

초전도 한류기를 포함한 계통의 단락사고에 대한 EMTDC 해석

최호상, 황시돌, 현옥배, 정상진
대전광역시 유성구 문지동 103-16, 한전 전력연구원 전력계통연구소

An EMTDC Analysis for Line Faults with a Superconducting Fault Current Limiter

Hyo-Sang CHOI, Si-Dole HWANG, Ok-Bae HYUN, Sang-Jin JUNG
103-16 Munji-dong, Yusong-ku, Taejon, Korea 305-380,
Power System Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

hschoi@kepri.re.kr

Abstract -We have performed an EMTDC simulation for the current limiting effects of a superconducting fault current limiter (SFCL). The fault currents in the 154 kV transmission line between the Gaepo and Sungnam substations increased up to 54 kA and 60 kA during the line-to-line and three phase faults, respectively. The SFCL with 100 Ω of impedance after quench limited the currents to less than 17 kA within a half cycle. This limited current is well below the upper limit of a circuit breaker, suggesting that the impedance of the SFCL in the transmission line is sufficient.

한데 사고 발생 후 차단기가 동작하는데는 154 kV급 선로의 경우 최소 3 cycle(IEEE 규격) 이상이 소요되어 이 시간 동안에 변압기를 비롯한 각종 기기의 손상을 피할 수 없다. 더욱이 국내의 154 kV급 선로에서는 50 kA급 차단기가 주종을 이루고 있고 GIS(Gas Insulated Switchgear)는 31.5 kV급으로서 이미 차단내력의 한계에 도달해 있는 실정이다. 여기에 초전도 한류기를 도입함으로써 사고시 신속한 전류제한으로 위에서 언급한 제반 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대되고 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 계통에서 발생하는 사고중 유형별 단락사고에 대하여 초전도 한류기를 적용하였을 때 나타나는 잇점을 중심으로 시뮬레이션 하였다. 해석방법은 현재 전세계적으로 많이 사용하고 있는 과도현상 해석 프로그램인 EMTDC (Electromagnetic Transient DC)를 이용하여 서울지역의 실계통 data를 참고하여 초전도 한류기에 의한 전류제한 효과를 분석하였다. 유형별 단락사고에 대한 각 상의 고장전류 파형을 고찰한 다음, 저항형 초전도 한류기를 적용하였을 때 고장전류 제한 효과를 분석하고, 단락사고값과 과도 및 정상상태 전류제한값을 비교분석 하였다.

1. 서 론

현재 국내의 전력수요가 지속적으로 증가함에 따라 계통의 임피던스는 감소하고 고장전류 용량은 점점 커지고 있다. 실제로 154 kV 모선의 경우 고장전류 차단 내력은 1998년의 data에서 이미 약 35% 이상이 초과하고 있는 실정이다.⁽¹⁾ 이에 대한 대책은 고장전류보다 차단내력이 큰 차단기로 교체하거나 고장전류가 기존 차단기의 차단내력 이하가 되도록 고장전류를 제한하는 방안을 들 수 있다.⁽¹⁻²⁾ 그러나 차단기의 차단내력을 크게 하는 데는 기술적 및 경제적 한계가 있고, 고장전류를 제한하기 위하여 전력계통에서 연계선로를 분리하는 것은 용이하지 않을뿐더러 전력공급 신뢰도 및 안정도 저하와 같은 문제점들이 발생할 수 있다. 따라서 전력계통에서 선로 고장 발생시 기존의 차단기보다 빠른 전류제한을 통하여 차단용량을 경감하는 방안이 적극적으로 검토되고 있다.

송전선로에는 보호계전기, 차단기 등의 각종 보호설비가 유기적으로 구축되어 있어서 서로 보호협조를 하고 있다. 이중 차단기의 기능이 중요

2. 사고모델계통 구성 및 EMTDC 계통 모델링

사고모델계통 구성은 서울근교의 개포와 성남 변전소간의 실계통 data를 참고하여 설정하였으며, 일반적인 단락사고에 대한 고장전류를 제시하고 여기에 단상형 초전도 한류기를 설치한 경우의 고장전류 제한효과를 모의하였다. 그림 1은 초전도 한류기를 설치한 2모선 양단전원을 갖는 1회선 전력계통 모델을 나타낸다. 전력조류는 개포에서 성남 변전소 방향이다.

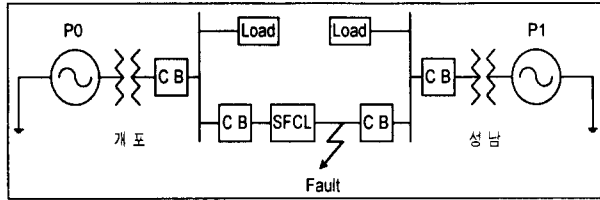


Fig. 1. Model system for ground fault

Source 모델은 2개의 양단 전원이 공급하는 경우를 축약하여 상정하였으며, 모델링에 필요한 계통전원 임피던스값, 사고모델 계통 선로정수값 및 각 부하모선의 R, X 및 L값 등은 지락사고시의 적용값을 사용하였다.^[4]

전력계통에는 특성이 서로 다른 부하가 다양하게 연결되어 있으나, 여기서는 해석을 간단하게 하기 위하여 저항과 리액턴스가 직렬로 연결된 직렬모델을 채택하였다. 식 (1)과 (2)는 부하전력과 모선전압으로부터 부하의 R 및 X 값을 구하는 방법을 보여주며, 여기서 L(H)값은 EMTDC에서 입력값인 X(Ω)으로 변환하였다.

$$S = P_L + jQ_L = V^2 \cdot Y_P^* = \frac{V^2}{Z_S^*} \quad (1)$$

$$Z_S = \frac{V^2}{S^*} = \frac{V^2}{P_L - jQ_L} = \frac{V^2}{S_L(\cos\theta - j\sin\theta)}$$

$$= \frac{V^2}{S_L}(\cos\theta + j\sin\theta) = R_s + jX_s \quad (2)$$

$$\text{단, } \theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_s}$$

여기서, S : 교류전력, P_L : 유효전력, Q_L : 무효전력을 나타낸다.

EMTDC를 이용한 단락사고시의 계통 모델링에서, 사고구간은 PI SECTION을 사용하여 60%와 40%로 나누어 구성하였다. 각 선로의 실제 길이는 60%측이 약 5.98 km, 40%측이 약 3.99 km이다. 고장지점 전단에 저항형 초전도 한류기를 설치한 후 고장이 발생한 경우를 모델로 삼고 전류제한 효과를 살펴보았으며, 이때 사고각은 C상을 기준으로 삼았다.

EMTDC내에서 초전도 한류기 요소를 구현하기 위하여 저항형 초전도 한류기 모델링에 사용된 trigger 부분 쉐치에 따른 임피던스 변화 패턴은 이전결과를 참고하여 적용하였다.^[4]

3. 결과 및 고찰

시뮬레이션은 우선 1회선 계통에 대해서만 실시하였으며, 선로는 154 kV급 송전선로에서 주로 쓰이고 있는 ACSR 410 mm²를 기준으로 선정하였다. 단락사고시의 각 상별 고장전류 파형은 개포에서 성남 S/S까지의 실제계통값에 대하여 C상을 기준으로 사고각이 0°일 때 과도전류값을 모의하

였다. 또한, 사고시 성남에서 개포 S/S으로 유입되는 전류는 개포-성남간 전력 조류에 비하여 작기 때문에 여기서는 생략하였다.

3.1 선간 단락사고의 경우

개포에서 성남 S/S까지의 data를 기준으로 주요한 전력조류를 형성하는 개포-사고지점에 대한 파형을 그림 2에 나타내었으며 각 상별 고장전류 파형은 사고각이 0°일 때 과도전류값을 모의하여 보여주고 있다. 단락사고가 발생하면 B, C상의 전류값이 최고 54 kA까지 상승하였다가 약 5주기 후에 36 kA값에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 사고발생전인 정상상태에서 선로에 흐르는 전류값이 약 0.45 kA인 것을 감안하면 사고 발생후 전류값이 최고 약 120배까지 상승하였다가 약 80배되는 지점에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 따라서 선로에 최후되어 있는 변압기를 포함한 각종 보호기기는 최소한 차단기의 IEEE규격인 정격차단시간(약 3 사이클) 동안에는 어느 정도의 손상을 감수해야 한다. 한편 건전상인 A상의 전류값은 사고발생 전후에 거의 변화가 없었으며 차단기의 차단책무에는 별 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 사고각 45°와 90°인 경우의 선간 단락사고 파형을 모의하였으나 사고각 0°인 경우에 비하여 과도전류값이 작기 때문에 여기서는 사고각 0°인 경우를 대표적으로 나타내었다.

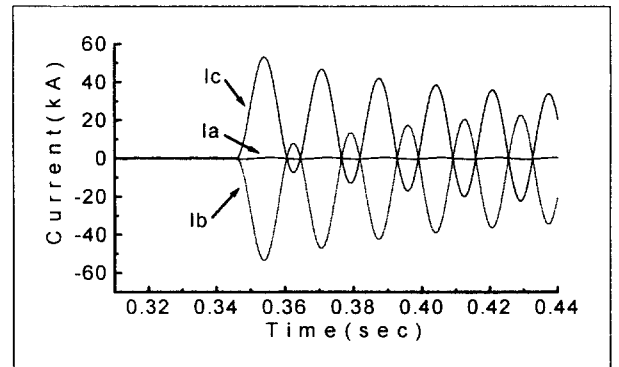


Fig. 2. Fault current waveforms for fault angle 0° (No SFCL)

다음으로, 전력계통에서 선간 단락사고가 발생하였을 때 차단기 전단에 초전도 한류기를 적용하는 경우, 고장전류 제한능력을 알아보기 위하여 사고각을 0°, 45°, 90°로 구분하여 시뮬레이션 하였다.

그림 3은 사고각 0°인 선간 단락고장 계통에 대하여 초전도 한류기를 적용하여 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 그림 3에서 사고가 발생한 B, C상을 보면 사고발생 직후 최고 52 kA의 최대 한류전류값을 나타내나, 약 반주기 이내에 15 kA(최종 고장전류값)에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 이는 GIS의 차단내력 이내이며 건전상인 A상은 사고발생 후 거의 변화가 없었다.

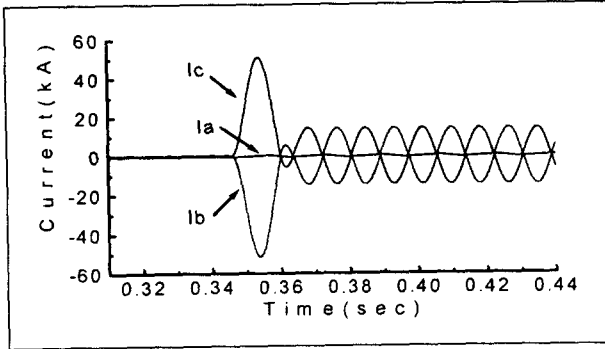


Fig. 3. Line-to-line fault with a SFCL at fault angle 0°

사고각이 각각 45° 와 90° 이고 선간 단락사고가 난 실계통에 대하여 초전도 한류기를 적용하였을 때 고장 전류 제한효과를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 사고가 발생한 직후에 고장전류는 사고각 45° 인 경우는 약 45 kA(최대 한류전류값), 사고각 90° 인 경우는 약 28 kA까지 상승하였으나, 반주기 이내에 각각 약 15 kA의 최종 사고전류값을 보여주어 매우 효과적인 전류제한을 하고 있음을 알 수 있다. 특히 사고각 45° , 90° 인 경우는 전류가 감소하는 순간에 초전도 한류기를 통하여 전류제한을 수행하기 때문에 반주기 이후의 사고전류 상승을 볼 수 없다. 건전상인 A상의 경우는 사고전후 거의 변화가 없었다.

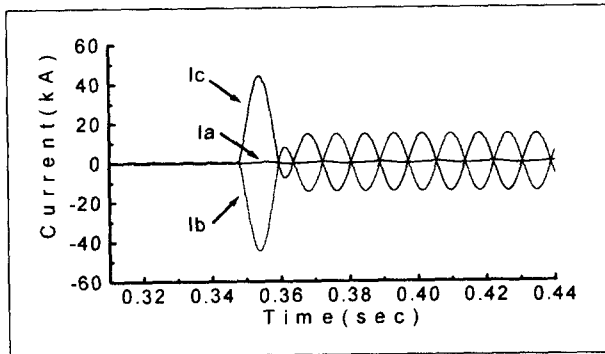


Fig. 4. Line-to-line fault with a SFCL at fault angle 45°

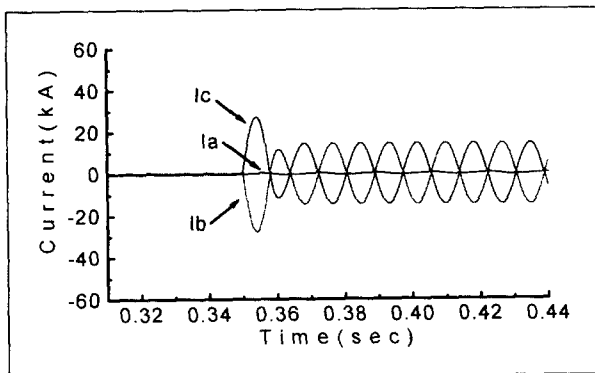


Fig. 5. Line-to-line fault with a SFCL at fault angle 90°

3.2 3상 단락사고의 경우

사고각 0° 에서 3상 단락사고가 발생한 경우를 그림 6에 나타내었다. 사고가 발생하면 최고 약 60 kA까지 상승하였다가 약 5주기 후에 39 kA 값에서 안정되는 것을 보여주고 있다. 사고발생전인 정상상태에서 선로에 흐르는 전류값이 약 0.45 kA인 것을 고려하면 사고발생 후 전류값이 최고 약 130배까지 상승하였다가 약 86배되는 지점에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 각 상별 초기 고장전류값의 약간의 차이는 사고각이 상이하기 때문에 발생한다. 사고각 45° 와 90° 인 경우의 3상 단락사고 파형을 모의하였으나 사고각 0° 인 경우와 과도전류값이 비슷하기 때문에 여기서는 사고각 0° 인 경우를 대표적으로 나타내었다.

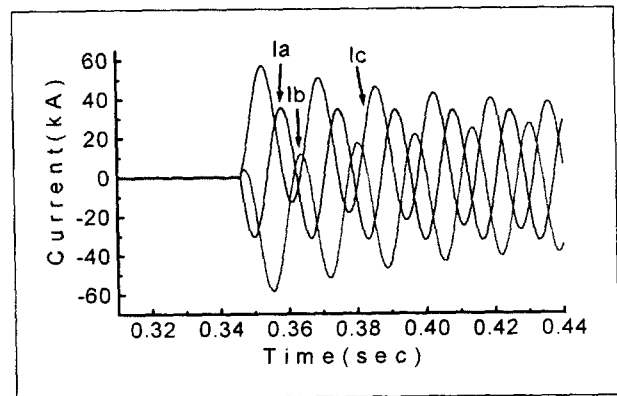


Fig. 6. Fault current waveforms of three-phase fault at fault angle 0° (No SFCL)

전력계통에서 3상 단락사고가 발생하였을 때 차단기 전단에 초전도 한류기를 적용하는 경우, 고장전류 제한능력을 살펴보기 위하여 사고각을 C상을 기준으로 0° , 45° , 90° 로 구분하여 시뮬레이션 하였다.

그림 7은 사고각이 0° 인 3상 단락 고장계통에 대하여 초전도 한류기를 적용하여 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 그림 7에서 사고각 0° 에서 고장이 발생한 C상을 보면 사고발생 직후 최대 한류전류값이 최고 51 kA의 사고전류값을 나타내나, 약 반주기 이내에 차단기의 차단내력 이내인 17 kA에서 최종 사고전류값을 나타내어 안정되는 것을 볼 수 있다. 사고각이 각각 120° , 240° 씩 차이가 나는 A, B상의 경우에도 사고 발생후에 각각 30 kA, 20 kA까지 전류값이 상승하지만 반주기 이내에 역시 17 kA에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 이는 quench시 최고저항값이 100Ω 인 초전도 한류기를 설치함으로써 154 kV급 송전선로의 3상 단락사고를 효과적으로 제한할 수 있음을 나타낸다.

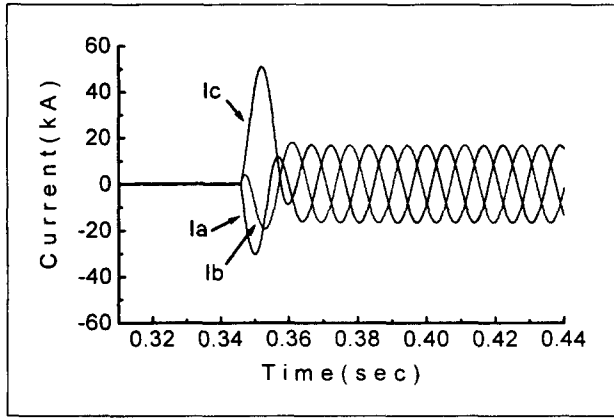


Fig. 7. Three-phase fault with a SFCL at fault angle 0°

C상을 기준으로 하여 사고각이 각각 45° 와 90° 이고 3상 단락사고가 발생한 실계통에 대하여 초전도 한류기를 적용하였을 때 고장 전류 파형을 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 사고가 발생한 직후의 고장전류는 사고각 45° 인 경우 B상에서 최대 한류전류가 약 55 kA, 사고각 90° 인 경우는 B상에서 약 40 kA까지 상승하였으나 반주기 이내에 각각 최종 사고전류가 17 kA값을 나타내어 매우 안정적으로 전류제한을 하였다. 특히 사고각 90° 인 경우 A 및 C상은 전류값이 감소하는 순간에 초전도 한류기를 통하여 전류제한을 수행하기 때문에 초기 사고전류상승을 거의 볼 수 없다. 한편 A 및 C상의 경우에도 사고각 45° 와 90° 인 경우 모두 반주기 이내에 17 kA이내에서 안정된 파형을 보여주었다.

한편, 초전도 한류기를 적용한 경우의 유입전류는 초전도 한류기의 전류제한 책무에 별 영향을 주지않을 정도로 작았기 때문에 여기서는 생략하였다.

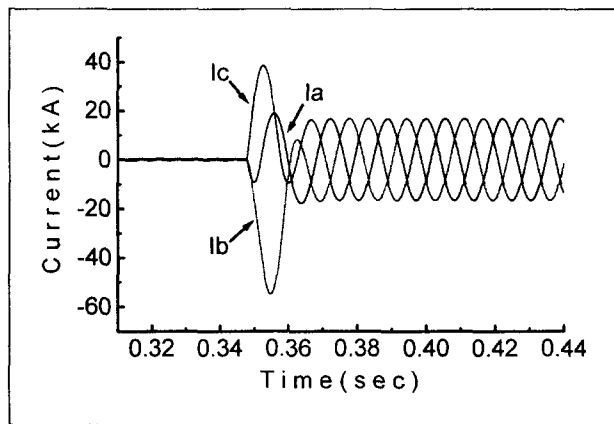


Fig. 8. Three-phase fault with a SFCL at fault angle 45°

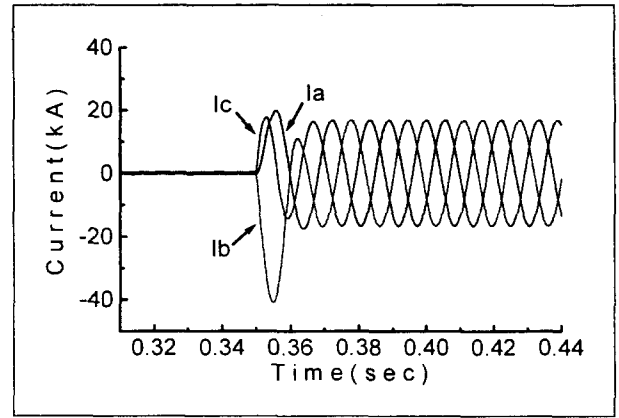


Fig. 9. Three-phase fault with a SFCL at fault angle 90°

4. 결 론

154 kV급 송전계통에서 발생할 수 있는 사고 유형인 단락사고에 대하여 개포 변전소와 성남 변전소간의 실계통값을 참고하여 EMTDC에 의한 사고전류 파형을 모의하고, 이 전력계통에 초전도 한류기를 적용하였을 때 사고각별 전류제한 효과를 알아 보았다.

개포 변전소로부터 성남 변전소까지 거리의 약 60 %지점에서 사고가 발생하였을 때, 선간 단락 사고에서 고장전류는 사고각 0° 의 경우 최고 약 54 kA이었으며 이는 정상전류의 약 120배였고, 5주기 이후의 전류값도 80배에 달하는 약 36 kA 값을 보여주었다. 차단기 전단에 초전도 한류기를 적용하였을 때 사고각별 전류제한 효과를 보면, 사고각 0° 인 경우 사고발생 직후 최대 한류전류값이 최고 52 kA까지 사고전류가 증가하였으나, 초전도체가 quench되면서 갖는 큰 최종 한류저항값(100 Ω)으로 인하여 약 반주기 이내에 15 kA의 최종 사고전류값을 보여주어 안정되었다. 사고각 45° 와 90° 인 경우에도 각각 약 45 kA와 28 kA까지 상승하였다가 반주기 이내에 약 15 kA까지 각각 감소하여 안정된 상태를 유지하였다.

3상 단락사고의 경우, 고장전류는 사고각 0° 의 경우 최고 약 60 kA이었으며, 이는 정상전류의 약 130배였고 5주기 이후의 전류값도 정상전류의 약 86배인 약 39 kA값을 보였다. 단상형 초전도 한류기를 적용하였을 때 사고각별 전류제한 효과를 보면, 사고각 0° 인 경우 사고발생 직후 최대 한류전류값이 51 kA까지 증가하였으나, 약 반주기 이내에 17 kA(최종 사고전류값)까지 안정되었다. 사고각 45° 와 90° 인 경우에도 각각 약 55 kA와 40 kA까지 상승하였다가 반주기 이내에 약 17 kA까지 각각 감소하여 안정된 상태를 유지하였다. 따라서 154 kV급 송전선로에 대한 선간 단락사고에 대해서는 차단기의 안정적인 운용을 고려하더라도 quench시 최종 한류저항값이 100 Ω 정도 되는 단상형 초전도 한류기를 설치하면 차단기의 차단내력을 초과하는 고장전류에 대해 효과적으로 대처할 수 있음을 알 수 있었다.

이상과 같이 154 kV 송전선로에서 선간 단락 사고에 대해 EMTDC 해석을 통해 사고전류 및 한류효과를 살펴보았으며 앞으로 전 고장 유형에 대해 3상형 한류기에 대한 simulation 을 수행하여야 할 것이다. 또한 전력계통 측면에서 요구되는 새로운 형태의 초전도 한류기에 대한 연구를 수행함으로써 다양한 용도의 초전도 한류기의 가능성을 제시하여야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] "전력계통 고장전류 증대와 대응방안." 전기저널, Vol. 5, pp. 24-31, 1998.
- [2] "장기 송·변전 설비설계 검토서." 한국전력공사 전원계획처, pp. 218-235, 1995.
- [3] 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.
- [4] 최효상, 현옥배, 고태국, 김진중, "송전선로 고장에 대한 초전도 한류기의 EMTDC 해석," 98 대한전기학회 하계학술대회 논문집, Vol. A, pp. 220-223, 1998.