

전력계통 적용 초전도한류기 개발

■ 안민철 / MIT Post-Doc. Fellow

■ 박정욱, 고태국 / 연세대 교수

1. 서론

전력수요의 증가에 따른 설비 증설로 인해, 전력계통에서의 고장전류(fault current)가 꾸준히 증가하고 있다. 전력계통 사고 발생 시, 차단기가 고장전류를 차단하기까지의 시간동안 계통에는 정상전류의 수십 배에 달하는 전류가 흐르기 때문에 계통의 안정성이 떨어지고 전력기기의 수명이 단축되는 문제가 발생하고 심지어는 2003년 미국, 유럽에서와 같은 대규모 정전사태와 같은 심각한 상황도 초래되기도 한다. 전력계통에서의 고장(사고)에 대한 가장 근본적인 해결책으로 최근 제시되고 있는 것이 초전도한류기(초전도 사고 전류 제한기, SFCL: Superconducting Fault Current Limiter)이다. 초전도한류기는 전기저항 영(零)의 초전도 현상을 이용하여 정상 운전 시 발생저항이 전혀 없다가, 계통의 고장 발생 시 별도의 감지 장치 없이 스스로 임피던스가 발생하는 신개념의 차세대 전력기기이다. 본고에서는 전력계통에서 초전도한류기의 필요성을 살펴보고 초전도한류기의 특성 및 개발현황을 소개하고자 한다.

2. 초전도한류기의 필요성

우리나라 전력계통은 송전선이 짧으며 서로 네트워크 되어 있는 특징을 지니고 있다. 또한 꾸준한 전력사용의 증가로 갈수록 단락용량은 증가하고 있으며, 기존의 차단기들의 용량이 한계에 다다르고 있어 차단기의 교체가 상당부분 요구되고 있다. 따라서 현재 154 kV 송전선의 31.5 kA 급 가스절연개폐장치(GIS)를 50 kA급 용량의 장비로 교체하고 있으며, 345 kV 송전선에서도 40 kA급 GIS를 63 kA급 GIS로 교체하는 작업이 진행 중이다. 또한 154 kV급 송전선로 들은 서로 연계되어 고장 발생에 대한 유연성을 높이는 것이 전력계통의 운용에 보다 효율적임에도 불구하고, 높은 고장전류 때문에 모선을 분리하여 방사형으로 운전하고 있는 실정이다[1]. 이러한 기존의 대책들만으로는 전력계통의 안정화를 기대하기 어려우며 특히 대용량 개폐기나 차단기의 비싼 가격을 고려한다면, 고장 전류에 대한 근본적인 새로운 대안이 강력하게 요구되고 있다. 현재 계통에 설치되어 있는 차단기들은 용량에 따른 약간의 차이는 있지만 대개 사고발생 후 3-5 주기가 지난 후

에야 완전한 절환이 이루어진다. 이 3-5 주기 동안에는 정상전류의 약 20배 이상의 전류가 전력기에 인가되게 된다. 이러한 고장전류는 전력기기의 피로도 증가나 열화 현상을 일으키는 직접적인 원인이 되고 있으며 때에 따라서는 전력기기의 파손이나 폭발들을 유발한다. 초전도한류기는 고장발생 1/4주기 이내에 스스로 동작이 시작되는데다, 고장전류를 차단하는 시간을 단축시키는 것이 아니라 고장전류의 크기를 감소시키는 것이기 때문에 전력계통의 안정화에 매우 중요한 역할을 수행할 수 있다.

3. 초전도한류기의 특징 및 종류

초전도 전력케이블, 초전도 변압기, 초전도 모터 등의 대부분의 초전도 응용 전력기기들은 기존의 상전도 기기들의 효율을 높이면서 부피나 무게를 줄일 수 있는 대안으로 개발되고 있다. 반면에 초전도한류기의 경우 구리와 같은 기존의 상전도 도체로는 제작할 수 없었던 신개념의 장치이다. 기존의 전력계통에서의 고장전류를 제한할 목적으로 설치되어 있는 장치로 직렬리액터가 있다. 그러나 계통의 정상 운전 시에도 항상 직렬리액터에서 전압강하가 존재하기 때문에 상시 운전 동안 일정한 손실을 감수하면서 사용되고 있다. 초전도한류기는 이러한 직렬리액터와는 달리 정상상태에서는 임피던스의 발생이 전혀 없다가 계통의 고장발생 시에만 큰 임피던스가 발생되도록 되어 있다. 실제 전력계통에서의 운전은 대부분의 시간을 정상 운전으로 쓰이기 때문에 정상상태에서의 무 손실 특징은 매우 중요한 초전도한류기만의 장점이 된다.

초전도한류기는 고장전류의 제한 수단에 따라 크게 저항형과 유도형으로 나뉘며 두 개의 형태를 조합한 혼합형의 형태도 존재한다. 형태를 불문하고 정상상태에서는 임피던스가 없다가, 고장 발생 시 높은 임피던스가 발생한다는 특징이 있다. 또한 고장의 발생을 감지하는 별도의 감지장치가 전혀 필요하지 않으며 초전도 사고전류제한기의 구조와 특성상 스스로 임피던스가 발생하게 된다. 고장 전류가

초전도체를 통과하게 되면 이에 의하여 초전도체는 임피던스를 발생하는데 이 반응시간이 수십 마이크로초 정도의 극히 짧은 시간이기 때문에 고장전류는 첫 번째 피크에서부터 이미 제한이 되기 시작한다.

또한 초전도한류기는 기존의 차단기나 개폐기를 대체하는 것이 아니기 때문에 기존의 계통에 큰 무리 없이 투입이 가능하다는 부가적인 장점이 있다.

4. 초전도한류기의 개발 현황

초전도한류기의 개발은 1960년대부터 시작되었지만, 냉각 등의 효율성이 극대화되는 고온초전도체를 이용한 한류기의 본격적인 개발은 1990년대 초반부터 가속화되었다. 새로운 초전도체가 계속 발견되고 그 성능 또한 향상되면서 여러 가지 초전도체를 이용한 다양한 초전도한류기에 대한 연구가 진행되어 오고 있다.

해외에서는 주로 독일을 중심으로 한 유럽, 미국, 일본에서 개발에 몰두하고 있다. SIEMENS의 경우 YBCO 박막형 한류기로 이미 2002년에 0.9 MVA-0.9 kV급 한류기의 개발을 완료하였고, 2007년 1월에는 2세대 고온초전도선재인 Coated Conductor(CC)를 이용한 2 MVA-7.5 kV급 한류기의 개발에 성공하였다. NEXANS의 경우 Bi-2212 벌크를 이용한 무유도 모듈을 개발하여 판매하고 있으며 ACCEL등과의 공동연구로 10 MVA-10 kV급 초전도한류기 개발에 성공하였다. CURL10이라 불리는 이 프로젝트는 FZK를 비롯한 독일 회사들이 참여하여 2004년 개발을 마치고 field test까지 성공한 상황이다[2]. 현재는 110kV급 송전급 초전도한류기의 개발하는 프로젝트가 진행 중이다. 일본은 Toshiba에서 송전급인 66 kV/ 750 A급 한류기를 개발 중에 있으며 현재 주요 핵심 부품인 직렬리액터형 초전도마그네트의 개발이 성공적으로 완료된 상태이다[3]. 현재는 2세대 고온초전도선재를 이용한 한류기의 개발에 착수하였다. 미국은 IGC-SuperPower가 참여하여 138kV급을 목표로 Matrix FCL 이라는 새로운 제안의 초전도한류기를 개발하고 있고, 역시 2세대 초전도선재를 이용하여 개발 중이다.

국내에서는 1991년부터 연세대학교 전기전자공학과에서 연구가 시작된 이래로 실험실 수준의 다양한 한류기 모델들에 대한 연구가 진행되어 왔으며 2000년 1kV급 초전도한류기 개발에 성공하였다. 그 이후 과학기술부 21세기 프론티어사업 중 차세대초전도 응용기술개발사업단의 DAPAS (Development of Advanced Power System by Applied Superconductivity Technologies)사업의 일환으로 2001년부터 2011년까지 10년 동안 송전급인 154 kV/ 2 kA급 초전도한류기의 상용화를 목표로 연구가 시작되면서 국내에서의 초전도한류기의 실용화급 개발이 본격화 되었다. 2001년부터 2004년까지 1단계 연구기간 동안 연세대학교에서 유도형한류기를, 한전 전력연구원과 LS산전에서 저항형한류기를 개발하여 각각 삼상 6.6 kV/200 A급 초전도한류기의 개발에 성공하여 단락시험 등의 특성시험을 완료하였다[4]. 그리고 2007년까지의 2단계 연구에는 현대중공업이 참여하여 현대중공업과 연세대학교가 공동으로 2세대 초전도선재를 이용한 무유도권선형 초전도한류기를, 전력연구원과 LS산전이 공동으로 저항형 초전도한류기를 개발하여 두 연구팀 모두 2006년 12월에 22.9 kV/ 630 A 용량의 배전급 한류기의 개발에 성공하였다. 현재 2011년까지의 최종 3단계 연구기간을 통하여 154 kV/4 kA 송전급 모델 및 22.9 kV/3 kA 대용량 배전급 모델의 한류기를 각각 개발할 계획이다. 2004년 개발한 6.6 kV급 한류기는 당시 세계에서 두 번째 용량이었으며 2006년 개발한 22.9 kV급 한류기는 세계 최고 용량이다. 용량뿐 아니라 현대중공업과 연세대학교가 개발한 모델은 2세대 선재를 이용한 세계최초의 실용화급 한류기 모델로서 고전압에 매우 유리한 구조로 내전압 시험에서 세계 최고의 성능을 입증하였으며, 전력연구원과 LS산전 모델은 독자적인 하이브리

드형태를 이용하여 초전도체의 사용을 획기적으로 감소시켜 한류기의 부피를 줄이는 등의 우수한 성능을 보유하고 있다. 기존의 많은 전력기기들에 관한 기술이 독일, 일본, 미국 등에서 많은 부분을 선점한 현실을 감안한다면, 새로운 개념의 초전도한류기에 관한 핵심기술의 국내에서 독자적으로 선점하여 많은 특허를 보유하게 된 결과는 매우 고무적인 일이라 할 수 있다.

5. 초전도한류기의 단락 특성

본 절에서는 국내에서 개발된 초전도한류기들의 단락특성을 소개한다. 특히 직류리액터를 이용한 6.6kV/200A급 유도형 초전도한류기와 22.9kV/630A급 무유도권선형 초전도한류기의 단락시험 결과를 살펴본다.

먼저 직류리액터를 이용한 유도형 초전도한류기는 교류/직류 전력변환기를 이용하여 계통의 교류를 직류로 변환한 후 초전도 마그넷을 직류리액터로 사용하여, 정상 시 임피던스는 없다가 사고 시에는 초전도 직류리액터의 인덕턴스에 의해 전류가 급격히 증가하는 것을 제한하는 개념이다. 개발된 삼상 6.6kV/200A급 한류기의 사진을 그림 1에서 보여 주었다.

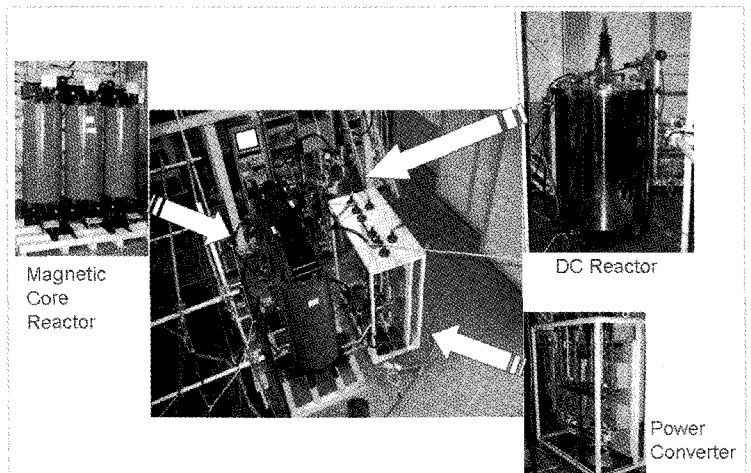


그림 1 유도형 초전도한류기

그림 2는 유도형 초전도한류기의 단락시험 결과이다. 단락시험은 한국전기연구원에서 수행되었으며 한류기가 없을 경우의 고장전류는 5.6 kApeak이다. 0.1초간의 고장을 발생시켜 고장 발생 후 6주기 동안의 한류기 동작을 확인하였다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 1.885초에서 고장이 발생하였는데 고장전류는 급격하게 증가하지 못하고 점차적으로 증가하였다. 따라서 첫 피크에서의 서지(surge)부터 완벽하게 제한하는 것을 확인하였다. 본 한류기는 전력변환기를 동반하고 있기 때문에 고장이 발생한 것을 판단

한 후에 전력변환소자로 사용된 SCR의 트리거신호를 제거하도록 하였다. 그 결과 그래프에서 볼 수 있듯이 약 2주기 이후에는 SCR이 턴오프되어 차단기의 역할까지 동시에 수행하는 것을 알 수 있다.

다음으로 최근에 개발된 배전급 한류기의 단락시험 특성을 살펴본다. 개발된 초전도한류기의 사진은 그림 3과 같다. 본고에서는 특히 차세대 무유도 권선형 초전도한류기(그림 좌)의 시험 결과를 살펴본다. 무유도 권선형 초전도한류기는 초전도선재를 유도(inductive)성분이 없도록 권선하여 계통에 직렬로

연결한 형태이다. 초전도체는 무저항으로 흘릴 수 있는 전류가 제한되어 있고 이를 임계전류라 부르는데 임계전류 이상의 전류에서는 초전도현상이 사라지면서 큰 저항이 발생하는 성질이 있으며 한류기는 그 성질을 활용한 기기이다. 즉 계통의 상시운전전류가 임계전류 이하가 되도록 설계하면 정상 운전 시에는 저항이 발생하지 않다가 고장이 발생하면 임계전류 이상의 전류가 통전하게 되어 스스로 저항이 발생하는 것이다.

개발된 22.9 kV/630 A급 한류기의 단상모델 시험 결과를 그림 4에서 보여주고 있다. 단락시험은 역시 한국전기연구원에서 수행되었으며 무유도 권선형 초전도 코일과 2 Ω의 구리저항을 병렬로 연결하여 시험하였다. 정상 운전에서는 초전도의 무저항 특성에 의하여 전체 선전류가 초전도코일로 흐르고, 고장 발생 시에는 초전도코일에서 최대 10 Ω의 저항이 발생하여 많은 전류가 구리저항으로 바이패스 된다. 그림 4의 그래프에서 한류기가 없을 경우

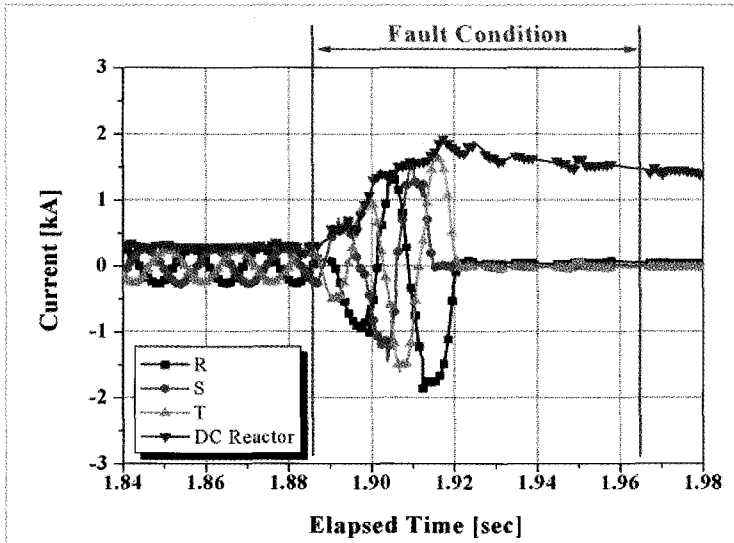


그림 2 유도형 초전도한류기의 단락시험 결과

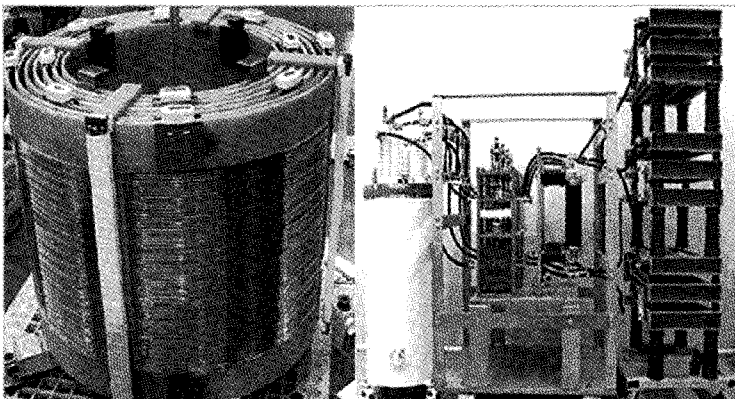


그림 3 22.9kV/630A급 초전도한류기: (좌) 차세대 무유도 권선형(현대중공업, 연세대학교 개발), (우) 선로변경식 하이브리드형(한전 전력연구원, LS산전 개발)

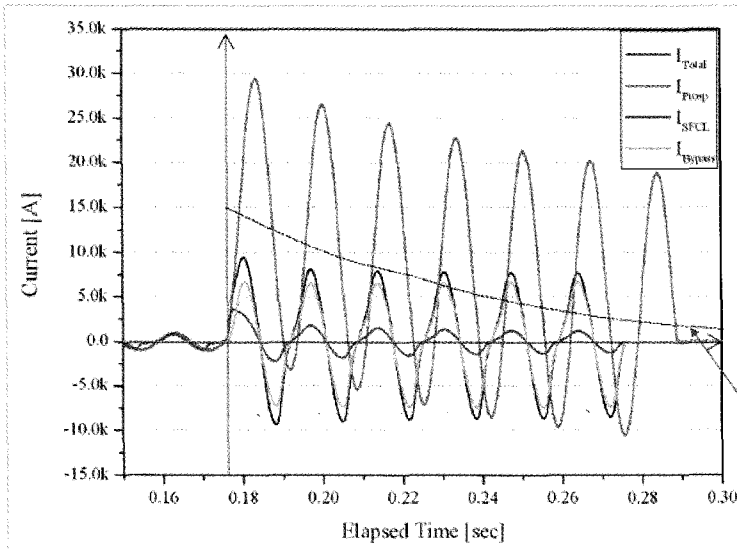


그림 4 무유도권선형 초전도한류기의 단락시험 결과

의 고장전류는 첫 피크에서 30 kA_{peak}이며 한류기의 투입으로 인하여 9.45 kA_{peak}로 제한 된 것을 볼 수 있다.

6. 결론

전력수요의 증가에 따른 단락용량의 증가는 피할 수 없는 현실이고, 이로 인한 고장전류의 효과적인 제한은 전력계통의 안정화에 크게 기여할 수 있는 기술이다. 이러한 고장전류 제한에 있어 가장 이상적이라 일컬어지는 초전도한류기의 특징 및 국내의 개발현황을 개괄적으로 살펴보았다.

초전도재료의 본격적인 상용화에 따른 안정적인 공급이 확보되고 가격이 급격히 하락할 것으로 예상되는 향후 3-4년 이내에 초전도한류기의 상용화가 가능할 것으로 예상된다. 현재 초전도한류기 분야에서는 국내의 대기업과 학교 그리고 연구소가 보유한 핵심기술이 세계최고 수준이기 때문에 국내기술에 의한 상용화급 초전도한류기의 성공적인 개발을 기대해 본다.

참고문헌

1. 윤용범, 현옥배, 황시돌, 김혜림. 154kV 초전도 한류기 모션연계적용 연구. 2003년 한국초전도저온공학회 추계학술대회 논문집: 291-293.
2. J. Bock, F. Breuer, H. Walter, S. Elschner, M. Kleimaier, R. Kreutz, M. Noe. CURL 10: development and field-test of a 10 kV/10 MVA resistive current limiter based on bulk MCP-BSCCO 2212. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2005; 15(2):1955-1960.
3. K. Yasuda, A. Ichinose, A. Kimura, K. Inoue, H. Morii, Y. Tokunaga, S. Torii, T. Yazawa, S. Hahakura, K. Shimohata, H. Kubota, Research & development of superconducting fault current limiter in Japan. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2005; 15(2): 1978-1981.
4. M. C. Ahn, S. Lee, H. Kang, D. K. Bae, M. Joo, H. S. Kim, T. K. Ko. Design, Fabrication, and Test of High-Tc Superconducting DC Reactor for Inductive Superconducting Fault Current Limiter. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2004; 14(2): 827-830.
5. M. C. Ahn, H. Kang, D. K. Bae, D. K. Park, Y. S. Yoon, S. J. Lee, T. K. Ko. The short-circuit characteristics of a DC reactor type superconducting fault current limiter with fault detection and signal control of the power converter. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2005; 15(2): 2102-2105.