

초전도 변압기 개발

*최경달, **김우석, &김성훈, #권오범, ##송희석, &한송엽
*한국산업기술대학교, **기초전력공학연구원,
&서울대학교, #(주)CVE, ##효성중공업

1. 서론

고온초전도 전력기기 중에서 가장 먼저 상용화 될 것으로 예상되었던 초전도 변압기는 아직 상용화가 될 것이란 소식을 들려주지 못하고 있다. 지난 3년 동안 프론티어 사업을 통해 고온초전도 변압기를 개발하였던 본 연구진의 생각이나, 다른 전문가들의 의견을 들어 봐도 초전도 변압기가 고온초전도 전력기기 시장의 선두주자가 되기는 쉽지 않을 전망이다. 현재의 연구동향을 보면, 고온초전도 전력케이블이 상용화면에 있어서는 다른 기기에 비해 앞서 있는 상황이고, 초전도 한류기 역시 파란 불이 들어와 있다고 볼 수 있다.

상용화란 측면에서 상당히 진척이 이루어진 케이블과 한류기는 현재 사용되고 있는 전력기기의 입장에서는 대안이 없는 유일한 선택이라는 공통점을 갖고 있다. 이와는 달리, 초전도 변압기가 상용화되기까지는 몇 가지 벽을 넘어야 하며, 다소 시간이 걸릴 전망이다. 초전도 변압기의 상용화를 가로 막는 가장 큰 어려움은 역설적으로, 현재 사용되고 있는 일반변압기의 성능이 너무 우수하다는 점일 것이다. 99.5%를 넘는 효율, 수명이 다할 때까지 특별히 고장 날 염려 없는 간단한 구조 등 수요자의 입장에서 별 불만이 없는데, 굳이 새로운 기기로 대체할 이유가 없다는 점이 가장 어려운 걸림돌이다.

다소 역설적인 이유이지만, 다시 역으로 이러한 특징이 일반 변압기의 가장 큰 문제점이 될 수도 있다. 즉, 일반 변압기는 이제 더 기술적으로 발전할 여지가 없고, 기술 개발의 한계에 다다랐다고 볼 수 있다. 더 이상 효율의 증가를 기대하기도 어려우며, 부피나 중량을 감소시킬 수 있는 신소재의 등장도 쉽지 않을 전망이다. 현재도 난연성 변압기를 설치해야 하는 경우에는 절연유를 사용한 오일변압기 가격의 3~4 배가 넘는 가격인 SF6 가스 변압기를 설치하고 있다.

얼마전 뉴스에 나와 관심을 끌었던, 분당 지역의 변전소 추가 설립 반대 시위를 보더라도 향후 인구밀집지역의 변전소 설립여건은 더욱 악화될 것이며 결국은 새로운 대안을 찾을 수밖에 없는 상황이 도래할 것이다. 초전도 변압기를 상용화하기까지는 우리가 기대했던 것보다 더 시간이 걸릴지는 모르나 그 흐름 자체가 멈추지는 않을 것으로 예상된다.

본고에서는 현재까지 외국에서 진행된 고온초전도 변압기 개발 현황과 함께 지난 3년간 국내에서 프론티어 사업으로 진행된 변압기 개발 결과에 대해 소개하였다.

2. 초전도 변압기 연구동향

초전도 관련 산업은 여러 분야의 기술이 고도의 기술력을 바탕으로 효율적으로 집적되어야 성공을 거둘 수 있는 산업이기 때문에, 초전도 기술의 선두에 있는 일본과 미국 그리고 현재 우리나라가 정부 주도하에 초전도 관련 전력기기(변압기, 한류기, 케이블, 모터등)들의 대부분을 포함하는 종합적인 거대 프로젝트를 진행하고 있다.

일본의 Super-ACE (R&D on base technology for AC superconducting power Equipment) 프로젝트와 미국의 SPI (Superconductivity Partnerships Initiative) 프로젝트 그리고 우리나라의 DAPAS (Dream of Advanced Power system by Applied Superconductivity technologies) 프로젝트가 그 일례들이다.

이 프로젝트들은 지금의 고온초전도체를 사용한 고온초전도 응용기기의 에너지 효율 증대를 통한 이윤추구와 더불어 앞으로 계속 확대될 전 세계의 초전도 전력시장을 선점하기 위한 목적으로, 정부와 관련연구소들 그리고 기업체들의 유기적인 참여로 진행되고 있다.

가. 국외의 연구현황

▣ 일본

1996년 Kyushu 대학과 Kyushu 전력 그리고 Fuji 전기 社의 주도하에 단상 6.6 kV / 3.3 kV 500 kVA 고온초전도 변압기를 세계 최초로 개발하였으며, 액체질소를 초전도 권선의 냉매로 사용하여 77 K 와 65 K에서 고온초전도 변압기를 운전함으로써 지금의 고온초전도 선재를 사용하여 경제성이 있는 고온초전도 변압기 제작이 가능함을 보여주었다.

그리고 2000년에는 과냉각 액체질소를 냉매로 사용한 22.9 kV급 단상 1 MVA 고온초전도 변압기를 개발하여 실제 전력계통에서 실부하 시험을 거쳐 과부하 시험, 돌입전류 시험 등을 통해서 고온초전도 변압기의 안정성 및 신뢰성을 확인시켜 주었다. 그림 1과 2는 각각 일본에서 개발되어진 6.6 kV급 500 kVA 고온초전도 변압기와 22 kV급 1 MVA 고온초전도 변압기의 사진을 보여주고 있다.

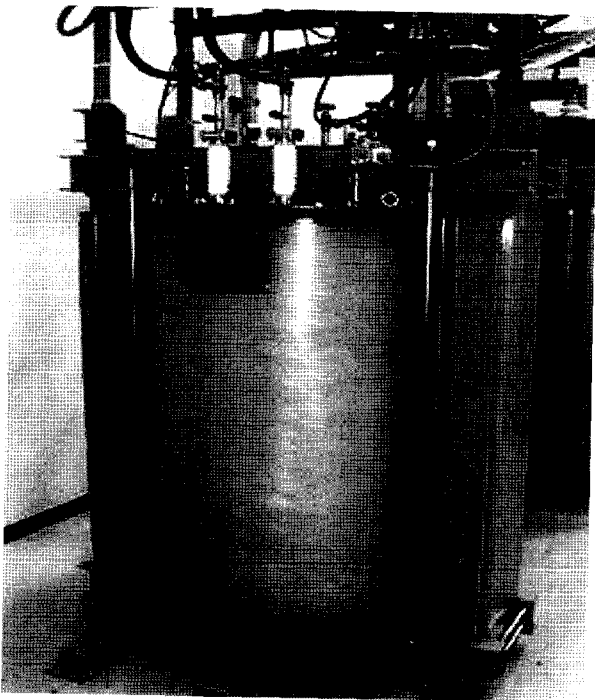


그림 1. 일본에서 개발한 6.6 kV, 500 kVA 고온초전도 변압기

▣ 유럽

유럽의 경우 1997년 다국적 기업인 ABB, AMSC, EDF 社가 중심이 되어 액체질소를 냉매로 사용한 3상 630 kVA, 18.7 kV / 420 V 고온초전도 변압기 개발에 성공하였다. 이

고온초전도 변압기는 1년 동안 실제 전력계통에 연결되어 실부하 시험을 거친 최초의 고온초전도 변압기로서 시험기간 동안 신뢰성 있게 동작하였을 뿐 만 아니라, 이 변압기를 통해서 고온초전도 변압기의 신뢰성과 안정성이 확인 되었다.

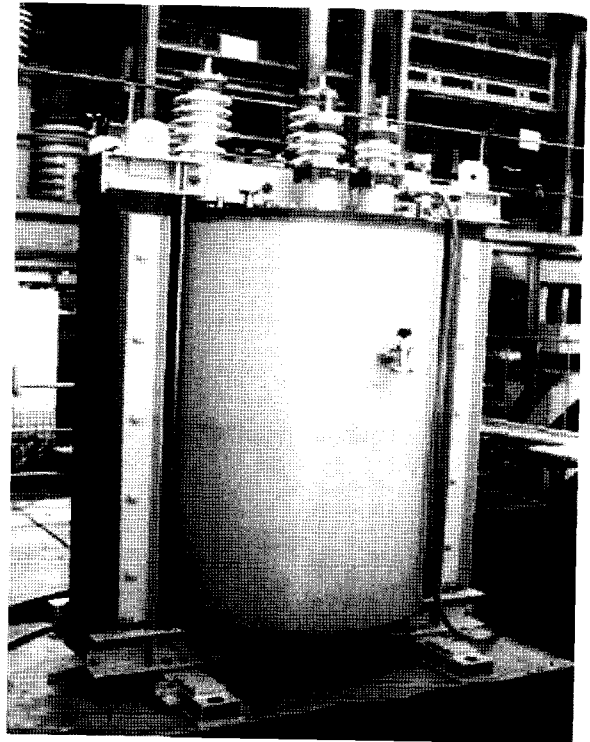


그림 2. 일본에서 개발한 22 kV, 1 MVA 고온초전도 변압기

그림 3은 ABB사에서 개발되어진 3상 630 kVA 고온초전도 변압기의 사진을 보여주고 있다. 그리고 독일의 Siemens사는 1999년부터 액체질소를 냉매로 사용한 25 kV급 단상 1 MVA 고온초전도 변압기를 고속철도에 탑재하는 것을 목표로 개발하였다. 그림 4는 Siemens사에서 개발되고 있는 고속철도용 고온초전도 변압기의 사진을 보여주고 있다.

▣ 미국

SPI 프로젝트의 일환으로 1998년 Waukesha Electric Systems 社 와 Oak Ridge National Laboratory의 주도로 동작온도가 20~30 K에서 운전되는 단상 13.8 kV / 6.9 kV 1 MVA 고온초전도 변압기가 개발되었다. 그리고 현재 단상 26.4 kV / 4.16 kV, 5

/ 10 MVA 고온초전도 변압기를 개발 중이다. 그림 5에 Waukesha에서 개발한 단상 1 MVA 고온초전도 변압기의 사진을 나타내었다.

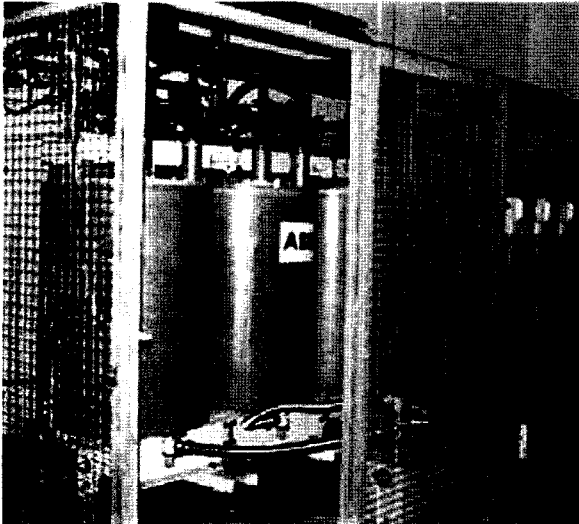


그림 3. ABB에서 개발한 3상, 18.7 kV 630 kVA 고온초전도 변압기

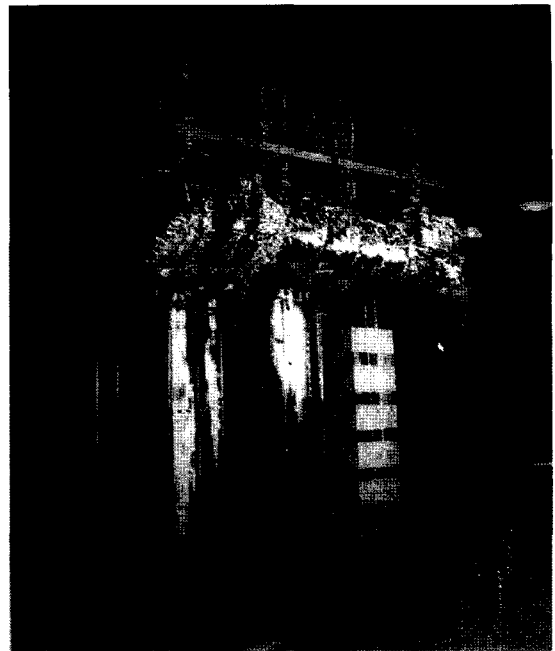


그림 5. Waukesha에서 개발한 단상 13.8 kV, 1 MVA 고온초전도 변압기

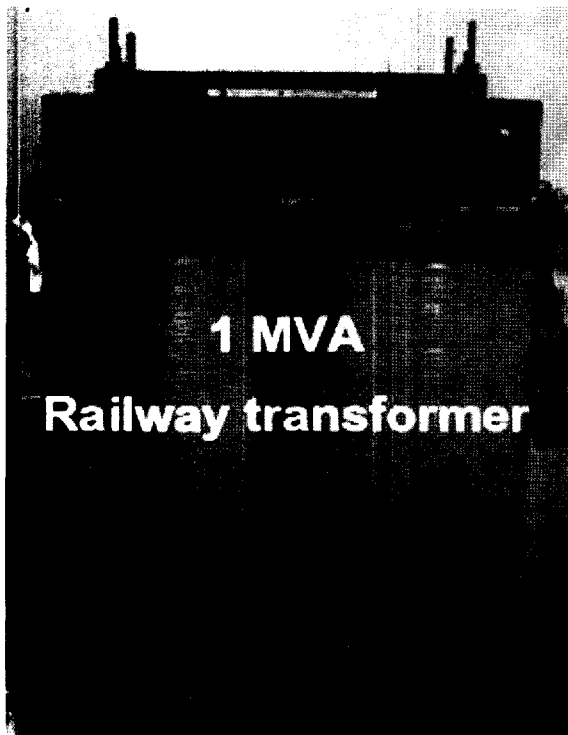


그림 4. Siemens에서 개발한 1 MVA 고속철도용 고온초전도 변압기

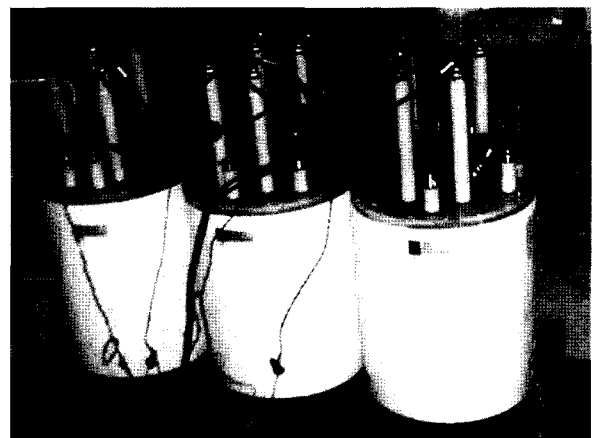


그림 6. 국내에서 개발한 3상 440 V, 10 kVA 고온초전도 변압기

나. 국내의 연구현황

국내에서도 이런 세계적인 고온초전도 변압기의 연구 추세와 더불어 1999년 기초전력공학공동연구소에서 액체질소를 냉매로 사용한 단상 220 V / 110 V 3 kVA 고온초전도 변압기를 개발하였으며, 2001년 3상 440 V / 220 V 10 kVA 고온초전도 변압기가 개발되

어 연속운전을 통해서 고온 초전도변압기의 신뢰성 및 운전특성을 확인하였다. 그리고 현재 과학기술부가 주도하는 21세기 프론티어연구개발사업의 일환으로 차세대 초전도 응용기술개발(DAPAS) 프로젝트 중에서 22.9 kV급 중·소규모 배전용 고온초전도 변압기 개발이 진행 중에 있다. 그림 6에 국내에서 개발되어진 3상 10 kVA 고온초전도 변압기의 사진을 보였다.

3. 22.9 kV, 1 MVA 고온초전도 변압기 개발

‘차세대 초전도 응용기술 개발’ 21세기 프론티어 사업의 세부과제 중 하나인 ‘초전도 변압기 개발’ 과제의 최종 목표는 3상, 154 kV / 22.9 kV, 100 MVA 고온초전도 변압기 개발이다. 이 3 단계 최종 목표의 달성을 위해, 2 단계 및 1 단계에서 목표로 정한 용량은 단상 154 kV / 22.9 kV, 5 MVA 와 단상 22.9 kV / 6.6 kV, 1 MVA 이었다.

1 단계 목표는 국내에서 처음 시도되는 고전압 변압기였다. 이전까지는 수백 V급의 변압기만 개발되었기 때문에 극저온 절연기술이 핵심요소기술로 부각되었다. 아울러 초전도 권선을 냉각시킬 극저온용기 역시 중공형으로서는 국내 최대의 크기였기 때문에 제작에 많은 어려움을 겪었다. 내측과 외측, 양쪽에 진공층을 두어야 하는 구조이어서 기밀을 유지하는 동시에 기계적 강도를 유지하는 것이 쉽지 않았다. 그림 7은 1 단계에서 개발한 극저온용기의 모습이다.

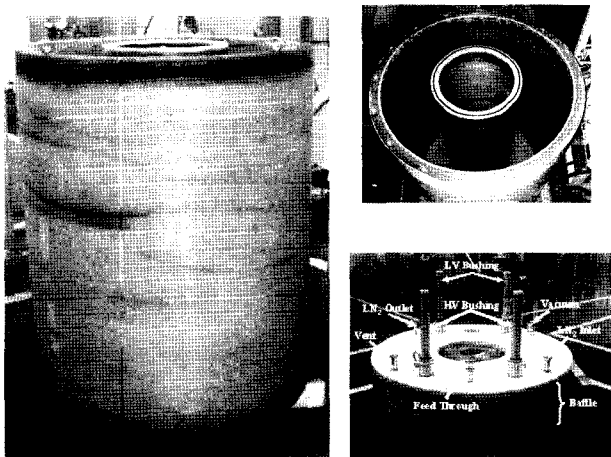


그림 7. 초전도변압기용 GFRP 극저온용기

1 단계 연구진의 구성을 보면, 한국산업기술평화진흥원이 주관기관이었으며 변압기 제작과 극저온시스템 제작기술 개발을 위해 효성중공업과 CVE가 공동연구기관으로 참여하였다. 또한, 전자장 및 교류손실 해석을 위해 서울대와 순천향대가 위탁기관인 기초전력공학연구소에 참여하였고, 미국 국립고자장연구소(NHMFLL)가 냉각시스템의 설계를 맡아 국제공동연구를 수행하였다.

프론티어 사업을 통해 개발한 1 MVA 초전도 변압기와 외국의 초전도 변압기의 가장 큰 차이점은 권선의 형태이다. 고온 초전도 마그네트의 경우, 일반적으로 솔레노이드 권선과 팬케이크 권선으로 그 형태를 구분하며, 변압기 권선에도 이 개념을 적용하여 왔다. 그러나 중전기기 업계에서는 이와 같은 형태를 레이어 권선(layer winding) 및 디스크 권선(disk winding)으로 정의해 왔으며, 레이어 권선이나 디스크 권선 모두 솔레노이드형으로 제작될 수 있다. 즉 변압기 1, 2 차 권선이 동심형으로 배치된 형태를 솔레노이드형이라 한다. 이렇게 분류하였을 때, 외국의 경우에는 모두 레이어 권선을 사용하였다. 레이어 권선은 디스크 권선에 비해 권선에 인가되는 수직자장의 크기를 더 작게 설계할 수 있기 때문에 저압 변압기의 경우 효과적으로 손실을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

그러나, 일반 변압기의 경우, 절연 내력의 한계 때문에 100 kV가 넘는 고압 변압기에서 레이어 권선을 사용하는 예는 극히 드물며, 디스크 권선을 교호배치한 쉘타입이나, 동심형으로 배치한 솔레노이드형을 사용하고 있다. 우리는 1 단계에서부터 최종 목표인 154 kV급 변압기 개발을 염두에 두고 변압기 권선을 디스크 권선으로 설계·제작하였다. 2차년도에는 교호배치형 권선을 제작하여 특성시험을 하였으며, 교류손실을 감소시킬 수 있는 동심형 권선을 3차년도에 제작하였다. 그림 8은 두 형태의 권선 개념을 나타낸 것이며, 그림 9와 10에 제작된 권선을 나타내었다.

초전도 변압기 권선 냉각을 위해서는 65 K의 과냉각질소를 사용하였다. 과냉각질소를 사용함으로써 전류용량을 증대시킬 수 있을 뿐만 아니라, 77 K에 비해 교류손실을 감소시킬 수 있을 것으로 기대한다. NHMFLL과의 국제공동연구를 통해, 2 가지 형태의 초전도 변압기 냉각시스템을 설계하였다. 현재 제작한 순환냉각방식은 일본에서 사용한 방식이며,

NHMFL은 세계 최초로 자연대류를 이용한 전도냉각방식을 설계하였다. 그림 11과 12는 강제순환방식 냉각시스템을, 그림 13은 완성된 초전도 변압기를 보여주고 있다.

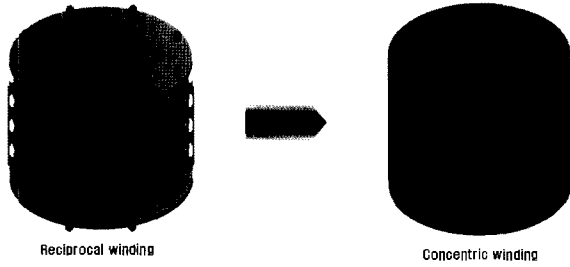


그림 8. 교호배치형 권선과 동심형 권선

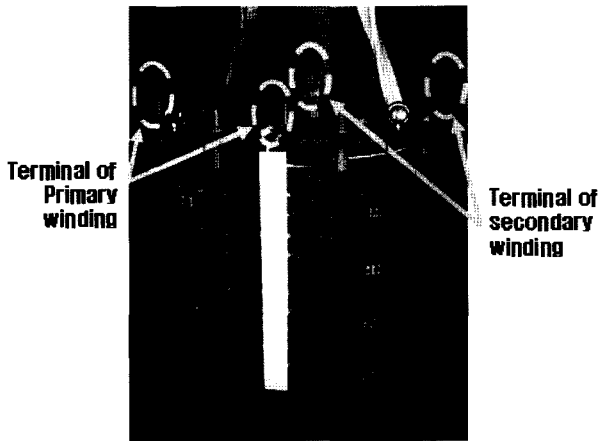


그림 9. 제작된 교호배치형 권선

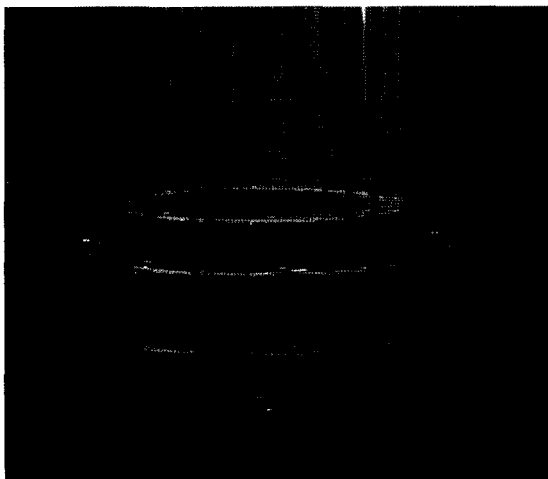


그림 10. 동심형 권선의 제작과정

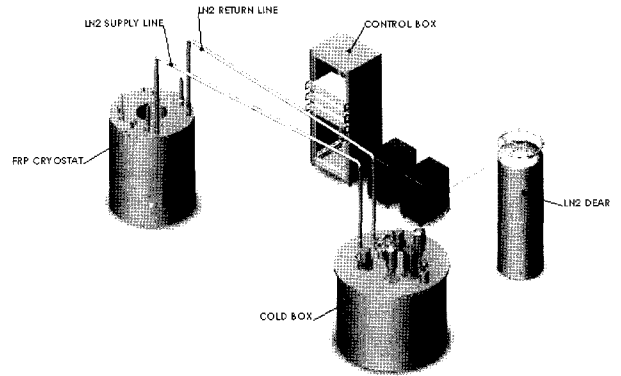


그림 11. 초전도 변압기 냉각시스템 개념도

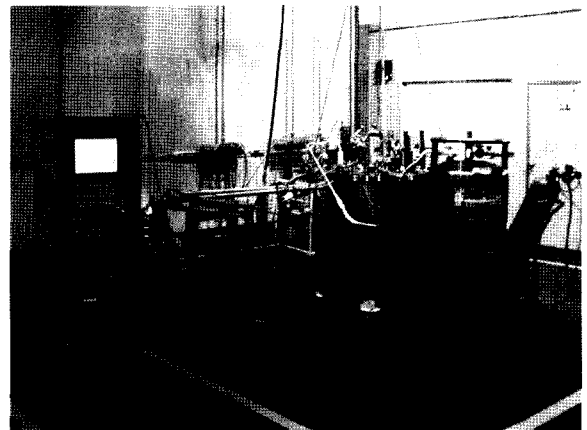


그림 12. 제작된 냉각시스템

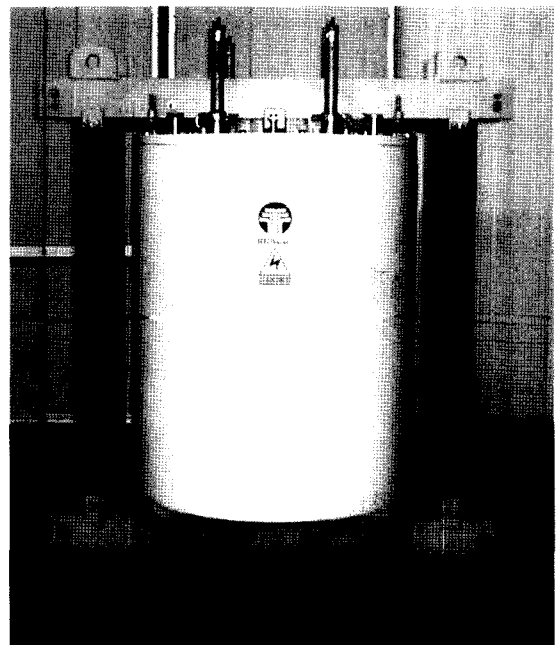


그림 13. 1 MVA 고온 초전도 변압기

4. 결 론

프론티어 사업의 2 단계에서는 초전도 변압기 개발 목표가 대폭 수정되었다. 현재 외국의 개발 동향을 감안할 때, 1 세대 고온 초전도 선재인 BSCCO PIT 선재로 초전도 변압기를 개발하는 것이 효과적인가에 대한 검토가 필요한 시점이기 때문이었다. 당초 예상보다 빨리 진행되고 있는 2 세대 초전도 선재인 coated conductor(CC)가 초전도 변압기용으로 최적인지 여부는 좀 더 연구가 필요한 사항이지만, PIT 선재에서 발생하는 교류손실로는 경제성을 맞추기가 쉽지 않은 것이 사실이다. CC의 경우, 고자장이나 수직자장에 대한 임계전류특성이 훨씬 우수하여, 교류손실뿐만 아니라 전류용량 증대에도 유리할 것으로 기대하고 있다.

이에 따라, 2 단계에서는 CC를 고려한 초고압 초전도 변압기의 요소기술을 개발하게 된다. 아울러, 국내 실정에 맞는 초전도 변압기 상용화 목표에 대한 경제성 평가를 수행하여 3 단계가 종료될 때 바로 상용화할 수 있는 개발목표를 설정하려고 한다.

저자이력



최경달(崔景達)

1962년 02월 12일생. 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과(석사), 1993년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1993년 기초전력공학연구소 연구원, 1998년 한국산업기술대학교



김우석(金佑錫)

1970년 06월 12일생. 1996년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1998년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2002년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 2002년 기초전력공학연구소 연구원



김성훈(金聖勳)

1973년 05월 20일생. 1999년 동아대학교 전기전자 컴퓨터 공학부 졸업, 2001년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사), 2004년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사)



권오범(權五範)

1941년 7월 20일생, 1966년 건국대 경제학과 졸업, 1961년 경제기획원 국토계획국, 1963년 아세아시멘트공업(주), 1968년 신한애자공업(주) 기획실장, 1970년 사면물산(주) 무역부장, 1977년 대연통상(주) 상무이사, 1987년~현재 (주)신성월드 대표이사, 1997년~(주)씨브이 대표이사



송희석(宋禧錫)

1951년 05월 15일생. 1974년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1990년 경남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1994년 주)효성 초고압 변압기 설계팀장, 2003년 주)효성 중공업연구소 전자기응용팀장, 2004년 주)효성 초고압변압기 제작팀장



한송엽(韓松喼)

1939년 3월 14일생. 1963년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1967년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1979년 프랑스 로렌공과 대학 대학원 졸업(박사), 현재 서울대 전기공학부 교수