

왜 초전도인가? - 전력응용을 중심으로



홍계원

한국원자력연구소
기능성재료연구실 책임연구원
관심분야: 고온초전도재료 및
응용기기



현옥배

전력연구원 에너지환경고등연구소
책임연구원
관심분야: 고온초전도재료 및
응용기기

1. 머리말

1911년 Kamerlingh Onnes에 의하여 초전도 현상이 발견된 이래 수많은 초전도 물질이 발견되

었으며 이의 응용기술이 개발되었다. 전기저항이 없다는 고유한 특성으로 인하여 군사, 우주, 실험실용 등 특수한 경우뿐만 아니라 MRI의 자석처럼 일반의료용으로도 응용범위를 넓혀가고 있다. 한편, 1986년부터 발견된 고온초전도체(high temperature superconductor, HTS)는 액체 질소를 냉매로 사용할 수 있다는 장점으로 전력 기술에의 응용이 한층 더 기대되고 있다.

현재 Nb, NbTi, Nb₃Sn 등의 금속계 초전도체 (혹은 액체 헬륨을 냉매로 사용하는 저온초전도체 low temperature superconductor: LTS), YBa₂Cu₃O_x(Y123), Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x(Bi2223) 등의 산화물 초전도체 등 많은 초전도체가 알려져 있으나, 물질의 기계적 특성, 임계전류(Jc) 등의 전자기적 특성, 가공기술, 경제성, 환경요인 등의 이유로 선재로 가공하여 대전류 통전용 도체로 사용할 수 있는 초전도체는 제한되어 있다. 가장 많이 쓰이는 것이 NbTi 다심선재이고 Nb₃Sn, Nb₃Al 등의 A-15 화합물, 그리고 고온초전도체로는 Bi2223 등이 선재로 개발되어 사용되고 있다. 이러한 선재를 사용하여 초전도 응용의 가장 핵심부분인 고자장 자석을 만들어 사용하고 있다. 초전도체의 발견이후 가장 큰 관심분야인 전력응용(power

application)에서는 냉각을 위한 액체 헬륨 냉각설비의 설치 및 운용비가 높아 실용화 기기의 도입이 지연되었으나 액체 질소를 냉매로 사용하는 고온초전도체는 냉각비용을 현저히 낮추면서 초전도의 장점을 살릴 수 있어 가까운 장래에 응용이 가능할 것으로 기대되고 있다. 현재 초전도 전력기기의 개발은 응용 가능성을 탐구하는 단계를 지나 실용화 단계로서, 외국에서는 벤처기업들이 참여하여 기기 개발 및 경제성을 논하고 있다. 초전도 응용은 크게 전자응용(small scale application)과 전력응용(large scale application)으로 구분할 수 있는데 여기서는 대규모 응용을 중심으로 전력기술에 있어 고온초전도체의 응용을 논의할 것이다.

2. 초전도 전력기기의 특징

초전도 전력기기가 갖는 장점으로서는 무저항특성에 의한 대전류 통전 및 그에 따른 기기 소형화이다. 도체의 저항이 전혀 없거나(직류전류에 대해) 혹은 작으므로(교류전류에 대해) 단면적이 작은 도체를 통해 열 손실 없이 큰 전류를 수송할 수 있다. 예로서, 100 A의 전류수송을 위해 일반 구리선은 직경이 1 cm 이상이어야 하지만, 초전도선(Cu

- NbTi matrix)은 0.5 mm로 충분하다. 초전도 발전기/모터의 경우, 철심을 사용하지 않고도 계자(rotor)의 자기장을 크게 할 수 있으므로 설계가 간단해져서 냉각시설을 포함하여도 기기의 크기를 약 1/2로 줄일 수 있다. 초전도 변압기에서는 코일이 작아짐으로 인해 철심이 작아지므로 무게 및 크기를 1/2 정도로 축소할 수 있어, 향후 도시지역에서 발생할 수 있는 공간 확보 문제에 유연하게 대처할 수 있다. 아울러, 기기가 작아짐으로 설계, 제작 및 운용이 간단해져 기기의 신뢰성을 높일 수 있다. 그림1은 송전케이블 소형화의 예를 보인 것이다. 현재 일본 동경전력과 Sumitomo사가 공동으로 개발하고 있는 HTS 송전 케이블은 직경이 130 mm의 SS pipe 속에 3상의 HTS 케이블 코어가 들어 있는데, 기존 OF(oil filled) 케이블(직경 138 mm) 판로를 재사용하도록 설계되고 있다.

초전도 전력기기는 이러한 에너지 손실 감소, 높은 전류밀도에 의한 기기의 소형화에도 전력계통 안정화에 큰 장점이 있다. 현재의 전력 계통은 발전, 송배전 및 부하로 구성되어 있는데, 대부분의 발전소는 환경 등의 이유로 주 소비지인 도시지역에서 멀리 떨어진 곳에 위치하고 있으며, 안정적 공급을 위해 송전선을 환상으로 연결하고 있는 등의 이유로 장거리 송전이 불가피하게 되어 있다. 여기서 초전도 전력기기의 장점이 나타난다. 예로서, 발전기의 출력을 높이기 위해서는 전기자의 ampere-turn을 높여야 하는데(철심자석이 약 1 Tesla로 제한되므로), 이 때 임피던스 Z가 증가하고, 또 전력계통으로부터 보면 Z의 증가는 송전거리 증가에 해당하므로 발전

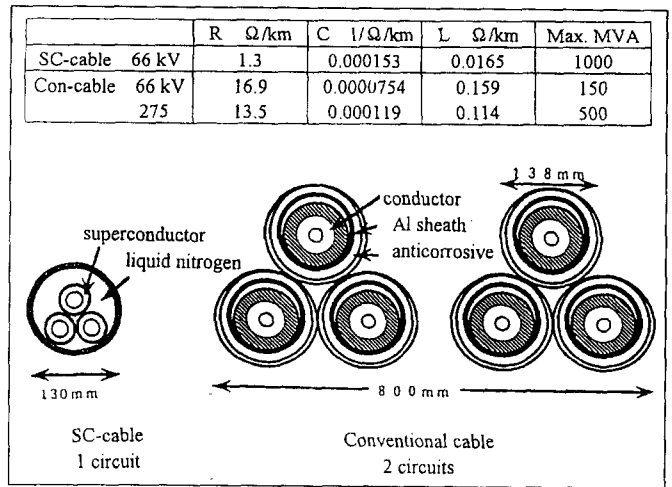


그림 1. 고온초전도 케이블과 OF 케이블의 크기 비교

기 사이의 동기화를 약화시켜 전력 계통의 정태 안정도 및 과도 안정도를 해치게 되며 이를 해결하기 위하여 자동 전압 조정기(AVR)나 전력계통 안정화 장치(PSS)등의 추가설비가 필요하게 된다. 초전도 발전기는 초전도 자석(약 5 Tesla)을 사용하므로 전기자의 동기reactance X_s 를 크게 줄일 수 있다. 초전도 송전선의 임피던스 또한 상전도의 그것에 비해 크게 낮다. 그러므로, 초전도 전력기기를 채택함으로써 계통 및 전압 안정도를 비약적으로 향상시키면서 더 많은 유효전력을 공급할 수 있고, 설계 및 운용이 용이해져서 전력공급의 안정성과 신뢰성을 높일 수 있다. 이러한 초전도 기술의 응용에는 초전도 재료, 저온공학, 전기 공학, 전자 공학 등의 복합 기술이 연계되어 있으며, 이론적으로는 전기를 사용하는 모든 기기는 초전도화에 의하여 효율을 높일 수 있으나, 실용성을 고려하면서 현재 추진되고 있는 응용 분야를 보면 아래 표1과 같이 분류할 수 있다.

여기서 소규모 응용인 정보통신 및 의료 분야와 케이블, 환류기, 자기차폐, 초전도베어링 등을 제외하고는 대부분 초전도 코일 및 자석을 응용하는 것이다. 다시 말해서 초전도 자석이 상전도 자석으로는 불가능한 새로운 응용을 개척했음을 의미한다. 실험실용 자석, NMR 및 MRI용 자석 등 고강도, 고안정, 고자기장 자석은 대부분 초전도체를 사용하여 제작되어 있다. 또한, 자기 부상열차(MLX01) 혹은 자기추진선(Yamato I), 그리고 Fermi Lab. 등의 가속기에도 초전도 자석이 쓰이고 있다.

이렇듯 초전도 자석은 상전도 자석에 비해 기능적인 면 및 경제성에서 월등히 우월하다. 그러나, 초전도 자석이 초대형으로 건설되거나, 혹은 경제성을 중시하는 전력기기 응용에서는 조건이 달라진다. 대형 초전도toroidal coil에 전기 에너지를 저장하는 SMES 개념이 나온 지 오래고, 실제 저온초전도체를 사용하여 SMES를 제작하고 미국의 발전소에서 실증시험도 실시되었지만

표 1. 초전도 기술의 응용 분야

분야	응용
전력기술	에너지저장 장치(SMES, Flywheel), 송전케이블, 발전기, 변압기, 한류기, MHD 발전, 핵융합, 모터 등
교통 응용	자기부상열차, 전자 추진선, 전자 발사 장치, 전기자동차 등
자원, 환경	자기광선, 자기 분리 (선광, 동위원소 분리, 오염된 물의 처리), 자기 지질탐사 등
산업 응용	NMR 분석기, 고분해능 전자현미경, 검출기(고에너지 입자, microwave, IR), 자기필드, 초전도 베어링, 가속기, 우주공간 simulation 등
의료	MRI, 초전도 사이크로트론, 중간자 조사장치, 심자계(MCG), 뇌자계(MEG) 등
전자기술	연산회로, 전자회로(SFQ 회로 등), 초고속 컴퓨터, 안테나, 필터, 믹서, 공진기 등

현재는 군사용 UPS 등 특수한 경우에만 쓰이고 있을 뿐이다. 초전도 모터는 미 해군연구소(Naval Research Laboratory)에서 고속정용으로 개발했으나, 민수용으로의 전환은 이루어지지 않았다. 그 외 대용량 초전도 변압기, 송전선용 한류기 등의 개발 및 실증시험이 완료되었으나 실제 사용은 미지수이다. 또한, 1970년대 및 80년대에 걸쳐 유럽의 Siemens사, 미국의 BNL 등에서 LTS 송전케이블을 제작하고 실증시험까지 마쳤으나 아직도 쓰이지 않고 있다.

그러면 초전도 전력기술의 응용에 있어 어떤 장애가 있는가? 초전도 기술은 기존 상전도 기술과는 판이하게 다른 새로운 기술이어서 해결되어야 할 여러 문제가 있다. 그 중요한 점을 들어보면,

(1) 액체 헬륨 냉각 시스템은 설계 및 제작이 복잡하고, 설치비가 비싸며, 운용 경비 또한 대단히 높다. 따라서 대용량으로 초전도화에 따른 에너지 절감 이득이 아주 크거나 군사, 우주 산업

등 특수한 분야가 아니고는 일반 상업용으로 가까운 장래에 응용 가능성이 희박하다. LTS 케이블, 변압기 등이 개발되어 있어도 계통에 이용되고 있지 않은 것이 현실이다.

(2) 동작 온도가 저온에 한정되어 있으므로 냉동 시스템이 전력기기와 함께 설계되어야 한다. 이런 부가적인 장치 때문에 경제성이 있으려면 어느 정도 이상의 용량을 가져야만 하는데, 이 한계 용량이 비교적 커서 작은 전력기기를 대체하기 어렵다. 예로서 HTS 케이블과 변압기의 경제 용량은 각각 1 GVA와 30 MVA로 분석되고 있다.

(3) 기기 종류에 따라 경제적 한계 용량이 크게 달라서 발전으로부터 송배전에 이르는 전 구간에서 범용성(汎用性)을 갖도록 완전히 연구되어 있지는 않다. 그러므로, 초전도 기기를 적용하려면 기존 시스템의 개조가 필연적이어서 부가적인 경비가 소요된다. 예로서, 고온 초전도 케이블의 경우에도, 경제적 한계 용량이 1 GVA 정도이므로 전력 계

통도 그에 맞게 개조되어야 한다. 한편, 한류기 및 변압기는 계통에의 영향이 적으므로 우선 응용 대상일 것이다.

(4) 초전도체는 과전류에 의해 켄치될 수 있어서 사고후 즉시 재투입하기가 어렵다. 그러므로, 한류기에 연결해서 쓰도록 설계되어야 한다.

(5) HTS의 경우는 상기 (1) ~ (3)의 제약이 크게 완화된다. 액체질소 냉각은 액체헬륨에 비해 저렴하고(1/10 이하) 냉각효율이 높아서(64배) 경비 면에서 약 1000배의 효과가 있으며, 설계 및 운용이 간단하므로 적절한 도체 개발이 이루어지면 응용 가능성이 크게 높아질 것이다.

(6) 전력 계통에 있어 기기의 수명은 약 30년 정도이고 정비 기간이 매 1 ~ 2년이므로 이 정도 장기간 사용에도 견딜 수 있는 신뢰성이 확보되어 있지 않다. 유일하게 일반 민수용으로 쓰이는 MRI용 초전도 자석도 이제 10여 년의 역사를 가졌을 뿐이다. 이것은 신기술 응용에 있어 공통적인 현상으로, 기술자 중심이 아닌 수요자 중심으로 기술을 개발함으로써 극복될 것이다.

3. 고온초전도 도체 (conductor) - PIT 및 coated conductor

초전도 기술이라는 기술의 혁신은 새로운 재료의 개발에 의해 가능하다. 전력 기술에 있어 가장 필요한 것은 선재(wire)로서 HTS 선재의 성능 향상이 곧 고온초전도 기술의 혁신을 가져올 수 있다. 고온초전도 도체는 냉매로서 값이 싸고 증발열이 높은 액체 질소(비등점 77 K = -196 °C)를 사용한다. 그러나 실제 응용 온도구간은 77 K에 국한되지 않고 냉동기술의 발달에 힘입어

20 K 전후로도 확대되고 있다.

대표적인 고온초전도 선재는 은피복 Bi2223로서, 은 튜브에 Bi2223분말을 넣고(powder in tube, PIT), 스웨징(swaging)-인발(drawing)하고, 다시 은 튜브에 넣는 적층(restacking), 그리고 swaging-drawing한 후, 압연(rolling)과 열처리를 적절히 반복하여 은 매질에 수많은 Bi2223 세립이 테이프형 선재로 만든 것이다. 이 과정을 통하여 산화물 초전도체의 이방성 문제를 해소하고, 표면적을 넓히며, 세라믹스의 고유성질인 취성 및 변형에 대한 취약성을 어느정도 극복할 수 있다. 이런 Ag/Bi2223 선재의 임계전류밀도는 77 K에서 3×10^4 A/cm² 이나 자기장 하에서는 Jc가 급격히 낮아지는 경향이 있다. (그러나 온도가 20 K 이하로 되면 Bi2223 선재도 H ~ 20 Tesla 이상까지 높은 값을 유지한다.) PIT 이외에 CTFF (continuous tube forming and filling) 등의 장선화에 유리한 공정도 개발되었으며 도체 임계전류 향상 및 장선화 연구와 병행하여 최근 비록 실험용이기는 하나 부분적으로 상품화로 시판되고 있다.

은피복재 Bi2223 다심 테이프 선재외에 최근에 YBCO coated conductor 제조기술이 개발되었다. 이는 정렬된 Ni 등 금속모재 위에 중간막(buffer layer ; YSZ, CeO₂ 등)을 입히고, 그 위에 YBCO thick film(1 μm 이상)을 입힌 것으로 외부자기장이 없는 상태에서 Jc(77 K)가 10⁶ A/cm²에 이르고, 자기장 하에서도 높은 값, Jc(H_{⊥film} = 5 Tesla, 77 K) ≈ 2 × 10⁵ A/cm²를 유지하는 등 SrTiO₃(STO) 기판 위에 입힌 YBCO film과 거의 같은

우수한 특성을 가지며 Bi-2223와 같이 비싼 은을 피복재로 사용하지 않고 Ni을 모재로 사용할 수 있는 장점이 있다, 그러나 공정기기가 비싸고 박막의 증착속도가 대단히 느리기 때문에 이를 해결하는 것이 장선화의 관건이다. 이런 테이프를 적층하여 대전류용 도체를 구성할 수 있고, 금속 파이프(former) 위에 비틀

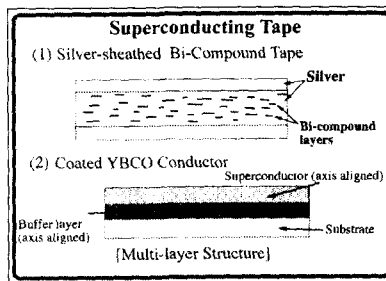


그림 2. 은피복재 Bi2223 테이프와 YBCO 테이프형 도체. 배향된(aligned) 금속(Ni 등) tape 위에 YSZ 혹은 CeO₂ 등의 buffer layer를 입히고 YBCO를 증착한다.

어 감음으로서 케이블 코어도 제작할 수 있다. 제조 방법으로 미국의 LANL의 IBAD(ion beam assisted deposition) 및 Oak Ridge National Laboratory (ORNL)이 개발한 RABiTS (rolling assisted biaxially textured substrates) 등을 위시하여 여러 가지 방법이 알려져 있고, 장선화 연구가 활발히 진행되고 있다.

HTS wire가 실용화되기 위해서는 통전 능력과 도체 값(cost)이 중요한 요소가 된다. 현재 개발되어 있는 km 정도길이의 Ag/Bi2223 다심선재는 임계전류밀도는 77 K에서 30,000 A/cm² 정도로서 실용화 요구수준인

100,000 A/cm²의 1/3 정도에 머물고 있으며 이것은 하나의 테이프 선재에 흘릴 수 있는 임계전류값을 20 ~ 30 A에서 100 A 이상으로 향상시켜야 함을 의미한다. 또한 대부분의 전력기에서 요구하고 있는 교류 응용시의 교류손실도 현재의 1/10로 낮추는 것이 필요하다. 한편, 경제적인 면에서 보면, 도체의 송전 능력에 대한 경비가 LTS 선재(NbTi 다심선재 등)와 비슷한 10 US\$/kA/m(1 kA의 전류를 송전할 수 있는 선재 값이 1 m 당 10 US\$)이 되어야 사용자측(utility company)에서 전력기기의 투입을 고려할 수 있는 수준이나 현재의 선재 생산비용은 상기 요구 값의 약 100배 정도이며, 금세기 내에 10배까지 낮아질 전망이나 여전히 높은 수준이다. 현재 EURUS나 BICC와 같은 회사가 통전전류 26 A (77 K)인 선재를 m당 20\$정도에 판매하고 있으며 임계전류밀도의 향상, 생산자동화, 피복재 대체(은 대신 기타 금속) 등을 통하여 단가 인하가 기대되고 있다.

4. 고온초전도 전력기기 응용 및 연구개발 현황

저온초전도 선재 제조기술은 잘 개발되어 상용화된 MRI용 초전도 자석이나 입자가속기, 실험실용 고자장 자석제작, 또는 초전도 케이블 개발등에 활용되고 있으나 경제성 문제로 실용화가 제한되어 왔다. HTS의 발전은 초전도 전력기기의 경제적 손익분기점의 결정에 여러 가지로 영향을 미치므로 앞으로 HTS 선재의 개발에 따라 실용화 범위가 크게 변화할 것으로 예상되고 있는바 여기서는 전력기기의 HTS 응용을 중심으로 살펴볼 것이다.

그러나 초전도 응용이 LTS - HTS로 명확히 구분되지는 않은 것이어서, 기존 초전도 기기의 역사를 살펴보고, 그리고 HTS 응용 전력기기의 개발 전망을 알아 볼 것이다. 현재 진행되고 있는 연구 개발 상황은 한류기, 변압기, 모터, 송전 케이블 및 Flywheel에서는 HTS 방식이 주류이고, 고자장 자석 및 발전기와 SMES의 경우는 고자장장용 코일을 만들 수 있는 HTS 선재 개발이 미흡하여 LTS 방식이 계속되고 있다.

가. 에너지 수송 및 이용
초전도한류기(Superconducting fault current limiter, SFCL)

한류기(fault current limiter)는 지락, 낙뢰 등 사고시 생기는 과전류를 차단하여 전력기기를 보호하는 장치이다. 저항형 혹은 유도형으로 나뉘며, 어느 쪽이든 초전도체 퀘칭시 회로의 임피던스를 증가시켜 교류전류 증가를 억제한다. 이런 초전도 한류기는 사고 발생 후 1/1000초 이내에 사고전류를 효과적으로 제한할 수 있음이 확인되어 실현 가능성이 가장 높은 초전도 전력기기로 알려져 있다. 초초전도 전력시스템을 구축하기 위하여 필수적인 장비로서 특히 루프형 송전계통에서는 더욱 요구되는 보호장치이다.

일본의 경우 도시바와 동경전력(TEPCO)이 공동연구로 6.6 kV/1.5 kA급의 유도형 초전도 한류기를 개발, 시험하였고, 500 kV를 목표로 하고 있다. 프랑스 GEC-Alstom사의 한류기는 저항형으로, 40 kV/1 kA급의 시험을 마쳤고, 1998년까지 40 kV/5 kA급을 63 kV 시스템에 적용하며, 그 후 225 kV급을 계획하고 있다. HTS의 경우는, 미국의

Lockheed Martin/ASC는 1995년 2.2 kA/2.4 kV급 surge protector를 제작하여 시험하였고, 17 kV급을 개발중이다. 스위스 ABB (Asea Brown Boveri)는 Bi2223 원통을 사용하는 10.5 kV, 1 MW급 차폐형 한류기를 제작하여, 1996년 11월부터 1997년 4월까지 5.5 MVA 발전기에 연결하여 시험하였고, 10 MVA급 개발을 진행하고 있다. 이 외에도 여러기관에서 한류기 개발을 계속하고 있는데, 용량 증대와 기기 소형화가 큰 이슈이다. 국내에서는 1995년 LTS 선재를 사용한 220 V/100 A급의 유도형 초전도 한류기와 1996년에 HTS 도체를 사용한 400 V급 차폐형 한류기가 기초연구단계로 개발되었다.

초전도 변압기

초전도 변압기는 전류 밀도가 큰 초전도 선을 사용함으로써 절연을 포함한 권선부의 전류 밀도가 종래 기기의 10~20배로 증가되기 때문에 권선부 단면적이 작게 되고, 또한 암페어 턴이 크게 되므로 철심의 단면적 및 길이를 작게 할 수 있어서 소형화가 용이한 것이 장점이다. 1981년 미국의 Westinghouse사의 1000 MVA기의 개념 설계에 의하면, 초전도 변압기는 상전도 방식에 비하여 36%의 중량감소와 0.15~2%의 효율향상을 얻을 수 있는 것으로 분석되었다.

초전도 변압기의 연구 개발은 고효율, 소형, 경량화의 이점으로 향후 전력 시스템의 초전도화에 대비하기 위한 송변전 기술로서 정착될 것으로 예상된다. 현재의 변압기 효율도 90%에 이르므로 초전도 변압기의 응용은 기기의 소형화 여부에 달려있다. 초전도 변압기 개발은 1983년 프랑스의 Alstom

사에 의해 50/60 Hz용 교류손실이 극히 적은 극세 다심(LTS) 초전도선재가 개발된 이래 활발히 진행되어 1988년 프랑스 Alstom사는 220 kVA급을 제작하였고, 스위스 ABB사는 1992년 330 kVA 단상 변압기를 개발하였으나, 헬륨 냉각장치의 운영비 때문에 상업화시키지 못했다. 일본에서도 1993년 1000 kVA급 초전도 변압기를 제작한 바 있으나 실증시험에는 이르지 못하였으나 HTS 변압기는 냉각비용이 낮으므로 경제성이 있을 것으로 판단된다. 표 2에서 보듯이, ABB의 분석에 의하면 40 MVA 이상에서 HTS 변압기가 상전도 변압기에 대해 경제성이 있다. 미국의Waukesha/IGC/Rochester, G&E/ORNL, 일본의 Kyushu대학/Fuji전기 등이 500 ~ 1000 kVA급 prototype을 제작하고 있다. 유럽의 ABB/EDF(프랑스 전력)/ASC 컨소시엄은 630 kVA급을 제작하여 1997년 3월부터 실계통 시험을

표 2. 100 MVA, 220/15 kV 변압기에 대한 상전도 및 HTS 방식의 비교 (ABB의 분석결과).

	상전도 방식	HTS 방식	이득
무게 (weight, ton)	130	60	-53 %
손실 (loss, kW)	275	85	-69 %
경비 (상대적비교)	2.0	2.0	0 %
설치비	3.1	2.4	-22 %

* 도체의 손실 0.25 mW/Am 및 0.1 Tesla 이하에서 전류밀도 10⁴ A/cm²를 가정.

수행하였고 (그림 3 참조), 1500만 달러의 예산으로 30 MVA급 (변전소 변압기 용량) 개발에 착수하였다. 이 계획에서 기대하는 이점은 (현재의 Bi2223 선재로) 크기 및 무게가 1/2로 줄며, 절연유를 사용하지 않고, 부수적으로 사고전류제한 기능이 생긴다는 것이다.

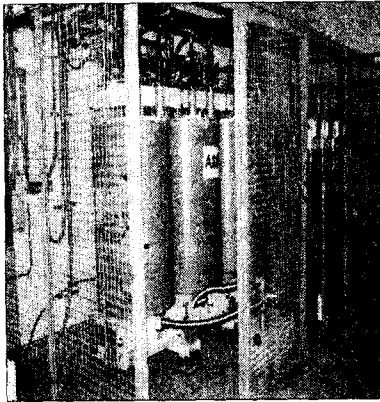


그림 3. 계통에 연결되어 시험중인 ABB의 고온초전도 변압기. 용량 630 kVA, 18.7 kV/420 V, 3상, 77 K운전

초전도 송전 케이블

초전도 송전 케이블의 특징으로는 (가) 대용량 및 저손실화, (나) 저 전압 송전, (다) 케이블의 소형화 등이며, 그 이외의 장점으로, surge free, 도시 경관에의 기여 등이 있다. 전력 수요의 증대에 대처하기 위해서 UHV송전과 병행하여, 초전도 도체, 전기 절연, 열 절연 등의 케이블 부품과 케이블 단말, 냉각 시스템 등의 대용량의 지중 케이블 기술 개발이 미국의 BNL, 독일의 Siemens, 일본의 ETL을 필두로 하여 세계 각국에서 진행되었으나, 헬륨 냉각장치의 높은 시설비 및 운영비 때문에 실증 시

험 연구가 완료되었음에도 불구하고 실제 투입은 실행되지 않았다. 현재 LTS 케이블은 입자가속기에의 전력 공급용으로 BNL에서 쓰이고 있고, 유럽 가속기 연구소인 CERN이 도입하고 있다.

HTS 케이블의 경우 0.5 ~ 1 GVA 정도용량이면 경제적으로 손익분기점을 초과하는 것으로 분석되었으나 초전도 케이블의 재투입을 위해서는 다른 계통 기기도 이에 맞게 변경되어야 하는 문제점이 있다. 이런 문제에도 불구하고 초전도 케이블이 필요한 것은 현재의 상전도 기술의 한계 때문이다. 한국의 경우만 보더라도, 수도권의 전력 수요는 계속 증가하고 있는데, 발전소로부터 수도권까지의 거리가 300여 km에 달하므로 장거리 수송을 위해 기존 154 kV와 345 kV에 더하여 현재 765 kV 가공선로 설치가 시작되었다. 그러나, 고압 송전선은 설치상 한계 (이론적 한계 약 1500 kV) 이외에도 여러 가지 환경 문제를 일으키고 있다. 그 대체 방식으로서, 그리고 가공 선로가 불가능한 연구

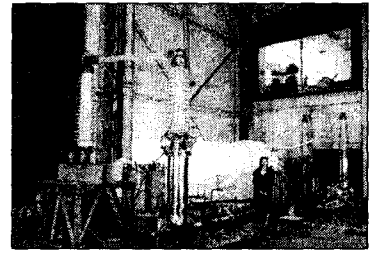


그림 4. 고온초전도 케이블의 통전시험(TEPCO/Sumitomo)

밀집 지역에서의 송전 수단으로, 지중 선로가 있는데 이 경우 초전도 케이블은 큰 장점을 가진다. 특히, 일본 동경전력의 계획에서 보듯이, 도심지 전력 수요 증대에 부응한 OF 케이블의 증설 대신, 기존 관로에 용량이 배가된 HTS 케이블을 사용함으로써 관로 증설을 생략할 수 있다. 초전도 케이블 개발에는 국토가 작고 인구밀집도가 높은 일본이 가장 적극적으로, TEPCO/Furukawa와 TEPCO/Sumitomo는 Bi2223 선재를 사용하여 50 m의 66 kV - 0.1 GVA 송전선을 개발하고 통과전 시험중이며, 1 GVA를 목표로 하고 있다. 그 외, 미국의 EPRI/Pirelli/ASC 및 Southwire Co./ORNL의 컨소시엄, Florida전기/EURUS, 유럽의 DEFU(벤마크전력)/NKT/RISO 컨소시엄, EDF 및 ENEL(이탈리아 전력), Pirelli, Siemens, BICC사 등이 HTS 케이블을 개발하고 있다.

모터

초전도 모터의 장점중의 하나는 특히 선박의 경우에서 필요한 것처럼 분당 회전수가 낮고 회전력이 크다는 점이다. 미국 해군 연구소에서는 1980년대 중반 NbTi 도체를 쓴 초전도 모터를 고속정에 장착하여 시험한 바 있

표 3. OF와 HTS 케이블의 비교 (BICC의 분석)

시 설 비		OF	HTS			
		(Ecu M)	(Ecu M)			
시 설 비	케이블	17.1	31.5			
	부대설비	2.2	4			
	설치	4.2	5.7			
	냉각계통		3.1			
	계	23.5	44.3			
운 영 비		OF	HTS	Ecu/kWh		
		(MEcu/year)	(MEcu/year)			
		전력손실	0.31		0.01	0.04
		냉각계통			0.19	0.04
계	0.31	0.20				

다. 최근에 개발된 것으로는 미국 DOE의 SPI (Superconducting Partnership Initiative) 지원의 일부로서 Reliance Electric사가 ASC의 HTS 선재를 사용한 AC 동기모터를 제작하여 1800 rpm에서 200 hp 출력을 보였다. 이 모터는 동급 상전도 모터에 비해 열손실 50%, 크기를 60% 감소시켰으며 2차 계획에서는 1998년에 1000 hp, 2000년까지 5000 hp의 출력을 목표로 하고 있다.

나. 에너지 생산(발전기) 및 저장(Flywheel, SMES) Magnetic bearing과 HTS flywheel energy storage (FES)

전기에너지는 사용이 편리한 반면 저장이 어렵다는 것이 최대의 단점이다. 이에 따라 초전도 현상의 발전이후 많은 연구자들의 관심의 대상이었다. 이것은 발전설비의 특성상 수요에 따라 발전량의 조절이 쉽지 않으므로 유희전력을 저장하여 최대부하시에 사용하거나 정전시에 방전하여 무정전 전력계통을 실현시키려는 목적이다. Flywheel energy storage는 전기에너지를 휠의 회전운동 에너지로 바꾸어 저장하는 방식으로, 고온초전도체의 높은 자기부상력을 이용한다. 원리적으로는 YBCO 벌크를 바닥에 설치하고, 그 위에 영구자석이 붙어있는 휠을 적절한 위치에 두어 시스템을 냉각시키면 된다. 이 경우 초전도체에 자석을 가까이 하고 field cooling시켜 자속이 일부 포획되게 하면 자석과 초전도체 사이에 인력과 척력이 공존하게 되어 위치안정을 도모할 수 있다. 중요한 문제는 휠에 부착된 영구자석의 자속밀도가 균일하지 않음으로 초전도체에 교류

손실을 야기하여 회전 마찰력을 만든다는 점이다. 이렇게 초전도 부상으로도 손실이 전혀 없지는 않으나, HTS 베어링과 같다고 하면 손실을 0.1 %/hr 이하로 할 수 있어서, 전력 입출력시의 손실 약 4 %를 합쳐 90 %의 에너지 회수가 가능하다고 예측되고 있다. (이것은 SMES에 버금가는 높은 효율이다. 참고로, 현재 사용되는 양수발전의 에너지 회수율은 70 % 정도이다.) 그러나 현실적으로는 저장 손실이 상기의 값보다 훨씬 크므로, 대단히 균일하면서도 대형인 자석 개발이 과제이다. 현재 제작된 HTS FES 규모는 0.1 ~ 1 kWh 이고, 실용화급인 10 MWh급은 개념설계 단계이다. 미국의 ANL/Common Wealth Research Co, Houston대/Boeing, 영국의 Cambridge대/IEA, 독일의 Karlsruhe 등이 HTS FES 계획을 진행하고 있다. 일본은 더 적극적이어서, NEDO의 지원 하에 ISTEK/Ishikawajima 중공업 등의 기업 컨소시움이 FES project를 진행하고 있다.

초전도 자기에너지 저장장치 - SMES

SMES는 자기장의 형태로 에너지를 저장하는 장치인데, 대형 초전도 코일과 입출력 장치로 구성된다. 그 특징으로는 저장 효율이 높고(99%), 응답성, 부하추종성이 우수하며, 정전류원이기 때문에 계통의 단락용량을 증가시키지 않으며, 소규모 용량에서도 실용화가 가능하다는 점 등이다. SMES는 애초 유희 전력을 저장했다가 최대부하시에 방전시키는 부하평준화용으로 인식되었으나, 반응시간이 짧다는 점을 이용하여 송전 시스템의 안정, 순동예비력, 전압 조절기, FACTS

에의 이용이 예측되고 있다. 어느 용도이건 자기장이 높을 수록 저장에너지가 크므로 고자기장이 필요한데, 이런 용도의 고온 초전도체가 개발되어 있지 않고, 더욱이 대규모 시설이 필요하므로, 현 단계에서는 저온 초전도를 포함해서 대규모 SMES 개발은 개념설계 정도에 머물고 있다. 그리고 소형(수 MJ급) SMES는 부하 평준화용으로 쓰이고 있는데, 미국 ASC사는 micro(수 MJ - 수 MW) SMES를 상용화하고 있으며 미 공군 등이 주고객이다. 일본에는 ISTEK의 100 kWh/40 MW급 토로이드형, 기업 컨소시움인 RASMES (Research Association for SMES)의 6 MWh급 토로이드형 (Maglev용), 전철 부하 평준화를 위해 일본 Kyushu 전력이 개발한 1 kWh (3.6 MJ) - 1 MW급 SMES(1998년 3월 시험 시작) 개발이 있다. 국내에서는 한국전력이 기초전력공학공동연구소와 공동으로 0.5 MJ SMES 및 입출력 장치를 개발한 바 있다. 이상은 LTS SMES에 관한 개발결과이다. HTS의 경우 고자장용 선재 개발이 미흡하여 ASC가 Bi2223 선재를 이용하여 개발한 4-20K 동작용 소형 SMES를 시험적으로 개발하는 등 아직은 초기 단계이다.

초전도 발전기

전력 계통에 초전도 회전기의 응용으로서는 초전도 발전기, 초전도 동기조상기 등을 들 수 있다. 이들의 특징으로는 (가) 발전기의 제작 한계용량(1,500 MVA)의 확대 (출력 계수가 종래 발전기의 2 ~ 5배로 증가), (나) 소형 경량화(동일 용량의 중량 : 50%, 축길이 : 60%), (다) 효율의 향상(2극 1,200 MVA의 경우

종래 기의 손실의 39%로 감소), (라) 계통 안정도 향상, (마) 발전기 단자 전압의 고압화 가능성 등이다. 초전도 발전기의 가장 대표적인 프로젝트는 일본의 Super-GM(Superconducting Generation Equipment and Materials)으로 70 MW급을 제작하여 현재 관서전력 구내에서 시험 중에 있고, 200 MW급 pilot 기 개발을 목표로 하고 있다. 국내에서는 20 kVA급 초전도계자형 발전기가 1988~1994까지 개발되었으며, 1995년부터 기초전력공학공동연구소와 전력연구원이 초전도 발전기에 관한 기초 연구를 수행 중에 있다. 또한, 전기연구소는 1 MVA급 초전도 발전기 개발을 진행하고 있다. 이들은 모두 LTS를 사용한 결과로서 SMES의 경우와 같이 HTS의 경우는 고자기장 코일을 만들 수 있는 선재 개발이 미흡하여, 현재는 소형 회전자의 코일을 제작하는 단계이다. 예로서, GE/IGC/NY Mohawk Power Co.가 100 MVA HTS 발전기 project의 첫 단계로 Bi2223 선재를 사용한 1.5 MVA급 코일(34 A at 25 K, 1165 turns)을 제작하여 시험하였다. 기대되는 이점은 동급의 상전도 기기에 비해 크기가 1/2로 줄어들고, 손실 또한 1/2로 줄어든다는 것이다.

5. 맺 음

새로운 기술이 실용화되기 위해서는 (1) 그 기술이 종래 기술에 비해 월등히 우월하든가, 혹은 (2) 그 기술만의 독특한 응용 분야가 있어야 한다. (1)의 경우, 초전도 전력기기가 명백한 장점

을 갖고 있음은 사실이나, 경제적 관점에서 기존 상전도 기술의 진보와의 경쟁에서 월등히 우월해야 한다. 예로서, 초전도 케이블은 진보된 XLPE 혹은 GIL 보다 확실한 경제적, 기술적 장점을 보여야 한다. (2)의 경우로서 고자기장 코일은 상전도 방식으로는 불가능한 초전도만의 분야이다. 초전도 베어링 (flywheel), SMES, 발전기 등은 고자기장 선재 및 주변기술의 발전에 따라 실용화가 이루어질 것이다. 초전도 기기는 일반적으로 소형화 및 계통안정이라는 장점에 더하여 환경친화적인 면이 중요성을 더해가고 있으므로 이를 잘 활용하여야 한다. 또한 현재 양산화 기술이 어느정도 확립된 Bi-2223 선재가 20K 정도의 온도에서는 실용화에 필요한 특성을 보이고 있으므로 우선적으로 이 온도범위에서의 실용화를 모색하는 것이 필요하다. 20K의 저온환경은 최근의 closed cycle 냉각기술의 발달에 따라 4.2K 냉각에 비하여 현저하게 낮은 비용으로 실용화시킬 수 있으며 77K용 초전도 전력기기의 실계통투입에 필요한 운전자료를 확보하기 위해서도 필요하다. 초전도 전력기기는 용량이 크고, 현장시험을 통한 신뢰성 검증에 1 ~ 2년이 걸리므로 지금의 추세로 보아 2010년을 전후해서 응용이 실현될 것으로 보인다.

참고문헌

[1] TEC/WTEC Workshop on Power Applications of Superconductivity in Japan and Germany, Washington

DC (July 1996).
 [2] Superconductivity for Electric Systems Program Plan, FY 1996 - FY 2000, USDOE (1995).
 [3] 초전도 전력 응용 기술 개발, 토탈 시스템 등의 연구, 도입 효과의 조사 연구 (일본어 판) (테크노바(주), 1994).
 [4] ISTE Journal 10(1-4), 11 (1) (ISTEC, Tokyo, 1977-8).
 [5] *Advances Toward Power Sector Applications* (IEA HTS Programme, ANL, 1997).
 [6] *International Workshop on HTS Power Transmission Cables* (Milan, Italy, 1997).
 [7] R. F. Giese, *Directory of Superconducting Device Projects Bearing upon the Electric Power Sector* (IEA HTS Programme, ANL, 1997).
 [8] R. F. Giese, *Use of Patent Search to Assess the Market Status of Superconducting Cables*, (IEA HTS Programme, ANL, 1997).
 [9] *Superconductor Week 11 (21-25)*, (1997).
 [10] John R. Hull, *IEEE Spectrum* 34(7), 20 (1997); W. Sweet, *IEEE Spectrum* 34(1), 38 (1997); [14] W. Paul *et al.*, preprint (submitted to ISS'97).

< 주진호 위원 >