

### 저항형과 유도형 한류기의 전류제한특성에 대한 EMTDC 해석

#### EMTDC simulation for current limiting characteristics of the resistive and inductive SFCL

최효상\*, 황시돌\*, 현옥배\*  
Hyo-Sang Choi\*, Si-Dole Hwang\*, Ok-Bae Hyun\*

\* 한전 전력연구원 전력계통연구실

#### Abstract

We investigated the current limiting characteristics of resistive and inductive SFCLs with 100 Ω of quench impedance for a single line-to-ground fault, which accounts for about 70% of the total power line faults, in the 154 kV transmission system. The fault simulation at the phase angles 0°, 45°, and 90° showed that the resistive SFCL limited the fault current less than 15 kA without any DC component after one half cycle from the instant of the fault. On the other hand, the inductive SFCL suppressed the current below 12 kA, but with 3 kA of DC component which decreased to zero in 5 cycles. We concluded that the inductive SFCL had higher performance in current limiting but the resistive SFCL was better from the view point of DC components.

**Key Words** : Superconducting Fault Current Limiter, EMTDC Simulation, Single-Line-to Ground Fault, Circuit Breaker

#### 1. 서론

현재 전세계적으로 수행되고 있는 초전도 한류기에 대한 연구는 크게 두가지로 분류할 수 있다. 그 하나가 YBCO 박막이나 thick film 또는 bulk를 이용한 저항형이고 나머지 하나는 변형된 변압기형태를 갖는 차폐형과 이를 응용한 hybrid 형태를 포함하는 유도형이다.[1-4] 저항형은 구조 및 원리가 간단하고 전류제한과 회복특성이 우수한 점등 장점이 있는 반면 대용량화 하기가 어려운점과 주열 발생이 많은 점등의 단점을 가지고 있다. 저항형에 대한 연구는 독일의 Siemens AG 그룹을 중심으로 활발하게 연구되고 있다.[1] 유도형은 차폐형을 중심으로 가장 많이 연구되고 있으며 대용량화가 용이하고 열발생이 상대적으로 적은 반면 기본구조상 core를 사용하여야 하기 때문에 용적이 크며 hysteresis 손실 및 와류손을 포함한다. 유도형은 스위스 ABB 그룹이 중심이 되어 실제통급에 적용하기 위한 연구가 진행중에 있다.[2]

따라서 본 연구에서는 아직 송전급의 초전도 한류기가 개발되지 않은 상황에서 전력계통 사고의 약 70% 이상을 차지하는 1선 지락사고에 대하여 154 kV급의 저항형과 유도형 초전도 한류기를 적용하였을 때 나타나는 특성을 시뮬레이션함으로써 장차의 연구개발에 데이터로 활용하고 송전선로에 적합한 초전도 한류기의 유형을 제시하고자 한다.

시뮬레이션 방법은 현재 전세계적으로 많이 사용하고 있는 과도현상 해석 프로그램인 EMTDC ( Electro-magnetic Transient DC)를 이용하였고 서울지역의 실제통 데이터틀 참고하여 parameter를 선정하였다. 1선 지락사고에 대한 각 상의 고장전류 파형을 고찰한 다음, 저항형 및 유도형 초전도 한류기를 적용하였을 때 사고 전류값과 과도 및 정상상태 전류제한값을 비교분석 하였다.

#### 2. 계통 모델링

사고모델계통 구성은 서울근교의 S1과 S2 변전소간의 실제통 데이터를 참고하여 설정하였으며, 일반적인 1선 지락사고에 대하여 동일한 조건(초전도한류기의 최종 임피던스를 100Ω으로 설정)하에서 저항형과 유도형 초전도 한류기를 설치한 경우의 사고각 0°, 45°, 90°에 대한 계통사고를 모의하였다. 전력조류는 S1에서 S2 변전소 방향이다.

EMTDC에서 사고계통을 모델링하기 위하여 필요한 요소는 source 임피던스, 선로정수 및 부하전력이다. 이에 대한 적용값 및 해석방법은 참고문헌에서 자세히 나타내었다.[5]

#### 3. 결과 및 고찰

시뮬레이션은 우선 1회선 계통에 대해서만 실시하였으며, 선로는 154 kV급 송전선로에서 주로 쓰이고 있는 ACSR 410 mm를 기준으로 선정하였다. 1선 지락사고시의 각 상별 고장전류 파형은 S1에서 S2 변전소까지의 실제통값에 대하여 C상을 기준으로 사고각이 0° 일 때 과도전류값을 모의하였다. 또한, 사고시 S2에서 S1 변전소로 유입되는 전류는 S1-S2간 전력 조류에 비하여 작기 때문에 여기서는 생략하였다.

S1 변전소로부터 약 5.98 km 떨어진 지점에서 1선 지락사고가 발생한 경우의 파형을 그림 1에 나타내었으며 이때 사고각은 0° 일 때 과도전류값을 모의하여 보여주고 있다. 사고가 발생하면 C상의 전류값이 최고 39 kA까지 상승하였다가 약 5주기후에 23 kA값에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 사고발생전인 정상상태에서 선로에 흐르는 전류값이 약 0.45 kA인 것을 감안하면 사고 발생후 전류값이 최고 약 87배까지 상승하였다가 약 53배되는 지점에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 따

라서 선로에 휘부되어 있는 변압기를 포함한 각종 보호기기들은 최소한 차단기의 정격차단시간(약 3 사이클) 동안에는 어느 정도의 손상을 입을 수 밖에 없다. 한편 선로 불평형에 따른 리액턴스 성분 때문에 초기 직류성분이 발생하였다가 약 5주기후에 사라지는 것을 관찰할 수 있었다. 사고각 45°와 90°인 경우의 선간 단락사고 파형을 모의하였으나 사고각 0°인 경우에 비하여 과도전류값이 작기 때문에 여기서는 사고각 0°인 경우를 대표적으로 살펴보았다.

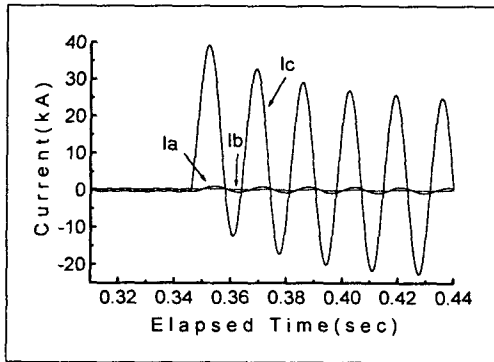


그림 1. 사고각 0° 일때의 고장전류 파형

전력계통에서 1선 지락사고가 발생하였을 때 차단기 전단에 저항형과 유도형 초전도 한류기를 적용하는 경우, 고장전류 제한과 과도특성을 살펴보기 위하여 사고각을 0°, 45°, 90°로 각각 나누어 시뮬레이션 하였다.

그림 2는 사고각 0°인 1선 지락고장 계통에 대하여 저항형 초전도 한류기를 적용하여 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 그림 2에서 사고가 발생한 C상을 보면 사고발생 직후 최고 39 kA(최대 한류전류값)까지 상승하고 있으나 약 반주기이내에 15 kA(최종 한류전류값)에서 안정되었다. 특히 저항형 한류기가 갖는 특성 때문에 반주기이후의 직류성분이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

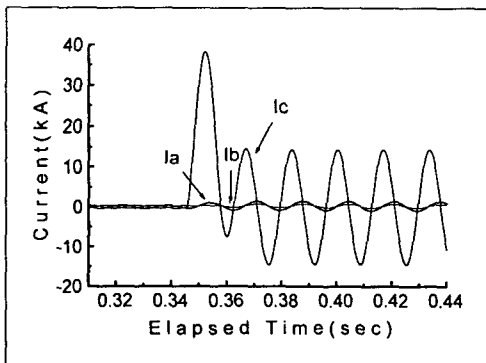


그림 2. 저항형 초전도 한류기를 적용한 1선 지락사고 (사고각 0°)

그림 3은 그림 2와 같은 조건에서 유도형 초전도 한류기를 설치한 경우의 파형을 보여준다. 저항형과 마찬가지로 사고발생 직후 전류값이 최고 39 kA까지 상승하고 약 반주기이내에 약 15 kA까지 감소하였으나,

약 5주기 이후에 전류값이 약 12 kA까지 추가로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 사고발생 후 선로의 임피던스와 유도형 초전도 한류기의 임피던스의 대부분이 인덕턴스 성분이기 때문에 초기에 직류분이 발생하여 일정기간 동안 지속되기 때문으로 사료된다. 그림 2와 그림 3에서 같은 조건하의 저항형과 유도형을 비교해보면 최종전류제한 능력은 유도형이 유리한 반면 직류성분의 발생측면은 저항형이 유리함을 알 수 있다.

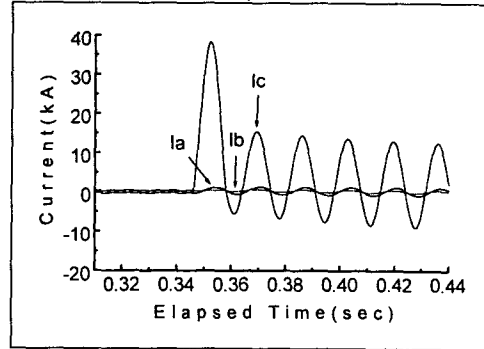


그림 3. 유도형 초전도 한류기를 적용한 1선 지락사고 (사고각 0°)

사고각이 45°인 1선 지락사고가 난 실제통에 대하여 저항형 초전도 한류기를 적용하였을 때 고장 전류 제한효과를 그림 4에 나타내었다. 사고가 발생한 직후의 고장전류는 약 27 kA까지 상승하였다가 반주기 이내에 약 15 kA까지 감소함을 알 수 있다. 또한 반주기 이후의 직류성분은 거의 발생하지 않았다. 즉, 사고시 선로 불평형에 따라 발생하는 직류성분은 저항형 초전도 한류기를 적용하였을 때 한류기의 저항값에 기인하여 거의 사라짐을 알 수 있었다. 건전상인 A상의 경우는 사고전후 거의 변화가 없었다.

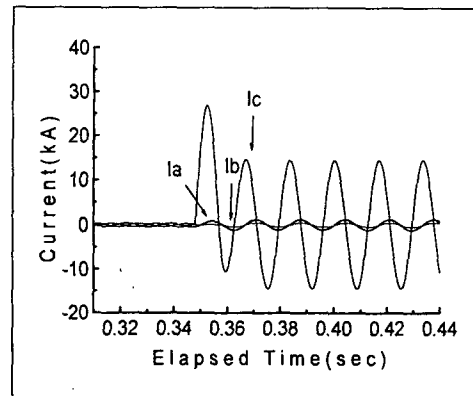


그림 4. 저항형 초전도 한류기를 적용한 1선 지락사고 (사고각 45°)

사고각 45°에서 유도형 초전도 한류기를 적용하였을 때 과도응답을 그림 5에 나타내었다. 전류제한특성은 사고각 0°인 경우와 마찬가지로 최고 27 kA까지 상승하였다가 반주기후 약 13 kA를 거쳐 약 5주기후에 12 kA값으로 안정되는 것을 볼 수 있다. 사고각 0°인 경우에 비하여 직류성분이 상대적으로 적은 이유는 사

고 순간의 파형에서 전류의 상승분과 감소분이 존재하는 부분에서 초전도 한류기를 통하여 전류제한을 수행하기 때문에 반주기 이후의 사고전류 상승이 상대적으로 적기 때문이다.

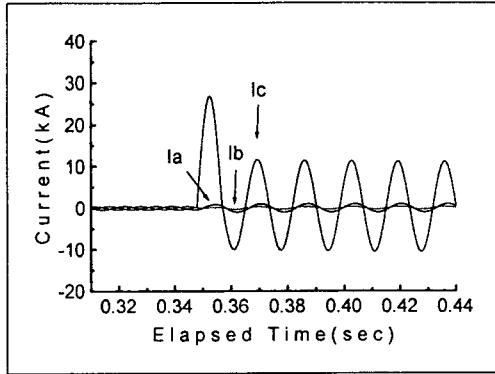


그림 5. 유도형 초전도 한류기를 적용한 1선 지락사고 (사고각 45°)

사고각 90°에서 1선 지락사고가 발생한 경우에 대하여 사고지점 전단에 저항형 초전도 한류기를 설치하였을 때 파형을 그림 6에 나타내었다. 사고 발생 직후 전류값이 약 11.5 kA값을 보였다가 반주기 이내에 약 15 kA값을 나타내었고 이후 안정된 파형을 보여 주었다. 불평형에 따른 직류성분은 거의 나타나지 않았다. 사고 직후 상승전류값이 작은 이유는 전류파형이 감소하는 순간에 사고가 발생했기 때문으로 생각된다.

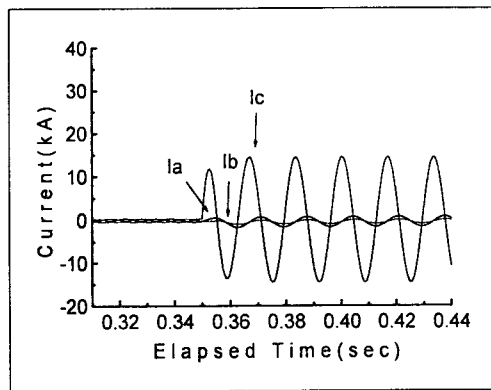


그림 6. 저항형 초전도 한류기를 적용한 1선 지락사고 (사고각 90°)

한편, 그림 6의 조건에서 유도형 초전도 한류기를 적용한 경우의 파형을 그림 7에 나타내었다. 사고 발생 직후 약 11.5 kA의 전류값을 보였다가 반주기 이후에 15 kA값에서 약 5주기에 걸쳐서 12 kA까지 감소하였다. 즉 유도형 초전도 한류기의 인덕턴스 성분에 의한 직류성분이 약 3 kA정도 발생하였다. 이는 사고각 0°인 경우와 거의 흡사한 결과를 보여주었다. 한편, 초전도 한류기를 적용한 경우 전력주류 방향의 반대편에서 사고시 고장점으로 흘러 들어오는 유입전류는 초전도 한류기의 전류제한 책무에 별 영향을 주지 않을 정도로 작았기 때문에 여기서는 생략하였다.

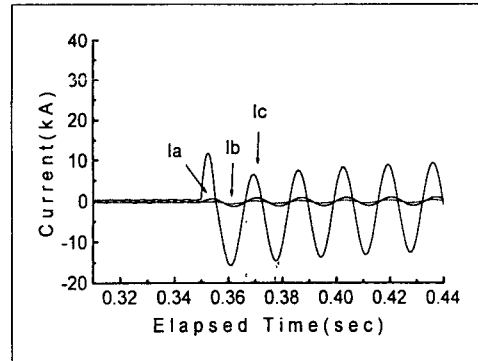


그림 7. 유도형 초전도 한류기를 적용한 1선 지락사고 (사고각 90°)

#### 4. 결 론

154 kV급 송전계통에서 가장 빈번하게 발생하는 사고유형인 1선 지락사고에 대하여 임의의 S1 변전소와 S2 변전소간의 실제통값을 참고하여 EMTDC 프로그램을 사용하여 사고전류를 모의하고, 이 전력계통에 저항형과 유도형 초전도 한류기를 적용하였을 때 사고각별 전류제한 효과를 살펴 보았다.

S1 변전소로부터 S2 변전소까지 거리의 약 60% 지점에서 사고가 발생하였을 때, 1선 지락사고에서 고장 전류는 사고각 0°의 경우 약 39 kA이었으며 이는 정상전류의 약 87배이었고, 5주기 이후의 전류값도 53배에 달하는 약 23 kA값을 보여주었다. 차단기 전단에 저항형과 유도형 초전도 한류기를 적용하였을 때 사고각별 전류제한 효과를 보면, 사고각 0°인 경우 저항형은 사고발생 직후 최대 한류전류값이 최고 39 kA, 최종한류전류값이 약 15 kA이었다. 이때 과도상태에서 직류성분은 거의 발생하지 않았다. 유도형은 사고발생 직후 최고 39 kA와 최종 12 kA의 전류값을 나타내었다. 이때 직류성은 약 3 kA이었다. 사고각 45°와 90°인 경우에도 저항형은 각각 사고직후 약 27 kA와 11.5 kA의 전류값을 나타내었으나 반주기 이내에 약 15 kA에서 안정된 상태를 유지하였으며 직류성은 거의 발생하지 않았다. 유도형은 각각 사고직후 약 27 kA와 11.5 kA의 전류값과 최종 12 kA에서 안정되었으며 직류성은 각각 약 1 kA와 3 kA이었다.

결론적으로 전력계통에서 초전도 한류기의 적용은 같은 조건(초전도 한류기의 최종 임피던스 100Ω)하에서 전류제한 능력면에서는 유도형이 유리하고 초기 과도상태에서 직류성분의 발생측면은 저항형이 장점을 가지고 있음을 알 수 있었다.

이상과 같이 154 kV 송전선로에서 1선 지락사고에 대한 EMTDC 해석을 통해 저항형과 유도형 초전도 한류기의 한류효과 및 과도상태를 살펴보았으며 앞으로는 초전도한류기가 전원측에 미치는 효과에 대해 simulation하고자 한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Nell E. Reimann, *et al.*, "Simulation of the Transient Response of a High-Tc Superconducting Current Limiter Inserted in an Electrical Distribution System," IEEE Trans. on

- App. Supercon., Vol. 7, No. 2, pp. 836-839, June 1997.
- [2] L. S. Fleischman and Y. A. Bashkirov, "Design Considerations for An Inductive High Tc Superconducting Fault Current Limiter," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 3, pp. 570-573, 1993.
  - [3] W. Paul, *et al.*, "Fault Current Limiters Based on High Temperature Superconductors," Inst. Phys. Conf. Ser. No. 148, pp. 73-78, July 1995.
  - [4] J. R. Cave, *et al.*, "Test Results for Laboratory Scale Inductive High Tc Superconducting Fault Current Limiters," IEEE Trans. on Mag., Vol. 30, No. 4, pp. 1895-1898, July 1994.
  - [5] 최효상, 현옥배, "초전도 한류기를 포함한 계통의 3상 단락사고에 대한 EMTDC 해석," 98년도 전기기기연구회 추계학술대회 논문집, pp. 11-13, 1998.