

초전도 응용기술 조사 전문위원회 조사 보고

* 류 강식, ** 윤 문수
* 한국전기연구소

Report of the Investigation Speciality Committee of
Superconducting Application Technology

* Ryu Kang Sik, ** Yyn Moon Soo
* Korea Electrotechnology Research Institute

1. 서론

문명의 발달로 에너지의 수요는 폭발적으로 증가하고 있으며 전체에너지 중에서도 대다수 이상을 차지하는 전기 에너지의 수요도 향후 2000년경에는 현재의 약 3배 이상에 달할 것으로 추정되고 있다. 특히 전력수요의 패턴에 있어서는 도심과 지방과의 전력 불균형 현상이 더욱 심화되어 도심지역에서의 전력수요 과밀화 현상이 진전됨으로써 전원 입지의 확보문제와 환경문제가 대두될 것으로 예상된다. 이와 같은 면에서 볼때 향후 전력시스템의 당면해결과제로는 대도시의 전력공급대책과 부하극선의 평준화 및 순동에 비력 확보, 발.송변전설비의 이용률 향상, 안정도 향상대책 등을 생각할 수 있는데 이 문제의 해결방법으로는 최근에 대두되고 있는 전력시스템의 초전도화가 유일한 방법으로 보인다.

이와 같은 관점에서 본 전기학회에서는 향후 곧 도래하게 될 전력시스템의 초전도화를 목적으로 이에 필요한 기술 개발을 촉진시키고 궁극적으로는 국내에서도 초전도 전력시스템을 구축하는데 일조하기 위하여 초전도 전력 응용의 전반적인 기술동향을 조사하였다.

조사대상으로는 전기에너지의 생성과 공급, 효율적 이용 측면에서 MHD발전, 에너지 저장, 케이블, 변압기, 회전기, 전류제한기, 주변기기 등으로 이들을 초전도 할때의 기술들에 대한 현황과 향후 개발과제 및 전망에 대하여 고찰하였다.

2. 초전도 전력시스템의 특징

기존의 전력기술에 초전도 기술을 적용할 때에는 한꺼번에 전력계통설비 모두를 초전도화 시킬 수 없기 때문에 다음에서와 같은 몇가지 전력시스템의 특징을 고려하여 초전도화가 가능한 전력 기기들로부터 점진적으로 초전도화 시키면서 궁극적으로는 계통 전부를 초전도화 시키는 전 초

전도 전력시스템을 구축하여야 한다.

1) 초전도 기술은 규모가 크고 소규모에서는 경제성이 적은 scale 효과 때문에 기존의 전력 공급 시스템과는 별도로 신 전력공급계를 건설하기란 매우 곤란하다. 따라서 기존의 전력시스템을 구성하고 있는 기기중 필요한 부분만을 차례로 초전도 기기로 바꾸는 것이 바람직하다.

2) 기존의 전력시스템은 저 리액턴스화 및 전기저항손실 저감을 위해 초고압 송전망으로 구성하고 있는 것에 비해 초전도 기술은 저전압.대전류형 송전망을 의미하기 때문에 기존의 시스템과 연계시키기 위해서는 초고압 계통의 중간부분에 새로운 초전도 송전망을 구축하여야 하는 문제점이 있다. 따라서 이와 같은 때에는 초전도의 메리트중에 하나인 전력손실 저감효과 보다도 변전설비의 증가폭이 더 부담이 크게 되는 경우가 생기기 때문에 초전도 기기를 도입하는 초기에는 기존의 기기와 같은 정격사양으로 하고 이후 초전도 기기가 많이 도입되고 기술도 어느정도 성숙된 단계에서 점진적으로 초전도 전력시스템을 구축하는 것이 좋다.

3) 기존의 전력기기중 발전기나 변압기의 경우를 보면 효율이 대단히 높아 각각 98.7%, 99.7%에 달하기 때문에 이들 기기를 초전도화 하더라도 1.3%, 0.3%의 손실만이 저감될 뿐이다. 따라서 이 자체만으로는 초전도화하는 잇점이 그다지 크지 않기 때문에 시스템에 도입할려는 각각의 초전도 기기에 어떤 새로운 기능과 성능을 부여함은 물론 고도의 신뢰성을 갖도록 하여야 한다.

4) 그림 1-1은 초전도 전력시스템의 예를 도시한 것으로 빗금친 부분에 해당하는 송전선, 핵융합 발전소, 발전기, 변압기, MHD 발전, 에너지 저장 등이 초전도화가 가능하다.

이상과 같은 사항을 고려하여 구축된 실용 전력설비의 초전도화 의의로는 요구자계의 합리적 형성, 기기의 소형.경량화, 에너지 절약 및 효율향상(저손실, 고선용), 고밀도화, 신기능(한류 및 저장기능 등), 계통구성의 최적화, 경

제성 향상등을 생각할 수 있다.

표 1은 전력기기를 초전도화 할 때의 merit 및 문제점을 나타낸 것이다.

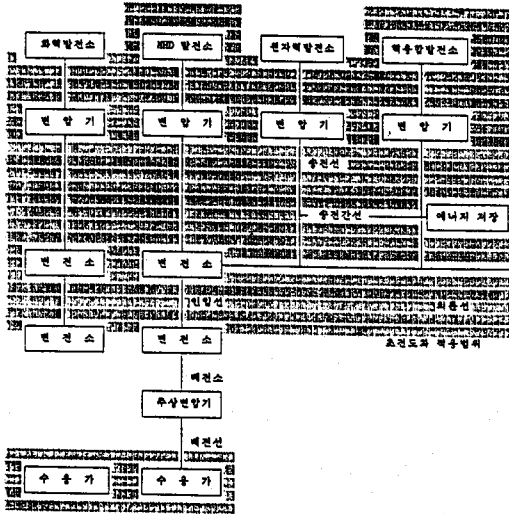


그림 1. 초전도 전력시스템의 예

표 1. 초전도 전력기기의 기술적 현황

기 기 명	사양 및 특징	merit	경제성 성립조건 및 문제점
동기발전기 (초전도체자권선)	<ul style="list-style-type: none"> 회전계자코일(2극 또는 4극)을 초전도화 고경전기자 코일은 상전도(기본적으로 직류마그네트이나 전기자 반작용에 의한 요란에 견디고 여자 제어가 가능한 것) 	<ol style="list-style-type: none"> 발전기손실이 반감된다(기본 효율 98.5%가 99.4% 정도로 향상) 동기 리액턴스가 작고(0.3), 계통 안정도 향상 효과가 크다. 동규모의 기존기보다도 소형화 가능하고 제조비용이 저감된다. 	<ul style="list-style-type: none"> 현재의 설계에서는 200 또는 400MVA 이상 규모에서 건설비 + 연료비가 현 용기보다 저감된다. 대용량기 일수록 그 저감량은 크고 송전선 건설비의 저감이 커진다.
동기발전기 (완전초전도화)	<ul style="list-style-type: none"> 계자, 전기자 코일 모두 초전도화(전기자 코일은 상용주파수의 교류 초전도체가 필요) 	<ol style="list-style-type: none"> 발전기 손실 계자권선 초전도 발전기보다도 40%정도 저감시킬 수 있다. 한송 소형화가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 초전도 계자권선과 거의 동일조건 교류 초전도체 기술확립이 필수 조건임
변압기	<ul style="list-style-type: none"> 철심을 상온으로 하고 1차 및 2차 권선을 초전도화 철심에 1차 및 2차권선을 설치하고 자계가 높지 않도록 설계 	<ol style="list-style-type: none"> 변압기손실이 반감한다.(기본기의 99.7%가 0.15% 정도 향상) 중량이 50~60% 감소된다. 	<ul style="list-style-type: none"> 200내지 300MVA 이상 규모에서 제조비 + 운전비(손실저감분 포함)가 기존기보다 경제력이라는 계산도 있으나 교류초전도 도체기술의 확립이 필수조건임
전력케이블 (직류 및 교류)	<ul style="list-style-type: none"> 동심원통상에 초전도 도체를 배치, 중심축 및 주위에 초임계 He을 강제순환시킨다. 3상 교류용에는 큰 직경의 shield 도체중에 3분의 동심원통상 도체를 배치한다. 케이블 도체는 flexible 하게 한다. 	<ol style="list-style-type: none"> 송전손실이 극히 작다 송전밀도가 높고 소요 root폭이 작다 직류대용량 송전에는 최적임 	<ul style="list-style-type: none"> 현재까지의 선진기술국에서의 설계에서는 AC 275 kV급 에서 6GVA, AC 500 kV급에서 9GVA 이상에서 기존의 유침 케이블을 보다 경제성이 있다는 계산도 있으나 1~2GVA 급에서 경제성이 성립 하도록 비용절감하는 기술이 필요 하다.
전류제한기	<ul style="list-style-type: none"> 초전도한류기로서 ① 병렬저항기형 ② 경류기형 ③ 리액터형의 3종류가 제안되고 있다. 	<ol style="list-style-type: none"> 계통용량의 증대, 초전도 기기의 도입등으로 인한 단락용량이 증대하는데 대한 차단기의 부담을 경감시킬 수 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> 독립적으로 사용하는데에는 경제성이 없으니 다른초전도 기기와의 조합에서는 매우 유망함
전력저장장치 (SMES)	<ul style="list-style-type: none"> 초전도 인덕턴스에 의한 전력저장 코일형상에서는 ① 소래노이드형 ② 토로이드형 등이 제안된다. 전자력 지지에는 ① 구조체 지지 또는 ② 암반지지가 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> 90% 이상효율의 전력저장이 가능 전력계통 이용율이 대폭 개선되고 경제적 효과는 막대함 무효전력의 제어도 가능하여 계통 안정화에도 이용된다. 	<ul style="list-style-type: none"> 수 GWh 이상이 아니면 양수발전소 정도의 경제성이 없다. 거대한 설비로 현재의 초전도 마그네트 기술보다 10배 이상의 규모이다. 이에 대한 개발방법이 문제

3. 향후 기술개발 과제

초전도 전력용용기기를 실용화하기 위해서는 해결해야 할 많은 기술개발과제가 있으나 본 보고에서는 지면상 중요한 사항만을 고찰하기로 한다.

3.1 초전도체

저온초전도체는 대부분 산산화 되어 있고, 초전도 응용의 진전과 함께 선재의 수요가 늘어나고 있어 향후 제조 process의 간략화와 가격인하 등의 과제가 남아 있다. 또한 저온초전도체의 치명적인 약점인 Tc 향상, 새로운 저온 초전도체의 개발도 시급하다.

고온초전도체는 BCS 이론에 대치되는 기초 메카니즘의 규명, 성분, 구조해석 등의 해석평가기술 및 초전도 관련기술의 data base화 등 기초, 물성연구가 있으며, Tc 150K 이상인 신물질의 탐색 및 합성연구, 액체 N₂ 온도에서 Jc가 10⁵ A/cm인 물질개발과 더불어 조셉슨 소자, SQUID센서 개발을 위한 박막제조 기술, 선재, 판재 가공기술 등의 기술 개발도 시급하다. 더욱이 실용화를 위해서는 실용적 합성 process 개발 및 대량생산 process 기술개발도 해결해야 할 난문제들이다.

3.2 초전도 발전기

구성요소	기술개발과제 및 내용
초전도체자 권선	· 회전장에서 여자성능 유지
다중원통 회전자	· 축방향의 열수축 대책 · 다중원통 회전자의 진동특성 · 기계가공 및 조립기술
Top bar	· 과도특성 해석과 개선 · 고강도 Top bar 재료개발 및 Top bar 제작법
냉각시스템	· 제자권선 및 회전자의 유효냉각법
여자장치	· 여자 및 제자전류 제어법 · 전류리드
He 급배장치	· 자성유체에 의한 He의 sealing · LHe으로의 열침입 감소법 · 급배장치의 신뢰성 확보
운전제어법	· 계통 안정도 해석 · 기동정지법 · 사고대응법

초전도	미그네트	· 코일설계 및 제작 · 교류손실 저감 · 자계분포 및 열해석 · 선재 입속 기술확립 · Quench 보호 및 안정성 확보 · 특성평가 및 측정기술 · 절연내력 확보
	초전도 선재	· Cable 설계 및 제조기술 확립 · 임계특성 향상(고상용 선재) · 자계인기및인장, 굽힘(Mechanical Stress)에 의한 특성저하 개선 · 장직회
Cryostat	환류용기	· 회전류손실저감 · 온도 저하에 의한 수축 메커니즘 해석 · 교신뢰성 확보
	진공용기	· 최적 설계 및 제작 기술
	열절연	· 최적화 · 절연 특성 평가
	단열지시구조	· 열침입 최소화 · 열용량 저감구조
	안락스위치	· 단락후 정렬 기법
	변환장치	· 계통연계용케이 보호 · 추 확보설계 기술
	지류차단기	· 고압 대전류 스위칭 기술
	Power Lead	· 대용량의 열 안정성 확보 · 열침입 저감
	실용시험 설비	· 전자기기 모델링 · 감시제어 및 시험기술
	전기설비	· 시스템 Eky'ing · 설계기술(교조라 저장, 역률 보상)
냉각시스템	· 펌프 Turbine 및 저온제기 Pump 개발 · 냉각시스템 제어	
합반공동	· 합반공동 해석(교조) · 설계기술	
Total System	· 시스템 최적화(코스프 저장) · 운용기술 및 S/W 개발 · 시스템 특성평가 및 계통연계 · 유지보수 및 실용화(환경평가)	

3.3 초전도 케이블

항목	기술과 과제	항목
초전도 도체	- 교류손실 저감	교류손실의 측정, 해석 및 저감
	- 전류밀도 향상	초저온실 고전류밀도 선재, 테이프 선재의 개발
	- 기계적 강도 향상	케이블 가공 등의 기계적 용력에 영향을 받지 않는 선재의 개발
	- 고온초전도 선재 개발	임계전류밀도 향상, 선재의 장직회, 기계적 특성의 향상 연구
케이블 코어	- 설계 기술 확립	열수축 등에 의한 내부응력 대책, 고장전류 대책 설계, 케이블 가공 및 도선에 적합한 구조설계 등의 설계 기술 확립
	- 가공기술 확립	케이블 가공기술의 개발
	- 장기 안정성의 확보	경년열화 특성의 해석
전기절연	- 절연기법 확립	복합절연 및 고온자 압출에 의한 합리적인 절연설계
	- 전기적 특성 향상 연구	절연체의 내전압 특성향상 및 유전손실 저감
	- 기계적 열적 특성 향상	연신, 압출 및 용접 프로세스, 고온자의 조성변경 등에 의한 기계적, 열적 특성 향상
	- 장기 신뢰성 확보	부분방전 열화 억제, 경년열화 특성 해석
열절연	- 열절연 특성 향상	열침입이 적은 고성능 열절연 기술의 개발
	- 기계적 특성 향상	시공성이 양호한(유연한) 열절연의 실현
	- 장적 특성 향상	장적 용기의 고진공 유지기술의 확립
	- 장기 안정성의 확보	경년열화 특성의 해석
	- 신뢰성 및 효율 향상	교신뢰성, 고효율 냉각시스템의 개발
냉각시스템	- 운용면의 과제	초기냉각 및 장기연속운전 등 운용면의 문제 해석
	- 접속기술 개발	초전도체 간 및 초전도체와 상전도체와의 접속법 개발, 중간전속부의 개발
접속 및 단말	- 단말의 설계 및 제조 기술	교전압, 대전류, 저열침입 케이블 단말의 설계 제조 기술의 확립

3.4 초전도 에너지 저장

3.5 초전도 변압기

(1) 운전조건

· 전초전도 시스템의 전압계급과 이것에 사용되는 초전도 변압기의 소요용량에 의해서 권선의 전류치가 결정되면 권선의 quench에 관해서 검토하지 않으면 안된다. 특히 전류 억제물 먼저 quench 시키지 않을 경우는 상시전류와 임계전류치의와의 여유를 어떻게 선정할 것인가에 대한 중요한 과제로 남아 있다.

· 권선 quench의 경우량 환류기 동작의 경우에 있어서 조류의 영향, 과전압특성, 보호특성등, 계통운전특성으로의 영향은 충분히 검토하여 두는것이 주요한 과제로 남아 있다.

(2) 사용선재

· 권선용의 초전도 선재는 소정의 자계중에서 소정의 전류가 흐르며 그리고 교류손실이 작은 선재가 안정 공급되지 않으면 안된다.

· LTS에서는 대전류를 흘리는 것 외에 교류손도 10kW/m²의 저손실의 것을 개발되고 있으며 이것보다도 저손실의 것을 안정화하여 제조하며, 공급되도록 하여야 한다.

· HTS의 경우는 선재로서 먼저 임계 전류밀도를 높이는 것이 당면과제이며 동시에 손실, 안정성등도 LTS와 동등 이상의 것을 제조할 수 있어야 한다.

(3) 권선구조

· 극저온의 냉각특성을 확보하고 고전압에 견디며 그 이상 조립도 용이한 절연구조로 되지 않으면 안된다.

· 사용할 절연재료는 전기적 특성뿐만 아니라 기계적 특성도 소요특성을 갖지 않으면 안된다. 그와 같은 Data를 기

준으로 하여 재료 선택과 그 사용방법에 관한 연구등도 과제로 남아 있다.

(4) 냉각기술

· 용기자체뿐만 아니고 권선과 lead선 등의 주위나 도체와의 관계를 포함해서 전기절연 성능이 충분하며 권선에서의 전자력 등에도 견딜정도의 기계적 강도도 충분한 이상으로 조립 작업성도 고려한 냉각 용기를 먼저 개발하지 않으면 안된다. 더우기 냉동기를 포함한 권선의 냉각방식의 확립과 그러한 것의 고신뢰성을 확보할 대책도 초전도 변압기의 실현에 있어서 해결을 필요로 하는 과제가 될 것이다.

(5) 신뢰성의 검증

· 저온에서의 절연과 운전특성에 대해서는 변압기 제작후의 내압시험과 온도상승시험에 의해서 확인되지만 경우에 따라서는 어느정도 장기운전에 의해서 그 특성과 신뢰성을 확인하는 것 외에 운전시의 문제점의 해명을 시도하여야 한다.

(6) 예방보전

· 종래 변압기에서는 극부가열 방전에 의해 발생하는 기체의 분해가스중에 용해하고 있는것을 검출하여 변압기 내부의 이상을 사전에 검지하는 방법이 취해졌지만 초전도 변압기에 있어서도 이것에 대한 것을 확립해야 한다.

3.6 초전도 전류제한기

초전도 전류제한기를 개발하기 위해서는 초전도체를 이용해서 고장전류를 신속히 제한할 수 있는 초전도 전류제한기의 특성을 해석하는 기법을 연구하고, 이를 토대로 해서 초전도 전류제한기의 설계방법을 개발하여야 하는데 이와 관련된 기술개발과제는 다음과 같다.

- 초전도 전류제한기의 도입효과 분석
- 스위치 요소에 적합한 교류용 초전도선 연구
- 초전도체의 상전이 특성 해석
- 효율적인 스위치 구조의 개발
- 요소설계기법 확립
- 특성파악을 위한 효율적 계속시스템 개발
- 제작기술 확보

3.7 MHD 발전

· 초전도 MHD 발전 뿐만 아니라 초전도 응용기술의 대부분이 아직 실험 plant 건설단계에 이르지 못하는 것이 세계적인 실정인데 그 문제점은 초전도는 종합기술로 아직 요소기술의 미진한점과 경제성에 있다.

따라서 경제성을 높이기 위한 향후 기술개발 과제는 초전도 재료의 임계온도(Tc)를 높이는데 있다. 즉 최근의 ceramic계 고온 초전도체의 이론정립과 더불어 선제화를 위한 process 기술개발, 임계전류밀도(Jc) 향상 연구 등이 남아있다.

· MHD 발전에서는 효율문제로 3000K 전후의 온도를 사용하고 있으며 더욱이 4000 시간 이상 견디어야 실용화가 가능

하기 때문에 요소기술로서 고온 내열재료의 기술개발이 시급하다. 그러나 MHD 발전용의 내열재료로서는 용점, 기계, 열 및 화학적 안정도 등 이의도 고온에 있어서의 전기저항이 문제가 된다. 현재로서는 위에 열거한 물질은 상온에서는 좋은 절연물이지만 고온에서는 상당히 전기저항이 저하하여 절연물로서의 기능을 잃어버리는 경향이 있으며 금후 이들의 고온물성을 제어할 방법을 연구 개발하여야 한다.

· 한편 전극재료로서는 흑연, W, Mo, Ta 및 ceramic 등을 사용하지만 용점 이하에서도 조직이 변화하여 기계적으로 취약하게 되고 또한 석화연료를 대상으로 하는 경우에는 연소가스 중에 P, S, Cl 등의 화학적으로 활성적인 가스를 포함하는 경우가 많으므로 이에 대한 전극 소모의 연구도 필요하다.

· MHD 발전의 전기적 출력은 염의 도전율(σ)과 자속밀도(B)의 2승에 비례하므로 저온에서 작동가스의 도전율(σ)을 높이는 요소 기술도 필요하다.

· 그외에 plasma 발생기술 및 안정도 향상 대책, 음극간 단락 방지책, 균등 자계분포의 해석, 장시간 운전대책, inverter 시스템 기술, 폐열의 이용기술, 효율 향상 대책 등등의 요소기술 개발이 있다.

3.8 초전도 주변기기

(1) 초전도 전원장치

MRI 및 NMR용으로 연구 개발된 transformer-rectifier형 초전도 전원장치는 현재 전류제한을 위해 사용되는 초전도 스위치 특성 연구가 미흡한 실정이고 특히 대용량화에 따른 고전류 발생의 한계를 가지고 있어 이 문제의 개선이 필요하며, 고전류 발생의 큰 장점으로 인해 최근에 고안된 회전자속형 초전도 전원장치도 실험상으로 발전된 다음과 같은 몇가지의 주요 문제점들을 가지고 있기 때문에 이들 문제의 해결이 시급하다.

- 회전자속에 의해서 초전도 박막에 형성되어지는 Normal spot의 와전류 현상
- 회전자석의 속도 증가와 함께 감소되는 자속평핑율의 문제점
- 전류의 증가와 함께 초전도 전원장치의 양단에 유기되는 유기 기전력의 감소
- 시간이 경과함에 따라 유기 기전력에 발생하는 전압변동

(2) 초전도 스위치

현재 개발중인 초전도 스위치는 다음과 같은 조건을 만족해야만 한다.

- 초전도 스위치는 극적인 용기내의 좁은 부분에 설치되므로 부피를 최소로 해야하며 이를 위해 권선을 한다.
- 스위치의 자기 인덕턴스는 스위치의 동작시간을 길게 하므로 자기 인덕턴스를 줄이기 위해서 권선을 bifilar로 한

다.

. 과도시에는 스위치에 높은 전압이 유기되는데 이를 위해 절연물을 사용한다. 이때 절연물이 초전도 스위치와 액체 헬륨간의 열전달을 방해하면 회복시간이 길어져 좋지 않다. 이를 위해 스페이서(spacer)를 사용하거나 냉각채널의 설치, 절연 플라스틱의 사용 및 알루미늄 산화물을 이용한다.

앞으로 필요한 연구과제는 자기 인덕턴스를 작게 하면서 저항을 높일 수 있는 스위치의 구조연구, 효율을 높이는 트리거 방법 등이 있다.

(3) 소형 무정전 전원장치의 개발

계통사고시에도 초전도 전원장치를 구동하여야 하며, 높은 효율이 요구되기 위해서 이에 적합한 회전자속형 초전도 전원 장치를 사용하고, 이르리 구동하는 모터의 전원으로는 충전용 배터리를 사용하는 것이 타당하리라 본다. 또한 전력변환장치는 적절한 양만을 계통으로 보낼 수 있도록 전류 분배기의 역할도 수행하여야 한다.

4. 결론

초전도연구는 80년이라는 오랜 연구역사를 가지고 있으면서도 국내에서의 연구인력이나 기반은 타 연구분야보다도 뒤떨어져 있어 본 조사사업은 다소 늦은감은 없지않아 있다. 그러나 대한전기학회 내에서도 조사사업의 일환으로 초전도 응용 조사 전문위원회가 구성되게 된 것은 이 분야에 있어서의 전기학회 발전과 더불어 2000년대를 맞이하여 선진기술국으로의 진입이라는 국가적인 사명감으로 볼때 매우 고무적이라 생각하며, 본 조사사업을 시작으로 초전도 분야의 연구분위기가 보다 활성화 되기를 희망한다.

끝으로 본 연구위원회의 위원으로 활동하신 여러 전문가 선생님들의 적극적인 참여속에 보다 알찬 내용이 담긴 보고서가 나오게됨에 대해서 본 지면을 통해 다시한번 감사를 드립니다.