

22.9kV/50MVA급 고온초전도 전력케이블의 교류손실

The AC loss of 22.9kV/50MVA High-Tc Superconducting Power Cable

최석진¹, 이상진^{2,*}, 심기덕³, 조전욱³, 이수길⁴, 양병모⁵, 윤형희⁵Sukjin Choi¹, Sangjin Lee^{2,*}, Kideok Sim³, Jeonwook Cho³, Soogil Lee⁴,
Byeong-Mo Yang⁵, Hyunghee Yoon⁵

Abstract: An HTS power cable is generally composed of 2 layers for conducting and 1 layer for shielding. For the analysis of AC loss of an HTS power cable, 2-dimensional magnetic field analysis is carried out. The magnetization loss in HTS cable core was calculated, and the transport current loss was obtained from the monoblock equation and the elliptical Norris Equation. And the total AC loss of the cable was expected by the sum of magnetization loss and transport current loss. The variation of ac loss with respect to the gap and uncertain factor between the superconducting tapes was investigated, and the ac loss of 22.9kV/50MVA high-Tc superconducting power cable was calculated. These results well agree with those of experiment.

Key Words: ac loss, elliptical Norris equation, HTS power cable, monoblock equation.

의 일환으로 22.9kV급 고온 초전도 케이블을 한국전기연구원과 LS전선(주)이 공동으로 개발 중에 있으며, 현재 고창에 있는 한전실증시험장에서 100m의 22.9kV, 50MVA급 초전도 전력케이블을 설치하고 시험 운전 중에 있다[1,2].

본 논문에서는 초전도 선재의 구성 형태에 따라 전자장 해석을 수행하였고, 전자장 해석 결과를 이용하여 교류 손실을 계산하였다. 먼저 선형으로 이루어진 초전도 선재 사이의 거리에 따라 교류 손실의 변화를 계산하였고, 그리고 원형으로 이루어진 초전도 선재 사이의 거리에 따라 교류 손실의 변화를 계산하였다. 그리고, 불확도에 따른 교류 손실의 변화를 계산하여 고온 초전도 케이블에서의 교류 손실의 변화를 예측할 수 있도록 하였다. 22.9kV/50MVA급 고온 초전도 케이블의 교류 손실을 계산하고, 실험 결과와 비교하여 교류 손실의 계산 방법에 대한 신뢰성을 검증하였다.

1. 서 론

고온초전도 전력케이블은 전기저항이 없어지는 초전도 현상을 이용하여 저손실·대용량 전력수송이 가능한 환경 친화적 전력케이블이다. 초전도 전력케이블은 1961년 McFee가 최초로 제안하여 80년대까지 저온 초전도케이블에 대하여 활발하게 연구개발이 진행되었으나, 1986년에 약 90K의 임계온도로 초전도특성의 재현성이 양호한 Y-Ba-Cu-O계 초전도체가 발견되어 액체헬륨이 필요가 없는 액체질소냉각 초전도케이블의 실현가능성을 기술적으로 검토하게 되었다. 고온초전도체의 발견이후 고온초전도 케이블의 실용화 가능성에 대하여 연구가 활발하게 진행되어져 왔다. 최근에는 Bi계 고온초전도 선재의 고임계 전류밀도화와 장치화가 이루어지면서 초전도 전력케이블 연구개발의 실용화를 목표로 경제성이 있는 고온초전도 전력케이블을 개발하려는 움직임이 일본, 미국, 유럽 등에서 본격화되고 있다. 우리나라에서도 21세기 프론티어 사업

2. 본 론

2.1. 교류 손실의 계산방법

2.1.1. 통전 손실

초전도 케이블의 통전 손실은 노리스 식과 모노 블록 모델식 두 가지 방법을 사용하여 계산을 할 수 있다. 노리스 식은 고온 초전도 테이프 선재에 대한 손실 계산식으로 잘 알려져 있으며, 모노 블록 모델식은 교류 손실 계산을 위해 초전도 테이프 권선 부분을 하나의 블록으로 보고 교류 손실을 계산한다. 모노 블록 모델식은 초전도 케이블 전체에 대해 계산될 수 있으며, 노리스 식은 케이블의 각 층별 손실값을 비교할 수 있다. 노리스 식은 다음 식(1)과 같다.

$$Q_i = \frac{\mu_0 f}{2\pi} I_c \left\{ (2-F)F + 2(1-F)\ln(1-F) \right\} \quad (1)$$

$$\text{where, } F = \frac{I_p}{I_c}$$

여기에서, I_p 는 테이프 선재에 흐르는 송전 전류의 최대값, f 는 케이블 송전 전류의 주파수, I_c 는 테이프 선재의 임계전류이다. 케이블 전체의 교류 손실은 각 층들의 손실의 합으로서 구할 수 있다.

모노 블록 모델식은 다음 식(2)와 같다.

$$Q_{mono} = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi \delta_0^2} \left\{ (1-\delta_0 F)\ln(1-\delta_0 F) + \delta_0 \beta (1-\delta_0 F/2) \right\}$$

(2)

$$\text{where, } \delta_0 = 1 - (R_i/R_0)^2$$

R_i , R_0 는 권선부의 내·외 반경이며, 다른 기호는 노

¹정 회 원 : 연세대학교

²정 회 원 : 위덕대학교

³정 회 원 : 한국전기연구원

⁴정 회 원 : LS전선(주) 수석연구원

⁵정 회 원 : 한전 전력연구원 연구원

*교신저자 : sjlee@uu.ac.kr

원고접수 : 2008년 10월 01일

심사완료 : 2009년 08월 24일

게재확정 : 2009년 08월 24일

리스 식(1)과 같다.

2.1.2. 자화 손실

고온 초전도 선재를 이용하여 제작한 권선을 초전도 케이블에 설치하였을 때 초전도 권선에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자장은 권선 내 각각의 선재에 외부 인가 자장으로 작용하여 초전도 선재의 자화 손실을 발생시킨다. 자화 손실은 초전도 선재에 인가되는 자장의 방향에 따라 각각 계산한다. 초전도 선재에 수평 방향으로 자장이 인가되면 자화 손실은 다음의 식(3)을 사용하여 계산한다.

$$Q_i = 2f \frac{2fB_i^2 \beta_i}{\mu_0 3} S_i \quad \beta_i < 1$$

$$= \frac{2fB_i^2}{\mu_0} \left[\frac{1}{\beta_i} - \frac{2}{3\beta_i^3} \right] S_i \quad \beta_i > 1 \quad (3)$$

where, $\beta_i = \frac{B_i}{\mu_0 J_b}$, $S_i = \text{area of the } i_{th} \text{ layer}$

B_i 는 수평 방향 외부 인가 자장이며, f 는 케이블 송전 전류의 주파수, J_b 는 초전도 선재의 임계 전류 밀도이다. 전체 자화 손실은 각 층의 손실의 합으로 얻어진다.

초전도 선재에 수직 방향으로 자장이 인가되면 자화 손실은 다음의 식(4)를 사용하여 계산한다.

$$Q_h = \frac{2B_a^2 \pi w}{\mu_0 2\beta d} \left[\frac{2}{\beta} \ln(\cosh \beta) - \tanh \beta \right] \quad (4)$$

where, $\beta = \frac{B_a}{B_d}$

B_a 는 수직 방향 외부 인가 자장이다. 도체 내 자장분포를 이용하여 전체 적분을 이용하여 계산하였다. 통전 손실은 두 가지 방식을 사용하여 계산하였고, 전체 교류 손실은 자화 손실과 통전 손실을 더하여 구하였다.

교류 손실 계산을 위해 모델링에 사용된 고온 초전도 선재는 Bi-2223 tape 선재이며, 선재의 사양은 표 1과 같다.

2.2. 초전도 선재의 결합 형태에 따른 교류 손실 계산

2.2.1. 선형으로 결합된 초전도 선재의 교류 손실

선형으로 결합된 초전도 선재의 교류 손실을 계산하였으며, 결합된 형태는 그림 1과 같다. 그림 1의 형태로 구성된 초전도 선재에 대한 전자장 해석을 수행하였고, 자장 분포는 그림 2와 같다. 전자장 해석 결과를 이용하여 교류 손실 계산을 하였고, 계산시 사용된 각 초전도 선재의 통전전류는 50A였다. 초전도 선재 사이의 거리를 변화시켜가며 교류 손실 계산을 하였고, 그 결과는 그림 3과 같다. 초전도 선재 사이의 거리가 커짐에 따라 교류 손실이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 초전도 선재 사이의 거리가 커지면서, 초전도 선재가 받는 수평 방향 성분의 자장은 감소하지만, 수직 방향 성분의 자장은 증가하게 된다. 초전도 선재의 교류 손실은 수평 방향 성분의 자장보다 수직 방향 성분의 자장에 더 큰 영향을 받기 때문에, 초전도 선재 사이의 거리가 커짐에 따라 교류 손실이 증가하게 된다.

2.2.2. 원형으로 결합된 초전도 선재의 교류 손실

원형으로 결합된 초전도 선재 교류 손실을 계산하였으며, 원형으로 결합된 형태는 그림 4와 같으며, 자장

Table 1. Specification of the HTS tape.

Parameter	Specification
Width	4.1±0.02 mm
Thickness	0.3±0.02 mm
Material	Bi-2223/Ag/Mg STS
Critical Current	>115 A, at 77 K, self field

분포는 그림 5와 같다. 초전도 테이프의 수를 고정시킨 상태에서, 원형으로 결합된 선재의 내반경을 크게 하며 교류 손실을 계산하였고, 계산 결과는 그림 6과 같다. 계산 시 전체 통전전류는 890Apeak 이었다. 내반경이 커짐에 따라 교류 손실은 증가하였고, 내반경이 16mm일 때 교류 손실 값은 내반경이 10mm일 때 교류 손실 값을 비교하여 보면, 노리스 식으로 계산한 교류 손실 값은 40.22% 증가하였고, 모노 블록 계산식으로 계산한 교류 손실 값은 37% 감소하였다. 교류 손실 값이 증가한 이유는 선형으로 결합된 초전도 선재의 경우와 마찬가지로 내반경이 커지면서, 초전도 선재가 받는 수평 방향 성분의 자장은 감소하지만, 수직 방향 성분의 자장은 증가하기 때문이다. 모노 블록 계산식으로 계산한 교류 손실 값이 작은 이유는 모노 블록 계산식이 초전도 테이프 권선 부분을 하

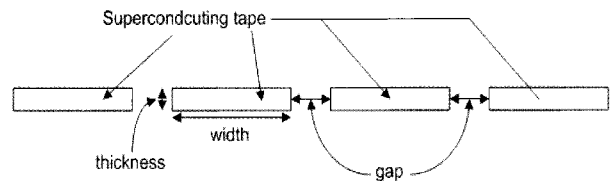


Fig. 1. The superconducting tapes assembled in a line shape.

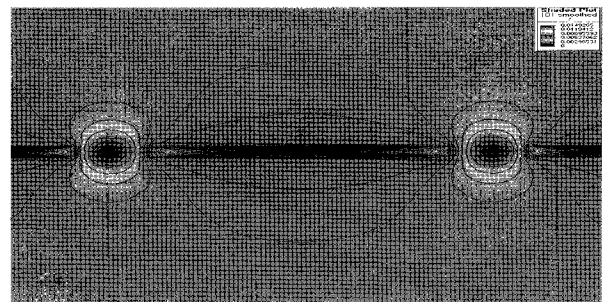


Fig. 2. Magnetic field distribution of the superconducting tapes in a line shape.

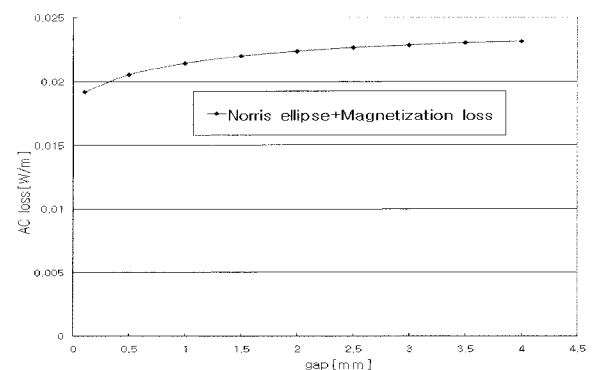


Fig. 3. The AC losses with respect to the gap between the superconducting tapes.

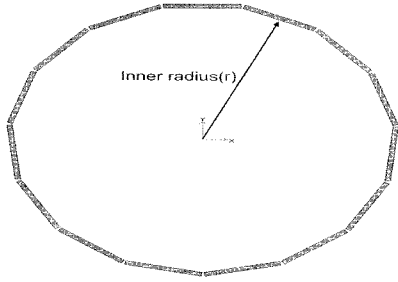


Fig. 4. The superconducting tapes assembled in a circular shape.

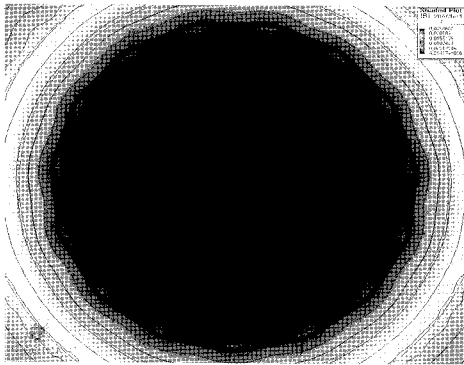


Fig. 5. Magnetic field distribution of the superconducting tapes in a circular shape.

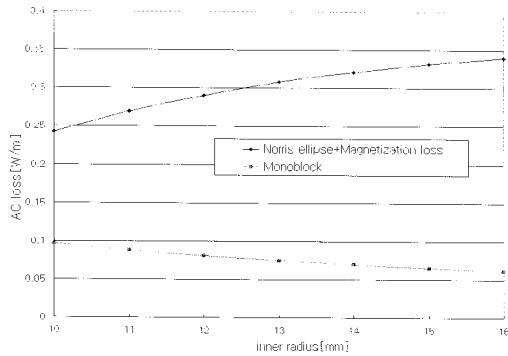


Fig. 6. The AC losses according to the various inner radii.

나의 블록으로 보고 계산하기 때문에 전체 통전전류가 같은 상태에서 권선 반경이 커짐에 따라 권선 부분에서의 전류 밀도가 줄어들기 때문으로 생각되어진다.

2.2.3. 불확도로 결합된 초전도 선재의 교류 손실

초전도 전력케이블은 원형으로 결합되고, 초전도 선재 사이의 거리는 고정시키도록 제작되어진다. 그러나, 초전도 케이블 설치 과정 중 원치 않는 초전도 선재의 기계적 이동이나 변형이 이루어질 수 있다. 이러한 기계적 이동이 교류 손실에 어떠한 효과를 미치는 지 알아보기 위하여 불확도로 결합된 초전도 선재의 교류 손실을 계산하였다. 불확도는 초전도 선재 사이 거리의 최소치 대 최대치의 비로 정의하였다. 그림 7은 불확도로 결합된 형태를 보여주고 있으며, 그림 8은 가장 분포를 나타낸다. 불확도에 따른 교류 손실 계산 결과는 그림 9와 같다. 불확도가 커지는 것은 초전도

선재 사이 거리의 최대치와 최소치의 차이가 줄어드는 것을 의미한다. 그림 9는 교류 손실 계산 결과가 불확도에 크게 영향을 받지 않는 것을 보여주고 있다. 하나의 초전도 선재가 이동하게 될 때, 옆의 초전도 선재와 멀어지게 되면 수직 성분의 자장이 커지지만, 다른 쪽 옆의 초전도 선재와 가까워지게 되면서 교류 손실 측면에서는 상쇄효과를 보이게 되기 때문이다.

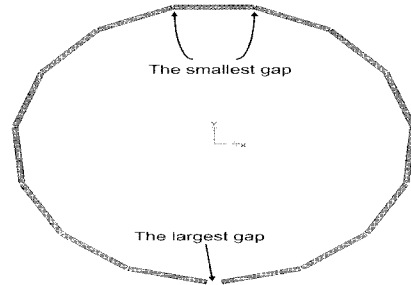


Fig. 7. The superconducting tapes assembled with uncertain factor.

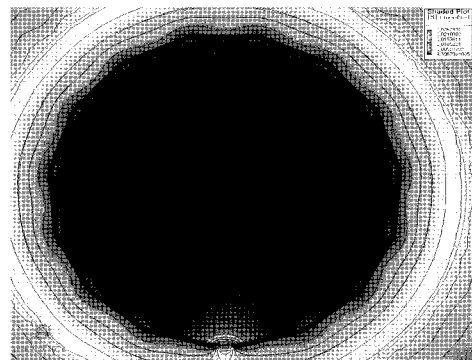


Fig. 8. Magnetic field distribution of the superconducting tapes with uncertain factor.

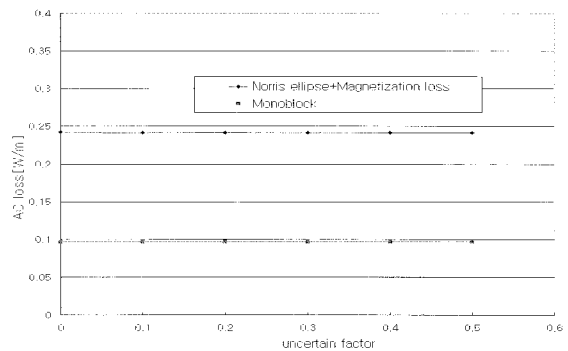


Fig. 9. The AC losses with uncertain factor.

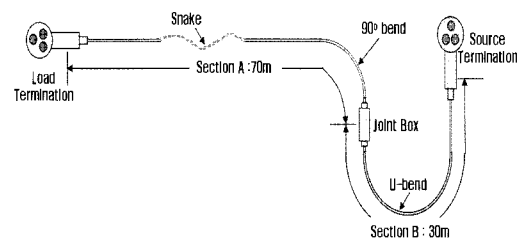


Fig. 10. Simplified view of 100m HTS cable.

Table 2. The calculated result and the measurement result.

Section of HTS cable	Calculated AC loss [W/m/phase]		Measurement AC loss [W/m/phase]
	Norris ellipse	Monoblock	
	Magnetization	Magnetization	
A : 70m	1.63	1.14	1.21
B : 30m	1.63	1.14	1.25

2.3. 교류 손실 계산 결과와 실험 결과 비교

계산된 교류손실 결과와 실제 교류손실 결과를 비교하기 위하여 한국전기연구원에서 개발하여 고장에 설치된 22.9 kV급 100m 고온초전도 전력케이블의 교류 손실을 측정하였다. 열량법을 사용하여 고온 초전도 케이블의 교류손실을 측정하였으며, 고온 초전도 케이블의 시스템의 개략도는 그림 10과 같다[3]. 교류 손실 계산은 2층의 통전층과 1층의 차폐층에 대한 결과이며, 교류손실 측정결과와 계산결과의 비교는 표 2와 같다. 측정결과가 계산결과보다 약간 높게 나왔지만, 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. A구간과 B구간의 측정 결과의 차이는 실험상의 오차와 길이 방향의 변화에 의해서라고 생각되어진다. 불확도로 계산한 결과로 볼 때, 반경 방향의 기계적인 이동은 교류손실에 큰 영향을 끼치지 않지만, 길이 방향으로의 이동에 의한 권선 피치의 변화 및 선재의 손상 등이 교류손실에 영향을 끼쳤을 것으로 생각되어진다.

3. 결 론

본 논문에서는 2차원 전자기장 해석을 통하여 고온 초전도 전력케이블의 교류 손실을 계산하였다. 초전도 선재 사이의 거리와 불확도에 따라 교류 손실을 계산하였다. 노리스 식으로 계산한 결과와 모노 블록식으로 계산한 결과가 차이를 보였는데, 모노 블록식이 초전도 선재 사이의 거리에 대한 고려가 이루어지지 않았기 때문으로 생각된다. 초전도 선재 사이의 거리가 작다면 두 결과의 차이는 크지 않을 것이며, 초전도 선재 사이의 거리가 크다면 초전도 케이블의 교류 손실 계산은 노리스 식으로 계산하여야 할 것이다. 22.9kV/50MVA급 고온 초전도 전력케이블의 교류 손실을 계산하고, 그 결과를 실험결과와 비교하였으며 실험결과와의 차이를 줄이기 위하여 길이 방향에 대한 해석을 진행하여 초전도 케이블의 피치에 따른 교류 손실의 변화에 대해 비교할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

참 고 문 헌

[1] 성기철 외, "배전급 초전도 전력케이블 개발", 차세대 초전도 응용기술개발 사업단 연차보고서, 2002.
 [2] J. W. Cho, "Design and Experimental Results of

a 3Phase HTS Power Cables", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 16, no. 2, pp. 1602 -1605, 2006.

[3] E.Cereda, "Comparison between self-field AC losses of a single-phase Bi-2223 cable measured by electric and calorimetric methods", Physica C:Superconductivity, vol. 310, pp. 231-235, 1998.

저 자 소 개



최석진(崔錫鎭)
 1974년 6월 10일생, 1998년 연세대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 연세대학교 박사과정.



이상진(李相鎭)
 1962년 3월 3일생, 1988년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수.



심기덕(沈基德)
 1973년 2월 1일생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원.



조전욱(趙全旭)
 1960년 3월 2일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도 응용연구그룹 책임연구원.



이수길(李秀吉)
 1970년 2월 2일 생, 1992년 광운대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 공학박사 수료, 1996년~ 현재 LS전선(주) 중앙연구소 수석연구원.



양병모(梁炳模)
 1969년 4월 24일생, 1995년 연세대공대 전기공학과 졸업, 1997년 동대학원 전기공 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



윤형희(尹亨羲)
 1954년 10월 20일 생, 1983년 동국대 공대 전기공학과 졸업, 한전 송변전처 및 송변전건설처 근무(1984~2004), 한전 의정부전력소 송전부장(2004~2006), 2006년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 지중케이블그룹 그룹장, CIGRE 한국 국내위원회 전력케이블 연구회 운영위원, 미국 EPRI Working Group Member.