

한전 초전도 전력케이블 냉각시스템 설치 및 시험

Installation and Performance Test of Cooling System for the KEPCO HTS Power Cable

양형석^{1*}, 김동락¹, 이병섭¹, 최연석¹, 류희석², 손송호³, 임지현³, 황시돌⁴

H. S. Yang^{1*}, D. L. Kim¹, B. S. Lee¹, Y. S. Choi¹,
H. S. Ryoo², S. H. Sohn³, J. H. Lim³ and S. D. Hwang⁴

Abstract: A cooling system for a 22.9kV, 1.25kA 100m HTS power cable has been installed and tested. The cooling system consists of decompression cooling system with the cooling capacity of 3kW and a closed circulation system of subcooled liquid nitrogen. This paper describes the outline of the installed cooling system and performance test results.

Key Words: HTS power cable, cooling system.

1. 서 론

고온 초전도 전력케이블 시스템은 액체질소를 냉매로 이용하여 냉각 비용 절감과 에너지 절약이 가능하면서도 콤팩트한 사이즈로 대용량의 전력운송을 가능하게 하는 시스템이다. 기존의 지하설로에 설치할 수 있고, 기존의 케이블에 비해 용량증대가 가능하여, 장래의 전기에너지의 증가를 대비하는 새로운 해결기술로서 각광 받고 있다.

최근 국외의 고온초전도 전력케이블의 개발현황을 살펴보면 100 m이상의 장선 케이블을 실계통에 적용하여 실증시험이 진행되고 있다. 미국에서 진행되고 있는 계획으로는 덴마크의 Ultera와 미국의 ASC가 개발하는 200m급의 AEP Ohio프로젝트[1], 프랑스의 Nexans와 미국의 ASC가 개발하는 620m급의 LIPA 프로젝트[2], 그리고 미국의 IGC와 일본의 Sumitomo가 개발하는 350m급의 Albany프로젝트[3]가 진행되고 있다. 일본의 경우 2004년에 일본의 CRIEPI(Yokosuka Lab.)에서 단상 500m케이블의 시험이 진행되어, 실선로 적용에 있어서의 문제점들에 대한 시험을 위해 500m의 케이블에 고저차, 지하매설, 곡률을 주어 실증시험이 완료되었다[4].

국내에서는 현재 과학기술부의 21C 프론티어 연구개발 사업인 차세대 초전도 응용기술개발사업단에서 2001년부터 초전도케이블 개발을 진행해 오고 있으며, 30m의 3상 22.9kV급 초전도전력케이블을 시험하였으며[5], 100m 급 시스템을 시험 계획 중에 있다.

¹정 회원 : 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀

²비 회원 : 한국전기연구원 전력연구단

³비 회원 : 한국전력공사 전력연구원 초전도그룹

⁴정 회원 : 한국전력공사 전력연구원 신에너지그룹

*교신저자 : yanghs@kbsi.re.kr

원고접수 : 2007년 1월 4일

심사완료 : 2007년 2월 13일

본 연구에서는 장래에 국내의 실선로에 설치될 것으로 예상되는 초전도 전력 케이블 시스템의 설치, 평가, 운전 등과 관련된 기술을 조기 확보하고, 특히 기존의 전력시스템에는 불필요하였던 냉각시스템에 관한 기술을 확보하는 것을 목적으로 22.9kV, 1250A 100m 급의 고온초전도 전력케이블을 한전 전력시험센터(전북 고창군)에 설치하였다[6]. 본 논문에서는 일본의 Sumitomo 전공에 의해 설치된 고온초전도 전력케이블의 냉각시스템 구성과 냉각성능시험 결과에 대해 논의한다.

2. 냉각시스템 개요

케이블 시스템 냉각은 과냉각 액체질소 순환 냉각 방식으로 감압냉각시스템과 과냉각 액체질소 순환시스템으로 구성된다. 운전온도로 냉각된 과냉각 액체질소는 북측단말, 초전도케이블, 남측단말을 냉각시키고, 리턴 파이프를 통해 냉각실로 순환되어 냉각시스템으로 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. 액체질소 탱크(CE Tank)에서 공급된 고압의 기액 혼합 질소를 기액분리기(Gas/Liquid separator)에서 1기압의 액체질소로 분리하여, 서브쿨러(Subcooler)에 공급한다.

서브쿨러는 가열장치(Heating unit), 버퍼탱크(Buffer tank), 감압펌프(Decompression pump)로 구성된 감압펌프시스템에 의해 포화상태의 액체질소가 생성된다. 이 액체질소에 의해 액체질소 저장장치(Reservoir unit)에서 순환펌프에 의해 공급된 고압의 액체질소는 냉각되어 과냉각 액체질소로 생성되어 초전도 케이블 시스템을 순환하게 된다.

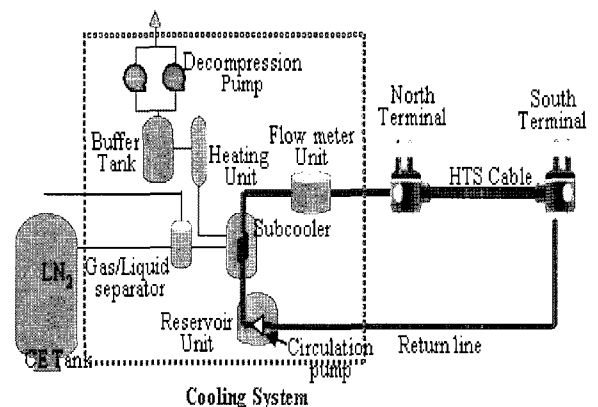


Fig. 1. Cooling System for the KEPCO HTS Power Cable.

이 냉각시스템은 서브쿨러의 액체질소 감압냉각에 의해 초전도 케이블에 공급되는 액체질소의 온도를 조절하므로 서브쿨러 내의 액체질소는 감소하여 주기적인 액체질소의 공급이 필요한 시스템이다. 이 냉각시스템의 사양을 Table 1에, 냉각실내에 설치된 냉각시스템의 사진을 Fig. 2에 보인다.

또한, 초전도 케이블 시스템의 열/기계적 특성을 파악하기 위해 온도, 압력, 유량, 액위, 진공도, 장력을 측정되고, 이 측정 데이터는 실시간으로 모니터링된다. 주요 측정 항목 및 측정 지점을 Table 2에 요약했다.

Table 1. Specifications of cooling system.

항 목	사 양
운전온도	66.4 ~ 77K
운전압력	최대 0.5MPa
유량	최대 50L/min.
냉각용량	3kW@70K

Table 2. Measured parameters of HTS cable system.

측정항목	측정장소
온도	<ul style="list-style-type: none"> HTS 케이블 입/출구 단말 cryostat 입/출구 리턴파이프 출구 Subcooler, reservoir unit 단말 cryostat
압력	<ul style="list-style-type: none"> HTS 케이블 입/출구 리턴파이프 출구 Reservoir unit, subcooler 순환펌프 출구
액위	Reservoir unit, subcooler, gas/liquid separator
유량	냉각실 출구 액체질소 공급라인
장력	양 단말cryostat 외부

3. 초전도 케이블 시스템 냉각시험

3.1. 초기냉각

초전도 케이블 시스템의 초기냉각은 상온에서 액체 질소온도 부근까지 예냉기에 의해 냉각된 질소가스를 이용하여 온도를 단계적으로 내려 예냉을 한 후에, 액체 질소를 충전시키고 그 후 냉각시스템을 운전시키면서 케이블 전체를 운전온도까지 냉각시키기 위한 초기 냉각과정이다. 이 작업은 시스템의 냉각에 있어서 급격한 냉각에 의한 케이블 시스템의 급격한 냉각에 의한 각 요소간의 온도구배 및 열수축 차이에 의한 응력 발생 등을 피하기 위한 작업이다. Fig. 3에 초기냉각시의 광화이버 온도센서를 이용하여 측정한 초전도 케이블의 길이방향 온도이력을 보인다. 질소가스에 의해 32시간에 걸쳐 123K까지 냉각시킨 후 액체질소를 주입하여 초전도 케이블 시스템 전체를 액체질소 온도로 냉각시켰다.

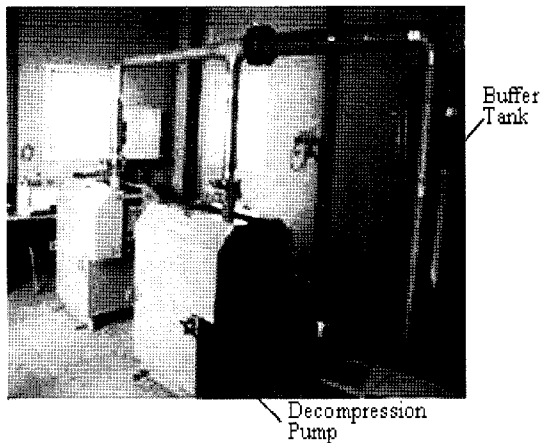
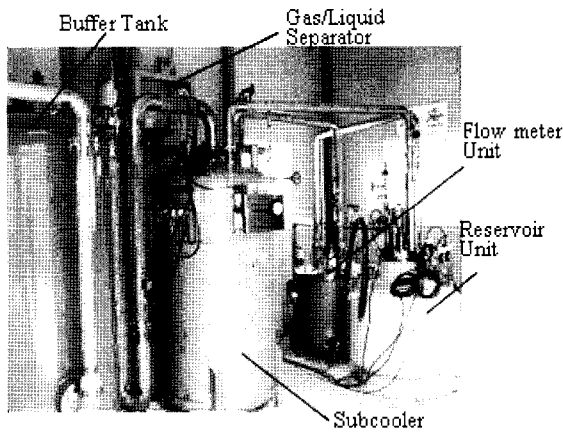


Fig. 2. Photographs of cooling system.

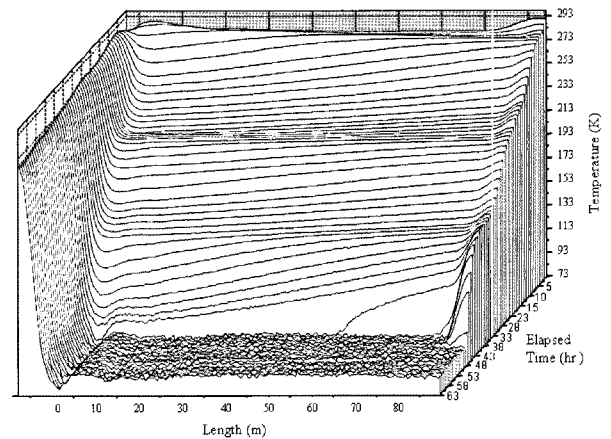


Fig. 3. Temperature history of HTS cable for initial cooling.

3.2. 열손실 측정 및 검토

초전도 케이블 시스템의 냉각성능을 시험하기 위해 22.9kV, 1250A 연속통전시험을 48시간 실시하였다. 무통전시 및 정격전류인 1250A 통전시의 초전도 케이블 시스템의 열손실량을 측정했다. 측정방법은 초전도 케이블 시스템의 각 지점에 설치한 온도센서의 온도차와 유량 및 액체질소의 물성치를 이용한 식 (1)로 계산하였고 주요결과를 Table 3에 보인다.

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (1)$$

Q : 열손실[W], \dot{m} : 질량유량[g/s], C_p : 정압비열 [J/kg-K], ΔT : 온도차 [K]

케이블 입구온도 66.4K, 유량 40 L/min 에서 무부하시의 초전도 케이블 시스템 전체 (냉각시스템 및 리턴 파이프 포함)의 열손실은 1.2kW, 1250A 통전시에는 2.3kW 였다. 즉, 시스템의 통전 열손실은 1.1kW 이다. 무통전시의 초전도 케이블의 열손실은 측정 초전도 케이블 길이 90m에 대해 0.22kW로 단위길이 당 2.5W/m에 해당하며, 단말의 열손실은 2대에 대해 0.55kW이다. 또한 1250A 통전시의 열부하는 0.84kW로 단위길이 당 9.3W/m에 해당하며, 단말에서는 2대에 대해 1.03kW이다. 이 초전도케이블의 통전시의 열손실에서 무통전시의 열손실을 빼면, 통전에 의한 초전도체의 교류 손실에 해당하므로 교류손실은 6.8W/m-3phases 로 산출되었다.

Table 3. Heat loads of the system.

통전	시스템 전체 (kW)	초전도 케이블 (kW)	초전도 케이블 (W/m)	단말 (kW)
0A	1.2	0.22	2.5	0.55
1250A	2.3	0.84	9.3	1.03

3.3. 액체질소 소비량 측정 및 검토

초전도 케이블시스템의 운전 중 액체질소의 소비는 주로 subcooler의 액체질소 증발에 의해 발생한다. 그러므로 subcooler의 액체질소 보충 주기 및 일회 충전량을 산출하면 초전도 케이블 시스템의 액체질소 소비량을 산출할 수 있다. Subcooler의 액체질소 보충주기는 무통전시 시간당 1.53회, 1250A 통전시 시간당 3회 충전되어 무통전시는 1일 610L, 1250A 통전시는 1,198 L가 소비된다. 이 소비량은 증발하여 소비된 액체질소에 상당하므로 아래에 나타낸 식 (2)의 관계식으로부터 전체시스템의 열부하를 환산할 수 있다.

$$Q = \dot{m} h_{fg} \quad (2)$$

\dot{m} : 기체증발율 [kg/s], h_{fg} : 증발잠열 [J/kg]

Table 4에 보인 액체증발량을 기체량으로 환산하여 열부하를 산출하면 무통전시 1.18kW, 1250A 통전시 2.32kW에 상당한다. 이를 Table 3에 보인 온도측정에서 산출한 초전도 케이블 전체 시스템의 열부하인

Table 4. Heat loads of the HTS system calculated from evaporated LN₂.

통전	액체 증발량 [m ³ /s]	열부하 [kW]
0A	7.07x10 ⁻⁶	1.18
1250A	1.39x10 ⁻⁵	2.32

1250A 통전시 2.3kW, 무통전시 1.2kW와 비교하면 2% 이내로 일치하고 있어 온도측정 결과에서 얻은 전체열부하의 타당성을 재확인할 수 있다.

4. 결 론

한전 전력실증시험장에 설치된 22.9kV, 1250A 100m급 HTS 초전도 케이블 시스템의 냉각시스템 개요 및 성능시험을 통하여 얻어진 결과를 소개하였다. 운전기술의 조기 확보 및 평가를 위해 이후에는 실계통 적용을 가정한 열싸이클시험, 장기운전시험 등이 실시되어 기술적, 경제적 평가가 수행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한전 전력연구원의 전력산업기술개발 사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] J. A. Demko, et al., "TESTING OF A LIQUID NITROGEN COOLED 5-METER, 3000A TRI-AXIAL HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING CABLE SYSTEM," Advances in Cryogenic Engineering, 45A, pp. 790-797, 2006.
- [2] J. Yuan et al., "A COOL-DOWN AND FAULT STUDY OF A LONG LENGTH HTS POWER TRANSMISSION CABLE," Advances in Cryogenic Engineering, 45A, pp. 782-789, 2006.
- [3] R. C. Lee et al., "PERFORMANCE TESTING OF A CRYOGENIC REFRIGERATION SYSTEM FOR HTS CABLES," Advances in Cryogenic Engineering, 45A, pp. 773-781, 2006.
- [4] M. Ichikawa et al., "Field Test of 500m high-Tc Superconducting Power Cable and Short Circuit Tests by Short Length Cable," Journal of the Cryogenic Society of Japan, 41-1, pp. 12-19, 2006.
- [5] I. S. Park et al., "Design and Operational Test of 22.9kV, 30m 3core HTS Cable Cooling System," KIASC Conference Proceeding, pp. 271-274, 2005.
- [6] S. H. Sohn et al. "Status of HTS Cable Project in KEPCO," ACASC Conference Proceeding, pp. 60, 2005.

저 자 소 개



양형석(梁炯哲)
1969년 05월 08일생, 1994년 홍익대학교 기계공학과 졸업, 1998년 Tsukuba 대학 대학원 이공학연구과 졸업(공학석사), 2001년 동대학 대학원 공학연구과 저온 공학전공 (공학박사), 현재 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀 선임연구원.



김동락(金東洛)
1953년 04월 04일생, 1976년 경북대학교 물리학과 졸업, 1993년 일본 오사카시립 대학 대학원 학위과정 수료(초저온물리학, 이학박사), 1993 ~ 현재 : 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀 책임연구원.



이병섭(李炳燮)
1968년 9월 3일생, 1994년 충남대학교 기계공학과 졸업, 1996년 동 대학원 기계공학과 공학석사, 2001년 8월 동 대학원 기계공학과 공학박사 졸업(Ph. D), 2004년 6월 ~ 2004년 11월 미국 NHMFL 방문연구원, 현재 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀 선임연구원.



최연석(崔然惜)
1969년 4월 5일생, 1994년 홍익대학교 기계공학과 졸업, 2004년 Florida State Univ. 기계공학과 졸업(저온공학, 공학박사), 2000년 ~ 2005년 NHMFL 연구원, 현재 한국기초과학지원연구원 선임연구원.



류희석(柳喜錫)
1958년 09월 30일생, 1979년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1986년 한국전기연구소 고전압연구실 입소, 현재 전력연구단 지중시스템연구 그룹 지중송배전기술 Team Leader, 선임연구원.



손송호(孫松縞)
1974년 07월 17일생, 2001년 고려대학교 금속공학과 졸업, 2004년 동대학원 신소재공학과 졸업(공학석사), 2004년 한국전력공사 전력연구원 입사, 현재 한국전력공사 전력연구원 초전도 그룹 일반 연구원.



임지현(林志炫)
1981년 03월 19일생, 2004년 전남대학교 기계공학과 졸업, 2006년 동대학원 기계공학과 졸업(석사), 2006년 1월 한국전력공사 입사, 현재 한국전력공사 전력연구원 초전도그룹 일반연구원.



황시돌(黃時玆)
1957년 1월 12일생, 1981년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업, 1986년 8월 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1980년 12월 한국전력공사 입사, 현재 한국전력공사 전력연구원 신에너지그룹 책임연구원.