154kV 초전도케이블 모델링과 해석

최종기, 정채균 , 양병모
한국전력공사

Modeling and Analysis of 154kV Superconducting Cable

Jong-kee Choi, Chae-gyun Jung, Beyong-mo Yang
Korea Electric Power Corp.

Abstract - 초전도 전력케이블은 기존 케이블에 비해 많은 전력을 공급할 수 있기 때문에 노후 전력케이블 교체시 대용량 송전을 가능하게 하는 대안으로 관심이 많아지고 있다. 초전도 케이블은 전기적인 특성이나 냉각시스템을 필요로 하는 등 기존 케이블과 다른 많은 특성을 가지고 있기 때문에 실계통에 투입하기 이전에 케이을 보호 등 새롭게 검토해야할 사안들이 있다. 이를 위해서는 초전도 전력케이블 모델 및 이를 이용한 전산모의가 필수적이지만, 새로운 요소인만큼 이에 관한 자료들이 많지 않은 실정이다. 본 논문에서는 전력계통 과도해석에 널리 사용되는 EMTP를 이용하여 초전도 전력케이블을 모델링하고 전압-전류 특성을 모의한 사례를 제시하고자 한다.

1. 서 론

초전도 전력케이블은 기존의 전력케이블에 비해 단위면적당 송전용량이 3~4배에 달하며 케이블의 전기저항에 의한 손실이 거의 없다는 장점을 가지고 있다. 이 때문에 날로 심각해져가는 송전용량의 제약과 부지확보의 문제 등의 해결책으로서 초전도 전력케이블에 대한 관심이 고조되고 있다. 초전도 전력케이블의 실용화를 위해서는 실제 계통에 투입했을 때의 영향에 관한 다양한 연구가 선행되어야 하기 때문에 이를 위한 전산모의가 필수적이다.

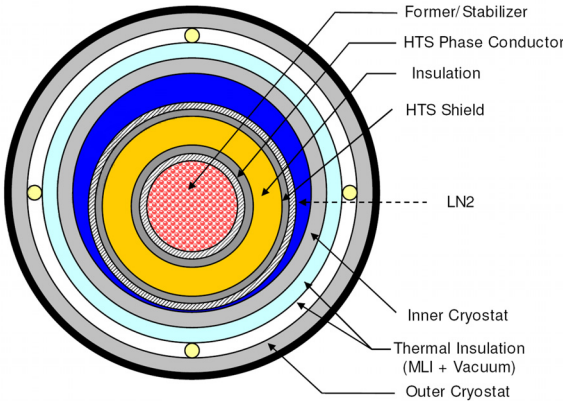
EMTP(Electro-Magnetic Transient Program)는 전력계통 과도현상 해석에 널리 사용되어온 프로그램으로서 많은 전력계통 요소 모델들을 제공하고 있다. 본 논문에서는 EMTP의 무료 버전인 ATP (Alternative Transient Program)와 그래픽 전처리기인 ATPDraw를 이용하여 154kV HTS (High Temperature Superconductor) 케이블을 모델링하였다. 구축된 모델을 이용하여 초전도케이블의 임계전류 측정실험을 재현하였으며 전류크기가 증가할수록 초전도체로 흐르는 전류 크기는 특정한 값으로 포화되고 Fomer로 흐르는 전류가 증가하는 현상을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 154kV 초전도 케이블의 구조와 특성

그림 1은 154kV HTS 케이블 구조를 보인 것이며, 주요한 구성 요소들을 아래와 같다.

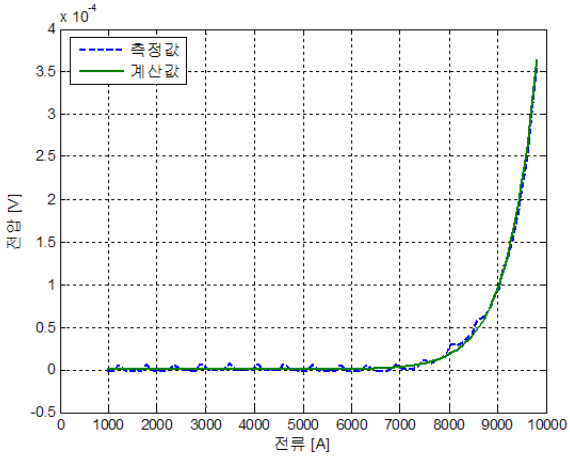
(1) HTS 테입 보호를 위한 stabilizer (325mm^2 Former)
(2) HTS 상도체 (HTS 테입 4층, 총 77본)
(3) HTS 쉴드 (HTS 테입 2층, 총 80본)
(4) Inner & outer Cryostat



<그림 1> 154kV 초전도 전력케이블의 구조

그림 2는 125 cm의 154kV HTS 케이블 상도체의 전압-전류 특성 실험결과와 fitting함수를 보인 것이다. HTS 상도체의 임계전류는 내부 전계의 세기가 1 μV/cm를 초과하기 시작하는 전류로 정의되며 그림 2의 측정결과로부터 도체 전압강하가 125 μV가 되는 임계전류값은 9130 A 이다.

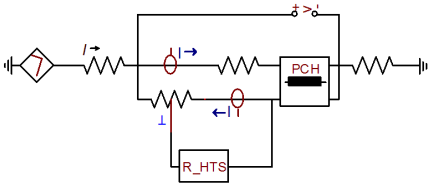
이처럼 초전도케이블이 초전도상태에서 정상상태(normal state)로 천이되는 특성을 모의하는 한가지 방법은 측정된 전압전류 특성을 추종하는 함수를 식별하고 이 함수를 이용하여 초전도케이블의 시변 저항으로 모의하는 방법이 있다. 이 방식의 문제점은 전류크기가 시험한 값 이상으로 커지는 경우에는 외삽에 의해 전압-전류 특성을 추정하게 된다는 점이다. 이 경우 초전도케이블의 물리적인 특성에 맞지 않는 비정상적인 결과가 초래될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 초전도케이블의 물리적인 구조, 즉 Former가 병렬로 연결된 회로를 모델에 반영하는 방법을 시험하였다.



<그림 2> 초전도 전력케이블 상도체의 전압-전류 특성

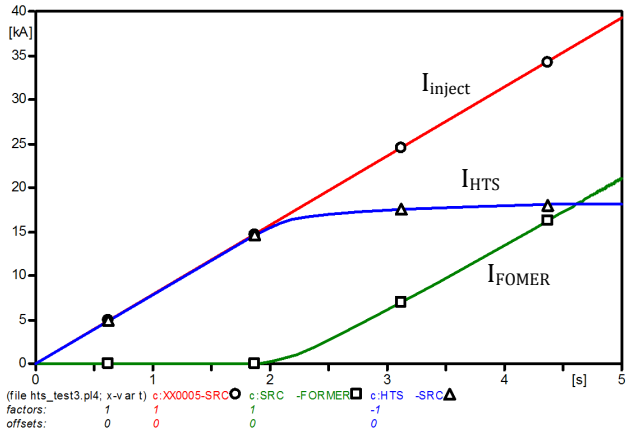
2.2 초전도 케이블 모델링

그림 3은 ATPDraw 에서 HTS 케이블의 상도체를 표현하는 등가회로를 보인 것이다. ATP의 CABLE CONSTANTS 보조루틴을 이용하여 2 phase (Former와 HTS 상도체)의 PI등가회로 정수를 구하고 HTS 상도체의 저항 및 인덕턴스를 매우 낮은 값으로 수정함으로써 HTS의 저항특성을 모의하였다. 전류 증가에 따라 초전도 상태(superconducting state)에서 보통 상태(normal state)로 전이되는 현상을 모의하기 위하여 Type-91 TACS 제어 비선형저항을 HTS 상도체에 직렬로 연결하고 MODELS 언어를 이용하여 그림 2의 fitting함수를 이용하여 매 계산스텝마다 저항을 계산하여 이를 Type-91 비선형 저항값으로 세팅하도록 하였다.



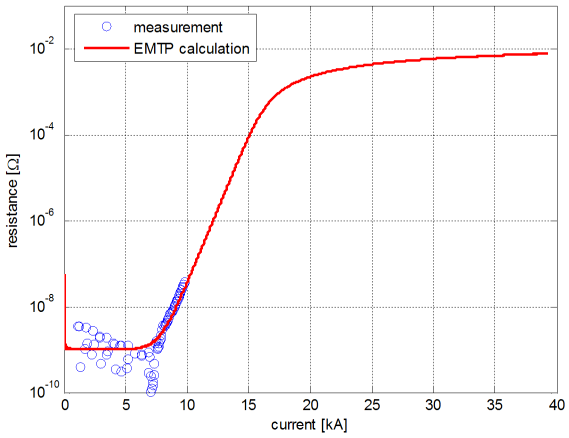
<그림 3> 초전도 전력케이블 상도체의 등가회로

그림 4는 EMTP 모델에서 HTS 케이블 상도체의 임계전류 측정실험을 재현한 결과를 보인 것이다. RAMP 함수를 이용하여 시험전류를 40 kA 까지 점진적으로 증가하였으며, 약 15 kA 부근까지는 HTS 상도체로만 전류가 흐르나, 전류가 그 이상이 되면 HTS 테입이 일반 상태(normal state)로 상태 전이되면서 Former가 전류를 분담하기 시작하는 특성을 확인할 수 있다. 상도체의 전압-전류 계산곡선과 측정결과의 비교를 그림 5에 보였다.

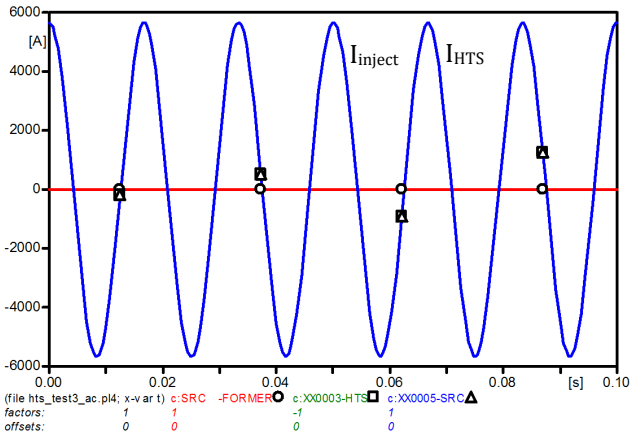


〈그림 4〉 주입전류 및 HTS케이블 전류분포 (DC)

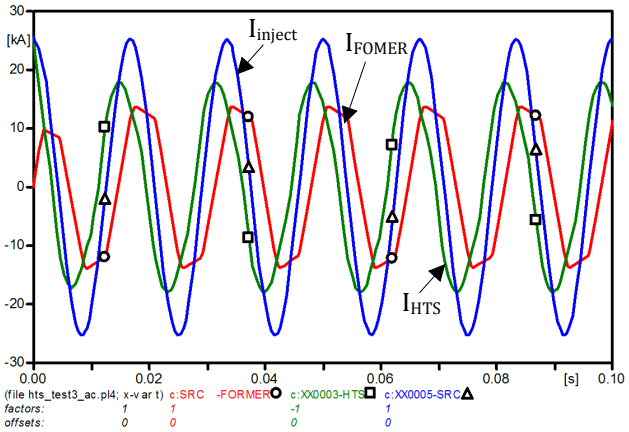
그림 5는 초전도케이블의 임계전류 측정실험(그림 2 참조) 결과를 이용하여 상도체 전류에 따른 저항특성을 보인 것이며, 상도체를 흐르는 전류가 커질수록 일정한 저항값, 즉 Former의 저항값으로 수렴하는 특성을 볼 수 있다.



〈그림 5〉 HTS 케이블 상도체의 전류-저항 특성



(a) I_{rms} = 4 kA



(b) I_{rms} = 18 kA

〈그림 6〉 주입전류 및 HTS 케이블 전류분포 (AC)

그림 4는 초전도 케이블에 교류를 인가했을 때 주입전류의 크기에 따라 초전도체 전류 및 Former 전류 분포 사례를 보인 것이다. 주입전류 합계가 6 kA 인 경우에는 100% 초전도체로 전류가 흐르나 전류크기가 증가한 경우에는 초전도체의 상태가 일반 상태(normal state)로 천이되어 Fomer로도 상당한 전류가 흐르게 됨을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 ATP와 ATPDraw를 이용하여 154kV 초전도케이블을 모델링하였다. ATP의 CABLE CONSTANTS보조루틴을 이용한 Pi등가회로를 기본으로 하여, Fomer와 초전도체가 병렬로 연결되었을 때 초전도체가 초전도상태에서 일반상태로 천이되는 특성을 표현하고자 하였다. 초전도케이블의 임계전류 측정실험을 전산모의로 재현하였으며 실측한 곡선과 유사함을 확인하였다. 임계전류 측정실험은 고장전류 크기에 대할만한 큰 전류를 인가하지 않기 때문에, 실측치를 넘어서는 전류크기에서의 초전도케이블 특성의 모의가 가능하였다. 향후 연구 과제로는 전류 및 손실 증가에 따른 온도상승과 이로 인한 초전도체 특성 변화(ex. 임계전류 감소), 자계에 의한 영향 등이 추가로 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 21C 프로티어사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] 김재호, 박민원, 심기덕, 조전욱, 유인근, “초전도 전력케이블의 전력계통 적용을 위한 고장전류 특성에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회, 2007

[2] 김재호, 박민원, 심기덕, 조전욱, 유인근, “고온초전도선을 이용한 초전도 전력케이블의 실시간 시뮬레이션 알고리즘 개발”, 한국초전도저온공학회 논문지, 8권 3호, 2006.9

[3] 이현철, 황시돌, 이근준, “PSCAD/EMTDC를 이용한 불평형 부하에서의 초전도케이블 운전특성 해석”, 대한전기학회 논문지, 57권 10호, 2008.10

[4] M.A.Young, M.J.Gouge, M.O.Pace, J.A.Demko, R.C.Duckworth, J.W.Lue, Aly Fathy, "An investigation of the current distribution in the Triaxial Cable and Its Operational Impacts on a Powre System", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2005

[5] L.Rostila, J.Lehtonen, M.Masti, R.Mikkonen, "Fault current analysis for a superconducting 1 kA YBCO cable", 7th European conf. on Applied Superconductivity, 2006

[6] J.W.Cho, J.H.Bae, H.J.Kim, K.D.Sim, S.H.Kim, H.M.Jang, C.Y.Lee, D.W.Kim, "Development of a single-phase 30 m HTS power cable", Croygenics, 2005.11