

대용량 전력 전송을 위한 초전도 전력케이블의 교류손실 특성 분석⁺

(AC Loss Characteristic Analysis of Superconducting Power Cable for High Capacity Power Transmission)

이 석 주^{1)*}

(Lee Seok-Ju)

요 약 점차적으로 늘어나는 전력 수요의 공급을 원활히 하기 위해서 발전 설비 뿐만 아니라 전력을 전송하기 위한 전력케이블의 증설도 반드시 필요하다. 하지만 대부분의 도심지에 전력을 공급하기 위한 전력케이블의 증설은 추가적인 케이블의 설치공사를 위한 공간을 필요로 하고 현재 국내 도심지에 케이블 설치를 위한 공간이 부족한 실정이다. 이에 동일한 사이즈로 더 많은 전력을 전송할 수 있는 초전도 전력 케이블은 부족한 케이블의 설치공간을 극복할 수 있는 대안으로 등장하였다. 하지만 대용량의 전력 전송의 이점을 가지고 있는 초전도 전력케이블은 교류 시스템에서의 일부 손실을 가지고 있다. 따라서 교류 전력 전송 시스템에서 초전도 전력 케이블을 도입하기 위해서는 교류손실의 설계 및 분석이 반드시 필요하다. 이에 본 논문에서는 다양한 초전도 전력케이블의 교류 손실 분석을 통하여 실제 초전도 전력 케이블의 제조 및 실계통 적용에 고려하고자 한다. 단일 초전도 선재에 대한 교류 손실의 이론적인 계산 방법은 존재하지만 많은 수로 구성된 초전도 전력 케이블의 교류손실 계산은 쉽지가 않다. 저자는 초전도의 E-J (Electric field-current density) 특성이 고려된 전자기적 유한요소해석법을 이용하여 다양한 종류의 초전도 전력케이블 교류 손실을 분석하고자 한다. 또한 본 초전도 전력케이블의 교류손실 특성 분석은 실계통에 적용될 초전도 전력케이블의 설계 및 개발에 중요한 요소로 작용될 것이다. [1-4].

핵심주제어 : 초전도 전력케이블, 교류 손실, 유한요소해석법

Abstract In order to facilitate the supply of gradually increasing power demand, it is also necessary to increase the number of power cables for power transmission as well as generation facilities. However, the expansion of electric power cables for supplying power to most urban areas requires a space for installation of additional cables, and the space for installing cables in domestic downtown areas is insufficient at present. The superconducting power cable, which can transmit more power with the same size, has emerged as an alternative to overcome the insufficient cable installation space. However, superconducting power cables, which have the advantage of large power

* Corresponding Author : i9993235@gmail.com

+ 이 논문은 2019~2020년 창원대학교 연구비에 의해 연구되었음.

Manuscript received March 25, 2019 / revised April 17,

2019 / accepted April 19, 2019

1) 창원대학교 전기공학과, 제1저자

transmission, have some losses in the AC (Alternating Current) system. Therefore, the design and analysis of AC losses are essential to introduce superconducting power cables in AC power transmission systems. In this paper, we analyze the AC loss of various superconducting power cables and consider the actual superconducting power cables and their application to the system. Although there is a theoretical calculation method of AC loss for single superconducting wire, it is not easy to calculate AC loss of superconducting power cable with large number.

Therefore, the authors intend to analyze various kinds of superconducting power cable AC loss by using electromagnetic finite element analysis considering E-J (Electric field-Current density) characteristics of superconductivity. The analysis of the AC loss characteristics of the superconducting power cable will be an important factor in the design and development of the superconducting power cable to be applied to the actual system.

Key Words : Superconducting power cable, AC loss, FEM

1. 서 론

늘어나는 에너지 산업으로 인하여 전세계적으로 전력의 수요 또한 지속적으로 증가하고 있는 상황이다. 이러한 에너지 산업에서 전력 수요의 증가는 전력 공급에 대한 증가를 야기한다. 전력의 공급을 증가하기 위해서는 첫 번째로 추가적인 발전 산업의 증가가 필요로 하고 또한 능률적인 전력 전송을 위한 전력케이블의 추가 증설도 필요하다. 전력 전송의 증가를 위한 기존의 전력케이블의 추가설치를 위해서는 전력 철탑, 전력구, 관로와 전력 케이블의 설치 공간도 함께 병행되어야 한다. 하지만 국내와 같은 경우 도심지와 같은 인구가 밀집되어 있는 곳에서의 추가적인 전력케이블의 설치 공간이 절대적으로 부족한 현실이다. 하지만 초전도 전력 케이블은 기존 전력 케이블과 동일한 크기와 대비하여 더 많은 전력 전송이 가능하고 추가적인 전력케이블의 설치 공간의 증설 없이 기존 전력 케이블을 대체하여 전력 공급의 증가를 극복할 수 있다. 초전도 전력케이블은 특정 온도 이하에서 저항이 거의 없는 초전도체의 특성을 이용하여 만든 전력케이블이다. 특히 초전도 전력케이블은 DC 시스템에서 저항이 완벽히 무시되기 때문에 손실 없이 대용량의 전력 전송이 가능해진다. 하지만 국내외 대부분의 전력 시스템은 교류 전력 전송 방식을 채택하고 있기 때

문에 초전도 전력케이블의 시스템에서는 일부의 교류 손실이 작용된다. 일부의 교류 손실이 존재하더라도 초전도 전력케이블은 기존의 전력케이블보다 5~6배 정도 많은 전력을 전송할 수 있는 장점이 있다. 따라서 초전도 전력케이블을 교류 시스템에 적용하기 위해서는 시변자계에 의해 초전도체 미치는 교류 손실에 대한 분석이 설계 단계에서 반드시 이루어져야 한다. 단일 선재의 초전도체와 같은 경우 오랜 연구를 바탕으로 이론적인 교류 손실 계산이 가능하나 여러 개의 초전도 선재가 모여서 케이블링 되어 있는 초전도 전력 케이블과 같은 경우는 초전도 선재에 상호간에 작용하는 자기장에 따른 교류 손실의 계산과 예측이 용이하지 않다. 이에 본 논문에서는 전자기적 유한요소해석 기법을 활용하여 다양한 초전도 전력케이블의 교류 손실 분석을 수행한다. 이러한 방법으로 분석된 초전도 전력케이블의 교류 손실은 단일 위상의 초전도 전력케이블 뿐만 아니라 다상의 초전도 전력케이블의 주요 교류 설계 인자에 적용될 수 있고, 나아가 초전도 전력케이블 시스템의 냉각을 위한 냉각시스템의 용량 산정에도 중요하게 반영될 수 있다.



Fig. 1 Configuration of conventional power cable and superconducting power cable

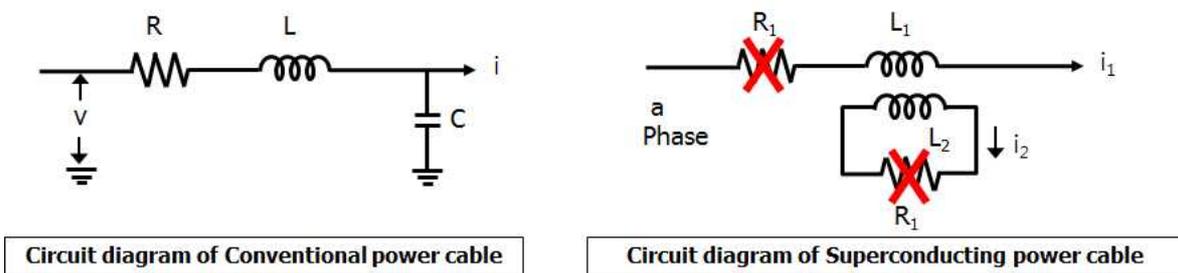


Fig. 2 Circuit diagram of conventional power cable and superconducting power cable

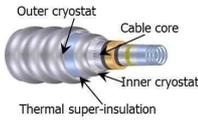
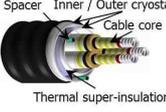
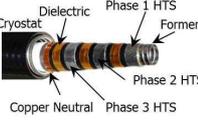
2. 초전도 전력 케이블의 구성과 종류

2.1 초전도 전력케이블과 기존 전력케이블의 구성

Fig. 1과 2는 기존 전력케이블과 초전도 전력케이블의 구성과 전기적인 회로도를 보여준다. 초전도 선재는 77 [K]에서 약 14,000 A/cm² 정도로 구리를 도체로 사용한 기존 초전도 전력케이블과 대비하여 매우 높은 전류밀도를 가지며 이와 같은 초전도체를 이용한 초전도 전력케이블 기존의 동일 크기 대비하여 아주 많은 에너지 밀도로 대용량의 전력의 전송이 가능하며 이와 같은 이유로 초전도 전력케이블은 대용량 전력 전송에 큰 장점을 가진다[5].

2.2 초전도 전력케이블의 종류

Fig. 3은 다양한 초전도 전력케이블의 형태를 보여준다. 시스템에서 필요로 하는 요구에 따라서 대용량 고전압 레벨에서는 단상 단심형을 주로 사용하고 대용량 중전압 레벨에서는 다상 일괄형의 초전도 케이블을 이용하며 중용량 저전압 레벨에서는 컴팩트한 다상 동축형 초전도 전력케이블의 전용이 유리하다. 다양한 초전도 전력케이블의 개발로 시스템의 조건에 따라 다양한 초전도 전력케이블의 적용이 가능하다.

Rated value	Use	Type	Industries
Three separate phases (1 core, 1 shield, 1 cryostat) 	High capacity High voltage (higher than ~138 kV class)	 Outer cryostat Cable core Inner cryostat Thermal super-insulation	LS cable, Nexans, Furukawa
3 phase in 1 cryo envelope (3 cores, 3 shields, 1 cryostat) 	High capacity Mid voltage (higher than ~66 kV class)	 Spacer Inner / Outer cryostat Cable core Thermal super-insulation	LS cable, SEI
Concentric HTS power cable (1 core, 1 shield, 1 cryostat) 	Mid capacity Mid voltage, low voltage (13.8 kV~50 kV)	 Dielectric Phase 1 HTS Former Cryostat Phase 2 HTS Phase 3 HTS Copper Neutral	Southwire, NKT → HTS TRIAX®

* concentric cable standard, supposition of same capacity Ref: CAPTA

Fig. 3 Comparison of superconducting power cable structures

Table 1 Design components of superconducting power cable system

Design component	Design items	Design factors
HTS layer (Current)	Current distribution (impedance balancing)	Impedance (R, L, C)
	AC loss	Rating current, critical current, magnetic field
Insulation (Voltage)	Eddy (induced) current loss	Rating current, current distribution
	Insulation thickness	Withstand voltage (AC, PD, impulse)

3. 초전도 전력케이블의 교류손실 분석

3.1 초전도 전력케이블의 설계 요소

초전도 전력케이블의 개발과 시스템의 적용을 위한 제조를 위해서는 케이블의 주용 인자에 따른 설계요소가 필요로 하다. Table 1은 초전도 전력케이블의 설계에 필요한 주요 요소를 나타내고 있다. 크게 전류적인 설계와 전압적인 설계 요소로 나누고 있으며 본 논문에서는 교류시스템에서 시스템의 용량 선정에 기인하는 교류손실 (AC loss) 특성을 분석하였다.

3.2 단일 선재의 초전도체 교류손실

단일 초전도 선재의 교류손실은 교류 피크 전류에서의 쇄교 자속 분포 및 전류 분포를 근거하여 식 (1)과 같이 Norris strip 식으로 계산할 수 있다. 하지만 여러 가닥과 여러 층의 초전도 선재로 구성된 초전도 전력케이블은 초전도 선재 상호간에 적용하는 자기장과 초전도 E-J 특성을 고려하여 해석하여야 한다. 이에 다층의 유한 요소 해석에 앞서 해석의 결과를 건정성을 확보하기 위하여 단일 초전도 선재에 대한 이론식과 해석값의 결과 비교를 실시하였다.

$$Q = \frac{I_C^2 \mu_0}{\pi} [(1 - F) \ln(1 - F) + (1 + F) \ln(1 + F) - F^2] \quad (1)$$

식 (1)에서 Q는 초전도 선재의 교류손실 (W/m), I_c 는 초전도체의 임계전류 (A), μ_0 는 진공투자율, F는 I_p/I_c (I_p 는 운전 피크전류)를 나타낸다.

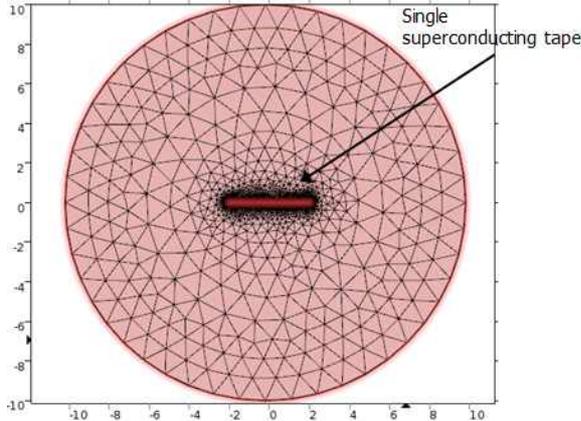


Fig. 4 A FEM analysis model of the superconducting tape

Fig. 4는 단일 초전도 선재의 교류손실 해석을 위한 유한요소해석 모델을 보여준다. 초전도체의 교류 손실을 해석하기 위해서 식 (2), (3)과 같은 맥스웰 방정식과 초전도체의 특징인 비선형 E-J 관계식을 함께 적용하게 된다.

$$\mu \frac{\partial \hat{H}}{\partial t} + \Delta \hat{E} = 0 \quad (2)$$

$$\hat{J} = \Delta \hat{H} \quad (3)$$

자기장인 H field를 직접 계산하면 비선형의 E-J 관계식 (4)가 추가된다.

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (4)$$

여기서, $J_c [A/m^2]$ 는 임계전류 밀도로서 초전도체의 임계전류를 해석모델에서 초전도체의 면적 $[m^2]$ 으로 나눈 값이 되며 $E_c [V/m]$ 는 임계 전기장으로서 $10^{-4} V/m$ 이다. 또한 n은 index 값으로서 초전도체의 특징에 따라 다르지만 대개 20-30 정도의 값을 가지며, 해석결과에 큰 영향을 주지는 않는다.

Table 2는 유한요소 해석에 사용된 초전도 선재의 해석 조건을 보여준다. 초전도 선재의 최소 임계전류는 100 A를 기준으로 해석을 진행하였으며 운전전류를 피크 약 80 A까지 F (I_p/I_c) 값을 0.8정도까지 해석하였다. 초전도 선재의 임계 전류는 운전 전류 이상으로 설정할 수 없다. 일반적인 초전도 선재의 두께는 $1 \sim 10 \mu m$ 로 아주 얇다. 이는 해석 시간을 길어지게 하는 요소가 된다. 따라서 FEM 해석 시간을 줄이기 위해 실제 이론상의 계산값과 해석 결과값이 크게 차이가 나지 않는 범위 내에서 해석 시간을 줄일 수 있는 0.1 mm의 두께를 적용하였다.

Table 2 Conditions of FEM analysis

Analysis conditions	Design factors
Width	4 mm
Thickness	0.1 mm
I_c	100 A
E_0	$10^{-4} V/m$
n	10
I	0 -> 86.2 A

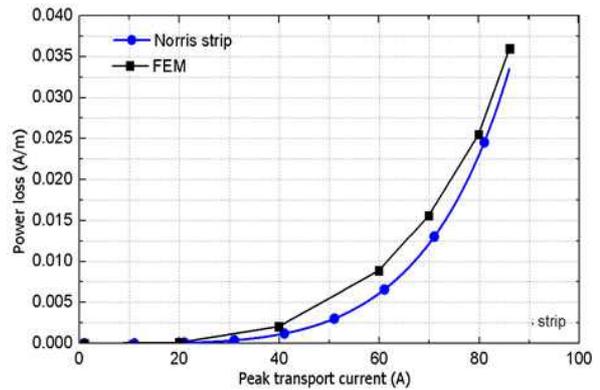


Fig. 5 Results of FEM analysis

Fig. 5는 단일 초전도 선재의 이론식과 FEM 해석 결과의 비교를 보여 준다. 비교 결과, 단일 초전도 선재의 교류 손실 해석값이 이론식의 계산 결과와 매우 유사함을 보여 주고, 본 해석 결과값을 바탕으로 여러 가닥 및 다층의 초전도 선재로 구성된 초전도 전력케이블의 유한요소 해석법의 건정성을 확인할 수 있다.

3.2 다상 초전도 전력케이블의 교류손실

단일 초전도 선재의 유한요소해석 기법을 적용하여 다상 다층 초전도 선재가 적용된 초전도 전력케이블의 교류손실 해석을 수행하였다. Table 3은 배전급 교류 전력 시스템에 적용하기 위한 초전도 전력케이블의 사양을 보여준다. Fig. 5는 단일 초전도 선재의 이론식과 FEM 해석 결과의 비교를 보여 준다. 운전전류는 50 MVA급의 실효전류 1,250 A를 적용하였고 각 상별로 여러 가닥의 초전도 선재를 구성하여 최소 임계전류값을 2,900 A로 운전전류가 임계전류의 약 50% 수준에서 교류 손실 값을 확인하였다. 일반적인 임계전류의 산정은 초전도 선재의 교류손실이 특성에서 임계전류 대비 운전전류가 약 50% 지점에서 손실이 비선형적으로 급격히 증가하게 되어 손실의 예측 가능 범위 내인 약 50% 이하의 값을 산정한다.

Table 3 Conditions of FEM analysis for distribution superconducting cable

Analysis conditions	Design factors
Width	4 mm
Thickness	0.1 mm
I_c	2,900 A
E_0	10^{-4} V/m
n	10
I	0 -> 1,250 A _{rms}

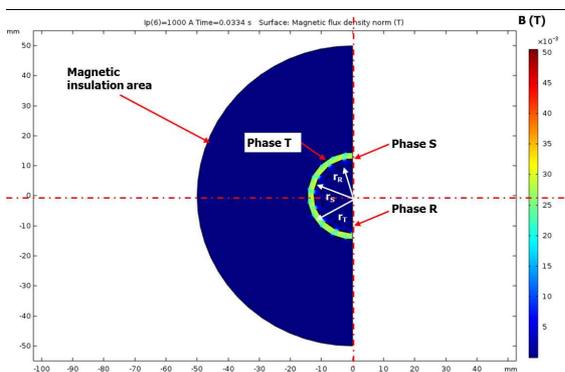


Fig. 6 Multi-phase Superconducting power cable analysis model

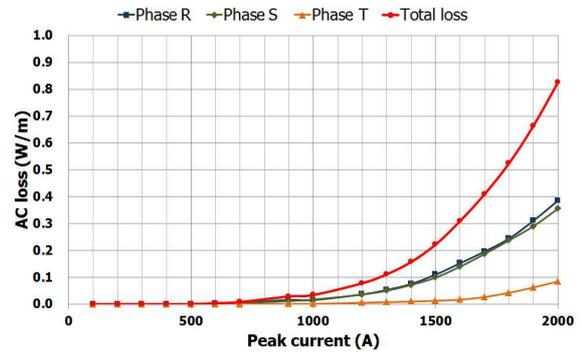


Fig. 7 Results of Multi-phase Superconducting power cable analysis

Fig. 6과 7은 여러 가닥이 들어간 초전도 선재 및 다상의 초전도 전력케이블 교류 손실 해석 결과를 보여 준다. 50MVA의 배전급 교류 시스템에 적용이 가능한 초전도 전력케이블의 교류 손실값을 보여준다. 해석 결과 총 교류 손실을 운전 전류 피크 약 1,800 A에서 약 0.6 W/m의 손실값을 나타내고 있다. 이는 초전도 전력케이블의 운전을 위한 냉각시스템의 용량을 약 1.8 kW급으로 선정시에 초전도 전력케이블의 길이를 약 3 km급의 선로를 구성할 수 있다는 것을 의미한다. 초전도 전력 케이블 시스템의 냉각 용량 선정에는 케이블 교류손실 외에도 여러 가지 항목들을 포함해야 하지만 본 논문의 초전도 전력케이블 교류손실해석 결과를 바탕으로 초전도 전력케이블 시스템의 구성에 주요 설계 인자로 적용할 수가 있다.

4. 결론

본 논문에서 저자는 대용량의 전력전송을 위한 초전도 전력케이블의 교류 손실 설계 기법 및 해석 결과를 제시하였다. 단일 초전도 선재의 이론적인 계산 결과와 해석적인 분석을 통하여 다양한 구조의 초전도 전력케이블 교류손실 해석 적용의 건정성을 보여 주었다. 초전도 전력케이블의 제조, 설치 및 운전을 위해서는 여러 가지 설계 인자와 다양한 해석이 존재한다. 그 중 교류 시스템에서 초전도 전력케이블이 가

지는 교류 손실의 해석 및 검증을 통하여 초전도 케이블의 길이 선정 및 초전도성의 발현을 위한 냉각시스템의 용량 선정에 중요한 설계 요소를 제공할 수 있다. 특히 현재 국내외적으로 활발히 진행되고 있는 초전도 전력케이블 시스템의 교류 전력 계통 연계 산업 등에서 초전도 전력케이블의 교류 손실 해석을 유용한 설계 요소로 적용할 수 있으며 국내 배전급 초전도 전력케이블 적용에 다양하게 적용될 것이다.

References

- [1] S. H. Kim, K. D. Sim, J. W. Cho, H. M. Jang, and M. W. Park, "AC Loss Analysis of HTS Power Cable With RABiTS Coated Conductor," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, pp. 2130-2133, 2010.
- [2] T. Hamajima, M. Tsuda, T. Yagai, S. Monma, H. Satoh, and K. Shimoyama, "Analysis of AC Losses in a Tri-axial Superconducting Cable," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp. 1692-1695, 2007.
- [3] S. Fukui, T. Noguchi, J. Ogawa, M. Yamaguchi, T. Sato, and O. Tsukamoto, "Analysis of AC Loss and Current Distribution Characteristics of Multi-Layer Triaxial HTS Cable for 3-Phase AC Power Transmission," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 16, No. 2, pp. 135-138, 2006.
- [4] K. Adachi, H. Ohnishi, R. Hironaga, S. Sano, K. Shiohara, N. Mido, T. Koizumi, T. Hasegawa, M. Konno, and M. Iwakuma, "Design of 22-kV 10-kA HTS Triaxial Superconducting Bus," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, No. 4, Art. No. 5400604, 2016.
- [5] A. P. Malozemoff, "The New Generation of Superconductor Equipment Power Grid,"

IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 16, No. 1, pp. 54-58, 2006.



이 석 주 (Lee Seok-Ju)

- 정회원
- 창원대학교 전기공학과 학사
- 창원대학교 전기공학과 석사
- 창원대학교 전기공학과 공학 박사
- 관심분야 : 에너지 산업, 전력시스템, 초전도 전력 응용기기, 신재생 대체에너지