

임계전류, 임계온도 및 회복시간을 고려한 초전도 전력케이블의 EMTDC 모델 컴포넌트 개발

Development of EMTDC model component for HTS power cable considering critical current, critical temperature and recovery time

방중현*, 김재호**, 심기덕***, 조진욱***, 윤재영***, 박민원#, 유인근##

Jong-Hyun Bang*, Jae-Ho Kim**, Kideok Sim***,
Jeonwook Cho***, Jae Young Yoon***, Minwon Park#, In-Keun Yu##

Abstract: Before applying HTS power cable to the real utility, system analysis should be carried out by some simulation tools. Hereby the electrical power system analysis is very important for practical use of HTS devices. Nowadays PSCAD/EMTDC simulation tool is one of the most popular and useful analysis tool for the electrical power system analysis. Unfortunately the model component for HTS power cable is not provided in the PSCAD/EMTDC simulation tool. In this paper, the EMTDC model component for HTS power cable has been developed considering critical current, critical temperature and recovery time constant that depend on the sorts of HTS wire. The numerical model of HTS power cable in PSCAD/EMTDC was designed by using the real experimented data obtained from the real HTS 1G wire test. The utility application analysis of HTS power cable was also performed using the developed model component and the parameters of the real utility network in this study. The authors got good results. The developed model component for HTS power cable could be variously used when the power system includes HTS power cable, especially it will be readily analyzed by PSCAD/EMTDC in order to obtain the data for the level of fault current, power flow, and power losses, and so on.

Key Words: critical current, critical temperature, PSCAD/EMTDC, HTS power cable, recovery time.

1. 서 론

국내 전력수요는 매년 증가하고 이에 따라 전력케이블의 대용량화가 불가피한 상황이다. 하지만, 부지확보의 문제와 송전용량 제약의 문제 등으로 인해 대용량화에 대한 부담을 안고 있는데, 이러한 상황에서 대두

된 것이 초전도 전력케이블이다. 초전도 전력케이블은 기존의 전력케이블과 비교할 때 단위면적당 송전용량을 3배 또는 4배 증가시킬 수 있으며 이로 인해 전력케이블의 소형화 및 대용량화가 가능하다. 또한 전기저항에 의한 손실이 거의 없어 송전비용 절감효과도 가져올 수 있다[1-3].

이러한 초전도 전력케이블의 개발이 최근 국내외적으로 활발히 추진되고 있으며, 이에 실용화를 위한 실제계통 선로 적용 연구의 필요성이 나타나게 되었다. 초전도 전력케이블을 실제계통 선로에 적용하기 위해서는 다양한 연구가 선행되어야 하는데, 그 중 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용한 시뮬레이션 연구도 하나의 좋은 방법이다[4].

본 논문에서는 초전도 전력케이블의 임계온도, 임계전류특성, 회복시간을 고려해서 초전도 전력케이블의 EMTDC 모델 컴포넌트를 개발하였다. 그리고 이를 시뮬레이션에서 모델링한 22.9kV, 154kV 선로에 적용하고, 이때의 특성을 분석하였다.

2. 초전도 전력케이블 EMTDC 모델 컴포넌트

2.1. 초전도 전력케이블의 특성방정식

Fig. 1은 실험을 통해 구한 초전도 전력케이블의 전압 및 전류 특성그래프이다. Fig. 1을 통해 초전도 전력케이블의 특성방정식을 도출해 낼 수 있다.

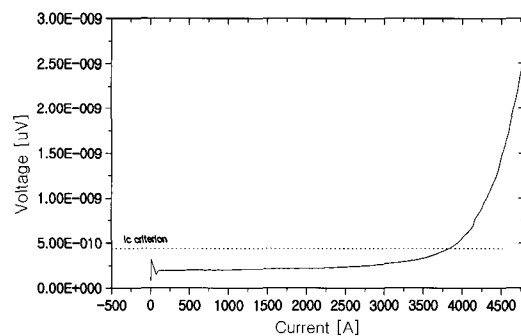


Fig. 1. Voltage and current characteristic curve of HTS power cable.

Fig. 2는 초전도 전력케이블의 전압-전류 특성방정식에서 특성계수 변화에 따른 임계전류 변화 그래프이다. 특성계수가 변할 때 임계전류 값이 변화하는 것을 볼 수 있는데 이를 통해 특정 임계전류 값을 지정해 주

* 학생회원 : 창원대 대학원 전기공학과 석사과정
 ** 정 회원 : 창원대 대학원 전기공학과 박사과정
 *** 정 회원 : 한국전기연구원
 # 정 회원 : 창원대 전기공학과 조교수
 ## 정 회원 : 창원대 전기공학과 교수
 원고접수 : 2006년 2월 9일
 심사완료 : 2006년 3월 20일

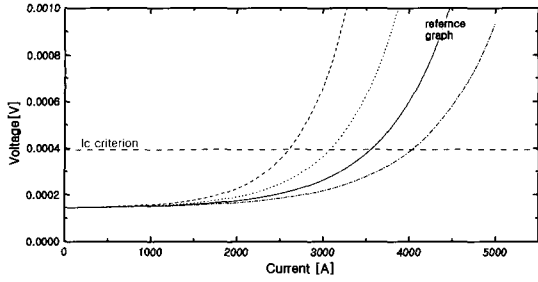


Fig. 2. Critical current change by voltage-current characteristic equation characteristic factor change.

면 실제 초전도 전력케이블과 동일한 전압-전류 특성 곡선을 구성할 수 있다. Fig. 1과 Fig. 2를 통해 먼저 임계전류에 따라 작동하는 초전도 전력케이블 EMTDC 컴포넌트를 개발하였다.

Fig. 3은 초전도 전력케이블의 온도의 변화에 따른 전압-전류 특성그래프이다. 이는 실제 실험에 의한 데이터로써, 온도가 상승할 때 임계전류는 낮아지는 것을 알 수 있다.

온도 특성에 의한 데이터와 초전도 전력케이블의 퀀치 회복실험을 통한 데이터를 바탕으로 온도와 전류, 그리고 초전도체의 퀀치 제거시의 회복시간을 고려한 초전도 전력케이블의 EMTDC 모델 컴포넌트를 완성하였다.

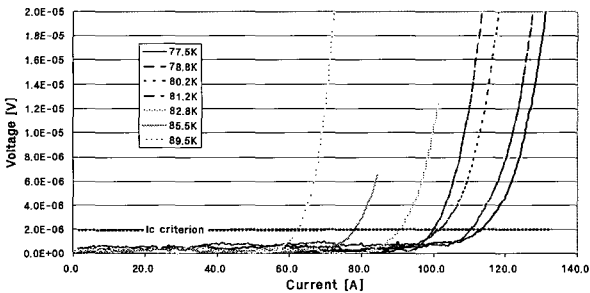


Fig. 3. Voltage and current characteristics along with temperature.

2.2. 초전도 전력케이블의 EMTDC 모델 컴포넌트

Fig. 4는 개발된 초전도 전력케이블 EMTDC 모델 컴포넌트로서 세 개의 입력과 한 개의 출력으로 구성되어 있다. 컴포넌트에서 'IN'은 초전도 전력케이블의 인입전류, 'K'는 절대온도 켈빈, 'CB'는 차단기를 의미한다. 그리고 출력 'OUT'은 초전도 전력케이블의 저항을 의미한다.

Fig. 5는 초전도 전력케이블의 컴포넌트 파라미터 입력창이다. 'Critical Current'는 임계전류, 'Critical Temperature'는 임계온도를 의미한다.

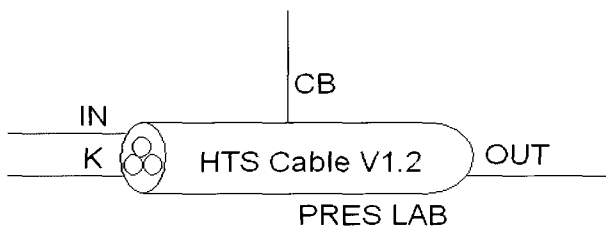


Fig. 4. Component of HTS power cable in EMTDC.

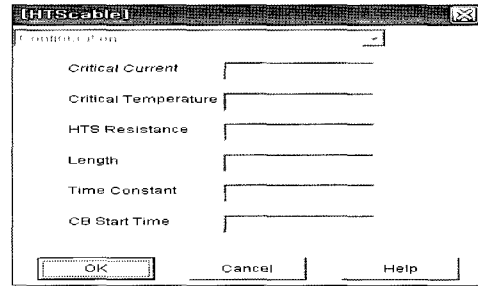


Fig. 5. Parameter of HTS power cable component.

'HTSResistance'는 임계점 이하, 즉 초전도 상태로 운전할 시 초전도 전력케이블의 저항 값을 의미하는데 0에 아주 가까운 수이다. 그리고, 'Length'는 선로에서의 초전도 전력케이블의 길이, 'Time Constant'는 초전도 선재의 시정수, 'CB Start Time'은 시뮬레이션 상에서 차단기의 작동 시작시간을 의미한다[5-6].

3. 초전도 전력케이블 컴포넌트 선로 적용 시뮬레이션

3.1. 22.9(kV) 선로 시뮬레이션

Fig. 6은 초전도 전력케이블을 포함한 22.9(kV)급 배전선로를 EMTDC상에서 모델링한 그림이다. 이는 실제 진동-진전 22.9kV 선로 임피던스와 데이터를 토대로 모델링 하였으며, ALOC-160(8km)구간을 초전도 전력케이블로 대체해서 시뮬레이션 하였다. 초전도 전력케이블 컴포넌트는 케이블로의 인입전류와 케이블의 온도, 그리고 차단기의 동작에 따라 작동한다. 초전도 전력케이블의 저항은 가변저항기로 표현하였으며 인덕턴스는 8km 전 구간에서 동일하게 설정하였다. 차단기는 사고 발생 후 5cycle후에 개방되도록 하였다.

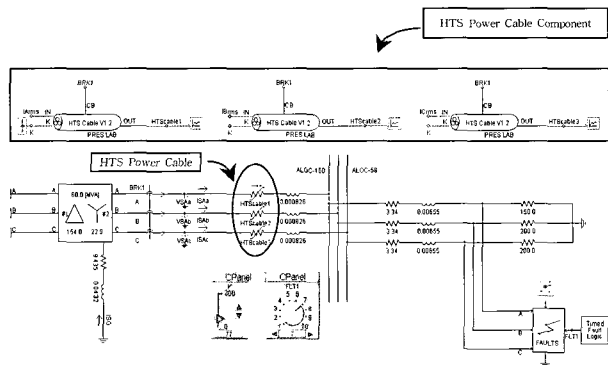


Fig. 6. Simplified practical 22.9(kV) distribution system.

Table 1은 22.9(kV) 배전선로의 파라미터로서 이 데이터를 토대로 시뮬레이션 모델링을 하였다. 그리고, 계통 사고 중, 가장 빈번히 발생하는 1선 지락사고와 가장 큰 사고전류가 발생하는 3상 단락사고에 대한 시뮬레이션을 실시하고 이때의 특성을 분석하였다. Table 2는 초전도 전력케이블이 아닌 기존 전력케이블의 선로 적용 시 정상전류와 사고 전류 값을 나타낸 것이다.

Table 1. Parameters of the 22.9(kV) modeling system.

Source voltage	154[kV]/22.9[kV]	
Transformer	60[MVA](Δ -Y)	
Z ₁ impedance	ALOC-160	1.619+j0.00826
	ALOC-58	3.340+j0.00655
Z ₀ impedance	ALOC-160	4.141+j0.0252
	ALOC-58	5.294+j0.0184
Line length	ALOC-160	8[km]
	ALOC-58	4.8[km]

Table 2. Current value on the normal power cable.

	I _{rms} [kA]
Normal state	0.089
line ground fault	0.553
Three phase short fault	1.406

3.1.1 1선 지락사고

Fig. 7과 Fig. 8은 1선 지락시 초전도 전력케이블 컴포넌트에서의 임계전류 값 I_c와 초전도 전력케이블 온도 K를 변화시킬 때의 초전도 전력케이블의 저항과 사고 전류 값의 그래프이다.

Fig. 7과 Fig. 8을 보면 임계전류가 증가할 때 초전도 전력케이블의 저항은 작아지고, 이에 따라 케이블의 고장 전류 값은 커진다. 그리고, 온도가 상승할 때 줄열에 의한 저항 값이 커진다. 이와 같은 임계전류 값에 따라 발생하는 초전도 전력케이블의 저항 값과 사고 전류 값은 내부 전력손실과 연관되는 문제인데, 이 논의는 다음 3.1.2장에서 언급하겠다.

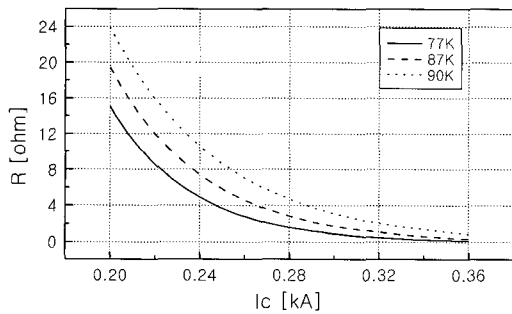


Fig. 7. Resistance vs. critical current with line ground fault.

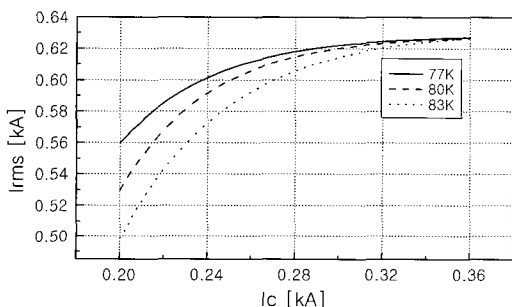


Fig. 8. Fault current vs. critical current with line ground fault.

Fig. 9는 1선 지락 사고시의 초전도 전력케이블의 사고 전류파형을 한 예로 나타낸 것이다. 사고는 0.4[sec]에 발생하고, 차단기는 사고 후 5cycle이 지난 후 개방하도록 하였다. Fig. 10은 1선 지락 사고시의 저항 값이다. Fig. 9와 Fig. 10을 보면, 사고 후 차단기가 작동하고, 초전도 전력케이블의 저항 값은 회복곡선을 그리는 것을 볼 수 있다. 이러한 초전도 전력케이블의 회복특성은 실제 실험데이터에 근거해서 나타났다.

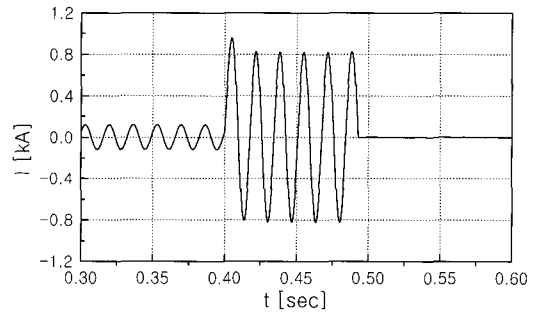


Fig. 9. Fault current with line ground fault.

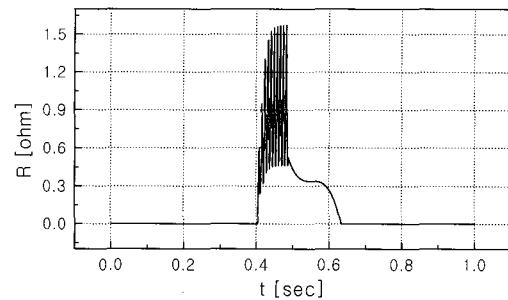


Fig. 10. Resistance curve with line ground fault.

3.1.2 3상 단락사고

Fig. 11과 Fig. 12는 3상 단락사고 시 초전도 전력케이블의 임계전류 값 I_c와 초전도 전력케이블의 온도 K를 변화시킬 때의 초전도 전력케이블의 저항과 사고 전류 값의 그래프이다. 초전도 전력케이블을 실제 계통에 적용시킬 때 고려되어야 할 요소 중의 하나가 냉동기 용량인데 이는 전력손실($P_{loss} = I^2R$)과 관련되는 문제이다. 전력손실이 커지면 이에 따라 냉동기의 용량도 커지므로 임계전류 값의 적절한 산정 값이 필요할 것이다. Fig. 11과 Fig. 12에서 보는 바와 같이 임계전류 값을 높여 설계하면 사고시 발생하는 내부 저항 값은 감소하나 사고 전류 값이 증가하는 것을 알 수 있다.

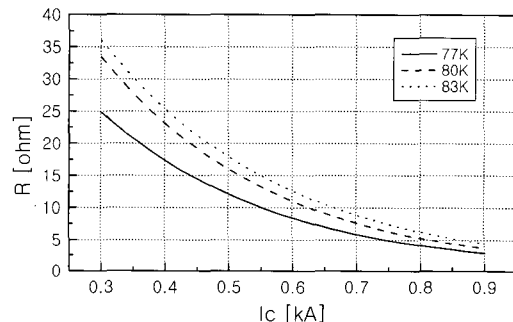


Fig. 11. Resistance vs. critical current with three phase short fault.

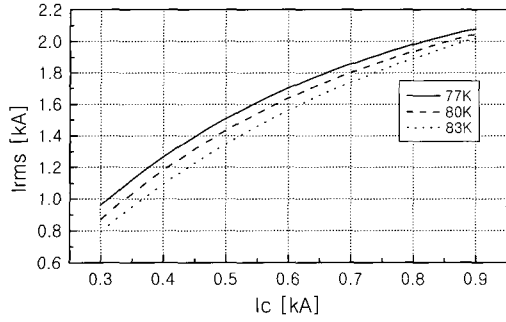


Fig. 12. Fault current vs. critical current with three phase short fault.

Fig. 13은 임계전류 값의 변화에 따른 초전도 전력 케이블의 내부 전력손실 변화 그래프이다. 내부 전력 손실 그래프는 임계전류가 0.45(kA)까지 증가하다가 이후 감소하는 모양을 나타내고 있다. Fig. 11, 12, 13을 통해 볼 때, 초전도 전력케이블을 설계 시 사고 전류, 초전도 전력케이블 저항, 내부 전력손실을 고려해서 임계전류 값을 산정할 필요성이 있을 것으로 사료된다.

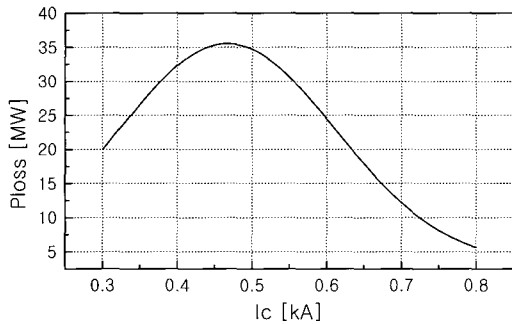


Fig. 13. Internal power loss by change of critical current.

Fig. 14는 전류와 온도의 켄치 발생에 따른 초전도 전력케이블의 사고전류 그래프이다.

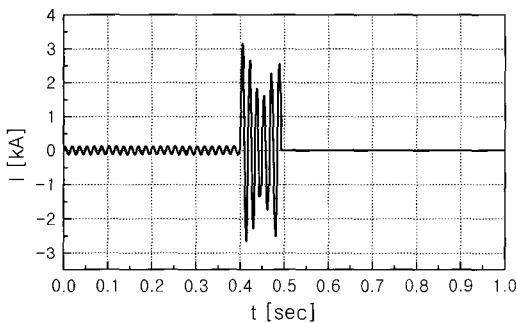


Fig. 14. The fault current as both the quench by temperature and three phase short fault happened.

Fig. 15는 이때의 초전도 전력케이블의 저항 값을 나타낸 그림이다. Fig. 15를 보면 전류에 의한 켄치 뿐만 아니라 온도에 의한 켄치 발생으로 인해 초전도 전력케이블의 저항 값이 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다. 그리고 이로 인해서 냉동기 용량과 관계되는 초전도 전력케이블의 내부전력손실도 크게 증가하는 것을 알 수 있으며, 이러한 사고는 시스템에 치명적인 장애를 일으킬 수 있는 문제를 가지고 있으므로 반드시 방지하여야 할 사고임에 틀림이 없다.

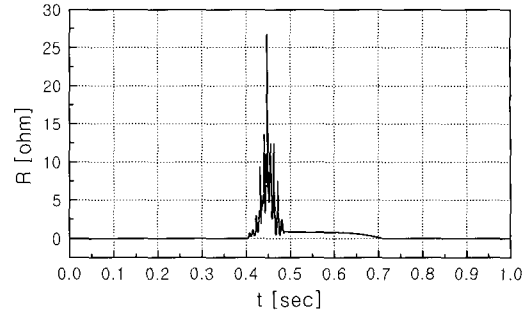


Fig. 15. The resistance as both the quench by temperature and three phase short fault happened.

3.2. 154[kV] 선로 시뮬레이션

Fig. 16은 154[kV] 선로를 EMTDC상에서 모델링한 그림이고 Fig. 17은 이를 간략화한 회로도이다. 시뮬레이션에 사용된 컴포넌트는 케이블로의 인입전류와 케이블의 온도, 그리고 변압기 2차측 차단기의 동작에 따라 작동한다. 초전도 전력케이블을 제외한 다른 전력 설비들은 기존 전력 설비들로 구성하였다. 선로의 사고유형은 가장 심각한 사고인 3상 단락사고로 시뮬레이션을 실시하였다.

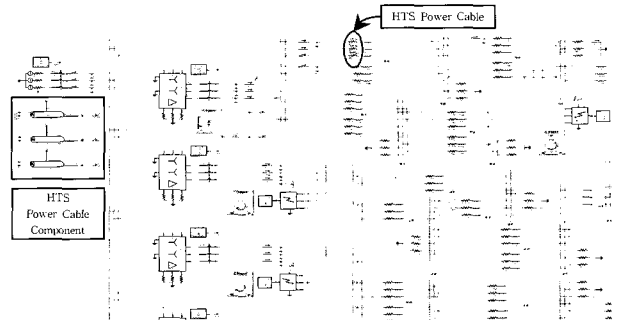


Fig. 16. Simplified practical 154[kV] system.

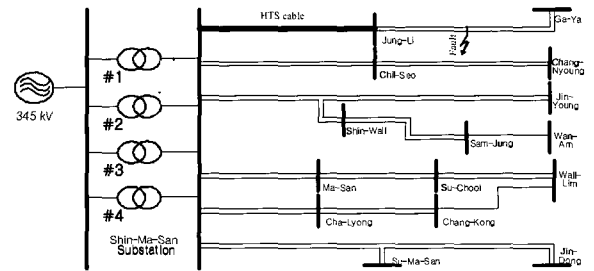


Fig. 17. Circuit diagram of 154[kV] system.

Fig. 18과 Fig. 19는 초전도 전력케이블 컴포넌트에서의 임계전류와 온도를 변화시킬 때 초전도 전력케이블의 사고 전류 값과 저항 값을 나타낸 그림이다. 22.9[kV] 시스템에서의 시뮬레이션 결과와 같이 임계전류 값이 증가할수록 초전도 전력케이블의 저항 값은 작아지고 사고전류는 커지는 것을 볼 수 있었다. Fig. 20은 초전도 전력케이블의 길이를 일정하게 유지한 채 일반케이블 선로의 임피던스 값을 변화 시켰을 때 내부 전력손실 변화 그래프인데, 이를 통해 사고 발생지점에 따른 초전도 전력케이블의 손실 값을 알 수 있다. 그리고, 초전도 전력케이블의 설치장소

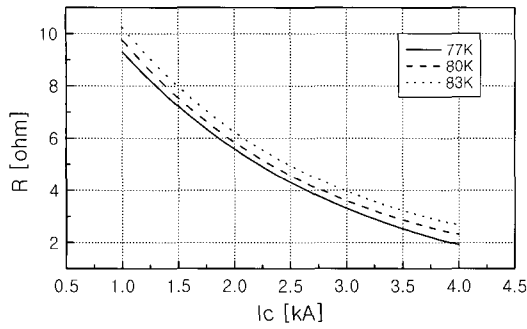


Fig. 18. Resistance vs. critical current with three phase short fault.

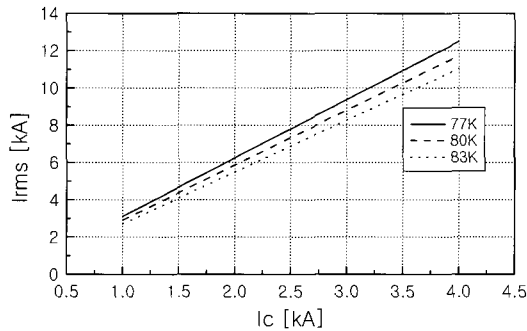


Fig. 19. Fault current vs. critical current with three phase short fault.

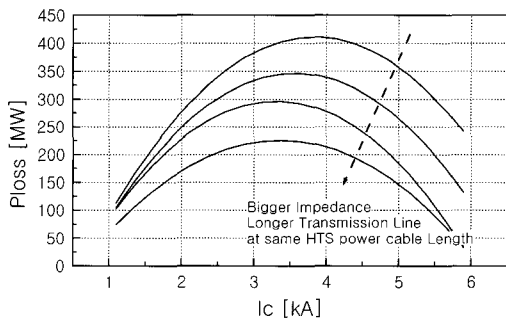


Fig. 20. Internal power loss change by change of line impedance.

(발전소와의 거리), 임계전류 값, 사고전류 값, 케이블의 길이, 사고지점 등을 고려해서 본 lab에서 개발 중인 초전도 전력케이블 EMTDC 컴포넌트에 적용하면, 이러한 사고 시 초전도 전력케이블의 내부전력 손실변화를 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 초전도 전력케이블의 EMTDC 모델 컴포넌트를 개발하였다. 초전도 상태가 유지되는 파라메터인 전류밀도, 온도, 자장 중 전류와 온도 두개의 요소와 초전도체의 회복시간을 컴포넌트에 반영해서 실제 초전도 전력케이블의 모델에 근접한 실험을 할 수 있었다. 시뮬레이션 실험에서 중요한 사실은 전류와 온도에 의한 퀘치가 발생했을 시 초전도 전력케이블의 내부 전력손실은 초전도 전력케이블의 저항의 급격한 증가로 인해 상승하는 것을 볼 수 있었다는 것이다. 그리고, 초전도 전력케이블을 설계할 시 계통에서의 사고시 전력손실을 고려해서 임계전류 값을 산정해야 함을 본 실험에서 보여주고 있다. 현재 초전도체의

자장을 고려한 EMTDC 모델 컴포넌트 개발도 연구 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Jeffrey O. Willis, "Superconducting Transmission Cables" IEEE Power Engineering Review, pp. 10-14, 2000
- [2] Aldo Bolza, Piero Metra, Marco Nassi, Mujibar Mrahman, "RECENT Development in HTS Power Cable Application" IEEE Transactions on applied superconductivity vol. 7, NO.2, pp. 339-344, June 1997
- [3] N.Kelly, M.Massi, L.Masur, "Application of HTS wire and cables to Power Transmission : State of the Art and Opportunities", IEEE Transactions on applied superconductivity, pp. 448-454, 2001
- [4] T.Kiss, M.Inoue, "Quench Characteristics in HTSC Devices", IEEE Transactions on applied superconductivity, vol. 6, NO.2, pp. 1073-1076, 1999
- [5] 이재득, 박민원, 유인근, "A STUDY ON THE MODELING OF SUPERCONDUCTING FAULT LIMITERS USING EMTDC", IFAC Symposium on Power Plants & Power Systems Control, Vol. 1, pp. 399-404, 2003
- [6] 한상근, 박민원, 유인근, "REAL TIME SIMULATION SCHEME FOR STAND-ALONE WIND POWER GENERATION SYSTEMS", IFAC Symposium on Power Plants & Power Systems Control, Vol.1, pp. 278-282, 2003
- [7] 오상수, 하홍수, 하동우, 김상철, 권영길, 류강식, "Development of Bi-2223/Ag superconducting wire for power application", ICEE, Vol.3, pp. 1578-1581, 2002
- [8] Chen Min, Yoitsu Sekiguchi, Shoji Mashio, Munehisa Mitani, Atsuhide Jinno, "Study of Ground-Fault Surge in Buried EHV Cable Line Based on EMT Simulation", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Vol 2, pp. 1290-1293, 2002
- [9] Takato Masuda, Masayuki Hiroes, Shigeki Isojima, "Verification tests of a 100m High-Tc SUPERCONDUCTING Cable" IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Vol. 2, pp. 1298-1303, 2002
- [10] D.F. Lee, P.M.Martin, D.M. Kroeger, M.W. Rupich, Q.Li, G.N.Riley, "Effects of initial cold work conditions on the deformation and current capacity of monofilament and multi filamentary Bi-2223 conductors" Super.Sci.Tech., Vol. 10, pp. 702-711, 1997

저 자 소 개



방종현(房宗眩)
1978년 10월 2일생, 2005년 창원대학교 전기공학과 졸업, 현재 동 대학원 석사과정.



김재호(鎭載浩)
1976년 11월 17일생, 2000년 인제대학교 전자공학과 졸업, 2005년 창원대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사), 2003년 10월~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 위촉연구원, 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



심기덕(沈基德)
1973년 2월 1일생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도 응용연구그룹 선임연구원.



조전욱(趙全旭)
1960년 3월 2일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임연구원.



윤재영(尹在暎)
1962년 7월 30일생, 1985년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1993년 기술사(발송배전), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 신전력시스템그룹장 책임연구원.



박민원(朴敏遠)
1970년 2월 12일생, 1995년 창원대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 일본 오사카대학 대학원 전기공학과 졸업(공학석사/공학박사), 2001년 10월~2004년 8월 한국전기연구원 차세대초전도응용기술개발사업단 기술팀장, 2004년 9월~현재 창원대학교 전기공학과 전임강사.



유인근(劉仁根)
1954년 2월 18일생, 1981년 동국대학교 졸업, 1983년 한양대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년 6월~1988년 2월 한국전기연구원 선임연구원(지중송전연구실장), 1988년 3월~현재 창원대학교 전기공학과 교수.