

창립  
40주년 학술대회  
논문 87-초청-2

# 超電導 電力機器의 開發現況과 課題

韓 松 暉

서울大學校 工科大学 電氣工學科

THE STATE OF ARTS OF SUPERCONDUCTING ELECTRIC POWER APPARATUS

Song-yop HAHN

Dept. of Electrical Eng. Seoul National University

## 1. 머리말

1911년 Onnes 가 초전도 현상을 발견한 후 수 십년 동안은 물리 현상의 이론을 확립하는데 많은 물리학자들이 노력을 경주하였다. 그리하여 1950년대 말에 BCS 이론이 확립되어 이 초전도 현상의 이론적 설명이 가능하게 되었다. 초전도체에서는 상도체에서 볼 수 없는 여러가지 현상들이 나타나고 있는데 그중 하나가 전기 저항이 영(zero)이라는 것이다. 이와같은 성질을 공학적으로 이용하기 위하여 초전도 전선을 개발하게 되었다. 초전도 전선을 이용하면 우선 가는 전선에도 많은 전류를 흘릴 수 있어 큰 가전력을 쉽게 얻을 수 있고 따라서 큰 규모의 전기기에서도 높은 작속밀도를 얻을 수 있게 된다. 다음으로는 전선에 저항이 없으므로 초전도 코일을 만들어 여기에 전류를 흘려 전기 에너지를 저장할 수 있게 된다. 실제 응용분야를 보면 표 1과 같다. 이 표에서 보면 전력 계통에의 응용이 초전도 발전기, MHD 발전, 핵융합발전, 초전도 에너지 저장, 초전도 변압기, 초전도 케이블, 초전도 차단기 등 많은 분야에서 응용될 수 있음을 알 수 있다. 본 고에서는 초전도 발전기 및 초전도 에너지 저장에 대하여 중심으로 기술하기로 한다.

## 2. 초전도 교류 발전기

### 2. 1 구조

현재 세계 여러나라에서 개발하고 있는 초전도 교류 발전기의 구조를 보면 그림 1과 같다. 회전 계자형으로 되어 있기 때문에 회전자의 권선이 초전도선으로 되어 있으며 전기자 권선은 종래의 교류 발전기와 같이 고정되어

있다.

### 가. 회전자

초전도 계자권선은 속이 빈 지지관 (torque tube 또는 support tube) 위에 여러개의 형권 (formed coil) 을 조립하여 만들어 진다. 도선으로는 기계적 강도가 좋은 NbTi 초전도선을 사용한다. 형권을 고정시키는 방법으로는 지지관 위에 권선지지 요우를 여러개 설치하고 그 사이에 초전도 권선을 끼워 넣으며 원심력에 대하여 충분히 견딜 수 있도록 외부 지지관을 설치하고 있다. 또 다른 방법은 형권을 레이스 트랙 (race track) 형으로 만들어 이것을 잘 쌓은 후 전체를 지지관 속에 넣고 모을링 하는 것이다. 계자권선은 약 4-5 k의 초저온으로 유지 되어야 하는데 이것은 회전자 축을 통하여 들어오는 액체 헬륨으로 냉각된다. 액체 헬륨은 발전기가 터어빈과 연결되는 커플링의 반대축 축에 헬륨 연결 기구 (rotating helium joint) 를 설치하여 그 축 내부를 통하여 공급되고 기화된 헬륨도 이 축 내부를 통하여 밖으로 나게 된다. 지지 강관의 양단은 상온의 구조물에 기계적으로 연결되므로 이 부분을 통한 열 손실을 최소한으로 줄여야 하는데 이 부분을 열 절연 지지편 (thermal isolation support 또는 thermal distance piece) 이라 하고 이곳도 액체 헬륨으로 냉각시켜 계자권선의 온도 상승을 막고 있다. 초전도선의 전류 밀도는 보통 100-150 A/mm<sup>2</sup> 정도이고 회전자 중심부에서의 작속밀도는 5-7 테슬라 (tesla) 정도이다. 계자권선과 전기자권선 사이의 간격 (air gap) 이 매우 크기 때문에 (300 MVA 경우 30cm 정도가 됨) 전기자 권선에서의 작속밀도 1-1.5 테슬라 정

초전도체의 전력기기 응용 분야

원 리	응용 기기	적용 위치 또는 부하
높은 기자력을 이용하여, 큰 공간에서 높은 자속밀도를 얻을 수 있음	초전도 교류 발전기	대형 교류 발전기의 계자 권선을 초전도 권선으로 하여 회전자의 크기를 줄일 수 있게 한다.
	핵융합 발전 장치	고온 플라즈마 발생에 필요한 자장을 초전도 코일에 의하여 발생시킨다.
	MHD 발전 장치	고속으로 운동하는 플라즈마 내에 고전압을 유지시키기 위한 여자 코일을 초전도 코일로 한다.
초전도 코일에서 손실이 없는 성질을 이용하여 전기 에너지를 저장할 수 있음	일부하 조정 전원	심야의 잉여 전기 에너지를 저장하였다가 주간에 첨두 부하를 공급하는 에너지 저장 장치
	브레이크 방지 전원	전철 또는 대형 압연기등의 대형 부하가 기동 또는 정지 할때 전력 계통에 주는 브레이크 현상을 보상하는 에너지 저장 장치
	계통 안정화 전원	계통의 부하 탈락, 전원 탈락등으로 계통의 주파수가 변동되고 있을때 이를 안정화 시키기 위한 에너지 저장 장치
	순차 대전력 전원	핵융합로, 레이저 펄스 가속기, 레일건등 순간적으로 대전력을 요구하는 시스템에 전력을 공급하기 위한 에너지 저장 장치
큰 기자력을 요구하지 않으나 무 저항성을 이용함	초전도 변압기	1차 및 2차 권선을 초전도 권선으로 하여 저항 손실을 줄이고, 계철의 양을 줄여 철손을 줄인다.
	초전도 송전 케이블	케이블의 도선 부분을 초전도선으로 하여 저항 손실을 줄이고 따라서 대전력 송전 케이블이 가능하다.
초전도 상태와 상전도 상태의 저항 변화를 이용함	초전도 전류 제한기	초전도체를 통하여 전류를 흘리다가 고장시 초전도체에 강한 자장을 걸어 상도체로 바꾸면 저항이 증가하여 고장 전류를 제한할 수 있다.

도가 된다.

나. 전기자

전기자는 전기자 권선과 자기자체로 이루어진다. 앞에서 설명한 바와 같이 초전도 발전기에서는 계자에서의 기자력이 매우 크기 때문에 전기자 권선에서 필요한 1-1.5 테슬라의 자속밀도를 얻기 위하여 자기 회로에 자성체를 사용할 필요가 없다. 그러므로 전기자의 구조가 현재의 발전기와 매우 다르게 되어 있다. 전기자 권선 사이에는 현재의 발전기에서와 같이 자기회로의 자기저항을 줄이기

위한 구소 강판의 이 (teeth)가 없다. 따라서 전기자 권선은 별도로 제작하여 계철 (yoke back iron 또는 magnetic shield)의 내부에 끼워 넣게 된다. 전기자 권선은 현재의 발전기에서와 같이 동선을 사용하고 냉각은 물로써 하고 있다. 권선에 발생하는 전자력에 의한 권선의 움직임을 막기 위하여 권선들을 플라스틱으로 고정하고 이것을 다시 도브트레이팅 플라스틱 스페이서를 이용하여 계철에 고정시킨다. 계철은 구소강판을 적층하여 만드는데 자기회로의 저항을 감소시켜 주는 역할을 하지만 자력

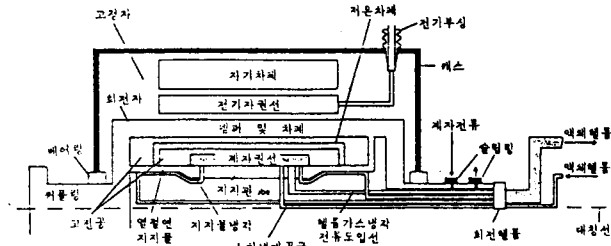


그림 1 초전도 교류 발전기의 단면도

선이 발전기의 외부로 발산해 나가는 것을 방지하는 역할을 한다. 그래서 이것을 자기차폐 (magnetic shield 또는 environmental shield) 라고 부를 때가 더 많다.

### 2.2 연구 개발 현황

초전도 교류 발전기는 1960년대 후반에 들어서서 미국에서 처음으로 시험제작에 들어갔다. 그 후 소련, 불란서, 일본, 독일 등에서 개발에 착수하여 이제 1000MVA 급 발전기의 개발이 진행되고 있다. 미국에서는 MIT 공과대학이 초전도 발전기의 연구 개발에 선도적 역할을 하고 있는데, 1969년에 45 KVA, 1973년에 3 MVA 발전기를 제작 시험하였고 현재에는 10MVA 발전기를 시작중에 있다.

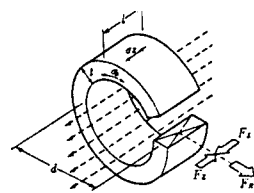
Westinghouse 사는 1973년에 5 MVA, 1978년에 10 MVA 발전기를 제작하였고 또한 EPRI의 지원을 받아 용량 300 MVA, 2주 60Hz, 3상, 2KKV, 효율 99.4%, 길이 3.5m 폭 3.4 m, 높이 6.4 m, 중량 159톤, 회전자 직경 1m의 발전기를 개발하기 시작하였는데 미국의 전반적인 에너지 수요의 감퇴로 1984년에 개발이 중단되었다. 그리고 GE 사에서는 20 MW 기를 제작한 바 있다. 소련은 1970년대에 1 MVA, 2 MVA 발전기를 개발한 바가 있으며 1980년대 초에 미국의 GE사와 공동연구를 통하여 20 MVA 동기 조상기를 제작하여 시험을 마쳤다. 이것을 기초로 하여 300 MVA 급 프로토타입기의 개발이 끝났고, 다시 1200 MVA 급의 개발 계획이 진행중이다. 프랑스에서는 알스톰사가 EDF의 지원을 받아 직경 1m의 모델 회전자를 완성하여 1980년부터 2년간에 걸쳐 기술 시험을 마쳤다. 이것은 앞으로 1-2GVA 급 발전기의 회전자로 쓰일 것이다. 일본에서는 미쯔비시 및 후지에서 통산성 중요 기술 개발비 보조로 1974년부터 3년간 6 MVA 초전도 발전기를 시작하여 초전도 발전기의 원리의 실증, 문제점의 발견등의 기본적 문제를 다루었다. 연구의 제1단계로 1977년부터

5개년 계획으로 30 MVA 초전도 동기 조상기를 제작하여 현재 시험중에 있다. 이와는 별도로 히다찌에서 50 MVA급 전기가 개발되었다. 1985년에 1000 MVA급 발전기의 경제성 검토를 마쳤고 개발에 필요한 연구과제를 도출하였으며 2000년 부터 상업운전에 들어갈 계획을 수립한 바 있다.

### 3. 초전도 에너지 저장

#### 3.1 원리

앞에서도 언급한 바와 같이 초전도 에너지 저장의 원리는 코일에 전류를 흘릴 때 저장되는 자기에너지 ( $1/2 LI^2$ )를 이용하는 것으로 코일을 이루는 도체가 초전도체이므로 손실이 없어 이 에너지를 오랫동안 저장할 수 있으며 필요할 때 방출도 가능하다. 초전도 코일에 많은 에너지를 저장하려면 에너지 저장밀도를 높여야 하는데 이것을 높이려면 코일의 기계적 강도와 지지문제가 심각하여 진다. 그림 2는 원형코일에 작용하는 전자력과 응력을 나타낸다. 즉 코일에는 축방향으로의 압축력과 반경방향



$$\text{徑方向的膨張力 } F_1 = \pi d l \cdot \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ (N)}$$

$$\text{Hub 應力 } \sigma_0 = \frac{d}{2l} \cdot \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$\text{軸方向的壓縮力 } F_2 = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ (N)}$$

$$\text{巻線の壓縮應力 } \sigma_z = \frac{d}{4l} \cdot \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

그림 2. 원형코일에 작용하는 전자력과 응력

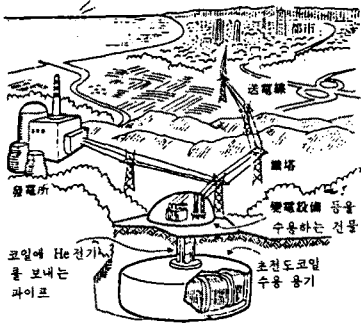


그림 3. 초전도 에너지 저장장치의 설치구상도

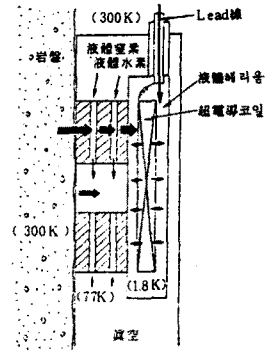


그림 4. 상온저구조

으로의 팽창력이 작용됨을 알 수 있다. 그러므로 코일의 설계에 있어서는 이와같은 힘에 대한 지지물 설계가 매우 중요하다.

### 3. 2 응용

표 1에서 보는 바와 같이 초전도 에너지 저장장치는 그 응용분야가 매우 다양하다. 여기서는 일부하 조정용 대규모 저장장치의 응용에 대하여 상세히 기술한다. 저장 에너지가 5000MWh (100만kw)인 초전도 코일의 직경은 400m, 높이는 150m 정도에 달하고 코일 중심의 자계는 9테스라이다. 이와 같은 대형코일은 전자력이 매우 크기 때문에 그 지지물 지지의 암반에 의존하는 것이 경제적이다. 그림 3은 초전도 에너지 저장 장치의 설치구상도이며 그림 4는 코일 및 지지물의 단면을 보여 준다. 초전도 코일은 우선 액체 헬륨으로 냉각되고 그 주위는 진공으로 한다. 전자력이 작용하는 쪽에는 암반과 코일 사이에 열 절연이 좋은 구조재를 삽입한다. 그리고 이 구조재를 통하여 집입하는 열을 막기 위하여 액체질소 및 액체수소로서 이 구조재를 냉각시킨다.

### 4. 맺음말

1960년대 이후 액체헬륨으로 냉각하여 고자계, 고전류 밀도를 낼수 있는 초전도선이 개발되어 이에 대한 응용연구가 활발히 진행 되었다. 2000년대 초에는 초전도 발전기 및 에너지 저장장치가 실용화 될것으로 확신된다.

국내 예서는 1983년 액체 헬륨 제조 장치가 도입되어 초전도 응용 연구가 시작 되었는데 1985년에 3테스라 초전도 전자석의 제작, 25KJ 에너지 저장 장치에 대한 연구 NbTi 초전도선의 시험 제작등 최근에 비로서 초전도 응용 연구가 시작되었다. 그러나 1987년 초부터는 고온 초전도체 연구가 시작되어, 전국적인 초전도 연구 분위기가 정착되어 가고 있다. 우리는 비록 늦게 시작하였지만 초전도 전력 기기의 응용이 아직도 십수년 이후의 미래기술이기 때문에 이제부터 시작하여도 초전도 시대에 부흥하는데 늦지 않다고 생각된다. 그러므로 이 분야의 인력 양성과 연구 개발이 박차를 가하여야 할 것이며 특히 정부의 정착적 배려가 요청된다.