

# 차세대 초전도 응용 기술 개발 사업의 초전도 전력기기 개발 현황 및 계획

■ 조영식 / 초전도응용기술개발사업단 기술팀장

## 1. 서 언

초전도 기술은 극저온에서 전기저항이 제로가 되는 현상을 이용하기 때문에 성능향상이라는 개념을 뛰어 넘어 성능혁신이라는 새로운 산업 패러다임으로 뒤바꿀 수 있는 기술로 친환경적이며 응용범위가 다양한 것이 특징이다. 전기에너지의 수요가 높아짐에 따라 전기에너지의 효율적/안정적 공급은 국가 경쟁력과 직결되고 있다. 이러한 절실한 요구에 맞추어 21세기 경제 패러다임의 변화에 부응하는 새로운 성장전인 산업을 발굴하고, 국가 경쟁력의 원천인 고품질의 환경친화형 국가전력 수급망을 구축함으로써 에너지 저 소비형 경제사회를 구현하려는 목적으로 2001년도에 과학

기술부 21세기 프론티어연구개발사업의 일환으로 차세대 초전도응용기술개발사업단(이하 초전도사업단)이 구성되어 4대 초전도 전력기기(케이블, 변압기, 한류기, 모터) 및 이들 기기의 핵심소재인 제2세대 고온 초전도 선(CC : Coated Conductor) 등을 개발하고 있다. 현재 2단계 3차년도 연구를 수행하고 있으며 2011년을 목표로 하여 실 적용을 위한 연구개발에 총력을 기울이고 있다.

## 2. 초전도 사업단의 목표

초전도 사업의 목표는 2011년까지 차세대 실용 초전도 선을 개발하고 발전소로부터 부하단에 이르기까지 대용량의 전기에너지를 수송하고 이용할 때 필수적인 초전도 케이블, 초전도 변압기, 초전도 한류기, 초전도 모터의 4대 초전도 전력기기를 개발하는 것으로 그림 1은 개발된 각 초전도 전력기기가 실 전력계통에 투입될 때를 가정한 그 투입대상 및 용량을 나타낸 것이다. 여기서의 용량은 본 사업의 최종목표로서 본 사업의 2단계 기획에서 분석한

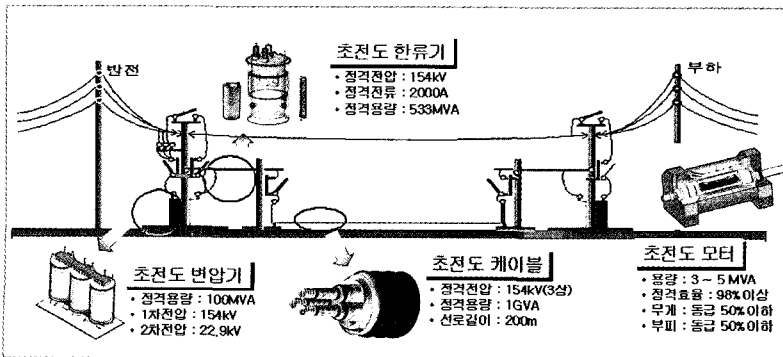


그림 1 초전도 전력기기의 실 전력계통 투입 개념도

표 1 단계별 연구개발 목표

구분	단계별 연구개발 목표
1단계 (2001년~2004년)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 핵심기반 기술 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 50MVA/30kV, 10m급 초전도 케이블 시스템 개발</li> <li>- 1MVA, 22.9kV/6.6kV, 단상, 초전도 변압기 개발</li> <li>- 3상, 3.3kV/400Arms(정상시)급 초전도 한류기 개발</li> <li>- 100마력급 초전도 모터 개발</li> <li>- 제1세대 초전도 선 공정기술 개발</li> <li>- 제2세대 초전도 선 공정기술 개발</li> </ul> </li> </ul>
2단계 (2004년~2007년)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 시스템화 핵심기술 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 22.9kV 실용화 기술 및 154kV급 초전도 케이블 코아 설계기술 개발</li> <li>- 154kV, 100MVA 초전도 변압기의 핵심기술 개발</li> <li>- 3상, 22.9kV/630Arms급 초전도 한류기 개발</li> <li>- 1300hp급 산업용 초전도 모터 개발</li> <li>- 제2세대 초전도 선 연속제조 공정 기술 개발</li> </ul> </li> </ul>
3단계 (2007년~2011년)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 실증기 개발 및 시증시험을 통한 실용화 기반기술 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1GVA/154kV급 초전도 케이블 시스템 개발</li> <li>- 100MVA, 154kV/22.9kV 초전도 변압기 개발</li> <li>- 3상, 154kV/2kArms(정상시)급 초전도 한류기 개발</li> <li>- 4000~6500hp급 초전도 모터 개발</li> <li>- 고성능, 저가격 제2세대 초전도 선 개발</li> </ul> </li> </ul>

기존 전력기기와의 가격경쟁이 가능한 사양, 내수 시장의 규모 및 무역 수지개선 효과 등과 같은 경제성, 향후 국내 전력계통의 변화 방향과 실 전력계통 시스템과의 호환 가능한 사양 및 실증시험이 가능한 규모 등과 같은 국내 전력시스템 적용 가능성, 현재와 미래의 국내 기술력으로 개발 가능한 목표인가 하는 기술개발 가능성, 해외 기술동향 등을 바탕으로 결정된 것으로 앞으로 3단계 집중기획을 통해서 그 목표가 수정될 가능성을 염두에 두고 있다.

초전도 사업은 최종목표를 달성하기 위한 단계별 목표는 표 1과 같으며, 주로 초전도 전력기기의 핵심기반 기술개발을 위한 배전급 용량의 기기개발을 목표로 한 1단계 3년, 시스템화 핵심기술 개발을 위한 송·배전급 전력기기 개발을 목표로 한 2단계 3년, 최종 실용화기 개발 및 실증시험을 통한 실용화 기반기술 개발을 목표로 한 3단계 4년으로 구성되어 있다. 현재 2단계 3차년에 있으며, 기획을 통해 목표의 상향 조정에도 불구하고 좋은 성과를 거두고 있다.

### 3. 초전도 전력기기의 연구 개발 현황 및 계획

#### 3.1 초전도 케이블

초전도 케이블은 기존 케이블의 구리 도체 대신 초전도 선을 사용한 저손실·대용량 전력수송이 가능한 전력케이블로서 대도시의 전력공급문제를 해결할 수 있는 환경친화적 신개념의 전력케이블이다. 또한 기존의 전력케이블에 비해 초전도 케이블은 765kV나 345kV의 초고압이 아닌 154kV 또는 22.9kV의 저전압으로 대용량 송전이 가능하기 때문에 종래 변전소의 고전압 송전을 위한 주변 기기를 간략화 시킬 수 있다. 더욱이 초전도 케이블은 송전손실이 극히 작고 같은 용량의 구리케이블의 20% 수준의 크기로 송전이 가능하여 추가의 건설공사 없이 이미 설치되어 있는 도심의 전력구

(케이블용 지하터널) 또는 관로를 사용할 수 있어 매우 경제적이며 도심의 부지, 전력수급 문제 등을 해결할 수 있다.

지난 2005년 7월 한국전기연구원과 LS 전선 등의 협동연구로 개발한 22.9kV, 50MVA 3상 30m 초전도 케이블의 AC impulse, 정전상태, 이상압력 등 장기운전에 의한 기계적/전기적 신뢰성을 검증한 장기실증 시험을 성공하였다. 이러한 초전도 케이블의 개발 및 실증시험을 통해 제품화급에 적용 가능한 3상 일괄형 단말, 케이블 코아의 설계 기술, 접속(joint)기술 등을 개발하고 개발된 기술로 100m 길이의 초전도 케이블을 제작하여 한국전력의 고창시험장에 설치하여 국제공인 시험기관(Kinetrics)의 입회하여 Type test 등 실증시험을 준비하고 있다. 이러한 초전도 케이블의 국제공인기관 시험의 추진은 초전도 케이블 시험의 객관성을 확보하고, 초전도 케이블의 국제규격화 및 국내외 시장진입의 교두보 확보에 큰 의의가 있다. 그림 2는 고창실증 시험장의 설치도면 및 설치 중인 100m 초전도

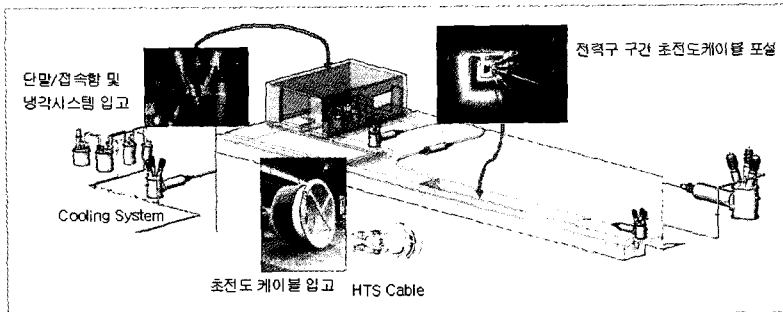


그림 2 100m 초전도 케이블의 국제공인기관 시험 (한국전력 고창시험장)

케이블 추진사항 등을 보여준다. 현재까지 모든 부품의 제작이 완료되었으며 전력구 구간의 설치완료, 냉각시스템 및 단말이 설치 중이며 12월 초에는 설치가 완료될 것으로 보인다. 앞으로 2007년 초까지 세계 최초로 국제공인기관의 입회하에 type test를 마치고 초전도 케이블의 고장모드 및 관련 시험 후 실 전력계통 시험을 진행하는 일정을 추진하고 있다. 이와 더불어 3단계에서는 22.9kV 대용량 및 154kV급 초전도 케이블 개발을 통해 조기실용화 및 실용화 기반기술을 확보할 계획이다.

### 3.2 초전도 변압기

초전도 변압기는 기존의 구리도체를 사용하여 oil이나 SF6 가스를 사용하는 변압기에 비해 폭발의 위험이 전혀없는 친환경적인 본질적 특징을 가지고 있다. 또한 초전도 변압기는 기존의 변압기에 비해 무게 및 부피의 감소, 효율 상승, 과부하 내력의 증대 등의 매우 우수한 특성을 가지고 있다.

초전도 사업의 1단계에서는 22.9/6.6kV, 1MVA 단상 초전도 변압기 개발을 통해서 초전도 변압기의 제조기술 확립 및 기본특성, 운전특성을 도출하였다. 이러한 성과 및 산업동향, 국외 기술동향 등을 통한 2단계 기획을 통해 3단계에서 실용화급 초전도 변압기 개발을 위해서는 우선적으로 핵심기술의 개발이 선행되어야 한다는 결론을 도출하여 2단계에서는 154kV 대용량 초전도 변압기 개발을 위한 핵심기술, 즉 대용량 권선 기술, 고전압 절연기술, 대용량 냉각시스템 기술 등의 개발에 주력하였다. 먼저, 대용량 권선 기술의 경우

100MVA급 개발을 위해 필요한 용량인 1.5kA급 권선기술을 개발하였으며 관련하여 세계 최초로 CDW(Continuous Disk Winding) 권선법을 개발하여 국내의 특허를 확보하였다. 그리고 154kV급 고전압 절연 연구는 세계적으로도 시작단계이지만, 본 연구를 통해 154kV급 초전도 변압기의 절연설계 data book, 부상설계,

OLTC 적용방안 등을 마련하였다. 또한 초전도 전력기기 중에서 가장 난이도가 높은 초전도 변압기용 극저온 용기의 제조기술 개발 등을 통해 154kV급 대용량 초전도 변압기용 냉각시스템을 설계하였다. 이러한 초전도 변압기의 핵심기술 연구를 바탕으로 설계된 154kV, 100MVA 설계 결과는 그림 3과 같다. 대도심 부하밀도의 증가에 따라 기존의 변압기 기술로도 154kV/100MVA의 설계가 진행 중에 있으며 이러한 결과를 한전이 검토하여 기존에 없었던 용량의 제품이지만 154kV/100MVA 변압기의 실제통 도입을 추진할 것으로 보인다. 초전도 사업단에서는 이러한 산업동향, 기존 변압기와의 비교를 통한 장단점 등의 분석을 바탕으로 3단계 집중기획을 통해서 3단계 실용화급 초전도 변압기의 목표를 설정할 계획이다.

### 3.3 초전도 한류기

우리나라 전력계통은 송전선이 짧으며 서로 네트워크화 되어 있는 특징을 지니고 있다. 따라서 국지적으로 발생하는 고장에도 대규모 정전과 같은 전기 사고에 직면할 가능성이 있다. 또한 급속한 산업발전 때문에 꾸준한 전력사용의 증가로 갈수록 단락용량은 증가하고 있으며, 기존 차단기들의 용량이 한계에 다다르고 있어 차단기의 교체가 상당부분 요구되고 있다. 이러한 요구에 가장 근본적인 대안으로 제시되는 것이 초전도 한류기이다. 초전도한류기는 전기저항 '0'이 되는 초전도 현상을 이용하여 정상 운전 시에는 발생 저항이 전혀 없다가, 계통에서 고장 발생 시에 별도의 감지 장치 없이 스스로 저항이 발생하는 신개념의 차

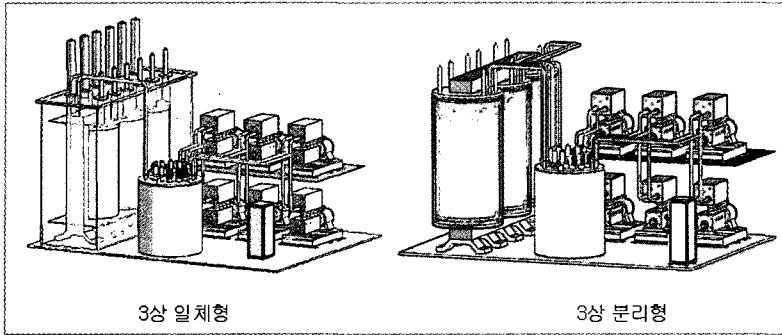


그림 3 154kV, 100MVA 초전도 변압기의 설계 결과

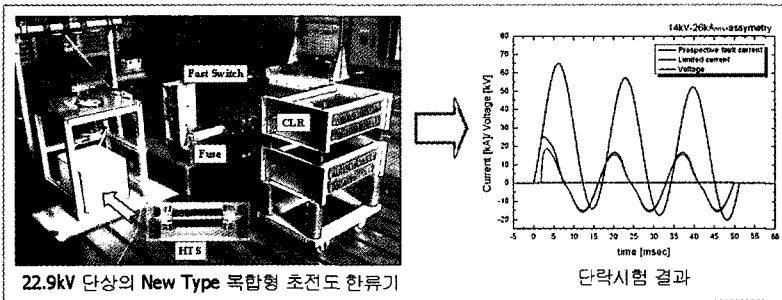


그림 4 22.9kV 단상의 복합형 초전도 한류기 및 시험결과

세대 전력기기이다. 초전도한류기가 계통에 적용되면 고장전류가 감소하여 계통의 안정도가 향상된다는 장점을 가지면서 동시에 기존 차단기의 교체시기를 늦출 수 있어서 경제적인 파급효과가 매우 크다.

초전도 사업의 1단계에서 6.6kV급 초전도 한류기 개발을 통해 초전도 한류기의 핵심기반기술을 확보하였으며, 2단계에서는 경쟁과제로서 현대중공업, 연세대학교 등의 협동연구로 CC를 이용하여 22.9kV, 630Arms 단상 무유도 한류기를 개발하고 있으며, 한전 전력연구원과 LS 산전 등의 협동연구로 22.9kV, 630Arms 3상 저항형 초전도 한류기를 개발하고 있다. CC를 이용한 무유도 한류기 연구개발에서는 세계최초로 제안하는 새로운 개념의 다병렬 솔레노이드 코일을 제안하여 전기절연에 유리하고 교류손실이 거의 없으며 열적으로도 안정하여 회복시간이 획기적으로 단축되는 기술을 확립하였으며 이를 이용하여 22.9kV 단상의 초전도 한류기를 제조하고 있다. 저항형 초전도 한류기의 연구개발에서는 새로운 형태의 복합형 초전도

한류기를 개발하였다. 새로운 복합형 초전도 한류기는 기존의 초전도 한류기의 방식과 달리 사고 전류를 감지하는 부분과 제한하는 부분으로 분리하여 구성하는 우리고유의 기술로 초전도 한류기의 성능을 극대화하였으며 저가 생산이 가능한 기술로 조기실용화를 추진할 계획이다. 그림 4는 22.9kV 단상 복합형 초전도 한류기와 단락시험 결과를 나타낸다. 12월 초에는 22.9kV 3상의 시험을 완료할 것이며, 앞으로 22.9kV 대용량 초전도 한류기에도 본 기술을 적용할 계획이며, 이와 더불어 154kV 대용량 초전도 한류기 개발을 3단계에 추진할 계획이다.

### 3.4 초전도 모터

초전도 모터는 기존의 구리도체 등을 사용하는 발전기나 모터의 계자코일, 혹은 전기자 코일을 초전도화하여 고자장/고전류밀도를 가능케하여 기기의 효율과 출력을 높이고 소형경량화, 안정도 향상 등 많은 장점을 가지고 있다. 미국의 경우 전체 전기에너지 사용량의 65%를 모터가 소비하고 있으며, 이 중에 절반정도를 1000hp 이상의 모터들이 차지하고 있어 효율 2%정도 향상이 가능한 초전도 모터의 개발은 국가적 에너지 정책의 핵심사안이 될 수 있다. 또한 개발된 초전도 모터 기술은 초전도 발전기 기술로 쉽게 전환이 가능하여 수백MW급 초전도 발전기 개발의 핵심기반기술이 될 것이다.

초전도 사업의 1단계에서는 100hp 초전도 모터를 개발을 통해 핵심기반기술을 확보하였으며 2단계 현재 두산중공업과 한국전기연구원 등의 공동연구로 1300hp 3600rpm의 초전도 모터를 개발을 통해 대용량 설계기술, 제작기술, 평가기술 등 시스템화 핵심기술을 확보하기위해 총력을 기울이고 있다. 초전도 모터

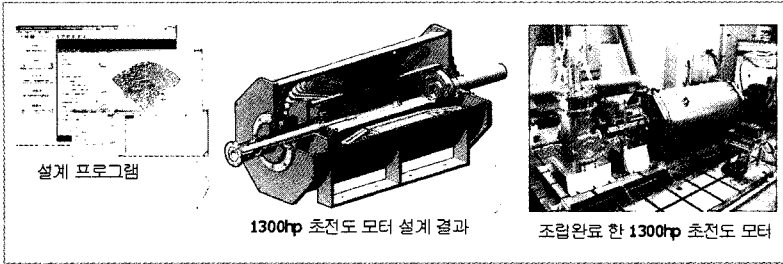


그림 5 1300hp 3600rpm 초전도 모터

기에 비해서 소형경량이며 손실이 감소하고 환경친화적인 본질적 속성으로 미래 에너지 사회의 핵심적인 대안으로 부상하고 있으며 이제는 전 세계적으로 초전도 전력기기의 적용은 먼 장래의 일이 아니라 현실로 다가온 사안이다.

초전도 사업단에서는 2011년

실용화급 초전도 전력기기 개발을 목표로 현재 2단계에서 22.9kV, 50MVA 초전도 케이블의 국제공인기관 시험, 154kV, 100MVA급 초전도 변압기의 핵심기술 개발, 22.9kV 초전도 한류기 개발, 1300hp 초전도 모터 개발을 통한 초전도 전력기기의 시스템화 핵심기술 확보를 목전에 두고 있다. 또한 수요자와 개발자간의 협의체 구성, 초전도 전력기기의 국제표준화 추진, 국제 초전도산업연맹의 회원국 가입추진, 국내외 언론매체 등을 통해 초전도 전력기기를 적극적으로 소개하고 도입을 촉진하기 위한 다양한 노력을 추진하였다. 본 원고가 이러한 노력의 일환으로 초전도 사업단의 초전도 전력기기 개발현황 및 계획에 대한 이해를 돕고 실 적용을 위한 참고자료가 되었으면 한다.

의 설계기술의 경우 기존의 방식에 비해서 매우 빠르고 간편하게 3차원 해석을 할 수 있는 EMCN (Equivalent Magnetic Circuit Network)를 기반으로 대용량 설계프로그램을 개발하였으며, 실용화를 고려한 계자코일 권선 및 조립기술 등 제작기술을 확보하여 1300hp 초전도 모터를 제작하였다. 그림 5는 조립완료된 1300hp 3600rpm의 초전도 모터를 보여주며 현재 한국전기연구원에서 실험을 준비하고 있다. 현재 미국 등에서는 저속형 초전도 모터를 개발하여 군함 등의 추진모터로 활용하기 위해서 연구 중에 있다. 이러한 국외동향을 반영하여 이미 수요자와 개발자가 참여한 초전도 모터 추진시스템 적용 협의체를 구성하여 구체적인 초전도 모터 적용방안을 수립하고 있다.

#### 4. 결 언

초전도 전력기기는 기존의 구리도체를 사용하는 기