

초전도 한류기 개발

현 옥 배
한전 전력연구원

1. 서 론

송전선로 혹은 배전선로 등 전력선에는 선로, 변압기, 부하 등에 각각의 임피던스가 있어 전류는 일정 수준으로만 흐른다. 그러나 전력선에는 합선, 사고, 락뇌 등 다양한 이유로 고장이 있다. 이러한 고장 발생시 위에서 언급한 임피던스 상당 부분, 혹은 극심할 경우 임피던스가 거의 전부 없어져 전력선에는 대단히 큰 전류가 흐르게 된다. 이 값은 국내 배전선로의 경우 수 kA, 혹은 10 kA를 초과하기도 하고, 송전선로의 경우는 극단적일 경우 100 kA에 육박하기도 한다. 이런 전류가 흐르면, 한편으로는 열적 및 기계적 이유로 전력선로 및 기기를 파괴하고, 다른 한편으로는 전력 흐름의 균형을 무너뜨려 광역정전을 만들기도 한다.

이런 고장전류를 차단하기 위해 차단기를 설치하고, 또 리액터를 설치해서 고장 크기를 줄이고 있다. 현실을 보면, 경제 발전 등으로 수요 증대에 따라 설비가 증대되고, 더하여 공급 신뢰도를 높이기 위해 network화 운전함에 따라 유효 임피던스는 낮아지고, 고장전류는 더욱 커지는 추세에 있다. 이를 차단기 용량증대, 리액터 설치만으로 제어하는 데는 기술적 장애, 경제성 난제 등이 있다. 그러므로 추가로 모선 및 선로 분리가 시행되고 있는 바, 공급신뢰도 저하 등 문제를 감수하고 있다.

여기에 새로운 고장전류에 대한 대책으로 초전도 한류기가 제안되었고, DAPAS 사업은 1단계부터 초전도 한류기 개발을 진행해 왔다. 초기는 6.6 kV급 개발에 이어, 2단계에서 하이브리드 초전도 한류기 개발을 성공적으로 마무리한 바 있다.

이 글에서는 한국전력공사, (주)LS산전, 그리고 연세대학교가 참여한 DAPAS 3단계 사업에서 초전도 한류기의 실증시험, 3 kA급 개발을 위시한 기술 진보에 관해 기술한다.

2. 초전도 한류기 실증시험

초전도 한류기가 현장에서 활용되기 이전에 그 한류기의 신뢰성을 평가할 필요가 있다. 이 과정으로 시험선로에서 우선 장기운전 및 인공고장시험을 수행하였다. 한국전력에는 전북 고창에 KEPCO PT Center가 있으며, 자체 변전시설 및 배전시험선로를 갖고 있다. 더하여, 인공고장시험을 위해 고장발생장치 (Automatic Fault Generator, AFG)를 보유하고 있다. 여기에 개발된 초전도 한류기를 설치하여 장기운전하면서, 리클로저 혹은 기타 보호기기와의 협조 관계를 연구하였다.

DAPAS 2단계에서 개발된 하이브리드 초전도 한류기는 원리검증 단계였으며, 실제 설치하기까지 많은 개선이 이루어져야 했다. 우선, 가장 중요한 것으로, 고속스위치의 개선이다. PMA 기술을 접목시켜 자동 회복 기능을 추가함으로써, 재폐로 동작을 가능케 하였다. 더하여 CT 및 OCR 신호를 바탕으로 전단계 동작이 미비할 경우 후속동작이 가능하게 하여 선로변경에 대한 fail safe 성능을 지향하였다. 둘째, 저온장치에 제어 시스템을 개발하고, 적용하여 자동 운전되면서, 데이터를 저장하도록 하였다.

이 한류기를 KEPCO PT Center에 설치하고 약 6개월간 안정화 운전을 하였다. 그리고 이후 18개월 이상 무인 운전을 수행하였다. 그동안 4회의 정전, 1회의 초전도 소자 교체, 3회의 false alarm, 1회의 신호선 접속 불량 등을 경험하면서, 이 과정에서 많은 경험, 노하우를 축적하였다. 그리고 정전시 온도유지 기술 등 운전 기술을 향상시켜 현장 적용에 대한 자신감을 갖게 하였다. 또 하나의 성과는 초전도 한류기의 운전경비 산출이다. 실제로는 연간 약 700만원이 소요됨을 보였는데, 이는 현장에서 수용할 수 있는 범위이며, 향후 현장의 거부감을 줄여주는 중요한 수확이라 하겠다.

실증시험의 다른 한 단계는 인공고장 시험이다. AFG를 이용하여 고장을 발생시키고, 한류기 - 리클로저 (혹은 차단기) 조합에서 협조 관계를 연구하였다. 이 시험에서 중요한 결과는 해당 초전도 한류기의 재폐로 성능을 확인한 것이고, 리클로저의 정정치에 대한 재정정 실험을 한 것이다. 이러한 초전도 한류기 포함 보호협조 시험은 선례가 없는 분야로서, 향후 많은 연구가 이루어져야 할 연구분야이다.

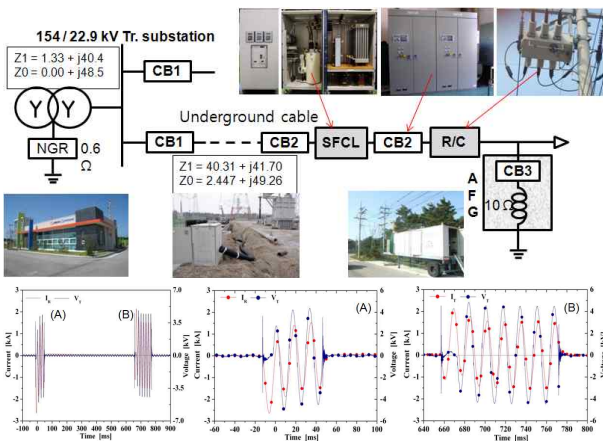


그림 1. 인공고장시험선로 및 재폐로 시험 결과.

3. 22.9 kV, 3,000 A 최대용량기 개발

본 과제에 다른 하나의 연구결과로서 22.9 kV, 3,000 A 3상 (125 MVA) 하이브리드 초전도 한류기 개발이 있다. 기존 하이브리드 초전도 한류기에서, 우선 고속스위치의 용량을 3,150 A급으로 증대시키고, 따라서 초전도 한류소자도 임계전류 4,000 A 이상으로 올려주어야 한다. 이를 위해 폭 12 mm의 SF 선재 (SuperPower사 생산)을 bi-spiral 형태로 감은 disk를 적층하여 구성하였다. 그러면서도 주어진 크기의 box에 수납되어야 했다. 아래 사진은 해당 초전도 한류기의 사진과 단락시험 결과이다.

주목할 것은, 제작된 하이브리드 초전도 한류기는, 상기 3 kA급 포함하여, 국내 옥내변전소의 협소한 공간에 설치될 수 있도록 (GIS의 2배 크기인) 폭 1.2 m × 길이 2.4 m × 높이 2.5 m의 공간에 수납되었다. 이는 현존하는 배전급 초전도 한류기 중 가장 작은 크기이다.

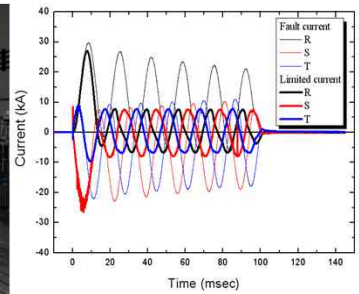


그림 2. 22.9 kV, 3,150 A 3상 하이브리드 초전도 한류기 단락시험 모습과 결과.

이 한류기는 당초 국내 전력계통의 전력 수요 증대에 대비하여 준비된 100 MVA 변압기의 2차측 모선보호용으로 제안된 것이다. 상기 변압기 도입이 기존 60 MVA 변압기 2대를 병렬운전하는 것에 유사하므로 고장전류가 증대하는 바, 이를 제한하는 기기가 필요하여 제시된 것이다. 그러나 세계 금융위기를 거치면서 수요의 변화에 따라 상기 계획이 수정되었고, 따라서 3,000 A급 초전도 한류기의 활용이 지연되었음은 아쉬운 점이다.

4. 차기 한류기 개발을 위한 준비

상기 연구개발 이외에도 많은 기술 진보가 본 과제를 통해 이루어졌다. 이들 중 중요한 기술진보 몇 가지를 보면 다음과 같다.

(1) 송전급 초전도 한류기 개발을 위한 준비로서, 2가지가 시도되었고, 여기서 뚜렷한 진보가 이루어졌다. 그 하나는 전력전자 스위칭 기술이다. 기존 전력전자 소자로는 대용량 교류전류를 임의의 각도에서 OFF 동작을 수행하지 못하였고, 그것은 지금도 같다. 그러나 본 과제에서 이를 상당한 수준으로 해소하고, 한류기 제작에 응용했다는 점이 주목된다. 이 방식을 사용하면, 전력전자 스위치를 사용하면서, 작고도 반주기내한류형(half-cycle limiting type) 한류기가 성립된다. 이는 선진국에서도 이루지 못한 매우 중요한 기술적 진보로 인식될 것이다. 더불어 송전급 개발을 위해 다절점 차단 스위치 연구를 진행하여 진보된 결과를 얻을 수 있었다. 차기 송전급 초전도 한류기 개발을 수행할 때 큰 도

움이 될 것이다.

(2) 초전도 한류기를 비롯하여 초전도 전력기기가 대용량화되면 대전류 사용이 불가피하고, 대형 전류인입선을 채용하게 된다. 이 대 전류인입선을 통한 열침입과 전류인입선 자체의 발열량이 냉각경비를 증가시키는 아주 큰 요인이 된다. 그러나 현재의 방법은 적절한 용량의 냉동기를 사용하는 것인데, 그 경비 부담이 대단히 크다. 이를 타개하기 위한 기술로 2단 냉각을 제시하였다. 값이 싸고 전력소모가 작은 Joule-Thompson 냉동기를 전류인입선 상부에 설치하여 1차 냉각하고, 기존 극저온용 냉동기를 하단에 설치하여 2단 냉각하는 것이 골자이다. 이를 사용하면, 냉동기 가격을 60%, 소비전력을 20% 정도 절감 가능하다. 기술의 핵심은 내부 초전도 소자가 분리될 수 있도록 착탈식으로 하면서 열접촉을 유지하는 것이다. 본 과제에서는 폴리머 재료를 나선형으로 제작하여 그 가능성을 입증하였다.

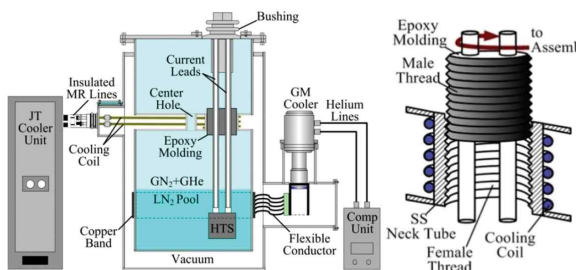


그림 3. 2단 냉각 개념도(좌) 및 1차 냉각부(우).

이와 더불어 또 하나의 성과는, 정전시에도 초전도 한류기는 계속 standby 상태에 있으면서 전력복구시 즉시 대응해야 하는 바, 이에 대한 대안을 제시했다는 것이다. 극저온 장치는 He 가스 3기압으로 유지되고 있는데, 이 가스 압력을 서서히 낮추어 온도를 유지시키는 것이다. 이를 통해 정전 후 최대 4시간까지 운전 온도를 유지시킬 수 있음을 증명하였다.

(3) 이 외에도, 2단 한류방식에 대한 연구로 반주기내 한류형에 대한 이해를 깊게 하였으며, FRP + PPLP composite에 의한 극저온 절연물은 차기 고전압용 대영 극저온 구조물 제작시 경비절감 방안을 제시한다. 또한, (고체 아르곤 + 과냉각 액체질

소)를 만들어 열전도와 높은 열용량을 동시에 추구하는 혼합고화냉매 특성 연구, CI - diac 방식 한류기 연구 등이 수행되어 차후 연구개발의 기반을 구축하였다. 고속스위치 개선의 한 방안으로, 이중 초전도체를 이용한 quench 방식의 스위칭 기술이 제안된 것도 결실이다. 특히 앞서 언급한 전력전자 스위치를 이용한 Peak Current Resistor 방식 한류기 연구는 차기 배전급 한류기 활용으로서 크게 기대된다.

5. 한류기 개발 및 활용 전망

이상과 같이 초전도 한류기의 실증을 통한 운전 경험은 바로 현장 설치 및 운용 사업으로 진행되었는데, 현재 경기도 이천 변전소에 설치되어 자체 안정화 운전 중이다. 안정화 단계를 거치면, 부하운전을 시작하여, 실제 시범적이지만 상업운전을 하게 된다.

이를 발판으로 본 과제의 참여자인 LS산전은 우선 배전급 한류기의 상업화를 추구하고 있는 바, 하나는 대용량 전력 수용가에 대한 고장전류 대책을, 다른 하나는 지중선 배전선로의 보호협조 대책으로 제시하는 것 등이 있다. 이어서, 에너지기술평가원의 지원으로 송전급 초전도 한류기 개발 사업이 추진되고 있는 등이 모두 DAPAS 초전도 한류기 과제의 결과물 혹은 활용 결과이다.

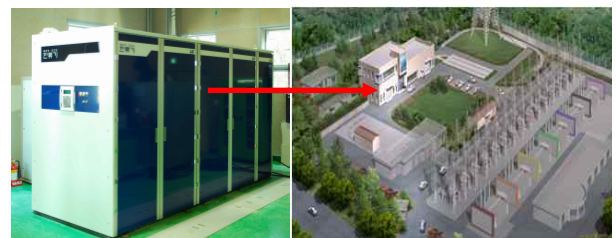


그림 4. 초전도 한류기 실계통 시범 적용 조감도(이천 변전소).

이상과 같이 DAPAS 3단계 초전도 한류기 과제의 결과를 요약하였거니와, 그 결과가 일부 현장설치, 일부 상업 발주 추진 등으로 진보하였다. 초전도 한류기는 고장전류에 대한 신개념의 대책으로, 송전선로의 network화를 지원하는 것뿐만 아니라,

특히 분산전원 보호를 비롯한 Smart Grid 등에서도 필요한 기기이다. 또한, 전력조류의 등분배 및 안정화는 각 선로의 전류 크기를 최소화하므로 저항손실을 그만큼 줄여준다. 이는 초전도 한류기도 녹색기술이 하나임을 인식시켜준다.

국내 전력계통은 최근 많은 변화를 주고 있는 바, 예로서 154 kV 송전선로는 345 kV 변전소를 중심으로 한 자체 loop을 유지하는 local network 개념을 지향하고 있다. 무릇 모든 기기가 그렇듯, 왕왕 시의적절한 시장 진입은 해당 기기의 성패를 가르기도 한다. 초전도 한류기는 앞으로도 필요한 기술이기는 하지만, 상기한 변화 이전에 개발이 완료되어 그 가치가 현장에서 증명되어야 할 것이다. 다만, 범용적 활용을 위해서는 초전도 한류기의 설치경비 절감, 소형화, 송전급 조기 개발에 이어 여타 보호기기와의 협조에 대한 연구 등 많은 기술 진보가 선행되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] 현옥배, “초전도 한류기 개발과 활용 전망”, 전기의 세계, (2010. 10월), pp. 26.
 [2] “직렬리액터 설치 타당성 검토 보고서”, 한국전력공사 전원계획처 (1999. 12).
 [3] G.-Ho. Lee, *et al.*, “Hybrid Superconducting Fault Current Limiter of the First Half Cycle Non-Limiting Type,” IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3, pp. 1888 - 1891 (June 2009).
 [4] 현옥배, “초전도 한류기용 실용화급 고속 스위치 개발”, ESE-14 (2009. 5) pp. 14.
 [5] S.-W. Yim, *et al.*, “Construction of testing facilities and verifying tests of a 22.9 kV/630 A class superconducting fault current limiter,” Physica C 470(20) (2010) 1611-1614.
 [6] Ok-Bae Hyun, *et al.*, “Introduction of a Hybrid SFCL in KEPCO Grid and Local Points at Issue”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., VOL. 19, NO. 3 (JUNE 2009) pp. 1946-1949.
 [7] Ok-Bae Hyun, *et al.*, “Long-Term Operation and Fault Tests of a 22.9

kV Hybrid SFCL in the KEPCO Test Grid”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., VOL. 21, NO. 3 (June 2011) pp. 2131-2134.

[8] “22.9 kV, 3,000 A 초전도 한류기 개발”, 교육과학기술부 보도자료 (2010. 3. 24).
 [9] Min Jee Kim, *et al.*, “Emergency Blackout Operation of Cryogenic System for Hybrid SFCL”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., VOL. 21, NO. 3 (June 2011) pp. 1284-1287.
 [10] 장호명, “초전도 한류기를 위한 2단 냉각”, ESE-16호 (2010. 5), pp. 34.

저자이력

현옥배(玄鉦培)



1976년 연세대학교 물리학과 졸업(이학사), 1981년 동 대학원 졸업(이학석사), 1987년 미국 Iowa 주립대 졸업 (Ph, D) Post doctoral Fellow(Ames Lab.), Guest Researcher (NIST), ISTEK Fellow (ISTEK, 일본) 를 거쳐 현재 한전 전력연구원 수석 연구원으로 재직 중.