	Cooling circuit & Cryostat	-	Discussing	-	←	20 l/min	-	30 l/min, 0.3MPa	-	0.3MPa	For Ref.
	I <sub>c</sub>	-	-	-	←	1100cm @77.3K	←	←	←	1100cm @77.3K	For Ref.
	Partial Discharge	-	-	-	←	@U <sub>0</sub>	@1.3U <sub>0</sub> (IEEE48- 1996)	@2U <sub>0</sub>	@1.7U <sub>0</sub>	@2.5U <sub>0</sub>	With **
Loss (thermal/electrical)	-	Discussing	-	←	Design Value for Ref.	Design Value for Ref.	Design Value for Ref.	-	Design Value for Ref.	For Ref.	

### 3. 평가기준 및 시험결과

초전도 케이블은 현재 세계적으로 표준화를 선점하기 위한 경쟁 단계로서, 한국의 기술력이 표준화 경쟁에서 우위를 차지할 수 있는지가 관심의 대상이 되고 있다. 초전도 케이블이 가지는 극저온 특성이 표준화를 이루어내는데 어려운 점이 되고 있는 것이 사실이나 미국 및 유럽의 기업, 정부를 중심으로 실선로 시적용을 통한 간략/단순화를 꾀하고 있다. 즉, 제작자가 필수적으로 확보해야 하는 자재의 전기적 특성과 납품 후 수명에 대한 품질 보증에 관한 사항을 분리하여 시장선점을 위한 적용 경험을 확대 추진하는 추세라고 할 수 있다. 표 1에는 2단계 사업을 추진하면서 유사 국제규격과 해외 메이커의 시험 실적을 분석하여 자재가 가져야 할 최소한의 특성을 규정한 평가 규격(안)을 나타내었다. 본 규격안은 IEC SB-1을 통하여 국제 표준화를 추진하고 있으며 향후 많은 전문가들의 평가와 논의를 통하여 수정안이 발표될 것을 기대한다. 2단계 연구 개발의 결과로서 본 규격(안)에 대한 평가를 실시하였다.

평가를 위해서 설치된 22.9kV 50MVA 3상 100m 초전도케이블시스템은 기본적인 규격 시험 외에도 초전도케이블의 포설상태에 따른 특성평가가 가능하도록 스네이크 포설된 지하 전력구 구간(55m), 90° 굴곡의 관로구간(15m), 180° 굴곡의 지상 U-bend(30m) 등 각각의 포설상태를 모의하여 설치하였다.

시험 항목 중 load cycle test는 전압 1.5U<sub>0</sub> (20kV)와 1.26kA (8시간 on+16시간 off) 조건으로 30일간 시험으로 진행하고 2차 cool-down 후 2U<sub>0</sub> (33kV), 24시간 장시간 내전압 시험을 추가로 실시하여 30년간의 전기적인 수명을 평가하였다. 또한 참고 시험으로 실시된 DC I<sub>c</sub>, 열손실, AC Loss 평가에서 설계치와 유사한 결과를 나타내었다. 이로부터 얻어진 데이터는 향후 양산 시스템의 기본적인 데이터로 활용 가능할 것으로 판단된다.

### 4. 향후 계획 및 전망

DAPAS 2단계 사업으로 개발한 22.9kV 50MVA 초전도 케이블 시스템의 규격시험을 통하여 제반적인 성능을 확인하였다. 추후,

제품 운영시의 여러 가지 조건을 감안한 운영 특성시험, 무인자동화 운전 및 냉각시스템에 대한 장기 평가 등 사용자의 편의성 및 예측 가능성에 대한 향상을 추구하고자 한다. 이를 통한 사용자 위주의 편의성 향상은 실선로 적용 추구를 통한 실선로 데이터 확보를 추구하고 동시에 세계적으로 경쟁단계로 접어든 초전도 케이블 산업의 국가 경쟁력 향상에 기여할 것으로 사료된다.

또한 2단계 연구 결과 및 연구 수행 과정에서 축적된 극저온용기, 케이블 Cryostat, 도체 접합, 케이블 단말 및 접속함 설계 기술은 22.9kV 초전도케이블의 상용화 및 DAPAS 3 단계에서 진행 중인 송전급 초전도 케이블 개발에 활용될 것으로 전망한다.

## 참고문헌

- [1] Superconductivity for Electric Systems 2006 Annual Peer Review (2006).
- [2] J. Cho et al., "Design and Experimental Results of a 3 Phase 30 m HTS Power Cable," IEEE Tran. on App Supercon., 16.2 pp. 1602-1605 (2006).

## 저자이력



조전욱(趙全旭)

1979-1983년 한양대학교 전기공학과, 1983-1985년 한양대학교 전기공학과 석사, 1995 - 2001년 연세대학교 전기전자공학과 박사, 1990 - 현재 한국전기연구원 책임연구원.