

## 22.9kV 중성점 다중접지계통에 CD형 초전도케이블을 적용한 경우의 지락전류변화

이근준\* 이상한\* 손승호\*\* 황시돌\*\*  
\*충북과학대학 \*\*한전전력연구원

### Ground fault current variation of 22.9kV CD type superconducting cable system

Geunjoon LEE\* Sanghan LEE Songho-Son\*\* Sidol-Hwang  
\*Chungbuk Provincial college, \*\*KEPRI

**Abstract** - 본 논문은 CD형 초전도 케이블을 22.9kV 다중접지 배전계통에 적용한 경우 불평형 지락 고장이 초전도 케이블에 미치는 영향을 검토하고 이로 인한 중성선 전류의 변화 및 계통보호를 위한 대책을 논한다.

3상 CD형 초전도 케이블을 사용하는 경우 귀로선은 전향선과 전류가 반대이면서 거의 동일한 전류가 흐르므로 회로의 인덕턴스를 크게 줄일 수 있지만 이를 위해 회로를 단락하여 운전하는 경우 지락고장시 영상회로가 별도로 존재하지 않으면 지락전류를 저감시키는 결과를 초래하게 되어 계통보호에 영향을 주게 된다. 본 논문은 EMTDC 프로그램을 활용하여 이 현상을 XLPE 케이블 계통과 비교, 모의하는 한편, 정상적인 보호계전기 동작이 가능토록 하는 대책에 대해 논한다.

**keywords** : 22.9kV distribution system, ground fault protection, CD type superconducting cable, neutral line

#### 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, 이에 대처하기 위한 HTS cable 연계 계통의 기술적/경제적 검토를 위한 계통 응용 기술 기반이 조성되어야 할 필요성이 있다[1].

#### 2. 본 론

1986년 Bednorz 와 Muller에 의해 고온 초전도 재료가 개발된 이후 액체 질소온도에서 동작하는 초전도 케이블에 대한 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 Bi 계의 고온 초전도 선재의 임계전류의 고밀도화와 및 장척화가 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

#### 2.1 고온 초전도케이블의 종류

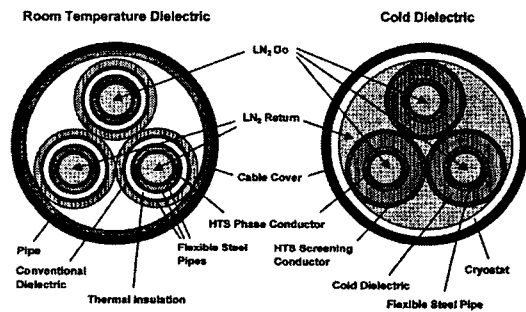
고온 초전도 (High Temperature Superconductor : HTS) 케이블은 절연 방식에 따라 상온 절연(Worm dielectric) 초전도 케이블, 저온 절연(Cold dielectric) 고온 초전도 케이블로 구분할 수 있다.

WD HTS 케이블의 구조는 그림 2.4와 같이 케이블 중심에 파이프 형태의 포머(former)가 구성되어 있는데 포머의 주역할은 LN2 냉매의 주 통로가 되며 주위에 감겨진 HTS 테이프를 지탱하는 것이다. 이 초전도체 위에 열적으로 절연된 cryostat이 있는데 이것은 열 침입을 최소화하기 위해 복사 절연(radiative insulation)의 역할을 한다. cryostat층 위에 전기적 절연물이 형성된다. cryostat의 바깥에 있는 절연체는 실온에 노출되어 있으므로, WD 설계에서 LN2는 초전도체의 동작온도를 유지하는 데만 사용되며 절연 부분으로써 사용되지 않는다. 이와 같은 절연방식은 기존의 케이블에 사용되었던 재료들을 유전체로써 사용한다.

따라서 WD HTS 케이블은 기존의 케이블 크기와 비슷한 사이즈를 유지할 수 있기 때문에 기존의 덕트 및 파이프 시스템을 개조 적용하는데 적합하다. 또한 기존의 케이블에서 입증된 절연 시스템을 사용할 수 있으며, HTS 차폐층이 필요 없고 단지 도선층에서만 HTS 테이프가 적용되므로 초전도 테이프의 소요량이 적게되어 케이블 비용 면에 있어서는 매우 유리하다. 또한 냉각 부분이 cryostat wall 부분과 HTS 도체 부분에만 해당되므로 냉각

하기 위한 열량을 최소화 할 수 있다. 그러나 WD 설계에서는 HTS 쉴드 층을 사용하지 않기 때문에 상간에 자기적인 상호 작용이 발생하게 된다. 케이블에서 발생한 자계는 케이블의 금속 성분에 큰 와전류(eddy current)를 발생시켜 전송가능 전류량을 제한하게 된다. 따라서 WD HTS 케이블은 동일한 손실을 가지는 기존의 케이블에 비해 2배 이상의 전력을 전송할 수 있지만 대용량 계통에 적용하기에는 한계가 있다. 만일 cryostat이 비금속성 재료로 만들어 진다면 전류 전송 용량은 더욱 커질 수 있다.

저온(Cold Dielectric : CD) HTS 케이블의 구조는 WD 형과 같이 케이블 중앙에 LN2 냉매가 흐르고 있는 포머가 위치하고 그 위로 HTS 테이프가 감겨져 있다. 그러나 WD 설계와 달리 이 초전도체 위에 절연층이 있고 이 절연층이 액체질소에 침투 되어 냉각되는 구조이다. 이와 같은 구조는 기존의 절연 재료를 이용할 수 있는 WD 설계와는 달리 냉각 온도에서 동작하는 유전 재료가 필요하다. 이 절연층 위에 HTS tape로 구성된 실드층이 있다. 이 초전도 쉴드층은 귀환전류를 수송하는 동시에 상도체 전류에 의해 발생된 자계를 차폐하고, 저항성 재료와의 유도 결합을 억제한다. 따라서 케이블 내부 AC 손실이 감소되고 강철 파이프에 와전류가 유기되지 않는다는 장점이 있다. 따라서 CD형 케이블은 설계는 복잡하지만 전류 전송 용량이 증대되고 컴팩트한 설계가 가능하다. 그러나 차폐층에 HTS 테이프를 쓰므로 초전도체 비용이 WD 형에 비해 2배 정도가 든다. 귀환 도체인 실드층 위에 열절연을 위해 cryostat 를 각 상 및 3상전체에 적용한다.



〈그림 1〉 상온 절연체와 저온 절연체의 구조

#### 2.2 고온 초전도케이블의 전기적 특성 비교

WD 형 케이블의 전력용량은 전송전압 (132/150-400kV) 수준에서 상당 2.5kA를 가지며 시스템 당 500-2000MVA정도로 전망하고 있다[26]. CD형 케이블은 WD형 케이블 보다 우수한 전류 전송 용량을 가지며 상당 8kA 정도이다. 수송전력은 시스템 당 1500 ~ 5500MVA로 전망된다. 또한 DC 초전도 케이블은 15kA 또는 더 이상을 전송할 수 있을 것이며 400kV DC 레벨에서 기대되는 전송 용량은 약 6000MVA정도가 될 것으로 예상된다.

#### 〈표 1〉 전력용량의 비교

	재래식	HTS(WD)	HTS(CDC)
Pipe 외경 (inch)	8	8	8
전압 (kV)	115	115	115
전력 (MVA)	220	500	1000
손실 (W/MVA)	300	300	200

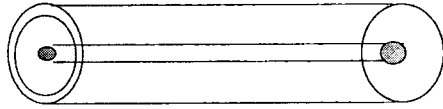
#### 〈표 2〉 31.5kA, 120kV Z1

케이블	저항	inductance(mH/km)	capacitance(nF/km)
CD HTS	0.0001	0.06	200
WD HTS	0.0001	0.39	217
XLPE	0.03	0.36	257

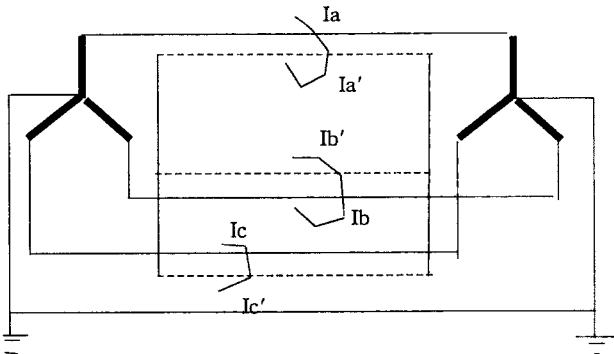
<표 3> 120kV Z0

케이블	저항	inductance(mH/km)	capacitance(nF/km)
CD HTS	0.03	0.10	140
WD HTS	0.12	1.47	175
XLPE	0.15	1.40	175

2.3 22.9kV CD 형 초전도 케이블 계통의 고장 현상



<그림 2> 초전도 케이블의 자기결합



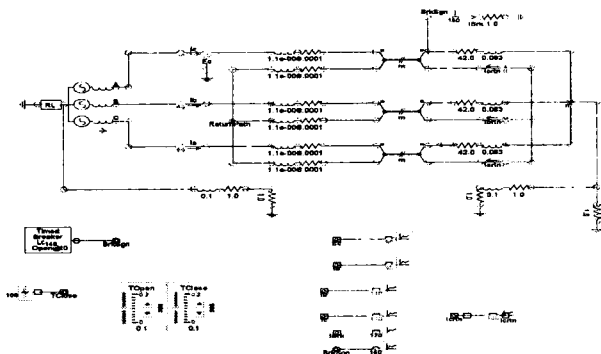
<그림 3> 22.9kV CD형 초전도 케이블 계통

CD형 초전도케이블은 쉴드를 귀환회로로 사용하므로 단상 회로인 경우에는 문제가 없으나, 중성선을 갖는 3상회로에 적용하는 경우 쉴드의 역할에 대한 고려가 필요하다

그림 4는 22.9kV 삼상 평형 배전계통에서 CD형을 적용할 경우 쉴드선로 양단을 단락한 경우를 보여준다. 본선의 중성선 전류는 0이며, 귀선인 쉴드회로의 전류도 각 선의 결합계수가 동일하다면 0이 되어 초전도케이블내의 손실을 감소시킨다.

만약 지락과 같은 불평형 고장이 발생하는 경우, 중성선에는 영상전류가 흐르게 되지만, 쉴드선은 3상 단락이 되어 영상전류가 흐를 수 없으므로 쉴드전류는 본선전류의 영상분을 감쇄하는 방향으로 작용하게 된다.

그림 5는 22.9kV-y 배전계통에서 쉴드회로를 활용하지 않는 경우 쉴드회로에 발생하는 현상을 EMTDC로 모의한 것이다. 쉴드 선로는 양단에서 단락하여 운전하는 것으로 가정하였다. 배전계통의 전원임피던스 Zs는 100MVA 기준 100%리액턴스로 설정하고 부하는 5000kVA 역률 0.8인 경우로 가정하였다 사용한 초전도 케이블의 길이는 10km, 선로 정수는 다음으로 가정하였다. 쉴드와 선로간의 결합계수는 0.9로 하였다.

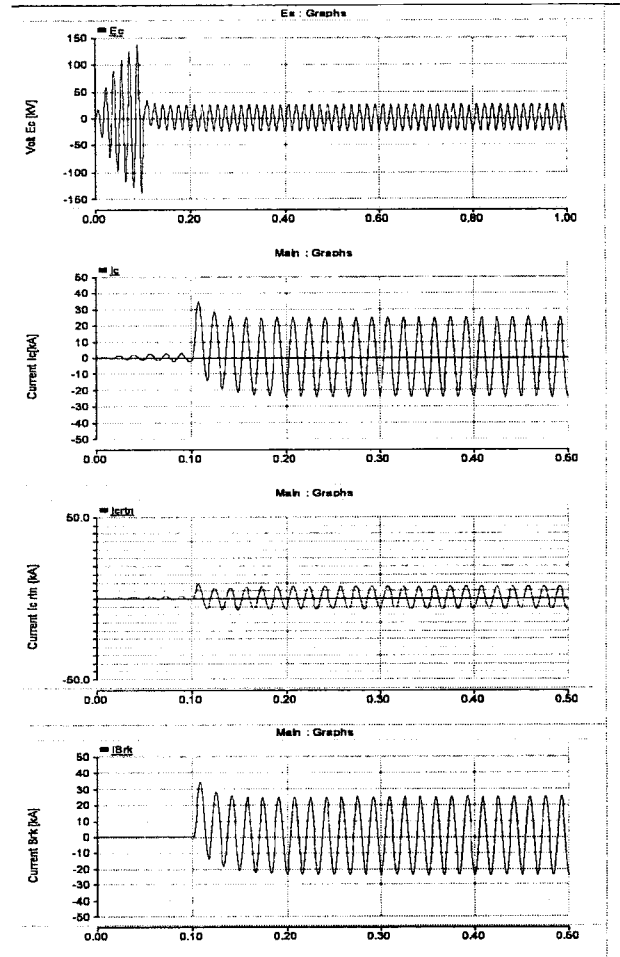


<그림 4> 22.9kV CD형 초전도케이블적용 배전계통-EMTDC 모형

<표 5> CD형 초전도케이블 선로정수

케이블	저항	inductance(mH/km)	capacitance(uF/km)
CD HTS	0.0001	0.00011	0.29

모의해석결과는 그림 3과 같다. 가장 빈발하는 단상 지락사고를 적용한 결과 CD형 쉴드 초전도체에는 본선로의 고장전류 17kA의 약30%에 해당하는 5 kA의 고장전류가 흘렀으며, 이는 CD형이 갖는 본선과 쉴드간의 높은 결합도에 기인한다. 이 경우 본선과 쉴드간의 고장전류의 차는 초전도 케이블 내부 자계의 불평형 및 와전류 손실을 증대시키게 되는 악영향을 초래한다.



<그림 5> 22.9kV CD형 초전도케이블 계통해석 결과

3. 결 론

CD형 초전도 케이블을 22.9kV 계통에 적용하는 경우 쉴드선과 본선을 적절히 활용할 수 있는 대책수립이 필요함을 알 수 있다. 쉴드선과 본선은 모두 초전도 선재로 되어 있으며, CD형식의 설계는 인덕턴스의 감소를 가져와 AC loss를 줄여주지만, 본선과 동일한 중성선로의 설치등과 같은 적절한 설계방안을 강구하지 않으면 지락사고시 고장전류가 증가하지 않아 이를 고려하지 않는 경우 계전기의 부동작을 초래할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] "초전도 케이블의 전력계통 적용 기반기술 연구", 중간보고서 산업자원부, 전력연구원 2004. 9
- [2] John Jipping et. al., "The Impact of HTS cables on Power Flow Distribution and Short-circuit Currents within a meshed network", IEEE SM 2001 pp.736-741
- [3] PSCAD manual Ver. 4.1 2006