

# 超電導 發電機의 開發動向

李 承 院  
(서울대 工大 教授)

## ■ 차 례 ■

- 1. 超電導現象
    - 1.1 超電導性的 發見
    - 1.2 超電導의 工學的 應用
  - 2. 超電導 發電機의 개발
    - 2.1 超電導의 發電機에의 적용可能性
    - 2.2 超電導 發電機가 갖추어야할 條件
    - 2.3 超電導 同期機의 개발상태
    - 2.4 超電導 發電機의 구조
    - 2.5 超電導 發電시스템의 경제성
    - 2.6 앞으로의 연구과제
    - 2.7 超電導 發電機 개발의 장래
- 參考文獻

### 1 超電導現象

#### 1.1 超電導性的 發見

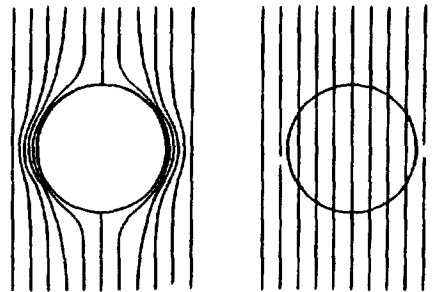
1907년 H. Kamerlingh Onnes 教授가 He의 液化에 成功함으로써 低温物理學의 門을 열어 놓고, 그로부터 3년후인 1911년에 水銀의 電氣低抗이 液體 He溫度(4.2K)에 가까운 極低温에서 갑자기 0이 되는 現象(完全導體)을 超電導現象이라고 부르게 되었다. 常電導에서 超電導로 移行하는 溫度를 臨界溫度( $T_c$ )라고 한다. 超電導體의 또하나의 特徵은 그림 1(a)와 같이 常電導狀態에서 磁界H를 加해놓고 溫度를 超電導狀態까지 降下시켜 超電導狀態가 되게하면 그림 1(b)와 같이 모든 磁束이 外部로 밀려난다. 즉 超電導體內部에는 磁界가 存在하지 못한다(完全反磁體). 이것을 그 發見者의 이름을 따서 마이스나(Meissner) 效果라고 부른다. 常電導體에서 는 低抗이 0이되는 極低温의 極限狀態에서도 磁束은 밀려나지 않는다.

고로 이것 역시 超電導의 特有的 現象이다.

그러나 磁界를 增加시켜 그것이 臨界磁界( $H_c$ )

에 到達하면 마이스나效果가 없어지고 곧바로 常電導體가 되는 것, 즉, 常電導로 傳移해버리는 것 과 磁界가 어느정도 侵入하더라도 超電導狀態가 維持되는 것이 있다. 前者를 第1種, 後者를 第2種超電導體라고 부른다.

Onnes가 水銀의 超電導狀態를 發見한 後 많은 科學者들에 의해 많은 超電導體가 發見되었으나 그것은 純粹元素인 第1種 超電導體이어서 작은 磁界의 侵入에 있어서도 超電導性은 喪



(a) 常電導狀態에 있어 서의 磁束分布      (b) 超電導狀態에 있어 서의 磁束分布

그림 1. 마이스나 效果

失한다. 즉, 臨界磁界가 낮아 實用化가 불가능 하였다.

그래서 超電導의 研究는 약50년간 중단상태에 있었는데 1950년에 이루어진 J. E. Kunzler가 臨界磁界를 갖는 第2種 超電導體를 發見함으로써 實用化가능성이 예측되어 超電導關連研究가 활발해졌다.

第2種 超電導體에 磁束이 침입할때는 超電導 영역과 常電導영역이 混在하는 混合狀態를 이룬다. 이상태에서는 그림 2와 같이 侵入磁束이 分布되고 이 주위를 超電導電流가 環流한다. 그리고 磁界의 增加와 더불어 超電導電流가 環流하고 있는 部分의 磁束은 增加, 純粹狀態의 臨界值  $H_{c1}$ 보다 높은 磁界  $H_{c2}$ 에 이르러서는 全體가 常電導化한다. 또 超電導體는 低抗이 0이라고 해서 電流를 無限정 많이 흘릴 수 있는 것은 아니다. 磁界中에 第2種導體가 있을때 이에 電流가 흐르면 超電導環流電流에 둘러싸여 있는 磁束과 電流間에 로렌스힘이 作用磁界와 電流에 直交하는 方向으로 磁束을 움직이게 한다.

그러나 材料中의 不純物 또는 格子缺陷에 의한 핀저지력에 의해서 움직이지 못하게 된다. 그러나 電流가 增加해서 臨界電流密度 ( $J_c$ )에 到達하면 핀저지력에 로렌스力이 이겨 磁束이 움직이게 되어 超電導狀態가 깨진다.

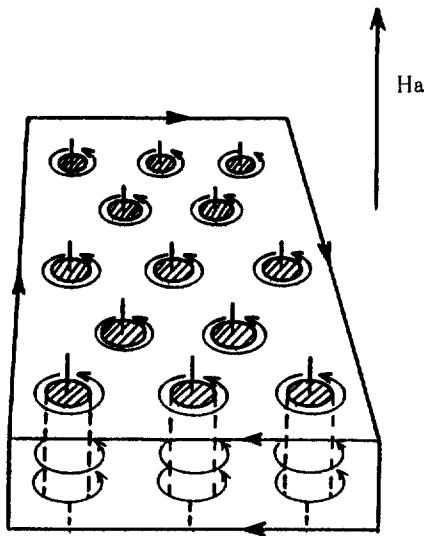


그림 2. 混合狀態, 磁束量子的 分布

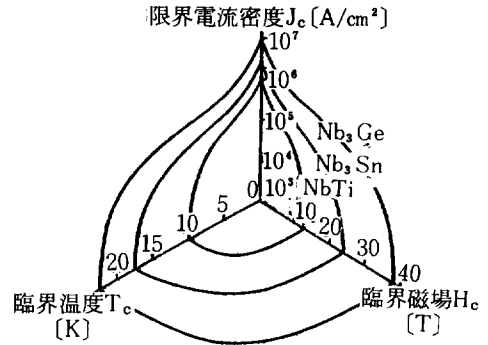


그림 3. 各種超電導體의 特性의 比較

이와 같이 超電導體는 臨界溫度 ( $T_c$ ), 磁界 ( $H_c$ ) 電流密度 ( $J_c$ )中 하나라도 그 臨界值를 벗어나면 常電導가 되어버린다.

$T_c$ ,  $H_c$ ,  $J_c$ 의 3次元空間으로 代表的 超電導體의 轉移영역을 표시하면 그림 3과 같이된다. 이그림을 보면 NbTi合金, Nb<sub>3</sub>Su化合物은 上部 臨界磁界가 8T 이상이 되는 第2種超電導體임을 알 수가 있다.

現在 實用化되고 있는 것은 모두가 이와 같은 第2種超電導體이다.

超電導現象의 解明은 1930년 런던(London)의 現象論에서 출발했으나 量子力學의 발달에 의해 1957년 Illinois大學의 바덴(Bardeen), 쿠퍼(Cooper), 슈리퍼(Schrieffer) 3인이 제안한 BCS理論에 의해서 이루어졌다.

現在 實用化되고 있는 것은 모두가 이와 같은 第2種超電導體이다.

超電導現象의 解明은 1930년 런던(London)의 現象論에서 출발했으나 量子力學의 발달에 의해 1957년 Illinois大學의 바덴(Bardeen), 쿠퍼(Cooper), 슈리퍼(Schrieffer) 3인이 제안한 BCS理論에 의해서 이루어졌다.

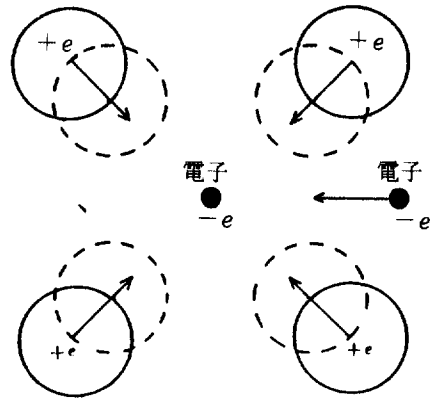


그림 4. 金屬의 格子와 電子와의 相互作用

즉, 보통 金屬中의 自由電子는 電界에 의해 加速되어 運動할때 金屬은 構成하는 原子心(原子에서 電子를 제외한 것을 말하며 陽電荷를 띠고 있다)과 충돌에너지를 상실 發熱해버리고 電氣抵抗性을 나타낸다.

超電導體中에서는 그림 4의 점선과 같이 1개의 自由電子가 그 電荷때문에 原子心을 끌기 때문에 原子心の 變位가 일어나 그電子부근은 正電荷가 과잉상태가 되어 또하나의 電子를 끌어당기어 두개의 電子가 일체가 되어 金屬中을 移動한다. 그래서 하나의 電子가 잃은 에너지를 다른 하나가 되돌려 받아 電子雙 自體로서는 에너지 減少없이 金屬中을 移動하게 되어 電氣抵抗이 0이된다. 溫度가  $T_c$  이상이 되면 이 쿠퍼쌍이 熱에너지때문에 깨져 常導體가 되어 抵抗이 發生하게 된다. 쿠퍼쌍의 移動은 波動性을 갖고 있기 때문에 터널效에 의해 그림 5와 같이 超電體間에 끼어놓은 絶緣膜(조셉슨소자)을 통과할 수 있다.

이때의 電流電壓特性을 표시한 것이 그림 6이

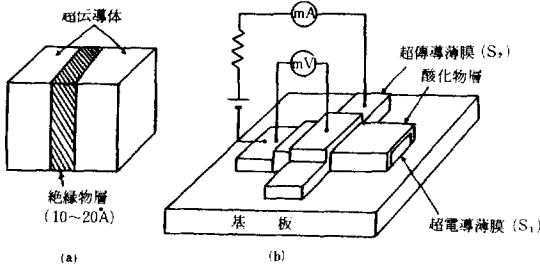


그림 5. 조셉슨 接合

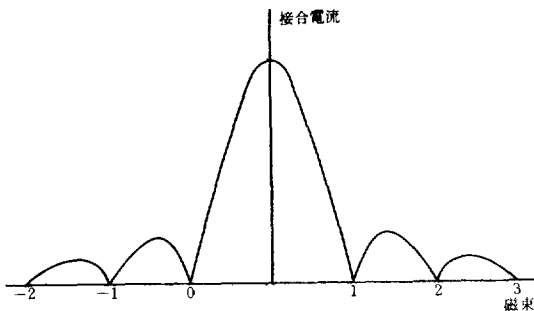


그림 6. DC 조셉슨 효과(磁界效果)

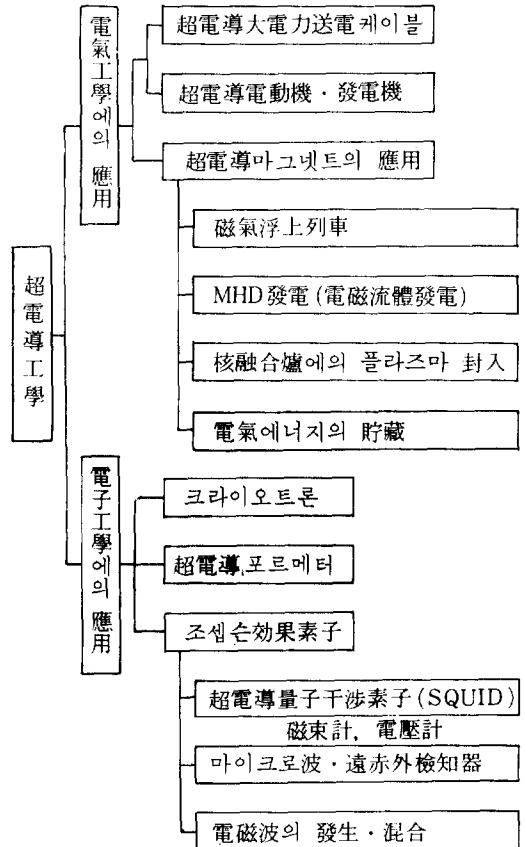
다. 接合兩端에 電壓이 없는 상태에서 超電導 電流는 흐른다. 이電流는 接合部의 磁界의 영향을 받아 磁界에 의하여 그림 7과 같은 電流變化를 얻을 수 있다. 第2種超電導體의 發見에 의해 그림 3과 같은 높은  $H_c$ 와  $T_c$ 를 가진 超電導體가 계속 발견되어 超電導의 應用研究가 시작되었다. 그러나 아직도 臨界溫度가 너무나 낮아(液體He溫度) 이의 應用이 發達하지 못하고 있는 실정이다.

만일 液體窒素(77K)의 溫度에서 安定하게 動作되는 超電導材料가 開發되면 超電導의 工學的利用은 획기적으로 發展할 것이다. 즉 높은  $T_c$ , 높은  $H_c$ 의 材料의 出現이 超電導工學發展의 열쇠라고 해도 過言이 아닐 것이다.

### 1.2 超電導의 工學的 應用

超電導는 표 1에 표시한 바와 같이 核融合,

표 1. 超電導의 工學的 應用



電氣에너지의 貯藏, 超電導發電機, 電動機, 超電導케이블, 磁氣浮上列車, MHD發電 등 廣範圍하게 新에너지技術의 中心的 役割을 擔當하려고 하고 있다. 에너지分野뿐만 아니라 電子工學分野에서도 超電導조셉슨素子는 超LSI 를 뒤이어 次世代의 電子計算機素子로서 注目되고 있다.

超電導가 에너지技術로써 注目되고 있는 主理由는 ①電氣抵抗이 0이어서 損失없이 大電流를 흘릴 수 있어 省에너지가 되는 점, ②超電導 코일에 한번 電流를 흘릴 것 같으면 電流는 永久히 흘러 (永久電流) 電力損失이 없는 永久磁石이 된다 (超電導磁石).

이 경우 在來의 電磁石과 같이 鐵心の 磁氣飽和 (2T) 現象이 없기 때문에 臨界磁界程度의 高磁界 (5~20T)를 發生시킬 수 있는 등의 특징이 있기 때문이다. ①의 特徵은 長距離大電力送電에 活用되어 數萬A의 電流를 흘릴 수 있을 것으로 豫상되어 世界各國에서 활발히 研究가 進行되고 있다. ②의 特徵을 이용한 超電導磁石은 磁界內에 플라즈마를 가두는 核融合, 磁氣浮上列車, MHD發電機에 없어서는 안 되는 要素인 것이다.

또 大形超電導코일에 大量的의 永久電流를 흘림으로써 電氣에너지를 直接貯藏할 수 있어 電氣에너지의 唯一의 缺點인 貯藏問題를 해결할 수 있어 電氣에너지를 完備한 에너지로 만들 수 있다.

또 超電導發電機, 電動機에 應用할 것 같으면 그 效率을 크게 높일 수 있을 뿐 아니라 小形輕量化할 수 있다. 發電機의 界磁코일을 超電導化하면 높은 磁界를 發生시킬 수 있기 때문에 常電導磁石의 경우에 비해 그 重量을 10분의 1程度로 할 수 있으며 코일損失이 전혀 없이 그 만큼 에너지效率이 上昇된다. 그래서 超電導發電機에 대한 研究가 世界各國에서 활발히 進行되고 있다.

즉, 美國에서 30萬KW, 日本에서 3萬KW, 소련에서 30萬KW 등의 超電導發電機가 始作된 바 있다. 이 超電導發電機는 前記한 特徵이외에 그 特性이 크게 改善되어 送電線의 安定度를 크게

改善할 수 있으며 따라서 送電線容量도 增加시킬 수 있는 利點이 있다. 이에 관해서 이하에 世界적인 開發動向에 대해 記述하면 다음과 같다.

## ② 超電導發電機의 개발

### 2.1 超電導의 發電機에의 적용可能性

현재 人類가 消費하는 에너지는 계속 증가하고 있을 뿐만 아니라 그의 電力으로의 전환 사용율도 상승추세에 있다. 따라서 電源 및 送電線의 대용량화가 불가피한 실정이다. 현재의 電氣機器는 磁束과 電流의 상호작용에 의하여 그 기능을 발휘하고 있으며 그 磁氣回路에 철을, 電氣回路에 동을 사용하고 있다. 그런데 이들에 의한 磁束密度의 한계는 1.5 Tesla, 電流密度의 한계는  $10^2 \sim 10^3 \text{ A/cm}^2$ 을 넘게 할 수가 없다. 이와 같은 조건하에서는 發電機의 대용량화는 주로 냉각방식의 진보에 의해서 이루어지고 있으나 기계적 구조상 크기에 한계가 있다. 그런데 이에 常導體 대신에 超電導體를 사용할 것 같으면 磁束密度는 철을 사용하지 않고 20 Tesla, 電流密度는  $10^{13} \text{ A/cm}^2$ 까지도 높힐 수가 있어 대용량화가 가능하다. 그 뿐 아니라 抵抗 손실이 감소되어 효율도 향상되고 리액턴스가 감소하기 때문에 系統安定度가 향상되고 또 이에 따라서 限界送電電力이 향상된다. 그래서 수요의 증가에 따라 發電機의 대용량화가 불가피할 경우 이를 超電導化하지 않을 수가 없으며, 또, 그럼으로써 효율의 향상, 安定도의 증가도 기할 수 있어 머지않은 장래에 超電導 發電機는 실용화될 것으로 豫상된다. 이미 미국, 소련에서는 20MVA 機, 일본에서는 30MVA 機, 서독에서는 400MVA 機를 제작 많은 시험을 실시한 결과 輕量, 소형화가 가능하고 效率이 향상되며 發電機의 운전특성과 系統安定化가 크게 향상됨을 확인하였다. 즉 야간의 輕負荷시의 進相運轉能力이 크게 개선되며 效率은 定格負荷시에 0.5% 이상 향상되고 部分負荷시에도 현재 發電機보다 效率이 향상됨이 확인되었다. 그리고 현재로서 超電導發電機의 제조비용을 일본에서 추정된 것을 보면 定勵磁機의 경우 80MW 이상이면 現용기보

다 덜 드는 것으로 나타나 있다. 가격면에서 보더라도 超電導發電機의 실용하는 충분히 가능하다고 볼 수 있다.

### 2.2 超電導發電機가 갖추어야 할 條件

超電導發電機를 구동, 회전시키는 터어빈은 발전용량과 회전수에 따라 고압, 중압, 저압 몇 대를 조합해서 만든다. 회전자의 쿨-다운과 위밍업용으로 현용기보다 어느 정도 회전수가 많은 회전 장치가 필요하다. 固定子の 電氣子卷線을 냉각시키는 給水裝置, 軸受部를 윤활·냉각시키기 위한 油裝置, 그리고 回轉子표면과 固定子鐵心の 냉각과 풍손 저감을 위한 수소 공급 장치 및 수소를 밀봉하기 위한 밀봉유장치는 현용기와 똑같이 사용한다. 그러나 超電導發電機의 경우는 回轉子에 He를 급배(給排)하기 위한 He냉동장치가 있어야 한다. 그리고 超電導界磁卷線을 勵磁하기 위한 靜止勵磁 장치가 필요하다. 도시(都市) 근교에 설치되는 中小容量의 경우는 一定電流勵磁 또는 低速勵磁制御를 한다. 원격지에 설치되는 대용량은 超電導勵磁制御方式을 채용할 경우가 많다. 大容量 超速應 여자 장치로서는 系統電源을 이용하는 다이리스터 勵磁장치가 좋으며 사고시에 電壓과 電流를 감지해서 AVR이나 PSS(전력계통 안정화 장치)를 동작시키게 한다. 超速應勵磁制御를 하는 超電導發電機는 개로 시정수가 짧아야 하고 댐퍼에 의해서 界磁磁束이 차폐가 되지 않게 하기 위해서 개로초기시정수를 짧게 해야한다. 일반적으로 超電導發電機, 개로시정수는 界磁回路의 抵抗이 아주 작기 때문에 현용기가 수 초인데 비해 수 백초 이상이 된다. 그래서 界磁電流를 크게 하고 卷回數를 작게해서 界磁인덕턴스를 작게 해야한다. 그리고 댐퍼의 抵抗은 電氣子反作用磁束의 電磁차폐 효과를 방해 하지않는 범위내에서 높게 취해야 한다. 이 외에 設計·制上 필요사항은 다음과 같다.

#### 2.2.1 回轉界磁

超電導導體를 안장형이 아닌 수평축상에서 극저온용기와 함께 3,000~3,600rpm 정도로 회전시

킨다. 卷線部の 최대界磁는 현재로서는 4~5 Tesla 정도로 하고 있다. 회전에 의해서 발생하는 큰 원심력에 견디게 하는 구조로서는 바인드선으로 줄라메든가 흠에 쇠기를 박아 고정시키는 방식을 택하고 있는데 대체적으로 쇠기방식이 우월하다. 그러나 導體의 안정화를 위한 냉각에 문제가 있어 앞으로 검토가 필요하다.

#### 2.2.2 댐 퍼

극저온부의 超電導界磁卷線에의 電氣子反作用을 완화시키는 방법은 상온 댐퍼와 100K의 低温댐퍼의 2중 방식으로 한다. 常溫 댐퍼는 큰 원심력 및 과도시에 발생하는 압축력에 견디게 하기 위해서 高強度 재료를 표면에 부착시켜 보강해야 한다. 과도시에 저온 댐퍼에 흐르는 制動電流는 發電機의 동요를 제동시키는 효과가 있다.

#### 2.2.3 界磁卷線의 냉각

回轉界磁卷線에 外部로부터 연속적으로 액체 He를 공급하고, 회수하는 시스템으로 해야한다. 원심력에 의해 He이 등엔트로피 압축에 의해 온도가 상승하지 않도록 해야하는데 이것은 셀프 팽팽효과에 의해서 제어된다. 그러나 정량적 수치와 과도시에 있어서 He의 동작에 관한 데이터를 알고 있어야 한다.

#### 2.2.4 토오크 튜우브

界磁卷線을 支持하고 원동기로부터의 토오크를 전달하는 구조재로서 상온부에서 저온부로 힘을 전달하는데 이 경우 열침입을 극력 적게하기 위해 가능한 한 얇게해야 한다. 현재는 고강도의 치탄슌금 또는 스텐레스鋼을 사용하고 있는데 大型機에 가서는 문제점이 있는 부분이다. 열수축에 수반되는 큰 열응력에 의해 파손되지 않도록 토오크 튜우브의 한편에 플렉시블 디스크를 사용하든가 그중 축수방식으로 해야한다.

#### 2.2.5 축 실딩

回轉子の He배급장치에는 축 실딩이 필요한데 이것은 磁性流體를 사용함에 의하여 해결되

고 있다. 이 방법에 의해서 He가스 系統에 불순물 혼입을 방지하고 또 He의 누설을 저지시키고 高速回轉子와 외부 정지액체 He 용기와의 접속시킨다.

### 2.2.6 固定子

電氣子卷線은 현재까지는 常電導體로 하고 있는데 超電導回轉子에 의한 강력한 起動力을 이용하고 있는데도 불구하고 固定子는 치부가 없는 鐵心과 公극卷線과 그 외측의 자기-실드로 구성하고 있어 많은 문제점이 상존하는 실정이다.

## 2.3 超電導同期機의 개발상태

### 2.3.1 개발 현황

超電導體를 이용하여 이상의 문제점들을 극복하면서 현재까지 개발한 研究상태를 살펴보면 다음과 같다.

#### 2.3.1.1 일본의 개발 현황

1970년대 후반에 일본의 三菱과 富士가 공동으로 6.2MVA용량의 것을 시작하였고 이어서 1982년에 30MVA의 同期調相機가 試作되었다. 이외에 1985년에 日立가 50MVA機로 시작하였고 1983년에 東芝가 3MVA로 시작, 시험중에 있다. 한편 대학에서는, 경도대학이 중심이 되어 20KVA의 소형기를 시작, 각종 특성시험을 실시 기초적 연구를 수행하고 있다. 6.25MVA는 界磁卷線이 에폭시로 함침된 점, 回轉子 내부에 He 저장탱크가 없고 대신에 액체 He를 수환시키는 법 등의 특징을 갖고 있다. 30MVA機는 界磁卷線의 고정법으로써 홈에 쇠기를 박고있다. 그리고 回轉子の 구조재료로서 Ti 및 Ti合金을 사용해서 용접구조로 하고 있는 것이 특징이다. 50MVA機도 界磁卷線은 에폭시 함침방식을 채용했고 卷線은 바인드 고정법을 채택하고 있다. 3MVA의 界磁卷線은 홈에 쇠기를 박는 방식으로 했고 토오코 튜브의 일단에 플렉시블 서포트를 사용하고 있다.

#### 2.3.1.2 미 국

AVCO가 8KVA 堅軸發電機를 제작한 것을 필

두로 MIT, WH, GE가 이어 수 MVA부터 20MVA機가 개발되었고 EPRI와 WH와 공동으로 30MVA機를 개발하기로 하고 있다. 그러나 이 기획은 개발자금 관계로 현재 중단상태에 있다. 그리고 GE의 20MVA는 일부하 시험을 성공적으로 끝낸 바 있다.

#### 2.3.1.3 프랑스

프랑스의 電力公社 EdF와 Alstom이 공동으로 실용기 규모의 직경 1.06m의 回轉子를 냉각 특성, 진동특성, 회전축실드에 관한 시험을 하였다. 계속해서 250MW의 것을 제작할 계획으로 있다. 이 과정에서 交流損이 아주 작은 NbTi의 극세선을 개발한 바 있으며, Alstom은 현재 回轉子뿐 아니라 固定子까지도 超電導線으로 하는 發電機를 개발중에 있으며 이와 더불어 發電機, 變壓機, 電力 저장장치로 구성되는 超電導 시스템을 개발하고 있다.

#### 2.3.1.4 서 덕

KWV와 Siemens가 공동으로 실용규모의 超電導發電機를 개발하기로 하고 현재 시험용 超電導回轉子の 界磁卷線을 완성, 靜止勵磁 시험중에 있다.

#### 2.3.1.5 소 련

2MW機를 개발한데 이어 1981년에 20MW 機를 제작, 시험을 실시한 바 있고 현재 300MW機를 제작중에 있다.

#### 2.3.1.6 기 타

영국, 이태리, 체코, 오스트레일리아, 스위스, 중공에서도 發電機 개발에 필요한 부분 기술개발 小型機의 시작, 운전특성 연구가 진행되고 있다.

#### 2.3.1.7 特殊機의 개발

미국 공군이 초경량으로 항공기용을 개발한 바 있고 WH가 12,000rpm, 400Hz의 10MVA 機를 시작한 바가 있고 이어서 GE가 1초에 여자하여 정격속도에 도달할 수 있는 20MW機를 개발한

바 있다. 표 3에 GE의 20MW機의 특성을 표시하였는데 이는 그 중량이 790kg로서 지상시의 1/10밖에 안되는 초경량기이다. 이것이 성공되면 항공우주시대에 적용될 것으로 전망되고 있다.

표 2. 主要諸元

定格出力(MVA)	6.25	30	50	3
定 格				
電 壓 (kV)	2.64	11	16	2.4
電 流 (A)	1,375	1,576	1,804	722
周波數 (Hz)	60	60	60	60
回轉速度(rpm)	3,600	3,600	3,600	3,600
寸 法				
回轉子外徑(mm)	390	730	600	445
軸受間長 (mm)	1,920	3,300	3,900	2,075
固定子높이(mm)	1,330	1,700	2,000	1,180
固定子길이(mm)	1,620	2,600	2,600	1,600
重 量				
回轉子 (t)	0.7	4	6	1.3
固定子 (t)	4.5	13	18	5.1
定 數				
xd (p. u.)	0.4	0.697	0.35	0.48
xd' (p. u.)	0.23	0.51	0.28	0.44
xd'' (p. u.)	0.15	0.27	0.19	0.29
Td' (s)	300	260	200	38
Td'' (s)	0.2	0.02	0.06	0.02

2. 4 超電導發電機의 구조

2.4.1 개 요

초전도성을 유지하려면 극저온장치가 필요하기 때문에 超電導發電機의 回轉子는 진공단열층이 있는 다중원통내에 고정시키고 액체 He를 주입시켜 그 온도를 4K 정도의 저온으로 유지

표 3. GE社製 20MW機

定 格 出 力	20 MW
極 數	4
回 轉 數	6,000 rpm
周 波 數	200 Hz
線 間 電 壓	29.6 kV (rms)
界 磁 電 流	867 A
自己인덕턴스	0.69 H
超 電 導 線	Nb <sub>3</sub> Sn
리액턴스 Xd	0.56 p. u.
Xd'	0.50 p. u.
Xd''	0.26 p. u.
固 定 子 外 徑	104 cm
回 轉 子 外 徑	26.7 cm
베아 링 스 판	81.3 cm
重 量 固 定 子	395 kg
回 轉 子	395 kg
發 電 機	790 kg

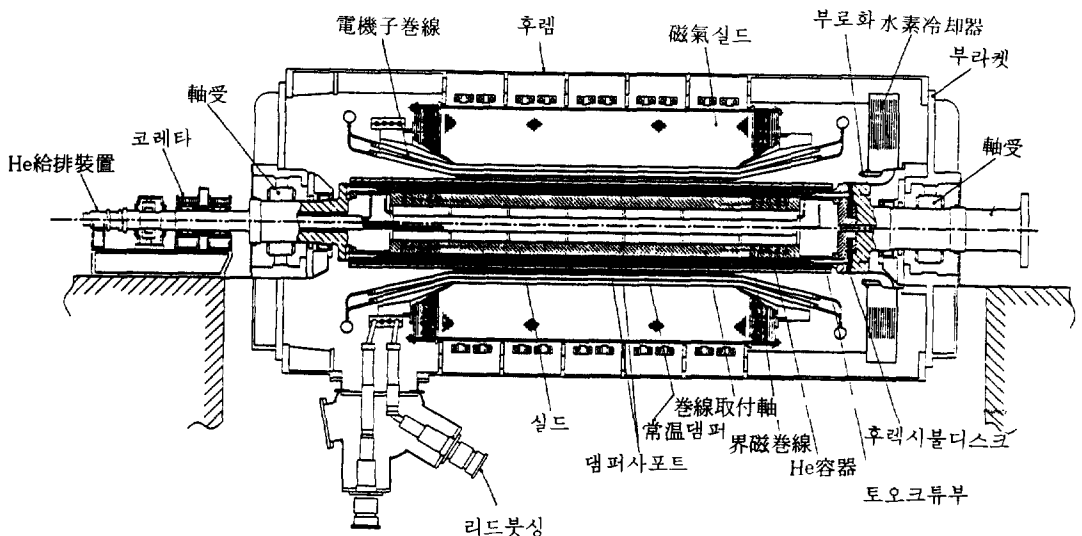


그림 7. 2極 1000MW超電導發電機縱斷面圖의 例

토록 하고 있다. 또 공극자기밀도를 철의 포화점의 수배내지 10수배로 해야 하므로 철심을 쓸 수가 없어 卷線이 철심홈에 의해서 지지되는 것이 아니라 磁氣실드 내면 공극중에 지지하는 구조로 하고 있다. 이와 같이 超電導發電機는 그 공극내 磁氣密度를 높게 할 수 있기 때문에 현용기에 비해 소형경량이 된다. 구조의 개략도가 그림 7 이다.

**2.4.2 超電導 界磁卷線**

超電導界磁卷線은 電流密度가 높아야 하고 卷線작업이 쉬워야 하며 또 交流損失이 작고 안정성이 높아야 한다. 그래서 電流密度면에서는 화합물계의 Nb<sub>3</sub>Sn이 우수하지만 작업이 곤란하기 때문에 合金系의 NbTi가 사용되고있다. 고전류 밀도와 안정성을 높이기 위해서는 NbTi를 극세선화해서 사용한다. 그리고 交流損失을 적게 하기 위해서는 CuNi의 高低抗體를 안정화 재료에 추가해서 삼층구조로 해서 사용한다. 안정화를 위해서는 코일을 예폭시 수지로 함침해서 고정시키는 방법 등이 채택되고 있다. 超電導界磁卷線을 지지하기 위해서는 축에 卷線을 삽입할 수 있는 홈을 만들고 이에 卷線을 삽입, 새기를 박아 고정시킨다. 이의 냉각은 내부 He통의 He

이 대류에 의해서 유통공을 통해 이루어진다. 그리고 이 액체 헬륨은 홈 아래부분에 있는 유통공을 통해서 내부 He통으로 돌아간다.

**2.4.3 다중원통 回轉子 (Torque Tube)**

토오크 튜브는 回轉力을 界磁卷線에 전달하게 되는데 이때 이것은 정격최하 回轉力에 견디어야 할 뿐만 아니라 사고시를 대비하여 그의 수배의 힘에 견디도록 두껍게 만들어야 한다. 반면 이 토오크 튜브로부터 回轉子극저온부와의 열침입이 액체 He의 소비량을 좌우하므로 이를 위해서는 얇게 만들어야 하는 상반관계가 있다. 그래서 얇고도 충분한 강도를 갖는 재료로 만들고 증발 He을 이용 토오크 튜브를 냉각시켜 열침입을 감소시켜야 한다. 토오크 튜브의 내부 즉 권선을 부착한 축은 4K정도인데 비해 회전원통 최외부(댐퍼)는 상온 이상이므로 토오크 튜브에 댐퍼를 직접 용접할 경우 열 팽창, 수축이 문제가 된다. 이의 해결책으로는 다음 두가지 방법이 있다.

**2.4.3.1 플렉시블 디스크 방식**

반구동축 토오크 튜브를 다중 플렉시블 디스크를 거쳐 회전축에 지지시키는 방식이다. 이 경

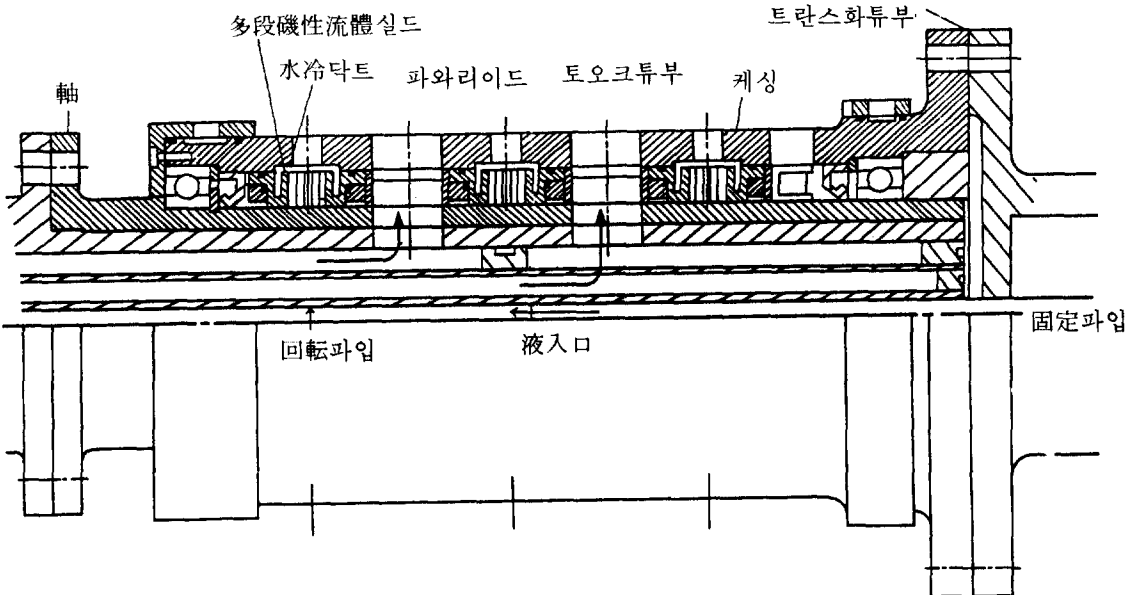


그림 8. He 給排裝置의 構造



우 반경 방향변위는 작고 축방향으로 신축이 자유롭게 된다.

2.4.3.2 2중축수 방식

回轉子の 내통부와 외통부를 반구동축에서 별개의 축수로 지지하는 방식으로서 반경방향으로는 변위가 생기지 않고 축방향으로는 신축이 자유롭게 된다.

2.4.4 댐 퍼

댐퍼는 사고시 과대한 2배 주파수의 電子力과 열이 가해지므로 두껍고 강력한 지지구조로 해야한다. 이에 대한 대책으로서 원심력과 電磁力을 고려한 다음, 두가지 방법이 있다.

2.4.4.1 단속 댐퍼

구조는 간단하나 電磁압축력이 그대로 댐퍼에 가해지므로 고강도·고도전계를 사용해야 한다. 그래서 고강도·非磁性강을 사용하고 그것을 두껍게 해서 전도율을 높게 한다.

2.4.4.2 3속 댐퍼

댐퍼의 내·외주에 고강도·비자성강을 보강한 3속구조로 해서 댐퍼의 응용을 대폭 감소시킨다. 이 경우 댐퍼재와 보강재와의 접합법이 문제로서 더 많은 연구가 필요하다.

2.4.5 He 급배장치

He 급배장치는 回轉子 軸端에 부착되어 He을 공급하고 증발된 He가스를 回轉子로부터 배출케 하는 역할을 담당한다. 따라서 액체 He系와 He가스系의 회전축실 등이 필요하다. He 배급장치의 구조예를 표시한 것이 그림 8이다. 액체 He의 입구는 회전중심에 설치된 回轉子 액체He 배관에 고정파이프를 삽입해서 송입한다. 회전파이프와 고정파이프 간의 간극은 0.5mm로 해서 열침입을 억제하고 있다. 回轉子당으로는 일반적으로 磁性유체로 해서 불순물이 침입하지 않으면서 대기중으로 누설되지 않도록 한다. 이 경우 He의 흐름이나 회전습동에 의한 열적 영향이 크므로 케이싱을 물로 냉각시켜 일정온도

로 유지시킨다.

2.4.6 공극 電氣子 卷線

電氣子 卷線은 磁氣철드 내주에 위치하는 공극卷線이므로 交流磁束에 유효하게 이용되게함과 동시에 점적율이 높아지는 卷線法을 채택해야 하며 또 냉각, 지지 絶緣法을 잘 고려하여 실시하여야 한다. 卷線法으로서는 여러가지가 고안되고 있으나 현재로서는 보수의 용이성과 高卷線系數를 얻기위해 2속卷線이 유리하게 평가되고 있다. 공극卷線의 지지법으로서는 絶緣틀에 홈을 만들어 거기에 卷線을 삽입, 쇠기로 고정시키고 있는데 이 방법은 卷線의 수리가 용이하다. 여하간 상용기와는 달리(상용기에선 치부분에 電磁力이 걸림) 공극卷線에 電磁力이 직접 가해지므로 이에 충분히 견딜 수 있도록 해야한다. 공극卷線의 냉각을 위해서 電氣子 導體間に 금속파일을 삽입해서 물을 통하게 하는 것이 보통이다. 또 磁束密度가 대단히 높으므로 와전류손과 순환전류손의 저감을 위한 노력이 필요하다. 이를 위해서 보통 권선 1mmφ 정도의 세선을 모아서 2중전위로 사용한다.

2.4.7 超電導發電機의 필요특성을 위해 구조상 고려해야 할 점

특수용도 超電導發電機를 제외하고는 超電導發電機는 대형 發電機가 되는데 이 경우 電力수요지와 發電所간의 거리가 먼 것이 보통이다. 따라서 送電系統의 안정도를 향상시켜 送電電力의 한계치를 상승시킴이 필요하게 된다. 그런데 超電導發電機는 상용기의 설계기준에 따른다 하더라도 電氣子反作用이 작아 단락비가 크고 同期 리액턴스가 작아 정격출력시 내부상차 각이 작아 안정출력한계가 크며 동기화력이 대단히 크게된다. 고로 이 특성에 유의, 同期 리액턴스를 적정치로 하여 送電電力한계치를 증가시켜 초속응勵磁가 되도록 노력해야 한다. 저 리액턴스가 되려면 과도시의 電磁力 증가에 충분히 견디는 구조로 해야한다. 또 超速應勵磁制御를 하려면 界磁卷線에 인가되는 高電壓에 견디도록 충분한 絶緣을 해야하고 또 高電壓 大電流의 勵磁

장치가 필요하다. 이들은 다같이發電시스템의 가격을 상승시키는 요인이 되므로 送電용량증대에 의해서 얻어지는 이익과 합쳐 가장 경제적이 되도록 해야한다. 이상을 위한 구조상의 특징은 다음과 같다.

**2.4.7.1 댐 퍼**

댐퍼는 固定子에서 回轉子로 가는 磁束의 변동뿐 아니라 回轉子에서 固定子로 가는 磁束 변동도 쇄딩하는 효과가 있다. 따라서 초속응여자제어에 의해 界磁磁束을 급변시킬 경우 쇄딩 효과가 큰 2중 댐퍼방식은 불리하다. 그래서 대용량기에서는 저온댐퍼는 제거 상온댐퍼만을 갖는 1중댐퍼 방식으로 해야한다.

**2.4.7.2 界磁卷線**

系統사고 및 이에 수반되는 超速應磁시에 界磁電流가 급변하게 되는데 이때 퀴치(Quench)가 발생하지 않도록 해야한다. 고로 界磁電流密度와 磁束密度에 여유가 있게 합과 동시에 저교류손실 導體를 사용 과도시의 안정성이 유지되도록 해야한다. 또 超電導線이 연성이어서 강성이 작음으로 卷線부착축의 홈내부에 卷線을 쇄기에 의해 잘 固定시켜야 한다. 그리고 導體 표면과 액체 He의 접촉면도 크게 해서 냉각효과를 증대시키도록 해야한다. 超電導發電機는 개로시정수가 커서 초속응여자시에 전류응답이 늦다. 이의 개선법으로서는 界磁卷線卷回數를 줄이고 電流를 증가시킴에 의해 自己인덕턴

스를 줄여 개로시정수를 짧게 해야한다. 그리고 電流리드, 코렉터링의 電流용량을 크게 잡고 界磁卷線의 絶緣재료를 두껍게하고 거리도 길게 해서 絶緣내력을 강화시켜야 한다.

**2.4.7.3 저 리액턴스화**

초전도발전기의 리액턴스를 작게 하려면 回轉子の 磁氣回路 起磁力은 크게 하고 電氣子起磁力의 영향을 적게해야 하므로 크기가 커진다. 또 電磁力, 댐퍼電磁壓力이 커짐으로 구조물을 튼튼히 해야한다. 또 回轉子 치수가 커지고 토오크 튜브도 두껍게 해야 하므로 냉각부하도 어느 정도 증가시켜야 한다.

**2.5 超電導發電시스템의 경제성**

超電導發電機의 개발의 경제적 평가는 현재까지 조사연구시작품제작 결과에 의해서 발전기 제작비, 발전기운전 손실비 同期 및 과도리액턴스 감소에 따른 안정도 향상에 따른 효과에 의해서 평가할 수 있다.

**2.5.1 發電機 제작비**

發電機 제작비는 일정 勵磁機의 경우와 超速應勵磁의 경우는 크게 차이가 나는데 이를 표로 한 것이 표4와 같다.

**2.5.2 發電機효율향상 효과**

超電導發電機는 回轉子 동손이 0이 될 뿐 아니라 철손, 기계손, 교류손이 대폭감소하기 때

표 4. 超電導發電機製造가격 想定值

發電機容量 (MVA)	가격比 超電導機 現用機	現用機製造가격推定值 (億圓)	超電導機製造가격推定值 (億圓)
300	1.1 ~ 1.4	100	100 ~ 300
	.....		.....
600	0.95 ~ 1.1	150	150 ~ 200
	1.2 ~ 1.4		180 ~ 210
800	0.9 ~ 1.0	200	180 ~ 200
	1.15 ~ 1.35		230 ~ 270
1000	0.85 ~ 1.0	250	210 ~ 250
	1.15 ~ 1.30		200 ~ 325
1300	0.85 ~ 0.95	145	300 ~ 350
	1.15 ~ 1.30		350 ~ 400

注) 上段: 超電導機를 一定勵磁로 한 경우, 下段: 超電導機에 超速應勵磁기를 부착한 경우 (559)

문에 냉동기손실을 고려하더라도 전체적으로 운전손실이 감소 발전 효율이 0.5~0.7% 향상된다. 이를 실제적 평과에 반영시키기 위해서는 용량, 댓수Kwh 단가 등을 참작해서 평가해야 하는데 대체적으로 효율의 상승분만큼 경제성이 크다.

### 2.5.3 안정도 향상분

超電導發電機는 리액턴스가 크게 감소하기 때문에 정태안정도는 크게 향상된다. 그러나 送電線용량의 한계치는 과도 안정도에 의해서 제약되므로 안정도 향상에 따른 경제성 향상은 과도안정도에 따라 추정되어야 한다. 이 향상분은 電壓이나 送電線길이에 따라서 다르나 대체적으로 보아 超速應勵磁의 경우는 약 30%된다. 일정여자의 경우는 約20% 향상된다고 추정된다. 이상 대체적인 경제성 평가기준에 대해서 언급했으나 그의 정량적인 평가는 용량, 거리, 수명, 가동율 등 여러가지 조건이 가미되어야 하므로 이를 상세히 제시하지 않았지만 제작비, 운전효율면에서 유리할 뿐아니라 안정성 향상에 의하여 送電線건설비가 커지므로 전체적으로는 현시스템보다 경제성이 훨씬 높다는 것을 알 수 있다.

### 2.6 앞으로의 연구과제

超電導發電機에 대한 연구과제로는 다음과 같이 예시된다.

### 2.7 超電導發電機 개발의 장래

超電導發電機는 回轉子나 電氣子나 간에 磁氣回路에 철을 사용하지 않고 다만 電氣子측 외부 磁界차폐용으로만 철을 사용할 뿐이다. 그래서 전선에 대한 내전자력보강 여자전압의 상승에 대한 대책, 단열구조 권선보호용 댐퍼 등이 필요하게 되어 이익의 일부가 상쇄된다. 그래서 앞으로 구조설계에 있어 단열부댐퍼에 대

해서만은 개선이 요구된다. 댐퍼電流의 외부회로에 의한 制御방식은 이미 시도되고 있고 저온설계의 발달에 의해 댐퍼 임피던스 制御가 정상시의 高安定化를 위시, 高速勵磁시에도 가능하게 될 것이 예상된다. 電氣子の 超電化도 이루어질 것으로 예상된다. 그렇게 되면 단열부를 최외부에 놓을 수가 있어 제정수예의 영향을 거의 없앨 수가 있을 것이다. 電氣子の 超電化는 交流線材의 발달이 있어야 할 것이나 電氣子와 回轉子간의 거리를 대폭 축소시킬 수 있을 것이므로 6극 이상의 다극화가 가능하게 되어 수력발전기로도 사용할 수 있게 될 것이다. 또 勵磁電壓을 3~5KV 까지 높일 수 있게 되어 系統安定性을 더욱 향상시키게 될 것으로 생각된다. 超勵磁 超電導界磁卷線의 전압분포가 과도시 크게 불균일하게 될 것이므로 절연분담설계에 발전이 있어야 할 것이다. 이것은 냉각구조와도 밀접한 관계가 있다. 電機子 電壓이 상승되어 변압기가 필요없게 될 것이다.

### 參 考 文 獻

- 1) 李承院外, “超電導 特輯”, 電氣學會誌, 32, 7, 1983.
- 2) 増田正美, “超電導工ネルギー入門”, オーム社, 1981.
- 3) W. G. Moore et al, “Development of A 300 MVA Electric Utility Superconducting Generator”, Presented at South Eastern Electric Exchange Conference, New Orleans, Louisiana, 1983.
- 4) 日本電氣學會技術報告(Ⅱ部) 第192號: 超電導電力機器의開發動向: 大型超電導マグネット調査專門委員會, 電氣學會, 1985.
- 5) James L. Kirtley Jr. “Per-unit Reactances of Superconducting Synchronous Machinery”, IEEE PES Winter Meeting, 1973.
- 6) 新技術檢討委員會, “超電導回轉機의技術的評價報告書”, 1984.