

고온초전도 케이블의 과도상태 특성 연구

장현만, 이창영, 김준동
LS전선

Study of Transient Characteristics of High Temperature Superconducting Cable

H. M. Jang, C. Y. Lee, C. D. Kim
LS Cable Ltd.

Abstract - High temperature superconducting (HTS) cable could be regarded as one of the most promising technologies for large electric power delivery with high reliability and low losses of power transmission system. Therefore, since 2001, LS Cable Ltd. has been developing 22.9kV, 50MVA HTS cable system as a member of DAPAS (Dream for Advanced Power system by Applied Superconductivity technology) program.

In 2003, 22.9kV HTS cable system, single-core cable employing BSCCO HTS wires was firstly manufactured in 2003, and then three-core cable was also successfully developed through the demonstration of its field applicability. In this paper, based on these experiences, the relevant design technology and transient characteristics of HTS cable is described

1. 서 론

1961년 R. McFee에 의해 최초로 제안된 초전도 전력 케이블은 1980년대 고온초전도체의 발견됨에 따라 실용화에 대한 연구가 본격적으로 진행되고 있다. 고온초전도 케이블 (이하 '초전도 케이블'로 기술함)은 액체질소 온도 (77K) 이하에서 약 50 ~ 100A/mm² 전류를 흘릴 수 있어 낮은 전압으로도 기존의 전력케이블의 5배 이상 전력수송이 가능하며, 초전도체의 저항이 매우 낮기 때문에 송전손실을 획기적으로 저감할 수 있다. 또한 초전도 케이블은 극저온상태에서 운전되기 때문에 케이블 설계 시에 반드시 적절한 단열구조를 필요로 하지만, 케이블의 포설 환경이나 주변온도와는 무관하게 초기에 설계된 정격용량을 그대로 송전할 수 있는 이점이 있다[1].

LS전선(주)는 최종 154kV급 초전도 케이블 개발을 목표로 2001년부터 과학기술부 주과 21C 프론티어연구개발사업에 참여해오고 있다. 현재는 22.9kV, 50MVA 초전도 케이블 시제품을 개발하여 신뢰성 평가를 진행 중에 있다.

본 논문은 초전도 케이블의 설계 개념과 실 계통 적용을 위한 사전연구로서 22.9kV 계통에서의 사고 상태 및 비상운전상태 등을 포함하는 초전도 케이블의 과도상태 특성을 기술하였다.

2. 초전도 케이블 설계

2.1 초전도 케이블 계통조건

22.9kV 초전도 케이블 시스템이 계통에 적용되기 위해서는 기존 전력기기 및 상전도 케이블 등과 연계되어 운전되어야 하며, 이들과의 상호 절연협조를 위해 기본적인 전압조건을 한전의 규격을 토대로 기존 시스템과 동일하게 하여 표 1과 같이 산출하였다.

표 1. 초전도 케이블 설계 조건

공칭전압, U ₀ /U(U _m)	13.2/22.9(25.8)kV
BIL	150kV _P
송전용량(정격전류)	50MVA(1260A _{rms})
사고전류	25kA _{rms}
케이블 최대외경	150mm 이하(175 판로기준)
LN ₂ 상시최대압력	10kg.f/cm ²

본 연구에서 개발제품의 정격용량을 시범적으로 50MVA로 설정하였으며 이 때 AC 정격전류는 1260A_{rms}이다. 초전도 도체의 DC 임계전류는 초전도 선재의 교류손실과 안전율을 감안하여 Peak current×1.3 이상으로 설계하였다.

2.2 초전도 케이블 개념 설계

초전도 케이블은 전기절연체의 냉각상태에 따라서 저온절연방식과 상온절연방식으로 구분되나, 세계적인 초전도 케이블 연구개발 동향 및 절연방식의 상호간 장단점 비교결과를 토대로 하여 본 연구의 개발목표를 저온절연방식으로 하였으며, 본 논문에서도 저온절연방식에 대해서만 기술하고자 한다.

본 연구의 대상인 초전도 케이블 구조는 3상의 케이블 코어를 하나의 단열관로중에 넣는 형태의 Triplex type의 3 core 케이블로서, 3상 케이블 코어와 내부 단열관, 열절연층 및 외부 단열관으로 구성된 cryostat로 이루어져 있다. 케이블 구조는 그림1에 표시한다. 3상의 케이블 코어는 과도상태 시 전기적 안정화제 역할을 수행하는 former, BSCCO 초전도 선재로 이루어진 초전도 도체층과 차폐층 그리고 도체와 차폐사이의 전기절연층으로 구성된다. 초전도 도체의 냉각을 위해서는 액체질소를 냉매로서 사용하며 냉각시스템을 통하여 액체질소를 과냉각상태로 만들어 케이블 내부에 강제유동 시킨다.

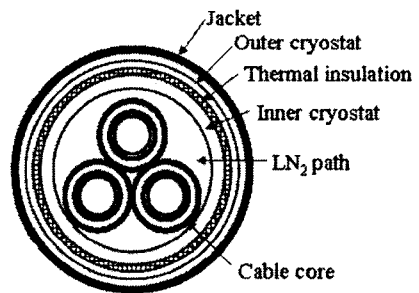


그림 1. 초전도 케이블 구조

실계통에서 단락 등의 고장이 발생하는 경우, 초전도 케이블에 정격전류의 수배에서 최대 수십배의 대전류가 흐르게 된다. 이러한 대전류에 대해서도 초전도 케이블이 그 기능을 잃지 않고 사고 복구 후에도 송전기능을 안정하게 유지할 수 있는 안정화 대책으로서 구리도체를 보호도체로서 설계하였다. 표 2에 22.9kV 50MVA 초전도 3상 케이블의 개략적인 사양을 나타내었다.

표 2. 22.9kV, 50MVA 초전도 케이블 설계사양

구분	사양
Former	Copper stranded wires
초전도 도체	BCSSO tapes (4×0.3 mm ²)
전기절연	Laminated PP Paper (4.68mm)
초전도 차폐	BCSSO tapes (4×0.3 mm ²)
Cryostat	Corrugated Al tube
단열층	Multi layer insulation (MLI, 3t)

3. 초전도 케이블 과도상태 특성

3.1 사고상태 특성

전력계통에서 고장은 3상 단락, 선간 단락, 2선 지락 및 1선 지락으로 분류되며, 그중 3상 단락사고에 의한 사고전류가 가장 크게 생성된다. 그림 2에 개략적으로 나타난 초전도 케이블이 적용된 계통에 있어서 고장이 발생했을 경우 고장지점을 기준으로 전원(모선)측의 사고전류 I_1 과 부하측의 사고전류 I_2 를 비교할 때 케이블 선로 및 부하 임피던스에 의해 I_1 이 I_2 에 비해 훨씬 크다. 상전도 케이블 계통에서도 마찬가지로 이며, 초전도 케이블 적용했을 때와는 I_2 값이 다소 상이할 수 있으나 두 경우 모두 I_2 는 I_1 을 초과하지 않는다[2]. 따라서 본 연구에서는 계통 내에서 주변 전력기기와의 절연협조를 위해서 22.9kV 계통에서 한전표준규격 “25.8kV 가스절연개폐장치”의 단시간 사고전류 25kA를 기준으로 안정화 도체를 설계 하였다[3].

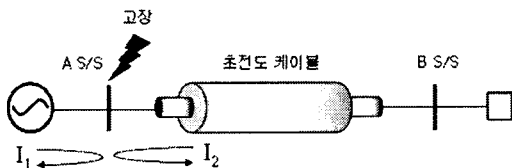


그림 2. 초전도 케이블 계통의 개요

초전도 케이블의 특성임피던스는 상전도 케이블에 비해 낮기 때문에 초전도 케이블 계통 적용 시에 계통 내 사고 시 사고전류 크기는 앞서 기술한 바와 같이 계통설계 및 케이블 설계 관점에서 주요 관심사항이다. 정상상태에서 초전도 케이블은 낮은 임피던스로 1260A를 통진하지만 사고 시 수십 kA이상의 단시간 과전류에 의해 수ms 이내에서 초전도 선의 임계전류를 초과하게 되어 초전도 도체는 상전도 상태로 전이되며, 그 저항이 수백 Ωcm에 달하게 된다. 그러므로 사고발생 수 ms 이후에는 모든 사고전류가 구리 안정화 도체를 통해 흐르게 되며, 이때는 상전도 케이블과 유사한 특성임피던스를 가지게 되므로 계통 내 사고전류 크기는 상전도 계통과 동일하게 된다[1]. 그러므로 초전도 케이블 계통 보호를 위한 추가적인 한류설비의 도움이 없이도 초전도 케이블을 계통에 직접 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

이러한 현상을 초전도 케이블 관점에서 바라볼 때, 구

리 안정화도체를 통해 사고전류가 흐르면 순간적으로 큰 열이 발생한다. 그 열은 순간적으로 구리 도체에 집중된 후 시간이 지나면 케이블 주변으로 전달되어 액체질소의 기화 및 과도한 압력 상승을 초래 할 수 있기 때문에 액체질소의 기화를 억제할 수 있는 구리 도체 단면적의 확보가 매우 중요 하다. 본 연구에서는 이 현상을 감안하여 IEC 949 및 극저온저항케이블 설계기술[***]을 토대로 구리도체 단면적을 산출하였으며, 표 3의 조건을 토대로 구리 도체, 초전도 도체 및 차폐층의 온도변화를 계산하였다. 표 3의 사고전류 지속시간은 차단기의 동작 성능 및 계통의 후비보호를 고려하여 250ms로 설정하였다. 과도상태 허용온도는 초전도 케이블 내부의 액체질소의 최소압력 2kgf/cm² 배의 비등점인 87.9K으로 설정 하였다.

표 2의 조건으로 계산된 초전도 케이블 core 중 고온 초전도 도체와 차폐층의 온도변화를 그림 3에 나타내고 있다. 정상상태일 때 도체층과 차폐층의 온도는 각각 77.3K과 75K이다. 도체층에 비해 액체질소에 직접 노출되어 냉각효율이 좋은 차폐층의 온도가 도체층에 비해 2K가량 낮게 유지되고 있다. 정상상태 운전 중 500초 시점에서 사고전류 25kA를 0.25초 동안 인위적으로 투입했을 경우, 초전도 도체 및 차폐층의 온도는 각각 최고 85.3K과 75.6K까지 상승하였다. 사고전류가 사라지고 약 25분 후에는 초기 정상상태로 회복되었다. 구리 도체의 온도는 초전도 도체층과 동일한 온도변화를 나타내었기에 그림 3에 별도로 나타내지 않았다. 그림 3의 결과로부터 구리 안정화 도체를 채택한 초전도 케이블은 사고전류가 투입되더라도 초기 설정된 허용온도 미만에서 안정적으로 유지됨을 알 수 있다.

표 2. 초전도 케이블 사고 상태 해석 조건

초기 정격	1260A _{rms}
사고전류	25kA _{rms}
사고지속시간	250ms
초기 도체온도	77K
액체질소 최저압력	2kgf/cm ²
허용 온도	87.9K
구리도체 단면적	150mm ²

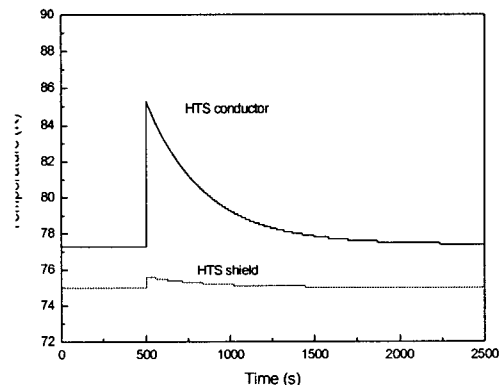


그림 3. 사고전류에 의한 초전도 케이블 core 온도 변화

3.2 비상 정격 특성

초전도 케이블이 다회전 포설되었거나 상전도 케이블 등 병행 운전 시에 이용하는 타 송전선로 중 한 선로가 어떤 원인에 의해 송전을 중단할 경우 정상 송전이

가능한 초전도 케이블은 정상상태 허용전류보다 더 많은 전류를 흘려야 하는 비상운전상태를 하게 된다. 또한 부하 조건에 의해서도 비상운전상태가 될 수도 있다. 이때 임의의 비상운전시간동안 초전도 케이블은 정격전류 이상의 전류를 흘려야 하며, 사고상태와 마찬가지로 초전도 케이블이 요구하는 허용온도 이하로 유지되어야 한다.

초전도 케이블 설계 시 초전도 도체의 77K에서 DC 임계전류는 정격 피크전류보다 약 30%이상 높게 설계하였다. 따라서 비상운전상태의 전류는 전체가 초전도 도체를 통해서 흐르게 되어 구리 도체의 주열 발생은 무시할 수 있다. 단지 초전도 선재의 운전전류가 증가하면 초전도 선재의 임계전류가 증가하기 때문에 교류손실에 의한 발열이 온도 증가요인으로서 작용한다[4].

그림 4는 22.9kV, 50MVA 초전도 케이블이 10시간동안 120% 과부하 운전된다고 가정하고 초전도 도체의 온도 변화를 해석한 결과이다. 액체질소의 순환 유량을 초기조건으로 일정하게 유지시킨 상태에서는 과부하에 의한 온도상승은 약 1.5K였으며, 냉각시스템에서 부하상태와 연계하여 액체질소 순환 유량을 제어할 경우에는 온도상승을 1K로 제한할 수 있었다. 비상운전상태에서 정상상태로 복귀 후에는 사고상태 해석과는 달리 초전도 선재에 축적된 열이 서서히 냉각되는 경향을 나타내고 있으나 초전도 케이블의 기능은 그대로 유지하고 있음을 알 수 있다.

을 나타내었다. 그 해석 결과를 바탕으로 볼 때 본 연구에서 개발 중인 초전도 케이블은 사고전류 및 과전류에 대해서도 우수한 신뢰성을 확보하고 있음을 알 수 있다.

본 연구는 과학기술부주관 “21C 프론티어연구개발사업”의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] John Howe et. al., "Very Low Impedance (VLI) Superconductor Cables: Concepts, Operational Implications and Financial Benefits", A White Paper of American Superconductor Corporation, November 2003
- [2] Charles A. Gross, "Power System Analysis" Second Edition, John Wiley & Sons, P333~366
- [3] "25.8kV 가스절연개폐장치" 한전표준규격 ES 150-576, 2004
- [4] K. Goto et. al., "Development of IITS cable with Bi-2223 transposed segment conductors", Physica C, 357-360, P1255-1258, 2001

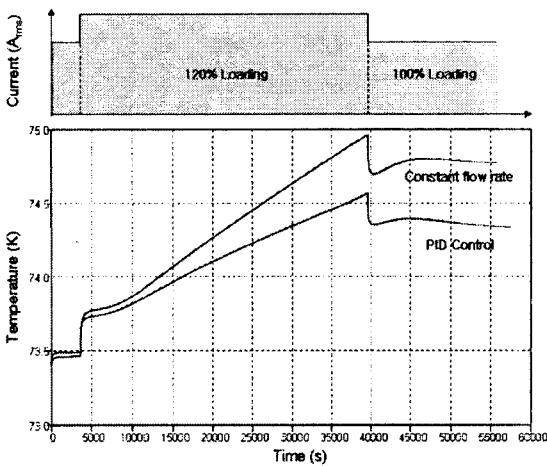


그림 4. 초전도 케이블 과부하 상태의 도체층 온도변화

4. 결 론

본 연구에서는 22.9kV, 50MVA 초전도 케이블의 설계 개념과 계통 내 사고전류 및 과부하 조건에서 초전도 케이블의 과도상태 특성을 조사하였다.

본연구의 초전도 케이블은 BSCCO 초전도 선재를 도체 및 차폐로서 사용하고, Laminated PP paper를 전기 절연체로 사용하는 저온절연방식의 3 core 케이블이며, 극저온과 상온과의 절연을 위해서 Al cryostat를 채택하였다. 초전도 케이블 core의 정상상태 때 온도 및 정격전류 각각 77K이하와 1260A_{rms}이다.

계통의 3상 단락사고에 의한 과도상태 특성을 해석하기 위해 25kA, 0.25초의 사고전류를 투입했을 때 케이블의 온도 변화를 해석한 결과 약 8K의 온도상승을 나타내었으나 사고전류 제거 후 25분 이내에 정상상태 운전조건으로 복귀함을 알 수 있었다. 또한 120%의 과전류가 10시간동안 투입 되었을 때는 최대 1.5K의 온도상승