초전도 케이블의 퀜치 특성에 대한 계통안전성 제어방식

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

이근준* · 황시돌 · 이정필 · 김창현 · 박희철
(Geun-Joon LEE, Si-Dol Hwang, Jeong-Phil LEE, Chang-Hyun Kim, Hye-Chul Park)

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, and HTS cable could be one of the countermeasure to solve the transfer limit as its higher current capacity and lower impedance[1]. However, the quench characteristic of HTS cable makes HTS cable to loss its superconductivity, and therefore change the impedance of the line and power system operating condition dramatically. This pheonominum threats not only HTS cable safety but also 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 by FCL(Fault Current Limiter) was suggested.

1. 서 론

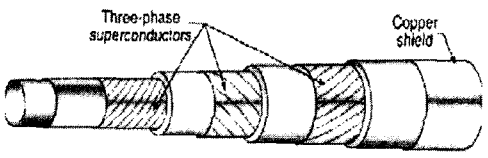
전력에너지의 소비 증가와 인구의 도시 집중화는 보다 높은 밀도의 전력 수송수단을 필요로 하고 있지만, 최근의 전력시장 규제완화 및 환경문제에 대한 관심도의 제고 추세는 전력수송설비의 신증설을 거의 불가능하게 만들고 있다.

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 22.9kV급 HTS 실증시험장을 건설을 추진 중에 있어 2010년을 전후로 HTS 케이블은 보다 현실적인 경쟁력을 가진 전력수송수단으로 등장할 것으로 전망되며[22], 이에 대처하기 위한 HTS cable 연계 계통의 기술적/경제적 검토를 위한 계통 응용기술 기반이 조성되어야 할 필요성이 있다[4].

1.1 고온 초전도케이블 개발 및 적용 현황

1986년 Bednorz 와 Muller에 의해 고온 초전도 재료가 개발 된 이후 액체 질소온도에서 동작하는 초전도 케이블에 대한 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 Bi 계의 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 110K정도로 매우 높아 최근 대부분의 HTS 케이블은 BSCCO-2223을 이용하여 제작하고 있다[5-6]. 이와 같이 개발된 케이블은 외형상 현재까지 3가지 종류로 구분할 수 있다. 그림 1은 단상 케이블, 3상 동축케이블, Try-axial 형태의 케이블을 나타내고 있다.

(b) Co-axial 3 core cable　　(a) single core cable



(c) Tri-axial cable

그림 1. 케이블의 종류

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

표 1. HTS케이블 개발현황

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

일본에서는 Tokyo Electric Power Company (TEPCO)와 Sumitomo Electric Industry (SEI)는 1999년 저온 절연(Cold Dielectric : CD)과 Bi-2223/Ag-Mn시스를 채용하여 66kV, 30m-3core HTS 케이블을 개발한데 이어, 2001년 동일 형식의 66kV/1kA/114MVA, 100m 3-core HTS 케이블 개발하여 CRIEPI test site에 설치, 제 시험을 성공적으로 수행하였다[7-9].

미국에서는 1999년 초, Pirelli Cable, EPRI, DOE가 공동으로 WD 형식의 50m 길이 115kV/2kA HTS 케이블을 설계 제작 하여 전기적인 테스트 수행하였다[10]. Pirelli Cables &Systems와 Detroit Edision에서는 WD형식 24kV/100MVA/2.4kA(rms) 120m케이블을 개발하여 Detroit Edison Frisbie 변전소에 설치하였으나[12], 설치된 3상 케이블 중 1상만 동작을 하고 나머지 두상은 냉각 절연의 누설이 발견되어, 철수되고 말았다. South wire and ORNL(Oak Ridge National Laboratory)는 CD 형식의 30m 길이 12.4kV/27MVA/1250A급 HTS 케이블을 제작하여 공장 3군데에 전력을 공급하는 실증 테스트를 성공적으로 수행하였으며, 또 2001년 1.5m 길이의 tri-axial prototype 케이블을 제조하여 테스트 한 결과 1250A에서 AC 손실이 1W/m인 긍정적인 결과를 얻었다. [13][14]. Ohio의 American Electric Power에서는 300m, 3kA, Trii-axial 3상 케이블을 시험할 예정으로 있다.

덴마크의 NKT는 1999-2000년 WD형식의 30m 길이 30kV/104MVA/2kA급 1-core HTS 케이블 설계 제작하고, 2001년 Amager (AMK)의 Copenhagen Energy 변전소에서 설치하여 2001-2002년 까지 약 18개월 동안 50000수용가에게 전력공급 하였다[15][16].

그림 2는 NKT의 HTS 케이블 시스템을 Copenhagen 남부 Amager에 있는 132/30kV(AMK) 변전소에서 테스트한 결과이다.

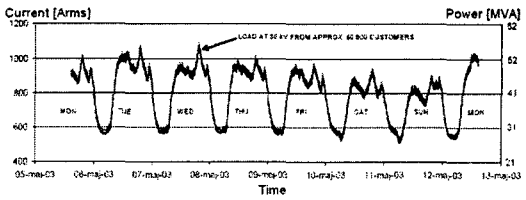


그림 2. HTS 케이블의 운전 데이터

테스트 기간동안 주요한 결과는 먼저 HTS 케이블과 단말은 60MVA의 전력까지 계획에 따라서 잘 동작하였으나, 냉동 시스템은 설치 환경에서 연속 동작시 요구 신뢰성을 충족하지 못했다. HTS 케이블 시스템의 동작과 보호를 위한 감시시스템은 정확하게 동작을 했다. 따라서 냉각 시스템을 향상 시킬 필요성이 제기되었다[25,26].

1.2 실용화상의 문제점 및 해결 방안

HTS 케이블이 실용화되기 위해서는 먼저 재료적인 관점에서 보면 낮은 AC 손실, 우수한 기계적 특성, 높은 임계전류 밀도, 임계전류의 균일성을 가져야 하며, 케이블의 열손실 감소, 장거리 대용량 도체의 제조방법의 개발, 액체 질소 온도에서 신뢰성 있는 유전체 개발, 열손실이 적고 열적으로 절연된 파이프, 높은 안정성과 신뢰성 있는 냉각 시스템의 개발 등 해결 과제가 상당부분 존재한다. 다음으로 전력 시스템 관점에서 보면 케이블 적용개소의 정확한 선정기준의 마련, 전압 안정도 문제, 계통안정도 문제 등 전력계통상의 영향을 정확하게 해석 할 필요가 있으며 특히 과도한 단락 전류에 의한 퀜치 현상 때문에 발생하는 케이블의 손상을 방지하기 위하여 케이블 보호 메커니즘에 대한 연구를 통한 안정성 제어 개념을 도출하고 이에 대한 대책이 요구된다.

2. 본 론

2.1 열 발생과 퀜치

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[17].

고장 전류 발생동안 HTS 케이블 열 발생과 퀜치의

관계는 $C(T)$를 열용량(heat capacity), $k(T)$를 열전도율, $Q(T)$는 내부 열 발생, $W(T)$는 냉각열이라면 식 1의 단열 방정식로써 근사화 될 수 있다[18-20].

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

여기서 내부 열 발생은 전류를 I(t), ρ를 테입의 전기 저항율(resistivity), A를 단면적으로 하면 식 (2)와 같다.

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

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

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

2.2 퀜치검토를 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 시간이내에 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 66kV급 케이블을 이용하였으며 케이블의 구조는 3상 동축 케이블로써 저온 절연 형태이고 정격은 66kV/1kArms/114MVA이며, 케이블의 임계전류는 77.3K에서 2.7kA, AC 손실은 1상당 0.7W/m이다. 그림 3은 66kV 케이블의 구조를 나타내며 표 2는 HTS 케이블의 사양을 나타낸다.

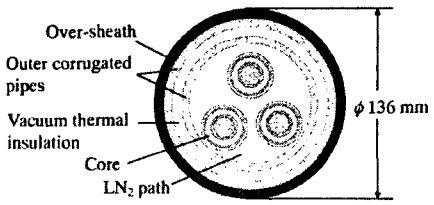


그림 3. 66kV 케이블의 구조

표 2. HTS 케이블의 사양

Part	size	특성
포머	Ø16mm	Filled-core fine-stranded copper
HTS 테이프	0.24mm×3.8 mm	Bi-2223, Ic>50A at 77.3K, 1μV/cm 4 layer with 52 tapes
도체	Ø20mm	Spiral pitch length[mm] and direction 130(Z), 305(Z), 400(S), 115(S) S=clockwise, Z=counterwize
전기적 절연	두께 7mm	PPLP impregnated with LN2
쉴드	Ø37mm	Spiral pitch length[mm] and direction 350(S), 530(Z)
열절연	95mm(I.D.) 129mm(O.D)	Co-axial stainless corrugated pipes with super-insulation
외경	136mm	PVC jacket on the corrugated pipes

이 케이블의 V-I 특성 곡선은 그림 4와 같다.

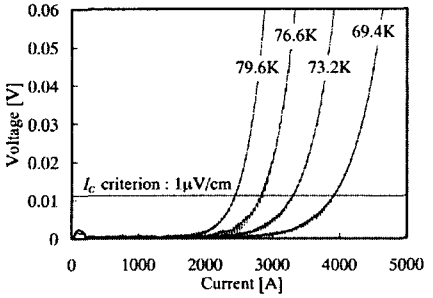


그림 4. 66kV 케이블의 V-I 특성 곡선

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 Ag 시스의 저항은 일정한 것으로 가정하였다. 고장전류가 임계전류를 초과하여 흐르는 경우 퀜치로 진전되면서 케이블 저항이 증가하며 임계 전류 이하로 떨어지게 되면 저항 역시 전류 변화와 마찬가지로 즉시 퀜치가 회복되어 저항이 감소되는 것으로 모델링 하였

다. 고장조건은 3상 단락으로 하였다.

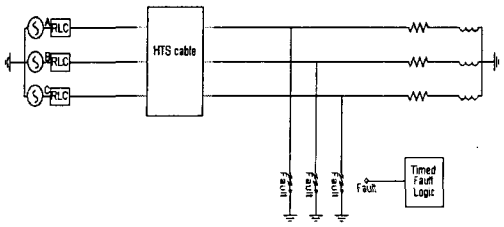


그림 5. HTS cable 퀜치해석 모형계통

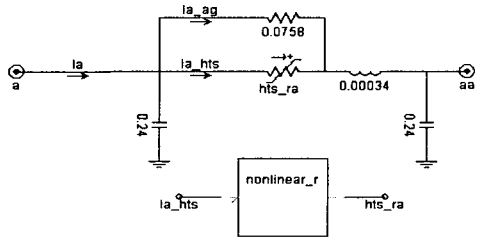


그림 6. HTS cable의 초전도체와 은쉬스 모형

2.3.2 시뮬레이션 결과

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

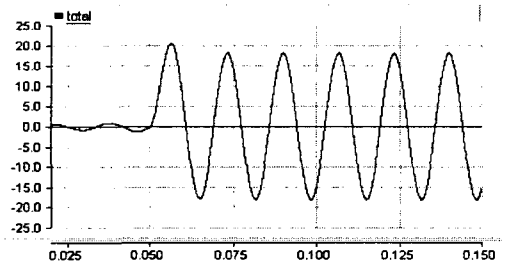


그림 7. HTS cable 전체 고장전류

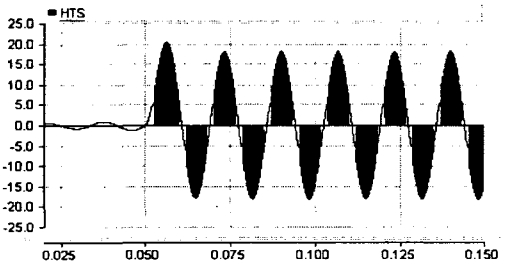


그림 8. HTS cable의 초전도체의 고장전류

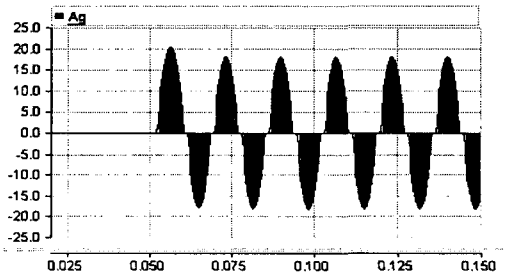


그림 9. HTS cable의 은 쉬스부 고장전류

고장전류의 최대값은 20kA로 계산되었는데, 진동하는 파형은 EMTDC 시뮬레이션시 초전도체의 저항 모형이 고장전류의 큰 지수함수로 주어지기 때문에 발생하는 수치에라이며 실제로는 그림 8의 HTS 테입의 단락전류는 5kA 정도에서 거의 일정하다. Ag 시스의 전류의 피크는 약 15kA 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] 정도 이므로 케이블에 허용되는 온도를 110[K]로 선정하였으며, 계산 결과 단락전류 20[kA]일 경우 임계온도 110K에 도달하는 시간은 0.35[sec]로 나타났다.

그림 10은 단락전류의 크기를 10kA에서 40kA까지 변화 시킨 경우에 온도 상승이 110K에 도달하는 시간을 나타내었다.

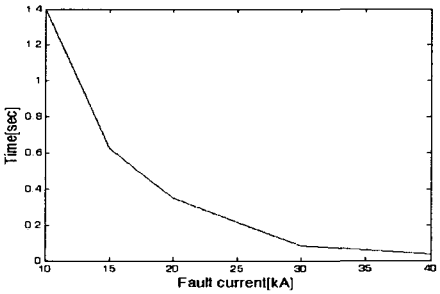


그림 10. 단락전류와 110[K]에 도달하는 시간

2.2.3 초전도 케이블의 안전성 제어

그림 11은 IEEE-14모선계통의 일부를 66kV 초전도 케이블로 대체한 경우 발생한 고장전류에 대하여 HTS cable의 퀜치 한계전류와 계통보호시스템의 협조방식을

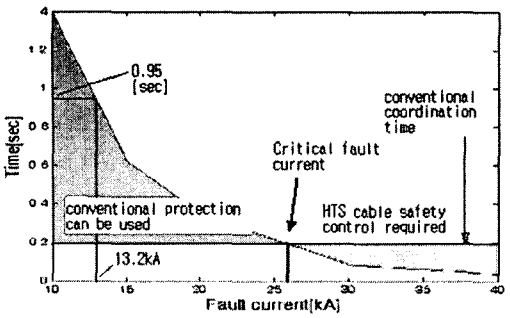


그림 11. HTS cable의 안전성 제어개념

제시한 것이다. 66kV의 보호계전방식에서 고장제거시간을 0.2[sec]로 가정하면 퓨치 한계 고장전류가 26[kA]로 되며, 표 10에서 HTS cable의 최대고장전류가 13.2[kA]이므로 퓨치발생시간은 0.95[sec]으로 되어 재래식 보호계전방식으로도 고장제거에 충분한 시간이 있게 되어 별도의 고장전류제어장치가 필요하지 않다. 그러나 26[kA]를 넘어서는 고장전류에 대해서는 한계 고장제거시간이 0.2[sec]보다 적으므로 고장전류를 저감하기 위한 한류기 또는 고속보호계전시스템의 채용이 필요하다.

3. 결 론

초전도 케이블 중 현실적으로 전력계통 응용 가능성이 있는 고온 초전도 케이블(HTS cable)을 전압안정도에 의해 수송력이 제약되는 모형계통에 적용하는 방법을 검토하고 적용시 HTS cable의 안전성을 확보하기 위한 안전성제어방법을 제시하였다.

HTS 케이블의 고장전류에 대한 퓨치특성을 열평형 방정식에 의하여 고장전류와 임계시간의 특성곡선으로 산출함으로써 기존의 보호협조방식과 HTS cable의 퓨치 보호방식을 시간협조에 의해 검토 가능하게 함으로써 초전도케이블의 계통적용시 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.

참 고 문 헌

[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. Uasur, D. Parker, M. Tanner, E. Podtburg, D. Buczㄷㅏ, 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] "초전도케이블의 전력계통 적용 기반기술연구," 전력연구원-충북과학대학, 중간보고서 2004. 8

[5] 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

[6] 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)

[7] 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

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

[9]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 66kV superconducting power cable system", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, 2003

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

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

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

[13] 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

[14] 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

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

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

[17] 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

[18] 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

[19] T. Kiss, M. Jasegawa, K. Ogata, V. S. Vyscotsky, Y. Ilyin and M. Takeo, "Quench characteristics in HTSC devices", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 1073-1075, 1999

[20] 이근준, 황시돌, "전압안정도 제약 계통에 대한 고온초전도 케이블 적용효과", 한국조명 전기설비학회 논문지 2004. 9.

[21] Jon Jipping, Andrea Mansoldo, "The empact of HTS cables on Power Flow distribution and Short-Circuit currents within a meshed network", IEEE 2001 O-7803-7285-9/01

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

[23] S. Honjo, M.Shimodate, Y. Takahashi, T.Masuda, H. Yumura, C.Suzawa, S.Isojima, H.Suzuki, "Electric Properties of a 66kV 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

[25] S. K. Olsen, O. Tonnesen and J. Ostergaard, "Power applications for superconducting cables in denmark", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 1285-1288, 1999

[26] J. Oestergaard, " Superconducting power cables in Denmark-A case study", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp. 719-722, 1997