

전력설비용 초전도케이블 냉각시스템의 냉각용량 과부하 모의시험

손승호*, 임지현*, 최하옥**, 양형석**, 진재홍*, 김동락**, 성태현*, 황시들*
 한전 전력연구원*, 한국기초과학지원연구원**

The Simulated Cooling Capacity Overload Test of HTS Cable Cooling System for Power Facility

S. H. Sohn, J. H. Lim*, H. S. Yang**, H. O. Choi**, J. H. Cheon*, D. L. Kim**, T. S. Sung*, S. D. Hwang*
 Korea Electric Power Research Institute*, Korea Basic Science Institute**

Abstract - 초전도케이블의 기술적 경제적 타당성에 대한 논의가 계속 진행되고 있는 가운데 이를 검증하기 위한 실험적 시험이 미국, 중국 및 일본을 포함한 주요 선진국들에서 이루어지고 있다.[1] 대용량 송전 및 절연성능 측면에서 장점을 가지고 있는 초전도케이블이 실제 계통에서 적용한 예가 지금까지 많지 않은 이유는 막대한 초기투자 비용과 함께 신기술 도입에 따른 기술적 신뢰성 확보를 꼽을 수 있다. 특히 케이블 자체의 전기적 특성과 함께 냉각시스템의 신뢰성은 초전도케이블 기술의 상용화를 위해서 반드시 확보되어야 하며 냉각시스템의 고효율과 함께 장기운전에 따른 냉각시스템의 안정성 및 기동 특성들이 우선적으로 파악되어야 할 것이다. 본 논문에서는 냉각시스템의 신뢰성을 검증하기 위한 실험의 일환으로 전류와 냉각시스템에 내장되어 있는 히터를 이용하여 열부하를 동시에 인가, 냉각시스템의 냉각용량 과부하 상태를 모의하여 냉각시스템의 반응성을 평가하였다.

초전도케이블 시스템이다. 이 중 냉각시스템은 과냉각 액체질소를 액체질소 순환펌프로 케이블 내부에 순환시키면서 과냉기(Sub-cooler)에서 열교환이 일어나게 하는 증발식으로, 그 구성요소는 냉각 시스템 제어반, reservoir unit, 기액분리기, 과냉기, Flow meter, 진공펌프 2기 및 buffer tank로 구성되어 있다.

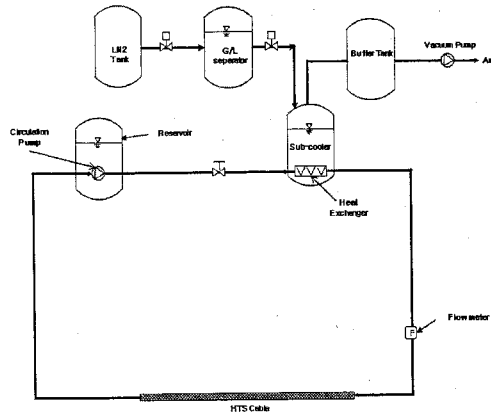


그림 1 초전도케이블 시스템 모식도

냉각시스템내의 액체질소는 액체질소 탱크에서 공급된 기액 혼합 질소가 기액 분리기에서 분리되어 과냉기로 공급된 다음 감압 펌프에 의해 압력이 낮아져 1기압 77[K]보다 낮은 압력과 온도에서 액체질소가 증발하면서 열에너지를 빼앗아 가는 1차계(Open Loop), 그리고 과냉된 액체질소가 초전도케이블, 단팔장치, reservoir unit 등을 순환하는 2차계(Closed Loop)로 냉각시스템을 구분할 수 있으며, 2차계는 과냉기 속에 위치한 열교환기에서 1차계에 열에너지를 공급해 준다.

<표 1> 냉각시스템 규격

Item	Specification
냉각시스템	증발식
운전온도	66~77[K]
냉각용량	3[kW]
최대운전압력	0.5[MPaG]
최대 유속	50[L/min]

초전도 케이블을 순환하며 열에너지를 흡수한 액체질소는 reservoir unit에서 순환 펌프에 의해 3기압까지 가압된 상태로 과냉기로 이동, 진공펌프에 의하여 1기압이하로 압력이 낮아져 77 K 이하의 온도를 유지하고 있는 과냉기 내의 포화증기압 상태의 액체질소와 열교환이 발

1. 서 론

도심지역의 재개발 및 산업혁신 클러스터 개발로부터 유발되는 전력 부하의 고밀도화에 따라 전력설비의 확충이 필연적으로 수반되어야 하나 각종 규제와 민원으로 인해 전력설비의 확충이 쉽지 않은 실정이다. 대용량 송전이 가능한 초전도케이블은 기존의 송전 전압을 유지한 채 수백의 전력 수송이 가능해 전력수급 안정화면에서 많은 장점을 가지고 있지만 운전온도가 액체질소 온도 이하여야 하기 때문에 이를 유지하기 위한 극저온 냉각시스템이 수반되어야 한다. 이러한 초전도전력기기에 수반되는 냉각시스템은 전력설비의 운영자에게 수 km에 이르는 케이블내 순환 매체의 열적 거동을 고려해야 한다는 측면과 함께 냉각기기 운영에 대한 저항감을 갖게 하는 등의 어려움을 더해준다. 따라서 초전도전력기기가 전력계통내에서 실용화하기 위해서 전력설비로서의 냉각시스템 신뢰성을 우선적으로 확보하고 신기술 도입에 따른 기술적 완충이 가능하도록 기기운영기술이 축적되어야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 증발식 초전도케이블 냉각시스템에 운전온도 조건을 변경하며 800[A]의 전류와 히터를 이용 0[W]에서 2[kW]까지의 열부하를 동시에 인가하여 냉각시스템의 과부하상태를 모의하고 운전온도 변경에 따른 냉각시스템의 최대 냉각용량 산정 및 냉각 시스템의 압력, 온도, 액위 등과 같은 냉각시스템의 반응성을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 한전 초전도케이블 냉각시스템

그림1은 한전 전력연구원에서 운영 중인 초전도케이블 시스템의 모식도로 22.9[kV], 50[MVA], 100[m]급

생한다. 열교환후 순환계내의 액체질소는 케이블 및 단말을 순환하며 지속적으로 냉각부하를 제거한다. 표 1에 초전도케이블 냉각시스템의 규격을 정리하였다.

2.2 실험 방법

과부하 시험시의 초전도 도체와 동도체의 접촉저항에 의한 열에 의해 발생할 수 있는 케이블의 손상을 억제하면서 냉각시스템의 반응성 및 최대냉각용량을 확인하기 위해 모의 과부하 시험을 진행하였다. 초전도케이블의 냉각 시스템은 통전시 발생하는 냉각부하를 제거하기 위해 액위, 압력, 케이블의 압력 및 온도 등이 적절하게 반응하고 신뢰성 있게 피드백 해야 한다. 시험은 초전도 케이블에 교류 전류를 인가하여 전류 인가시 발생하는 열손실에 추가하여 reservoir unit하단에 부착되어 있는 히터로 0[kW]부터 최대 2[kW]까지 0.5[kW]씩 증가시키며 순차적으로 열부하를 동시에 인가하여 정격 전류 인가시 발생하는 열손실 이상을 발생시켜 이 때 냉각 가능여부와 냉각 시스템의 반응성을 동시에 조사하였다. 운전 조건 및 시험조건을 표 2에 정리하였다.

〈표 2〉 냉각 시스템 모의 과부하 시험 조건

운전 조건	인가 전류	Heater input
T1=72[K], F=40[L/min]	800[A]	0[kW] ~ 2.0[kW]
T1=66.4[K], F=40[L/min]	800[A]	0[kW] ~ 1.5[kW]

2.2.1 운전온도 72[K] 조건에서 냉각 시스템 모의과부하 실험결과

그림 2와 그림 3은 72[K]운전 온도 조건에서 800[A] 전류 인가와 함께 reservoir내 히터로 2[kW]까지 열부하 인가시의 시스템 온도변화와 냉각시스템의 반응이다.

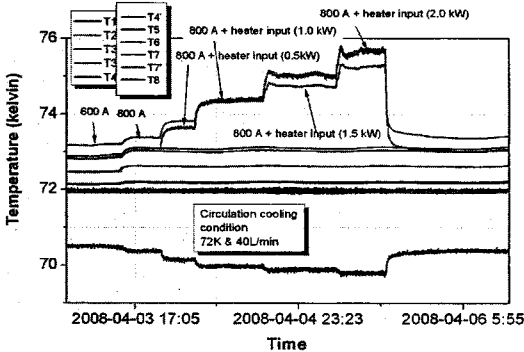


그림 2 72[K] 운전 조건에서 모의 과부하 시험시 시스템 온도 변화

전체적으로 케이블 입출구의 온도, 압력은 크게 변하지 않으나 3[kW]이상시 압력이 20[kPa]상승함과 동시에 값이 불안정하게 된다. 히터로 열부하를 동시에 인가시, 액체질소의 증발이 늘어나게 되고 따라서 기액 분리기와 과냉기의 액체질소 공급 주기가 빨라짐을 알 수 있다. 운영 중인 초전도케이블 냉각시스템의 최대 냉각용량은 72[K]조건에서 최대 3.66[kW] 냉각용량을 확인 할 수 있다. 현재의 냉각시스템은 액체질소가 가스로 펄 때의 증발열을 이용하는 증발식 냉각시스템으로 기액분리기로부터 과냉기로 공급되는 액체질소의 양이 전체 액체질소 소비량과 일치한다. 600[A]인가시 기액 분리기와 과냉기의 액체 공급 주기를 비교해 보면 800 [A]와

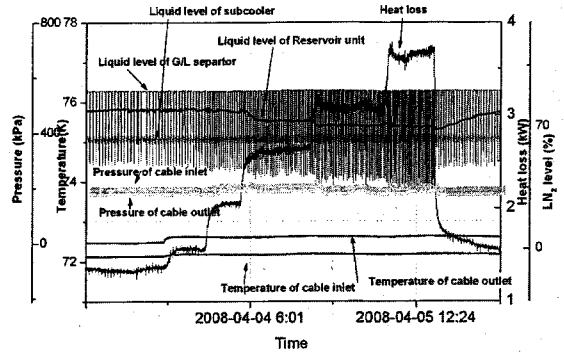


그림 3 72[K] 운전 조건에서 모의과부하 시험시 냉각시스템 반응성

1.0[kW]를 동시에 인가시 공급주기가 두 배가량 빨라지게 되며 2.0[kW]까지 열부하를 증가시키게 되면 최대 약 2.35배까지 공급주기가 빨라지게 된다. 표 3에 공급 주기 및 전체 열손실을 정리하였다.

〈표 3〉 72[K] 운전 조건에서 모의과부하 시험시 기액분리기 공급주기

시험조건	기액 분리기 및 과냉기 액체질소 공급 횟수 (주기)	전체 열손실
600[A]	25 (1.504회/시간)	1.34[kW]
800[A]	14 (1.544회/시간)	1.58[kW]
800[A]+0.5[kW]	16 (2.418회/시간)	2.05[kW]
800[A]+1.0[kW]	37 (2.921회/시간)	2.61[kW]
800[A]+1.5[kW]	43 (3.146회/시간)	3.09[kW]
800[A]+2.0[kW]	32 (3.542회/시간)	3.66[kW]

각 조건의 운전 중 액체질소 소비량을 산출하기 위하여 과냉기의 액체질소 증발량을 계산하였다. 과냉기의 Level gauge의 최대, 최소 설정치는 각각 65[%], 60[%]로 매회 16.63[L]의 액체질소가 과냉기로 공급된다. 아래 표 4에 각 조건에서 1일 운전시 액체질소 소비량을 정리하였다.

〈표 4〉 시험조건에 따른 1일 운전시 액체질소 소비량

시험조건 및 열손실량	1일 운전시 액체질소 소비량
600[A]	600.27[L]
800[A]	616.24[L]
800[A]+0.5[kW]	965.07[L]
800[A]+1.0[kW]	1165.83[L]
800[A]+1.5[kW]	1255.63[L]
800[A]+2.0[kW]	1413.68[L]

2.2.2 운전온도 66.4[K] 조건에서 냉각 시스템 모의과부하 실험결과

그림 4는 66.4[K]운전 온도 조건에서 800[A] 전류 인가와 동시에 reservoir내 히터로 1.5[kW]까지 열부하 인가시의 시스템 온도변화와 냉각시스템의 반응이다. 액체질소의 고화점이 63.148[K] (@12.52[kPa])이므로 운전 마진이 크지 않음을 고려하여 1.5[kW]까지만 열부하를 인가하였다. 전류 인가후 히터로 열부하를 동시에 인가시 72[K]운전조건에서의와 마찬가지로 액체질소의 증

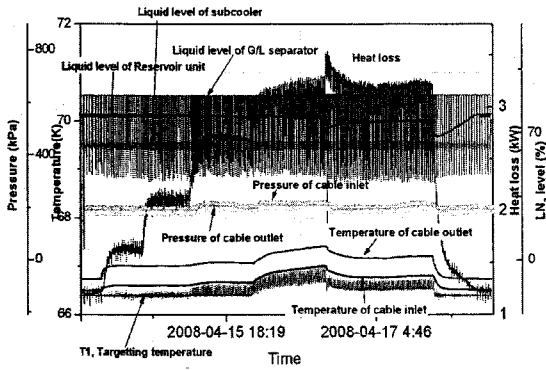


그림 4 66.4[K] 운전 조건에서 모의 과부하 시험시 냉각시스템 반응성

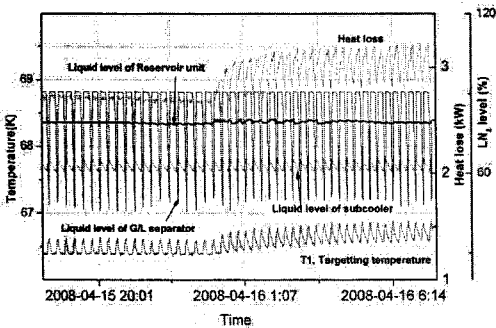


그림 5 냉각용량 초과시 냉각시스템 반응성

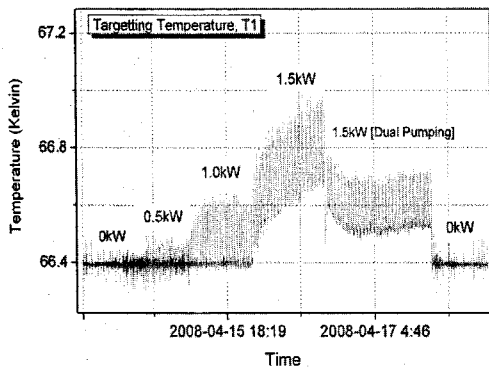


그림 6 부하 변화에 따른 목표 온도 변동성

발이 늘어나게 되고 따라서 그림 5와 같이 기액 분리기와 과냉기의 액체질소 공급 주기가 빨라짐을 알 수 있다. 800[A], 1.5[kW] 열부하 인가시 케이블 입구 및 출구의 온도가 계속 증가하는 경향을 보여 냉각 능력이 떨어지는 것으로 판단되어 두 기의 진공펌프를 동시에 운전하였다. 그림 6에서와 같이 800A 전류 인가 후 히터로 0.5[kW] 열부하 인가시까지는 목표 온도값 T_1 이 0.1[K]이하의 온도 진동을 보이나 1.0[kW]인가시 0.2[K], 1.5[kW]인가 시에는 최대 0.6[K]의 온도 진동을 보인다. 진공펌프의 효율을 고려하여 동시에 두 대의 진공펌프를 가동시키자 0.3[K]으로 온도 진동이 감소하게 되고 증가하던 케이블 입구 및 출구 온도가 안정화되

었다. 액체질소의 공급주기를 살펴보면 무부하시 과냉기의 액체질소 공급주기는 1.784회이나 1.0[kW] 열부하 인가시 3.226회까지 액체질소 공급주기가 증가하게 되고 1.5[kW] 열부하시에는 3.801회까지 공급주기가 증가하였다. 1.5[kW]인가시 냉각용량을 초과하게 되자 케이블 입출구의 온도가 계속 증가하여 두 기의 진공펌프를 동시에 운전하였다. 이때 공급주기는 3.673회로 감소하였는데 이는 진공배기의 효율 증가와 관련된 것으로 사료된다. 표 5에 66.4[K] 운전조건에서 공급주기를 정리하였다.

〈표 5〉 66.4[K] 온도 조건에서 모의과부하 시험시 기액분리기 공급주기

시험조건	기액 분리기 및 과냉기 액체질소 공급 횟수 (주기)	전체 열손실
0[A]	8 (1.784회/시간)	1.21[kW]
800[A]	19 (2.014회/시간)	1.66[kW]
800[A]+0.5[kW]	27 (2.458회/시간)	2.12[kW]
800[A]+ 1.0[kW]	46 (3.266회/시간)	2.73[kW]
800[A]+ 1.5[kW] (Single Pumping)	65 (3.801회/시간)	-
800[A]+ 1.5[kW] (Dual Pumping)	92 (3.673회/시간)	3.23[kW]

66.4[K] 운전조건에서 1250[A] 정격운전시 열손실은 2.4[kW] 정도로 모의 과부하 시험시 최대 2.73[kW]의 냉각용량을 확인할 수 있었으며 두 기의 진공펌프를 동시에 운전하여 진공 배기시 최대 3.23[kW]의 냉각용량을 확인하였다. 표 6에 과냉기의 액체질소 증발량을 근거로 각 조건에서 1일 운전시 액체질소 소비량을 정리하였다.

〈표 6〉 시험조건에 따른 1일 운전시 액체질소 소비량

시험조건 및 열손실량	1일 운전시 소비량
0[A]	712.03[L]
800[A]	803.83[L]
800[A]+0.5[kW]	981.04[L]
800[A]+1.0[kW]	1303.53[L]
800[A]+ 1.5[kW]	1517.06[L]
800[A]+ 1.5[kW]	1465.97[L]

3. 결 론

초전도케이블은 고효율 대용량 송전시스템으로서 활용 범위 및 기술적 가치가 높다고 할 수 있으나 아직까지 소량 생산에 따른 규모의 경제를 이루지 못하였고 기술적 신뢰성에 대한 검증이 끝나지 않았기 때문에 prototype을 이용한 소규모 실증시험의 단계를 거쳐 실 계통에 연결, 장기 신뢰성을 확보하기 위한 검증시험이 이루어지고 있다. 초전도케이블의 실용화를 위해선 냉각 시스템의 신뢰성이 반드시 확보되어야 하며 신뢰성이 확보되는 범위내 운전조건이 제시되어야 한다, 따라서 한전은 다양한 조건의 실험을 통해 초전도케이블 운영기술을 축적 중으로, 본 논문에서 제시된 과부하시의 냉각시스템의 반응성은 계통에서 발생 할 수 있는 위급상황시에 대한 운전 가이드라인을 제시하는데 활용이 가능할 것이다.

〔참 고 문 헌〕

[1] Demko, "Triaxial HTS cable for the AEP Bixby Project", Applied Superconductivity IEEE, Vol 17, issue 2, pp2 047, 2007