초전도 전력기기 개발동향

조전욱[1], 성기철[1], 최경달[2], 고태국[3], 현옥배[4], 성태현[4], 한영희[4] /
[1]한국전기연구원, [2]한국산업기술대학교, [3]연세대학교, [4]한국전력공사 전력연구원

1. 초전도 케이블

대도시에서 빌딩의 집중, 도시기능이 고도화되면서 전력 수요가 급증하는 현상이 일어나고 있다. 전력수요 고밀도화에 대한 대책으로 지중케이블을 대용량화하거나, 복수회선을 신·증설하고 있으나 도심 지하공간은 지하철, 통신, 수도, GAS 및 빌딩 등이 복잡하게 얽혀 있어 지중케이블용 관로 및 전력구를 확보하는데 어려움이 많다. 이런 문제를 해결하기 위하여 고전압화와 강제냉각방식 등으로 케이블의 용량을 증대시키고 있으나 지금 현재 거의 한계에 도달한 상태이다. 그래서 손실이 현저하게 적고 에너지밀도가 매우 큰 고온초전도 전력케이블이 이러한 문제를 해결할 수 있는 기술로 인정되고 있다.

고온초전도 전력케이블은 표 1과 같이 기존 케이블의 구리도체 대신 고온초전도 도체를 사용한 저손실·대용량 전력수송이 가능한 전

표 1 기존케이블과 초전도케이블의 비교

항 목	고온초전도케이블	OF 케이블	CV 케이블
Former	Flexible Pipe or Spiral Tape	Spiral Tape	없음
도체	고온초전도도체	구리	구리
도체구조	Tape형태의 적층	원형압축연선	원형압축연선
냉매	액체질소 (77K)	OF 절연유	없음(냉각수)
절연	냉매함침 복합절연방식	OF절연유 함침	XLPE 압출
냉각계통	액체질소순환 및 냉동기부착	PT등 유압 조절장치	냉각수

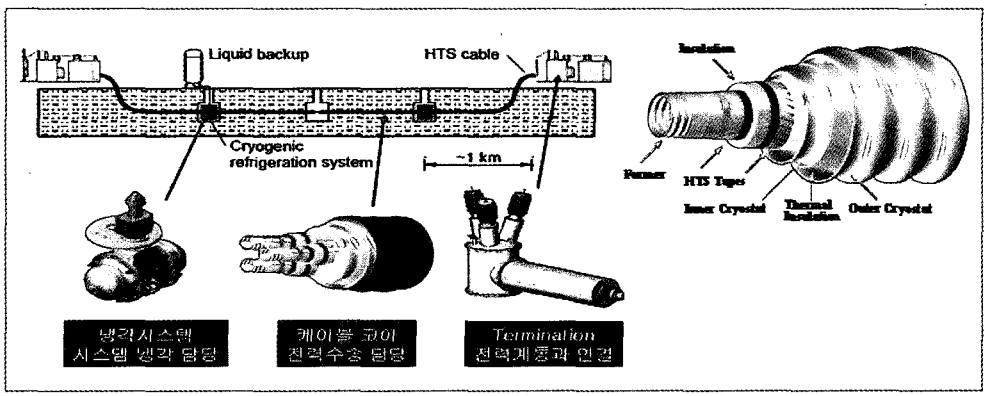

그림 1 초전도케이블 시스템 및 케이블 코아의 구성

력케이블로서 대도시의 전력공급문제를 해결할 수 있는 환경친화적 신개념의 전력케이블이다. 또한 기존의 전력케이블에 비해 초전도케이블은 765kV나 345kV의 초고압이 아닌 154kV 또는 22.9kV의 저전압으로 대용량 송전이 가능하기 때문에 종래 변전소의 고전압송전을 위한 주변기기를 간략화 시킬 수 있다. 초전도 전력케이블은 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, 전력공급 문제 등을 해결할 수 있다.

표 2. 미국 DOE SPI 프로그램에서 진행 중인 3대 초전도 전력케이블 프로젝트

Install	Long Island Power Authority	Bixby Substation, Ohio	Albany, New York
Period	2002-2006	2003-2006	2003-2006
Nation	France&USA	Denmark&USA	Japan&USA
Length	620m	300m	350m
Volt/Current	138kV/2.5kA	13.2kV/2.5kA	34.5kV/2.5kA

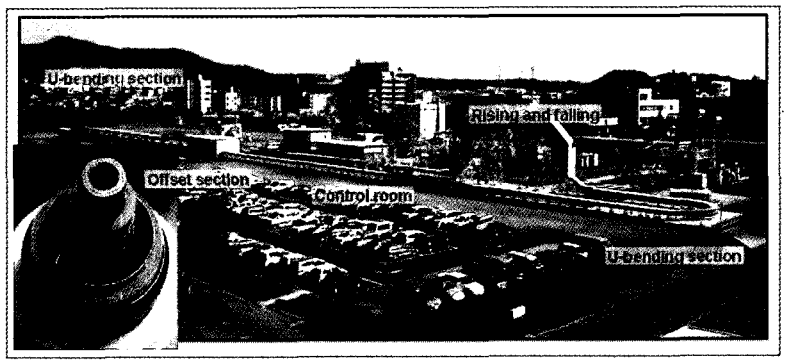

그림 3 Furukawa에서 개발하여 CRIEPI에 설치한 초전도 전력케이블

고온초전도 전력케이블은 그림 1과 같이 세부적으로는 former, 초전도도체, 전기절연 등으로 구성된 케이블 코아와 열 절연을 위한 cryostat의 부품과 냉각시스템, Termination 등으로 구성되어 있다.

고온초전도 전력케이블을 개발하고 있는 연구기관 및 국가는 미국에 상당히 편중되어 있으나 한국을 포함한 아시아권의 연구개발도 미국 못지않게 활발한 연구개발이 진행되고 있다.

미국에는 Southwire Co.와 ORNL(Oak Ridge National Lab.)이 공동으로 2000년 2월부터 2005년까지 Georgia 주의 Carrollton 공장 내에 12.5kV, 1.25kA, 3상으로 30m 시스템을 설치하여 공장 내의 전력공급용으로 30,000시간의 성공적인 운전을 하였으며, Pirelli 그룹은 2002년 Frisbie 변전소에 WD(Warm Dielectric) 방식의 초전도케이블로서 24kV급 120m를 포설하였으나 케이블 cryostat의 진공문제로 프로젝트를 중단하였다. 현재 DOE의 지원을 받은 SPI (Superconductivity Partnership with Industries) 프로그램으로는 LIPA project, AEP Ohio project, 및 Albany project 3대 초전도 전력케이블 프로젝트가 실계통 운전을 목표로 진행 중에 있으며 이에 대한 요약설명은 표 2와 같다.

일본 스미토모전공과 동경전력이 공동으로 개발한 100m급 초전도 전력케이블 실증시험이 끝나고, 스미토모전공은 미국의 IGC-Superpower와 협력하여 Albany project로 진출하였다. 이후, 일본 내에서는 Super-ACE project를 중심으로 후루카와 전공에서 500m급 단상 초전도 전력케이블을 개발하여 CRIEPI에서 실험을 완료하였다. 그림 3은 CRIEPI에 특성 시험을 위해 설치되어 있는 500m급 초전도 전력케이블의 사진이다. 본 개발은 고저차, U-bending, 지하포설 등 실제 포설 및 운전상황을 고려하여 평가를 진행하여 초전도케이블의 실계통 적용에 필요한 연구 결과를 확보하였다.

또한 2006년부터 2세대 초전도도체를 이용한 초전도케이블 개발과 이의 접속 등 상용화를 위한 연구개발을 진행하고 있다.

중국은 저온부터 시작하면 30년이 넘는 초전도 연구개발 역사를 자랑한다. 최근에 고온초전도에 대한 연

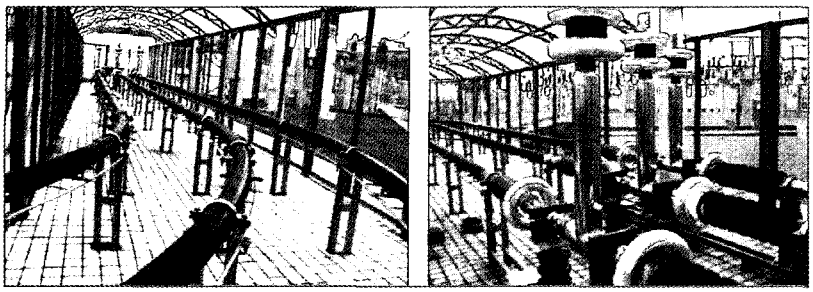

그림 4 푸지변전소내의 30m 초전도 전력케이블의 설치모습

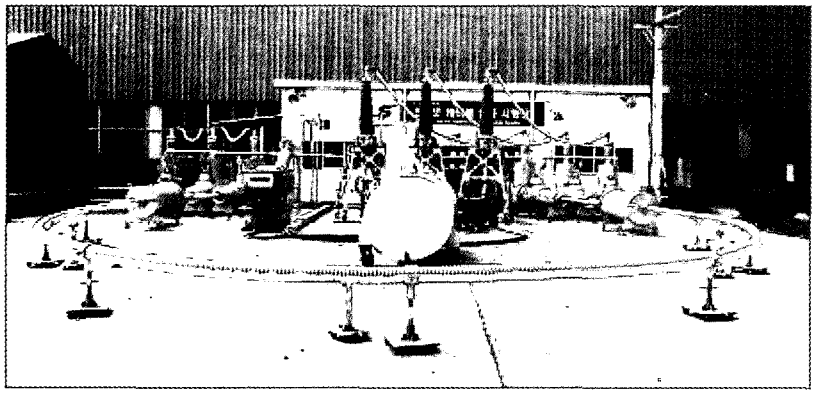

그림 5 국내에서 개발 중인 고온초전도 전력케이블 시스템

며, 그림 5는 개발 완료된 3상, 30m 초전도케이블의 사진이다.

이는 22.9kV, 50MVA, 3상 30m Cold Dielectric 방식의 전기절연과 1개의 cryostat에 3상을 모두 설치하는 구조의 초전도케이블로서 2005년 7월 장기실증시험을 성공적으로 완료하였다.

2006년은 2단계의 3차년도로서 22.9kV, 50MVA급 초전도케이블의 제품화를 위한 기반을 확보하고 2세대 도체를 이용한 초전도케이블 개발을 진행할 계획이다. 또한 154kV급의 송전용량을 대체할 수 있는 대용량 초전도 신배전 전력계통을 대비한 22.9kV, 150MVA 이상의 초전도케이블 연구와 154kV급 연구개발을 계속 진행할 계획이다.

구가 활발하게 진행되고 있으며, IEE CAS그룹과 InnoPower사에서 특히 초전도 전력케이블 연구를 활발하게 진행시키고 있으며, InnoPower사의 초전도 전력케이블 연구개발 현황은 다음과 같다.

InnoPower사는 Bi-2223 wire를 제작 판매하고 있는 중국의 InnoST사와 중국의 운남전력과 공동 출자로 만들어진 회사로서 2004년 6월 30m급 초전도 전력케이블을 중국계통에 최초로 설치하였다.

전압계급은 35kV이며, 정격전류는 2kA로 설계되었다. 최근 대부분의 초전도 전력케이블이 Cold Dielectric으로 설계되고 있는 것에 반하여 본 프로젝트는 절연방식이 Warm Dielectric방식으로 설계되었으며, 8대의 GM 냉동기를 설치하여 냉각시스템을 개발 운전하고 있다.

현재 국내에서 2001년부터 21C 프론티어연구개발사업의 하나인 차세대초전도응용기술개발사업에서 한국전기연구원 주관으로 LS전선(주), 한국기계연구원 등이 공동으로 초전도 전력케이블 개발을 진행하고 있으

2. 초전도 변압기

초전도변압기의 기본 구조는 일반변압기와 크게 차이가 없으며, 기본적인 구조는 1차 권선과 2차 권선 사이에 자기 결합이 잘 되도록 철심을 두는 형태이다. 초전도변압기의 설계는 기본적으로 일반변압기와 동일한 기준이 적용된다. 그러나 초전도 선을 사용하기 때문에 일반변압기와는 다른 열적 또는 기계적인 측면에서 초전도선을 냉각시키고 온도를 유지해야하는데 그러기 위해서는 극저온 용기가 필요하다. 초전도변압기는 1차, 2차 권선만 냉각시키고 철심은 상온에 위치하도록 하기 위해 가운데가 빈 저온 용기에 권선을 설치하고 철심은 저온 용기의 중심으로 통과시키는 구조를 가진다.

초전도변압기가 일반변압기에 비해 갖는 장점을 살

펴보면 다음과 같다.

1) 효율 상승

초전도체의 대표적인 특징은 저항이 없다는 점이다. 저항이 없으므로 전류가 흐를 때 발생하는 주울 열 손실, 즉 동손이 없기 때문에 초전도변압기는 일반변압기보다 효율이 높다. 그러나 일반변압기의 경우에도 변전소 등에서 사용하는 대용량 변압기의 효율은 현재 99 % 이상이어서 초전도 변압기를 사용함으로서 개선할 수 있는 효율 상승 폭은 0.2 % 정도로 낮은 편이다. 하지만 전력 계통 시스템에서 사용하는 전체 변압기 수량을 고려한다면 효율상승으로 인한 운전비용의 감소와 에너지 절약 효과는 크다.

2) 무게 및 부피 감소

초전도변압기의 다른 장점으로 무게와 부피의 감소를 들 수 있다. 일부 대도시의 경우 초전도변압기의 고효율로 인한 에너지 절약효과보다 변압기의 부피 및 무게감소 효과가 매우 중요하게 고려된다. 특히, 우리나라 대도시의 경우 154kV급 60MVA 배전용변압기는 빌딩의 지하에 설치되어 운전되고 있다. 하지만 2017년에 150%의 부하용량 증가가 예상되고 있어서 배전용 변압기의 용량 또한 증가 하여야 한다. 일반변압기를 사용한 용량 증가는 설치장소의 면적 제한 때문에 많은 어려움이 있으며, 이 문제를 해결하기위한 방안으로 일반변압기의 크기를 1/3 혹은 1/2로 줄일 수 있는 초전도변압기의 필요성이 고려되고 있다. 그림 6은 100MVA 초전도 변압기와 60MVA 일반변압기를 비교하여 나타낸 것이다.

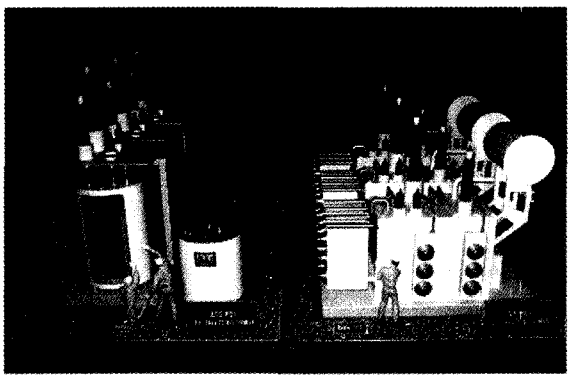

그림 6 100MVA 초전도 변압기(좌측)와 60MVA 일반변압기(우측)

3) 안전하고 환경 친화적

일반변압기에서는 권선의 냉각과 절연을 위해 절연유를 사용한다. 30MVA급 변압기에 들어가는 절연유는 대략 23,000 l 가 되며 이 절연유는 환경오염을 유발하고 변압기의 과열 시 화재나 폭발할 수 있는 문제점이 있다. 초전도변압기의 초전도권선 냉각을 위해 사용되는 냉매는 77K의 온도를 가지는 액체질소를 사용한다. 액체질소는 값이 싸고 환경오염과 폭발 위험이 없기 때문에 초전도 변압기의 냉매로 적합하다. 또한, 냉매인 액체 질소는 초전도변압기 권선의 절연도 담당한다.

4) 과부하 내력 증가

대용량 변압기 수명은 대략 30~40년 정도로 보고 있다. 변압기를 30년 이상 사용하기 위해서는 변압기 내부의 온도가 가장 높은 지점이 110℃를 넘어서는 안 된다. 만일 이 한계를 20℃ 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 1년 중 평균 수요의 2배 가까이 증가하는데 이 기간 수요에 맞춰 용량이 결정된 변압기이기 때문에 여름철을 제외한 나머지 기간에는 정격의 50% 정도밖에 사용하지 못하여 운전 효율이 높지 못하다. 반대로 변압기 용량을 낮춰 설치한다면 변압기 수명이 급격히 감소하므로 지금의 일반변압기로는 이 문제를 해결할 수 없다. 초전도변압기의 경우, 정격 전류 이상의 부하 전류를 흘린다고 하더라도 일반변압기와 같이 절연이 열화 되는 일은 발생하지 않는다. 정격의 200% 정도의 부하 전류가 흘러도 변압기 수명에는 아무런 영향이 없으므로 1년 중 몇 주밖에 되지 않는 피크 부하에 맞춰 변압기 용량을 결정할 필요가 없으며, 따라서 연간 운전 효율은 일반변압기보다 훨씬 더 좋아지게 된다.

현재, 이러한 일반변압기의 단점을 극복하기 위하여 21세기 프론티어연구개발사업인 차세대초전도응용기

술개발사업의 일환으로 2001년부터 2011년까지 3단계로 나누어 100MVA / 154kV급 변전소용 초전도변압기 개발에 관한 연구가 진행 중에 있다.

1단계(2001년~2004년) 연구 목표는 22.9kV / 6.6kV 1MVA급 단상 초전도변압기 개발을 통하여 고온 초전도변압기 제조기술 확립 및 초전도변압기 기본 특성 및 운전 특성 도출함으로서 3단계에서 제작될 100MVA급 초전도 변압기의 제작 관련 기초 기술을 확보하였다.

2단계(2004년~2007년) 연구 목표는 100MVA 초전도변압기를 개발하기 위하여 선행 되어야 되는 핵심 기술(절연, 권선, 냉각방식)개발을 목표로 한다. 현재 100MVA 초전도변압기의 개념 설계 및 냉각 방식, 권선 형태에 대한 연구 및 기술 개발이 진행 중에 있다.

3단계(2007년~20011년) 연구 목표는 앞서 연구된 성과를 바탕으로 100MVA / 154kV급 변전소용 초전도변압기 개발 할 계획이다.

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 산업발전에 따른 꾸준한 전력사용의 증가로 갈수록 단락용량은 증가하고 있으며, 기존 차단기들의 용량이 한계에 다다르고 있어 차단기의 교체가 상당부분 요구되고 있다. 따라서 현재 154kV 송전선의 31.5kA급 가스절연개폐장치(GIS)를 50kA급 용량의 장비로 교체하고 있으며, 345kV 송전선에서도 40kA급 GIS를 63kA급 GIS로 교체하는 작업이 진행 중이다. 또한 154kV급 송전선로는 서로 연계되어 있어 고장 발생에 대한 유연성을 높이는 것이 전력계통 운용에 보다 효율적임에도 불구하고, 높은 고장 전류 때문에 모선을 분리하여 방사형으로 운전하고 있는 실정이다. 이러한 기존의 대책들만으로는 전력계통의 안정화를 기대하기 어려우며 특히 대용량 개폐기나 차단기의 비싼 가격을 고려한다면, 고장 전류에 대한 근본적인 새로운 대안이 강력하게 요구되고 있다.

최근에 전력계통에서 고장(사고)에 대한 가장 근본적인 해결책으로 제시되고 있는 것이 초전도한류기(Superconducting Fault Current Limiter)이다. 초전도한류기는 전기저항 '0' 이 되는 초전도 현상을 이용하여 정상 운전 시에는 발생저항이 전혀 없다가, 계통에서 고장 발생 시에 별도의 감지 장치 없이 스스로 저항이 발생하는 신개념의 차세대 전력기기이다. 현재 계통에 설치되어 있는 차단기들은 용량에 따른 약간의 차이는 있지만 대개 사고발생 후 3~5 주기가 지난 후에야 완전한 절환이 이루어진다. 이 3~5 주기 동안에는 정상전류의 약 20배 이상의 전류가 전력기기에 인가되게 된다. 이러한 고장 전류는 전력기기의 피로도 증가나 열화 현상을 일으키는 직접적인 원인이 되고 있으며 때에 따라서는 전력기기의 파손이나 폭발들을 유발한다. 초전도한류기는 고장발생 1/4주기 이내에 스스로 동작이 시작되는 데다, 고장 전류를 차단하는 시간을 단축시키는 것이 아니라 고장 전류의 크기를 감소시키는 것이기 때문에 전력계통의 안정화에 매우 중요한 역할을 수행할 수 있다. 특히 초전도 전력케이블, 초전도변압기 등 대부분의 초전도 전력기기들이 기존의 전력기기에 비해 무저항, 무손실 특성을 활용한 소형화 및 고효율화를 추구하는 반면, 초전도한류기는 기존 전력시스템에 없던 전혀 새로운 첨단기기이면서 현재 초전도응용기기 중 가장 상용화가 빠를 것으로 예상되고 있는 장치 중의 하나이다.

초전도한류기가 계통에 적용되면 고장전류가 감소하여 계통의 안정도가 향상된다는 장점을 가지면서 동시에 기존 차단기의 교체시기를 늦출 수 있어서 경제적인 파급효과가 매우 크다. 예를 들면, 154kV 송전급 모선연계(bus-tie) 부위에 초전도한류기를 설치하게 되면 기존의 50kA 정격의 차단기 약 64대 이상의 교체를 막을 수 있으며 단순히 차단기의 교체 비용만을 계산하더라도 최소 96억원 이상의 경제적인 이득을 가질 수 있는 것으로 파악된다. 이외에도 병원이나 인테리전트 빌딩과 같은 고급 부하의 고장전류에 대한 보호 역할이나 고장전류에 의한 변압기의 열화를 방지해 주는 효과 등을 산출해보면 초전도한류기 설치로 인한 경제적, 사회적 파급효과는 막대하다고 할 수 있다.

현재 초전도한류기는 미국, 독일, 일본 등의 대학, 연구소 및 기업에서 활발하게 개발 중에 있으며 특히 대부분의 프로젝트가 전력회사와 함께 진행되고 있어 상용화의 임박을 예고하고 있다. 독일에서는 초전도체 제작회사, 전력운용회사 등이 모두 참가한 CURL10이라는 프로젝트를 통하여 고온 초전도체인 Bi2212 벌크를 이용한 10kV/10MVA급 초전도 사고전류제한기 개발을 2004년에 완료하였고 실제 전력계통에서 실증시험에 성공하였다. 그림 7은 CURL10 프로젝트의 한류기 및 시험장을 보여준다. 또한 일본의 Toshiba에서는 송전급인 66kV/750A급 사고전류제한기를 개발 중에 있으며 현재 주요 핵심 부품인 직류 리액터형 초전도마그네트의 개발이 성공적으로 완료된 상태이다.

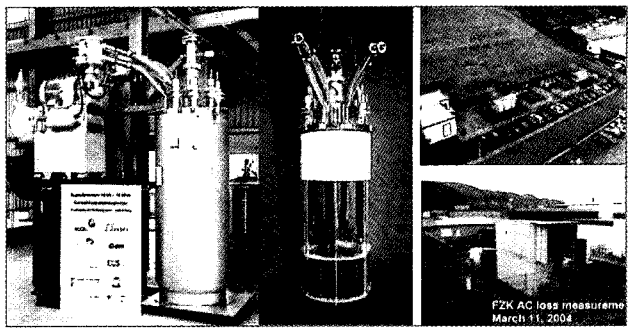

그림 7 독일 CURL10 프로젝트의 10kV급 한류기. 오른쪽은 RWE 변전소에 모선 연계용으로 설치한 모습(2004년 4월부터 1년간 시험)

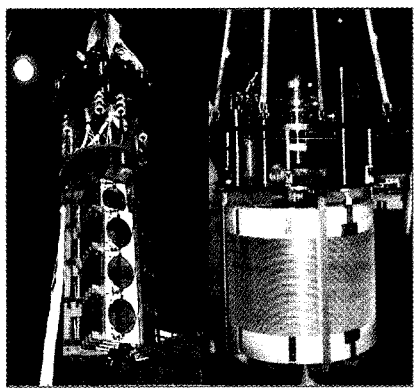

그림 8 (a)한전 전력연구원 (b)연세대학교에서 각각 개발한 6.6kV급 초전도한류기의 내부

우리나라에서도 과학기술부 21세기 프론티어연구개발사업 중 차세대초전도응용기술개발사업의 일환으로 2001년부터 2011년까지 10년 동안 송전급인 154kV/2kA급 초전도한류기의 상용화를 목표로 연구가 수행 중에 있다. 2001년 9월부터 시작하여 1단계 3년 후인 2004년까지 6.6kV/200A급 초전도한류기 개발, 2단계 3년 후인 2007년까지 22.9kV/630A급 초전도한류기 개발, 마지막 3단계 4년 후인 2011년까지는 154kV/2kA급 초전도한류기를 개발하는 것이다. 1단계 목표인 6.6kV급 초전도한류기는 그림 8과 같고, 유도형 및 저항형 초전도한류기가 연세대학교와 한전 전력연구원 주관으로 각각 개발되어 단락 시험을 완료한 상태이다. 그림 9는 단락시험 결과를 보여주는 그래프인데 한류기가 없는 경우 고장 전류는 5.5kA이상 올라가게 되며, 모의실험이 아닌 실제 단락사고라고 가정하면 정상 시 전류의 20배에 달하는 전류가 약 0.1초의 시간 동안 계통에 흘러 막대한 피해를 줄 것으로 예상된다. 하지만, 그래프에서 초전도한류기가 있는 경우에는 사고가 발생하자마자 전류를 제한하기 시작하여 전류가 서서히 증가하고 있으며 사고 발생 후 0.05초 이후에도 1.7kA로 고장 전류를 제한하는 것을 확인할 수 있다.

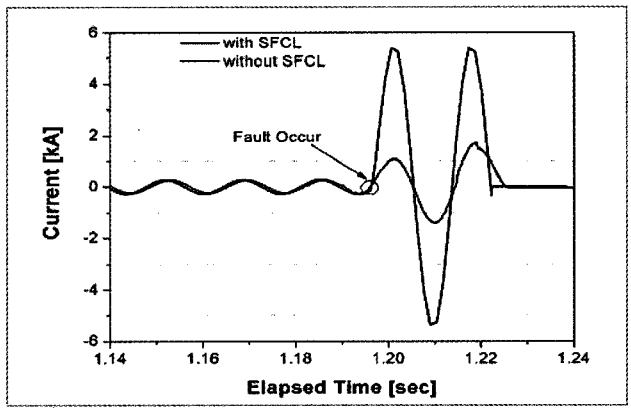

그림 9 초전도한류기가 설치되지 않은 경우의 부하에 흐르는 전류 vs. 초전도한류기가 설치된 경우의 부하에 흐르는 전류

현재는 2단계 연구가 진행되고 있는 상황이며 연세대학교와 현대중공업이 공동으로 제2세대 초전도선을 이용한 무유도권선형 초전도한류기를, 한전 전력연구원과 LS산전이 공동으로 Bi 벌크를 이용한 배전급 초전도한류기를 각각 개발 중에 있다. 1단계 연구를 성공적으로 마치면서 준 상용화급인 6.6kV급 proto-type 한류기로서의 사용을 검증하였으며, 2단계 연구에서는 초전도 기술뿐만 아니라 고전압 절연과 고효율 냉각을 고려한 상용화급 한류기의 개발을 목표로 진행 중이다.

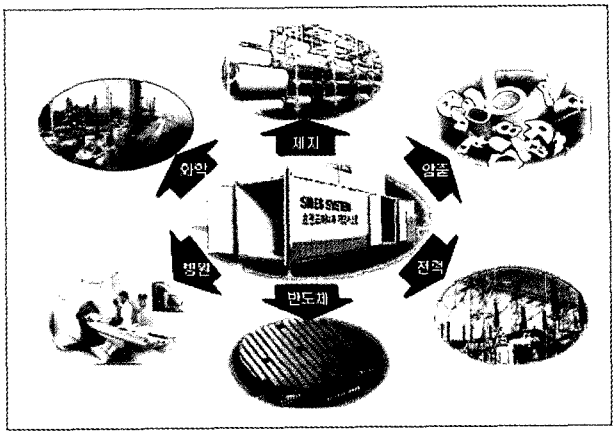

그림 10 SMES의 활용분야

4. 초전도 에너지 저장장치

과학자들은 효과적으로 에너지를 저장하기 위한 노력을 경주해오고 있다. 즉, 위치에너지를 이용한 양수발전, 이차전지를 사용한 전지저장, 압축 공기저장 등이 대표적 기술이다. 한편, 에너지 저장기술로서 빠른 충·방전, 대용량 충·방전 및 고효율 특성을 가진 기술의 필요성은 전력수요의 증가에 따른 부하평준화 및 대용량 무정전 전원장치의 필요성에 따라 더욱 절실해지고 있다. 석유파동을 겪고 난 이후인 1970년 대 후반부터 이 분야에 초전도 기술을 접목하여 특성이 우수한 초전도 자기에너지 저장(SMES ; Superconducting Magnetic Energy Storage) 및 초전도 플라이휠 에너지 저장(SFES; Superconductor Flywheel Energy Storage) 기술 개발에 매진 중에 있다.

4.1 초전도 자기 에너지 저장장치

SMES 기술은 전기저항이 0(零)인 초전도마그네트에 전류를 흘려 자기(磁氣)에너지의 형태로 에너지를 저장하는 방식으로 저장효율이 높은 것은 물론 대용량의 저장에너지를 고속으로 저장 또는 방출할 수 있는 우수한 특징을 가지고 있다. 또한 반영구적으로 사용이 가능하며, 환경 친화적인 기술이기 때문에 응용분야가 매우 넓은 새로운 기술이다.

SMES 기술이 전력계통에 도입될 경우, 단순히 전력저장 측면의 기능뿐만 아니라 전력계통의 주파수·전압 제어 및 안정화 제어와 같은 제어성능의 고도화는 물론 전력품질 향상 등과 같은 효과가 기대되므로 전기에너지의 생산·수송·소비 분야에서 폭넓게 활용될 수 있는 유용한 기술이다.

최근 전기 분야에 있어서 새로운 변화들을 살펴보고, 각각에 대한 SMES 기술의 중요성을 요약하면 다음과 같다.

■ 분산전원 도입량 증대

분산전원의 도입량이 증대됨에 따라 분산전원의 계통연계에 의한 전력 품질공급 신뢰도 확보에 대한 문제점이 지적되고 있어 계통제어 측면에서 효과가 탁월한 SMES 기술의 중요성이 더욱더 커지고 있다.

■ 전력시장 자유화

전력시장 자유화에 따라 질 높은 전력공급을 유지하면서도 한층 더 저비용화를 도모하는 것이 중요한 과제가 되고 있다. 이 때문에 주파수 조정, 변동부하 보상 및 전력계통의 안정화에 효과적인 계통 제어용 SMES 기술에 대한 기대가 높아지고 있다.

■ 지구환경 문제의식 고양

지구 온난화의 주범인 CO_2 저감과 에너지 절약에 대한 사회적 관심이 그 어느 때 보다도 커지고 있어, SMES의 고효율 특성을 활용한 부하 평준화용 SMES 기술도 기대되고 있다.

■ IT(Information Technology)기술의 급속한 진전

IT기술의 급속한 진전에 따라 전력수요에서 차지하는 IT와 관련된 비중이 급속히 증가하고 있으며 향후에는 더욱더 높아질 것으로 예측되고 있어, 순간전압강하 등이 발생했을 경우 피해규모가 커질 것으로 생각된다. 따라서 전력품질의 향상에 위력을 발휘할 수 있는 SMES기술의 중요성이 높아지고 있다.

80년대부터 지금까지의 SMES 연구개발 방향을 간단히 정리하면, 주로 80년대에는 도입효과를 검증하기 위해 수백 kJ규모 이하의 SMES를 설계/제작하여 전력계통을 모의한 실험실 수준의 검토가 진행되었다. 이 결과 SMES는 부하 평준화는 물론, 유효 · 무효 전력을 독립적으로 제어할 수 있으며 시간 응답성도 우수하여 전력 계통 제어장치로서는 매우 뛰어난 기능을 가지고 있다는 것이 실험적으로 확인되었다.

따라서 90년대 이후에는 기타 에너지저장 기술보다 월등하게 고효율인 특성을 활용하기 위한 중 · 대규모의 SMES 기술 개발이 추진되었던 시기로 볼 수 있다. 그러나 대용량 초전도 도체, 대전류 영구전류 스위치, Quench보호, 고강도 지지구조 및 고효율 냉각기술 등에 대한 기술개발이 이루어져야 하며 이로 인한 시간과 고가의 연구개발 비용으로 인하여 중 · 대규모의 SMES기술 개발이 실용화되기까지는 아직도 시간이 필요할 것으로 전망된다.

반면, 소규모의 SMES의 경우에는 90년대 중반부터 최근까지 대용량의 에너지를 초고속으로 수수할 수 있는 특성을 활용한 용도와 반복되는 충 · 방전에 의한 열화가 적기 때문에 사용빈도가 높은 변동부하를 보상하거나 불안정한 전원의 안정화를 도모하기 위한 용도에 대한 연구개발이 활발히 추진되었던 시기로 볼 수 있다. 그 결과 전자의 경우, 초 단위의 대용량 에너지 충 · 방전을 통해 전력회사에서는 전력계통 안정화를 도모할 수 있으며, 사용자측에서는 순간정전 및 순간전압 강하와 같은 전력품질 문제에 대해 중요부하를 보호할 수 있는 기술개발로 발전되었다. 즉 미국의 기업에서는 이미 10여년 전부터 Micro SMES라고 부르는 소규모 SMES를 개발하여 중요부하 보상용도로 수십대를 판매하였으며, 특히 이 기술을 개선하여 전력회사에서 소규모 계통안정화 용도로 SMES를 운전/개발하였다. 일본에서도 순간전압 강하 보상용 SMES가 개발되어 액정공장에서 3여 년간의 실증시험이 현재까지 성공적으로 추진되고 있다. 이미 국내에서도 이와 동등 수준의 소규모 SMES에 대한 연구개발을 완료하고 현재 상용화 방안을 강구하고 있다.

후자의 경우에는 경합기술인 전지 및 슈퍼커패시터 등과 비교하여 압도적인 Cycle 수명을 가지므로 태양광이나 풍력 등의 변동이 심한 불안정한 전원에 대한 안정화를 도모하거나 철도 등 사용빈도가 높은 변동부하를 보상하기 위한 기술개발이 이루어지고 있다. 일본에서는 이를 위하여 국가의 지원 하에 동경지역 근방의 제철공장에서 발생하는 부하변동을 보상하기 위하여 수십 MJ규모의 SMES를 도입하기 위한 연구개발이 현재 활발히 추진하고 있다.

한편 그간의 문제점으로 지적되었던 저 자계 운전, 고가의 냉각 비용 및 운전 · 유지 보수상의 어려움 등에 대한 해결방안으로 최근 고온 초전도체를 적용한 SMES 기술 개발이 진행되고 있어 국내에서도 외국과 동등 규모의 고온 초전도 SMES 개발을 목표로 기술개발 사업을 추진하고 있다.

4.2 초전도 플라이휠 에너지 저장장치

플라이휠 에너지 저장장치는 전기에너지로 모터를 돌려서 회전체를 고속으로 회전하여 회전에너지로 변환시킨 후 저장하였다가 필요할 때 발전기를 연결하여 전기에너지를 뽑아내는 방식을 사용하는 에너지 저장장치이다. 플라이휠 에너지 저장장치의 구성은 회전할 수 있도록 하는 베어링과 에너지를 저장할 수 있는 로터, 전기에너지에서 회전에너지, 또한 회전에너지에서 전기에너지로 변환할 수 있는 전동/발전기의 3부분으로 되어 있다. 플라이휠 에너지 저장장치에서 중요한 것은 저장 에너지밀도와 변환효율 그리고 손실율이다.

미국에서는 플라이휠 관련 프로젝트에 많은 연구진들이 참여하여 우주 산업분야에서부터 도심형 버스에까지 폭넓게 연구되고 있다. 초전도 베어링을 이용한 플라이휠 관련 프로젝트 중 초전도 베어링 관련 기술개발에 대한 연구는 주로 ANL(Argonne National

Laboratory)에서 하며 플라이휠 시스템 개발은 보잉사에서 주로 수행하고 있다. ANL은 보잉사와 공동으로 5kWh/3kW 플라이휠 시스템과 요소별 설계를 하여 시스템을 구축하였다. 5kWh/3kW 플라이휠 시스템에 사용된 모터/전동기는 4 pole로 구성되어있으며 radial gap이 큰 것이 특징이다. 모터/전동기 특성을 평가하기 위해 87,000 rpm에서 회전 특성 실험을 수행하였다. 출력은 3kW이고 이때 발생되는 모터/전동기 손실은 45W이다. 100kW UPS 플라이휠 시스템에 적용될 모터/전동기 특성은 24,000 rpm에서 수행되었으며 출력은 100kW이고 손실은 약 1.6kW 정도였다.

일본에서는 국가적 과제로써 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization) 지원 하에 연구기관과 기업간 상호 협력으로 초전도 플라이휠 시스템에 대한 연구를 활발히 수행하고 있다. 일본은 데이터 백업 시장을 고려한 플라이휠 시스템 시장이 2010년에 25조 엔이 될 것으로 예상하고 있다.

ISTEC과 중부전력은 현재 10kWh급 초전도 플라이휠 시스템 시작품을 개발하고 있으며 직경 1m에 무게 400kg인 플라이휠 로터를 12,000 rpm까지 성공적으로 회전시킴으로써 대용량 초전도 플라이휠 시스템의 가능성에 대한 확신을 얻게 되었다. 10kWh급 초전도 플라이휠 시스템은 초전도 베어링과 두 개의 전자석 베어링, Carbon Fiber Reinforced Plastic으로 구성되어 있고 이에 사용되는 레디얼 방식 초전도 베어링은 10 N/㎠(71 K) 부양능력을 달성하였다. 초전도 베어링은 실린더 형태이며 직경 12cm에 9cm 높이를 갖는다.

국내에서는 전력기반조성 사업센터의 지원을 받아 한전 전력연구원 주관으로 효성중공업, 한국기계연구원, 한양대, 한국과학기술원 등이 공동으로 5kWh 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 개발을 목표로 연구를 진행 중이다. 주관기관인 한전 전력연구원은 2002년 300Wh 초전도 플라이휠 에너지 저장장치를 개발하고 28,000 rpm까지 운전하여 진폭 25㎛로 세계 최고 값을 달성한 바 있으며, 2003년에는 초전도 베어링 마찰계수 값으로는 세계 최고 수준인 2×10^{-6}을 달성하였다. 이러한 기술력을 바탕으로 2004년 5kWh 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 설계와 제작을 완료하고 초전도 회전체 전용 실험동 내의 지하 5m 깊이에 있는 안전시설에서 운전 테스트 중에 있다.

그림 11은 한전 전력연구원에서 개발하고 있는 5kWh 초전도 플라이휠 에너지 저장장치를 보여주며, 특징은 영구자석 베어링을 사용하여 플라이휠의 하중을 지지하고, 초전도 베어링으로 안정된 부양 및 베어링의 역할을 하도록 구성되어 있어 초전도 베어링용 cryostat의 크기가 타 모델에 비하여 작고 그에 따라 열부하도 크게 감소시켜 전체 시스템의 효율을 대폭 향상시킨 것이다.

이에 한전 전력연구원에서는 5kWh 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 개발을 2006년에 완료하고 향후 5년 계획으로 상업화에 근접하는 규모인 100kWh 급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 개발에 착수하였다.

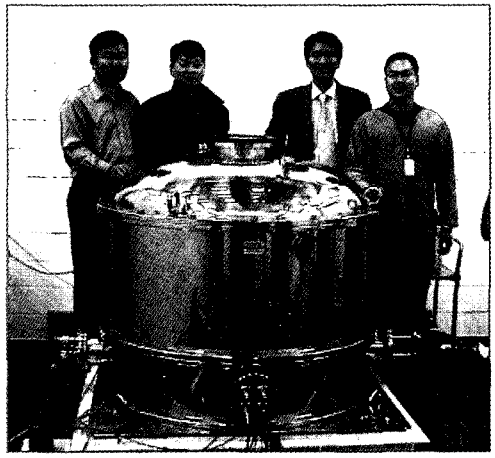

그림 11 전력연구원에서 개발 중인 5kWh 초전도 플라이휠 에너지 저장장치