



# 초전도응용기기 및 시스템의 연구동향과 발전방향

류 강 식  
한국전기연구소 초전도응용연구사업팀장

## 1. 머릿말

액체헬륨온도인 4.2 K(-269℃)부근이나 액체질소온도인 77 K(-196℃)부근에서 전기저항이 영(zero)인 초전도체는 비록 사용온도가 극저온으로 인한 경제성문제등으로 실용화에는 일부 제약을 받고 있지만 동일한 면적에서 일반 구리도체와 비교하여 수백배까지 이르는 아주 높은 밀도의 전류를 손실없이 흘릴 수 있으므로 전기기기나 에너지·환경기기등에 응용을 하면 고효율화, 소형·경량화는 물론 새로운 기능을 갖는 기기의 실현이 가능하다. 그림1은 초전도기술의 응용분야를 초전도특성에 따라 분류하여 도식한 것으로 산업 전 분야에 걸쳐 응용되고 있음을 볼 수 있으며 크게 전기저항제로특성과 초전도코일에 의한 강자장발생, 미소자장과의 상호작용등을 이용한 세 부분으로 나뉜다. [1]

초전도기술이 이와 같은 많은 분야에 걸쳐 응용되고 있음에도 불구하고 기기 및 시스템으로의 본격적인 응용연구가 시작된 시기는 초전도현상이 발견된 1911년이후 거의 50년이란 세월이 지나 고임계자장값을 가지는 Nb-Ti나 Nb<sub>3</sub>Sn등과 같은 실용 초전도선이 발견되기 시작하는 1950년대 말로서 이때부터 상용 주파수에서도 사용가능한 교류용 초전도선이 개발되는 1983년까지 약25년 동안 주로 직류분야에서의 응용연구가 진행되어 왔다. 이후 1983년을 경계로 하여 보다 저교류손실이 가능한 금속계 초전도선이 개발되고 1986년 액체질소온도에서도 초전도가 되는 고임계온도 산화물 초전도체(고온초전도체라 약칭함)가 발견되면서부터 초전도기술이 응용 가능한 모든 분야에 걸쳐 연구가 전개되기 시작하여 MRI/NMR, 소형 SMES 등이 상용화되고 초고자장 NMR의 최내층 코일과 같은 일부 응용분야에서는 고온초전도체도 실용화되는 오늘날까지 이르렀다. [2]

이와 같은 초전도응용기기 개발연구의 오랜 연구역사를 가진 세계적인 동향과는 달리 우리나라에서의 초전도응용기기개발로의 연구는 1985년 서울대학교의 수십kJ급 소형 초전도에너지저장장치 연구를 시작으로 출발하였으며 본격적인 응용연구는 기초전력공학공동연구소의 초전도발전기, 초전도에너지저장, 한국전기연구소에서의 초전도MRI 및 초전도케이블개발연구등이 활발하게 전개된 1990년대초로 불과 7.8년밖에 안된다. [3]

한편 일본, 미국등의 초전도기술분야에서의 선진국들은 초전도연구역사가 길고 오랜 저임계온도 초전도체(저온초전도체로 약칭함)연구로 축적된 기술을 바탕으로 이 기술의 연장선상에서 고온초전도체 연구를 함으로서 고온초전도체가 발견된 지 불과 10여년밖에 안되는 짧은 기간임에도 불과하고 일부 초전도응용분야에서는 실용화 수준에 근접하고 있다. 이에 비해 우리나라는 연구역사가 일천하여 저온초전도연구를 경험하기도 전에 세계적으로 붐을 탄 고온초전도의 열기에 편승하여 저온초전도기반축적의 필요성은 인식하지 못한 채 고온초전도체 중심으로만 연구가 진행됨으로서 선진국과 동일한 시기에 고온초전도연구를 시작하였음에도 불과하고 오늘날에는 선진국과의 고온초전도응용기술수준의 격차가 더 벌어지고 있다. 이와 같은 저온초전도와 고온초전도기술 사이의 편협된 인식과 연구수행 방법 등으로 인해 일반인은 물론 초전도를 전문적으로 연구하는 전문가들마저 초전도에는 마치 고온초전도와 저온초전도의 두 가지 서로 다른 초전도분야가 존재하는 것처럼 오해되는 경향이 있는데 분명히 저온초전도와 고온초전도는 동질의 초전도기술 연장선상에 있다고 볼 수 있다. 그것은 저온초전도중에서도 임계온도가 10K이하로 아주 낮은 Nb-Ti 등과 같은 합금계 초전도체가 있는가 하면 이보다 임계온도도 높을 뿐만 아니라 재료적으로도 합금계와는 다른

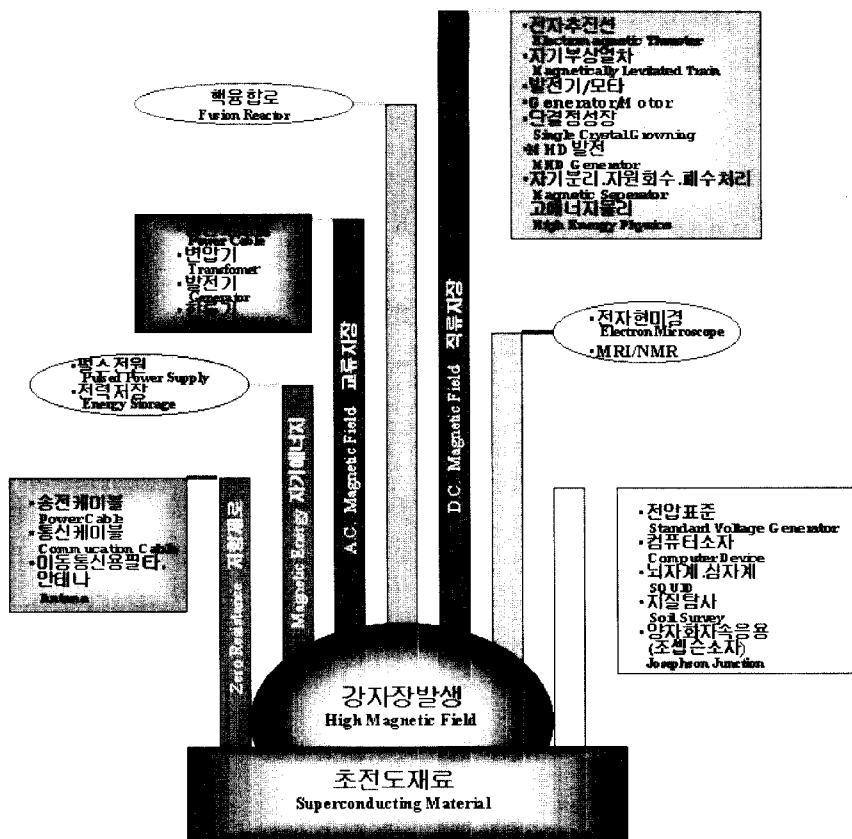


그림 1. 초전도 응용분야의 분류

Nb<sub>3</sub>Sn 등과 같은 금속간화합물계 초전도체가 있듯이 고온초전도체도 단지 이들보다 임계온도가 높고 재료가 산화물계로 합금계나 금속간화합물과는 다르다는 측면에서 인식되어야 한다는 점이다. 실제로 고온초전도체가 일반인들이 알고 있듯이 임계온도인 액체질소 온도 77K 이상에서만 사용되는 것이 아니고 24 Tesla급 NMR의 예에서와 같이 단지 고온초전도체의 우수한 임계자장 특성만을 이용하여 고온초전도체의 임계온도와는 관계없이 저온초전도체가 사용되는 온도인 액체헬륨 온도 4.2K에서 저온초전도코일과 고온초전도코일과의 Hybrid코일로 구성되어 이용되고 있다. 이것은 24 Tesla를 발생시키기 위해서는 Nb-Ti코일만으로는 8 Tesla 정도까지만 발생시키지 못하여 임계자장값이 높은 Nb<sub>3</sub>Sn코일을 이용하여 21.22 Tesla 부근까지 발생시키듯이 24 Tesla까지 발생시키기 위해 필요한 나머지 2~3 Tesla 정도를 더 발생시키기 위해 고온초전도코일이 필요로 할 뿐이다.

이와 같은 의미에서 본고에서는 굳이 저온초전도체와 고온초전도체를 분리하지 않고 같은 초전도기술의 테두리 내에서 초전도 마그네트를 이용한 여러 가지

초전도 응용분야 중 오늘날 상용화에 성공한 MRI/NMR과 강자장을 이용한 응용 중 가장 대표적이고 파급효과가 지대한 전력응용기기를 중심으로 간략한 기술개요와 연구동향에 대해서 서술하고자 한다.

## 2. MRI/NMR

MRI는 인체세포에 함유되어 있는 수소 등의 원자핵의 자기공명현상(NMR: Nuclear Magnetic Resonance)을 이용하여 인체의 단층화상을 영상으로 촬영하는 장치이다. 생체중의 원자핵은 고유의 Spin을 가지고 있으며 정자장중에서는 자장의 방향과 평행한 축을 중심으로 한 세차운동을 한다. 그 세차운동의 회전주파수  $\omega_0$ 는 자장의 세기  $B_0$ 에 비례하여  $\omega_0 = \gamma B_0$  (여기서  $\omega_0$ 는 라모아 주파수,  $\gamma$ 는 자기회전비임)가 되며 회전주파수는 원자핵에 따라 다른 핵 고유의 값으로 예를 들면 1 T의 자장하에서 <sup>1</sup>H(플로톤)의 공명주파수는 42.6 MHz이다. 여기서 이 주파수 즉  $\omega_0$ 에 일치하는 주파수를 가진 여기용의 고주파 펄스를 조사하면 자기공명현상이 일어나 생체중의 대상 핵종은 여기된다.

이때 조사된 고주파 펄스를 끊어 주면 여기된 핵종은 원래의 에너지상태로 되돌아 가면서 여기될 때 흡수한 에너지를 전자파형태로 외부로 방출하게 된다. 이렇게 방출된 신호가 NMR신호로 이 신호를 수신코일로 검출하여 화상으로 만든다.

MRI시스템은 이와 같이 고주파 펄스를 조사하기 위한 RF코일, 환부의 위치정보를 주기 위한 Gradient 코일 및 강력한 정자장을 만들어 주는 주 마그네트등으로 구성되는데 RF코일과 Gradient 코일은 상전도방식으로 만들어 지나 주 마그네트는 영구자석, 전자석 또는 초전도방식등으로 만들어 진다. 현재 MRI의 대부분은 영구자석형과 초전도형이 있는데 영구자석형은 자장의 세기가 0.2 Tesla이하로 낮으나 초전도형은 자장의 세기가 0.5~2 Tesla 정도로 높아 S/N비가 높은 고화질의 화상을 얻는데 이용된다. 참고로 금년을 기준으로 일본에 설치된 MRI는 약 3000대에 이르며 이중에서 초전도 방식이 전체의 80%에 이르는 약2400대 정도로서 MRI의 대부분을 차지하고 있다. 우리나라도 지금은 IMF로 인해 MRI의 도입이 주춤하고 있으나 95년부터 연 평균 약50대씩 증가하면서 현재 약 250대에 이르고 있다.

현재 MRI용 초전도마그네트를 생산하는 회사는 영국의 Oxford, GE, 일본의 도시바등이 대표적이라 할 수 있으며 우리나라도 한국전기연구소가 중심이 되어 1995년 말부터 보건복지부의 지원을 받아 2001년까지 MRI용 초전도마그네트의 상용화하기 위한 본격적인 연구개발 진행중에 있다. 그림2는 현재 전기연구소에서 제작이 완료된 1.5 Tesla급 전신촬영용 초전도마그네트로 상온 보아는 800mm $\phi$ , 중심자속밀도는 1.5 Tesla, 자장균등도는 2.5 ppm/30cm DSV, 헬륨소모량은 0.06 l/hour이다. [4] 앞으로 MRI기술은 환자의 상태를 화면으로 보면서 수술할 수 있는 개방형 MRI나 4 Tesla이상의 보다 강력한 자장을 발생시켜 다양한 핵종의 촬영과 S/N비의 대폭적인 증가로 뇌의 기능을 해명할 수 있는 Functional MRIS등과 같은 새로운 기능을 갖는 MRI개발이 주축을 이룰 것으로 보인다. 또한 이와는 별개로 1장의 화상을 수십 ms로 촬영하는 고속화상처리기술개발이 급속히 진전되고 있는데 이를 위해서는 Gradient코일에 수백 A에 이르는 높은 전류를 흘려야 되며 이로 인한 발열문제를 해결하기 위해 산화물계 고임계온도 초전도체를 이용한 코일개발이 기대되고 아울러 수신용 RF코일도 고임계온도 초

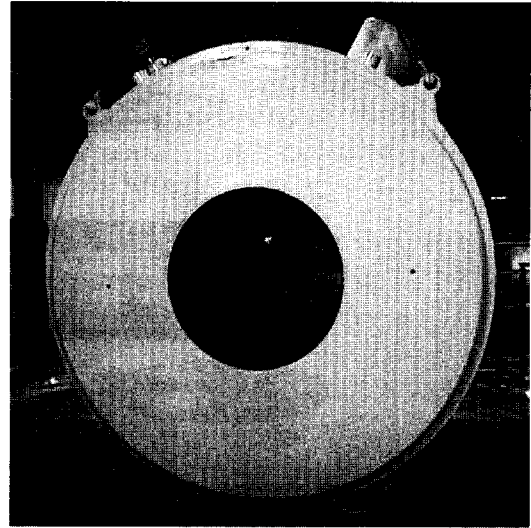


그림 2. 전신촬영용 MRI 초전도 마그네트

전도체를 사용하여 초전도화합으로서 S/N비를 향상시키는 것이 가능하리라 생각된다. 한편 이상과 같은 사람을 대상으로 한 MRI외에도 NMR원리를 이용하여 물질을 구성하는 원자간의 화학구조를 고분해능으로 규명하는 첨단분석장비로 NMR분광기가 있는데 MRI와 NMR분광기가 다른 점은 단지 NMR이 MRI의 700~1000mm $\phi$ 보다는 작은 수십 mm공간내에서 20 Tesla이상에 까지 이르는 아주 강한 자장을 발생시켜야 한다는 점이다. 그 이유는 S/N비의 증가외에도 측정하고자 하는 물질의 분자량이 크면 클수록 Chemical Shift를 증가시키기 위해 자장의 세기를 증가시켜야 하는데 단백질이나 생체고분자등과 같은 거대 분자량을 가진 물질의 규명을 위해서는 반드시 초고자장을 필요로 한다. 현재의 기술로는 임계자장특성이 우수한 BSCCO 산화물계 초전도코일이 가능 함에 따라 약24 Tesla정도까지 발생 시키고 있으나 아직까지는 안정적이지 못하다. 그림3은 한국전기연구소에서 1997년말 초고자장 핵자기공명분광기 연구기획과 관련하여 개념적으로 도식한 초고자장 NMR 플랜트구성 및 관련 기술개발 체계도로서 가장 중요한 기술은 초고자장을 발생시키기 위한 초전도코일과 초유동헬륨 냉각계의 구성 그리고 고임계온도 초전도코일제작 기술과 고자장으로 인한 강한 전자력으로부터 어떻게 코일을 지지하는가 하는 기술 등이다. [5]

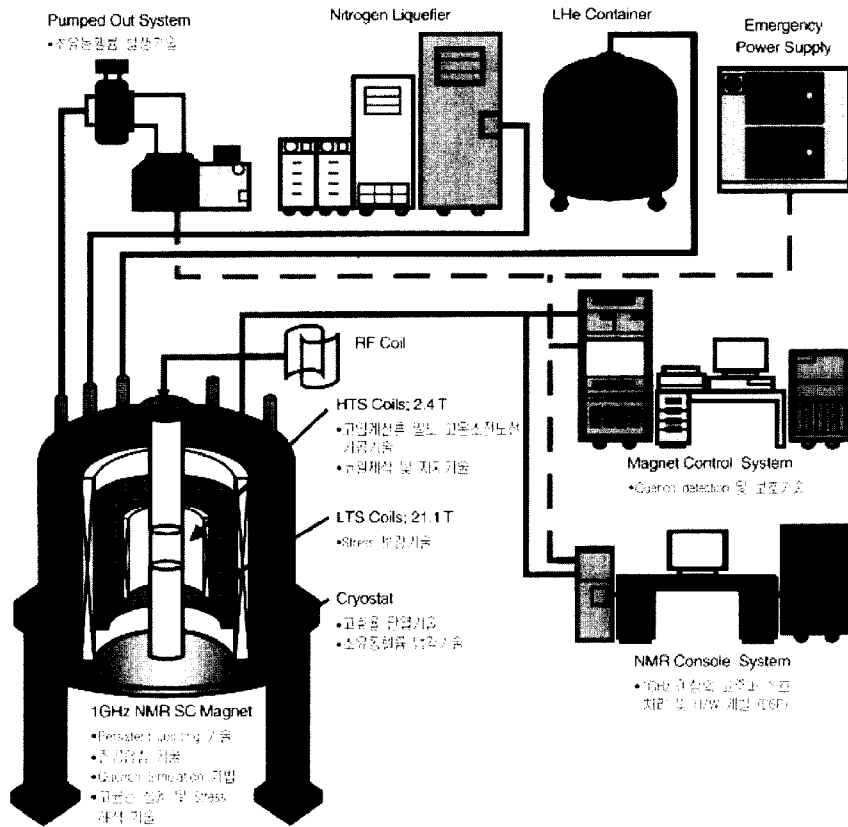


그림 3. 초고자장 NMR 플랜트구성 및 관련 핵심요소기술개발 체계

### 3. 초전도전력기기

초전도전력기기로의 응용에는 초전도전력케이블등의 저자장 교류응용과 초전도발전기나 초전도에너지저(SMES)등과 같은 고자장 직류응용, 전기차코일까지 초전도화한 전초전도발전기나 초전도변압기, 초전도한류기등과 같은 고자장 교류응용등이 있다. 세계적으로 볼 때 직류응용연구는 1960년대부터 교류응용연구는 1980년대부터 시작되고 있으나 고품질의 전력품질을 요하는 국지부하보상용으로서의 소형 초전도에너지저장장치를 제외하고는 실제 상용계통내에서 운용되는 기기의 개발은 다음 21세기가 될 것으로 보인다.

#### 3.1 초전도전력케이블

초전도케이블이란 케이블 통전도체로 기존의 Al이나 Cu도체대신에 초전도도체를 사용하여 대용량 송전을 가능하게 하는 것으로 송전용량을 현재의 2~4배까지 획기

적으로 증대시킬 수 있을 뿐만 아니라 저전압·대전류 송전이라는 신개념의 도입이 가능하여 도심의 초고압변전소를 생략하게 함으로서 전력계통의 절연구성이 간단해지고 송전비용이 절감되고 전력환경이 개선되는 등의 여러 가지 도입효과를 가능하게 한다. 그림4는 이런 냉각시스템과 초전도케이블코어, 케이블과 극저온관로를

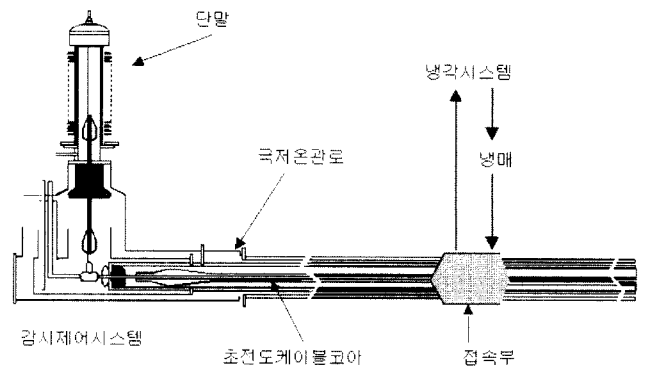


그림 4. 초전도 송전시스템

연결하는 접속부 및 냉각시스템, 냉매의 급배와 과·통전을 위한 극저온 단말등으로 구성된 초전도 송전 시스템을 나타낸 것으로 케이블의 구조는 일반 케이블과 비하여 기본적으로 거의 비슷하나 도체의 재료와 냉매가 다르고 극저온을 유지하기 위한 별도의 구조와 냉각계가 필요한 게 가장 다른 특징이다.

초전도전력케이블에 대한 연구는 세계적으로 볼 때 Nb나 Nb<sub>3</sub>Sn 금속계 테이프재료를 이용한 연구가 1960년대말 시작되었으며, 1980년대에는 미국의 BNL에서 138 kV, 4000 A정격에서 Nb<sub>3</sub>Sn도체와 Polypropylene 절연 테이프를 이용한 초임계헬륨냉각 115 m급의 모델선로를 건설하여 실증시험을 하였다.〔6〕 우리나라에서는 한국전기연구소에서 1988년 154 kV, 800 A급 극저온저항케이블연구를 시작으로 1994년 Nb<sub>3</sub>Sn 금속계 테이프선재를 이용한 154 kV, 3 GVA급 10 m모델 케이블연구를 하였다.〔7〕

이와 같은 초전도케이블 연구와 동시에 실시된 경제성검토에서는 초전도전력케이블은 한 루트당의 송전용량이 3GVA~5GVA정도의 대용량이 되지 않으면 경제성이 없는 것으로 검토된 바가 있다. 초전도 케이블은 다른 초전도응용 전력기기와는 달리 초전도 상태를 유지하는데 필요한 냉각대상이 길기 때문에 단열층을 통해 들어오는 침입열이 냉각시스템의 열부하의 주요한 요소가 된다. 따라서 저온에서의 냉각 능력과 냉각시스템 운용을 위한 소비전력의 비인 냉각시스템의 효율이 카르노 사이클 효율의 한계에 의해 1/300~1/1000로 매우 낮은 액체헬륨냉각에서는 침입열을 줄이는 것이 중요한 기술개발과제가 된다. 그러나 고온초전체를 도체로 이용하여 액체질소로 냉각하면 냉각시스템의 효율이 1/10~1/30로 30배이상 개선될 수 있으므로 고정적인 열부하가 되는 침입열의 영향을 절감시킬 수 있다.

이와 같은 효과에 의해 초전도선재의 비용이 저온 초전도나 고온초전도가 동일하다고 보고 계산하면 고온초전도체를 이용한 케이블은 루트당 1~2 GVA정도에서도 경제성이 있는 것으로 나타나 초전도케이블을 적용할 수 있는 범위가 보다 넓어 졌다. 이것은 인구 및 전력수요 과밀화 지역인 도심부에서의 지하 전력구 지중송전에서는 초전도케이블을 적용하여도 충분히 잇점이 있음을 의미하는 것으로 지금은 고온 초전도체를 이용한 초전도케이블의 도입을 적극 제안하고 있다. 이로 인해 미국, 일본, 프랑스를 비롯한 세계 각국에서는 고온초전도체를 이용한 전력케이블 개발을 위한 연구가 진행되고 있다. 실제로 미국은

1996년 Pirelli Cable이 DOE의 지원을 받아 EPRI 및 ASC사와 공동으로 직류 3000 A급 50 m BSCCO 전력케이블을 개발한 바 있으며 일본도 1996년 동경전력이 Sumitomo전기, Furukawa전기등과 공동으로 66 kV, 0.25~1 GVA급 3상 동축 케이블을 개발한바 있다.〔8〕

이외의 나라에서도 영국은 BICC Cables, 독일은 Siemens AG, 덴마크는 NKT 연구센터, 스위스는 EPRI-CRPP등이 중심이 되어 활발히 연구하고 있다.

우리나라도 한국전기연구소가 중심이 되어 1994년부터 1997년까지의 Nb<sub>3</sub>Sn 금속계 테이프를 이용한 초전도케이블연구에 이어 금년부터 BSCCO테이프선재를 이용한 전력케이블의 타당성 검토를 완료하고 현재 2005년까지154kV, 1 GVA급 100m 3상 케이블 개발을 목표로 케이블 개념설계 및 요소기술을 개발중이다.

### 3.2 초전도에너지저장

초전도에너지저장(SMES)은 코일에 전류를 흘려 자기적인 에너지를 저장시키는 원리를 이용해 코일을 초전도화하여 저장된 에너지가 감소되지 않도록 만든 장치로서 수많은 초전도응용분야중에서도 초전도현상을 이용한 최초의 응용분야이기도 하다. SMES의 동작원리는 전력계통으로부터 전력을 흡수하여 초전도코일에 에너지를 축적시키는 충전모드와 코일의 용량만큼 에너지를 축적시킨 후 영구전류스위치를 닫아 에너지를 저장시키는 저장모드, 초전도코일에 저장된 에너지를 필요에 따라 전력계통에 방출하는 방전모드로 이루어 진다.〔9〕

이와같은 SMES는 현존하는 양수발전, 배터리저장, Flywheel등과 같은 에너지저장장치중 전기를 직접적으로 저장하는 유일한 장치로서 충·방전 속도가 대단히 빠를 뿐만 아니라 저장효율이 약 95%로 대단히 높고 유효전력과 무효전력을 동시에 제어할 수 있고 반영구적이라는 장점 때문에 장거리송전선, 변전소, 분산형 에너지 도입장소 등에서 안정도 향상 및 변동부하 보상, 부하 레벨링등을 목적으로 한 소,중,대규SMES의 응용이 제안되고 있었으나 불과 몇년 전까지만 해도 SMES는 경제성면에서 장치의 Scale Merit 효과가 커 양수발전소에 상당하는 저장용량 5 GWh급의 대형 SMES에서나 경제성이 있는 것으로 보고되면서 SMES연구의 커다란 제약이 받았다. 그러나 근래에는 SMES의 입출력장치로 반도

체소자를 이용한 전력변환기술이 더욱 발달되어 고속으로 입출력 전력을 제어할 수 있게 됨에 따라 SMES를 전력계통 안정화용으로 이용하려는 연구와 더불어 순시전압강하 및 순간정전에 대응하는 전원장치로서의 연구가 진행되면서 그 생각이 크게 바뀌고 있고 그 응용분야도 과거의 전력계통과 관련된 분야 이외의 새로운 용도로서 옥외경기장의 조명 또는 빌딩 및 공장, 레이저용등의 각종 전원장치, 비접촉 엘리베이터, 제철소의 부하평준화, 태양광 발전용 저장시스템등 다양한 분야에 걸쳐 검토되고 있다.[10]

현재 일본에서는 ISTECH이 NEDO의 지원하에 부하평준화를 목적으로 한 1단계 연구에서 0.1MWh급 소규모 SMES 요소기술개발연구를 진행중에 있으며 미국에서는 초전도를 전문으로한 기업을 중심으로 정보·통신분야나 반도체, 제철소, 공군기지등에서 순간정전이나, 순시전압강하 또는 Flicker, Voltage Sag & Swell등과 같은 저품질의 전력으로부터 정밀부하를 보호하기 위한 장치로 저장에너지가 1~5 MJ, 정격출력은 0.5~1 MVA 정도인 소형 Micro SMES를 개발하여 상용화한 바가 있다.

우리나라에서도 1995년 기초전력공학공동연구소에서 전력계통안정화용으로 0.5 MJ급 SMES를 개발하여[11] 에너지 수수시험을 성공적으로 마친 경험을 바탕으로 한국전기연구소에서 SMES의 상용화를 목표로 UPS용 1 MJ급 Micro SMES개발연구를 수행하고 있으며, 그림 5는 1998년 한국전기연구소에서 개발된 UPS용 0.7 MJ급 SMES 모델코일로서 운전전류는 1,555 A,

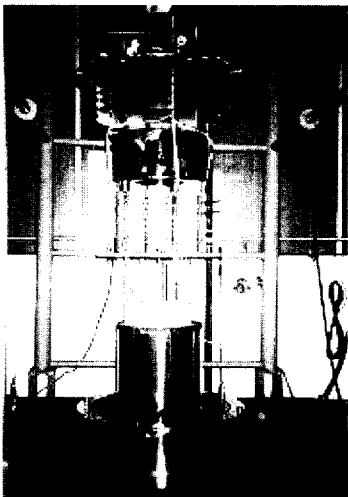


그림 5. UPS용 0.7MJ급 SMES 코일

전력변환기의 출력은 100 kVA이다.

### 3.3 초전도발전기

초전도발전기의 구성은 기본적으로 기존발전기와 같으나 계자권선으로 기존 발전기의 Cu도체대신에 초전도도체를 사용함으로써 복잡한 냉각계가 필요하다는 게 크게 다른 점으로 초전도발전기는 대전류를 흘려 약 5 Tesla정도의 고자장(기존 발전기는 약 1.5 Tesla)을 발생시킬 수 있기 때문에 냉매가 유통하고 있는 회전자축은 자기포화를 피하기 위해 비자성재료를 사용하고 외부의 열침입을 방지하기 위한 진공단열층과 전기자권선으로 부터의 자계영향을 차단하기 위한 Damper층을 갖는 다중원통구조로 이루어 진다. 또한 고정자는 높은 자속밀도를 쉽게 얻을 수 있기 때문에 철심을 사용하지 않는 공극 전기자권선 구조를 택하고 있으며 이로 인해 초전도발전기는 다음에서와 같이 기존발전기에서는 얻을 수 없는 여러 가지 잇점을 얻게 된다.

#### • 소형·경량화

철심이 없는 초전도코일을 이용하기 때문에 공극자속밀도만으로도 현재기술로 20 Tesla까지도 발생시킬 수 있고 전기자코일까지도 철심을 사용하지 않아 그만큼 전기자권선내의 도체수를 증가시킬 수 있어 발전기 출력계수를 기존발전기의 2배이상 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 동일 용량에서는 발전기 크기를 반으로 줄일 수 있다. 이것은 발전기 단기용량증대에 의한 Scale Merit효과와 더불어 냉동기를 포함하여도 운반, 설치가 용이하고 설치면적을 축소화할 수 있음을 의미한다.

#### • 발전기효율 향상

초전도발전기는 기존발전기에서 30%이상이던 여자손실이 전기저항이 영인 초전도체를 사용하는 관계로 거의 0%에 가깝고 소형·경량화에 따른 기계손이 10%정도 절감되는등 기존발전기에 비해 손실을 60%정도 줄여 발전효율을 0.5%~1% 향상시킬 수 있다. 이것은 발전비용을 절감시킴과 더불어 연료소비량을 줄여 CO<sub>2</sub>가스 배출량을 억제시킴으로서 지구환경보전에도 기여함을 의미한다.

#### • 계통안정도 향상

초전도발전기는 계자코일의 초전도화에 따른 고전류밀도, 고자속밀도등으로 동기리액턴스를 기존발전기의 1/3~1/5수준으로 대폭 감소시킬 수가

있다. 송전선의 송전능력의 한계는 발전기의 동기 리액턴스와 송전리액턴스의 합에 거의 역비례하므로 동기리액턴스의 감소는 송전능력의 한계를 키울 수 있어 전력계통의 안정도가 향상되는데 모델계통에서의 시뮬레이션 결과에 의하면 약30%정도의 계통안정도가 향상되는 것으로 계산된다. 이것은 동일 송전계통의 송전가능능력을 약30%증가시켜 전력수요의 증가에 따른 송전설비의 확충을 30%절감할 수 있음을 의미한다. 더욱이 기존발전기에서의 고정자 철심부분의 과열현상에 의한 진상운전 한계가 없기 때문에 진상운전영역이 확대되고 전압안정성 유지를 위한 콘덴서, 리액터 등의 조상설비를 대폭 줄일 수 있게 된다. 또한 초전도발전기는 리액턴스 설계의 허용범위가 넓고 단락전류에 영향을 주는 과도, 차과도 리액턴스를 크게 설계할 수 있기 때문에 단락전류가 문제가 되는 계통으로의 도입도 가능하게 된다.

이외에도 초전도발전기 도입에 따라 불평형 부하 내력이 향상되고, 전압변동율이 기존발전기의 1/4~1/5 정도로 향상될 뿐만 아니라 초전도발전기의 공극 전기자권선 구조를 갖는 고정자는 권선과 대지전위에 있는 자기철드 사이의 전기적 절연거리가 커 100 kV이상의 단자전압의 고전압화가 가능하게 되는 등의 여러 가지 장점 때문에 초전도발전기를 실용화하려는 연구개발 노력이 활발하게 전개되어 왔다. 그러나 액체헬륨을 냉매로 사용함에 따른 발전기비용 등의 경제성면과 기술적인 한계를 극복하지 못하고 실용화에 회의를 품은 미국, 독일, 프랑스 등은 1990년대초를 고비로 서서히 연구를 중단하고 지금은 초전도응용기술면에서 세계적 선두주자로 자부하고 있고 또한 가까운 장래에 초전도발전기의 실용화를 위한 모든 기술적 문제를 해결하여 실 계통으로의 도입을 확신하고 있는 일본이 중심이 되어 러시아, 인도, 우리나라 등이 지속적인 연구를 수행하고 있다. 특히 일본은 가까운 장래에 초전도발전기가 전압유지능력의 향상을 위한 200~300 MW급의 도시근교 Combined cycle기나 계통안정도 향상을 위한 600 MW급이상의 원격지 대용량기로의 적용될 것으로 보고 통상성의 New Sunshine계획의 일환으로 Super-GM에서 200 MW급 초전도발전기개발을 목표로 연구 수행중에 있으며, 현재 그 1/3 용량수준인 70 MW급 모델기를 제작하여 관서전력 오사카발전소에서 2000시간 장기실증 계통연계 운전시험을 성공함으로써 21세기초에는 실용화될

수 있을 것으로 기대하고 있다. [12]

우리나라는 다른 나라에 비해 연구출발시기가 상당히 뒤쳐졌지만 서울대학교를 중심으로 한 기초전력공학공동연구소에서 1991년부터 1994년까지 초전도발전기의 해석기술 및 개념설계, Component제작기술등의 기초기술을 확보할 목적으로 20 kVA 초전도발전기개발 연구를 한 바 있으며, 이 기술을 기반으로 1996년 말부터 한국전기연구소는 과학기술기부의 Star project의 일환으로 고효율 발전이 가능한 초전도발전기를 중심으로 감시제어 및 운용시스템으로 구성된 차세대 고효율 발전시스템 개발 연구를 수행하고 있다. 1998년 현재 1차 중간 시제품으로 30kVA 초전도발전기를 개발하여 금년 11월 말 냉각시험, 회전 및 여자시험, 출력 및 과도특성 시험등을 성공리에 마치고 지금은 1 MVA급 발전기설계에 필요한 데이터를 인출하기 위한 발전기 동특성시험중에 있다. 그림6은 한국전기연구소에서 개발에 성공한 30kVA초전도발전기 시험장면을 찍은 사진이며, 앞으로 2001년까지 1 MVA급 초전도발전기 모델

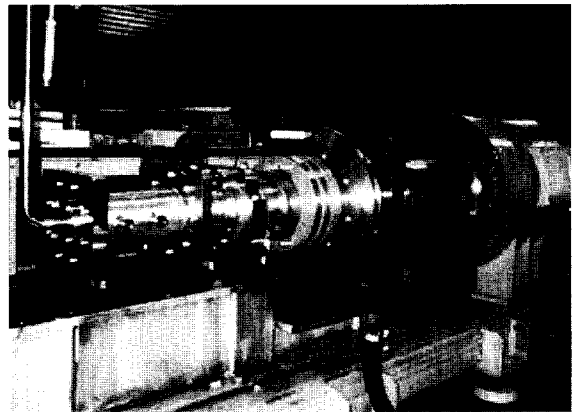


그림 6. 30kVA 초전도 발전기 외형

기의 개발을 마쳐 초전도발전기를 기술적으로 실용화하는데 필요한 관련 핵심 요소기술을 확보한다는 계획이다. [13]

### 3.4 초전도변압기

초전도변압기는 대표적인 교류기기로 초전도선을 변압기에 응용하려는 연구는 1980년대초 프랑스에서 저손실의 교류용 초전도선이 개발되면서 부터이다. 그 이유는 초전도체가 직류자장중에서나 전기저항이 영이지 변동자장중에서는 손실이 있기 때문으로 초전도선을 교류기기에 적용하기

위해서는 바로 이 교류손실을 가능한 한 적게 할 필요가 있다. 그 동안의 연구노력의 결과 Sub-micro두께의 초전도필라멘트를 갖는 초극세다심초전도선의 개발로 저손실 교류초전도선이 가능하게 되어 직류기기로의 응용에 이어 변압기와 같은 교류기기로의 응용도 활발하게 이루어 지게 됐다.

초전도변압기는 변압기의 권선을 초전도화함으로써 고효율화, 소형·경량화를 도모하려는 대표적인 교류형 초전도전력기기로 전형적인 기존 기기의 대체기술이라 할 수 있다. 기존변압기는 권선의 동선과 철심에서의 손실의 비율을 최적화함으로써 운전시의 종합손실을 최소화하는 방향으로 설계하고 있으나 초전도변압기는 고전류밀도특성을 이용하여 권선의 턴수를 증가시키고 철심의 사용량을 줄여 변압기의 크기와 무게를 줄이고 효율을 증대하는 쪽으로 설계하고 있다. 즉 초전도변압기에서의 초전도코일이 기존변압기에서의 동코일에 비해 전류밀도가 수십배정도 높고 손실도 작아 코일의 권선수를 늘려 코일과 쇠교하는 자속을 많게 할 수 있기 때문에 철심의 양을 줄일 수 있어 소형·경량화가 가능하고 철손도 줄어들게 된다. 궁극적으로는 장차 초전도선의 전류밀도와 교류손실특성을 더욱 향상시켜 철심이 없는 변압기도 출현할 것으로 기대된다.[14] 지금까지의 초전도변압기에 대한 연구는 설계용량이 수 10 kVA에서 1000kVA급의 소형 초전도변압기 위주로 연구되고 있는데 그중 대표적인 것이 일본 관서전력과 미쓰비시가 1996년에 공동으로 개발한 2000/3 kVA 단상 Nb<sub>3</sub>Sn 외철형 초전도변압기로 켄치의 원인중 하나인 전자력에 의한 코일의 진동을 억제하기 위해 코일을 에폭시 함침하였으며 함침에 따른 코일의 냉각효율 저하로 인한 코일의 온도 상승은 Nb<sub>3</sub>Sn초전도선의 선의 큰 온도마진으로 흡수하도록 설계한 것이 특징이다. 한편 근래에는 그동안 산화물계초전도 다심선재에서 약점으로 대두되었던 은시스템의 필라멘트사이의 강한 전자기적 결합과 단심 선재적인 특성을 해결하기 위한 저손실형 다심선이 속속 개발되면서 고임계온도 초전도체를 이용한 변압기의 연구가 활발하게 전개되고 있다.

그중 하나가 1997년 스위스의 ABB사가 개발한 BSCCO 테이프선재를 이용한 630 kVA급 3상 초전도 변압기(그림7참조)로 이 연구개발을 바탕으로 프랑스의 EDF가 ADD와 미국의 ASC와 공동으로 2000년까지 10 MVA급 BSCCO 초전도변압

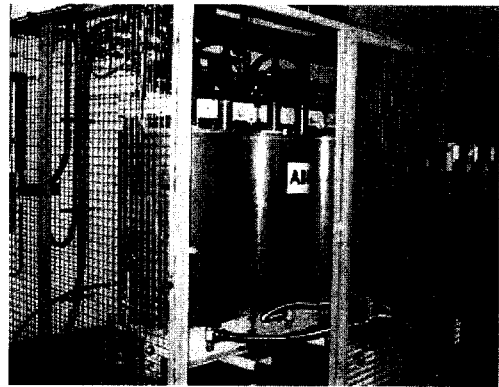


그림 7. 630kVA 3상 BSCCO 초전도 변압기

기를 개발한 후 경제성이 검증되면 30 MVA급 변압기의 상용화 여부를 결정하겠다고 발표한 바 있다.[15]

우리나라에서도 1990년대초·중반에 교류용 Nb-Ti극세다심선을 이용한 수십kVA급 소형 초전도변압기를 개발한 경험을 바탕으로 1997년부터 산자부의 에너지절약기술개발사업의 일환으로 기초전력공학공동연구소가 중심이 되어 소형 BSCCO초전도변압기 개발을 목표로 요소기술을 연구중에 있다. 이상과 같은 국내·외적인 연구기류로 보면 어떤 형태로든 가까운 장래에 초전도 변압기의 실용화 가능성 여부가 판명될 것으로 보인다.

### 3.5 초전도한류기

전력수요의 증가에 대응하기 위한 계통설비의 확충이나 보강 등으로 인해 계통규모가 확대됨에 따라 계통에서 발생하는 사고전류는 해마다 증가하고 있으며 대도시를 중심으로 한 전력수요의 과밀화와 전원입지의 편재화가 진전되면서 그 현상은 더욱 심화되는 경향이 있다. 이와 같은 사고전류의 증가대책으로는 사고를 제거하기 위한 차단기의 차단용량을 향상시키거나 단락용량이 큰 전력기기로 교체하는 방법, 계통분리등에 의해 사고전류가 기존 차단기의 정격용량을 넘지 않도록 계통을 구성하거나 운용하는 방법 등이 있으나 이들 방법에는 여러 가지 기술적인 한계와 함께 경제적인 문제가 따를 것으로 예상되어 이 문제를 근본적으로 해결하기위한 대책으로 초전도한류기의 적용이 제안하고 있다.

초전도한류기는 초전도의 특징을 이용하여 계통의 단락사고시 단락전류를 차단용량 이내로 제한하는 장치로서 다른 전력기기와 직렬로 설치 하여



전력기기의 단락용량을 초과한 과도한 전류가 흐르지 않도록 한다. 초전도한류기에서 단락전류를 제한하는 방법에는 두가지 방법이 있는데 그중 하나가 초전도선재의 임계전류를 단락전류이하로 설정하여 단락전류가 흐르면 초전도가 상전도로 전이하여 상전도 상태의 높은 저항에 의해 전류가 제한 되는 하는 방식으로 SN 전이형이라 불리우기도 하며 교류용 금속계 초전도선을 이용하는 방법과 고임계온도 박막형 초전도소자를 이용하는 방법이 있다. 다른 하나는 산화물계 고임계온도 초전도체를 이용한 분야중 가장 실용화 가능성이 높은 대표적인 응용 예로서 자기차폐형이라 불리우는 방법이 있는데 이것은 초전도체를 차폐재료로 사용하는 방법으로 원통형으로 된 초전도체의 차폐효과를 이용하여 원통형 초전도체의 외측에 권선한 코일의 인덕턴스를 변화시켜 전류의 크기를 제한하는 방식이다.[16]

이와 같은 초전도한류기는 1978년 미국의 ANL에서 NBN박막 테이프선재를 이용한 한류기를 세계 최초로 개발한 이래 오늘날까지 독일, 일본, 프랑스, 스위스등을 중심으로 활발하게 연구되고 있으며 그중 SN전이형 초전도한류기의 대표적인 것으로 일본의 동경전력과 도시바가 공동으로 개발한 6.6kV/2,000Arms Nb-Ti 초전도한류기(그림8)와 최근 독일의 지멘스가 가까운 장래에 100kVA급 달성을 목표로 새롭게 제안한 다결정 YSZ기판위에 Laser Ablation법에 의해 Y123막을 성막하여 만든  $J_c$ 가  $10^8 \sim 10^9$  A/m<sup>2</sup>, 용량이 750 VA의 한류소자를 들 수 있다. 또한 자기차폐형 초전도한류기의 대표적인 연구에는 스위스의 ABB가 개발한 직경 20cm, 높이 35cm의 BSCCO2212 벌크를 이용한 100 KW/480 V 한류기로서 130~250A에서 8kA의 단락전류를 부하전류의 5배로 제한하고 있으며 현재는 스위스의 수력발전소에 10.5kV, 1MVA급 한류기를 설치하여 연속운전 시험중에 있다. 이 외에 캐나다의 하이드로 퀘벡, 일본의 전력중앙연구소, 전자기술 종합연구소, 동경전력등이 연구하고 있다.[17]

국내의 경우에는 연세대학교가 1989년부터 초전도 한류기에 대한 연구에 착수하여 1992년에 교류용 초전도선재를 이용한 220Vrms/100Apeak급 유도형 저온초전도 한류기를 제작하여 600Apeak의 단락전류를 100Apeak내로 제한하는데 성공함으로써 한류기의 실현가능성을 확인하였고, 1997년에는 직경 110mm, 높이 100mm의 실린더형

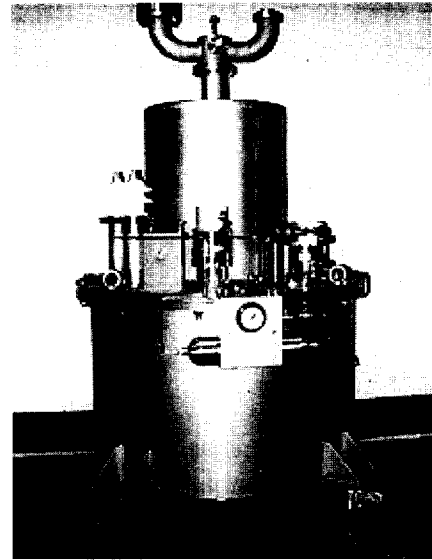


그림 8. 6.6kV/1kA급 초전도 한류기

BSCCO 튜브를 이용한 440V급 공극형 고온초전도 한류기를 개발하였다. 이 장치는 자기차폐형 한류기의 포화에 의한 임피던스의 감소를 억제하고자 core내에 공극을 설치하였으며, 실험을 통해 단락전류를 정격전류의 3~4배내로 제한하는데 성공하였고, 현재는 한류기의 용량증가 연구에 주력하고 있다.[16],[18]

## 4. 맺음말

지금까지 초전도기술을 응용하는 관점에서 다른 분야에 비해 과급효과가 크다고 본 몇몇 응용 분야만을 대상으로 그 기술의 개념과 현재 연구되고 있는 상황을 간략하게 서술하여 보았으나 지면 관계상 언급하지는 못하였던 것중 SMES와 같이 거대하지는 않으나 독립된 에너지저장원으로 활용할 것으로 기대되는 초전도 Fly Wheel이나 오늘날 여러 가지 공해로 인해 유발되는 환경공해중 녹·적조를 가장 경제적이며 고속·대량으로 제거할 수 있는 초전도자기분리장치등은 가까운 장래에 인류에게 닥칠 에너지·환경 문제를 해결하기 위한 방안의 하나로 활용될 것으로 보인다.

세계적으로 볼 때 초전도기술을 산업적으로 응용하려는 연구는 어느덧 30이란 세월이 흘렀지만 상업적인 면에서는 MRI/NMR외에는 별로 없게 현 실정이다. 그것은 아마 우리들이 흔히 말하는 액체헬륨사용으로 인한 경제성 문제라기 보다는 초전도기술을 상용화하기까지 필요한 기술이

그만큼 어렵거나 상용화가 가능한 새로운 개념의 창의적인 아이디어가 부족하기 때문이라고 생각한다. 아무튼 누구도 초전도기술이 실용화되는 시기에는 다소 견해를 달리 할지라도 초전도기술이 21세기의 새로운 산업사회를 이끌 기술로서 그 경제적인 규모가 천문학적이라는 데에는 아무런 이견이 없는 것 같다. 그렇다면 그 시기는 결코 많이 남은 것이 아니다. 전문인력이나 장비, 연구예산, 전문기업, 기반기술 축적 등 모든 면에서 선진국에 비해 절대 부족한 우리나라로서는 지금까지 해온 연구형태를 바꾸어 저온초전도기술과 고온초전도기술을 같은 연구영역 내에서 연구하는 것이 선진국과의 기술격차를 극복하여 다가오는 미래의 초전도시장에서 우리나라의 부가가치를 창출하는데 도움이 될 것이다.

끝으로 지면 관계상 초전도응용기술을 이해할 정도로 충분히 기술하지는 못하였으나 본고가 금번 한국초전도·저온공학회 창립을 기념하면서 초전도를 연구하거나 관심이 있는 모든 사람들에게 초전도의 산업적 응용측면에서 초전도기술을 알리는데 조그만 보탬이 될 수 있게 되기를 기대한다.

### 참고문헌

1. E.H.Rhoderick, "Introduction to Superconductivity", Oxford, 1980
2. M.N.Willson, "Superconducting Magnets. Clarendon Press", Oxford, 1983
3. "대한전기학회 기술조사보고 제1호 초전도응용 기술현황", 초전도응용 기술조사전문위원회, 1992
4. 한국전기연구소, "자기공명 영상진단용 초전도 마그네트 개발 최종보고서", 보건복지부, 1998
5. 한국전기연구소, "초고자장핵자기공명분광기 개발 연구기획", 통상산업부, 1997
6. E.B.Forsyth, "The 60Hz performance of superconducting power transmission cables rated for 333MVA per phase", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-103, No.8, pp.2023-2033, 1984
7. 류강식외, "Development and research activities on the cryogenic power transmission cable in korea", CIGRE, Vol.21, No.22, pp.8, 1996
8. 藤上 純, et. at, "高温超伝導 ケーブルシステムの開発", 低温工学, Vol.33, pp.128, 1998
9. J.D.Rogers, "Magnetic energy storage", IEEE MAG-17, No.1, pp.330, 1981
10. R.W.Boom&H.A.Peterson, "Superconductive energy storage for power system", IEEE MAG-8, No.3, pp.701, 1972
11. V.P.Agalakov.et.al,"Two 0.5MJ coils SMES system development and test results", the proceedings of the IEA symposium on use of superconductivity in energy storage, pp.141-149, 1994
12. 森井 외, "Super-GM Review", 超伝導發電連機器·材料技術研究組合, 1993
13. 백승규 외, "30(kVA) 초전도발전기용 계자코일 설계", '98 하계학술대회 논문집, Vol. A, pp.232-234, 1998, 7
14. 京谷好泰외, "超伝導應用技術", C.M.C, 1991
15. S.P.Mehta, et.al., "Superconductivity in Electric Power", Spectrum, 1997, 7
16. 배준한 외, "220Vrms/100Apeak급 초전도 사고전류제한기의 제작 및 특성실험" 대한전기학회 논문지, 제45권, 1호, pp.14-17, 1996, 1
17. B.B.Gamble, G.L. Snitchler and R.E. Schwall, "Prospects for HTS Applications", IEEE Trans.Magn., Vol.32, No.4, pp.2714-2719, 1996
18. Minseok Joo, et.al., "The analysis of the Fault Currents According to Core-Saturation and Fault Current Limiters", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.5, pp.1047-1050, June 1995