

초전도 케이블의 Quench 특성에 대한 계통안전성 제어방식

(Power System Security Control Method for Quench Characteristic of High-Temperature Superconducting Cable)

이근준* · 황시돌

(Geun-Joon Lee · Si-Dol Hwang)

요 약

본 논문은 고온 초전도 케이블을 전력계통의 송전용량 증대를 위해 적용시켰을 경우, 고장발생시 초전도케이블에서 예상되는 퀘치의 영향에 대해 안전하게 제어할 수 있는 방법을 제시하였다. 접근 방법으로는 초전도케이블의 퀘치 특성을 열평형 방정식으로 모델링하고 그 결과 고장전류에 따른 케이블의 설계 최대 온도상승한계에 도달하는 시간을 산출하여 기존의 보호계전시스템의 차단시간과 비교함으로써 안전성 여부를 판정하였다. 퀘치발생 고장시간을 모의하기 위해 초전도케이블용 EMTDC 모형을 개발하였으며, 모의 결과 초전도 케이블 계통을 보호할 수 있는 안전성 제어방식이 설계 가능성을 보였다.

Abstract

This paper presents the basic quench protection idea for the HTS(High-Temperature Superconducting) cable. In Korea power system, the transfer capability of transmission line is limited by the voltage stability, HTS cable could be one of the countermeasure to enhance the transfer limit with its higher current capacity and lower impedance[1]. However, the quench characteristic makes not only HTS cable to loss its superconductivity, but also change the impedance of the transmission line and power system operating condition dramatically. This phenomenon threatens HTS cable safety as well as power system security, therefore a proper protection scheme and security control counterplan have to be established before HTS cable implementation. In this paper, the quench characteristics of HTS cable for the fault current based on heat balance equation was established and a proper protection method regarding conventional protection system was suggested.

Key Words : Transfer Capability, HTS cable, Quench, Heat balance equation, Security control design

1. 서 론

전력에너지의 소비 증가와 인구의 도시 집중화는 보다 높은 밀도의 전력 수송수단을 필요로 하고 있지만, 최근의 전력시장 규제완화 및 환경문제에 대한 관심도의 제고 추세는 전력수송설비의 신증설을

* 주저자 : 충북과학대학 전기에너지시스템과 교수

Tel : 043-730-6321, Fax : 043-730-6321

E-mail : gjlee@ctech.ac.kr

접수일자 : 2005년 4월 20일

1차심사 : 2005년 4월 25일, 2차심사 : 2005년 6월 29일

심사완료 : 2005년 7월 26일

거의 불가능하게 만들고 있다.

초전도 케이블은 1986년 고온 초전도체가 발견된 이래 꾸준한 기술 진보를 보이고 있으며, 절연과 냉각 및 도체 배열 방식에 따라 다양한 특성을 갖는 1[GVA]급 수백 [m]급 고온초전도 케이블(High Tc Superconductor cable : HTS cable)이 일본, 미국, 유럽을 중심으로 제작 시험되고 있고[1-3], 우리나라에서도 22.9[kV]급 HTS 실증시험장을 건설을 추진 중에 있어 2010년을 전후로 HTS 케이블은 보다 현실적인 경쟁력을 가진 전력수송수단으로 등장할 것으로 전망되며[4], 이에 대처하기 위한 HTS cable 연계 계통의 기술적/경제적 검토를 위한 계통 응용 기술 기반이 조성되어야 할 필요성이 있다[5].

1.1 고온 초전도케이블 개발 및 적용 현황

1986년 Bednorz와 Muller에 의해 고온 초전도 재료가 개발 된 이후 액체 질소온도에서 동작하는 초전도 케이블에 대한 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 Bi계의 고온 초전도 선재의 임계전류의 고밀도화와 및 장척화 가능해져 HTS 케이블의 실용화를 목표로 경제성이 있는 HTS케이블 시스템 개발에 박차를 가하고 있다. 그 중에서도 BSCCO-2223은 현재 임계온도가 110[K]정도로 매우 높아 최근 대부분의 HTS 케이블은 BSCCO-2223을 이용하여 제작하고 있다[6-7]. 이와 같이 개발된 케이블은 외형상 현

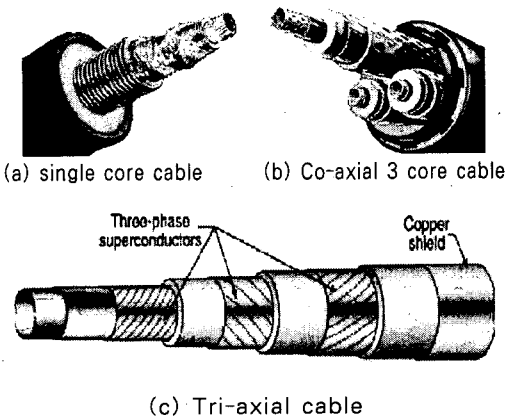


그림 1. HTS 케이블의 종류
Fig. 1. HTS cables

재까지 3가지 종류로 구분할 수 있다. 그림 1은 단상 케이블, 3상 동축케이블, Try-axial 형태의 케이블을 나타내고 있다.

지금까지 케이블의 개발 동향 중 대표적인 것을 소개하면, 표 1과 같다.

표 1. HTS케이블 개발현황(8-17)
Table 1. Development status of HTS cable

Project	Year	[m]	[kV]	[kA]	#Phase	[MVA]
Sumitomo/TEPCO	1997	30	66	1	1	100
Sumitomo/TEPCO	2001	100	66	1	3	114
Southwire/DOE-SPI	2000	30	12.4	1.25	3	25
Ultera/SW/AEP	2001	30	36	2	3	125
Pirelli/EPRI/DOE-SPI	1996	50	115	2	1	400
Pirelli/DTE/DOE-SPI	2001	120	24	2.4	3	100
Pirelli/EDF	2002	30	225	2.6	1	1,000
Pirelli/ENFL/Edison	2003	30	135	3	1	685

1.2 실용화 상의 문제점-퀀치

HTS 케이블이 실용화되기 위해서는 경제적인 측면에서 초전도케이블 시스템의 저가화가 필수적이지만, 기술적인 측면에서는 초전도 선재의 기계적, 열적, 전기적 우수한 특성이 요구된다. 그중 퀀치는 초전도 상태를 유지하는 평형 상태가 깨져서 초전도 상태를 상실하는 현상으로 전력계통에 초전도 케이블을 병입, 운전하는 경우 퀀치가 발생하게 되면 대용량 전력수송을 담당하는 초전도 케이블의 수송능력을 상실시키면서 고가의 초전도 케이블을 파괴시킬 수 있는 중요한 현상이다. 따라서 기존 계통에 초전도 케이블의 적용을 검토할 경우 계통에 발생가능한 외란(열적, 기계적, 전기적)이 초전도 케이블에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 한편, 외란에 대해 초전도 케이블이 초전도 상태를 유지 가능한지를 판정할 수 있는 기법의 개발이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 퀀치 특성을 고장전류의 크기와 시간의 함수로 도출하고 이를 통해 적용계통의 고장전류가 주어진 경우 기존 전력계통의 보호시스템에 대한 퀀치 안전성 검토 및 이를 제어할 수 있는 방법을 제시코자 한다[21].

2. 본 론

2.1 열 발생과 켄치

일반적으로 초전도 케이블에 발생하는 열손실은 부하전류에 의해 발생하며, 도체의 온도 상승으로 이어진다.

전력 시스템에서 여러 가지 요인으로 발생하는 과전류는 HTS 케이블에 중요한 영향을 준다. 임계 전류의 수 배에 해당하는 과전류가 흐르면, 매우 짧은 순간에 실온까지의 온도상승을 초래하여 초전도 케이블에 심각한 손상을 초래할 수 있다. 그러므로 HTS 케이블 운전시 매우 큰 고장전류가 발생한 경우 케이블의 열적한계 이내로 단락전류를 저감 또는 차단하는 것이 필수적이며, 이를 적절히 제어하지 못하면 케이블의 영구적인 손상을 초래할 수도 있다[18].

고장 전류가 인가된 동안 HTS 케이블 열 발생과 켄치의 관계는 온도를 T , $C(T)$ 를 열용량(heat capacity), $k(T)$ 를 열전도율, $Q(T)$ 는 내부 열 발생, $\mathbb{W}(T)$ 는 냉각열이라면 식 (1)의 단열 방정식으로 근사화 될 수 있다[19-21].

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q(T) - \mathbb{W}(T) \quad (1)$$

여기서 내부 열 발생은 전류를 $I(t)$, ρ 를 테입의 전기 저항율(resistivity), A 를 단면적으로 하면 식 (2)와 같다.

$$Q(T) = \frac{\rho(T)}{A} I(t)^2 \quad (2)$$

초전도 도체가 임계온도 이상이 되면 즉시 켄치가 발생한다고 가정하고 켄치 후의 매우 짧은 시간동안 열 전도와 냉각을 무시하면, 열 평형 방정식은 식 (3)과 같이 간단하게 된다.

$$\int_{t_0}^t \frac{\rho_{Ag}(T)}{A_{Ag}} I^2 dt = \int_{T_0}^T m_{HTS} c_{p,HTS}(T) dT \quad (3)$$

t_0 : 고장발생시간, t : 고장시간 [sec]

T_0 : 초기 온도, T : t 초 때의 케이블 온도[K]

m_{HTS} : 케이블 통전부의 질량[kg]

$c_{p,HTS}(T)$: T[K]에서의 통전부 비열[kcal/kg.K]

2.2 켄치검토를 위한 HTS cable의 과도 해석

HTS 케이블이 과도한 열에 의해서 견딜 수 있는 최대 온도는 케이블의 종류와 특성에 따라 다르며, 케이블 설계시 기본적으로 고려된다. 케이블이 견딜 수 있는 최대 온도가 사양으로써 주어지면 정상 전류의 수배에 해당하는 단락 전류에 대한 최대 온도 도달시간을 산출할 수 있으며 이 시간 이내에 보호 장치를 동작시켜 HTS 케이블을 보호해야 한다. 본 논문에서는 EMTDC를 이용하여 고장임피던스의 변화에 대한 단락 전류를 구한 후 이에 대한 HTS 케이블의 최대 허용 온도 상승에 도달하는 시간을 구하고, 이를 이용하여 HTS 케이블의 안전성 제어를 위한 대책을 제시하고자 하였다.

2.2.1 모형화

본 연구에서 고찰된 케이블은 문헌 [23]에서 개발된 66[kV]급 케이블을 이용하였으며 케이블의 구조는 3상 동축 케이블로써 저온 절연 형태이고 정격은 66[kV]/1[kArms]/114[MVA]이며, 케이블의 임계전류는 77.3[K]에서 2.7[kA], AC 손실은 1상당 0.7[W/m]이다. 그림 3은 66[kV] 케이블의 구조를 나타내며 표 2는 HTS 케이블의 사양을 나타낸다.

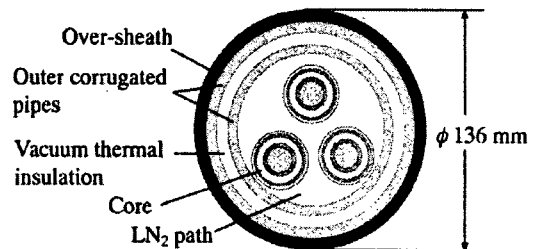


그림 3. 66(kV) HTS 케이블의 구조
Fig. 3. Structure of 66(kV) HTS cable

조전도 케이블의 Quench 특성에 대한 계통안전성 제어방식

표 2. HTS 케이블의 사양
Table 2. Design status of HTS cable

Part	size	특성
포머	∅16[mm]	Filled-core fine-stranded copper
HTS 테이프	0.24[mm]×3.8[mm]	Bi-2223, I _c >50[A] at 77.3[K], 1[μV/cm] 4 layer with 52 tapes
도체	∅20[mm]	Spiral pitch length[mm] and direction 130(Z), 305(Z), 400(S), 115(S) S=clockwise, Z=counterwise
전기적 절연	두께 7[mm]	PPLP impregnated with LN ₂
섀드	∅37[mm]	Spiral pitch length[mm] and direction 350(S), 530(Z)
열절연	95[mm](I.D.) 129[mm](O.D.)	Co-axial stainless corrugated pipes with super-insulation
외경	136[mm]	PVC jacket on the corrugated pipes

이 케이블의 V-I 특성 곡선은 그림 4와 같다[23].

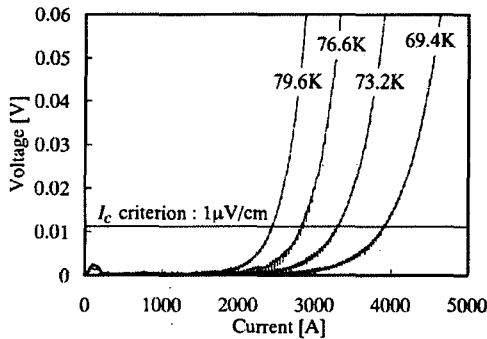


그림 4. 66(kV) HTS 케이블의 V-I 특성 곡선
Fig. 4. V-I characteristics of 66(kV) HTS cable

2.2.2 모형계통

그림 5는 고장임피던스 변화에 따른 HTS cable의 고장전류를 모의하기 위한 계통이며, 그림 6은 HTS cable의 EMTDC 모델로 초전도 도체와 Ag시스를 병렬로 하여 π 등가 회로로 나타내었다. 고장전류가 흐를 경우 케이블의 저항과 인덕턴스가 증가하지만 여기서는 케이블의 저항 증가만 고려하였으며 [24], 시뮬레이션 동안 Ag시스의 저항은 일정한 것으로 가정하였다. 고장전류가 임계전류를 초과하여 흐르는 경우 켄치로 진전되면서 케이블 저항이 증가

하며 임계 전류 이하로 떨어지게 되면 저항 역시 전류 변화와 마찬가지로 즉시 켄치가 회복되어 저항이 감소되는 것으로 모델링 하였다. 고장조건은 3상 단락으로 하였다.

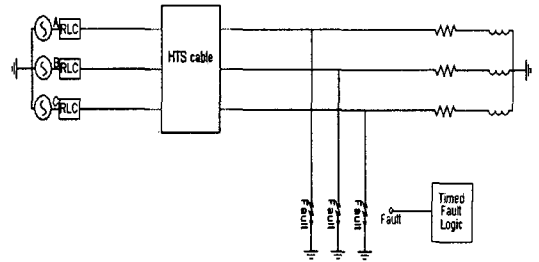


그림 5. HTS cable 켄치해석 모형계통
Fig. 5. Model diagram for HTS cable quench analysis

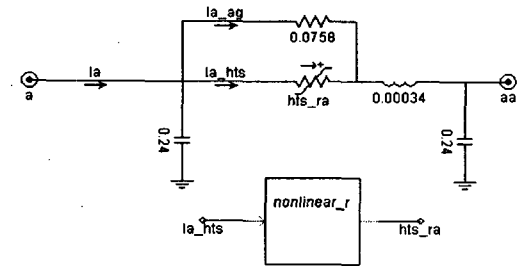


그림 6. HTS cable의 초전도체와 은시스 모형
Fig. 6. Model of superconductor and Ag sheath

2.2.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과 회로의 단락 전류 및 HTS 테이프에 흐르는 전류와 Ag시스에 흐르는 전류를 그림 7~9에 나타내었다.

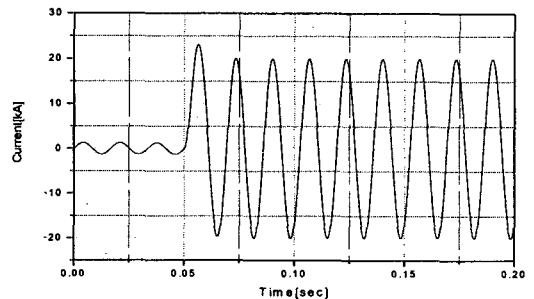


그림 7. HTS cable의 전체 고장전류
Fig. 7. Total fault current of HTS cable

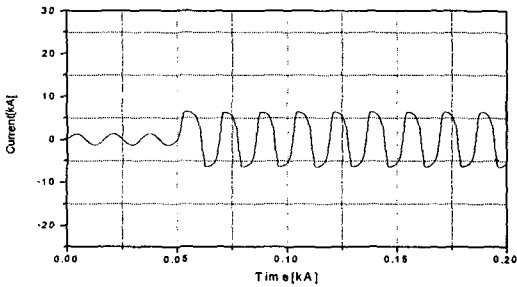


그림 8 HTS cable의 초전도체 고장전류
Fig. 8 Fault current of superconductor in HTS cable

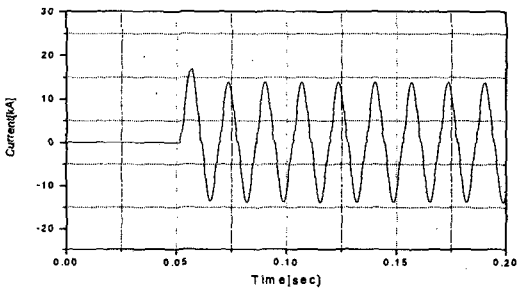


그림 9. HTS cable의 은 sheath 부 고장전류
Fig. 9. Fault current of silver sheath in HTS cable

고장전류의 최대값은 20[kA]로 계산되었는데, HTS 테이프의 단락전류는 5[kA] 정도에서 거의 일정하다. Ag시스템의 전류의 피크는 약 15[kA] 정도까지 상승한다. 케이블의 온도 상승은 식 3의 단열 방정식으로 계산될 수 있는데, 이때 계산된 결과는 열전도와 방사와 같은 항을 무시한 단열 방정식을 이용했기 때문에 실제 계통보다는 조금 낮게 나타날 수 있으나 그 결과는 문헌[24]의 실험 결과와 비교 고찰에서 계산된 결과와 측정 결과는 많은 차이가 나지 않기 때문에 어느 정도 신뢰성을 가진다고 할 수 있다.

현재 HTS 케이블의 임계온도는 약 110[K] 정도이므로 케이블에 허용되는 온도를 110[K]로 선정하였으며, 계산 결과 단락전류 20[kA]일 경우 임계온도 110[K]에 도달하는 시간은 0.35[sec]로 나타났다.

그림 10은 단락전류의 크기를 10[kA]에서 40[kA]까지 변화 시킨 경우에 온도 상승이 110[K]에 도달하는 시간을 나타내었다.

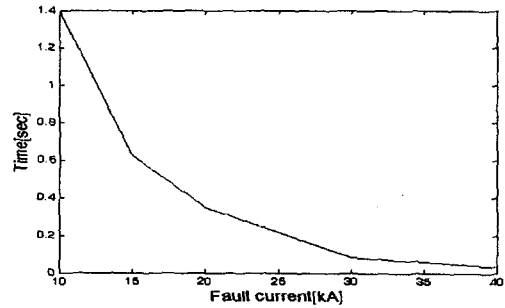


그림 10. 퀠치시 단락전류와 110(K)에 도달하는 시간
Fig. 10. Fault current and time of quench at 110(K)

2.3 초전도 케이블의 안전성 제어

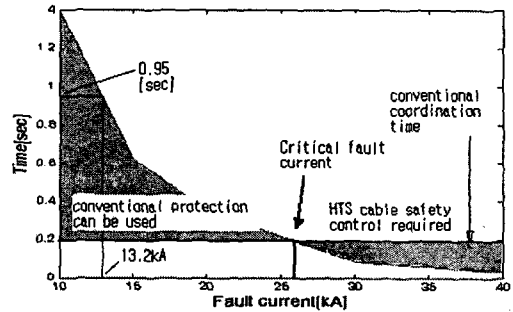


그림 11. HTS cable의 안전성 제어개념
Fig. 11. Security design concept of HTS cable and protection system

그림 11은 IEEE-14모선계통의 일부를 66[kV] 초전도케이블로 대체한 경우 발생한 고장전류에 대하여 HTS cable의 퀠치 한계전류와 계통보호시스템의 협조방식을 제시한 것이다. 66[kV]의 보호계전방식에서 고장제거시간을 0.2[sec]로 가정하면 퀠치 한계 고장전류가 26[kA]로 되며, HTS cable의 최대고장전류가 13.2[kA]로 계산되었으므로 퀠치발생시간은 0.95[sec]으로 되어 재래식 보호계전방식을 사용한 고장제거 시에도 퀠치발생에 충분한 시간 마진이 있게 되어 별도의 고장전류제어장치가 필요하지 않다. 그러나 계통의 변화에 의해 26[kA]를 넘어서는 고장전류가 발생하는 경우에는 한계 고장제거시간이 0.2[sec]보다 적게 되므로 고장전류를 저감하기 위한 초전도 한류기를 적용하거나 고속보호계전시스템의 채용이 필요하다.

3. 결 론

초전도 케이블 중 현실적으로 전력계통 응용 가능성이 있는 고온 초전도 케이블(HTS cable)을 송전 시스템으로 채용하는 경우 퀘치 현상에 의해 발생할 수 있는 HTS cable의 파손으로부터 안전성을 확보하기 위한 안전성제어방법을 제시하였다.

HTS 케이블의 고장전류에 대한 퀘치특성은 열평형방정식에 의하여 고장전류와 임계시간의 특성곡선으로 산출함으로써 기존의 보호협조방식과 HTS cable의 퀘치 보호방식을 시간협조에 의해 검토가능토록 함으로써 초전도케이블의 계통 적용시 초전도 케이블의 안전성제어를 위한 판단을 가능케 함과 동시에 고장전류 저감을 위한 한류기와의 협조에 필요한 설계자료를 제공하였다.

향후 초전도 케이블의 실용화를 보다 정밀히 검토하기 위해서는 해당 전압계급에 대한 HTS 케이블의 열적, 전기적, 기계적 특성이 구체적으로 규격화되어야 하며, 우리나라의 경우 22.9[kV], 154[kV], 345[kV]용 HTS cable 및 직류 HTS cable의 실용화를 위한 전력계통상의 적용검토 및 규격설정에 대한 연구가 면밀히 수행되어야 한다.

이 연구는 산업자원부 및 한국전력기술연구원의 전력산업 연구개발사업에 의해 지원된 것으로 이에 감사를 드립니다.

References

[1] S. honjo, K. Matsuo, T. Mimura, Y. Takahashi, "High- T_C superconducting power cable development", *Physica C* 1234-1240, 2001.

[2] 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.

[3] L. Usur, D. Parker, M. Tanner, E. Podtburg, D. Buczek, J. Scudiere, P. Caracino, S. Spreafico, P. Corsaro and M. Nassi, "Long length manufacturing of high performance BSCCO-2223 tape for the Detroit Edison power cable project", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 11, No. 1, pp. 3256-3260, 2001.

[4] "초전도 케이블의 실증시험 및 평가-초전도 전력케이블 시스템 개발" 중간보고서 2003. 7. 31 산업자원부.

[5] "초전도케이블의 전력계통 적용 기반기술연구," 전력연구원-충북과학대학, 중간보고서 2004. 8.

[6] T. Hemmi, A. Ninomiya, T. Ishigohka, K. Kurahashi, K. Arai, J. Yamaguchi, M. Umeda and K. Kaiho, "Transient behavior of Bi2223/Ag HTS tape for sharp rising current", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 12, No. 1, pp. 1422-1425, 2002.

[7] T. Masuda, T. Kato, H. Yumura, M. Hirose, S. Isojima, S. Honjo, K. Mausuo, T. Mimura, Y. Takahashi "Experimental results of a 30m, 3-core HTSC cable", *Physica C*, 1555-1559(2002).

[8] T. Masuda, T. Kato, H. Yumura, M. Watanabe, Y. Ashibe, K. Ohkura, C. Suzawa, M. Hirose, S. Isojima, K. Matsuo, S. Honjo, T. Mimura, T. Kuramochi, Y. Takahashi, H. Suzuki, T. Okamoto, "Verification tests of a 66(kV) HTSC cable system for practical use (first cooling tests)", *Physica C*, 378-381, pp. 1174-1180, 2002.

[9] T. Masuda, et al, "Development of a 100m, 3-core 114 MVA HTSC cable system" *Physica C* 1580-1584, 2002.

[10] M. Watanabe, T. Masuda, Y. Ashibe, M. Hirose, S. Isojima, S. Honjo, T. Uchiyama, M. Shimodate, Y. Takahashi and H. Suzuki, "Thermo-Mechanical Properties of a 66(kV) superconducting power cable system", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 13, No. 2, 2003.

[11] O.Mimura, S.Tanaka, K.Miyoshi, N. Ichiyonagi, Y. Tanaka, H.Ishii, T.Hara, "66(kV)-2kA peak load test of high- T_c Superconducting model cable", *Cryogenics* 36, 589-598, (1966).

[12] M. Nassi, N. Kelley, P. Ladie, P. Coraro, G. Coletta and D. V. Dollen, "Qualification results of a 50m-115(kV) warm dielectric cable system", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 11, No. 1, 2001.

[13] S. Spreafico, M. Bechis et al, "Status of warm dielectric cable installation at Detroit Edison", *Physica C*, 372-376, pp. 1588-1590, 2002.

[14] M. J. Gouge, M. J. Cole, J. A. Demko, P. W. Fisher, C. A. Foster, R. Grabovickic, D. T. Lindsay, J. W. Lue, M. L. Roden, J. C. Tolbert, "High-temperature superconducting tri-axial power cable", *Physica C*, 392-396, pp. 1180-1185, 2003.

[15] P. W. Fisher, M. J. Cole, J. A. Demko, C. A. Foster, M. J. Gouge, R. W. Grabovickic, J. W. Lue, J. P. Stovall, D. T. Lindsay, M. L. Roden, and J. C. Tolbert, "Design, Analysis, and Fabrication of a Tri-Axial Cable System", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 13, No. 2, pp. 1938-1941, 2003.

[16] D. Willen et al, "First operation experiences from a 30(kV), 104MVA HTS power cable installed in utility substation", *Physica C*, 372-376, pp. 1571-1579, 2002.

[17] D. W. A. Willen et al, "Test results of full-scale HTS cable models and plants for a 36(kV), 2kArms utility demonstration", *IEEE Trans. on Applied superconductivity*, Vol. 11, No. 1, pp. 2473-2576, 2001.

[18] J. Jipping, A Mansoldo, and C. Wakefield, "The impact of HTS cables on power flow distribution and short-circuit currents within a meshed network", *IEEE* pp. 736-541.

- [19] T. Hemmi, A. Ninomiya, T. Ishigchka, K. Kurahashi, K. Arai, J. Yamaguchi, M. Umeda and K. Kaiho, "Transient behavior of Bi2223/Ag HTS tape for sharp rising current", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, pp. 1422-1425, 2002.
- [20] V.S. Vysotsky, A.L. Rakhmanov, Yu. Ilyin, "Influences of voltage-current characteristic difference on quench development in low-Tc and high-Tc superconducting devices(Review)", Physica C 401 pp.57-65, 2004.
- [21] 이근준, 황시돌, "전압안정도 제약 계통에 대한 고온초전도 케이블 적용효과", 한국조명 전기설비학회 논문지 2004. 9.
- [22] Jon Jipping, Andrea Mansoldo, "The impact of HTS cables on Power Flow distribution and Short-Circuit currents within a meshed network", IEEE 2001 O-7803-7285-9/01.
- [23] S. Honjo, M.Shimodate, Y. Takahashi, T.Masuda, H. Yumura, C.Suzawa, S.Isojima, H.Suzuki, "Electric Properties of a 66(kV) 3-core superconducting power cable", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13, No.2, 2003.
- [24] K.W.Lue, G.C.barber, J.A. Demko, M.J.Gouge, J.P.Stovall, R.L.Jughey and U.K. Sinha, "Fault current test of a 5-HTS cable", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp.1785-1788, 2001.

◇ 저자소개 ◇

이근준 (李根準)

1957년 9월 4일 .1981년 울산공대 전기공학과 졸업.
1985년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1996년 울산대 전기공학과 졸업(박사). 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.

1957년 1월 1일 주요관심분야 : 초전도, 전력계통안정
도, FACTS, 전력품질평가시스템, 분산전원.

Tel:043-730-6321, E-mail gilee@ctech.ac.kr

황시돌 (黃時堧)

1957년 1월 12일. 1982년 연세대 전기공학과 졸업.
1986년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980
년~현재 한전 전력연구원 초전도 그룹 책임연구원.
주요 관심분야 : 초전도 기술의 전력계통 응용.

Tel : 042-865-5972, E-mail : sdhwang@kepri.re.kr