

초전도 전력케이블의 교류손실 측정

황시돌, 현옥배, 손송호, 최형식

한국전력공사 전력연구원

AC loss Measurement of Superconducting Power Cable

Si Dole Hwang, Ok Bae Hyun, Song Ho Sohn, Hyung Sik Choi
Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

Abstract - As a research activity of the project of "Verification Test of Superconducting Power Cable", we measured the AC loss of a short length superconducting power cable. The rating and the length of the cable were 22.9kV, 1,250A and 2.2m. The voltage taps for measuring the AC loss were attached to both ends of the conductor of the superconducting cable. Through the voltage taps and a lock-in amplifier we measured the in-phase component of the voltage(V_x) with the load current(I). The AC loss was measured by multiplying the in-phase component of the voltage(V_x) by the load current(I). The value of the AC loss of the superconducting power cable was 1.18W/m/phase/kA at 77.3K, 1atm.

2. 본 론

임계전류보다 작은 직류전류를 초전도체에 흘리면 전기 저항이 없기 때문에 발생하는 전력 손실이 없다. 그러나 초전도체에 외부전원으로부터 교류전류를 흘리거나, 교류자장을 가할 경우에는 전력손실이 생긴다. 자장이나 통전전류의 크기가 바뀔 때 초전도체 속의 전류분포가 변화하며, 이러한 초전도체 내부의 전류분포 변화는 외부전원으로부터 에너지의 공급을 요구하게 되고 그 에너지가 바로 초전도체의 교류손실이다. 초전도 현상은 극저온 환경에서 일어나므로 초전도체 내부에 에너지 손실이 생기면, 극저온 환경을 만들어 주는 액체질소 등 냉매를 증발하게 하거나 냉동기의 열부하로 작용하여 초전도케이블시스템 유지비용을 증가시킨다. 그러므로 전력계통에 초전도케이블의 도입을 검토하거나 기존 전력케이블(OF케이블, XLPE케이블 등)과 초전도케이블의 경제성을 비교 할 때는 초전도체의 교류손실전력을 고려하지 않으면 안 된다. 초전도케이블 시스템의 손실은 보통 케이블 부분의 교류손실, 단말장치의 열접입 손실 그리고 배관 및 밸브 등의 기타 손실로 구분하여 취급하는데, 여기서는 케이블 부분의 교류손실만 측정하였다.

1. 서 론

초전도체를 사용한 전력케이블은 기존의 동도체 전력케이블에 비하여 작은 단면적에 많은 전류를 흘릴 수 있다. 경우에 따라 다르지만 일반적으로 초전도케이블은 같은 단면적의 기존 동케이블에 비하여 3-5배의 전력 전송이 가능하다. 이러한 특성을 갖는 초전도케이블은 도심 재개발사업 추진으로 갑자기 전력수요가 몇 배씩 증가하는 경우 등 대도시 지역의 기존 케이블 대체용으로 활용하기에 적합하다. 기존의 동케이블로는 대도시 지역의 전력수요 증가 속도에 맞는 공급 설비 추가 건설에 큰 어려움을 겪고 있는 한국전력공사도 초전도케이블의 대용량 송배전 가능성을 인식하고 수년전부터 초전도케이블에 대한 연구를 진행하고 있다. 초전도케이블 자체의 요소기술 개발 및 제조에 관한 연구는 국내외의 관련 연구기관과 전력케이블 제조업체 등에 맡겨 두고, 한국전력공사는 케이블 사용자의 입장에서 초전도케이블의 활용에 필요한 기술을 개발함과 아울러 초전도케이블을 현재의 전력계통에 적용할 때 발생할 수 있는 문제점 파악 및 해결에 연구의 주안점을 두고 있다. 이를 위하여 초전도케이블시스템의 설치 및 실증시험을 통한 활용성 연구를 수행하고 있고, 여기에 필요한 초전도케이블시스템은 SEI가 제작을 완료하였으며 2005년 7월 중 설치를 시작할 것이다. 제작된 초전도케이블시스템은 정격전압 22.9kV, 정격전류 1,250A, 길이 100m 급으로서 주요 구성요소는 초전도케이블, 단말장치, 냉각장치 등이다.

초전도케이블은 직류에 대해서는 전력손실이 없으나 교류에 대해서는 전력손실이 발생하여 효율을 떨어뜨린다. 세계적으로 교류손실의 값을 1,000A의 전류를 흘릴 때 1W/m 이하로 저감하기 위해 노력하고 있다. 본 논문에서는 상기 초전도케이블의 제작 과정에서 그 일부를 2.2m 길이로 절단하여 실시하였던 교류손실전력 측정에 관하여 설명한다.

2.1 초전도케이블 시료 및 규격

본 교류손실 측정에 사용된 초전도케이블 시료는 길이 2.2m의 단상 케이블이었고 초전도체는 Bi - 2223/ A_g 선재로 하고, 전기적 절연체는 PPLP로 제작하였다. 임계전류 값은 운전온도인 72K에서 1,768A 이상이 되도록 설계하였다. 표 1과 그림1에 구성 요소별 기본 규격과 초전도케이블의 구조도를 표시하였다.

표 1. 초전도케이블의 규격

| 구성요소 | 규격 |
|---------------------------|----------------------------|
| Former | Cu stranded wire |
| Conductor | Bi-2223 tape, 2 layers |
| Electrical insulation | PPLP + LN2, t = 4.5 mm |
| Superconducting shielding | Bi-2223 tape, 1 layer |
| Protection layer | Cu tape + insulation paper |

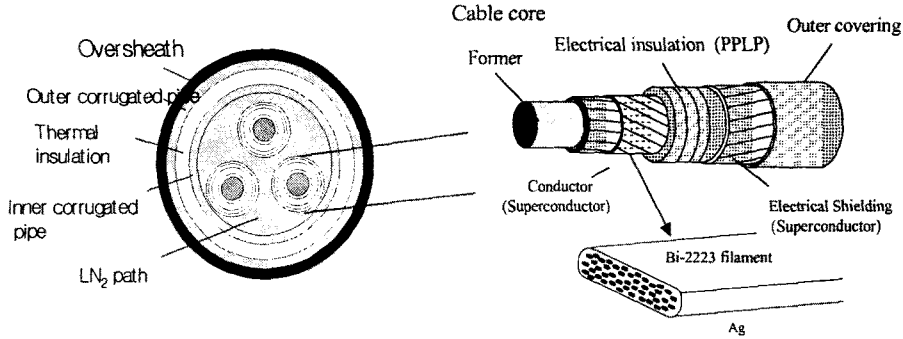


그림 1. 초전도케이블 구조도

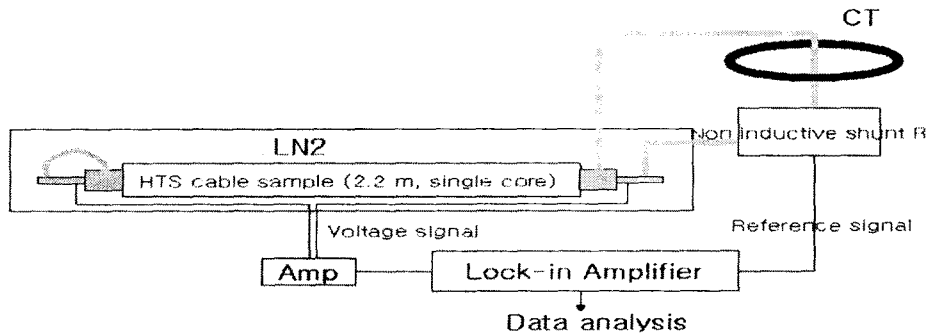


그림 2. 교류손실 측정 회로도

2.2 측정 방법

우선 초전도케이블 시료를 열적 절연이 충분한 직육면체의 통속에 넣고, 77.3K의 액체질소를 그 통속에 채워서 케이블을 냉각함으로써 초전도상태를 유지하도록 하였다. 교류손실을 측정하기 위한 회로는 그림 2와 같고, 전류는 CT를 통하여 공급하였다. 시료가 단상 케이블이므로 차폐층을 전류의 통로로 활용하였다.

Lock-in 앰프의 출력전압(V)은 인가된 전류와 동상인 부분(V_x)과 전류보다 90도 뒤진 성분(V_y)으로 구성된다. 교류손실 전력의 크기는 인가된 전류값에 그 전류와 동상인 전압 값을 곱한 것이다. 즉 Lock-in 앰프의 출력전압을 $V = V_x + jV_y$ 라고 하면 시료 전체의 교류손실값 $W = I \times V_x$ 이고, 단위 길이당 손실전력은 시료의 길이가 2.2m이므로 $\frac{W}{2.2m}$ 가 된다. 그림 3은 액체질소를 이용한 초전도케이블 냉각 장면이다.



그림 3. 액체질소를 이용한 초전도케이블 냉각

2.3 교류손실전력 측정 결과

시료로 사용한 초전도케이블의 정격전류는 1,250A이다. 그러나 세계적으로 초전도케이블의 교류손실 값은 1,000A 통전의 경우를 기준으로 측정하는 것이 관례화되어 있으므로 여기에서도 1,000A를 포함한 3가지의 경우에 대하여 교류손실을 측정하였다. 그 결과를 표 2에 나타내었다. 일반적으로 초전도케이블을 설계할 때 통전전류 1,000 A에서 교류손실 1 W/m 이하를 목표로 하고 있으므로 본 케이블의 교류손실 측정값 1.18 W/m는 그 목표값에서 크게다 손실이 적게 나타날 수도 있으나 측정의 편리성 등 실 벗어나지 않고 있다. 그러나 향후 코어 설계최적화 등을 통하여 교류손실 값을 더욱 줄여나가는 것이 초전도케이블의 실용화를 앞당기는데 도움이 될 것이다.

한편, 전압값을 측정하기 위한 단자가 도체층의 양쪽 끝에 위치하므로 차폐층에서 발생하는 손실전력이 측정값에서 제외되어, 실제보용상의 장점 때문에 전압 단자의 위치를 변경하지는 않았다.

표 2. 교류손실전력 측정 결과

| Current (Arms) | Amplification Ratio | In phase V_x (Vrms) | Out of phase V_y (Vrms) | AC loss (W/m) |
|----------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|---------------|
| 500 | $\times 10$ | 0.009 | 0.436 | 0.205 |
| 1,000 | $\times 10$ | 0.026 | 0.869 | 1.18 |
| 1,250 | $\times 10$ | 0.040 | 1.098 | 2.27 |

3. 결 론

정격전압 22.9kV, 정격전류 1,250A, 길이 2.2m의 단상 초전도케이블 시료를 확보하여 교류손실 전력을 측정하였다. 통전전류 1,000A를 흘렸을 때의 측정결과는 1.18W/m였다. 현재의 세계적인 초전도케이블 제조 능력과, “초전도케이블의 실증시험 및 평가”라는 본 연구의 최종 목표를 고려할 때 교류손실 1.18W/m는 적정한 크기이다. 그러나 향후 초전도케이블이 실용화되기 위해서는 기존 동케이블과 경제성 측면에서의 경쟁이 필연적이며, 그 경쟁에서 우위를 점하려면 재료 및 선재 성능 향상, 코어 설계최적화 등을 통하여 지속적으로 초전도 케이블의 교류손실 전력을 감소시켜 나가야 한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부(전력산업기반기금)와 한국전력 공사의 연구비 지원으로 수행하였으며 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. J. Rabbers “AC Loss in Superconducting Tapes and Coils” Department of Applied Physics, Low Temperature Division, University of Twente, 2001
- [2] 조영호, 마용호, 류경우, 최병주, 황시돌, “인접 HTS 테이프가 Bi-2223테이프의 자기자계손실 특성에 미치는 영향”, 2004년도한국초전도·저온공학회학술대회 논문집, 무주, 10월 20-22, pp162-164, 2004.
- [3] 류경우, 정재훈, 황시돌, 김석화, “전압리드의 배치가 단층고온초전도 모델케이블의 교류손실 측정에 미치는 영향”, 대한전기학회논문지, 51B권, 12호, pp.670-675, 2002.