

선간단락 사고에 대한 초전도 한류기의 EMTDC 해석

최 효상, 현 옥배
한국전력공사 전력연구원

An EMTDC Simulation for a Superconducting Fault Current Limiter in the Line-to-Line Fault

Hyo Sang CHOI, Ok Bae HYUN
KEPCO-KEPRI

Abstract - We have performed an EMTDC simulation for the current limiting effects of a superconducting fault current limiter (SFCL) for the 154 kV transmission line between the Gaepo and Sungnam substations. The simulation showed that a line-to-line fault increases the fault current up to 54 kA. The SFCL with 100 Ω impedance after quench limited the current to 15 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.

1. 서 론

오늘날 전력수요는 계속 증가되고 있으며 이에 따라 전원설비 신·증설 및 송변전 설비의 규모 확대가 요구되고 있다. 이는 선로 임피던스의 감소를 초래하여 부하 용량 및 계통 고장용량의 증가를 수반하고 있다. 따라서 기존의 전력계통을 유지하면서 선로 고장 발생시 신속한 전류제한과 차단을 통하여 기존 보호 기기의 한계를 극복하고 차단용량을 증대하는 방안으로서 초전도 한류기가 검토되고 있다.

이러한 초전도 한류기는 1973년 Falcone 등이 그 필요성을 처음으로 역설한 이래, 다른 전력기기로서 대체할 수 없는 초전도 교류의 기기라는 점과 구조가 간단하고 동작시간이 짧을 뿐만 아니라 수명이 반영구적이라는 점 등, 다른 전력기기들과 구별되는 초전도 한류기만이 갖는 특성때문에 세계적으로 활발하게 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

본 논문은 계통 사고에 대한 그동안의 해석 결과⁽⁵⁻⁷⁾에 이은 후속연구로서 선간 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 서울 지역의 실제계통을 모델로 삼고, 초전도 한류기에 의한 전류제한 효과를 분석하였다. 특히, 선간 단락사고에 대한 각 상의 고장전류 파형을 고찰한 다음, 저항형 초전도 한류기를 적용하였을 때 고장전류제한 효과를 분석하고 사고값과 과도 및 정상상태 전류제한값을 비교분석하였다. 또한, 154 kV급 송전선로에 사고보호기기로서 사용할 수 있는 저항형 초전도 한류기의 임피던스를 제시하고자 한다.

2. 사고모델계통 구성 및 EMTDC 계통 모델링

사고모델계통 구성은 서울근교의 성남-개포 변전소의 실제계통 data를 기반으로 하였으며, 일반적인 단락사고에 대한 고장전류를 살펴보고 여기에 단상형 초전도 한류기를 설치한 경우의 고장전류 제한효과를 simulation 하였다.

EMTDC에서 사고계통을 모델링하기 위하여 필요한 요소는 source 임피던스, 선로정수 및 부하전력이다. Source의 임피던스는 정확한 데이터를 확보하기 위하여 전력계통 해석용 프로그램인 PSS/E를 이용하여 구한 값을 사용하였으며, 부하는 해당 선로의 유효 및 무효전력을 환산하여 집중모델로 표현하였다.

Source 모델은 2개의 양단 전원이 공급하는 경우를 축약하여 상정하였으며, 모델링에 필요한 계통전원 임피던스값, 사고모델 계통 선로정수값 및 각 부하모선의 R, X 및 L 값 등은 1, 2선 지락사고시의 적용값을 사용하였다.⁽⁶⁻⁷⁾

선로정수를 모델링하기 위하여 집중정수 모델인 PI SECTION을 사용하였다. PI SECTION 모델은 대도시 지역에서 송전선로의 길이가 10 km 이내의 짧은 길이를 가진 경우에 적합한 것으로 알려져 있다. EMTDC에서 선로정수를 표현하는데 필요한 data는 정상 임피던스(Z1), 정상 어드미턴스(Y1), 영상 임피던스(Z0) 및 영상 어드미턴스(Y0)이다. 선로정수의 기준용량은 100 MVA, 기준전압은 154 kV하에서 실제 선로정수 %Z를 단위 Z[Ω]으로 환산하여 적용하였다. 아래 식 (1), (2)는 %Z를 Z[Ω/km]와 %Y를 [μS/km]로 환산하는 식이다.

$$Z = \%Z \cdot \frac{10[(kV)_{base}]^2}{(KVA)_{base}} = \%Z \cdot 2.3716 [\Omega/km] \quad (1)$$

$$Y = \%Y \cdot \frac{10[(KVA)_{base}]}{[(kV)_{base}]^2} = \%Y \cdot 42.1656 [\mu S/km] \quad (2)$$

전력계통에는 특성이 서로 다른 부하가 다양하게 연결되어 있으나, 여기서는 해석을 간단하게 하기 위하여 저항과 리액턴스가 직렬로 연결된 직렬모델을 채택하였다. 식 (3)과 (4)는 부하전력과 모션전압으로부터 부하의 R 및 X 값을 구하는 방법을 보여주며 L(H)값은 EMTDC에서 입력값인 X[Ω]으로 변환하였다.

$$S = P_L + jQ_L = V^2 \cdot Y_p = \frac{V^2}{Z_s} \quad (3)$$

$$Z_s = \frac{V^2}{S^*} = \frac{V^2}{P_L - jQ_L} = \frac{V^2}{S_L(\cos\theta - jsin\theta)} = \frac{V^2}{S_L}(\cos\theta + jsin\theta) = R_s + jX_s \quad (4)$$

$$\tan \theta = \tan^{-1} \frac{X_2}{R_2}$$

EMTDC를 이용한 선간 단락사고시의 계통 모델링에서 각선로의 실제 길이는 60 %축이 5.98 km, 40 %축이 3.99 km이다. 고장지점 전단에 저항형 초전도 한류기를 설치한 후 B, C상에서 단락 고장이 발생한 경우를 모델로 삼고 전류제한 효과를 살펴보았다.

EMTDC내에서 초전도 한류기 요소를 구현하기 위하여 저항형 초전도 한류기 모델링에 사용된 trigger 부분 켄치에 따른 임피던스 변화 패턴은 이전 결과를 참고하여 그 형태를 library로 제작하여 적용하였다.⁽⁶⁻⁷⁾

3. 결과 및 고찰

시뮬레이션은 우선 1회선 계통에 대해서만 실시하였으며 선로는 154 kV급 송전선로에서 주로 쓰이고 있는 ACSR 410 mm를 기준으로 선정하였다.

개포에서 성남 S/S까지의 실제통값을 기준으로 선간 단락사고시의 각 상별 고장전류 파형은 사고각이 0° 일 때 개포에서 사고구간으로의 전력조류에 대한 전류파형을 모의하여 그림 1에 나타내었다. 단락사고가 발생하면 B, C상에서 최고 54 kA까지 상승하였다가 약 5주기후에 36 kA값에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 참고로 3상 단락사고인 경우에는 최고 60 kA값까지 상승하였다가 39 kA값에서 안정되었다.⁽⁵⁾ 사고발생전인 정상상태에서 선로에 흐르는 전류값이 약 0.45 kA인 것을 고려하면 사고발생 후 전류값이 최고 약 120배까지 상승하였다가 약 80배 되는 지점에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 이는 차단기의 차단내력(50kA, IEEE 규격)을 초과하는 것으로 차단기능을 손상시킬 수 있다. 그리고 차단기가 정상적으로 작동하여도 선로에 취부되어 있는 변압기를 포함하여 각종 보호기들은 최소 3 사이클 동안에는 어느 정도의 손상을 감수해야 한다. 한편 건전상인 A상은 사고발생 전후에 거의 변화가 없었다. 그림 2에 사고각 0°의 성남에서 사고구간으로의 유입전류에 대한 각상별 전류파형을 나타내었다. 고장발생이후 B, C상에서 약 5.7 kA값을 나타내었고 A상은 사고발생 전후 거의 변화가 없었으며 차단기의 차단책무에 별 영향을 주지 않음을 알 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 나타내었다.

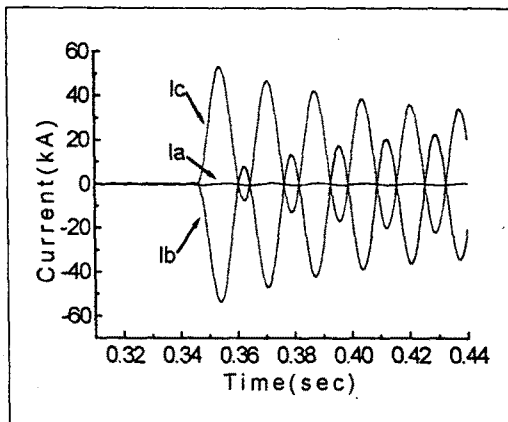


그림 1. 사고각 0° 일때의 고장전류 파형(전력조류)

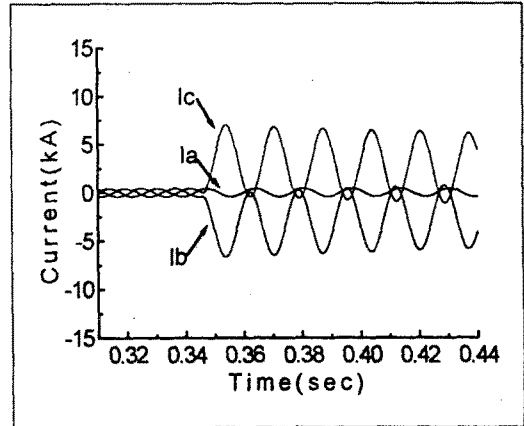


그림 2. 사고각 0° 일때의 고장전류 파형(유입전류)

다음으로, 전력계통에서 선간 단락사고가 발생하였을 때 차단기 전단에 초전도 한류기를 적용하는 경우, 고장 전류 제한능력을 알아보기 위하여 사고각을 0°, 45°, 90°로 구분하여 시뮬레이션 하였다. 이때 초전도채의 quench 시간은 3 msec로 설정하였으며, quench시 최저저항은 여러번의 시뮬레이션을 거쳐 100 Ω으로 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 사고전류값을 나타내나, 약 반주기 이내에 15 kA에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 건전상인 A상은 사고발생 전후 거의 변화가 없었다.

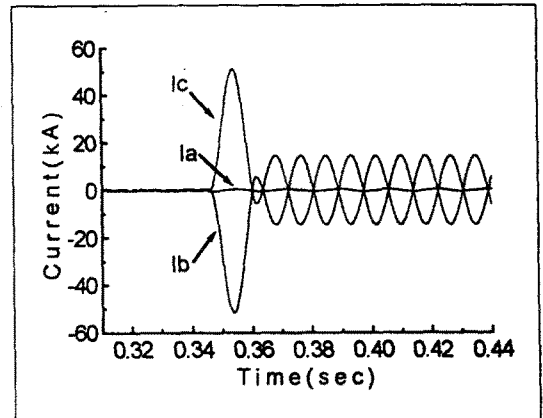


그림 3. 초전도 한류기를 적용한 선간 단락사고시의 각상의 파형(사고각 0°)

사고각이 각각 45°와 90°이고 선간 단락사고가 난 실제계에 대하여 초전도 한류기를 적용하였을 때 고장 전류 제한효과를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 사고가 발생한 직후에 고장전류는 사고각 45°인 경우는 약 45 kA, 사고각 90°인 경우는 약 28 kA까지 상승하였으나, 반주기 이내에 각각 약 15 kA까지 감소하여 매우 효과적인 전류제한을 하고 있음을 알 수 있다. 특히 사

고각 45, 90°인 경우는 전류값이 감소하는 순간에 초전도 한류기를 통하여 전류제한을 수행하기 때문에 반주기 이후의 사고전류상승을 볼 수 없다. 건전상인 A상의 파형은 사고전후 거의 변화가 없었다.

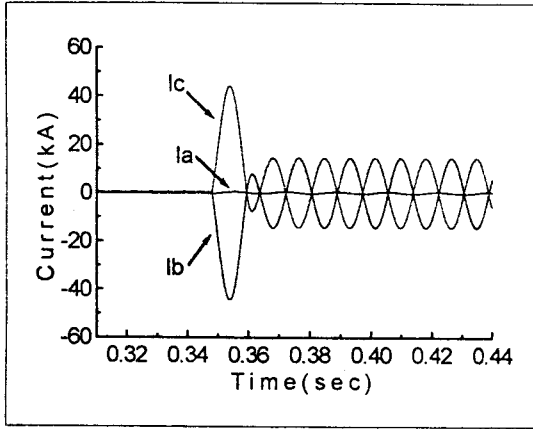


그림 4. 초전도 한류기를 적용한 선간 단락사고시의 각상의 파형(사고각 45°)

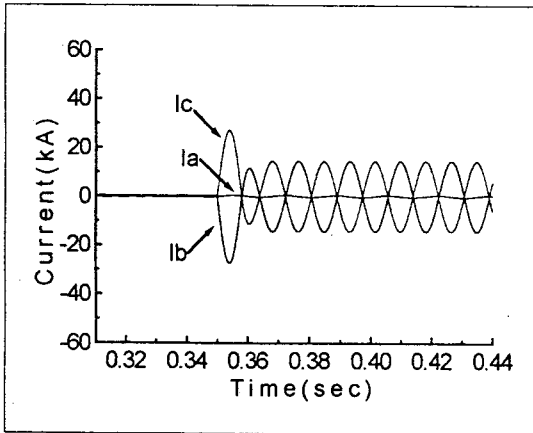


그림 5. 초전도 한류기를 적용한 선간 단락사고시의 각상의 파형(사고각 90°)

한편, 초전도 한류기를 적용하였을 때 성남에서 사고구간으로의 유입전류는 그림 2의 결과와 마찬가지로 초전도 한류기가 동작하지 않을 정도로 작았기 때문에 여기서 생략하였다.

4. 결 론

154 kV급 송전계통에서 고장전류가 큰 사고유형중 하나인 선간 단락사고에 대하여 개포 변전소와 성남 변전소간의 실제통값을 적용하여 EMTDC를 이용하여 사고전류 파형을 모의하고, 이 전력계통에 초전도 한류기를 적용하였을 때 사고각별 전류제한 효과를 알아 보았다. 이때 사고가 발생한 상에만 단상형 초전도 한류기를 채용한 경우에 대하여 시뮬레이션 하였다. 개포 변전소로

부터 성남 변전소까지 거리의 약 60 %지점에서 사고가 발생하였을 때 고장전류는 사고각 0°의 경우 최고 약 54 kA이었으며, 이는 정상전류의 약 120배 이었고, 5주기 이후의 전류값도 약 36 kA값을 보여주어 정상전류의 약 80배에 달하였다. 한편, 비교를 위하여 3상 단락 사고의 경우를 보면 과도전류값이 60 kA, 안정전류값이 39 kA이었다.^[5]

차단기 전단에 초전도 한류기를 적용하였을 때 사고각별 전류제한 효과를 살펴보았다. 사고각 0°인 경우 사고 발생 직후 최고 52 kA까지 사고전류가 증가하였으나, 초전도체가 quench되면서 갖는 큰 저항값(100 Ω)으로 인하여 약 반주기 이내에 15 kA까지 안정되었다. 사고각 45°와 90°인 경우에도 각각 약 45 kA와 28 kA까지 상승하였다가 반주기 이내에 약 15 kA까지 각각 감소하여 안정된 상태를 유지하였다. 다시 말해 154 kV급 송전선로에서 차단기의 안정적인 운용을 고려하더라도 quench 저항이 100 Ω정도 되는 초전도 한류기를 설치하면 차단기의 차단내력을 초과하는 고장전류에 대해서도 효과적으로 대처할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 유입전류는 선간 단락사고시와 초전도 한류기를 적용하였을 경우 모두 최고 약 5.7 kA의 적은 값으로서 초전도 한류기의 동작에 별 영향을 주지 않았다. 앞으로는 실제 저항형 한류기를 제작하여 실험값과 simulation 결과를 비교 분석하는 연구가 병행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] W. Paul, et al., "Fault Current Limiters Based on High Temperature Superconductors," Inst. Phys. Conf. Ser. No. 148, pp. 73-78, July 1995.
- [2] 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.
- [3] Masanori Tsuchimoto, et al., "Experimental Evaluation of the Total Shielding Current in a Bulk High-Tc Superconductor," IEEE Trans. on App. Supercon., Vol. 6, No. 1, pp. 10-12, March 1996.
- [4] C.A. Falcone et al., "Current Limiting Device - A Utility's Need," IEEE Trans. PAS-93, November/December, pp. 1768-1775, 1974.
- [5] 최효상, 현옥배, "초전도 한류기를 포함한 계통의 3상 단락 사고에 대한 EMTDC 해석," 98 대한전기학회 전기기기연구회 추계 학술발표회 합동논문집, pp. 11-13, 1998.
- [6] 최효상, 현옥배, 고태국, 김진중, "송전선로 고장에 대한 초전도 한류기의 EMTDC 해석," 98 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, Vol. A, pp. 220-223, 1998.
- [7] 최효상, 현옥배, 고태국, "2선 지락사고에 대한 초전도 한류기의 EMTDC 해석," KCMAS '98, Vol. VII, pp. 333-338, 1998.