

초전도 한류기 동작 특성에 따른 계통 영향 분석

이상봉*, 김철환*, 김규호** 현옥배***
 성균관대학교*, 안산공과대학** 한국전력연구원***

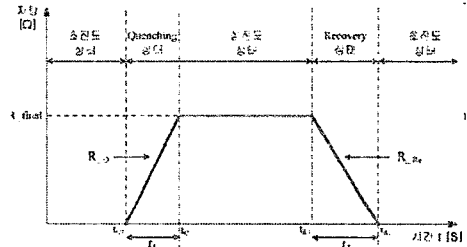
A Characteristic Analysis of Superconducting Fault Current Limiter in Power Systems

Sang-Bong Rhee*, Chul-Hwan Kim*, Kyu-Ho Kim**, Ok-Bae Hyun***
 Sungkyunkwan University*, Ansan College of Technology** KEPRI***

Abstract - For proper application of the superconducting fault current limiter(SFCL), the prior investigation of fundamental characteristics and its effects to the distribution systems are needed. The current limiting behavior of SFCL is dominated by quenching and recovery characteristics. So, we have developed an EMTP/ATPDraw model of resistive type SCFL using MODELS language. The operating characteristics and current limiting behaviors of SFCL in distribution systems have been simulated and investigated.

2. 초전도 한류기

초전도 한류기는 상전도체로의 전이 시 발생하는 임피던스의 종류에 의해 저항형과 유도형으로 구분할 수 있다[3]. 본 논문에서는 사고 시 발생하는 임피던스가 저항값만을 갖는 저항형 초전도 한류기의 특성을 분석하였으며 중요한 특성은 퀸칭 및 회복특성이다. 그림 1은 저항형 한류기의 동작특성을 나타낸다[8].



<그림 1> 저항형 초전도 한류기 동작 특성

1. 서 론

전력에너지의 사용 증가로 인해 전력계통은 더욱 대용량화 되고 있으며 특히, 배전계통의 경우에는 부하의 지속적 증가와 분산전원을 비롯한 전원의 다원화로 인해 규모의 증대와 더불어 계통 구성의 복잡성을 더해가고 있는 실정이다. 이러한 변화는 계통 사고 시 고장전류의 크기를 증가시키는 원인이 되어 기존 보호기기의 차단용량을 초과하므로 더 높은 차단 능력을 갖는 새로운 차단기로의 교체뿐만 아니라 전체 계통 설비의 개선이 필요한 실정이다[1-3].

전력계통의 고장 시 고장전류의 크기를 제한하는 한류기는 고용량의 계통에서 우선적으로 선택되는 보호기기이며 특히, 최근에 활발히 연구되고 있는 초전도 한류기의 경우에는 정상상태에서의 무저항을 갖는 장점으로 계통적용에 대한 관심이 높아지고 있으며 새로운 보호설비 대안으로 인식되고 있다[5-7].

초전도 한류기는 무저항으로 인해 정상운전 시 계통에 영향을 주지 않으나 사고와 같은 계통 외란 시에는 초전도 상태 이탈로 임피던스를 발생시켜 사고전류를 제한하게 된다. 따라서 기존 상전도 한류기의 장점 외에 평소 무손실로 계통 운용이 가능한 장점을 갖고 있다.

초전도 한류기의 고장전류 제한 동작은 한류기에 사용된 초전도체의 초전도 상태에서 상전도체 전이 시 퀸칭(quenching) 특성, 상전도 상태에서 초전도 상태로의 복귀 시 회복(recovery) 특성에 의해 결정된다. 이러한 특성의 변화에 따라 고장 시 제한전류의 특성 또한 변하며 초전도 한류기가 적용된 계통에서의 영향도 다르게 나타나게 된다.

본 논문에서는 향후 배전계통에서의 초전도 한류기 적용 시 발생할 수 있는 문제점을 확인하고자 초전도 한류기 동작특성에 따른 계통 영향을 분석하였다. 신뢰성 있는 정확한 계통 영향 분석을 위해 과도해석 프로그램인 Electro-Magnetic Transient Program(EMTP)을 사용하였으며 초전도 한류기의 퀸칭 및 회복에 관한 동작특성을 구현하기 위하여 EMTP내의 프로그래밍 언어인 MODELS를 이용 하였다.

2.1 퀸칭특성

초전도 한류기는 계통의 사고 발생 시 사고전류의 증가로 인한 초전도체의 온도 상승으로 저항값을 갖게 되어 상전도체로의 전이를 시작한다. 초전도체가 상전도체화 되는 특성을 퀸칭이라 하고 이때의 초전도체 저항값 변이는 지수함수를 이용하여 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$R(t) = \begin{cases} 0 & : t < t_{Q1} \\ R_{-Q} = R_{final}(1 - e^{-At}) & : t_{Q1} \leq t \leq t_{Q2} \end{cases} \quad (1)$$

여기서, A는 초전도체의 퀸칭시간을 결정하는 기울기 계수, R_{final} 은 상전도체 시의 저항[9]이다. 퀸칭시작 부터 완료 시 까지의 시간 $t_1(t_{Q2} - t_{Q1})$ 은 퀸칭저항의 기울기 A에 의해 결정 되는데 이는 초전도체의 재료, 냉각 방식, 사이즈, 용량 등에 의해 결정된다[9].

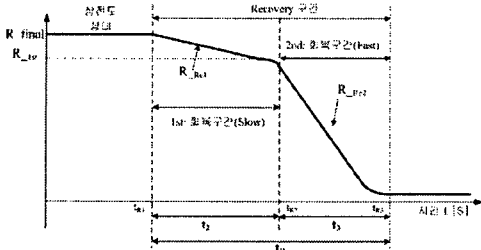
2.2 회복특성

계통 고장 시 상전도체가 되어 고장 전류를 제한하고 있던 초전도 한류기는 사고가 제거 된 후 선로에 흐르는 전류 감소를 검출하여 자동적으로 다시 초전도체로 특성이 복귀해야 하는데 이 상태를 회복특성이라고 한다. 회복특성을 결정하는 중요 요소는 상도체화 되어 있는 도체를 다시 초전도체로 변화시키기 위한 냉각 특성이며 일반적으로 퀸칭시간 보다 상당히 길다고 알려져 있다.

초전도 한류기의 배전 계통 적용에 있어서 회복특성의 영향 분석이 중요하며 이는 기존 보호기기인 제제로 차단기 등의 동작특성까지 고려해야 하기 때문이다. 즉, 회

복시간이 재폐로 시간보다 늦어질 경우 초전도체로 완전히 전이하지 못해 초전도 한류기가 임퍼던스를 갖고 있는 경우 정상 전류까지 제한하게 된다.

본 논문에서의 초전도 한류기 회복특성은 그림 1에서의 회복구간을 2단계로 나누어 그림 2와 같이 회복특성을 갖도록 모델링 하였다.



<그림 2> 초전도 한류기 회복특성(2단계)

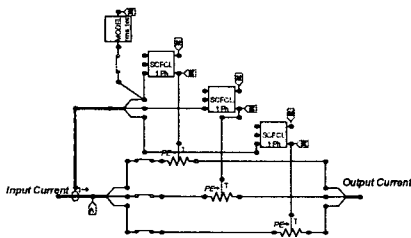
따라서, 초전도 한류기의 회복특성 저항 $R(t)$ 는 켄칭 특성에서의 수식화 와 같이 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$R(t); \begin{cases} R_{final} & : t < t_{R1} \\ R_{Re1} = R_{final} e^{-Bt} & : t_{R1} \leq t \leq t_{R2} \\ R_{Re2} = R_{1st} e^{-Ct} & : t_{R2} \leq t \leq t_{R3} \end{cases} \quad (2)$$

여기서, B, C, R_{Re1} , 그리고 R_{Re2} 는 회복구간 중 각각 1st, 2nd 구간의 시간을 결정하는 상수, 그리고 초전도체의 저항이다. 초전도체의 전체 회복시간은 $t_R(t_2 + t_3)$ 이다.

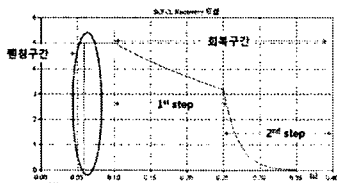
3. 초전도 한류기 모델링

초전도 한류기 모델링을 위하여 식 (1), (2)를 이용하였고 EMTP/ATPDraw로 모델링 하였다. 초전도 저항에 관한 수식 구현을 위하여 EMTP내의 프로그래밍 언어인 MODELS를 사용하였다. 그림 3은 모델링된 초전도 한류기를 나타내며 TACS 저항을 이용하여 초전도 저항을 구현하였다.



<그림 3> 초전도 한류기 EMTP 모델링

그림 4는 임의의 사고에 대한 초전도 한류기 동작 시 EMTP로 모델링 된 초전도체의 저항 출력 결과이다. 2 단계 회복특성의 각 회복단계 시간은 전체 회복시간을 동일하게 분배해 설정하였다.

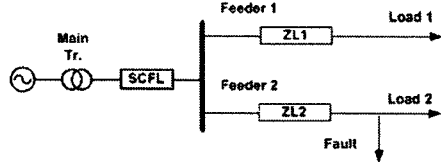


<그림 4> 초전도 한류기 저항 특성

4. 초전도 한류기 동작특성에 따른 계통 영향

구현된 초전도 한류기를 이용하여 켄칭, 회복특성 변화에 따른 배전 계통의 영향을 분석하였다. 분석 계통은 그림 4와 같고 주요 데이터는 다음과 같다. 사고는 feeder 2 부하 측에서 A상 지락 사고이며 고장저항은 0 [Ω]으로 가정하였다.

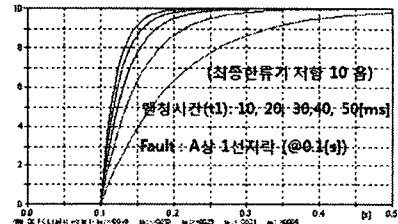
- 주변압기 : 154/22.9[kV], Delta-Wye
- 선로(Z_{L1}) : 4[km], $Z_{L1} = 0.869 + j1.788[\Omega]$
- 선로(Z_{L2}) : 4[km], $Z_{L2} = 1.176 + j2.052[\Omega]$
- 부하 : L1(18 + j8.9[MVA]), L2(9 + j4.7[MVA])



<그림 4> 시험 배전 계통

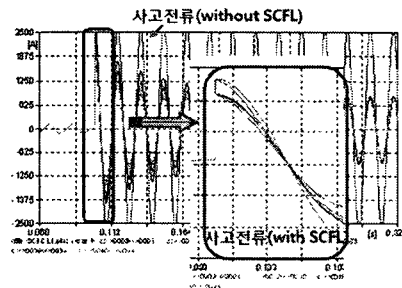
4.1 켄칭특성에 따른 계통 영향

켄칭특성 변화에 따른 영향 분석을 위해 켄칭시간은 10-50[ms], 최종 한류기 저항은 10[Ω]으로 설정하고 모의 시험 하였다. 그림 5는 켄칭시간에 따른 초전도 한류기 저항변화를 나타내며 그림 6은 켄칭시간에 따른 한류전류의 파형을 나타낸다. 한류전류는 변압기 2차측에서 측정한 값이다.



<그림 5> 켄칭시간에 따른 초전도 저항 변화

그림 6에서, 켄칭시간 변화에 따른 고장전류는 켄칭시간이 증가 할수록 한류전류로의 과도시간 역시 비례하여 증가함을 확인하였다.



<그림 6> 켄칭시간에 따른 고장전류 변화

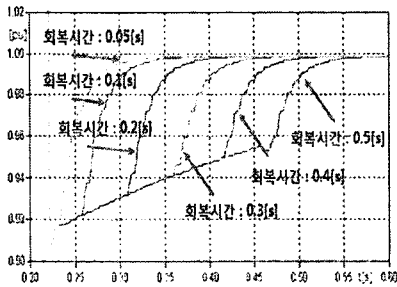
따라서, 켄칭시간이 짧을수록 최종 한류전류에 빠르게 수렴하므로 다른 보호 설비인 재폐로 차단기의 투입 시간을 고려하여 최대한 짧은 켄칭특성을 갖도록 하는 초전도체의 적용이 필요함을 확인할 수 있었다.

4.2 회복특성에 따른 계통 영향

초전도체의 소재 특성으로 초전도 한류기의 회복시간

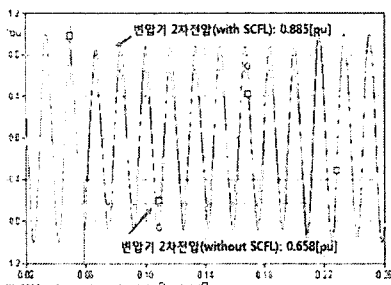
은 켄칭시간 보다는 긴 특성을 갖고 있으나 계통의 재페로 동작을 고려할 때 1차 재페로 시간인 0.5[s]를 초과하지 말아야 한다. 따라서 초전도 한류기의 회복시간은 0.05[s], 0.1-0.5[s]로 한정하고 0.1[s] 단위로 증가시켜 모의시험 하였다.

초전도 한류기의 회복시간이 짧수록 계통의 영향이 미비함을 예상할 수 있으며 모의시험 결과, 그림 7에서의 결과와 같이 한류기에 의한 제한 전류가 고장 제거 후 정상 전류(1.0[pu])까지의 안정화 시간이 초전도 한류기의 회복시간에 의해 결정됨을 확인할 수 있었다. 즉, 빠른 회복시간 특성을 갖는 한류기가 사고제거 후 과도 시간을 최소화 하는 것으로 확인 하였다.



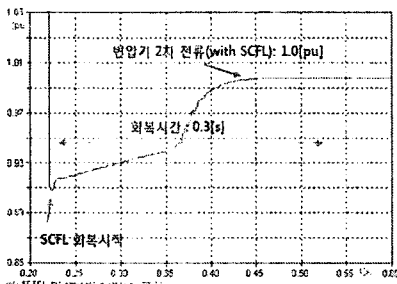
<그림 7> 고장전류 회복특성

그림 8은 초전도 한류기 투입에 따른 변압기 2차측 A상 전압 파형이며 초전도 한류기 투입 전과 비교하여 전압 강하를 비교하였다. 초전도 한류기의 회복시간은 0.3[s]이다. 초전도 한류기의 투입 전에는 0.658[pu], 투입 후에는 0.885[pu]로 한류기를 계통에 적용함으로써 전압 강하 개선 효과가 있음을 확인할 수 있었다.



<그림 8> 전압 강하 (회복시간:0.3[s])

그림 9는 회복시간 0.3[s]를 갖는 초전도 한류기의 고장전류 변화를 나타낸 것이며 초전도 한류기의 회복시간에 따라 정상전류로의 복귀시간이 결정됨을 확인할 수 있다.



<그림 9> 고장전류(RMS) 변화 (회복시간:0.3[s])

회복특성 시간은 초전도 한류기 냉각 설비의 비용적인 문제를 고려할 때 회복시간이 길어질수록 저비용이 소요되며 재페로 동작이나 계통의 영향 측면에서는 짧은 시간이 우선 시 되는 pay-off 특성을 갖는다. 따라서 초전도 한류기 설계에 있어서 재페로 동작이나 기타 보호기기의 한시특성에 영향을 주지 않는 범위 내에서 최대의 회복특성 시간을 갖도록 구성되어도 무방함을 모의시험을 통해 알 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 초전도 한류기의 재페 투입 시 한류 특성을 결정하는 켄칭, 회복특성에 따른 계통 영향을 분석하였다. 켄칭, 회복시간에 따라 초전도 한류기의 제한전류, 사고 제거 후 정상전류까지의 안정화 시간이 서로 비례함을 확인 함으로써 초전도 한류기 설계에 있어서 빠른 켄칭 및 회복시간을 갖는 한류기가 한류기 동작에 따른 계통의 영향을 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 이러한 연구 결과는 계통 안정도를 고려하지 않은 결과이며 향후, 계통 안정도 및 최적 한류 저항 결정과 같은 병행 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Vladimir Sokolovsky, Victor Meerovich, Shaul Goren, Istvan Vajda, "Study of the Quench Conditions in Superconducting Current Limiters", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, Mar. 2001.
- [2] Lj. Kojovic, S. Hassler, "Application of Current Limiting Fuses in Distribution Systems for Improved Power Quality and Protection", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, April 1997.
- [3] Alex Y. Wh, Yucxin Yin, "Fault-Current Limiter Applications in Medium- and High-Voltage Power Distribution Systems", IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 34, No. 1, Jan./Feb.,1998.
- [4] Juan A. Martinez, Jacinto Martin-Armedo, "Voltage Sag Studies in Distribution Networks-Part I: System Modeling", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No.3, July, 2006.
- [5] Anders Wikstrom, Peter Bennich, Ake Ekstrom, Pasi Hyvonen, "Power Quality Improvement by Use of a solid State Current Limiting Device", Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Vol. 3, 1-4 Oct., 2000.
- [6] J. R. S. S. Kumara, A. Atputharajah, J. B. Ekanayake, F. J. Mumford, "Over Current Protection Coordination of Distribution Networks with Fault Current Limiters", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.
- [7] John Cerulli, "Requirements for a Superconducting Fault Current Limiter in the Utility Bus-Tie Location", IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, Volume 2, 1999.
- [8] 한국전기연구원, "초전도 기기 모델링 및 초전도 기기 보호 기술 개발보고서", 한국전기연구원, 2004.
- [9] Lin Ye, Klaus-Peter Juengst, "Modeling and Simulation of High Temperature Resistive Superconducting Fault Current Limiters", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, June, 2004.