

초전도케이블 해석용 모델링에 관한 기초연구

김남열*, 정채균, 이종범
원광대학교

A Basic Study on the Modeling for Analysis of Superconducting Cable

Nam-Yoel Kim*, Chae-Kyun Jung, Jong-Beom Lee
Wonkwang University

ipower@wonkwang.ac.kr

Abstract - It is very important to analyze the superconducting power cables by the modeling for correct and reasonable cable design suitable for the domestic situation of power systems. This paper describes the basic modeling for superconducting power cables using ATPDraw. And also it is shown the line constants of cold dielectric coaxial type which is one of the HTS cables. It is compared with the line constants of general two kinds of power cables(OF, XLPE).

1. 서 론

오늘날의 지속적인 경제성장에 따라 무공해 양질의 에너지 수요가 급격히 증가하는 추세에 있으며 특히 에너지 중에서도 전기에너지는 다른 에너지로의 변환이 용이하고 효율적이고 미세한 제어가 가능하다는 특징 때문에 그 수요는 비약적으로 증대하고 있다[1].

앞으로 지속적인 기술개발이 이루어질 것을 감안하더라도 현재의 가공송전이나 지중 케이블 송전 등과 같은 기존의 송전방식에서의 송전 회선수의 증가, 발전소나 대용량 변전소의 건설로서는 전체적인 송전량의 증가율은 미비할 것으로 보인다. 그리고 지속적인 도심지의 산업화, 빌딩화 및 아파트 단지의 냉 난방시설의 증가로 인해 공급의 한계에 이르게 될 것으로 보이고 그에 따른 경제적, 기술적인 문제, 환경적인 문제, 용지 확보문제 등이 발생하게 되어 급증하는 전력수요에 대비한 새로운 대전력 수송방법의 개발 필요성이 강하게 요구되고 있다. 이 문제의 해결을 위한 초전도 케이블(Superconducting cable)은 송전용량, 송전거리는 물론 송전손실, 소요면적면에서 다른 케이블과는 비교가 안될 정도로 우수한 특성을 가지고 있다. 1988년까지의 결과로 LN₂를 이용하여 일정온도 이상에서 사용 가능한 고온초전도체가 미국에서 발견됨으로써 경제성, 신뢰성이 우수한 송전계통 실현을 기대하

는 가운데 그 관심이 집중되고 있다. HTS 케이블은 기존의 관로나 전력구에 실질적으로 적용이 가능하면서도 그 용량을 증가시킬 수 있는 것으로 실용성 면에서 매우 우수하다[2].

현재 국내에서는 Bi-(Pb)-Sr-Cu-O인 Bi-2223과 BiCCO-2223등의 초전도 선재나 이를 이용한 고온 초전도 기기와 초전도케이블의 자계에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 초전도 특성을 이용하여 연구된 전력기들에 도입하기 위한 다양한 노력들이 진행 중에 있다. 이와 같은 활발한 연구로 인하여 2010년에는 시장규모가 수백억 달러가 될 것으로 보고되고 있다[3]. 그러나 초전도 케이블 분야에서는 부분적인 특성만을 고려하는 이론적인 연구가 주류를 이루고 있는 실정이라서 외국만큼의 실증적인 모델링을 토대로 한 연구가 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 국외에서 구체화된 여러 개의 모델중의 하나인 Cold dielectric Coaxial type중의 하나인 Common type을 구성하였으며, 케이블의 선로정수를 계산하여 기존의 OF, XLPE 케이블과 비교 검토하였다. 본 모델에 통한 지속적인 연구를 국내 배전급 초전도 케이블 선로에 적용할 수 있도록 하기 위한 노력이 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

2. 본 론

2.1 케이블의 종류.

초전도 케이블의 종류는 크게 저온 초전도(LTS) 케이블과 고온 초전도(HTS) 케이블이 있는데, 저온 초전도 케이블은 고온 초전도 케이블이 개발되기 이전에 액체 헬륨을 냉매로 사용하여 구성되었다. 그 후에 새롭게 개발된 고온초전도 케이블은 액체 질소를 냉매로 사용하기 때문에 저온 초전도체와는 달리 임계온도가 높아 비교적 저렴하고 취급이 유리하다. 즉 저온 초전도 케이블은 10K에서 송전을 하는데 반하여 고온초전도 케이블은 액체 질소가 끓는 점인 77K 가까이에서 송전이 가능하다. 그리고 초전도체는 폐회로 루프안에서 액체 질소에 의해서 냉각되어 사용되기 때문에 복잡하지 않고 저온 초전도(LTS)

케이블의 다단식 냉각기보다 유지하는 비용이 저렴하다.

한편, 고온 초전도 케이블에는 그 종류가 Warm Dielectric (WD) 과 Cold Dielectric Coaxial (CDC)이 있다. 이에 대한 구성도는 그림 1과 같다. 그리고, 설비면과 운전면에서의 WD 와 CDC의 장단점을 표 1에 나타내었다.

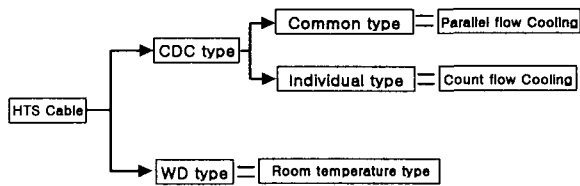


Fig. 1. A kind of cable system

Table 1. Characteristics of HTS cable

특성 종류	장점	단점
WD Type	<ul style="list-style-type: none"> *전송능력이 기존의 두배 이상 *단도체로 구성 *초전도 테이프 절감 *초기설치 비용 저렴 	<ul style="list-style-type: none"> *냉매가 중앙에 존재 *냉매의 순환 불가 *금속, 상성분 전기적 손실 큼 *높은 운전비용
CDC Type	<ul style="list-style-type: none"> *송전용량, 능률이 큼 *냉매의 리턴으로 최대 활용 *자계차폐효율 양호 	<ul style="list-style-type: none"> *HTS 테이프 비용 크다 *크기가 커짐

2.2 케이블의 구성

HTS 물질들은 초전도체적인 성질을 나타내기 위해서 매우 낮은 온도인 영하 200 °C 정도를 유지해야 하고 지속적으로 온도를 유지해 주기 위해서 열적 절연과 냉각 시스템이 뒷받침되어야 한다. 그리고 WD의 경우에는 전체적인 도체 구조는 기존의 케이블 중 OF 케이블과 유사하며 현재 포설된 지중 케이블 시스템에서 사용되어 오고있는 설비를 그대로 사용하는 것이 가능하다. 오히려 기존의 케이블 크기보다 작아서 공간 활용 면에서 우수하다. 케이블의 구조는 WD와 CDC가 서로 다른 구조를 가지고 있으며 CDC에서도 Common type 과 Individual type으로 나눌 수 있다. HTS 전력 케이블의 종류를 나누는 기준은 극저온 유지장치의 위치이다. WD의 경우에는 극저온 유지장치가 초전도체 바로 표면에 위치하지만 CDC의 경우에는 파이프에 위치하는 경우와 각각의 상도체 상에 위치하는 경우로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 CDC 중에서 Common type을 모델로 선정하여 구성하였다. 케이블의 중심에 LN₂가 흐르기 위한 홀이 형성되어 있으며 그 주위로 former가 존재하며 도체, 전기적인 절연체, 쉴드레이어, 스킴드와이어, 극저온 유지장치, 파이프 등으로 구성된다.

2.2.1 액체질소(LN₂)

기존의 저온 초전도체는 액체 헬륨을 냉매로 사용하였으나 현재의 고온초전도체는 냉매로서 액체질소를 사용하는데, 저온 초전도체와는 달리 임계온도가 높아 고온 초전도체 케이블의 경우 비교적 저렴하고 취급이 유리하기 때문이다. 액체 질소는 케이블의 초전도 테이프를 임계온도 내에서 최대의 송전율을 유지시키기 위해 송전시 초전도 테이프에서 발생하는 열과 전기적인 손실에 의한 열을 제거하는 역할을 수행한다. 본 논문에서 액체 질소는 냉각기에서 나와 former로 감싸져 있는 중앙 통로를 통하여 이동하며 케이블을 냉각시키고 다시 파이프와 삼상간이 통로를 통하여 리턴되어 냉각기로 되돌아오는 순환적인 동작을 하는 것으로 하였다.

2.2.2 Former

former는 초전도체의 가장 중심에 위치하며 LN₂의 이동 통로를 지지해주는 단순한 기능을 수행하며 개발 초기에는 동을 사용하였으나 여러 연구를 통해서 동보다 스테인레스가 우수함이 밝혀져 현재에는 스테인레스를 사용하고 있다. 또한 former는 유연성을 갖기 위해서 주름관 형식으로 제조되었기 때문에 어느 정도 커브를 갖는 관로나 전력구에도 설치가 가능하다.

2.2.3 초전도체

초전도체는 알루미늄 former의 바로 외곽으로부터 BS-2223/Ag 나 BSCCO-2223/Ag의 초전도 테이프를 이용하여 일정각도와 방향성을 갖는 나선형으로 감겨져있다. 규격은 3.2-3.5mm의 폭과 0.2mm의 두께를 갖으며 하나의 초전도선에 흐를 수 있는 전류는 대략 수십 암페어 정도이다. 그러므로 일반 다중연선을 이용한 초전도 케이블에서도 그 전송용량을 높이기 위해서는 2차 혹은 3차 케이블까지를 사용하듯이 CDC케이블에서도 그 전송용량을 높이기 위해서는 사용되는 용량에 따라 여러개의 레이어층으로 나눌 수 있으며, 그 사이는 절연테이프로 분리를 시키고 있다. HTS에서의 초전도 테이프는 주로 액화질소의 비등점(77K)에서 작동되는데 만약 외부에서 일정량 이상의 열이 가해지면 테이프의 온도가 상승한다. 초기 상승온도가 미비하다고 하더라도 초전도테이프는 적은 열에도 민감하기 때문에 온도가 상승하다가 일정한 온도에 도달하면 초전도체 내의 초전도 상태는 깨어지게 되고 초전도 선재는 그 특성을 잃어버리고 상전도 상태가 된다. 상전도 상태로 변환 부분에서는 시간이 지나면서 외부로부터 침입했던 열이 없어져도 주울열에 의한 가열이 이루어져 인접한 선재부분의 초전도 상태를 파괴하면서 열이 전파하게 되는데 이를 퀘칭현상이라 한다. 이 퀘칭현상을 방지하기 위해서 만약 가까운 부분에 온도가 더 낮은 부분이 존재하면 그곳을 통해 흐르는 특성을 이용하여 안정화재를 사용하게 된다. 보통 안정화재로는 은(Ag)을 사용하는데 퀘칭현상이 발생하

였을 시에는 오히려 은의 저항보다 초전도체의 저항이 훨씬 커지게 되어 초전도체로 흐르던 전류가 켄치 후에는 주로 은 매트릭스로 흐르게 되므로 켄치 후에 초전도테이프에서 발생하는 주울 열은 주로 은의 비저항에 의존한다. 일반적인 상식으로 초전도테이프 내에서는 저항이 존재하지 않는 것으로 생각되지만 아주 작은 저항은 존재하게 되므로, 본 논문에서는 그 저항을 충분히 고려하였다. 그리고, 만약 초전도 테이프가 액체질소에 함침이 되었다면 흐르는 전류에 의한 켄치현상이 일어나지 않고 열량이 침입한 부위 역시 즉각 냉동이 된다. 즉 중심부의 former가 완전히 냉매를 차폐하기보다는 former를 통해 초전도체를 함침 시키고 절연체전까지 퍼지게 한다면 켄치에 대한 영향을 줄일 수 있을 것이다. 하지만 여기에서 냉매의 주 통로는 여전히 former 내부가 된다.

2.2.4 절연체

전기적인 절연은 액체 질소와 종이간 절연의 조합으로 인해서 이루어진다. 케이블에 전류가 유입되는 동안 각각의 레이어들의 상호 전자계가 원인이 되어 발생하는 각각의 교류손실을 줄이기 위해서 도체의 레이어 사이에는 절연을 위한 kapton 테이프가 사용된다.

2.2.5 쉴드 레이어

CDC의 큰 장점중의 하나인 쉴드 레이어는 극저온 절연체의 바로 표면에 감겨있으며, 상도체로부터 생성된 자계를 각각의 쉴드 레이어가 분담하게 된다. 쉴드 레이어에 흐르는 전류의 크기는 상도체 레이어와 같은 값을 가지고 있으며, 그 흐름이 반대이기 때문에 리턴 도체라고도 한다.

2.3 HTS 케이블 구성

본 논문에서는 위에서 제시한 케이블의 구성성분들을 이용하여 기본 케이블 모델을 구성하였다. 모델은 1구 3상의 형태를 하고 있으며, 각 상의 형태는 OF 케이블과 유사한 형태를 하고 있다. 또한 모델을 이용한 선로정수를 구하고 기존 케이블의 선로정수와 비교함으로써 앞으로의 배전급 초전도 선로 계통 연구에 지속적으로 사용하고자 한다.

초전도 테이프는 두께에 따른 저항률을 이용하여 본 선로의 저항률을 계산하면 $10 \times 10^{-23} \Omega \cdot m$ 이다. 그리고 액체질소의 비유전율은 77K인 임계온도에서 1.431을 갖는다. 그리고, 케이블에 대한 규격은 표 2와 같다.

Table 2. System parameters

항목	규격	항목	규격
former 외경	16mm	쉴드층	10mm
케이블 코어외경	39mm	보호층	2mm
케이블 외경	136mm	단열층	34mm
절연층	7mm	방식층	3.5mm

표 2의 파라미터 값들을 이용하여 ATPDraw의 선로정수 계산 프로그램인 ATP-LCC상에서 모델링을 구성하여 선로정수를 구한다. 조건은 본 모델은 지표면에서 1m 지하에 설치되며 대기 저항률을 $100 \Omega \cdot m$ 로 하고, 주파수는 국내기준인 60Hz로 하였다.

그림 2는 지금까지의 데이터 값들을 사용하여 ATP-LCC 프로그램 상에서 데이터를 상세 입력한 것이다.

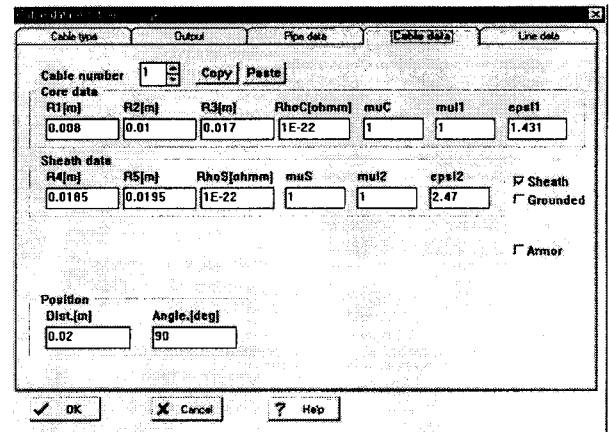


Fig. 2. Input window

위의 입력화면은 단지 케이블의 상도체 구성을 위한 입력 화면이며, 파이프 도체와 기타 입력사항은 각각의 채널에 입력된다. 그림 3은 위의 그림 2를 프로그램 윈도우 상에서 실행시켰을 때의 케이블 구성의 단면도를 나타낸 것이다.

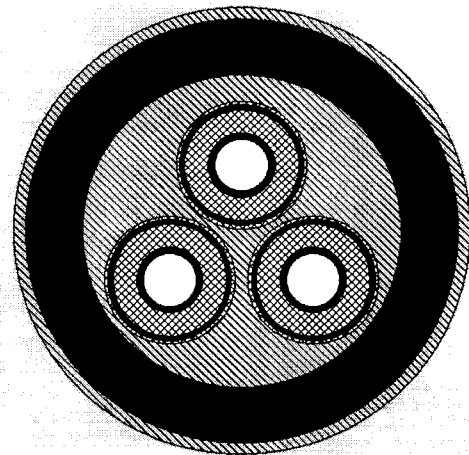


Fig. 3. Structure of HTS cable in ATP-LCC

그림 2와 그림 3을 고려한 선로 정수를 구하고 $1200mm^2$ 의 OF 케이블과 XLPE 케이블의 선로정수 중 A상과 초전도 케이블의 A상을 비교하였다. 표 3은 비교 결과이다. 표 3의 결과에서 볼 수 있듯이 초전도 케이블은 임피던스 면에서 매우 낮은 값을 나타내고 있으며 전파속도 또한 다른 케이블과 10배의 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 3. Line constants

케이블 선로정수	OF 1200[mm ²]	XLPE 1200[mm ²]	HTS cable
임피던스(Ω/m)	$9.58 \times 10^{-5} + j1.74 \times 10^{-4}$	$9.14 \times 10^{-5} + j1.62 \times 10^{-4}$	$3.89 \times 10^{-12} + j4 \times 10^{-5}$
특성 임피던스(Ω)	15.6 - j3.93	10.6 - j2.79	26.6 - j1.29 × 10 ⁻⁶
특성 어드미턴스(S)	$6.03 \times 10^{-2} + j1.52$	$8.86 \times 10^{-2} + j2.34$	$3.76 \times 10^{-2} + j1.83$
전파속도(m/sec)	3.16×10^7	2.29×10^7	2.5×10^8

즉 본 논문에서 모델링한 초전도 케이블은 규격과 크기 등을 고려하여 볼 때에 선로정수 상에서 충분한 초전도의 특성을 나타내고 있다고 할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 CDC 케이블을 모델링하기 위해서 케이블의 구조와 배열 등을 선정하였으며 이를 이용하여 분석한 결과는 다음과 같다.

- [1] 초전도 케이블 연구를 위한 케이블 모델링을 시도하여 적절한 모델을 제시하였으며 케이블 내에서의 초전도의 특성을 확인하였다.
- [2] 기존의 1200mm² OF 케이블, XLPE 케이블을 함께 모델링을 실시하여 본 논문의 선로 정수와 비교 검토하였다.

본 연구는 과학기술부 21C 프론티어연구개발사업단의 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] N.Kelley, M.Nassi, L.Masur, "Application of HTS Wire and Cables to Power Transmission :State of the Art and Opportunities", IEEE, pp. 448-454, 2001
- [2] Jeffrey O. Willis, "Superconducting Transmission Cables", IEEE Power Engineering Review, pp. 10-14,2000
- [3] 최상봉, 성기철, 조전욱 외4, "컴팩트형 고온 초전도 전력 케이블의 기대효과와 경제성 평가", 한국초전도·저온공학회논문지,3권2호,pp10-14, 2001
- [4] J.P.Stovall, J.A.Demko, P.W.Fisher, M.W.Gouge, " Installation and Operation of the Southwire 30m High-Temperature Superconducting Power Cable", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.11, No.1,2001
- [5] J.A.Demko, J.W.Lue, M.J.George, " Partical AC Loss and Thermal Considerations for HTS Power Transmission Cable Systems",IEEE Trans. on Applied Superconductivity ,Vol.11, No.1, 2001