

송전급 대용량 초전도 변압기 핵심부품 설계기술 개발

최 경 달

한국산업기술대학교 에너지대학원

1. 들어가는 말

대부분의 연구자들에게도 같은 경험이겠지만, 한 연구 주제로 10 년동안 연구를 진행해 본 건 내겐 처음이었다. 돌이켜 보면 10 년 전 그때는 아무 것도 모른 채, 하면 다 될 것 같은 치기만 갖고 덤벼들었던 것 같다. 함께 고생해 온 다른 세부과제와 달리 상용화 모델을 개발하지 못한 변압기 세부과제 책임자로서 다른 과제책임자와 참여연구원들에겐 미안한 마음뿐이지만, 3단계 연구의 가장 큰 성과로는 무엇이 먼저 해결되어야 초전도 변압기가 상용화 될 수 있는지 알아냈다는 것을 꼽을 수 있다.

1 단계에 참여했다가 2 단계부터 참여하지 않은 효성중공업의 존재감이 크게 느껴진 것은 3 단계에 들어서면서부터이다. 154 kV 이상의 초고압 변압기를 생산할 수 있는 기업이 국내에 단 세 군데밖에 없는 것은 단지 비용 문제만이 아니었다. 절연유가 사용된 지 130 여년이 지났지만, 초고압 절연기술은 여전히 첨단기술로 남아 있다. 초전도 변압기는 이에 더해 극저온 절연기술을 담보하여야 한다.

고온초전도 전력기기에 주력으로 쓰일 2세대 초전도선인 CC (Coated Conductor)는, 처음 등장할 때 1 세대 초전도선인 BSCCO의 교류손실 문제를 상당부분 해소해 줄 것으로 기대를 모았다. 사용해야 하는 초전도체의 양은 크게 감소하여 손실을 획기적으로 줄일 수 있는 여지를 주었으나, 코팅된 초전도체의 치수는 극단적으로 너비와 두께의 차이가 커, 이 형상으로 인해 생기는 교류손실을 줄이지 못하면 초전도변압기의 상용화는 난망이라고 할 수 있다.

본고에서는 21C 프론티어 사업 1단계와 2 단계 성과를 다시 조명하고, 고온초전도 변압기 상용화의 가장 핵심기술이라고 할 수 있는 대전류 저손실 기술과 극저온절연기술의 성과에 대해 설명하고자 한다. 이 핵심기술들은

대학이나 연구소만으로 해결할 수 없는 기술이며, 궁극적으로 기업의 참여를 통해 완성되어야 한다.

2. 22.9 kV/1 MVA 초전도변압기(1단계)

1 단계에서는 한국산업기술대학교, 효성중공업, 경상대학교, 순천향대학교 연구팀이 참여하였고, 2004년 1 MVA 초전도변압기를 완성하였다. 당시로서는 세계적인 흐름과 달리, 초전도권선을 고압, 저압 모두 팬케이크 형으로 제작하였다. 테이프형태인 고온 초전도선에서 발생하는 손실은 선재에 수직방향으로 가해지는 자장의 크기에 크게 좌우된다. 따라서 일반 변압기와 달리, 이 수직자장을 가능한 최소화하는 설계가 필요한데, 팬케이크 형은 레이어 권선(Layer Winding)과 비교했을 때 수직자장이 더 크게 나오기 쉬운 구조이다.

프론티어 사업에서는 최종적으로 154 kV 급 초전도변압기 개발이 목표였기 때문에, 일반 변압기에서와 마찬가지로 팬케이크 권선으로 제작하였다. 현재 다시 재개되고 있는 외국의 초전도변압기 연구에서는 모두 고압측을 팬케이크 권선으로 설계하고 있다. 그림 1은 국내에서 개발한 1 MVA 급 BSCCO 고온초전도권선과 완성된 변압기를 나타내고 있다[1].



그림 1. 고온초전도 팬케이크 권선(좌) 및 1 MVA 초전도변압기(우).

3. 154 kV 고온초전도 변압기 핵심기술 개발(2단계)

2003,4년 경을 기점으로 외국의 고온 초전도 변압기 개발이 대부분 유보되었다. 이는 기본적으로 1세대 고온초전도선재인 BSCCO PIT(Power in Tube) 선재의 한계 때문이었다. BSCCO 분말을 은통에 넣어 인발하는 형태인 1세대 선재는 대량 생산에 들어간다 하더라도 가격에 한계가 있었고, 무엇보다도 교류손실을 감소시키기가 어려웠다. 변압기용 초전도선은 가격도 가격이거니와, 저손실 특성과 한류 특성을 갖추어야만 했는데, 이런 특성을 갖춘 2세대 선재인 YBCO CC는 막 개발이 시작되는 시점이었다.

프론티어 사업에서도 이런 환경이 고려되어 2단계 목표의 전면적인 수정이 이루어졌다. 변압기 권선에 필요한 2세대 초전도선재의 개발은 시일이 소요되기 때문에, 기업 참여가 유보되고 대학 중심의 요소기술 개발로 목표가 변경되었다. 초전도 변압기의 핵심 기술을 대전류 저손실기술, 극저온 절연기술, 고효율 극저온 냉각기술로 나누어 세 개의 핵심과제를 구성하였다. 각 요소기술은 주관기관인 한국산업기술대, 경상대, CVE가 담당하였다.

대전류 저손실 기술에서는 지멘스에서 개발한 BSCCO 퇴벨도체 기술을 한 단계 발전시켜 CC에 적용할 수 있도록 하였다. 아울러 팬케이크 형태로만 적용되던 초전도 테이프를 이용하여 연속권선이 가능한 기술을 개발하였다. 그림 2는 BSCCO 병렬선재로 감은 초전도 코일이다.



그림 2. 21가닥 선재로 전위된 병렬선재로 제작한 CDW.

경상대학교는 세계에서 최초로 154 kV급의 극저온절연 기초특성연구를 시작하였다. 초전도

도 전력기기의 최적 절연설계를 위해서는 기초특성연구가 반드시 필요하며, 2단계 연구성과로서 그림 3의 극저온 전기절연 데이터북을 발간하였다.

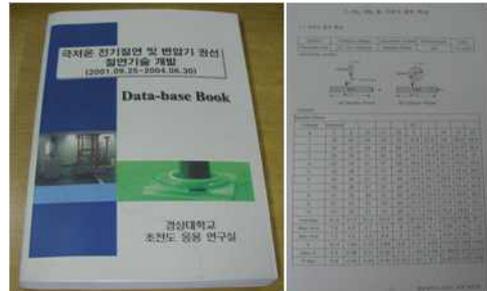


그림 3. 극저온 전기절연 데이터북.

극저온 냉각기술을 담당한 CVE에서는 변압기 GFRP 저온용기 및 액체질소 과냉 냉각시스템을 개발하였다. 국내에는 고품질의 대구경 GFRP 파이프가 없었기 때문에, 자체적으로 에폭시 수지 경화과정을 진공 및 가압, 고온 조건에서 경화시키는 기술을 개발함으로써 기포가 적은 파이프를 제작할 수 있었다. 그림 4는 이때 개발한 GFRP 파이프이다.



그림 4. CVE에서 개발한 GFRP 파이프.

4. 송전급 초전도 변압기 핵심부품 설계기술 개발(3단계)

2단계가 종료되는 시점까지도 3단계 사업에 참여할 기업을 확보하지 못 하였다. 이에 따라 3단계 1차년도는 154 kV/100 MVA 초전도 변압기의 상세설계를 진행하면서, 2차년도부터 제작에 참여할 기업을 계속 모색하였다. 결국 참여기업을 확보하지 못 하여, 그 대안으로 실물 크기의 극저온 실험을 수행할 수 있는 대학연구기관으로 한양대학교 퓨전전기

기술응용연구센터가 참여하였다.

100 kV급 이상의 극저온 절연 연구를 위해, 국내 대학뿐만 아니라 아시아권에서 가장 큰 규모의 고압시험설비를 갖춘 한양대학교 퓨전 연구센터에 극저온 절연연구 설비를 동시에 갖추어, 1단계부터 극저온 절연설계를 담당할 경상대학교와 함께 초전도변압기 외에도 케이블, 한류기 등에 필요한 극저온 연구를 수행하였다. 3단계를 통해 그림 5의 기존 한양대학교의 고압시험설비에 더해 세계 최대 수준의 극저온 절연시험설비를 그림 6과 같이 구축하였다.



그림 5. 한양대학교 초고압 시험설비.



그림 6. 극저온 절연시험 설비.

100 MVA급 변압기의 저압권선에는 2,500 A이상의 전류가 흐르게 된다. 일반변압기의 구리권선과 마찬가지로, 초전도 도체 역시 대전류 통전을 위해서는 병렬 도체를 사용하여야 하고, 이 도체는 일정한 간격으로 전위를 해 주어야 한다. 한국산업기술대학교에서는

대전류 저손실 병렬도체를 제작 방법을 고안하여, 세계에서 처음으로 특허를 출원하였고, 이에 대한 실증시험을 위해 2세대 초전도선재를 사용한 대전류용 초전도변압기를 제작하였다. 그림 7과 8에는 초전도변압기용 도체인 CTCC(Continuous Transposed Coated Conductor)와 대전류시험용 변압기의 개념도를 각각 나타내었다.

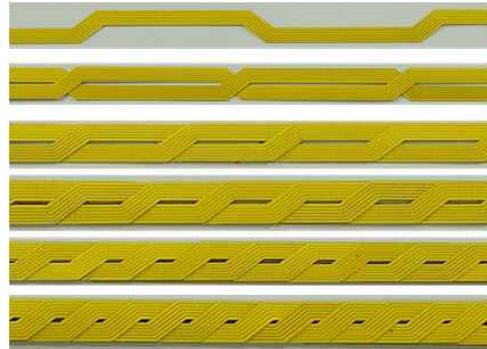


그림 7. 초전도변압기권선용 연속전위도체.

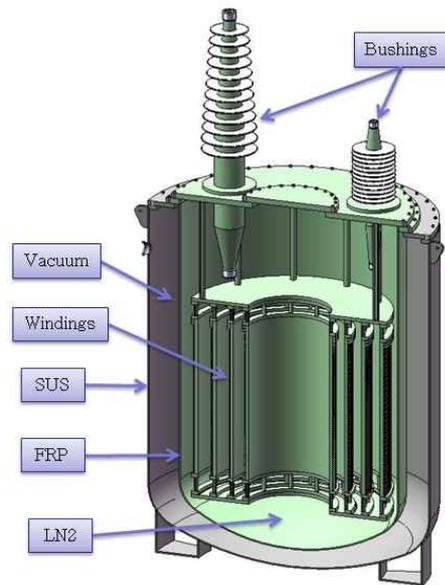


그림 8. 변압기 성능평가용 대전류 초전도 변압기.

4. 맺음말

전 세계적으로 아직 초고압 변압기에 적용할 수 있는 저손실 선재와 극저온 절연기술이 개발되지 않은 상태이다. 선재의 개발이 재료 분야에서 추진되고 있다면, 전

기분야에서는 극저온 절연을 담당하여야 한다. 일반변압기에서도 알 수 있듯이 초고압 절연기술은 단순한 이론만으로 단기간에 획득될 수 있는 것이 아니며, 이 절연기술이야말로 미래의 전력기기 핵심기술이 될 것이다.

고온 초전도선재 분야에서, 1세대 선재 개발 시에는 우리나라가 외국에 비해 늦게 시작하였지만, 2세대 선재의 경우 비슷한 시기에 같이 출발하여 어느덧 외국 기업과 견줄 수 있는 위치에 왔다. 이제 극저온 절연분야도 더 이상 늦추지 말고, 기초연구를 통해 설계기술을 자력으로 확보해야 할 시점이며, 기업의 관심과 참여가 절실한 상황이다.

참고문헌

- [1] 최경달, “고온초전도 변압기 기술 동향 및 전망,” 대한전기학회 전기의 세계, Vol. 59, No. 10, pp 34-38 (2010).

저자이력



최경달(崔景達)

1984년 서울대학교 전기공학과 졸업 (공학사), 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 1993년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사), 1995년 일본 사가대학교 객원연구원, 1998년 한국산업기술대학교 교수.