

HTS 케이블의 실계통 적용을 위한 EMTDC 모델개발

윤재영, 최홍관, 김종율, 이승렬
한국전기연구원

Development of EMTDC model for applying HTS Cable to KEPCO system

Yoon, Jae-Young Choi, Heung-Kwan Kim, Jong Yul Lee, Seung-Ryul
Korea Electrotechnology Research Institute

1. 서론

초전도케이블은 기존 상전도 케이블에 비하여 송전용량, 관로입지, 신뢰도, 포설의 유연성, 송전손실 및 환경측면에서 많은 장점을 지니고 있어서 향후 대용량 전력 수송 및 대도시와 같은 고부하 밀도 지역에서의 전력공급 방안으로서 각광받고 있다.[1] 이러한 이유로 전 세계적으로 초전도 케이블을 개발하기 위한 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다.[2~3] 우리나라에서도 154kV급 고온초전도케이블(HTSC : High Temperature Superconductivity Cable) 개발을 최종 목표로 하여 현재 연구개발이 이루어지고 있다.[4] 이와 같이 초전도 케이블을 개발하기 위한 연구는 활발하지만, 그 적용대상인 우리나라의 전력계통 측면에서의 각종 영향분석을 위한 연구는 송전용량 측면에서의 간략한 검토를 제외하고는 극히 미미한 실정이다.[5] 초전도 케이블 적용시의 다양한 현상분석을 위해서는 고장전류로 인한 초전도 케이블의 초전도 파괴현상(Quenching state) 및 초전도 복귀현상(Recovery state)이 정확하게 모의되어야 한다. 그러나 현재까지 개발되고 있는 초전도 케이블에서 이와 같은 초전도 파괴와 복귀현상에 대한 정확한 현상론적 고찰이 없다. 이를 위해서는 순시치해석(EMTP류) 프로그램을 적용해야 하지만 EMTP류의 프로그램에서도 이러한 초전도 현상을 정확하게 모의할 수 있는 모델이 제공되지 않고 있으며, 또한 개발되지 않고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 EMTP류의 하나인 EMTDC에서 초전도 케이블을 모의할 수 있는 방법론을 고찰하고 이와 더불어 초전도파괴 및 복귀현상을 해석할 수 있는 해석모델을 개발하였다.

2. EMTDC 초전도 케이블 모델링

초전도케이블은 크게 WD(Warm Dielectric) 및 CD(Cold Dielectric) 방식으로 구분되는데 현재의 개발 추세가 CD(Cold Dielectric) 방식이므로 이를 기준으로 하여 모의하였다.[6] 154kV HTSC의 경우, 3상 케이블 형태로 개발된다고 가정할 때 EMTDC 모의에서는 다음과 같은 문제점을 지니고 있다.

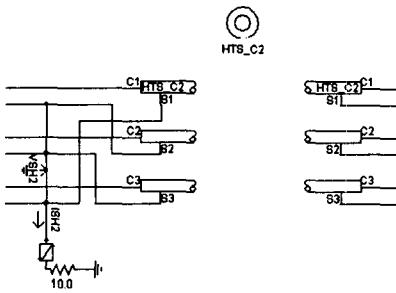
- EMTDC 프로그램에서는 파이프형(Pipe Type) 케이블을 모의할 수 없다.[7]
- 기존 OF 혹은 CV 케이블 보다 초전도 케이블은 훨씬 복잡한 형상을 가지고 있다. (각종 Shield, Layer, Former 등)
- 케이블이 포설되어 있는 대지와 파이프의 저항률과 투자율이 기존의 상전도 케이블과는 상당히 다른 파라미터를 가지고 있다.

위와 같은 난점을 지닌 3상 파이프형 초전도 케이블을 EMTDC에서 표 1과 같은 파라미터를 사용하여 그림 1과 같이 등가의 단상 3개 직매 케이블로서 모의하였으며, 내부의 중공도체와 외부의 각종 쉴드, 레이어 등을 표현하기 위하여 도체-절연체-시스-절연체의 형식

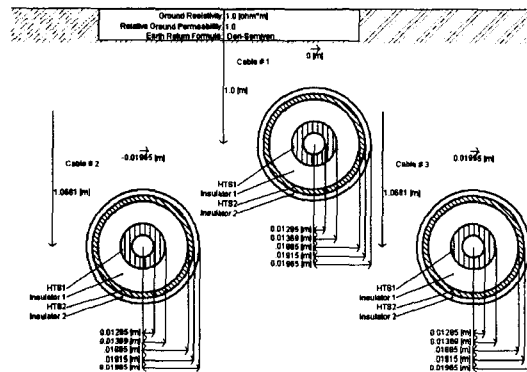
으로 구성하였다. 또한 파이프와 대지간의 등가 저항을 및 투자율을 상정하여 이를 대지모형으로 등가화하여 처리하였다. 시스의 접지저항은 1종 접지기준인 10.0[Ω]을 적용하였으며 절연접속함에서의 시스연결은 Crossbond 접지방식과 썬지보호 대책을 위하여 전형적인 CCPU 데이터를 적용하였다.

<표 1> HTS 케이블 모의 파라미터

항 목	반경(m)	저항율(Ω-m)	비유전율	비투자율	비 고
중공도체	0.01285	-	-	-	냉각재(LN2)
도체	0.01369	1.E-18		1.0	
절연체-1	0.01885	-	4.1	1.0	
시스	0.01915	1.E-18	-	1.0	
절연체-2	0.01965	-	2.3	1.0	

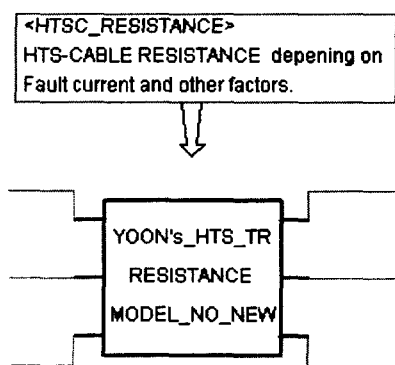


(A) 초전도케이블 연결 관계

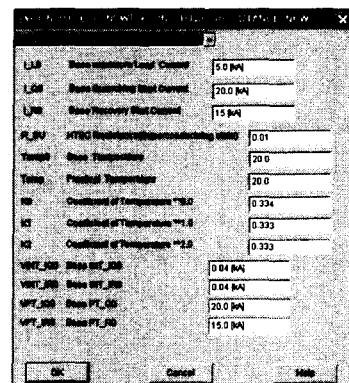


(B) 초전도케이블 모의 파라미터

<그림 1> EMTDC HTSC 등가모의



<그림 2> 초전도상태 변화에 따른 초전도케이블(HTSC) 저항모델



3. 초전도파괴 및 복구현상 모델

초전도케이블은 상전도케이블과 달리 정상시의 초전도상태에서는 저항이 거의 영(zero)이지만(저항률 1.0e-18[Ω-m] 이하) 고장전류가 흐르는 경우 초전도 상태가 파괴되어 저항값

이 증가한다.(초전도파괴 상태 : Quenching) 또한, 고장제거에 따라서 초전도 상태로 돌아가서 케이블 저항값이 원래 상태로 복귀하게 된다. 현상론적으로 고장전류 통전에 의해서 순간적으로 초전도상태가 파괴되는 반면에 초전도 상태로의 복귀에는 냉각을 위한 상당한 시간 지연이 필요할 것으로 예상된다. 현재, 실제 개발된 초전도 케이블에서 초전도 파괴 및 복귀상태에 대한 실험 데이터가 없으므로 본 논문에서는 이를 고장전류 및 온도 등을 포함한 기타 요소를 고려한 비선형 함수로 처리할 수 있는 그림 2와 같은 EMTDC 모델을 개발하였다. 그림 2의 EMTDC 모델은 최대부하전류(I_L), Quenching 개시전류(I_Q), Recovery 개시전류(I_R) 등의 파라미터를 사용하여 초전도상태, 초전도파괴(Quenching) 상태, 초전도복귀(Recovery) 상태의 초전도 케이블 저항을 고장전류 및 온도 혹은 기타 요소를 고려하여 비선형적으로 변화되도록 모델링하였다. 실제 초전도 케이블의 개발이후 상태별로 정확한 데이터가 수집되면 이 부분에 적용하여 보다 정확한 해석이 될 것으로 판단된다.

3.1 기준 parameter 온도 의존성

현재까지 초전도 케이블의 온도의존성에 대한 연구는 미미한 실정이다. 본 논문에서 개발된 모델은 각각의 기준 파라미터에 대하여 온도의존성을 고려하여 다음 식 (1) ~ (7)과 같이 비선형 2차식으로 표현하였다. 실제 케이블에서 이러한 온도에 의한 영향은 매우 적으므로 본 논문의 사례연구에서 온도에 의한 효과를 최소화하기 위해서 이에 관련된 수치는 1로서 가정하였다.

$$I_L = I_{L0} \times (K_2 T_{pu}^2 + K_1 T_{pu} + K_0) \quad (1)$$

$$I_Q = I_{Q0} \times (K_2 T_{pu}^2 + K_1 T_{pu} + K_0) \quad (2)$$

$$I_R = I_{R0} \times (K_2 T_{pu}^2 + K_1 T_{pu} + K_0) \quad (3)$$

$$VINT_{IQ} = VINT_{IQ0} \times (K_2 T_{pu}^2 + K_1 T_{pu} + K_0) \quad (4)$$

$$VINT_{IR} = VINT_{IR0} \times (K_2 T_{pu}^2 + K_1 T_{pu} + K_0) \quad (5)$$

$$VPT_{IQ} = VPT_{IQ0} \times (K_2 T_{pu}^2 + K_1 T_{pu} + K_0) \quad (6)$$

$$VPT_{IR} = VPT_{IR0} \times (K_2 T_{pu}^2 + K_1 T_{pu} + K_0) \quad (7)$$

여기서, $T_{pu} = \frac{T}{T_0}$: 기준온도 대비 pu 온도

I_L : 초전도기기 최대 부하전류(kA)

I_Q : Quenching 개시 가능전류(kA)

I_R : Recovery 개시 가능전류(kA)

$VINT_{IQ}$: Quenching 누적전류 기준값(kA-sec)

$VINT_{IR}$: Recovery 누적전류 기준값(kA-sec)

VPT_{IQ} : 단위 시간당 Quenching 누적전류 기준값(kA-sec/sec)

VPT_{IR} : 단위 시간당 Recovery 누적전류 기준값(kA-sec/sec)

3.2 초전도 상태 유지조건

초전도 케이블이 초전도 상태를 유지하기 위한 조건식은 식 (8)과 같다. 이 경우의 저항은 거의 0(zero)이므로 초전도 저항함수는 식 (9)와 같이 상수값으로 나타낸다.

$$I_{\text{실효치}} \leq I_L \quad (8)$$

○ 초전도 저항함수 = $HTS_R = R_{SU} (Constant Value)$ (9)

3.3 초전도파괴(Quenching) 상태 발생조건

초전도 케이블의 초전도파괴(Quenching) 상태에 영향을 미치는 요소로는 온도, 고장전류 등의 여러 가지 인자들이 있지만, 본 논문에서는 실제 초전도 케이블에 가장 큰 영향을 미치는 고장전류를 중심으로 고려하였다. 이러한 초전도케이블은 식 (10)~(12)의 조건을 동시에 만족하는 경우, 초전도파괴가 발생한다. 즉, Quenching 누적전류 및 단위시간당 누적전류가, 초전도선계가 초전도성을 유지할 수 있는 최대한계를 초과하는 경우에 초전도파괴 상태가 되는 것이다. 이러한 초전도파괴 상태에서는 초전도 케이블이 초전도성을 잃고 저항값이 증가하므로 이 경우의 초전도 저항함수를 식 (13)과 같이 표현한다.

$$I_{\text{실효치}} \geq I_Q \quad (\text{현재 혹은 과거시점}) \quad (10)$$

○ Quenching 누적전류 = $\int_{T_Q}^T I_{\text{실효치}} dt \geq VINT_{I_Q}$ for $T_Q \leq T \leq T_R$ (11)

○ 단위시간당 Quenching 누적전류

$$= \frac{\int_{T_Q}^T I_{\text{실효치}} dt}{T - T_Q} \geq VPT_{I_Q} \quad \text{for } T_Q \leq T \leq T_R \quad (12)$$

○ 초전도 저항함수 = $HTS_R = (T - T_Q) \times I_{\text{실효치}} \times \exp(-kT)$ (13)

3.4 초전도 복귀(Recovery)조건

초전도복귀(Recovery) 상태가 발생하기 위해서는 식 (14)와 식 (15)의 조건을 만족해야 한다. 초전도복귀 상태에서는 초전도 저항값이 감소하여 원래상태로 되돌아가므로 이를 고려하여 식 (16)과 같이 나타낸다.

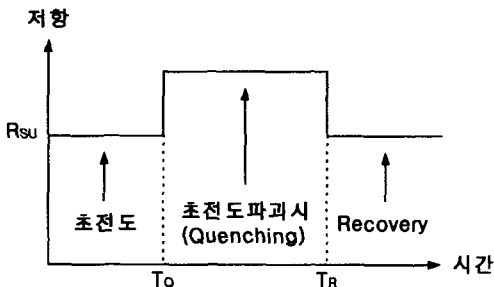
○ Recovery 임계전류 $I_L \leq I_{\text{실효치}} < I_Q$ (현재 혹은 과거시점) (14)

○ 단위시간당 Recovery 누적전류

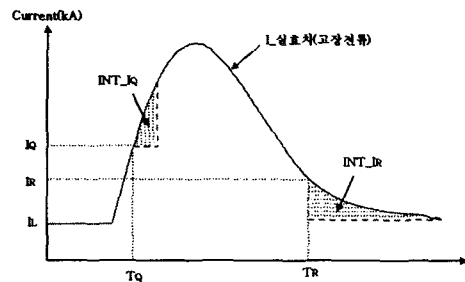
$$= \frac{K_Q \times \int_{T_Q}^{T_R} I_{\text{실효치}} dt + K_R \times \int_{T_R}^T I_{\text{실효치}} dt}{T - T_Q} \leq VPT_{I_R} \quad \text{for } T \geq T_Q \quad (15)$$

○ 초전도 저항함수

$$= HTS_R = (T_R - T_Q) \times I_{\text{실효치}} \times \exp(-kT) \quad (\text{단, 최소치는 } R_{SU}) \quad (16)$$



(A) 초전도 케이블의 저항변화 추이



(B) 초전도 케이블의 전류변화 추이

<그림 3> 고장전류 의존형 초전도케이블(HTSC) 상태변화 추이

4. 154kV 계통 초전도 케이블 적용분석

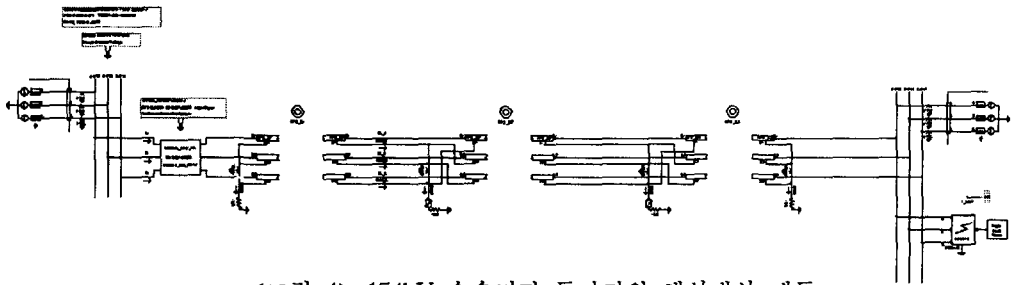
본 논문에서 개발한 EMTDC 초전도 케이블 및 케이블 저항모델을 활용하여 전형적인 154kV 계통을 대상으로 하여 본 초전도 케이블 저항모델을 검증하였다. 본 사례연구에서는 초전도 케이블 저항모델 검증을 위해서, Recovery 상태로 복귀하는데 걸리는 시간 지연을 최소화하였으며, 상태변화에 따른 비선형 함수를 단순화하여 적용하였다.

4.1 해석대상 계통

그림 4는 일반적인 154kV 송수전단 계통을 2모선으로 표현한 것으로서, 송수전단 양모선 사이에 대용량 송전을 위하여 초전도 케이블을 연결한 것이다. 초전도 케이블의 기본 정격은 다음과 같다.

- 케이블 길이 : 30[km]
- 구간 및 접속함 : 3구간, 양단 보통 접속함, 중간에 2개 절연 접속함
- 연결 및 접지방식 : Crossbond 접지
- 케이블 파라미터 : 표 1 참조

그림 4의 해석대상 계통에서 송수전단 특성을 나타내는 양단 모선의 등가전압원과 전원 임피던스를 변경시키면 발전단과 송전단 혹은 송전단과 수전단의 특성을 각각 모의할 수 있다. 여기서, 전원 임피던스는 특정 변전소에 대한 실제 한전계통 자료를 그대로 적용하였다.



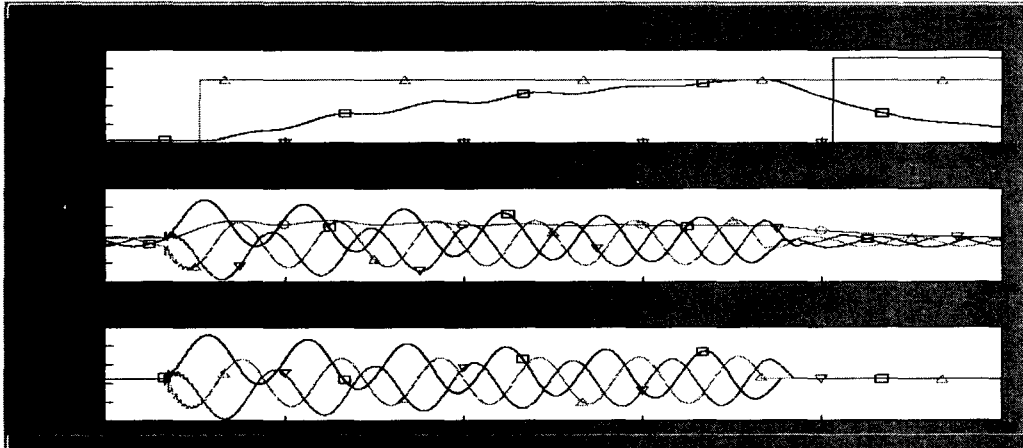
<그림 4> 154kV 송수전단 등가전원 해석대상 계통

4.2 기본해석 및 검증 사례연구

그림 4의 해석대상계통에서 수전단측 모선에 3상고장이 0.1초 동안 발생한 경우를 가정하여 초전도케이블의 저항 응답 특성을 분석하였다. 기본해석시에 적용한 파라미터는 표 2와 같으며 해석결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 초전도케이블 저항이 고장발생과 동시에 초전도파괴(Quenching) 현상에 따라서 증가하다가 고장제거 이후 복귀함을 알 수 있다.

<표 2> 기본해석 파라미터

항 목	파라미터	비 고
I_L	5.0(kA)	최대부하전류
I_Q	20.0(kA)	Quenching 개시전류
I_R	15.0(kA)	Recovery 개시전류
R_{SU}	0.01(ohm)	초전도상태 케이블 저항



<그림 5> 케이블저항, 고장전류 및 각종 상태 해석결과

5. 결 론

본 논문에서는 초전도케이블의 특성을 반영한 EMTDC 모델을 개발하였으며, 이를 모의계통에 적용하여 해석결과를 분석하였다. 연구결과를 종합하여 기술하면 다음과 같다.

- 본 논문에서는 일반적인 초전도케이블의 동작특성을 분석하고 이를 바탕으로 하여 3상 파이프형으로 초전도케이블의 EMTDC 모델을 개발하였다. 즉 초전도케이블의 초전도파괴(Quenching), 초전도복귀(Recovery), 고장전류의존특성, 온도의존특성 등의 독특한 특성을 반영하여 3상 파이프형 저항모델방식으로 모델링하였다.
- 본 논문에서 개발한 EMTDC 모델을 한전 154kV 등가계통에 적용하여 모의함으로써 초전도케이블의 계통적용시 응용특성을 검증하였다.
- 본 논문에서 초전도케이블의 비선형 특성을 모의하여 모델링을 하였으나 실제 개발되고 있는 초전도케이블의 특성에 관련된 정확한 실험치는 전무한 실정이다. 따라서, 향후 정확한 실험 데이터를 적용한 응용특성 검토와 이를 적용한 해석을 수행할 필요성이 있다.

<참고문헌>

- [1] Ladie Pierluigi, Mansoldo Andrea "HTS Cable application studies and technical/economical comparisons with conventional technologies", PES-WM 2002
- [2] Chang, Kenneth, "High Temperature Superconductors Find a Variety of Uses," New York Times, May 29, 2001.
- [3] Marsh, G. E., and A. M. Wolsky, AC Losses in High-Temperature Superconductors and the Importance of These Losses to the Future Use of HTS in the Power Sector, Argonne

National Laboratory, Argonne, Ill., May 18, 2000, pp. II-3-II-4.

- [4] 한국전기연구원, 초전도기기 모델링 및 초전도기기 보호기술개발, 과학기술부, 2002
- [5] CAST, DAPAS Technical Report I, 2002. 7
- [6] Nassi, Marco, Pierluigi Ladie, Paola Caracino, Sergio Dpreafico, Giorgio Tontini, Michel Coevoet, Pierre Manuel, Michele Dhaussy, Claudio Serracane, Sergio Zannella, and Luciano Martini, "Cold Dielectric (CD) High-Temperature Superconducting Cable Systems: Design, Development, and Evaluation of the Effects on Power Systems," manuscript received by RAND September 19, 2000;
- [7] EMTDC Manual, Custum Model