

Simulation for characteristics of various type SFCLs

유형별 초전도 한류기의 특성에 대한 시뮬레이션

Hyo-sang CHOI, Ok-bae HYUN, Sang-joon KIM, Byoung-sung HAN

최효상, 현옥배, 김상준, 한병성*

103-16 Munji-dong, Yusong-ku, Taejon, Korea 305-380,
Power System Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

대전광역시 유성구 문지동 103-16, 한전 전력연구원 *전북대학교

We simulated the current limiting characteristics of resistive and inductive SFCLs with 100 Ω of impedances for a single and double line-to-ground faults in the 154 kV grid between two substations nearby Seoul. The transient current at the faults includes not only high AC current up to 44 kA but also significant DC component as high as 4 kA. The DC current is greater and lasts longer for the double line-to-ground fault than for the single line-to-ground fault. The inductive SFCL limited the fault current more effectively than the resistive one. The DC component, however, was greater and diminishes slower for the inductive SFCL than for the resistive one.

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 어려운 점과 주열 발생이 많은 점등의 단점을 가지고 있다. 저항형에 대한 연구는 독일의 Siemens AG 그룹을 중심으로 활발하게 연구되고 있으며 배전급에 대한 적용이 고려되고 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

실계통급에 적용하기 위한 연구가 진행중에 있다.^[2]

따라서 본 연구에서는 아직 실계통급의 초전도 한류기가 개발되지 않은 상황에서 전력계통 사고의 대부분을 차지하는 지락사고에 대하여 154 kV급의 저항형과 유도형 초전도 한류기를 적용하였을 때 나타나는 특성을 시뮬레이션함으로써 장차의 연구개발에 데이터로 활용하고 유형별 초전도 한류기의 장단점을 분석하고자 한다.

시뮬레이션 방법은 현재 전세계적으로 많이 사용하고 있는 과도현상 해석 프로그램인 EMTDC (Electromagnetic Transient Direct Current)를 이용하였고 서울지역의 실계통 데이터를 참고하여 parameter를 선정하였다. 지락사고에 대한 각 상의 고장전류 파형을 고찰한 다음, 저항형 및 유도형 초전도 한류기를 적용하였을 때 사고 전류 값과 과도 및 정상상태 전류제한값을 비교분석하였다.

2. 모델 시스템 구성

사고모델계통 구성은 서울근교의 S1과 S2 변전소간의 실계통 데이터를 참고하여 설정하였으며, 일반적인 지락사고에 대하여 동일한 조건(초전도 한류기의 최종 임피던스를 100Ω 으로 설정)하에 저항형과 유도형 초전도 한류기를 설치한 경우에 대해 사고각 0° 를 대표적으로 모의하였으며 모델시스템을 그림 1에 나타내었다. 단, 초전도 한류기의 최종 임피던스를 저항형 및 유도형 모두에 대해 100Ω 으로 설정하였으며 임피던스 발생시간은 3 msec 로 설정하였다. 전력조류는 S1에서 S2 변전소 방향이다.

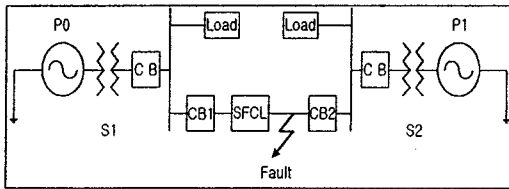


그림 1. 지락사고에 대한 모델시스템

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

3. 결과 및 고찰

지락사고시의 각 상별 고장전류 파형은 S1에서 S2 변전소까지의 실계통값에 대하여 C상을 기준으로 사고각이 0° 일 때 과도전류값을 모의하였다. 또한, 사고시 S2에서 S1 변전소로 유입되는 전류를 나타내었다.

S1 변전소로부터 약 5.98 km 떨어진 CB1(그림 1 참조)후단 지점에서 1선 지락사고(사고각 0°)가 발생한 경우의 과도 전류값 파형을 그림 2에 나타내었다. 사고가 발생하면 사고상인 C상의 전류값이 최고 39 kA 까지 상승하였다가 약 5주기후에 23 kA 값에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 사고 발생전인 정상상태에서 선로에 흐르는 전류값이 약 0.45 kA 인 것을 고려하면 사고 발생후 전류값이 정상치의 최고 약 87배까지 상승하였다가 약 53배되는 지점에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 따라서 선로에 취부되어 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. 같은 사고에 대해 S1 변전소에서 사고지점까지의 전력조류 방향과 반대방향에서 사고지점으로 유입되는 전류파형, 즉 CB2에서의 전류파형을 그림 3에 나타내었다. 사고가 발생한 C상에서 최고 약 4.1 kA 까지 상승하였다가 5주기 후에 3.2 kA 값으로 안정되는 것을 볼 수 있다. 이 값은 차단기의 차단책무에 별 영향을 주지 않으므로 이후에는 분석대상에서 제외하였다.

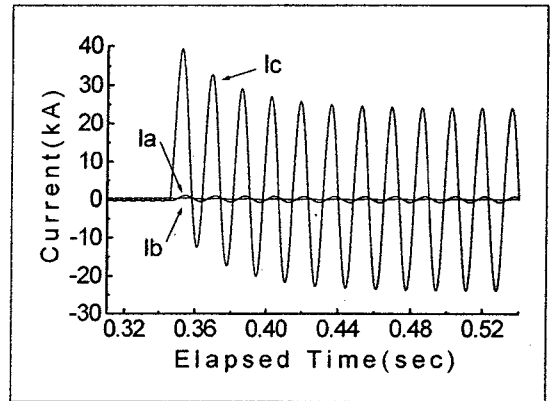


그림 2. 사고각 0° 일때의 고장전류 파형(CB1 지점)

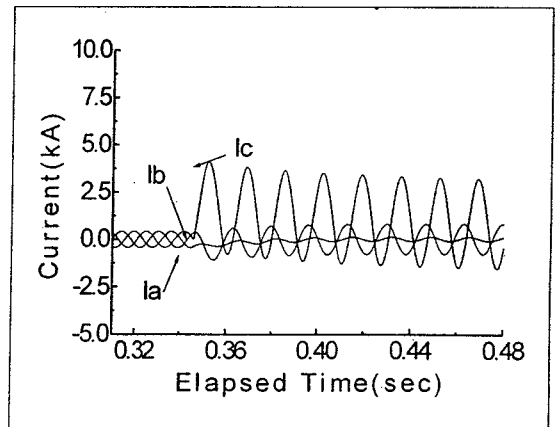


그림 3. 사고각 0° 일때의 유입전류 파형(CB2 지점)

전력계통에서 1선 지락사고가 발생하였을 때 차단기 전단에 저항형과 유도형 초전도 한류기를 적용하는 경우, 고장전류 제한과 과도특성을 살펴보기 위하여 사고각 0° 에서 대표적으로 시뮬레이션 하였다.

그림 4는 사고각 0° 인 1선 지락고장 계통에 대하여 저항형 초전도 한류기를 적용하여 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 그림 4에서 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. 즉, 사고시 선로 불평형에 따라 발생하는 직류성분은 저항형 초전도 한류기를 적용하였을 때 한류기의 저항값에 기인하여 거의 사라짐을 알 수 있었다.

그림 5는 그림 4와 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 4와 그림 5에서 같은 조건하의 저항형과 유도형을 비교해보면 최종전류제한 능력은 유도형이 유리한 반면 직류성분의 발생측면은 저항형이 유리함을 알 수 있다.

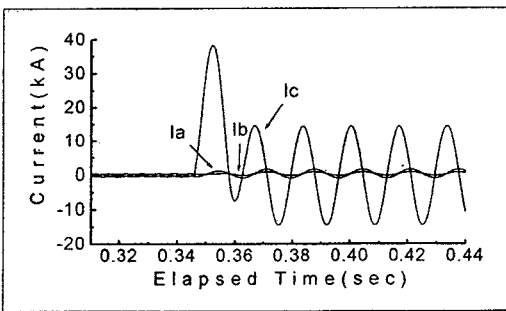


그림 4. 저항형 초전도 한류기를 적용한 1선 지락사고 (사고각 0°)

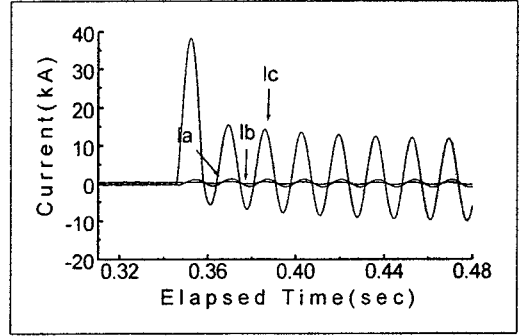


그림 5. 유도형 초전도 한류기를 적용한 1선 지락사고 (사고각 0°)

1선 지락사고와 같은 지점에서 2선 지락사고가 발생한 경우의 파형을 그림 6에 나타내었으며 이때 사고각은 0° 이었다. 사고가 발생하면 B, C상의 전류값이 최고 56, 53 kA까지 상승하였다가 약 5주기후에 34 kA값에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 사고발생전인 정상상태에서 선로에 흐르는 전류값이 약 0.45 kA인 것을 감안하면 사고 발생 후 전류값이 최고 약 124 배까지 상승하였다가 약 76배되는 지점에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 한편 1선 지락사고의 경우와 마찬가지로 B, C상에서 선로 불평형에 따른 리액턴스 성분 때문에 초기 직류성분이 발생하였다가 약 5주기후에 사라지는 것을 관찰할 수 있었다. 전력조류의 반대방향에서 사고지점으로 흘러들어 오는 유입전류에 대한 파형을 그림 7에 보여준다. 사고발생 후 B, C상에서 최고 6.7 kA값과 6주기후에 4.0 kA값을 보여주었으나 역시 차단기의 차단책무에는 별 영향을 주지 못하였다.

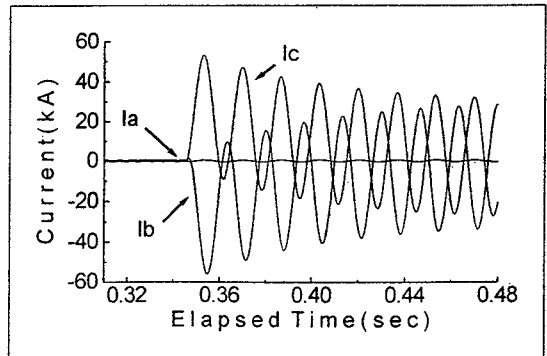


그림 6. 사고각 0° 일때의 고장전류 파형

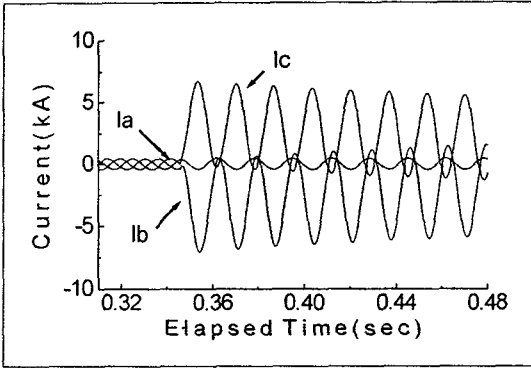


그림 7. 사고각 0° 일때의 유입전류 파형

전력계통에서 2선 지락사고가 발생하였을 때 차단기 전단에 저항형과 유도형 초전도 한류기를 적용하는 경우, 고장전류 제한과 과도특성을 살펴보기 위하여 사고각 0° 에서 시뮬레이션 하였다.

그림 8은 C상을 기준으로 사고각 0° 인 2선 지락고장 계통에 대하여 저항형 초전도 한류기를 적용하여 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 사고가 발생한 C상을 보면 사고발생 직후 최고 44 kA(최대 한류전류값)까지 상승하고 있으나 약 반주기 이내에 15 kA(최종 한류전류값)에서 안정되었다. 특히 저항형 한류기가 quench 이후에 갖는 저항성분에 의하여 반주기 이후의 직류성분이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

그림 9는 그림 8과 같은 조건에서 유도형 초전도 한류기를 설치한 경우의 파형을 보여준다. 저항형과 마찬가지로 사고발생 직후 C상의 전류값이 최고 44 kA까지 상승하고 약 반주기 이내에 약 18 kA까지 감소하였으나, 약 5주기에 걸쳐 전류값이 약 14 kA까지 추가로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 사고발생 후 선로의 임피던스와 quench 이후에 유도형 초전도 한류기에 발생하는 임피던스의 대부분이 인덕턴스 성분이기 때문에 초기에 직류분이 발생하여 일정기간 동안 지속되기 때문으로 사료된다. 그림 8과 그림 9에서 같은 조건하의 저항형과 유도형을 비교해보면 크기의 차이는 있지만 1선 지락사고와 마찬가지로 최종전류제한 능력은 유도형이 약간 유리한 반면 직류성분의 발생측면은 저항형이 유리함을 알 수 있다.

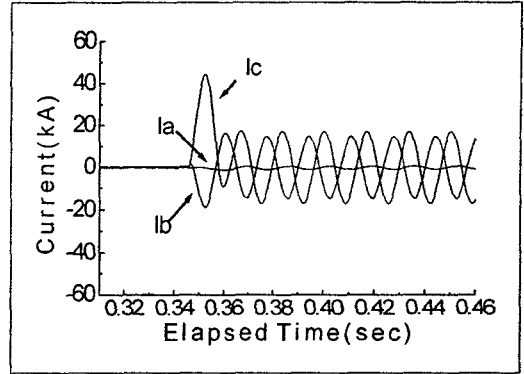


그림 8. 저항형 초전도 한류기를 적용한 2선 지락사고 (사고각 0°)

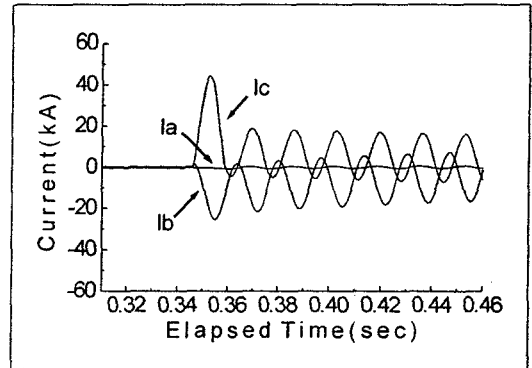


그림 9. 유도형 초전도 한류기를 적용한 2선 지락사고 (사고각 0°)

3. 요약

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 S1측 고장전류는 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 사고 발생 직후 최대 한류전류값이 최고 39 kA, 최종

한류전류값이 약 15 kA이었다. 이때 과도상태에서 직류분은 거의 발생하지 않았다. 유도형은 사고발생 직후 최고 39 kA와 최종 12 kA의 전류값을 나타내었다. 이때 직류분은 약 3 kA이었다.

2선 지락사고에서 고장전류는 사고각 0°의 경우 최고 약 56 kA이었으며 이는 정상전류의 약 124배이었고, 5주기 이후의 전류값도 76배에 달하는 약 34 kA값을 보여주었다. 선로에 저항형과 유도형 초전도 한류기를 적용한 경우 사고각별 전류제한 효과를 보면, 사고각이 0°일때 저항형은 사고발생 직후 최대 한류전류값이 최고 44 kA, 최종한류전류값이 약 15 kA이었다. 이때 과도상태에서 직류분은 거의 발생하지 않았다. 유도형은 사고발생 직후 최고 44 kA와 최종 14 kA의 전류값을 보여주었다. 이때 직류분은 약 4 kA이었다.

1, 2선 지락사고를 종합해 보면 2선 지락사고가 사고전류의 크기와 유도형의 직류분 감쇄폭이 약간 컸을 뿐 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.

아울러 앞으로는 quench 시간에 따른 전류제한 현상에 관한 simulation을 수행 하고자 한다.

본 연구의 일부분은 과학기술부 중점연구 개발 사업으로부터 연구비 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

- [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, 황시돌, 현옥배, "단락사고에 대한 저항형 초전도 한류기의 실계통 시뮬레이션", 한국초전도·저온공학회논문지, 1권, 1호, pp. 28-32, 1999.