

22.9kV 중성점 다중접지계통에 CD형 초전도케이블을 적용한 경우의 지락전류변화

論 文

56-6-1

Ground Fault Current Variation of 22.9kV Multi Neutral Grounded Distribution System with CD Type Superconducting Cable

李宗培* · 黃時彥** · 孫松縞*** · 李根準†

(Jong-Bae LEE · Si-Dole Hwang · Song-Ho Sohn · Geun-Joon LEE)

Abstract - This paper discusses the effects of CD type superconducting cable operation in 22.9kV multi neutral grounded distribution system during L-G fault and counterplans to power system protection. In case of using the 3-phase CD-type superconducting cable, the inductance of superconducting cable system would be decreased due to the current of shield part of superconducting cable, which is opposite direction and nearly equal value with respect to main superconductor. However, when the shield circuit system is operated in shorted state, shield current decreases faulted ground current and give effects to power system protection scheme. This study examines the phenomena of single line to ground fault case in above mentioned system using the EMTDC program and discusses the right operation method of superconducting shield.

Key Words : HTS cable · multi neutral gounded · ground fault current · shield layer

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 응용기술 기반이 조성되어야 할 필요성이 있다.[1] 본 논문에서는 이상 상태 시, 순간적으로 모재와 쉴드층에 흐르게 되는 전류로 인해 발생하는 인덕턴스로 인한 초전도체에서의 영향을 모의하였다. CD형 HTS cable은 쉴드층을 귀환회로로 사용하므로 단상의 경우, 문제가 없으나 중성선을 갖는 3상회로에 적용하는 경우 쉴드층의 역할에 대한 고려가 필요하다. 그래서 본 논문에서는 쉴드선로의 양단을 단락함으로써 쉴드회로를 활용하지 않는 상황을 만들

고, 그 가운데 고장발생 시 쉴드회로에 발생하는 현상을 모의하였다. 각 모의 내용 중, 고장내용은 1선지락의 경우이고, 쉴드선의 운전의 경우 첫째, 접지저항1Ω일 때의 모의, 둘째, 접지저항을 초전도체저항과 동일 시 했을 때의 모의, 셋째, 비접지 했을 때의 경우를 모의하여 1선지락 고장 발생 시, 쉴드선로에 나타나는 현상과 그로 인해 초전도체에 발생될 수 있는 영향에 대해 알아보았다.

2. 초전도케이블의 종류와 인덕턴스

1986년 Bednorz 와 Muller에 의해 고온 초전도 재료가 개발된 이후 액체 질소온도에서 동작하는 초전도 케이블에 대한 연구가 진행되어 왔다.[4-6] 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.[7-10]

2.1 고온 초전도케이블의 종류

고온 초전도 (High Temperature Superconductor : HTS) 케이블은 절연방식에 따라 상온 절연(Warm Dielectric) 초전도 케이블, 저온 절연(Cold Dielectric) 고온 초전도 케이블로 구분할 수 있다.

WD HTS 케이블의 구조는 그림 1과 같이 케이블 중심에 LN2 냉매의 주 통로가 되고 주위에 감겨진 HTS 테이프를 지탱하는 파이프 형태의 포머(former)가 구성되어 있다. 이 초전도층 위에 침입을 최소화하기 위해 복사절연(radiative insulation)의 역할을 하는 cryostat가 있다. cryostat층 위에

* 正會員 : (주)그린넷파워 엔지니어링팀 대리
** 正會員 : 韓電電力研究員 責任研究員
*** 正會員 : 韓電電力研究員 先任研究員
† 교신저자, 正會員 : 忠北科學大學 電氣에너지시스템學科 教授 · 工博

接受日字 : 2007年 1月 22日
最終完了 : 2007年 4月 26日

전기적 절연물이 성형된다. 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 냉각하기 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 성분에서 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 초전도층 위에 절연층이 있고 이 절연층이 액체질소에 함침 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 쉴드층이 있다. 이 초전도 쉴드층은 귀환전류를 수송하는 동시에 상도체 전류에 의해 발생한 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.[11] 그러나 차폐층에 HTS 테이프를 쓰므로 초전도체 비용이 WD 형에 비해 2배 정도가 든다. 귀환 도체인 쉴드층 위에 열절연을 위해 cryostat 를 각 상 및 3상전체에 적용한다.[12]

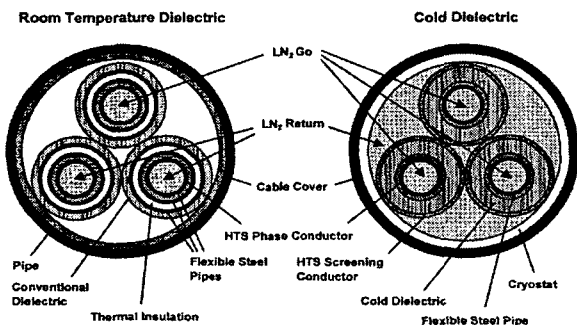


그림 1 상온 절연체와 저온 절연체의 구조
Fig. 1 structure of cables with warm and cold dielectrics

2.2 초전도케이블의 인덕턴스

이와 같은 초전도 케이블의 인덕턴스는 전송전류를 통과하는 초전도체로 구성된 HTS conductor, 도체를 배열하는 모재, 자기차폐를 하는 HTS return 부의 형상 및 각 부를 구성하고 있는 재질에 의해 결정된다. 또, 정상상태의 전류는 초전도체를 통해 흐르지만, 이상상태인 경우 초전도체에 퀘칭이 발생하면, 순간적이지만 전류통로가 모재 및 쉬스로 변경된다. 따라서 초전도 케이블의 인덕턴스는 이들 각 경우에 따라 달라지며, 본 절에서는 각 경우에 대해 인덕턴스를 구한다.

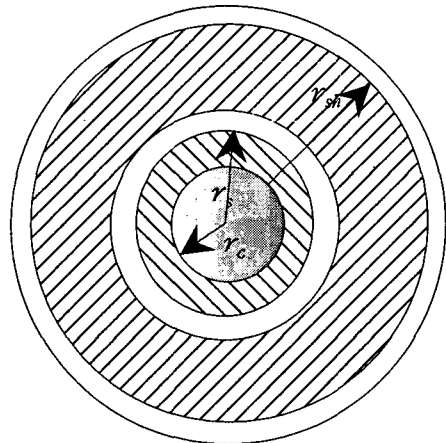


그림 2 초전도 케이블 내부
Fig. 2 the inside of the superconducting cable

여기서는 CD형 초전도 케이블에 전류가 흐르는 경우 각 상의 인덕턴스를 구한다. CD형 케이블의 내부 액체질소가 통과하는 관로의 반경을 r_c [m], 초전도체의 반경을 r_s [m], 쉴드선의 반경을 r_{sh} [m]라 하고, 유전체의 비유전율을 ϵ_d , 모재의 비유전율을 ϵ_c 라 한다. 또 초전도 쉴드선의 결합계수를 k 라고 가정한다.

2.2.1 외부 자속계수의 계산

초전도체에 전류 I 가 흐르면 쉴드선에는 결합계수에 의해 전류가 흐르며, 쉴드전류 I_{sh} 는

$$I_{sh} = kI \text{ [A]}$$

이다. 이때 초전도 케이블에서 멀리 떨어진 거리 x [m]에서의 외부 자장 H_{out} 는

$$H_{out} = \frac{I - I_{sh}}{2\pi x} \text{ [AT/m]} \tag{1}$$

$$B_{out} = \mu H_{out} = \frac{\mu(I - I_{sh})}{2\pi x} \text{ [Wb/m}^2\text{]} \tag{2}$$

로 되며, 미소 단면 d_x 를 통과하는 자속 $d\phi$ 는

$$d\phi = B_{out} \times 1 \times dx = \frac{\mu(I - I_{sh})dx}{2\pi x} \tag{3}$$

이므로 쇄교자속 수 $d\lambda$ 는

$$d\lambda = nd\phi = n \frac{\mu(I - I_{sh})}{2\pi x} dx \text{ [WbT/m]} \tag{4}$$

그러므로 원거리 S[m]에서 초전도체 쉘드선까지의 자속 쇄교수 λ_{out} 는

$$\lambda_{out} = \int_{r_{sh}}^S d\lambda = \int_{r_{sh}}^S n \frac{\mu(I - I_{sh})}{2\pi r} dx$$

$$= n \frac{\mu_o I (1-k)}{2\pi} \ln \frac{S}{r_{sh}} \quad (5)$$

2.2.2 냉각 유전체를 통과하는 범위의 자속 쇄교수 ($r_s < x < r_{sh}$)

냉각 유전체에 대해 작용하는 자속은 초전도 본선 전류에만 의존하므로 내부의 자속 쇄교수

$$d\lambda_{inw} = B_{inw} \times 1 \times dx = \frac{\mu I}{2\pi x} dx \quad (6)$$

단, λ_{inw} : 내부자속쇄교수, B_{inw} : 내부자속밀도 이다. 따라서 쉘드부터 초전도선까지의 내부자속 쇄교수는

$$\lambda_{inw} = \frac{\mu_d I}{2\pi} \ln \frac{r_{sh}}{r_s} \quad (7)$$

2.2.3 켄치시 전류가 모재를 통과하는 때의 자속쇄교수 ($r_c < x < r_s$)

평상시는 초전도체를 통하여 전류가 흐르므로 이 부분의 자속쇄교수는 0이다.

사고에 의해 초전도체에 켄치가 발생하면 전류는 모재(support)를 통하여 흐르게 되므로 모재의 임의의 반경 x [m] 에 대해 흐르는 전류 I_x 는

$$I_x = I \times \frac{\pi(r_x^2 - r_c^2)}{\pi(r_s^2 - r_c^2)} \quad (8)$$

미소 반경 dx 에 대한 자속쇄교수는

$$d\lambda_q = \frac{\mu J}{2\pi x} \frac{x^2 - r_c^2}{r_s^2 - r_c^2} \times \frac{x^2 - r_c^2}{r_s^2 - r_c^2} dx \quad (9)$$

그러므로 켄치 시 자속쇄교수 λ_q 는

$$\lambda_q = \int_{r_c}^{r_s} d\lambda_q \quad (10)$$

$$= \frac{\mu I}{2\pi(r_s^2 - r_c^2)} \left[\frac{(r_s^2 + r_c^2)}{4} - \frac{r_c^4}{r_s^2 - r_c^2} \ln \frac{r_s}{r_c} \right]$$

이상의 주어진 각 자속쇄교수로부터 정상적인 상황과 이상상황에 대한 인덕턴스를 구한다.

2.2.4 정상상태(Quench가 없는 경우) 시의 작용 인덕턴스

정상상태에서의 자속쇄교수는 초전도체에 흐르는 전류와 쉬스에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자속쇄교수의 합으로 결정된다.

$$\lambda_{tot0} = \lambda_{out} + \lambda_{in0} = \frac{\mu_o I}{2\pi} \left[(1-k) \ln \frac{S}{r_{sh}} + \mu_s \ln \frac{r_{sh}}{r_s} \right] \quad (11)$$

단,

λ_{tot0} : 총자속쇄교수

λ_{out} : 시스에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자속쇄교수

λ_{in0} : 초전도체에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자속쇄교수

μ_o : 진공투자율

S 는 외부 자속 쇄교 범위로서 케이블에서부터 무한 원점 또는 자기차폐가 된 경우는 차폐지점부터 도체 중심 간의 거리가 된다.

3상인 경우 자속쇄교수는

$$\lambda_a = \lambda_{aa} + \lambda_{ba} + \lambda_{ca}$$

$$= \frac{\mu_o I_a}{2\pi} \left[(1-k) \ln \frac{1}{r_{sh}} + \mu_s \ln \frac{r_{sh}}{r_s} + I_b (1-k) \ln \frac{1}{D_{ab}} + I_c (1-k) \ln \frac{1}{D_{ac}} \right]$$

$$+ \frac{\mu_o}{2\pi} [I_a (1-k) \ln S_a + I_b (1-k) \ln S_b + I_c (1-k) \ln S_c]$$

단, μ_s : 초전도체투자율 (12)

S_a, S_b, S_c 는 같으며, 삼상평형이면 위 2항은 0이 된다. 따라서

$$\lambda_a = \frac{\mu_o}{2\pi} \left[I_a (1-k) \ln \frac{1}{r_{sh}} + I_a \mu_s \ln \frac{r_{sh}}{r_s} + I_b (1-k) \ln \frac{1}{D_{ab}} + I_c (1-k) \ln \frac{1}{D_{ac}} \right] \quad (13)$$

그러므로 작용인덕턴스 L_a 는

$$L_a = \frac{\lambda_a}{I_a}$$

$$= \frac{\mu_o}{2\pi} \left[(1-k) \ln \frac{1}{r_{sh}} + \mu_s \ln \frac{r_{sh}}{r_s} + \frac{I_b}{I_a} (1-k) \ln \frac{1}{D_{ab}} + \frac{I_c}{I_a} (1-k) \ln \frac{1}{D_{ac}} \right] \quad (14)$$

[F/m]

여기서 $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$, $D_{ab} = D_{ac} = D$,

$\ln_e A = 2.3025 \log_{10} A$ 를 적용하고 평형삼상인 경우를 가정하면

$$\frac{I_b}{I_a} + \frac{I_c}{I_a} = a^2 + a = -1$$

이므로 위 식은

$$L_a = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \left[(1-k) \log_{10} \frac{1}{r_{sh}} + \mu_s \ln \frac{r_{sh}}{r_s} - (1-k) \ln \frac{1}{D} \right]$$

$$= 0.4605 \times 10^{-7} \left[\mu_s \log_{10} \frac{r_{sh}}{r_s} + (1-k) \log_{10} \frac{D}{r_{sh}} \right] \quad (15)$$

[mH/km]

로 된다.

2.2.5 고장 시(켄치 발생시) 인덕턴스

켄치 상태에서는 초전도체에 흐르는 전류가 모재를 통하여 흐르게 되므로 쉬스 및 모재에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자속쇄교수의 합으로 결정된다.

$$\lambda_{tot0} = \lambda_{out} + \lambda_{in0} = \frac{\mu_o I}{2\pi} \left[(1-k) \ln \frac{S}{r_{sh}} + \mu_d \ln \frac{r_{sh}}{r_s} \right] + \frac{\mu_c I}{2\pi(r_s^2 - r_c^2)} \left[\frac{(r_s^2 + r_c^2)}{4} - \frac{r_c^4}{r_s^2 - r_c^2} \ln \frac{r_s}{r_c} \right] \quad (16)$$

단 S 는 외부 자속 쇄교 범위로서 케이블에서부터 무한 원점 또는 자기차폐가 된 경우는 차폐지점부터 도체 중심 간의 거리가 된다.

2.2.6 3상 고장인 경우

3상인 경우 자속쇄계수는

$$\begin{aligned} \lambda_a &= \lambda_{aa} + \lambda_{ba} + \lambda_{ca} \\ &= \frac{\mu_0 I_a}{2\pi} \left[(1-k) \ln \frac{S}{r_{sh}} + \mu_d \ln \frac{r_{sh}}{r_s} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\mu_c}{(r_s^2 - r_c^2)} \left(\frac{r_s^2 + r_c^2}{4} - \frac{r_c^4}{r_s^2 - r_c^2} \ln \frac{r_s}{r_c} \right) \right] + \frac{\mu_0 I_b}{2\pi} \left[(1-k) \ln \frac{S}{D_{ab}} \right] \\ &\quad + \frac{\mu_0 I_c}{2\pi} \left[(1-k) \ln \frac{S}{D_{ac}} \right] \end{aligned} \tag{17}$$

단, μ_d : 유전체투자율

$$\begin{aligned} &= \frac{\mu_0 I_a}{2\pi} \left[\mu_d \ln \frac{r_{sh}}{r_s} + \frac{\mu_c}{(r_s^2 - r_c^2)} \left(\frac{r_s^2 + r_c^2}{4} - \frac{r_c^4}{r_s^2 - r_c^2} \ln \frac{r_s}{r_c} \right) \right] \tag{18} \\ &\quad + \frac{\mu_0 (1-k) I_a}{2\pi} \ln \frac{D}{r_{sh}} \end{aligned}$$

단, S_a, S_b, S_c : 각상에서 무한원점 혹은 차폐 지점에서 도체 중심 간의 거리는 같다. (a상, b상, c상)

그러므로 고장 시 작용인덕턴스 L_{af} 는

$$\begin{aligned} L_{af} &= \frac{\lambda_a}{I_a} \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\mu_d \ln \frac{r_{sh}}{r_s} + \frac{\mu_c}{(r_s^2 - r_c^2)} \left(\frac{r_s^2 + r_c^2}{4} - \frac{r_c^4}{r_s^2 - r_c^2} \ln \frac{r_s}{r_c} \right) \right] \tag{19} \\ &\quad + \frac{\mu_0 (1-k)}{2\pi} \ln \frac{D}{r_{sh}} \end{aligned}$$

여기서, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, $D_{ab} = D_{ac} = D$,

$\ln_e A = 2.3025 \log_{10} A$ 를 적용하고 평형3상인 경우를 가정하면

$$\begin{aligned} \frac{j_b}{I_a} + \frac{j_c}{I_a} &= a^2 + a = -1 \text{ 이므로 위 식은} \\ &= 0.05 \mu_c \frac{(r_s^2 + r_c^2)}{(r_s^2 - r_c^2)} \\ &\quad + 0.4605 \left[\mu_d \log_{10} \frac{r_{sh}}{r_s} + \mu_c \frac{r_c^4}{(r_s^2 - r_c^2)^2} \log_{10} \frac{r_s}{r_c} + (1-k) \log_{10} \frac{D}{r_{sh}} \right] \tag{20} \end{aligned}$$

로 된다.

2.2.7 고장 시 인덕턴스의 변화에 대한 고찰

고장 시 켈치에 의해 고장전류가 모재로 모두 흐른다면 고장 시 인덕턴스는 정상상태의 인덕턴스에 비해

$$\Delta L_a = 0.05 \mu_c \frac{(r_s^2 + r_c^2)}{(r_s^2 - r_c^2)} + 0.4605 \mu_c \frac{r_c^4}{(r_s^2 - r_c^2)^2} \log_{10} \frac{r_s}{r_c} \tag{21}$$

[mH/km] 만큼 증가하게 되며 이 값은 초전도체의 반경(r_s)과 모재의 반경(r_c)에 따라 변화한다.

만약 r_s 가 r_c 가 거의 같게 되면 분모의 값이 0에 수렴하게 되어 급격히 인덕턴스가 증가하게 되지만, 실제의 경우 모재의 반경이 초전도체와 같아지게 되면 모재는 존재하지 않는 것이 되므로 이 가정은 성립할 수 없다.

다음으로 $r_c = 0.5r_s$ 인 경우는 $\Delta L_a = 0.085$ [mH/km]만큼 증가되며, $r_c = 0$ 인 경우 $\Delta L_a = 0.05$ [mH/km]만큼 증가되어 켈치 시 고장전류의 통로에 따라 인덕턴스의 값이 증감하는 것을 볼 수 있다.

2.3 22.9kV CD 형 초전도 케이블 계통의 고장 현상

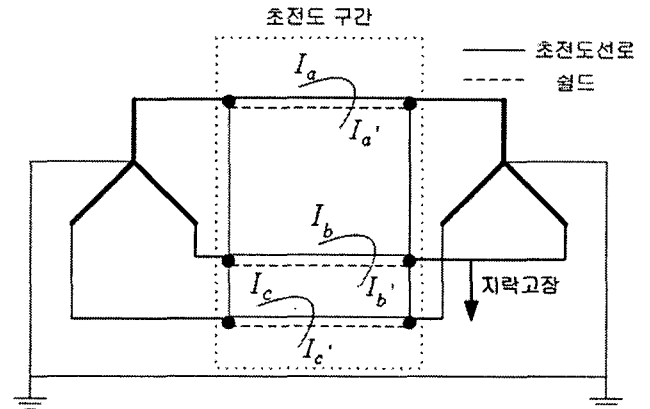


그림 3 22.9kV CD형 초전도 케이블 계통 (쉴드단락)
Fig. 3 22.9kV CD type superconducting cable system (short shield circuit)

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

3. 모의 사례 연구

3.1 모의계통 및 고장데이터

그림 4는 22.9kV 배전계통에서 쉴드회로를 활용하지 않는 경우 쉴드회로에 발생하는 현상을 EMTDC로 모의한 것이다. 쉴드 선로는 양단에서 단락하여 운전하는 것으로 가정하였다. 배전계통의 전원임피던스 Z_s 는 100MVA 기준 100%리액턴스로 설정하고 부하는 5000kVA 역률 0.8인 경우로 가정하였다 사용한 초전도 케이블의 길이는 10km, 선로 정수는 표 1과 같이 가정하였다. 쉴드와 선로간의 결합계수는 0.9로 하였다.

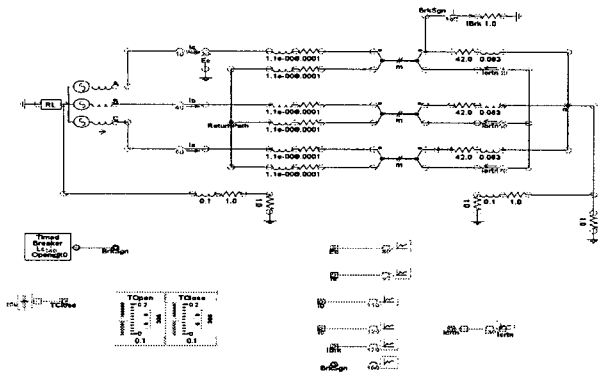


그림 4 22.9kV CD형 초전도케이블적용 배전계통-EMTDC 모형
 Fig. 4 distribution system with 22.9kV CD type superconducting cable-EMTDC

표 1 CD형 초전도케이블 선로정수
 Table 1 CD type superconducting cable impedance

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

표 2 CD형 3상일괄형 초전도 케이블의 1선지락 시 고장 사례연구 - EMTDC
 Table 2 when single line to ground fault, study of CD type 3core-one superconducting cable - EMTDC

고장종류	쉴드선 운전	지락 고장점 저항	비고
1선지락 - c 상	3상 단락, 접지 (접지저항 1 Ω)	1 Ω	그림 6
1선지락 - c 상	3상단락, 접지 (접지저항=초전도체저항과 동일)	1 Ω	그림 7
1선지락 - c 상	3상단락, 비접지	1 Ω	그림 8

3.2 보통 저항의 지락과 접지상황

그림 5은 일반적인 접지의 경우 CD형 HTS 케이블에 발생하는 현상을 모의한 것이다. CD형 케이블에서 도체부와 쉴드부와의 결합계수를 0.9로, 지락점의 저항을 1 Ω으로 가정하고, 쉴드선은 상호 단락되어 있으며, 공통 접지를 하여 접지저항을 1 Ω으로 한 경우이다. 지락된 상의 전류는 16[kA], 쉴드 전류 7[kA] 정도로 되었다. 각상의 쉴드전류간의 불평형이 발생하였으며, 상전류와 쉴드전류 간에도 불평형의 정도가 차이가 발생하고 있다.

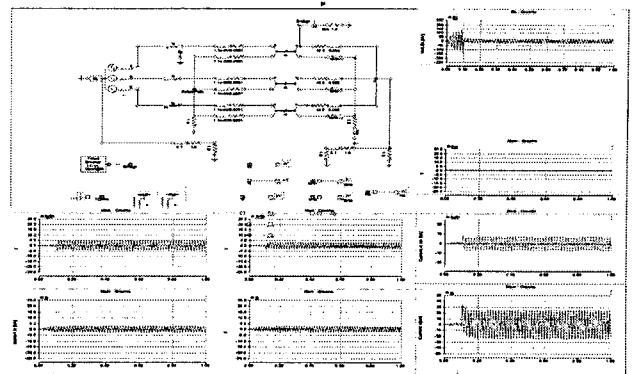


그림 5 1선지락 고장 시 쉴드선 전류의 변화 (접지저항 1Ω, 쉴드선 접지저항1Ω)
 Fig. 5 when single line to ground fault, variation of shield current (ground resistance 1Ω, shield line resistance 1Ω)

3.3 쉴드선 단락 (HTS와 동일한 접지값 적용)

쉴드선이 단락되고 접지저항이 0인 이상적인 상황을 상정 하였는데, 이 경우 지락전류는 16[kA], 지락 측 선로의 쉴드전류는 7[kA]이며, 쉴드 중성선 전류는 6[kA]로 되었다. 주회로의 비접지 상의 전류는 거의 평형을 이루었으며, 쉴드 측의 값은 상호간 큰 차이를 보였다.

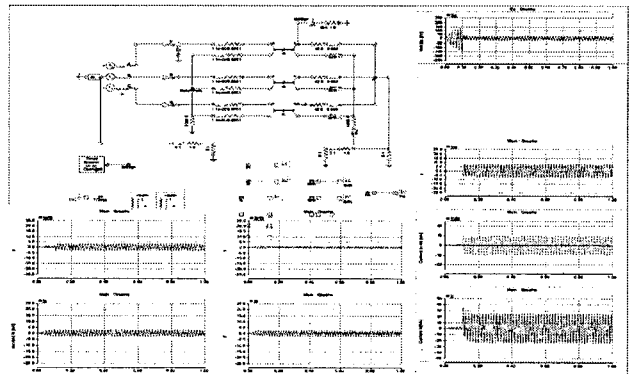


그림 6 1선지락 고장 시 쉴드선 전류의 변화 (지락 및 쉴드선 접지저항0.0001Ω)
 Fig. 6 when single line to ground fault, variation of shield current (ground & shield line resistance 0.0001Ω)

3.4 쉴드선 비접지 경우

쉴드 3상 단락 비접지, 본선은 다중접지인 경우의 모의해 석결과는 그림 7와 같다. 단상 지락사고를 적용한 경우 c 상의 쉴드 전류는 5 kA (본선 : 17kA의 30%정도) 정도로 상승하였으며, 이 경우 본선과 쉴드 간의 고장전류의 차는 초전도 케이블 내부 자계의 불평형 및 와전류 손실을 증대시키게 되는 악영향을 초래하게 된다.

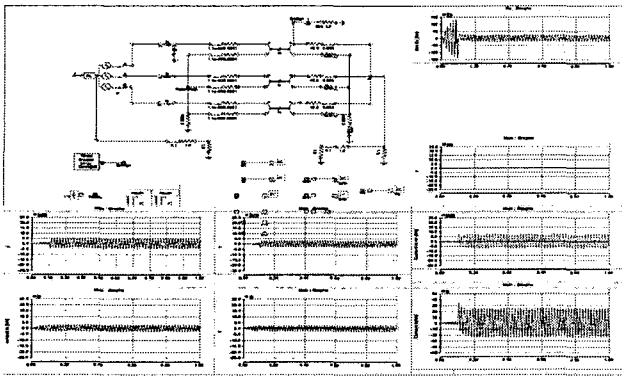


그림 7 1선지락 고장 시 쉴드선 전류의 변화 (쉴드선 비접지, 본선 다중접지)

Fig. 7 when single line to ground fault, variation of shield current (shield line non-ground, superconductor multi grounding)

이상의 모의 결과를 요약하면 다음과 같다.

표 3 HTS CD형 케이블의 지락고장 시 쉴드 및 접지저항에 따른 전류분포

Table 3 when ground fault of HTS CD type cable, current distribution with shield and grounding resistance

고장전류[kA]		Ia	Ib	Ic	In
비접지	초전도	2.1	2.1	17	16
	쉴드	3.5	2.1	5.3	0
접지 1.0 ohm	초전도	2.1	2.1	17	17
	쉴드	3.5	2.1	5.5	0
접지 HTS선	초전도	2.1	2.1	17	17
	쉴드	2.1	0.7	7	6.3

4. 결 론

본 논문에서는 쉴드회로를 단락하고, 1선지락 고장이 발생했을 때의 쉴드선로에 대한 영향을 접지, 비접지의 경우를 통해 알아보았다. 우선 각 경우에 대한 인덕턴스를 수식을 통해 구하여 이론적 토대를 마련하였으며, EMTDC 시뮬레이션을 통한 결과값 산출로 본 연구의 타당성을 확립시킬 수 있었다. 쉴드선의 접지 및 비접지한 경우, 쉴드선에 흐르는 전류를 비교한 결과 비접지 단락이 완전접지보다 쉴드 전류가 적었다. 하지만 초전도케이블의 전류는 쉴드선의 접지방식에 거의 영향을 받지 않았다. 쉴드 전류는 접지에 따라 달라지나, 유효한 범위 내에서는 변화가 없었다. 모의 결과 쉴드선은 접지하지 않고 단락하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. C D형 초전도 케이블을 22.9kV 계통에 적용하는 경우 쉴드선과 본선을 적절히 보호할 수 있는 대책수립이 필요함을 알 수 있다. 또한 쉴드선과 본선은 모두 초전도 선

재로 되어 있으며, CD형식의 설계는 인덕턴스의 감소를 가져와 AC loss를 줄여주지만, 본선과 동일한 중성선로의 설치등과 같은 적절한 설계방안을 강구하지 않으면 지락사고 시 고장전류가 증가하지 않아 이를 고려하지 않는 경우 계전기의 부동작을 초래할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 산업자원부 및 한전 전력연구원의 전력 산업 연구개발사업에 의해 지원된 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] "초전도 케이블의 전력계통 적용 기반기술 연구", 중간 보고서 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
- [4] S. honjo, K. Matsuo, T. Mimura, Y. Takahashi, "High- T_C superconducting power cable development", Physica C 1234-1240, 2001
- [5] R. Weshe, A. Anghel, B. Jakob, G. Pasztor, R. Schindler and G. Vecsey, "Design of superconducting power cables", Cryogenics 39, pp. 767-775, 1999
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] L. Uasur, D. Parker, M. Tanner, E. Podtburg, D. Buczda, 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
- [10] 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
- [11] A. P. Malozemoff, J. Maguire, B. Gamble, and S. Kalsi, "Power Applications of High-Temperature Superconductors : Status and Perspectives", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, pp. 778-781, 2002
- [12] J. Oestergaard, " Superconducting power cables in Denmark-A case study", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp. 719-722, 1997



이근준 (李根準)

1957년 9월 4일생. 1981년 울산공대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 울산대 전기공학과 졸업(공학박). 1976-1998년 한전전력연구원 선임연구원. 1988년-1989년 미국 University of Texas at Arlington 에너지시스템 연구소 연구원 2001년-2002년 미국 Arizona State University PSERC 교환교수. IEEE Seniormember, 발송배전기술사. 현재 충북과학대학 전기과 교수. 주요관심분야는 전력계통 안정도, FACTS, 전력품질평가시스템
Tel : 043-730-6321
Fax : 043-730-6329
E-mail : gjlee@ctech.ac.kr, roundyou@hotmail.com

저 자 소 개



이종배 (李宗培)

1978년 5월 7일생. 2004년 경성대학교 전기전자공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2006년~현재 (주)그린넷파워 엔지니어링팀 대리
Tel : 043-862-3722
Fax : 042-862-3723
E-mail : jblee@greennetpower.com



황시돌 (黃時爚)

1981년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업. 1986년 8월 동 대학원 졸업(석사). 1980년 12월 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 초전도그룹 책임연구원
Tel : 042-865-7520
Fax : 042-865-7804
E-mail : sdhwang@kepri.re.kr



손승호 (孫松綸)

1974년 07월 17일생, 2001년 고려대학교 금속공학과 졸업, 2004년 동대학원 신소재공학과 졸업(석사), 2004년 한국전력공사 전력연구원 입사, 현재 한국전력공사 전력연구원 초전도 그룹 선임 연구원.
Tel : 042-865-7521
Fax : 042-865-7804
E-mail : shsohn@kepri.re.kr