

## 초전도 사고전류제한기를 설치한 독립배전계통의 고장상태해석

\*이상진, 오유상, 배준한, 고태국  
연세대학교 전기공학과

Fault simulation of distributed power system  
with superconducting fault current limiter

\*Sang-Jin Lee, Yun-Sang Oh, Joon-Han Bae, Tae-Kuk Ko  
Dept. of Electrical Engineering, Yonsei University

**Abstract** - Electrical transmission and distribution networks must withstand an occasionally abnormal condition such as a fault, with prejudicial consequences for the line, transformers or generators. And the improvement of reliability and quality of the delivered power from an electric utility motivates the development of new technologies in power applications. As a part of these studies, the usefulness and utility of a superconducting fault current limiter(SFCL) are shown. The SFCL is applied to 22.9KV three-phase power system and performed short circuit studies. The verified quench characteristic of SFCL is adopted for fault simulation and the results are compared with those of system which have not SFCL.

용량을 크게 하기 위하여, 초전도 소선을 여러 개 합하여 1차연선을 구성하고, 이 1차연선을 합하여 2차연선, 3차연선 등으로 사용하는 경우가 많다. 그렇지만 이러한 연선에 교류전류를 흘려 보면, 여러 가지 요인에 의하여 연선 전체의 임계전류는 소선의 임계전류의 합이 되지는 않는다. 또한 고압에서는 절연문제로 인하여 지금까지 개발된 초전도선제는 전류용량이 수천 A 정도이다. 따라서 이를 우리나라의 실 계통에 적용하기 위해서는 그림 1과 같은 22.9KV의 배전계통이 적절한 것으로 판단된다. 또한 22.9KV 선로는 154KV의 모선에서 변전소를 거쳐 부하까지 연결되는 독립계통이므로 주변의 계통에 영향을 주지 않으면서 초전도 사고전류제한기를 시험하기에는 가장 적합한 선로로 평가된다.

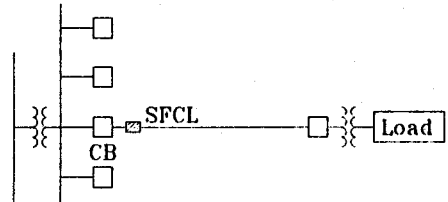
### 1. 서 론

국내 전력계통의 경우에 지속적인 수요 증가와 대단위 발전설비가 부하의 중심에서 원거리에 설치됨으로 인하여 전력전송 용량이 증가하고 있고, 전력전송 용량이 증가함에 따라 고장용량도 필연적으로 증가하고 있다.[1] 현재의 전력전송체제를 유지하면서 고장용량의 증가에 수반되는 문제점을 해결하기 위한 근본적인 해결책은 고장용량을 차단기의 차단용량 이내로 적절히 제한하는 것이다.[2]

지금까지 기존의 변압기와 차단기를 그대로 둔 채 고장용량을 제한하는 방식으로는 초전도 사고전류제한기가 가장 우수한 특성을 갖는 것으로 알려져 있다.[1] 초전도 사고전류제한기는 정상 시 임피던스에 의한 전압강하가 없고, 사고 시에는 상전도로의 전이 저항과 차단기가 동작하기 훨씬 전에 사고전류를 미리 설정한 한계 값 이하로 제한하는 특성을 갖고 있다. 본 논문에서는 초전도 사고전류제한기를 실 계통에 적용하였을 때 발생할 수 있는 고장상태를 해석하고, 사고전류제한기가 설치되지 않은 계통과 비교분석하여 초전도 사고전류제한기의 효율성을 제시하였다. 대상계통은 22.9KV의 독립된 표본배전계통이며 여기에 초전도 사고전류제한기를 설치하고 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에 사용된 초전도 사고전류제한기는 단상계통에서 실험을 통하여 그 특성이 밝혀진 것을 이용하였다.[3]

### 2. 고장상태해석을 위한 모델설정

초전도 사고전류제한기를 실 계통에 적용하기 위해서는 먼저 적절한 용량의 교류용 초전도선제의 개발이 선행되어야 한다. 교류용 초전도선제는 교류손실을 감소시키기 위하여 가느다란 초전도 필라멘트를 CuNi에 삽입하여 극세다실 형태의 소선(strand)을 만들고, 이를 꼬아서 사용한다. 한편 초전도 소선의 전류용량은 수천 A 정도이므로 전류



154KV bus

그림 1. 초전도 사고전류제한기를 실 계통에 적용한 회로도

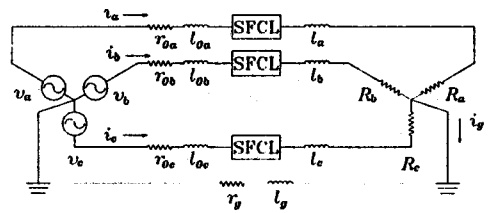


그림 2. 사고전류제한기가 설치된 전력계통의 고장해석모델

본 논문에서는 결과에 크게 영향을 미치지 않는 한도 내에서 문제를 간단히 하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다. 먼저 그림 1과 같이 대지를 키로로 하는 3상 1회선의 229KV 표본배전계통을 선정하였고, 모든 변압기는 정격 탭에서 운전한다고 보고 이를 그림 2와 같이 전압과 내부 임피던스로 등가화 하였다. 접지방식은 직접접지로 가정하였으며, 또한 선로와 접지, 선로와 선로 사이의 병렬회로는 모두 무시하였다. 이러한 가정은 단락 등의 사고회로에서 사고전류는 병렬 임피던스보다는 직렬 임피던스에 의하여 주로 영향을 받기 때문에 타당하다고 할 수 있다. 부하는 각 상에  $R=8\Omega$ 의 저항부하를 정적으로 하였고, 각 상의 선로 임피던스와 불평형 사고 시 나타나는 접지 임피던스는 각각  $0.15\mu\Omega$ , 또한 변압기의 내부임피던스는  $0.5\mu\Omega$ 로 가정하였다. 실제의 전력계통에서는 이러한 값들은 선로 전체에 걸쳐 존재하기 때문에 분포정수회로를 사용하여 해석하여야 하나 본 논문에서는 계산의 편의상 이를 집중정수회로로 해석하였다. 또한 각 상에 대칭 되는 부분은 그 값이 서로 같다고 가정하였다. 이렇게 결정한 3상에서의 사고전류제한기를 포함하는 계통의 각종 상수를 표 1에 나타내었다. 이러한 각종 상수는 사고전류제한기가 설치되는 계통에 따라 달라질 수 있으나 표본 전력계통의 상수로는 어느 정도 타당한 값이라 할 수 있다.

표 1. 초전도 사고전류제한기를 포함한 표본전력계통의 상수

선간 전압 ( $v_0$ )	22.9KV/60Hz
정격부하 ( $R$ )	8 $\Omega$
내부저항 ( $r_0$ )	0.2 $\Omega$
내부임피던스 ( $l_0$ )	2.6mH
접지저항 ( $r_g$ )	0.5 $\Omega$
접지인덕턴스 ( $l_g$ )	1.8mH
선로임피던스 ( $l_a, l_b, l_c$ )	2.6mH
리미팅코일 인덕턴스 ( $L_s$ )	13mH
리미팅코일 켄치전류 ( $I_{gl}$ )	8000Apeak
트리거코일 내충 인덕턴스 ( $l_1$ )	4.0mH
트리거코일 외충 인덕턴스 ( $l_2$ )	4.5mH
트리거코일 상호 인덕턴스 ( $m$ )	3.3mH
트리거코일 켄치전류 ( $I_{gt}$ )	2000Apeak

### 3. 고장상태의 해석

전력시스템의 고장상태 해석은 변압기와 차단기 용량의 길짐, 계전기의 정정 및 안정도 판정 등에 필요한 정보를 알아내는 데 필요하다. 또한 발전소나 송전선로 등의 시스템 구성설비를 추가 및 변경한 경우 시스템 특성이 달라지므로 반드시 고장상태 해석을 실시하여야 한다. 송전선로에서 발생하는 고장 중 약 70% 이상이 1선 지락사고이지만 이밖에 선간 단락, 2선 지락, 3상 단락 및 단선고장 까지도 발생하는 경우가 있다. 특히 3상 단락 고장이 발생하면 계통에는 매우 큰 전류가 흐르게 되어 이를 기준으로 변압기와 차단기의 용량을 결정하게 된다. 따라서 본 논문에서는 사고전류가 가장 큰 3상 단락고장과 가장 많이 발생하는 1선 지락고장을 시뮬레이션 하였다.

#### 3.1 3상 단락고장

그림 3은 3상 단락사고가 발생하였을 경우 각 상에 흐르는 전체전류이다. 단락사고는 a상의 전류가 90°인 지점에서 발생한 것으로 하였으나 이러한 사고각은 각 상의 위상각이 120°씩 차이가 나므로 단락에서처럼 큰 의미는 없게 된다. 사고 전에는 약 2KA이던 각 상의 전류가 사고 후에는 과전류 및 과도직류성분이 나타나 최고 5.5KA까지 증가하였다가 곧 3.5KA로 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

그림 4의 사고전류제한기 양단에 걸리는 전압을 보면 사고 전에는 전압이 나타나지 않다가 사고가 발생한 후에는 각 상의 상전압이 대부분 전류제한기 양단에 걸리는 것을 볼 수 있다. 특히 a상의 전압을 보면 트리거코일에 흐르는 전류가 리미팅코일로 빠르게 분류되지 않기 때문에 순간적으로 약 145KV의 높은 전압이 사고전류제한기 양단에 걸린 것을 알 수 있다. 또한 이 보다는 작지만 b상과 c상의 트리거코일이 켄치되는 순간에도 높은 과전압이 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 과전압 문제는 초전도 사고전류제한기를 계통에 적용하는 경우 심각한 장애요인이 될 것으로 생각된다. 한편 트리거코일의 상전도 저항값은 차단기가 동작하는 시간인 100ms 이내에는 포화되지 않도록 여러 번의 시뮬레이션을 거쳐 결정된 것으로 저항이 커서 실제 제작에는 어려움이 많을 것으로 예상된다. 이 값을 작게 하면 트리거코일의 양단 전압이 급격히 증가하는 것을 관찰하였다.

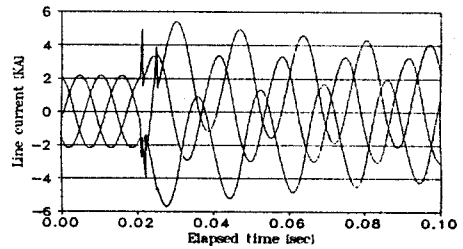


그림 3. 3상 단락사고시 각 상에 흐르는 전체전류

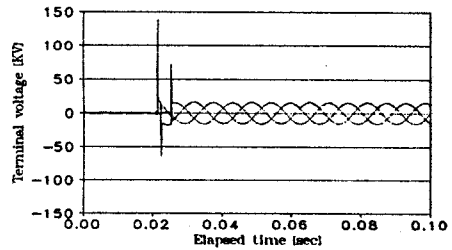


그림 4. 3상 단락사고 시 사고전류제한기 양단에 걸리는 전압

#### 3.2 1선 지락고장

계통에서 발생하는 사고의 대부분은 1선 지락고장으로 전체의 약 70% 이상을 차지하고 있다. 실제로 1993년도 주안변전소의 고장전류 기록계에 기록된 108건의 고장 전류류를 분석해 보면 1선 지락사고가 74건으로 가장 많았고, 다음이 2선 지락사고, 단락사고의 순이었다.[4] 따라서 전력기계를 계통에 설치할 때 1선 지락고장에 대한 분석은 필수적이라 할 수 있으며, 본 논문에서도 이를 해석하였다.

먼저 그림 5의 각 상에 흐르는 전체전류를 보면 사고 전에는 약 2KA 정도가 계통에 흐르다가 1선 지락사고가 발생하면 이 값이 최고 4KA까지 증가하였다가 3KA 정도에서 안정되는 것을 알 수 있다. 이때 사고각은 90°로 하였으며 90°가 아닌 경우에는 과도직류성분이 나타나 약간은 더 증가하게 된다. 또한 1선 지락사고는 대표적인 불평형 고장으로 건전상의 상전류도 약간씩 변동된 것을 볼 수 있다.

그림 6과 7은 전류제한기 양단에 걸리는 전압과 부하에 나타나는 전압으로 사고가 발생한 상의 경우 약 90KV의 과전압이 제한기 양단에 나타났으며, 건전상의 전압은 약간 상승한 것으로 나타났다. 건전상의 상전류와 상전압을 비교해 보면 사고를 전후해서 거의 변동이 없으므로 차단기를 동작시키지 않은 상태로 계속 송전이 가능한 것으로 판단된다.

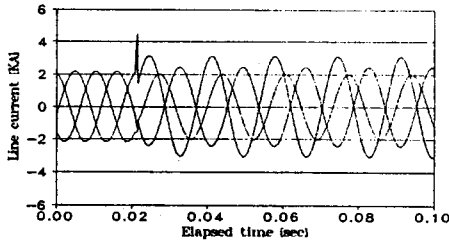


그림 5. 1선 지락사고시 각 상에 흐르는 전계전류

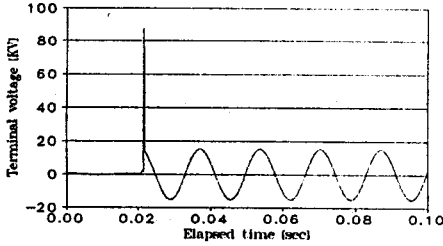


그림 6. 1선 지락사고 시 사고전류제한기 양단에 걸리는 전압

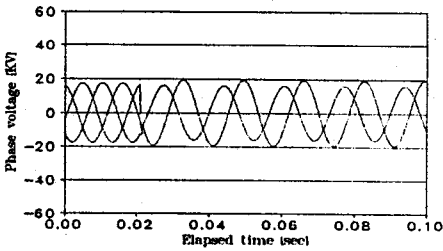


그림 7. 1선 지락사고시 각 상의 부하전압

#### 4. 결과고찰

그림 2의 표본전력계통에서 초전도 사고전류제한기를 제거한 후 동일한 고장상태를 해석하여 사고전류제한기가 있는 경우와 비교하였다. 그림 8은 사고전류제한기가 없는 경우의 3상 단락전류로 사고 전에는 약 2KA이던 전류가 사고 발생 후에는 최고 25KA까지 증가하였다가 약 18KA로 안정되는 것을 볼 수 있다. 즉, 사고가 발생하면 정상 시 전류의 약 10여배에 달하는 큰 사고전류가 변압기 및 선로에 흐르기 때문에 이를 기준으로 전력기기를 설계하여야 한다. 반면에 그림 3의 제한기가 있는 경우에는 사고전류가 약 4분의 1로 줄어든 것을 알 수 있다.

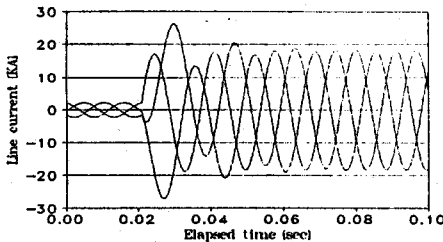


그림 8. 사고전류제한기가 없을 경우의 3상 단락전류

그림 9와 10은 초전도 사고전류제한기가 설치되지 않은 계통의 1선 지락사고를 해석한 것으로 그림 9는 상전류류, 그림 10은 부하에서의 상전압을 나타내고 있다. 먼저 지락 사고전류는 약 12KA로 그림 5의 제한기가 있는 경우의 4배에 달한다. 즉, 초전도 사고전류제한기는 1선 지락사고가 발생할 경우 12KA로 예상되는 사고전류류 수 msec 이내의 시간에 3KA 정도로 효과적으로 제한하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 10과 그림 7에서 건전상의 상전압을 비교해 보면 사고전류제한기가 있는 경우의 전압이 훨씬 안정되어 있음을 볼 수 있다. 이는 초전도 사고전류제한기를 계통에 연결하므로써 보다 양질의 전력을 공급받고 싶어하는 수용가의 요구에도 부응할 수 있는 것으로 판단된다.

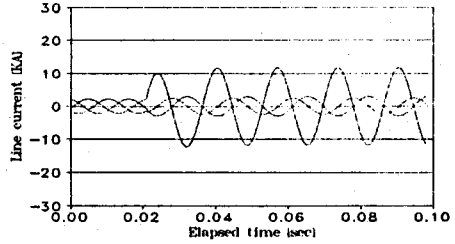


그림 9. 사고전류제한기가 없을 경우의 1선 지락전류

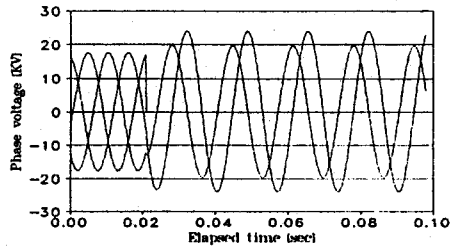


그림 10. 사고전류제한기가 없을 경우의 1선 지락사고 시 부하전압

#### 5. 결론

초전도 사고전류제한기를 22.9KV의 계통에 설치한 경우의 효과를 선로의 고장상태 해석을 통하여 알아보았다. 지속적인 수요 증가와 전력 전송 용량의 증가에 따라 고장전류도 증가하고 있으며, 고장전류가 기준에 설치되어 있는 차단기의 차단용량을 상회하여 많은 문제가 발생하고 있다. 초전도 사고전류제한기가 설치된 계통의 시뮬레이션 결과 현재의 전력전송체계를 유지하면서 이러한 문제를 해결하기 위한 근본적인 해결책으로는 초전도 사고전류제한기가 가장 적합한 것으로 판단된다. 또한 초전도 사고전류제한기가 실용화되면 고장용량이 기준에 설치된 차단기의 차단용량을 넘어서는 곳에 설치하여 변압기나 차단기의 증진없이 사고전류제한기를 이용하여 대처해 나갈 수 있으리라 예상된다.

#### 6. 참고문헌

- [1] 대한전기학회 기술조사보고 제1호 초전도응용 기술현황, 초전도응용 기술조사전문위원회, 1992년 7월
- [2] E. Thuries et al., "Towards the Superconducting Fault Current Limiter" IETEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, April 1991, pp.801-808
- [3] 이상진 외 3, "220Vrms/100Apeak급 초전도 사고전류제한기의 제작 및 특성실험", 대한전기학회 논문지 심사중
- [4] 한국전력공사 기술연구원, 전력용 변압기 사고감소 연구(사후관리), 1994