

22.9kV배전계통에 대한 초전도케이블의 정상 및 과도상태에 대한 전기적 특성 시험 및 시뮬레이션 결과 검토

논문

58-12-3

A Electrical Characteristic Simulation and Test for the Steady and Transient State in the 22.9kV HTS Cable Distribution System.

이근준* · 황시돌** · 양병모*** · 이현철†
(Geun-Joon Lee · Si-Dol Hwnag · Byeong-Mo Yang · Hyun-Chul Lee)

Abstract - With rapid development of world economics, electricity demand in metropolitan area has been increased dramatically. HTS(High Temperature Superconducting) cable is one of most promising technology to solve the bottleneck of electric network. However, HTS cable is not considered as matured technology yet to power system planners because of its different characteristics with conventional metal conductors. This paper suggests the comparison results of HTS cable simulation and experiment on steady state operation, also give the simulation results on transient characteristics of HTS cable components. This results could devote not only to discuss the security of HTS cable operation, but also to design power system oriented HTS cable.

Key Words : HTS(High Temperature Superconducting) Cable, HTS component(Conductor, Shield, Former, Stabilizer)

1. 서론

산업화 이래, 세계 경제의 급속한 성장은 도심을 중심으로 전력수요를 크게 증가시켜 왔으며, 선진국의 대도시에서는 증가된 전력수요 밀도를 충족하기 위한 새로운 인프라로서 초전도 송전을 지속적으로 연구하여 실용화를 눈앞에 두고 있다. 그 예로, 미국은 138[kV]의 송전급[LIPA project] 및 13.8[kV] 배전급[AEP, Southwire, Entergy] 초전도케이블 시험 계통을 운용하고 있으며, 일본은 66[kV] 송전급[TEPCO] 초전도케이블을 시험 운용하고 있다[1-2]. 우리나라에서도 한전, 전기연구소, LS 전선 등을 중심으로 22.9[kV] 배전계통에 대한 초전도케이블을 한전 고창시험센터에 설치, 운용하고 있으며, 현재 500[m] 규모의 초전도케이블 및 초전도 한류기를 실 계통에 설치하기 위한 프로젝트가 진행 중이어서 도심 대전류 송전을 위한 배전급 초전도 케이블의 응용이 실현될 전망이다[3-5].

본 논문은 초전도케이블이 계통에 연계되어 운용될 경우 발생하는 정상 및 과도상태의 운전 조건들에 대해 케이블 전기적 구성 요소 각 부분의 물리적 제량의 변화를 모의하고, 이를 실험결과와 비교함으로써, 시뮬레이션에 의한 초전도 케이블 시스템의 운전 안전성을 검토할 수 있는 계기를 제시함은 물론, 향후 계통의 요구조건에 대한 초전도 케이블의 설계시에도 활용할 수 있는 가능한 검토모형을 제시하는

데 그 의의가 있다.

2. 22.9kV 초전도케이블 배전계통의 구성 및 모델링

2.1 배전용 초전도 케이블 시험계통

그림 1은 KEPRI(Korea Electric Power Research Institute)에서 2004년 SEI(Sumitomo Electric Industries)와의 협약으로 고창 전력실증시험센터에 설치한 초전도케이블 시스템이다. 길이 100[m], 3phase, 22.9[kV] 50[MVA]급의 초전도케이블로써 외경 130[mm], ELP(Corrugated hard polyethylene pipe) 관의 지름은 175[mm]이며, 3 core-in one cryostat로 되어 있다[3].

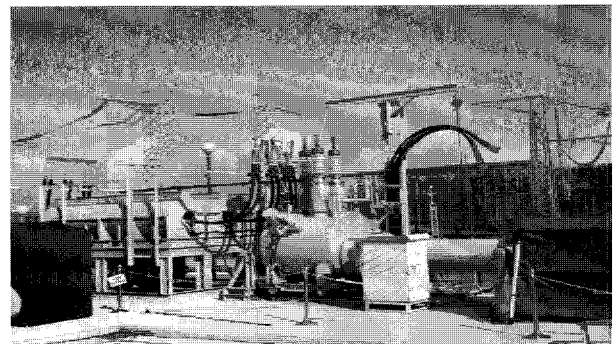


그림 1 고창시험장에 설치된 초전도 케이블 시스템

Fig. 1 HTS cable system on Ko-Chang Test Center

2.2 초전도 케이블 및 모형화

그림 2는 설치된 초전도 케이블의 단면 및 각 상 케이블의 구조도이다. 케이블의 규격은 표 1과 같다. 초전도케이블은 정상상태 시 초전도체에 전류를 통전하는 도체부와 쉴드부 및 이상현상 시 큰 전류를 주로 통전하는 구리로 된

* 시니어회원 : 충북도립대학 전기에너지시스템학과 교수 · 공박

** 정 회 원 : 한전전력연구원 책임연구원

*** 정 회 원 : 한전전력연구원 선임연구원

† 교신저자, 정회원 : (주)그린네파워 엔지니어링팀 차장

E-mail : roundyou@hotmail.com

접수일자 : 2009년 10월 14일

최종완료 : 2009년 11월 11일

포머 및 stabilizer 로 구성된다. 포머는 도체부와 인접하고, stabilizer는 절드부를 감싸고 있어, 케이블의 이상시 전류를 분배하는 특성을 가진다. 초전도체는 온도, 전류, 자기장에 따라 저항특성이 달라지며, 초전도 상태가 상실될 수도 있으므로 이들 특성을 고려하여 운전해야 한다.

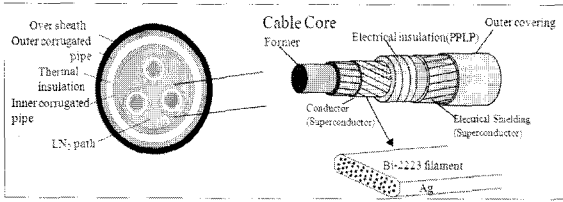


그림 2 초전도케이블의 구조
Fig. 2 A structure of HTS cable

표 3 케이블의 규격 및 정격전류

Table 3 Rated current and Standard of cable

Items	Specification
Rated Voltage	22.9 kV
Rated Current	1,250 A
Capacity	50 MVA
Length	100 m
Cable Type	3 cores in one cryostat
Dielectric Type	Cold dielectric
Cable Size	Applicable for 175 mm duct
Response to Fault Current	There shall be no damage for the cable and cable system when the fault of 25kA is applied to the cable for 5 cycles.

본 논문에서는 그림 3에 EMTDC에 의해 초전도케이블을 전기적으로 동가화[3,6]하였고, 각 구성요소간의 선로정수 및 열적 동특성을 식1과 식2의 전류-저항 특성식 및 열평형 방정식으로 나타내었다[3-6].

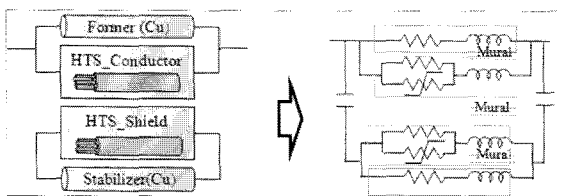


그림 3 초전도케이블 모형화
Fig. 3 Modeling of superconducting cable

$$R_{HTS} = \frac{V_{HTS}}{I_{HTS}} = r_c \times \left(\frac{I_{HTS}}{I_{critical}} \right)^{n-1} \quad (\text{식 1})$$

여기서, R_{HTS} 는 초전도케이블의 저항이고, r_c 는 초전도케이블의 임계저항이다.

온도의 변화에 따른 임계전류의 변화식은 실험식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{critical} = 0.001617 T_{operated}^2 - 0.30584 T_{operated} + 19.8 \quad (\text{식 2})$$

여기서, $T_{operated}$ 는 초전도케이블의 운전온도[K]이다.

그림 4는 초전도 케이블이 운전될 22.9[kV] 배전선로의 모형을 구성하여 다양한 계통외란에 대한 초전도 케이블의 모의를 수행하도록 하였다[5-7]. 또한, 배전계통에 빈발하는 고장인 단락 및 지락전류에 대한 실험은 전원의 제약성 및 시스템의 수명상 영향을 고려하여, 실제 시험이 불가능하므로 시뮬레이션 결과만을 제시한다.

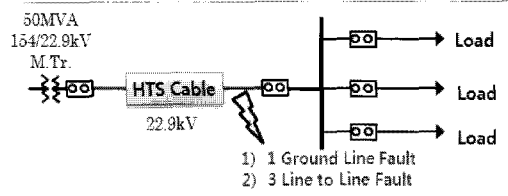


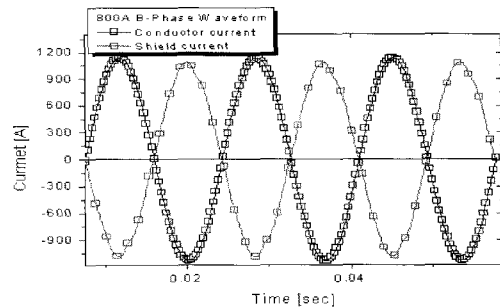
그림 4 초전도케이블이 병입된 모형 배전계통
Fig. 4 A distributed power system to insert HTS cable

3. 운전 특성

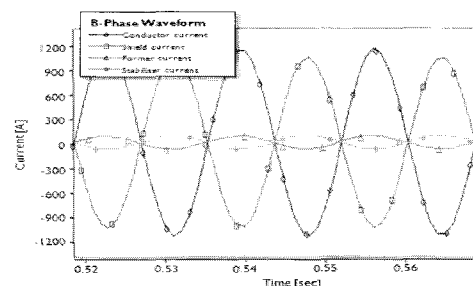
3.1 정상상태 운전 특성

3.1.1 3상 평형시

정상상태에서 초전도 케이블에 흐르는 전류를 정격전류까지 상승시켰을 때 케이블 각 부분에 흐르는 실측 전류와 컴퓨터 모형에 의한 모의한 결과를 그림 5 및 표 2에 제시하였다. 이 양자를 비교한 결과, 초전도 케이블의 도체 및 절드에 흐르는 전류는 각각 1.5% 및 0.7%의 모의 오차를 보였다. 다음과 같은 오차는 초전도케이블의 열특성 및 AC loss로 사료된다.



(a) 실증실험결과



(b) 모의실험결과

그림 5 평형전류 통전시의 초전도케이블 전류(실측 및 모의 결과)

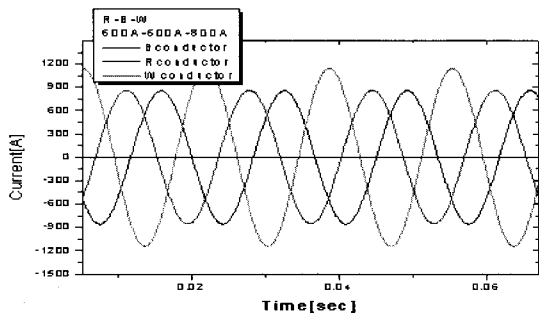
Fig. 5 HTS cable current at three phase balanced current.(Compared test and simulation result)

표 4 초전도케이블의 실증실험과 모의실험 결과 Data
Table 4 Data about Test and Simulation result of HTS cable

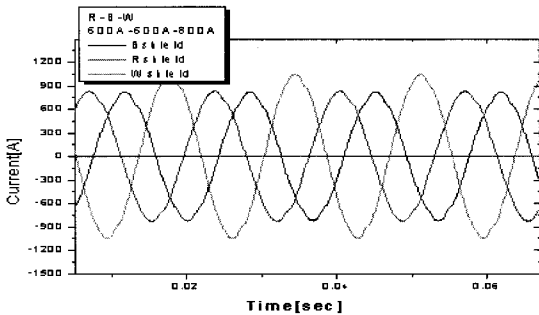
전류[A]	Conductor(B상)	Shield(B상)	비교
실측(rms)	800	744	93%
모의(rms)	812	739	91%
오차(rms)	1.5%	0.7%	

3.1.2 3상 불평형시

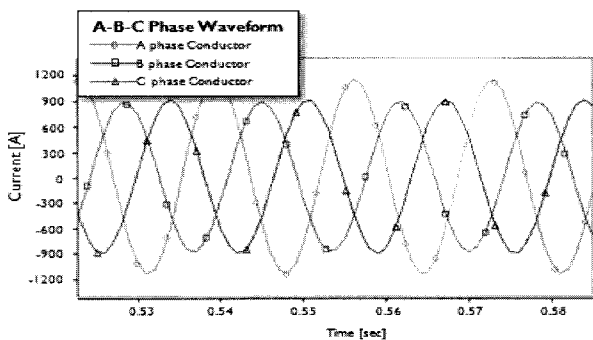
그림 6은 3상 불평형 전류(30% 불평형율)를 통전한 경우의 도체 각 부분에 흐르는 전류와 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 비교 결과는 표 3과 같다. 모의와 실측간의 오차는 쉴드부의 오차가 통전부의 것보다 상대적으로 컸으며, 최대오차는 6.5% 정도였다.



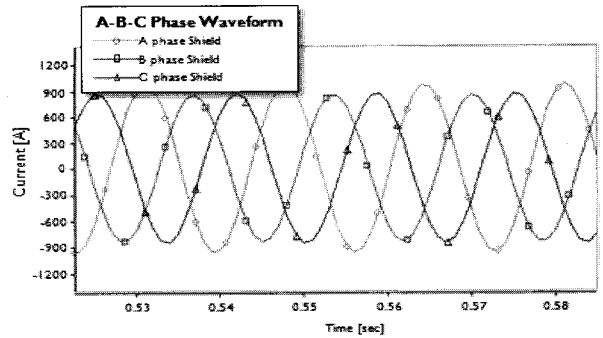
(a) 실증실험결과(Conductor)



(b) 실증실험결과(Shield)



(c) 모의실험결과(Conductor)



(d) 모의실험결과(Shield)

그림 6 3상 불평형전류 통전시 각 부분의 전류(실측 및 모의결과)

Fig. 6 HTS cable current at three phase unbalanced current.(Compared test and simulation result)

표 5 불평형전류 통전시 각 부분의 전류(실측 및 모의 결과)

Table 5 HTS cable current at unbalanced current.(Compared test and simulation result)

	Conductor(Arms)			Shield(Arms)		
	실측	모의	오차	실측	모의	오차
A상	795	810 \angle -133	15	728	684 \angle -47	44
B상	636	626 \angle 107	10	572	599 \angle -77	27
C상	636	639 \angle -13	3	572	609 \angle 172	37

3.1.3 고조파의 영향

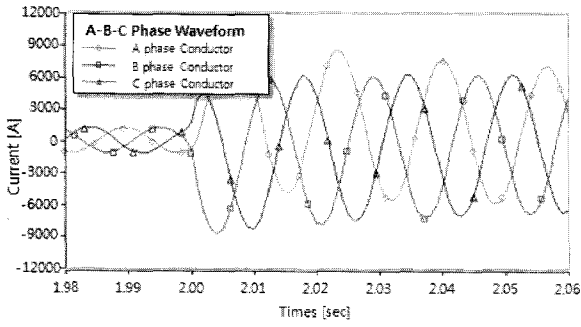
고조파에 대한 초전도 케이블의 영향을 시뮬레이션에 의해 평가한 결과, 고조파가 함유된 경우 AC loss는 THD의 증가에 따라 증가하게 된다[7]. 예로, 7고조파가 7% 함유된 경우 실효치는 1.0025[pu]로 되어 거의 측정오차 범위 이내에 들어오게 되며, 손실전력은 저항만을 고려한 경우는 0.5[%]의 손실 증가에 그치게 되지만, 히스테리시스 손실을 고려하는 경우, 2.6[%]의 손실 증가를 보여 약 5배 정도 손실이 증가하게 되었다. 따라서 고조파 영향에 의한 손실증가를 고려하여, 케이블의 운전정격전류를 감소시키거나, 냉각기의 용량을 증대시킬 필요가 있다.

이상의 결과, 초전도 케이블 시스템에 대한 정상상태의 시뮬레이션은 실험의 결과와 상당히 근접하고 있음을 알 수 있으며, 따라서, 개발된 EMTDC 모형이 유효하다고 결론지을 수 있다.

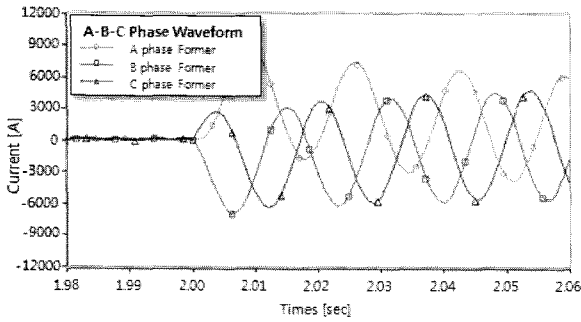
3.2 과도상태 운전특성

3.2.1 3상 단락시

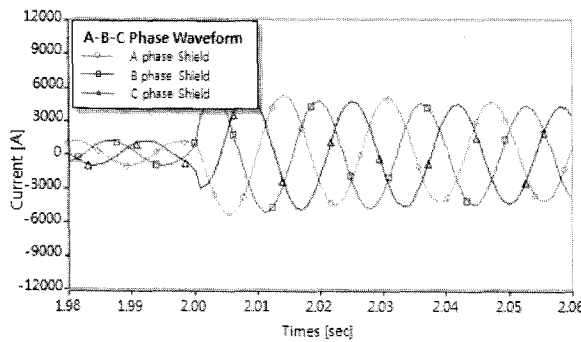
다음 그림은 초전도케이블의 3상 고장시 고장전류를 시뮬레이션 한 결과이다.



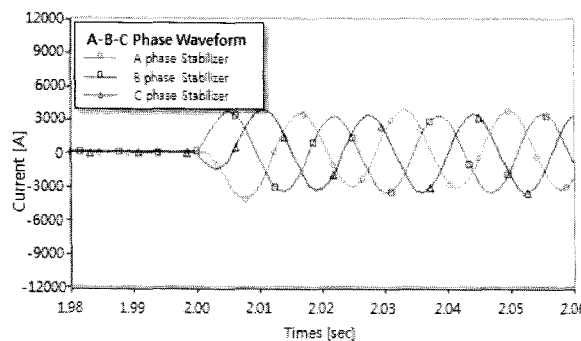
(a) 초전도체 각상전류



(b) 포머 각상전류



(c) 쉴드 각상전류



(d) stabilizer의 각상전류

그림 7 3상 단락시 고장전류 분포
Fig. 7 Fault current in case of three phase line to line fault

모의 결과, 3상 단락시 초전도체와 포머는 고장전류를 각각 60% 및 40%를 부담하며, 쉴드 및 stabilizer도 비슷한 비율로 고장전류를 부담하여 통전하고 있음을 확인하였다. 초전도체에서는 임계전류 3.1[kA]를 초과하는 고장전류에 의

해 적정시간내 차단하지 않는 경우, 퀘ن치로 이어질 가능성이 있다.

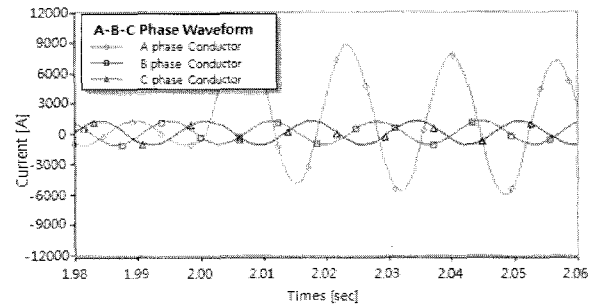
표 6 3상 단락고장시 각 부분의 전류(모의결과)

Table 6 Each part current in case of three phase line to line fault
단위 : [A]_{RMS}

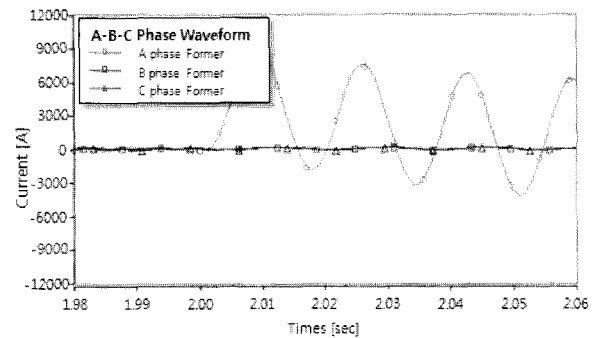
	Conductor	Shield	former	Stabilizer
A상	5427∠-146.5	3865∠55.5	3670∠164.2	2783∠13.6
B상	5150∠90.9	3642∠-66.0	3551∠38.7	2547∠-115.1
C상	5076∠-25.3	3663∠177.5	3339∠-78.0	2311∠135.0

3.2.2 1선 지락시

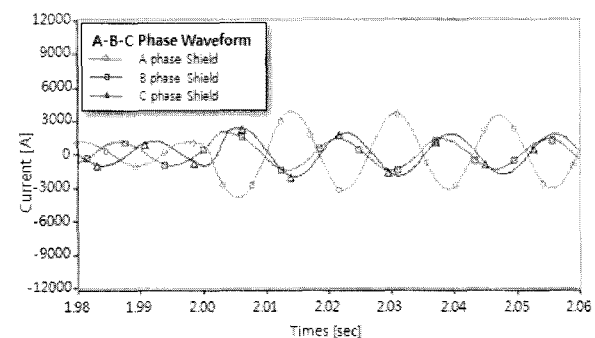
1선 지락에 의해 고장난 A상은 초전도체와 포머가 각각 60%,40% 정도의 비율로 고장전류를 부담하고 있으며, 쉴드와 stabilizer에서도 각각 60%, 40% 정도의 비율로 고장전류를 부담하고 있는 결과를 얻었다.



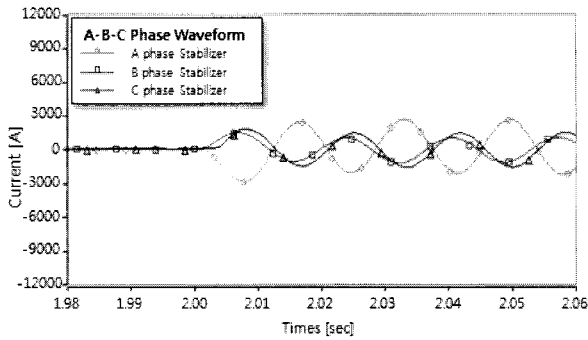
(a) 초전도체 각상전류



(b) 포머 각상전류



(c) 쉴드 각상전류



(d) stabilizer의 각상전류

그림 8 1선 지락시 고장전류 분포

Fig. 8 Fault current in case of single line to ground

표 7 1선 지락고장시 각 부분의 전류(모의결과)

Table 7 Each part current in case of single line to ground

단위 : [A]_{RMS}

Arms	Conductor	Shield	former	Stabilizer
A상	5565∠-146.9	2836∠56.2	3782∠162.9	1914∠133
B상	820∠114.2	1200∠-107.5	74∠107.2	929∠-153.1
C상	837∠-20.9	1587∠-133.2	95∠78.7	1161∠-176.6

이와 같은 고장상태가 지속될 경우, 초전도 케이블의 내 부온도변화는 그림과 같다. (온도모의 결과 수록) 초전도선재의 온도상승한계를 300[K]로 잡을 경우, 국부적인 온도상승에 의해 초전도 선재의 손상을 가져올 수 있으므로, 포머의 전류분담률을 증가시키거나, 고장전류를 감소시킬 수 있도록 초전도 한류기를 사용하는 방안을 수립하여야 한다.

4. 결 론

도심 부하밀도의 증가, 대규모 분산전원의 병입과 계통연계, 스마트그리드의 개발 등에 따라, 초전도케이블 기술에 대한 수요가 증가되고 있으며, 이에 따른 초전도케이블의 실용화가 큰 관심대상이 되고 있다. 본 논문에서는 초전도 케이블의 설계용 응용을 위한 정상 및 과도상태의 특성을 실험하고 이를 컴퓨터 모의에 의해 그 현상을 재현하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Bi-2223형 초전도케이블에 작용하는 외란에 대하여, 정상상태에서는 최대치 1200[A]인 경우, 측정치 대비, 해석 오차 1.5%이내인 모의결과를 얻었다. 불평형 부하인 경우의 최대 오차는 6.5%였다.

2. 과도상태에 대하여는, 실험의 제약성으로 인하여 시뮬레이션만을 수행하여, 1상 및 3상고장에 대하여 케이블의 응용특성을 조사하였다. 그 결과, 9[kA]의 고장전류 통전시 포머 및 stabilizer의 고장전류 분담은 전체전류의 약 40%정도이었다. 고장 시간이 5[cycle]에 도달하는 경우, 초전도케이블 선재의 온도는 103.1[K]에 이르렀다[11].

3. 포머의 직경을 증대시켜 고장전류를 포머로 통전시킨 결과, 선재의 온도가 동일 고장조건에서 93.9[K]로 낮아

진 것을 관측할 수 있었다. 초전도케이블의 안전성을 확보하기 위하여 5[Ω]의 리액턴스형 초전도 한류기를 적용한 결과, 고장전류가 0.25[cycle] 이내에 정격전류의 3배 이내로 제한되었으며, 초전도케이블에서는 제약된 온도상승을 초과하지 않으면서 안전하게 차단기의 동작 시퀀스에 의해 고장전류가 차단됨을 볼 수 있었다.

따라서, 이 모형에 의해 초전도케이블의 설계용 적용시 현상을 모의할 수 있으며, 계통의 보호 조건을 고려한 초전도 케이블의 설계시 활용될 수 있는 가능성을 보였다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 박민원, "고온초전도 전력케이블의 국제동향", 한국초전도·저온공학회, Vol.6, No.1, pp.4-7, 2004
- [2] H. Jones, "Superconductors in the transmission of electricity and networks", Elsevier energy policy 36, pp.4342-4345, 2008
- [3] "초전도케이블 실증시험 및 평가 (최종보고서)", 2006.10, 산업자원부
- [4] G. Coletta, F. Zanovello, D. Uglietti, R. Tebano and R. Mele, "Current density distribution in BSCCO-2223 tapes in overload conditions", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 2749-2752, 2001
- [5] K. Hayashi, T. Hikata, T. Kaneko, M. Ueyama, A. Mikumo, M. Ayai, S. Kobayashi, H. Takei and K. sato, "Development of Ag-Sheathed Bi2223 superconducting wires and their application", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1 pp. 3281-3284, 2001
- [6] 이현철, 황시돌, 이근준, "PSCAD/EMTDC를 이용한 불평형 부하에서의 초전도 케이블의 운전특성 해석", 대한전기학회지, 제57권 10호, 2008년 10월
- [7] 이근준, 이종배, 황시돌, 손송호, "고조파가 고온초전도 케이블의 운전특성에 미치는 영향", 대한전기학회 논문지 56-12-2, pp.2065~2071, 2007. 12.
- [8] Y. B. Lin, L. Z. Lin, Z. Y. Gao, H. M. Wen, L. Xu, L. Shu, J. Li, L. Y. Xiao, L. Zhou and G. S. Yuan, "Development of HTS transmission power cable", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 2371-2374, 2001
- [9] 이근준 외 1 "초전도 케이블의 쉐일 특성에 대한 계통 안전성 제어방식", 한국조명.전기설비학회 논문지 Vol.19, No.6, pp.29-35 2005. 9월
- [10] 이근준, 이상한, 손송호, 황시돌, "22.9kV 중성점 다중접지계통에 CD형 초전도케이블을 적용한 경우의 지락전류변화" 대한전기학회 하계학술대회논문집 pp.46-47, 2006년 7월

[11] G.J. Lee, S.D. Hwang, H.C. Lee, "A Study on Cooperative Control Method in HTS Cable under Parallel Power System", IEEE T&D, 2009

저 자 소 개



이근준 (李根準)

1981년 울산공대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대학교 대학원 전기공학과(석사) 1996년 울산대 전기공학과졸업(공학박) 1976-1998년 한전전력연구원 선임연구원. 1988-1989년 미국 University of Texas at Arlington Energy System Research Center 연구원, 2001-2002년 미국 Arizona State University PSERC 교환교수. IEEE Senior Member, 발송배전 기술사, 현재 충북과학대학 전기과 교수.

Tel : 043-731-7448
Fax : 043-731-7433
E-mail : gilee@ctech.ac.kr



황시돌 (黃時玆)

1981년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업. 1986년 8월 동 대학원 졸업(석사). 1980년 12월 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 초진도그룹 책임연구원

Tel : 042-865-7520
Fax : 042-865-7804
E-mail : sdhwang@kepri.re.kr



양병모 (梁炳模)

1969년 04월 24일생, 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학 졸업(공학석사), 현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5922
E-mail : bmyang@kepri.re.kr



이현철 (李賢哲)

1979년 12월 13일생. 2002년 원광대 대전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년~2005년 (주)네스랩 연구원, 2007년~현재 (주)그린넷파워 연구원

Tel : 043-731-7448
Fax : 043-731-7433
E-mail : oneyel@naver.com