

송전선로 고장에 대한 초전도 한류기의 EMTDC 해석

최추삼* 현옥배* 고태국** 김진중*

*전력연구원 에너지환경고등연구소, **연세대학교 전기공학과

EMTDC Simulation for a Superconducting Fault Current Limiter in the Transmission Line

Hyo Sang CHOI,* Ok Bae HYUN,* Tae Kuk KO,** and Jin Joong KIM*
KEPRI-CASEE,* Dept. of E.E., Yonsei University**

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 fault current increased up to 39 kA during an artificial ground fault. 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

전력전송 용량의 증가와 함께 전원의 개발과 계통의 병렬 연결은 선로 임피던스의 감소를 초래하여 부하용량의 증가 및 계통 고장용량의 증가를 필연적으로 수반하고 있다. 이의 해결 방법으로서 승압송전방식과 선로의 방사화 구조가 검토될 수 있으나 이 방안들은 과도한 비용문제가 수반되며 환경파괴 등의 문제점 때문에 시행에는 역시 문제점을 안고 있다.⁽¹⁻²⁾ 따라서 기존의 전력계통을 유지하면서 선로 고장 발생시 신속한 전류제한과 차단술을 통하여 기존 보호 기기의 한계를 극복하고 차단용량을 증대하는 방안으로서 초전도 한류기가 검토되고 있다.

송전선로에는 각 선로마다 지락사고, 선간 단락등의 고장에 대처하기 위하여 보호 계전기(Relay), 차단기(CB)등의 각종 보호설비가 구축되어 있다. 보호설비 중 차단기의 역할이 중요한데, 사고가 발생한 직후 사고지점을 감지하여 선로를 차단하는데 약 3 ~ 4 cycle이 소요된다. 더욱이 국내의 154 kV급 GIS (Gas Insulated Switchgear)는 31.5 kA급과 50 kA급이 주종을 이루고 있고, 현재의 기술수준상 차단내력을 크게 하려는 데는 기술적 및 경제적인 한계가 있다. 1998년 현재 차단내력을 초과하는 변전소는 약 35.5 %⁽³⁾에 달하고 있기 때문에 국내에서도 초전도 한류기의 필요성이 대두되고 있다. 그러나 아직까지 전세계적으로 실계통에 적용할 정도의 초전도 한류기가 개발되어 있지 않은 상태에서 장차의 연구개발 방향에 data로 활용될 수 있기 때문에 전력계통에서 초전도 한류기를 부착함으로써 한류효과를 알아보고 실용상 사용할 수 있는 한류용량을 정하는 것은 큰 의미를 가질 수 있다.

이러한 초전도 한류기는 1973년 Falcone 등이 그 필요성을 처음으로 역설한 이래, 다른 전력기기로서 대체할 수 없는 초전도 고유의 기기라는 점과 구조가 간단하고 동작시간이 짧은 뿐만 아니라 수명이 반영구적이라는 점 등, 다른 전력기기들과 구별되는 초전도 한류기만

이 갖는 특성때문에 세계적으로 활발하게 연구가 진행되고 있다.⁽⁴⁻⁷⁾

본 연구에서는 계통에서 발생하는 사고의 약 70 % 이상을 차지하는 1선지락사고에 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 실계통을 모델로 삼고, 전력계통 해석용 프로그램인 PSS/E를 이용하여 구한 실계통값을 기초로 하여 초전도 한류기에 의한 전류제한 효과를 분석할 것이다. 특히, 1선지락사고에 대한 각 상의 고장전류 파형을 고찰한 다음, 저항형 초전도 한류기를 적용하였을 때 고장전류제한 효과를 분석하고 지락사고값과 과도 및 정상상태 전류제한값을 비교분석 할 것이다. 또한, 154 kV급 송전선로에 사고 보호기기로서 사용할 수 있는 저항형 초전도 한류기의 임피던스를 제시하고자 한다.

2. 사고모델계통 구성 및 EMTDC 계통 모델링

사고모델계통 구성은 사고전류가 약 40 kA정도 되는 서울근교의 성남-개포 변전소의 실계통 data를 기초로 설정하였으며, 일반적인 지락사고에 대한 고장전류를 제시하고 여기에 단상형 초전도 한류기를 설치한 경우의 고장전류 제한효과를 모의하였다. 그림 1은 초전도 한류기를 설치한 2모선 양단전원을 갖는 1회선 전력계통 모델을 나타낸다.

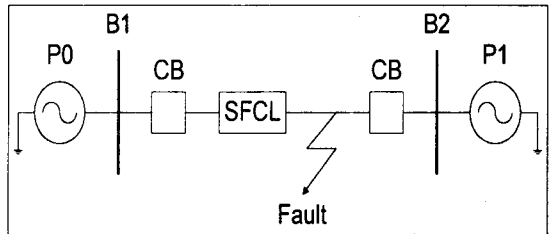


그림 1. 초전도 한류기를 설치한 1회선 전력계통 모델

EMTDC에서 사고계통을 모델링하기 위하여 필요요소는 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 임피던스는 표 1의 값을 사용하였다. A P0를 기준모선으로

설정하고 선로의 조류에 지배적인 영향을 미치도록 하였으며, A P0의 전압 위상각 0도를 기준으로 삼고 B P1의 전압위상각을 구하였다. 또한 변압기 임피던스등을 포함하여 기타 기기에서 발생하는 임피던스는 source 임피던스로 통합하여 표시하였다.

표 1. 계통 전원 임피던스값

Source	임피던스값			전압의 크기 및 위상각
	정상	영상	역상	
A P0	2.4∠88.67°	3.8∠86.42°	2.4∠88.67°	154∠0°
B P1	29∠88.06°	150∠85.04°	29∠88.06°	154∠3.6°

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.

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

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

EMTDC에서 입력 data로 사용하기 위하여 환산한 선로정수값을 표 2에 나타내었다.

표 2. 사고모델 계통 선로정수값

구 분	선로정수값			선로길이 (km)
	정상	영상	역상	
Resistance	4.35E-01	0.24E-01	4.35E-01	9.98
Reactance	0.63	0.61	0.63	

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, 이 수식을 통하여 얻은 부하모델 수렴결과를 표 3에 나타내었다. 여기서 L(H)값은 EMTDC에서 입력값인 X[Ω]으로 변환하였다.

$$S = P_L + jQ_L = V^2 \cdot Y_P^* = \frac{V^2}{Z_S^*} \quad (3)$$

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

$$= \frac{V^2}{S_L}(\cos\theta + j\sin\theta) = R_S + jX_S \quad (4)$$

$$\text{단, } \theta = \tan^{-1} \frac{X_S}{R_S}$$

표 3. 각 부하모선의 R, X 및 L 값

구 분	R [Ω]	X [Ω]	L [H]	전 압(kV)
A P0	551.73	181.70	0.4809	154
B P1	155.06	50.93	0.1351	154

EMTDC를 이용한 1선지락사고시의 계통 모델링에서, 사고구간은 앞서 언급한 바 있는 PI SECTION을 사용하여 60%와 40%로 나누어 구성하였다. 각선로의 실제 길이는 60%측이 5.98 km, 40%측이 3.99 km이다. 고장지점 전단에 저항형 초전도 한류기를 설치한 후 C상에서 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 패턴^[8]은 아직까지 154 kV 급용 자료가 없다. 따라서 낮은 전압계통의 실험값을 참고하여 초전도 한류기 quench저항이 최고 100 Ω이 되도록 구성하고(그림2), 그 형태를 library로 제작하여 적용하였다.

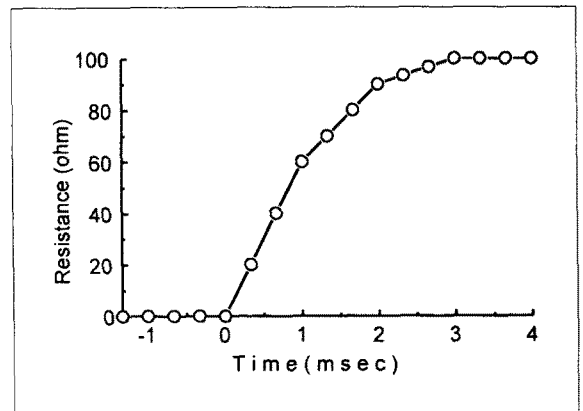


그림 2. 초전도체의 저항 변화값

3. 결과 및 고찰

시뮬레이션은 우선 1회선 계통에 대해서만 실시하였으며, 선로는 154 kV급 송전선로에서 주로 쓰이고 있는 ACSR 410 mm를 기준으로 선정하였다. 저항이 거의 없는 1선 지락사고시의 현상을 분석하기 위하여 P0 - P1 S/S 구간중 P0 S/S에서 약 60% 지점에서 고장을 발생시켰다. 1선지락사고시의 각 상별 고장전류 파형은 개포에서 성남 S/S까지의 실제통값을 기준으로 사고각이 0°일 때 과도전류값을 모의하여 그림 3에 나타내었다. 지락사고가 발생하면 C상의 값이 최고 39 kA까지 상승하였다가 약 5주기후에 23 kA값에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 사고발생전인 정상상태에서 선로에 흐르는 전류값이 약 0.45 kA인 것을 고려하면 사고발생후 전류값이 최고 약 87배까지 상승하였다가 약 53배되는 지점에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 따라서 선로에 취부되어 있는 변압기를 포함하여 각종보호기기들은 최소한 차단기의 IEEE규격인 정격차단시간(3 사이클) 동안에는 어느 정도의 손상을 입을 수밖에 없다. 그림 4에 사고발생 전후의 각상별 전류파형을 자세히 관찰하기 위하여 그림

3의 그래프를 확대하여 나타내었다. 고장발생이후 A상 및 B상의 전류값에 선로 불평형에 따른 리액턴스 성분 때문에 초기 직류성분이 나타나는 등 약간의 변화가 있으나 차단기의 차단책무에는 별 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 사고각 45°와 90°인 경우의 1선 지락사고 파형을 모의하였으나 사고각 0°인 경우에 비하여 과도 전류값이 작기 때문에 여기서는 사고각 0°인 경우를 대표적으로 나타내었다.

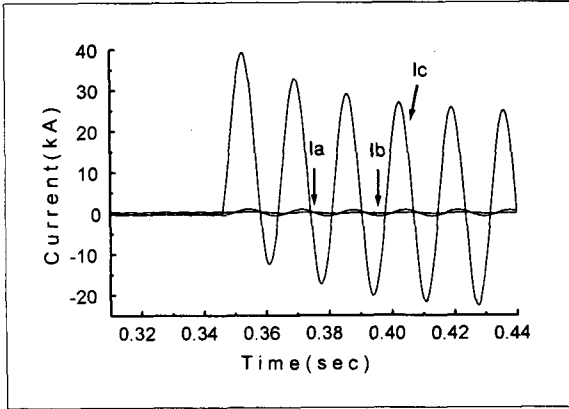


그림 3. 사고각 0° 일때의 고장전류 파형

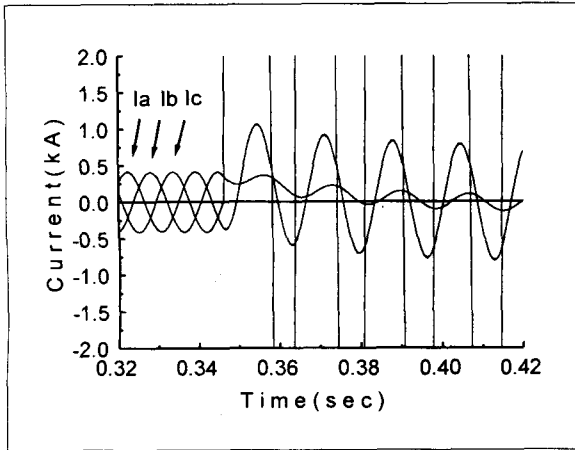


그림 4. 사고각 0° 일때의 각상의 고장전류 파형

다음으로, 전력계통에서 1선 지락사고가 발생하였을 때 차단기 전단에 초전도 한류기를 적용하는 경우, 고장 전류 억제능력을 살펴보기 위하여 사고각을 0°, 45°, 90°로 구분하여 시뮬레이션 하였다. 이때 초전도체의 quench 시간은 그림 2에서 보여주는 바와 같이 3 msec로 설정하였으며, quench시 최저저항은 여러번의 시뮬레이션을 거쳐 100 Ω으로 하였다.

그림 5와 그림 6은 사고각 0°인 지락고장 계통에 대하여 초전도 한류기를 적용하여 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 그림 5에서 사고가 발생한 C상을 보면 사고발생 직후 최고 39 kA의 사고전류값을 나타내나, 약 반주기 이내에 15 kA에서 안정되는 것을 볼 수 있다. 건전상인 A, B상의 경우에도 사고 발생 후에 각각 1.6 kA, 0.9kA까지 전류값이 상승하지만 차단기의 차단내력에는 별 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

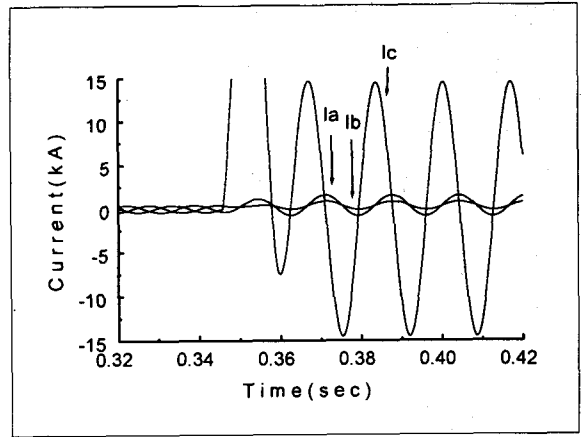


그림 5. 초전도 한류기를 적용한 1선지락사고의 각상에 대한 전류파형 (사고각 0°)

사고각이 각각 45°와 90°이고 1선지락사고가 난 실계통에 대하여 초전도 한류기를 적용하였을 때 고장 전류 억제효과를 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 사고가 발생한 직후에 고장전류는 사고각 45°인 경우는 약 27 kA, 사고각 90°인 경우는 약 11.5 kA까지 상승하였으나, 반주기 이내에 각각 약 15 kA까지 감소하여 매우 효과적인 전류제한을 하고 있음을 알 수 있다. 특히 사고각 90°인 경우는 초전도 한류기를 통하여 반주기 이내에 전류제한을 수행하기 때문에 반주기 이후의 사고 전류상승을 볼 수 없다. 건전상인 A, B상의 경우에도 사고각 45°와 90°인 경우 모두 1.5 kA이내에서 안정된 파형을 보여 주었다.

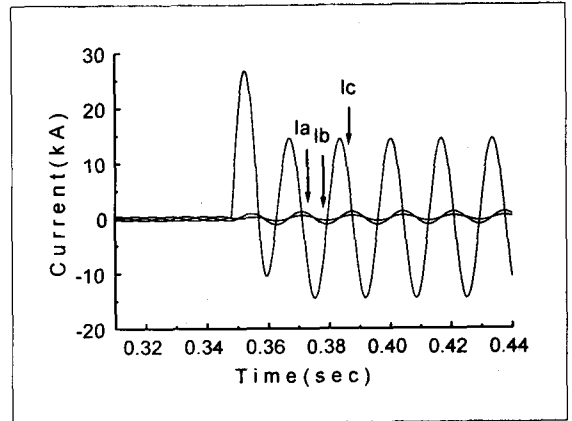


그림 6. 초전도 한류기를 적용한 1선지락사고 (사고각 45°)

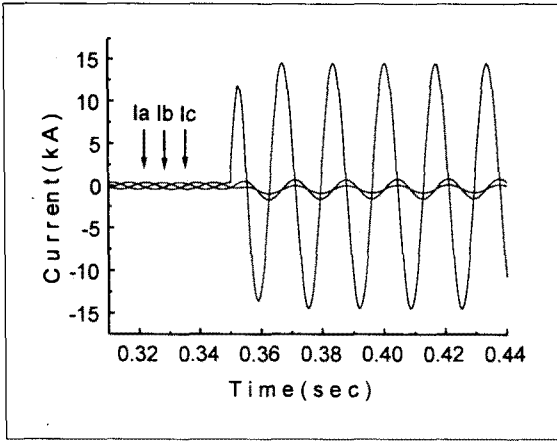


그림 7. 초전도 한류기를 적용한 1선지락사고 (사고각 90°)

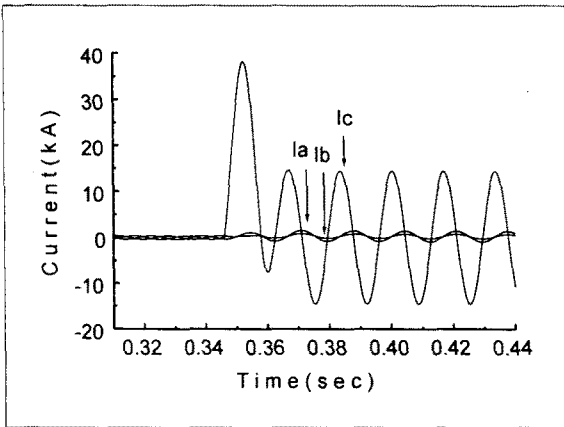


그림 8. 초전도 한류기를 적용한 1선지락사고 (사고각 0°)

4. 결론

154 kV급 송전계통에서 가장 빈번하게 발생하는 사고 유형인 1선 지락사고에 대하여 개포 변전소와 성남 변전소간의 실계통값을 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 변전소로부터 성남 변전소까지 거리의 약 60%지점에서 사고가 발생하였을 때 고장전류는 사고각 0°의 경우 최고 약 39 kA이었으며, 이는 정상전류의 약 87배 이었고, 5주기 이후의 전류값도 약 23 kA값을 보여주어 정상전류의 약 53배에 달하였다.

차단기 전단에 초전도 한류기를 적용하였을 때 사고각별 전류제한 효과를 살펴보았다. 사고각 0°인 경우 사고발생 직후 최고 39 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 27 kA와 11.5 kA까지 상승하였다가 반주기 이내에 약 15 kA까지 각각 감소하여 안정된 상태를 유지하였다. 다시 말해 154 kV

급 송전선로에서 차단기의 안정적인 운용을 고려하더라도 quench 저항이 100 Ω정도 되는 초전도 한류기를 설치하면 차단기의 차단내력을 초과하는 고장전류에 대해 효과적으로 대처할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 1선 지락사고와 같은 계통고장이 발생하면 전원측 발전기의 power angle에 영향을 미치기 때문에, 초전도 한류기를 계통에 설치함으로써 전원측의 안정도에 미치는 효과에 대한 연구가 앞으로 수행되어야 할 것으로 여겨진다.

참고 문헌

- [1] "장기 송·변전 설비설계 검토서," 한국전력공사 전원계획처, pp. 218-235, 1995.
- [2] "전력계통 고장전류 증대와 대응방안," 전기저널, Vol. 5, pp. 24-31, 1998.
- [3] L. S. Fleischman, Yu. A. Bashkurov, "Design Considerations for An Inductive High Tc Superconducting Fault Current Limiter," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 3, pp. 570-573, 1993.
- [4] W. Paul, et al., "Fault Current Limiters Based on High Temperature Superconductors," Inst. Phys. Conf. Ser. No. 148, pp. 73-78, July 1995.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] C.A. Falcone et al., "Current Limiting Device - A Utility's Need," IEEE Trans. PAS-93, November/December, pp. 1768-1775, 1974.
- [8] "계간 기술개발," 한국전력공사 기술기획처, '97 봄호 (제 31집) pp. 95-111, 1997.