

## 한국형 초전도 변압기 개발

이 승 욱, 최 경 달  
기초전력연구원, 한국산업기술대학교 에너지대학원

### 1. 연구배경

구리는 은(Ag) 다음의 전기전도성(Electric conductivity)을 가지고 있으나 은에 비하여 가격이 싸고 연성이 좋은 금속이다. 따라서 현재 사용하고 있는 대부분의 전력기기는 구리선(Cu wire)을 이용하여 권선이 제작되고 있다. 하지만 구리로 제작한 권선의 경우 일반 금속보다는 작지만 저항을 가지고 있으며, 이 저항에 의해 전류의 공급에 비례하는 저항손실(Resistivity Loss)이 발생하게 된다.

현재 전력기기는 꾸준한 전력 수요 증가로 인하여 대용량화가 이루어지고 있으며, 이들 기기들은 높은 전류를 사용한다. 따라서 저항손실에 의한 효율감소와 대 전류를 흘리기 위해 굵은 구리선의 사용으로 전력기기의 전체적인 부피 및 무게의 증가로 이어지고 있다. 특히 전력기기의 효율은 산업공정에서 에너지 소비를 감축시킬 수 있는 대안이며, 이를 통해 전력 생산 시 발생하는 CO<sub>2</sub>의 배출 억제 효과가 있다. 환경을 저해하는 CO<sub>2</sub> 배출량의 감소는 단순히 전력 생산량 감소를 통한 이득과는 비교할 수 없는 큰 파급효과가 있다. 따라서 전력기기의 효율을 개선시키기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 기존 구리선의 단점을 극복하기 위한 대안으로 저항이 없는 초전도체(Superconductor)를 이용한 전력기기 개발에 필요성이 대두되었다. 변압기의 경우 고효율에 따른 에너지 절약과 운전비용의 감소를 위해 초전도 변압기 개발이 이루어졌으나, 우리나라의 경우 나날이 증가하는 부하에 대한 변압기의 무게와 부피를 줄일 수 있다는 사실이 큰 장점으로 부상하고 있다. 이는 용량의 증대에 따른 도심지에 설치 운용되고 있는 변전소를 추가적으로 물색해야 한다는 문제점을 유발시키기 때문이다. 이에 따라 본 연구 팀에서는 일반적으로 사용하고 있는 3상 154 kV급 60 MVA 변압기의 용량을 100 MVA로 증가시키면서 효율, 부피 및 무게를

줄일 수 있는 초전도 변압기 개발에 관한 연구를 수행하였다.

### 2. 초전도 전력기기

1911년 Onnes가 발견한 초전도체는 구리선이 가지고 있는 문제점을 해결할 수 있는 새로운 물질로 인식되어, 이와 관련된 연구가 많은 이들에 의해 수행되어 왔다. 1988년 비등점 77 K의 액체 질소를 냉매로 사용하는 BSCCO 계열의 고온초전도체가 발표되었다. 이 초전도체는 기존의 저온초전도체가 비등점 4.2 K의 액체 헬륨을 냉매로 사용하므로 생기는 저온 유지 장치 기술의 제약 및 액체 헬륨 가격에 의한 경제성 제한을 액체 질소를 냉매로 사용함으로써 해결의 실마리를 제공하였다. 이에 액체 질소를 냉매로 사용하는 초전도체를 이용한 전력기기 응용에 관한 연구가 집중적으로 이루어졌다. 초전도 선재를 사용한 전력기기 분야는 한류기, 송전케이블, 변압기 등이 있다.

초전도 변압기의 경우 기존의 변압기에 비하여 권선 부를 극저온상태로 유지시켜야 하는 어려움이 뒤따르지만, 저항이 없는 고온초전도 권선을 사용함으로써 극저온 유지비용을 극복할 수 있는 여러 가지 장점을 가지고 있다. 고온초전도 변압기의 장점으로는 극저온 상태에서 저항이 0인 고온초전도 선재를 사용하여 권선을 제작하기 때문에 같은 전류용량을 가지는 상전도 선재보다 훨씬 적은 도체를 사용한 변압기의 제작이 가능하다. 그리고 동손이 거의 없으므로 변압기의 운전효율이 높으며, 기존의 변압기보다 더 동 기계에 가깝게 만들 수 있어 변압기 철심의 크기와 양을 줄여 전체적인 변압기의 무게와 부피를 현격히 감소시킬 수 있다. 이에 따라 초전도 변압기는 부피 문제가 되는 도심지의 대형 빌딩내의 변전실이나 무게 문제되는 고속전철용 차량에 설치가 용이해진다. 초전도 변압기의 개

발 초기 단계에는 고효율에 따른 에너지 절약과 작동 비용의 감소가 가장 주요한 장점이었지만 현재 우리나라에서는 초전도 변압기의 무게와 크기를 줄일 수 있다는 것이 더 큰 이점이라고 볼 수 있다. 일반적으로 사용하고 있는 3상 154 kV급 변압기의 기준 용량은 60 MVA이며, 대도시의 경우 빌딩의 지하에 설치되어 운전되고 있다. 하지만 2017년에는 부하가 현재 전력의 150 % 증가가 예상됨에 따라 변압기와 같은 전력기기의 용량 증가가 필요하다. 하지만 기존 구리선을 이용한 변압기의 용량 증가는 부피의 증가로 이어지며 이는 현재 도심지에 설치 운영되고 있는 장소를 새로 물색해야 하는 문제점이 발생한다. 초전도 변압기는 기존 변압기를 대체할 수 있을 뿐만 아니라 기존 변압기보다 크기를 1/3 또는 1/2 정도로 줄일 수 있어 용량 증가에 따른 설치장소의 문제점을 해결할 수 있다. 비록 대도시로부터 멀리 떨어진 산이나 들판에 설치되는 변전소에는 큰 이득이 되지 못하지만 서울과 같은 대도시의 큰 빌딩의 지하에 있는 50개 정도의 변전소의 경우 빌딩을 새로 짓는 것을 제외하고 대도시 내 변전소의 정격용량을 증가시킬 수 있는 방법이 없어 초전도 변압기 적용의 중요한 장점이 될 수 있다. 그림 1은 100 MVA 초전도 변압기와 60 MVA 일반변압기의 형상을 보여준다. 또한 권선부의 절연 및 냉각을 위해 절연유를 사용하지 않기 때문에 기존의 변압기 절연유로 인한 환경오염이나 폭발위험성이 없어짐으로써 안전하고 환경 친화적인 전력기기이다.

### 3. 관련분야 동향

이러한 기존 변압기의 단점을 기술적으로 극복하기 위한 대안으로서 초전도 현상을 이용한 초전도 변압기의 개발을 위하여 기술 개발의 필요성이 대두되었으며, 초전도 변압기의 필수 요소라 할 수 있는 초전도 선재의 기술 개발과 그 응용 방법에 관한 연구가 많은 기관 및 연구자들에 의해 수행되어 왔다. 하지만 선진국들은 BSCCO 고온초전도 선재를 이용한 초전도 변압기의 경우 초전도 선재의 임계전류 밀도, 초전도 선재에서 발생하는 교류손실(AC losses), 선재 가격의 한계 때문에 상용화되기 어렵다고 판단, 현재 개발 중에 있는 2세대 선재 YBCO coated conductor의

성능 추이를 살피며 초전도 변압기의 개발을 미루는 상황이 되었다. 이러한 국외의 상황에 대하여 국내 연구 방향은 차세대 초전도 응용 기술개발 사업단 기획회의를 통하여 초전도 변압기 개발을 보류하는 것이 아니라 2세대 초전도 선재의 상용화 시점까지 초전도 변압기 개발에 필요한 핵심요소기술 확보를 위한 연구 개발을 하였다. 지난 3년 동안, 2세대 고온 초전도선의 성능이 대폭 향상되고, 세계 각국에서 2세대 초전도선재 개발을 경쟁적으로 이끌어 나가는 양상으로 급격히 변화하였다. 실제로 그동안 중단되었던 일본과 미국의 초전도 변압기 연구도 재개될 움직임을 보이고 있다.

### 4. 송전급 초전도 변압기 요소기술 개발

본 연구팀은 일반변압기 보다 많은 장점을 가지는 초전도 변압기 개발을 위해서 반드시 개발되어야 하는 핵심 기술인 대전류 기술, 권선기술, 설계기술에 관한 연구를 수행하였으며, 고전압 대용량 초전도 변압기의 경제성 종합평가를 통하여 초전도 변압기의 적용가능성을 확인하였으며, 개발된 기술의 특성 평가를 통하여 대용량 고전압 초전도 변압기의 제작가능성을 입증하였다.

- 대전류용 고온초전도 병렬선재 기술 개발
- 전력기기를 위한 고온 초전도 선재의 개발은 고온 초전도 현상이 발견된 이후 계속 진행되어 왔다. 현재 개발되고 있는 초전도 선재의 경우 자장에 의해 임계전류가 감소하는 단점을 가지고 있다.

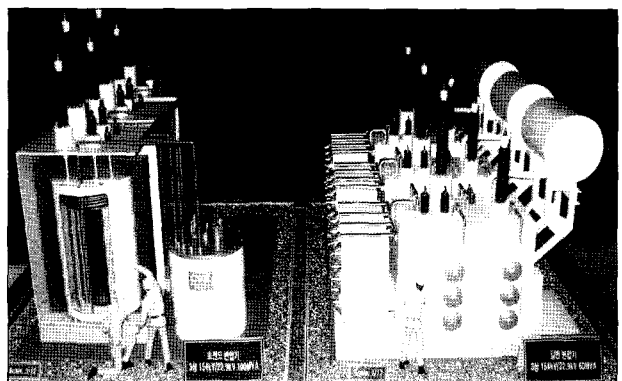


그림 1. 100 MVA 초전도 변압기와 60 MVA 일반변압기의 크기 비교

특히 초전도 변압기의 경우 강한 교류 누설 자장이 초전도 권선에 직접 인가될 뿐 아니라, 송배전급 전압을 감당하여야 하며, 증가하는 전력수요에 따라 용량이 점점 증가하고 있으므로 대전류가 인가될 수 있어야 한다. 따라서, 초전도 변압기는 고자장, 고전압, 대전류의 가혹한 환경에서 초전도상태를 유지해야 하는 어려움을 극복하여야 한다. 고온 초전도 변압기가 일반 변압기에 비하여 경제성을 가지기 위해서는 정격용량이 적어도 30 MVA 이상이 되어야 비로소 경제성을 가질 수 있다고 알려져 있다. 또한 현재 154 kV/22.9 kV 변압기의 표준용량은 3상 60 MVA이며, 정격운전시 2차측 상전류는 1,500 A가 넘는다. 하지만 현재 개발된 고온초전도 선재로는 최대 흘릴 수 있는 교류전류의 크기가 100 A를 넘기 힘든 실정이다. 따라서 100 A이상의 대전류 흘리기 위해서는 초전도 선재를 병렬로 결합하여 사용하는 것이 불가피하다. 그러나 병렬선재를 사용하여 권선을 제작할 경우 병렬선재를 구성하는 수 가닥의 고온초전도 선재의 임피던스 차이에 의하여 통전전류의 불균형이 발생 할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 병렬선재의 전류 불균형 분포에 대한 병렬선재의 전기적 특성을 확인하고 제 2세대 초전도 선재를 이용하여 병렬선재 제작 시 전류 불균형을 막는 전위 방법에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과 대용량 초전도 전력기기의 적용에 반드시 필요한 기술로서 병렬선재를 사용한 권선 제작 시 발생하는 인덕턴스 차이에 의한 통전전류의 불균형을 막음으로서 병렬선재의 성능을 향상시키며, 교류손실을 저감하는 기술을 획득하였다. 이 기술을 이용하여 500, 1000, 1500 A급 병렬선재를 제작하고 이들의 특성 실험을 수행하였다. 이는 선진국 대비 110 %의 기술 수준이다. 그림 2는 제작된 1500 A급 병렬선재와 교류손실을 저감하기 위한 기술을 보여준다.

- 연속 디스크 권선 기술 개발

선진국에서 사용하는 레이어 권선은 초전도 선재의 교류손실을 줄여주지만, 실제 대용량 고전압 초전도 변압기 적용에 적합하지 않은 권선 방법이다. 따라서 본 연구팀은 대용량 고전압 변압기 권선에 적합한 연속디스크권선(Continuous Disk Winding)법을 제안하였다.

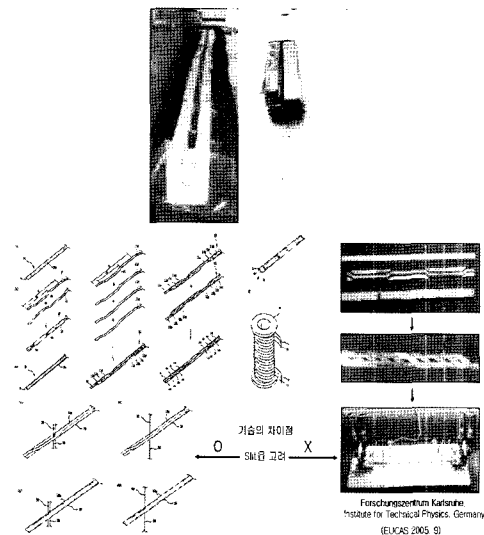


그림 2. 대전류용 2세대 초전도 병렬선재 제작 기술

제안된 권선법 사용 가능성을 확인하기 위하여 병렬선재를 이용하여 500, 1000 A급 연속디스크 권선을 제작하고 특성 시험을 수행하였다. 시험 결과 고전압 대용량 권선에 적합함을 확인하였으며, 기술수준은 선진국 기술수준 대비 110 % 수준이다. 그림 3은 제안된 권선 방식과 이 기술로 제작된 연속디스크 권선을 보여준다.

- 초전도 변압기의 부하 시 탭 변환장치 적용 기술 연구

일반적으로 사용하는 3상 154 kV급 전력용 변압기는 설치장소까지 운반의 편의성을 위하여 3개의 단상 변압기로 구성 된다. 또한 일반 변압기에 적용되는 탭 절환 장치(On Load Tap Changer)는 부하 변동에 따른 전압의 변화를 일정하게 유지시키기 위하여 설치되며, 1차권선 혹은 2차권선의 권선 비를 조절하여 부하 변동에 따른 전압의 변화를 조절한다. OLTC는 대용량 변압기에 적용되어 사용되어지며, 대용량 초전도 변압기를 상용화하기 위해서 반드시 고려되어야 하는 장치이다. 따라서 본 연구에서는 초전도변압기의 상용화를 위해 반드시 적용되어야 하는 OLTC를 초전도 변압기 권선에 적용시키기 위해 OLTC의 구조 및 적용방법에 관한 조사를 수행하였으며, 초전도 변압기의 OLTC 설치 방안을 제시하였다. 이는 선진국 대비 100 % 기술 수준이다. 그림 4는 초전도 변압기 탭 변환장치 적용 기술을 보여준다.

### 5. 추진성과의 활용도 및 파급효과

초전도전력기기는 여러 요소기술을 서로 공유하고 있다. 따라서 본 연구팀이 획득한 송전급 초전도 변압기 요소기술 또한 초전도 전력기기 전반에 걸쳐 활용가능할것으로 예상된다. 초전도 변압기 설계 이론, 구조 해석, 자장에 의한 초전도 권선의 교류손실해석 등은 고온 초전도 발전기나 전동기 개발에 적용할 수 있으며, 초전도변압기에 사용되는 극저온용기 역시 다른 정지형 저온기기에 바로 응용될 수 있다. 철심을 상온에 두는 구조는 MRI 마그네트에서 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 것이다.

향후 2014년 까지 초전도 변압기 시장 형성은 어려울 것으로 보이나 2015년 \$ 243,000 규모의 시장을 형성하기 시작하여 2025년 까지 1,600 % 이상의 시장 규모가 이루어 질 것으로 예상된다.

2018년에 초전도 변압기의 본격적인 시장진입이 가능해질 것으로 예측되지만, 다른 전력기기와는 달리 단 기간 내에 약 80 % 급속한 시장 점유율을 차지하게 될 것으로 예상된다. 또한 고온 초전도 변압기가 실 계통에 적용되어 효율을 향상시킬 경우, 효율이 향상된 부분만큼의 전력생산량을 절감할 수 있으며, 이를 통해 전력생산 시 발생하는 CO<sub>2</sub>의 양을 감축시킬 수 있다. 2010년 전력생산을 통해 발생하는 총 CO<sub>2</sub>량은 약 4790 만톤으로 예측되며, 이 시기에 변압기의 10 %가 고온 초전도 변압기로 대체 될 경우 전체 CO<sub>2</sub>량의 약 0.03 % 즉, 14,370 c-t을 감축할 수 있다. 그리고 초전도 변압기가 약 76 % 보급될 것으로 예측되는 2020년에는 CO<sub>2</sub> 배출량을 연간 약 135,000 c-t정도 감소시킬 것으로 예측된다. CO<sub>2</sub> 1 c-t을 감축하는 데에 필요한 경비가 현재 약 53만원인 것을 고려하면, 현재 화폐가치로, 2010년에는 연간 76억 원 2020년에는 715억 원의 경비가 절감될 것이다. 에너지 소비감소는 결국 CO<sub>2</sub> 배출량 감소로 이어지며, 이를 통해 달성되는 CO<sub>2</sub> 배출 억제 효과는 위에서 언급한 전력생산량 감소를 통한 경우와는 비교가 안 될 정도로 파급효과가 클 것이다.

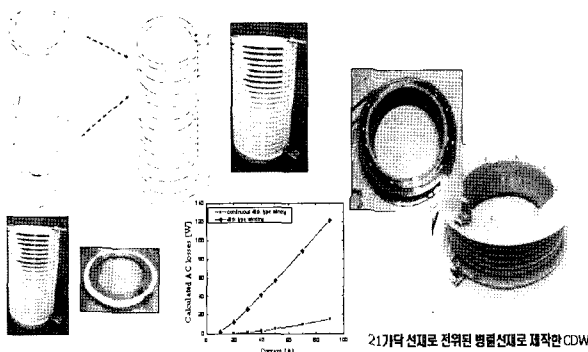


그림 3. 대용량 고전압 연속디스크 권선 제작기술

### 저자이력



이승욱(李昇昱)

1973년 12월 23일생, 1999년 순천향대학교 공과대학 전기공학과 공학사, 2001년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 2005년 동 대학원 전기공학과 공학박사, 2005년 - 현재 기초전력연구원.

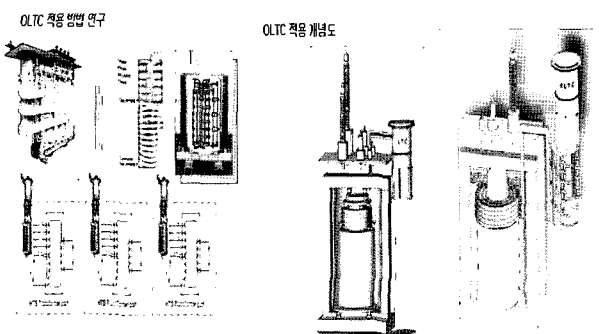


그림 4. 초전도 변압기 탭 변환장치(OLTC) 적용 기술



최경달(崔景達)

1962년 2월 12일생, 1984년 서울대학교 공과대학 전자공학과 공학사, 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 공학석사, 1993년 서울대학교 대학원 전기공학과 공학박사, 1993년 -1997년 기초전력공학공동연구소 전임연구원, 1998년-현재 한국산업기술대학교 에너지대학원 교수.