

실용화에 근접한 고온 초전도 변압기

이지광, 차귀수, 한송엽

우석대학교 전기공학과, 순천향대학교 전기공학부, 서울대학교 전기공학부

1. 머리말

초전도 분야의 전문가들은 고온 초전도 전력 기기가 늦어도 21세기 초에는 실용화될 것으로 예상하고 있으며, 이 중에서 가장 먼저 실용화가 가능하고 수요가 제일 많은 전력기기로 고온초전도변압기를 꼽고 있다.

현재 전세계적으로 고온초전도변압기는 아직 실용화되어 있지 않은 상태로서 현재 특성해석용 시작품을 제작하는 상태이다. 그러나 고온초전도 변압기의 실용화가 늦어도 빠르면 5년 늦어도 10년 이내일 것으로 전망하여 외국에서는 초전도선 제작회사와 전력기기 제작회사가 함께 거액을 투자하여 적극적으로 개발에 참여하고 있다. 현재 이와 같은 상태이기 때문에 현 단계에서는 물론이고 상업운전이 가능한 초전도변압기를 개발한 이후에도 기술도입은 당분간 불가능할 것으로 생각된다. 개발에 참여하고 있는 외국기업의 경우에 개발내용에 대해서 자세한 것은 전혀 밝히지 않고 있고 개발하고 있는 초전도변압기의 규모 정도만 밝히고 있는 실정이다.

따라서 아직은 국내에서 초전도변압기를 개발하여도 외국의 특허와 중복될 가능성은 적으며 오히려 개발과정에서 나오는 아이디어를 우리가 특허화 할 수 있는 단계로 판단된다. 변압기용 고온초전도선재의 경우도 선진국에서도 소수의 선재제작회사에서만 연구 개발하는 단계이므로 독자적인 기술로 특허장벽을 피할 수 있다고 생각된다.

2. 구조 및 장점

초전도변압기의 기본 구조는 일반 변압기와 크게 차이가 없다. 1차 권선과 2차 권선 사이에 자기 결합이 잘 되도록 철심을 두고, 철심의 단면적 등을 설계하는 기준은 일반변압기와 동일한 기준을 적용한다. 열적 또는 기계적인 측면에서 초전도선을 냉각시키고 온도를 유지하기 위해 극

저온 용기가 필요하다. 철심과 권선을 함께 냉각시킬 수 있지만 철심에서 발생하는 열로 냉매가 기화하면 이를 다시 액화하는 데는 20배 정도의 전력이 필요하므로 전체 효율면에서 철심을 냉각시키는 방법은 바람직하지 않다. 따라서 철심은 상온에 두고 1차, 2차 권선만 냉각시켜야 하며 가운데가 빈 저온 용기에 권선을 설치하고 철심은 저온 용기의 중심으로 통과시키는 구조를 가져야 한다[1-4]. 그림 1은 일반적인 고온초전도변압기의 구조로서 상온부에 위치한 철심의 주위에 극저온 용기가 설치 되어 있고 그 안에 초전도 권선이 배치 되어 있다.

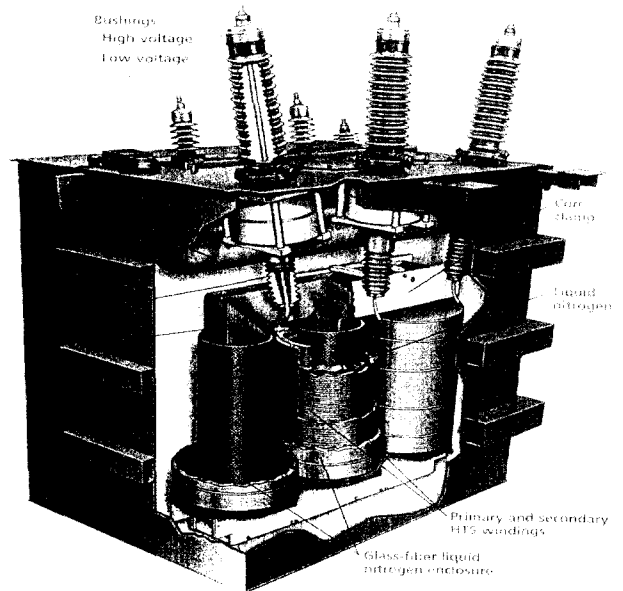


그림 1 고온초전도변압기의 구조

이러한 고온초전도변압기가 갖는 장점을 살펴보면 다음과 같다[4][5].

- 효율상승
초전도체의 대표적인 특징은 저항이 없다는 점이다. 저항이 없으므로 전류가 흐를 때

발생하는 주유 열 손실, 즉 동손이 없어 초전도 변압기는 일반 변압기보다 효율이 높다. 그러나 일반 변압기의 경우에도 변전소에서 사용하는 대용량 변압기의 효율은 현재 99% 이상이어서 초전도화 함으로써 개선할 수 있는 효율 상승폭은 0.2% 정도이다.

● 무게 및 부피 감소

초전도변압기의 다른 장점으로 무게와 부피의 감소를 들 수 있다. 고온초전도체가 발견되기 전인 1981년 미국의 Westinghouse 사는 저온 초전도 변압기의 경제성을 연구하였고 당시의 기술 수준에서 초전도 변압기가 일반 변압기보다 경제적인 용량을 대략 300MVA 정도라고 발표하였다. 1997년에 미국 Waukesha Electric Systems 사는 중용량 변압기 중 대표적인 30MVA, 138kV/13.8kV 용량의 변압기를 고온초전도변압기로 대체할 때의 효과를 연구하였으며, 그 결과 현재는 30MVA 급에서도 고온 초전도 변압기의 가격을 일반 변압기보다 더 낮출 수 있다는 결과를 얻었다. 변압기 권선을 초전도 선으로 대체하면 손실이 줄 뿐만 아니라 같은 단면적의 선에 10 ~ 20 배의 전류를 흘릴 수 있으므로 선의 양을 크게 줄일 수 있다. 실제로 30MVA 급 변압기에 사용되는 구리선은 수천 kg 정도인 데 비해 고온초전도변압기에서는 수십 kg의 초전도 선으로 충분한 것으로 밝혀졌다.

그림2는 일반변압기와 순환 방식, 비순환 방

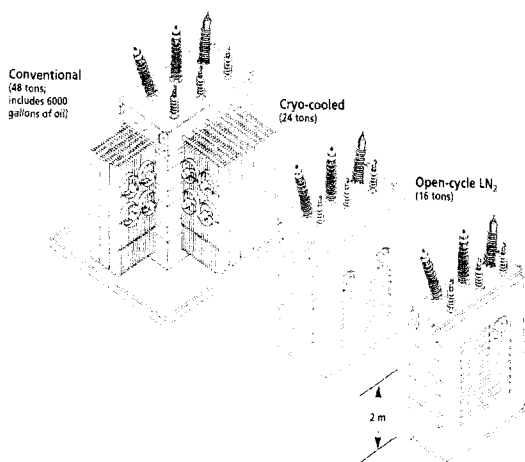


그림 2 30MVA 일반 변압기와 고온초전도변압기의 비교

식의 고온 초전도 변압기의 크기를 비교하여 보여준다. 3가지 형태의 변압기 모두 138kV/13.8kV, 30MVA 용량이다. 그럼에 나와 있듯이 고온초전도변압기의 중량은 순환 방식의 경우에는 일반변압기의 1/2, 비순환 방식의 경우에는 일반변압기의 1/3로 감소함을 알 수 있다.

● 안전하고 환경친화적

일반 변압기에서는 권선의 냉각과 절연을 위해 절연유를 사용한다. 30MVA 급 변압기에 들어가는 절연유는 대략 23,000 리터나 되며 이 절연유는 환경 오염과 변압기 과열시 화재나 폭발 위험이라는 문제점이 있다. 고온 초전도 변압기는 냉각을 위해 액체 질소를 사용한다. 꼭 액체 질소를 사용할 필요는 없으나 20 ~ 77K의 온도 범위에서 값 싸고 안전한 냉매로서 액체 질소가 가장 적합하다. 냉매인 액체 질소는 고온초전도변압기 권선의 절연도 담당한다.

● 과부하내력 증가

중용량급 이상의 변압기 수명은 대략 30 ~ 40년 정도로 보고 있다. 변압기를 30년 이상 사용하기 위해서는 변압기 내부에서 온도가 가장 높은 지점이 110 °C를 넘어서는 안 된다. 만일 이 한계를 20 °C 이상 초과해서 사용한 기간이 총 100일을 넘긴다면 변압기 수명은 25% 감소한다. 초과 사용 기간이 10%를 넘어서면 수명은 절반 이하로 줄어든다. 한 여름철의 전력 수요는 이 기간을 제외한 일년 중 평균 수요의 2 배 가까이 된다. 이 기간의 수요에 맞춰 용량이 결정된 변압기는 그 결과 일년 중 대부분의 기간 동안 정격의 50% 정도밖에 사용하지 못 하며 이에 따라서 운전 효율도 나빠질 수밖에 없다. 그렇지 않고 변압기 용량을 낮추어서 설치한다면 변압기 수명이 급격히 감소하므로 현재의 일반 변압기로는 이 문제를 해결할 수 없다.

고온초전도변압기의 경우, 정격 전류를 넘어서는 부하 전류를 흘린다고 해서 일반 변압기와 마찬가지로 절연이 열화되는 일은 발생하지 않는다. 정격의 200% 정도인 부하 전류가 흘러도 변압기 수명에는 아무 영향이 없으므로 일년 중 몇 주밖에 되지 않는 피크 부하에 맞춰 변압기 용량을 결정할 필요가 없으며 이에 따라 연간 운전 효율은 일반 변압기보다 더 좋아지게 된다.

3. 국내·외 관련기술 현황 및 수준

현재까지 국내에서 고온 초전도 변압기를 연

초전도전기기기 및 시스템 분야 특집

구·개발한 사례는 아직 없으나 저온초전도변압기는 개발한 경험이 있다. 1992년 서울대학교에서는 5kVA, 220/110V 단상 저온초전도변압기 개발에 성공하였고 최대 8kVA 용량의 부하에 전력을 공급할 수 있었다. 1993년도에는 한국전기연구소에서 5kVA급 단상저온초전도 변압기를 개발하였고, 1998년에 기초전력공학공동연구소에서는 3상 100kVA, 440/220V 변압기를 개발 했다.

이 외에도 저온초전도전력기기로는 초전도 발전기, 초전도 사고전류 제한기 등이 개발되었다. 1993년 기초전력공학공동연구소에서는 20kVA 저온초전도발전기를 개발하였으며, 서울대학교에서는 1992년 소용량의 초전도 사고전류제한기를 개발하였고, 1995년 연세대학교에서도 초전도 사고전류 제한기 개발에 성공하였다. 전기연구소에서는 1999년에 30kVA급 저온초전도발전기의 시제품을 제작했다.

고온초전도선재를 개발중인 기업은 국내에 없다. 저온초전도선재의 경우는 중소기업인 대성전선에서는 전기연구소와 공동으로 저온초전도선재인 NbTi 선재를 개발하여 국산 의료용 MRI 마그네트 제작시에 사용하였다. 정부출연 연구기관 중 원자력연구소, 기계연구원, 전기연구소, 표준연구원 등이 고온 초전도 선재 및 재료 개발을 수행하고 있고, 기계 연구원에서는 BSCCO-2223를 사용하여 짧은 선재의 개발에 성공하였으며 현재 길이 100 m 급의 장선재를

개발했다.

고온초전도전력기기로는 주로 마그네트 개발이 이뤄졌고, 연세대학교에서는 유도형 고온초전도 사고전류 제한기와 고온 초전도 플럭스 펌프, 그리고 고온 초전도선을 계자권선으로 사용한 초전도 동기전동기의 개발이 진행 중이다. 외국에서는 교류손실이 적은 고온초전도선재가 ASC, Sumitomo 등에 의해 개발된 이래로 고온초전도변압기에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다[4][5]. 세계에서 제일 처음으로 실제의 전력 계통에 연결되어 시험한 고온초전도변압기로는 ABB(Asea Brown Boveri)사와 ASC(American Superconductor Corp.), Electricite de France, Services Industriels de Geneve, Ecole Polytechnique de Lausanne 등의 공동 연구로 개발한 630kVA 3상 변압기를 들 수 있다. 1997년 3월 제네바 시에 연결되는 전력 계통에 연결해서 6개월간의 실부하 시험을 수행했다. 그림 3은 ABB사에서 개발한 3상 고온 초전도 변압기이다. 고온 초전도 선재로는 BSCCO-2223를 사용했으며 액체 질소로 냉각하였다. 1차 전압은 18.7kV, 2차 전압은 420V이다.

일본 Kyushu대학교에서는 1996년 8월 Fuji 전기, Sumitomo사와 공동으로 500kVA, 단상 고온 초전도 변압기의 개발에 성공하였다. 고온 초전도 선재로는 역시 BSCCO-2223 테이프를 사용하였고 1차 전압 6.6kV, 2차 전압 3.3kV의 정격 전압을 가지며, 단일 선재로 정격 전류를 흘릴 수 없어 1차 셋, 2차 여섯 가닥의 선재를 병렬로 연결하여 전류 용량을 증가시켰다. 선재를 병렬 연결하였을 때, 각 선재 사이에서 임피던스 차이로 전류가 불균등하게 분배되는 것을 막기 위해 수차 해석으로 각 선의 임피던스를 같게 하도록 연가시켰다.

그림 4는 규슈 대학교에서 개발한 500kVA 단상 고온 초전도 변압기이다. Kyushu대학에서는 고온초전도변압기를 액체 질소 온도인 77K와 subcooled 방법을 이용하여 66K, 두 온도에서 시험하였으며 77K에서는 503kVA 용량에 99.1%의 효율을 얻었고, 66K에서는 99.3%의 효율에 800kVA의 최대 용량을 얻었다. 이 때의 효율 계산에는 물론 철손과 냉각 손실을 포함시켰다.

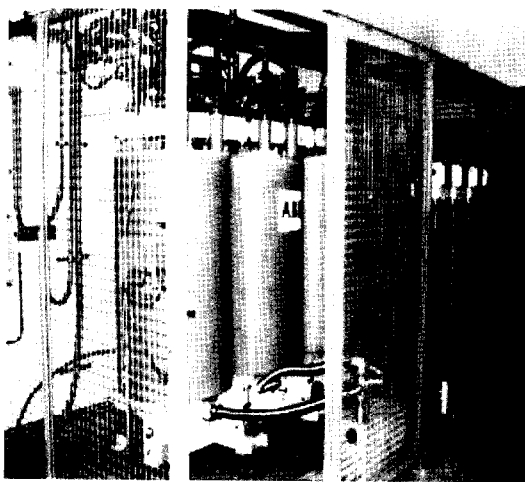


그림 3 ABB 사의 630kVA 3상 고온초전도변압기

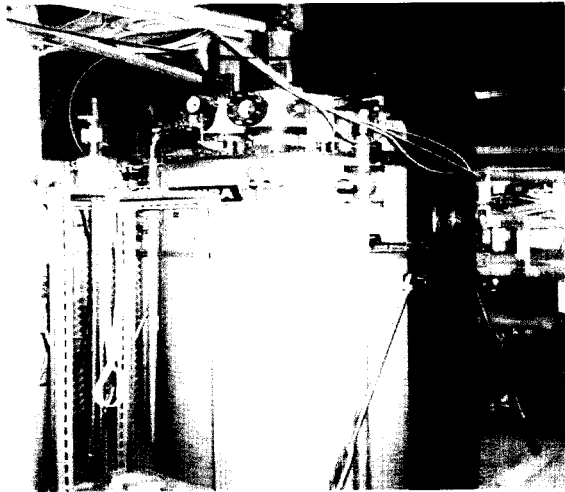


그림 4 Kyushu 대학교의 500 kVA 단상 고온초전도변압기



그림 5 Waukesha에서 개발한 1MVA 고온초전도변압기

미국에서는 Waukesha Electric Systems의 주도로 Intermagnetics General Corp., Rochester Gas & Electric Corp., Rensselaer Polytechnic Institute, Oak Ridge National Laboratory 등이 참여하여 1MVA 단상 고온초전도변압기를 개발했다. 선재로는 BSCCO-2212를 사용하며 순환 방식(Cryo-cooled)을 채택했고 정격전압은 1차 13.8kV, 2차 6.9kV이다. 이 변압기는 20~35K의 온도에서 동작하고 30MVA 일반 변압기와 특성을 비교하기 위해 정격 전류의 최대 12배 크기의 사고 전류에도 견딜 수 있도록 설계되었다. 다음 단계로는 5MVA의 prototype 초전도 변압기를 계획하고 있다.

그림 5는 미국 Waukesha Electric Systems에서 개발한 1MVA 단상 고온 초전도 변압기이다.

1997년에 630kVA 고온초전도변압기를 개발한 경험이 있는 ABB에서는 EDF, ASC와 공동으로 용량이 10MVA인 고온초전도 변압기를 개발하고 있는 중이다. 이 변압기는 지금까지 제작된 고온초전도변압기 중에서 가장 용량이 클 뿐만 아니라 상용화가 가능한 용량의 변압기의 직전 모델로 의미가 크다. 2000년에 완성할 예정으로 개발기간은 3년이고 총 개발비는 1500만불에 달한다. ABB 등에서는 10MVA 개발이 끝나면 사용화가 가능한 30MVA 고온초전도변압기를 예정할 예정이다.

4. 변압기 개발기술의 파급효과

초전도 전력기기는 변압기, 발전기, 전동기 사이에 여러 요소기술을 서로 공유하며, 특히 고온초전도선재는 다른 전력기기에서 바로 활용될 수 있으며 고온 초전도 변압기의 실용화 연구·개발이 진행된다면 실용화 완료 이전에도 고온 초전도변압기 관련 기술이 여타 고온초전도 전력기기의 개발 및 실용화에 긍정적인 영향을 끼치는 물론 다른 저온기기 기술개발에도 도움이 된다.

초전도 선재는 크게 직류용과 교류용으로 구분한다. 고온초전도 응용에 있어서 직류기기로서 대표적인 것은 의료기기인 MRI 마그네트인데, 현재 국내에도 상당수의 저온 초전도 MRI 장비가 각 병원에 설치되어 운영되고 있고, 전기 연구소에서는 이 장비의 국산화에 성공한 바 있다. 고온초전도변압기에 사용될 수 있는 초전도 선재를 개발한다면 이는 바로 MRI 마그네트와 같은 직류용 초전도기기에 응용될 수 있음을 뜻한다. 고온초전도체는 저온초전도체보다 고자장에서 임계전류의 변화가 훨씬 작고, 더 높은 임계자속 밀도를 갖는다. 현재도 물리학 분야에서 초고자장이 필요한 경우, 저온 초전도 선으로 제작한 마그네트에 고온 초전도선을 함께 사용하여 한계자장을 높이는 연구도 진행되고 있다.

고온초전도변압기에 사용되는 극저온용기 역시 다른 정지형 저온기기에 바로 응용될 수 있다. 철심을 상온에 두는 구조는 MRI 마그네트

초전도전기기기 및 시스템 분야 특집

에서 상온 코어를 갖는 구조와 동일하며, 변압기 권선은 곧 교류 마그네트와 동일하므로 저온 초전도 분야에서 이미 실용화된 MRI 마그네트가 고온 초전도 변압기의 개발로 고온 초전도 마그네트로 대체될 수 있을 것이며, 자기 부상 열차에서 사용되는 초전도 마그네트 역시 고온초전도 마그네트로 대체되는 기간을 단축시킬 것이다.

초전도체의 특징 중 하나는 임계전류를 넘어서면 상전도체로 바뀌어 온도가 낮아도 저항을 가진다는 점이다. 일상적인 상황에서는 이와 같이 상전도 상태로 바뀌는 것을 최대한 억제해야 하지만, 변압기나 발전기와 같은 전력기기에서는 이 퀘칭 현상이 기기 보호에 일익을 담당한다. 즉 일반 변압기나 발전기에서는 사고로 큰 단락 전류가 흐를 때, 차단기 등을 이용하여 이 전류를 외부에서 차단시키지 않으면 기기 내의 권선이 타 버릴 때까지 사고 전류는 계속 흐르게 된다. 초전도전력기기는 사고 등으로 부하 전류가 비정상적으로 증가하면 초전도 권선이 퀘칭되어 상전도 상태의 저항값을 갖게 되고 이 저항값으로 사고 전류는 자동으로 제한된다.

센서와 같은 감지 장치도 필요 없으며 사고 후 적정 수준으로 제한된 사고 전류를 기존의 차단기와 같은 장치로 끊으면 다시 초전도 상태로 회복된다.

고온초전도변압기의 실용화는 이와 같이 기존의 차단 설비를 그대로 사용할 수 있다는 부수 효과도 가져다 준다. 전력계통의 용량이 증가하면서 지금까지는 계통의 차단기 용량을 계속 증대시키며 차단기를 교체하였으나, 초전도 사고 전류 제한기나 변압기 등에서 사고 전류를 제한해 주면 이런 차단기의 교체가 필요 없게 된다.

고온 초전도 변압기를 실용화하기 위해서는 몇 단계를 거쳐야 할 것으로 생각된다. 우선 고온 초전도 변압기의 기본 구조, 특성 등을 분석하기 위해 소용량의 변압기를 제작·시험하고 그 다음 단계로 실용화 직전의 prototype에 해당하는 용량을 시도한다. 2단계의 결과가 우수하면 3단계에서 바로 실 전력 계통에 연결하여 실제 상황 시험을 거칠 수 있는 고온 초전도 변압기를 제작한다. 현재까지 실용화를 목표로 추진되고 있는 초전도 전력 기기는 모두 이와 같은 단계를 거치고 있다.

일본에서 추진되고 있는 Super-GM의 경우, 각 대학 및 연구소에서 소용량의 저온 초전도 발전기에 대한 특성 연구가 이뤄지자 바로 70MVA급 초전도발전기를 제작하였다. 이 과정

에서 Toshiba, Hitachi, Mitsubishi와 같은 기업이 참여하였고, 이 다음 단계로는 200MVA 용량의 초전도 발전기를 계획하고 있다. 발전기의 경우에는 단위 기기의 용량이 크기 때문에 Super-GM에서는 200MVA 초전도 발전기를 실용화 직전의 prototype으로 간주하고 있다. 미국 Waukesha Electric Systmes의 개발 계획은 1 MVA급 고온 초전도 변압기를 거쳐 최종 30MVA급 생산 이전에 5MVA급 개발을 목표로 하고 있으며, 미국 에너지 성(U.S. Department of Energy)과 Rocheter Gas & Electric 사의 지원 하에 진행되고 있다[4].

5. 경제성 검토 및 시장 전망

초전도변압기는 총투자비용이 기존의 변압기에 비해서 저렴한 것은 물론이고 초기 투자비용도 기존의 변압기와 비슷한 수준이기 때문에 개발이 완료된다고 보장된다면 특별한 제도적인 장치가 없이 시장경제에 의해서 보급될 수 있다.

국내의 22KV급 이상의 변전소는 400개소이고 변압기 총용량은 96,160MVA이다. 변전소마다 한 대의 변압기가 설치되어 있다면 변압기 총 대수는 400대이다. 또 배전선로에 연결된 3.3KV 이상의 변압기 총 대수는 996,453대이다. 송전용변압기의 평균수명은 40년으로서 송전용변압기는 매년 노후된 10여대의 대체수요가 발생하고 배전용변압기의 평균수명을 30년으로 잡으면 노후된 배전용변압기 전체를 초전도변압기로 대체할 경우에 매년 33,215대의 대체수요가 발생한다. 실제로 우리나라에서 변전소가 갑자기 늘어난 시기는 경제가 급성장한 시기인 1970년대 이므로 변압기의 대체수요는 향후 20년 이내 동안 위와 같이 계산한 평균치를 훨씬 상회할 것으로 생각된다.

송전용변압기 1대당 연간 투자비용이 평균 1천만원이 감소하고(연간 2%씩 감소) 배전용변압기 1대당 연간 투자비용이 평균 1백만원이 감소한다고 잡으면, 총 투자비용감소량은 연간 300억원에 달한다.

에너지절약의 관점에서 초전도변압기는 효율적인 전력기기이다. 1996년에 국내의 총전력공급량은 205,494GWH이고 이 중에서 송배전시에 발생하는 전력손실은 5.4%

로서 11,096GWH 이다. 전체 손실 중에서 변압기에서 발생하는 손실은 25% 수준으로 2,774GWH에 해당한다. 30MVA를 기준으로 할 때에 초전도변압기에서는 손실이 60% 감소하므로 절약되는 연간 에너지는 1,664GWH이다. 1996년의 발전단가는 62.99원/KWH 이므로 절약되는 에너지를 금액으로 환산하면 연간 1천56억원에 이를 것이다.

초전도변압기를 제작했을 때에 현시점에서 경제성이 있는 30MVA급 변압기의 세계 시장규모는 약 30억\$에 해당하는 것으로 추정되고 있으며, International Superconductivity Industrial Summit의 전망에 의하면 초전도 전체 시장은 현시점에서는 15억불, 2020년경에는 1200억불에 이를 것으로 생각된다[4]. 이와 같은 수치는 새로운 응용분야가 개발되어 감에 따라 더욱 늘어날 것이다.

참고문헌

1. T. Ise and Y. Murakami, "Design Method of Volt/Turn for Minimizing Life Cost of a Superconducting Transformer", IEEE Trans. on AS, Vol. 9, No. 2, June, 1999
2. K.Funaki, et al., "Preliminary Tests of a 500kVA-Class Oxide Superconducting Transformer Cooled by Subcooled Nitrogen", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, pp.824-827, 1997
3. E. Floch, P. Hiebel, Y. Laumond and A. Lacaze, "Modelization and Test of a 500J Superconducting Pulsed Power Transformer", IEEE Trans. on AS, Vol. 9, No. 2, June, 1999
4. Sam P. Mehta, Nicola Aversa, & Michael S. Walker "Transforming Transformers", Spectrum, Vol.34, No.7, July, 1997
5. J.K.Sykulski, et al., "Prospects for large high-temperature superconducting power transformers: conclusions from a design study", IEE Proc.

Electri. Power Appl., Vol.146, No.1, pp.41-52, 1999

저자이력

이지광

1966년 6월 1일생, 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1997년 동대학원 전기공학부 졸업(박사), 현재 우석대 전기공학과 전임강사



차귀수

1956년 7월18일생, 1978년 서울대 공대공업교육학과 졸업, 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 순천향대전기공학과 교수.



한송엽

1939년 3월14일생, 1963년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1967년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1976년~1979년 불란서 로렌공과 대학원 졸업, 현재 서울대 전기공학부 교수, 현재 당 학회 회장

