

초전도 전력 케이블 시스템에서의 stabilizer와 외부 cryostat에서의 전기적 손실 해석

최석진, 송명곤, 이상진, 심기덕*, 조전욱*

위덕대학교, *한국전기연구원

The Electrical Loss Analysis on the Stabilizer and Cryostat of a Superconducting Power Cable System

S.J. Choi, M.K. Song, S.J. Lee, K.D. Sim*, J.W. Cho*

Div. of Elec. Eng., Uiduk Univ., *KERI

Abstract - 초전도 전력케이블 시스템은 일반적으로 다음과 같은 전자기적 구조를 가지게 된다. 먼저, 여러 층으로 이루어진 전력 전송을 위한 초전도 코어, 초전도 코어 고장시 전송전류를 바이패스 시키는 stabilizer 그리고 쇄외각의 절소 및 진공을 위한 2층의 cryostat으로 이루어진다. 본 논문에서는 초전도 전력케이블이 정상적으로 운행될 때 내부 stabilizer 및 외부 절소조와 진공조에서 발생하는 와전류 손실을 상용전자장 해석프로그램인 opera 3d를 이용하여 모델링한 후, 각 부분에서의 와전류 손실을 도출하여 초전도전력케이블 시스템의 설계시 stabilizer와 외부 절소조 및 진공조의 제작에 그 결과를 응용하고자 한다.

1. 서 론

1987년 액체질소온도에서 사용가능한 고온초전도체가 발견되고 1990년 중반 이후부터 실제 전력기기에 적용이 가능한 실용성 있는 고온 초전도선이 개발되면서 2000년 대에 들어선 최근에는 세계적인 케이블 제조업체와 전력 회사들이 경쟁적으로 가세하여 고온 초전도 전력케이블의 상용화 개발에 박차를 가하고 있다. 고온 초전도 전력케이블은 기존 케이블의 구리로드 대신 고온초전도 도체를 사용한 저손실 · 대용량 전력수송이 가능한 전력케이블로서 대도시의 전력 공급문제를 해결할 수 있는 환경 친화적 신개념의 전력케이블이다. 또한 종래의 전력케이블에 비해 초전도 전력 케이블은 정전용량이 작아 정전용량에 의해 송전용량이나 송전거리의 제한을 받지 않기 때문에 대전류 송전이 가능하다. 따라서 낮은 송전 전압으로도 송전용량을 확보하는 것이 가능하고, 절연설계의 간략화뿐만 아니라 회선수의 감소나, 송전손실의 저감에 의해 계통 운전경비를 절감할 수 있다.[1]

초전도 케이블이 정상적으로 통전되는 경우, 주위에는 와전류가 발생하여 손실이 생기며, 와전류 손실은 전체 시스템에 많은 영향을 끼치게 된다. 그러므로 초전도 케이블 제작의 전단계로 와전류 손실에 대한 전반적인 해석이 반드시 이루어져야 한다. 본 논문에서는 초전도 케이블에서 발생하는 와전류 손실을 상용전자장 프로그램인 opera 3d를 이용하여 모델링 한 후, 각 부분에서의 와전류 손실을 도출하였다.[2]

2. 본 론

2.1 기본 이론

2.1.1 와전류 손실 기본 이론

초전도전력케이블 시스템은 일반적으로 다음과 같은 전자기적 구조를 가지게 된다. 먼저 여러 층으로 이루어진 전력 전송을 위한 초전도코어, 사고 발생시 전송전류를 바이패스 시키는 stabilizer 그리고 쇄외각의 절소 및 진공을 위한 2층의 cryostat으로 이루어진다. 초전도 케이블 시스템의 구조 및 형상은 그림 1과 그림 2에 나타

나 있다.

케이블에 전류를 인가하면, 각 층에 권선된 고온초전도 선재에 연속적인 전류가 흐르고 자계가 형성된다. 이 자계에 의하여, 내부의 stabilizer와 2층의 cryostat에는 와전류 손실이 발생하게 된다. 진공층의 손실은 무시할 수 있고,은 모재의 와류 손실은 초전도선이 상호 절연되어 있거나 중간 절연된 경우에는 매우 작기 때문에 stabilizer에서의 손실이 전체 케이블 시스템 손실에 큰 부분을 차지한다. stabilizer 손실 해석에 대한 기본적인식은 다음과 같다.

T(두께)<<R(내경), 표피깊이=∞로 가정한 경우, i층의 초전도체는 stabilizer 중심에 y축에 평행한 축방향으로 아래 식과 같은 균일한 자계를 발생하며, 여기에서 $I_{li}=I_{lo} \sin(\omega t)$ 로서 $L_p(w=2\pi f, f=60Hz)$ 의 twist 피치를 갖는 i층에 흐르는 전류이다.

$$H_i = \frac{I_i}{L_p}$$

stabilizer에서의 손실에 기여하는 자계 H는 아래식과 같다.

$$H = \sum_i H_i, \quad H = H'/\sin(\omega t)$$

전압 U_유도는

$$U_{유도} = \int dE = \frac{\partial \phi}{\partial t} = \mu_0 \pi R^2 w H \cos \omega t$$

이며, stabilizer에 유도되는 전류의 최대치는

$$\max I_f = \max U_{유도} / Re$$

가 된다.

Re는 원주를 따라 와전류가 흐를 때, stabilizer의 저항이다. stabilizer 길이가 1이고, 저항 ρ인 경우, $Re=\rho l'/A$ 이고, $A=1*T$, $l'=2\pi R$, T는 stabilizer 두께이다. 따라서 stabilizer에 유도된 전류는

$$\max I_f = \frac{\mu_0 R u T l}{2r} H$$

가 되며, 결국 단위 길이당 유효손실은

$$\frac{P_f}{l} = \frac{\mu_0^2 \pi^3 R^3 f^2 T}{r} H^2$$

가 된다.

stabilizer에서의 손실은 모재의 저항율이 높을수록 저감되고, stabilizer의 직경에 3승배로 비례함을 알 수 있다.

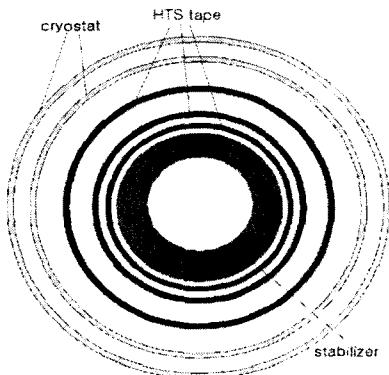


그림 1 초전도 전력케이블 시스템의 구조
stabilizer cryostat

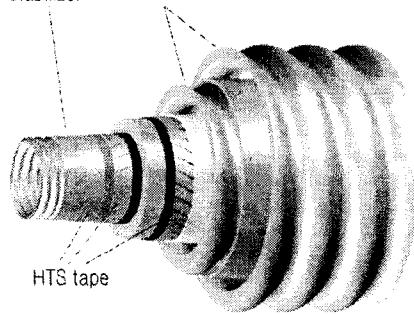


그림 2 초전도 전력케이블 시스템의 축면도

2.1.2 전자기적 해석을 위한 기본 이론

초전도 전력케이블 시스템은 Maxwell 방정식으로부터 유도되는 Poisson방정식 또는 Laplace방정식으로 모델링 할 수 있다. 이 방정식들은 경계조건을 갖는 편미분 방정식의 형태로 주어지는 데, 아주 특수한 경우를 제외하면 해석적인 방법으로 해를 구하는 것은 불가능하고, 대부분의 경우 수치해석적인 방법을 이용한다. 경계 조건을 갖는 편미분 방정식의 해를 구하는 수치해석적인 방법은 유한차분법, 경계요소법 등 여러 가지가 있지만 가장 널리 사용되는 것은 유한요소법이라 할 수 있다. 유한요소법은 방정식이 적용되는 전체 영역을 작은 영역으로 세분하고, 각 영역에서 해가 일정하다고 가정하여 방정식을 만족하는 해를 구한 다음 각 영역의 해를 일차 또는 이차 다항식을 이용하여 근사함으로써 전체 영역에서의 해를 구하는 기법이다. 현재 개발되어 있는 대부분의 상용프로그램들이 이 방법에 기초하고 있으며, 본 논문에서는 전자기장 수치해석에 상용화프로그램인 opera-3d를 사용하여 모델을 해석하였다.

교류 자기장의 해석에는 몇 가지 종류의 기법이 사용되지만 본 논문에서는 일반적으로 $A - \phi$ method로 알려져 있는 자기 벡터 포텐셜과 정전 스칼라 포텐셜을 기본으로 하여 계산 시간 및 메모리용량을 감소시키기 위해 자기 스칼라 포텐셜을 도입하는 방법을 이용하였다.[3]

2.2 해석 모델

전자장 해석 모델 구성시 고려하여야 할 것이 표피효과(skin depth)이다. skin depth는 사용 주파수가 증가할수록 유도 전류 및 자기장은 도체의 표면부근에만 분포하는 특성으로 이 효과에 의해 도체 내부의 전류 및 자기장은 도체 표면으로부터 지수함수 형태로 감소하는 분포를 가지게 된다. skin depth는 주파수와 매질의 전기 전도도 및 투자율이 증가할수록 작아진다. 본 논문에서

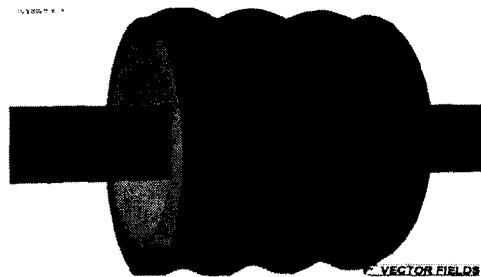
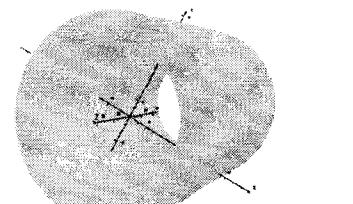
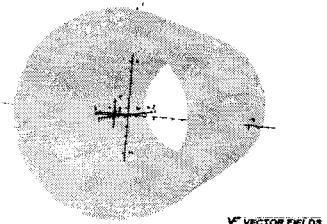


그림 3 초전도 전력케이블 시스템의 해석모델



(a) 모델1(원통형태)



(b) 모델2(원통을 나눈 형태)

그림 4 두 가지 형태의 stabilizer

도 해석의 정확도를 위하여 skin depth를 고려하여 모델링하였다. 즉, skin depth에 영향을 주는 여러 설계 파라미터들의 변화에 따라 그 모델에서의 skin depth를 계산하여 mesh 생성시 skin depth내에서 충분한 mesh를 생성할 수 있도록 프로그램화하였다. 그림 3은 opera-3d로 해석하기 위한 해석 모델의 모습이다. 초전도 전력케이블의 코어는 통전층과 shield층 모두 모델링하였다. 코어의 바깥쪽에 절연층과 진공층, 두 층으로 cryostat가 위치해 있으며, 코어의 양쪽에 stabilizer가 위치해 있다. 그림 4는 stabilizer의 모습이다. 그림 4와 같이 원통형으로 이루어진 stabilizer와 원통을 나눈 형태의 stabilizer, 두 가지 형태로 모델링을 하였다. 그림 4(b)와 같은 형태의 stabilizer는 서로 절연시켜 주거나 충분한 간격으로 나누어준다면, 자속에 수직인 와전류들을 그 각각에 제한되도록 해준다. 이와 같은 두 가지 형태의 stabilizer에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 비교하여, 와전류 손실을 줄이는 데 적합한 stabilizer의 형태를 찾도록 하였다. 해석을 위한 입력은 통전전류는 1260[A]rms, 주파수 60[Hz]로 하였으며, 해석영역은 z축 방향으로 40mm로 정하였다.

2.3 해석 결과

그림 5와 그림 6은 모델 1과 모델 2의 stabilizer를 가지는 초전도 전력케이블 시스템의 자장분포를 나타낸 그림이다. 해석 결과를 보면 초전도 케이블과 실드층 사이에 대부분의 자장이 존재하며, 내부 영역에 수직방향의 자장이 형성됨을 알 수 있다.

표 1 와전류 손실 해석 결과

구조물 모델	Stabilizer [W m]	Inner Cryostat [W m]	Outer Cryostat [W m]
모델1	0.10188	1.5721e-4	2.0212e-5
모델2	0.002638	1.6529e-4	2.1245e-5

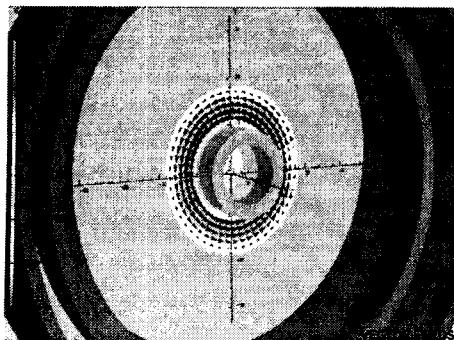


그림 5 초전도 전력 케이블의 자기장 분포(모델1)

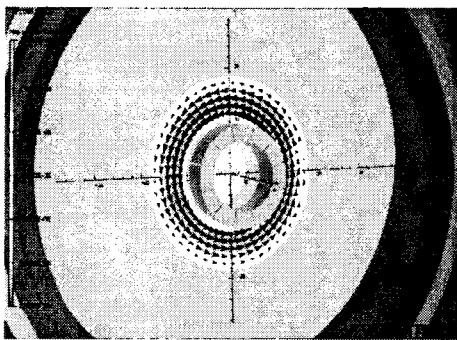


그림 6 초전도 전력 케이블의 자기장 분포(모델2)

stabilizer만을 확대하여 stabilizer에서의 자기장 및 와전류 분포 나타낸 것은 그림 7과 같다. 표 1은 와전류 손실 해석결과이다. 기본 이론에서 예상했던 대로 초전도 케이블 바깥쪽의 cryostat에서의 손실은 매우 작은 값이 나타났으며, stabilizer에서의 손실이 와전류 손실의 대부분을 차지하였다. 해석모델은 앞에서 언급한 대로

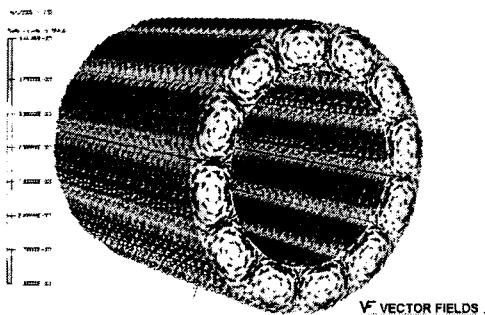
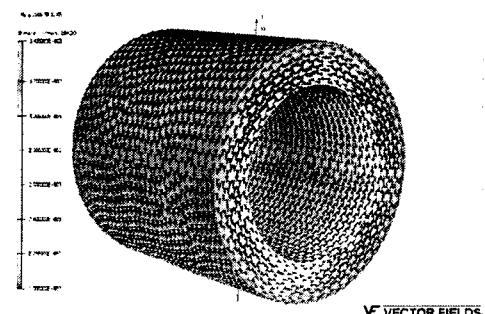


그림 7 stabilizer에서의 자기장 및 와전류 분포

shield층이 존재하며, 이 shield층의 영향 때문에 초전도 케이블 코어의 바깥쪽에는 자장이 매우 작게 형성된다. 또한, 초전도 시스템의 구조상 초전도 케이블 코어와 cryostat과의 거리가 상당히 떨어져 있기 때문에 cryostat에서의 손실은 해석결과와 같이 매우 작은 값이 나오게 된다. stabilizer에서의 손실값들을 보면 모델1과 모델2는 약 50배의 큰 차이를 보였다. 모델1과 모델2의 stabilizer는 같은 직경과 두께를 가지고 모델링되어 있다. 모델1의 경우 와전류가 하나의 루프를 형성해 나타나지만, 모델2의 경우 나누어져 있는 각 부분별로 와전류가 나타나게 된다. 모델2의 stabilizer는 0.078mm의 간격으로 10개로 나누어져 있다. 실제작이 가능한 범위에서 stabilizer의 나누는 개수를 최대한 늘리는 것이 초전도 케이블 시스템에서 와전류 손실을 줄이는 데 유리함을 알 수 있다. 또한 재료적으로는 큰 투자율을 갖고 작은 도전율을 갖는 재료를 사용함으로써 와전류손실을 줄일 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 초전도 전력케이블 시스템의 stabilizer와 외부 cryostat에서의 와전류 손실을 도출하였다. cryostat의 경우 와전류 손실에 그리 큰 영향을 끼치지 않았으며, 대부분의 와전류 손실은 stabilizer에서 발생하였다. 또한 stabilizer의 형태에 따라 와전류 손실값이 큰 차이를 보였다. 본 논문은 입력값에 따라 초전도 케이블과 stabilizer, cryostat을 모델링할 수 있는 변수화 모델을 구축하였으며, 이 변수화 모델을 이용하여 stabilizer와 cryostat의 제작에 그 결과를 응용할 수 있도록 하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 성기철, “고온초전도 전력케이블의 개발동향 및 전망”, 전력케이블 심포지엄, 2002
- [2] “초전도 기술”, 제 8회 국제 초전도 산업 summit(ISIS-8) 발표자료, October, 1999
- [3] Vectorfields, “OPERA-3d Reference Manual”. Vectorfield s, v9.0, 2003