

고온 초전도 모델 케이블의 임계전류 및 교류손실 특성

김해준, 심기덕, 김재호, 조전욱
한국전기연구원

Critical Current and AC loss Characteristics of mini-model HTS cable

Hae Joon Kim, Ki Deok Sim, Jae Ho Kim, Jeon Wook Cho
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - Reduction of AC losses is very important for realizing HTS cable and it had been reported that the same layer current controlled by twisting pitch and direction could reduce the AC losses effectively. During the long-term development of HTS cables, the superconductor AC losses will need to be reduced to a level determined by the economics of each installation and the efficiency of the refrigeration. Theoretical models have been developed to predict the magnitude of the losses in cables composed of several layers of flat HTS tapes. This paper is manufactured mini-model HTS cable and voltage signal line to spiral shape. Mini-model HTS cable is composed of 13 HTS tape. We measured to critical current and AC loss and compared used lock-in-amp to cancel coil. This data is useful to HTS cable of DAPAS program.

sine파의 모양을 갖지 않으므로 noise를 분리해 내는 것도 쉽지 않고 전류파형과의 위상차를 잡아내는 것도 쉬운 일이 아니다. 이러한 noise 저감을 위해 FFT(Fast Fourier Transform)등의 소프트웨어를 사용하는 경우도 있지만, 실제로 가장 많이 사용되는 방법은 Lock-in-amp를 사용하는 방법이다.

초전도체의 전압tap과 초전도체, 전압 신호선을 하나의 loop를 형성하게 되고, 이 loop의 내부에는 자기장이 통과하게 된다. 이 loop의 자기장은 초전도체에 흐르는 전류에 의해 생긴 자기장과 noise자장이 합해진 것인데 이 영향을 최소화하기위해 신호선 배치가 매우 중요하다. 따라서 그림 2와 같이 본 연구에서는 mini-model cable의 전압 신호선을 다음과 같이 3가지 종류로 하여 각각의 경우 cancel coil을 사용하는 방법과 Lock-in amp를 사용하는 방법으로 교류손실을 측정하여 신호선의 형태에 따라 교류손실이 이론적인 Norris식에 접근하는지를 연구하였다.

1. 서 론

초전도를 전력기에 응용하고자 할 경우 교류손실은 가장 큰 장애의 하나가 된다. 초전도를 이용하는 목적은 보통 소형 경량화와 손실 감소가 되는데, 교류 손실이 크다면 손실 감소라는 목적을 달성할 수 없게 된다.[1] 초전도를 응용한 전력기기 중 고온 초전도 전력케이블의 경우 최근 전력수요의 지속적인 증가와 집중화에 대비하여 도심지에 적용하기에 가장 이상적인 지중 송전방식으로 송전 에너지 밀도가 높고 송전 에너지 손실이 적을 뿐만 아니라 저전압 송전, 송전비용의 절감, 케이블의 소형화 등과 같은 장점을 갖고 있어 관심의 쏠림이 되고 있다.

최근 임계전류가 높고 기계적 특성이 크게 개선된 고온초전도 선재가 개발됨에 따라 이를 응용한 고온초전도 케이블의 개발연구가 더욱 활발해지고 있다. 이에 미국, 유럽 및 일본에서는 케이블을 개발하여 시험 운전 중이며, 우리나라에서도 21세기 프론티어 사업의 일환으로 3상 22.9kV급 고온초전도 케이블을 주관 연구기관인 한국전기연구원과 LS전선(주)이 공동으로 개발하여 장기 성능평가 시험이 완성된 상태이다.[2-4].

초전도 케이블의 상용화에 앞서 이들의 경제성 및 효율에 크게 영향을 미치는 Bi-2223 tape의 교류손실에 대한 실험 데이터 구축 및 이해는 가장 선행되어야할 중요한 과제이다. 초전도 케이블에서 주된 교류손실로 예상되는 통전손실에 영향을 미치는 중요한 인자는 Bi-2223 tape의 중첩비 및 tape의 피치등과 같은 인자와 외부자장을 차폐할 수 있는 절드층의 역할, 전압리드의 배열 등과 같은 요인도 있다.

따라서 본 연구에서는 mini-model 케이블을 제작하여 초전도 케이블의 임계전류를 측정하였고, 전압리드선의 배열에 따른 교류손실도 측정을 하였다. 특히 교류손실을 전기적으로 측정하기위해 cancel coil을 통한 선로의 인덕턴스값을 상쇄시키는 방법과 lock-in-amp를 이용한 전압의 실효치를 얻어 유효전류를 계산하여 손실을 구하는 2가지 방법을 적용하여 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1 실험방법

표 1에서는 본 연구에서 제작된 HTS tape의 사양이다. HTS tape는 AMSC사의 Sus-reinforce wire로 임계전류가 평균 120[A]이다. 이러한 HTS tape 13개를 가지고 그림 1에서와 같이 pitch 없이 직선으로 20φ FRP former에 권선하여 mini-model cable을 제작하였다. 보통 HTS cable은 실제 전력을 전송하는 통전층, cable을 보호하는 절연층, 전자장을 차폐하는 절드층으로 구성되어있지만, 본 연구에서는 간단한 mini-model cable을 제작하여 HTS cable의 임계전류 측정 방법 확립 및 교류손실을 측정하기 위해 통전층 하나만을 제작하였다.

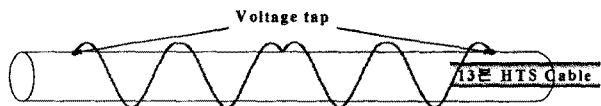
HTS cable에서 교류손실을 전기적으로 측정하는 것은 매우 어렵다. 일반적으로 초전도는 그 특성상 저전압 대전류로 동작하므로 전류신호는 충분히 크지만 전압신호는 대단히 미약하다. 전압 신호는 전류에 의해 발생하는 자장의 영향을 크게 받게 되고 noise의 영향도 크게 받게 된다. 그리고 교류손실은 비선형성에 의해 파형이 정확한

<표 1> specification of HTS tape

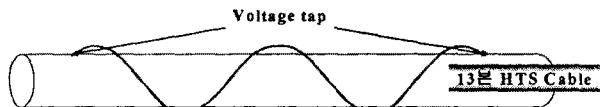
Manufacturer	AMSC
Width	4.1 ± 0.02[mm]
Thickness	0.3 ± 0.02[mm]
Material	Bi-2223/AgMg/STS
Manufacturing process	Powder In Tube
Number of filaments	56
Critical Current	>115[A] at 77K, Self-field



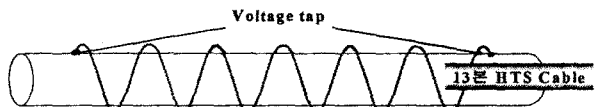
<그림 1> mini-model cable



a. 양단 전압탭에서 spiral의 방향이 반대 방향으로 4번 꼬여 있는것 (reverse)



b. 양단 전압탭에서 spiral의 방향이 같은 방향으로 2번 꼬여 있는것 (same, 2)



c. 양단 전압탭에서 spiral의 방향이 같은 방향으로 6번 꼬여 있는것 (same, 6)

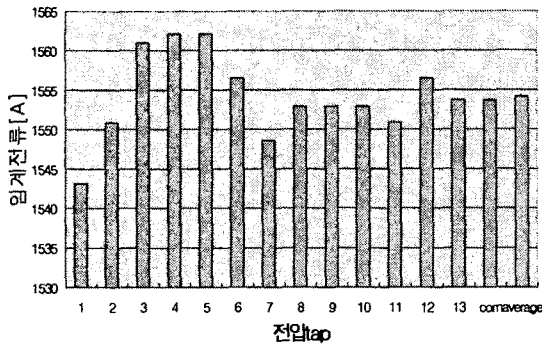
<그림 2> mini-model cable의 신호선 종류

2.2 실험결과

2.2.1 임계전류 특성

mini-model cable의 임계전류를 측정하기 위해 13가닥의 초전도선에 각 각 전압tap을 내었으며, (+)쪽에는 신호선을 common하였고, (-)쪽에는 13가닥 각각의 신호선으로 측정하였다. 1번 HTS tape에서 13번 HTS tape까지 각각의 경우 임계전류를 측정하였으며, 마지막에는 (-)쪽 신호선도 common 시켜놓고 임계전류를 측정하여 최종적으로 평균을 내었다. HTS tape 한가닥의 임계전류가 평균 120[A]이므로 13가닥의 mini-model cable의 임계전류 역시 $120 \times 13 = 1560$ [A]로 측정될 것을 예상하였고, 실제 임계전류도 그림 3에서와 같이 평균 1553[A]가 측정되었다. 임계전류가 보다 낮게 측정된 1번 전압 tap과 7번 전압 tap의 경우는 통전시에 발생될 수 있는 self-field의 영향이나, HTS tape 사이 전류분류의 불균일성으로 인해 조금 낮게 측정되는 것으로 사료된다.

임계전류 분포



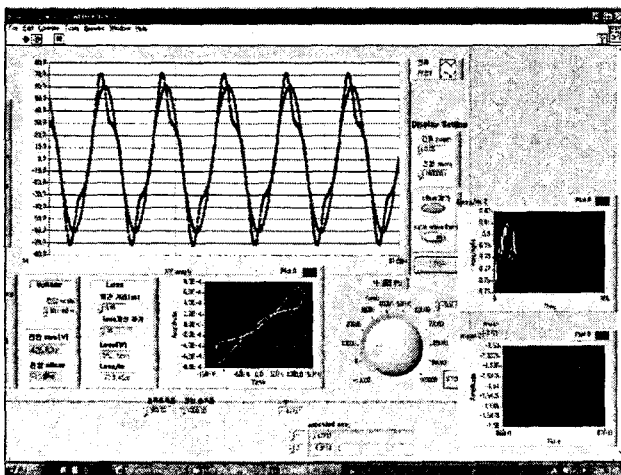
<그림 3> 각 신호선별 임계전류 분포

2.2.2 교류손실 특성

mini-model cable의 교류손실을 측정하기 위해 3가지 종류의 신호선으로 각각 cancel coil을 이용하는 방법과 Lock-in-amp를 이용하는 2가지 방법으로 각각 측정하였다. 보통 HTS tape의 교류손실을 측정하기 위해서는 전압 tap을 8자 형태의 모양으로 만들고, cancel coil을 사용하여 선로의 Inductance값을 상쇄하여 측정하지만 HTS cable에서 통전손실은 cable 자체의 Inductance가 크기 때문에 교류손실을 전기적인 방법으로 측정하기는 어렵다. 하지만 cancel coil의 turn수를 맞추고 전원의 리드선을 잘 배열한다면 간단한 mini-model cable의 교류손실은 측정이 가능하다.

본 연구에서는 DAQ board를 사용하여 cancel coil에서 Inductance를 상쇄시켜서 전압과 전류의 위상차를 맞추어 그림 4에서와 같이 10주기의 data를 받아 적절한 평균값을 계산하였다. 또한 lock-in-amp를 사용하여 전압의 실효치를 받아서 그때의 유효전력을 식 (1)과 같이 계산하여 교류손실을 측정하였다. 그리고 각각의 HTS tape에 전류분류가 동일하다는 가정하에 Norris Ellipse식을 계산하여 실험치와 이론치를 비교, 분석하였다.

mini-model cable의 교류손실은 그림 5에서와 같이 임계전류 근처에서는 전압 tap의 종류에 따라 큰 영향은 없었지만, 임계전류보다 작은 전류범위 내에서는 spiral 형태의 신호선이 반대방향으로 꼬인 것이 이론식과 거의 비슷하게 측정되었다. Lock-in-amp에서 측정한 교류손실값 역시 통전전류가 작을 때에 여러 가지 노이즈의 영향으로 전압값의 실효치가 높게 측정되었지만 전류가 커지면서부터는 노이즈의 영향이 줄어들어 이론치에 근접하는 값이 측정되었다.

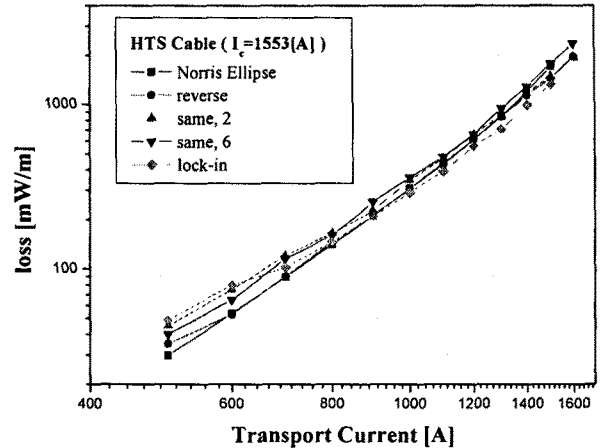


<그림 4> cancel coil을 이용한 교류손실 측정

$$P = V_{rms} \times I_{rms} \times \cos\theta \quad [W]$$

(1)

$$\begin{cases} V_{rms} : \text{Lock in Voltage} \\ I_{rms} : \text{Transport Current} \\ \theta : \text{Phase} \end{cases}$$



<그림 5> mini-model cable의 교류손실

3. 결 론

mini-model 케이블을 제작하여 초전도 케이블의 임계전류를 측정하였고, 전압리드선의 배열에 따른 교류손실도 측정을 하였다. 특히 교류손실을 전기적으로 측정하기 위해 cancel coil을 통한 선로의 인덕턴스값을 상쇄시키는 방법과 lock-in-amp를 이용한 전압의 실효치를 얻어 유효전력을 계산하여 손실을 구하는 2가지 방법을 적용하여 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

mini-model cable의 임계전류는 cable에서 각 HTS tape에 전압 tap을 삽입하여 각각의 경우 임계전류를 측정하여 그 평균값을 임계전류로 산정하였다. 실제 HTS tape사이 전류분류가 동일한 경우와 측정치와는 비슷하게 측정이 되었다. 따라서 HTS cable의 임계전류 역시 HTS tape의 임계전류 측정방법과 비슷한 방법으로 측정해야된다.

HTS cable에서 교류손실을 전기적인 방법으로 측정하기 위해서는 측정하는 곳의 선로의 Inductance 값과 cable의 Inductance를 상쇄시킬 수 있도록 cancel coil을 제작하여야하며, 전압 tap의 모양은 spiral 형태로 (+)(-)측에서 반대방향으로 꼬이면 낮은 전류에서 노이즈의 영향을 다소 줄일 수 있었다. 또한 이렇게 신호선을 제작하면 Norris 이론식에 가장 접근하는 형태로 측정할 수 있다. Lock-in-amp를 사용하여 교류손실을 측정하는 경우 측정방법은 간단하지만 전류가 낮을 경우에는 외부 노이즈의 영향을 많이 받아 측정하기 어렵다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] S. Mukoyama, K. Miyoshi, H. Tsubouti, T. Yoshida, M. Mimura, N. Uno, M. Ikeda, H. Ishii, S. Honjo, and Y. Iwata, "Uniform current distribution of HTS power cable with variable tape-winding pitches," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 9, no. 2, pp. 1269-1272, June 1999.
- [2] 김해준 외, "고온 초전도 tape의 임계전류 저하에 따른 교류손실 특성", 한국초전도·저온공학회 논문지, 7권, 3호, pp 29-33, 2005년
- [3] H Noji, K Haji, T Hamada, "Alternating current loss calculation in a high-TC superconducting transmission cable considering the magnetic field distribution", *Supercond. Sci. Technol.* 16, No 1, pp.14-18, 2003
- [4] Satoshi Fukui, Takeshi Noguchi, Jun Ogawa, Mitsugi Yamaguchi, Takao Sato and Osami Tsukamoto, "Analysis of AC loss and current distribution in multi-layer tri-axial three-phase HTS cable", *Physica C: Superconductivity*, Volumes 426-431, Part 2, 1 pp.1374-1379, 2005
- [5] C Traeholt, E Veje, F Gomory, M Daumling and O Tonnesen, "Contactless electrical measurements of transport ac losses in a 3 m long superconducting cable", *Supercond. Sci. Technol.* 15, No 6, pp. 898-901, 2002