

超電導에너지貯藏

黃錫永*

□ 차 례 □

- 1. 초전도에너지 저장의 필요성과 의의
 - 2. 초전도 에너지 저장의 원리 및 특징과 응용
 - 3. 초전도 에너지 저장체통의 구성 및 운용
 - 4. 초전도 전력저장 장치의 효율
 - 5. 초전도 전력저장 장치의 안전대책
 - 6. 초전도 전력저장 장치의 경제성 및 개념설계 사안
 - 7. 결 론
- 참고문헌

1 초전도 에너지 저장의 필요성과 의의

1911년에 화란의 H.Kamerlingh Onnes 가 수은의 초전도 현상을 발견한 이래 초전도의 개발 및 응용은 제 1종 초전재료(순수금속)를 주로 연구 개발한 제 1시대와 그후 1960년 초반 J. E. Kunzler에 의한 Nb₂Sn 화합물의 실용성이 있는 초전도성 발견에서 활기를 찾기 시작하여 제 2종 초전재료(금속화합물 또는 혼합물)를 대상으로 연구 개발한 제 2시대를 거쳐 1970년부터 LIM, MHD, 핵융합, 초전도 에너지저장, 발전기등에 제 2종 재료의 응용을 공학적으로 대규모 개발하기 시작하여 현재까지 제 3시대에 접어들고 있으며 현재까지의 연구결과 및 응용분야로 봐서 우리 인류에게 새로운 발전 및 혜택을 가져 올 것이 분명하다.

초전도의 응용의 하나인 초전도 에너지저장에 관한 연구 개발은 관련 과학 기술의 발전에 따라 대용량의 집약형은 물론 전력 수급 안전용의 소요량 분산형도 그 경제성이 높히 평가되어 미국, 일본등지에서는 이미 연구가 활발히 진행중에 있고 특히 미국의 Wisconsin 대학에서는 Wisconsin 전력회사와 에너지청의 공동 재정지위(\$ 1,500 만)으로 1981년부터 100 MWH 급의 prototype를 본격적으로 연구 개발중에 있으며 또 이장치의 경제성은 설계 방침 및 신재료의 개발 등으로 해를 거듭할 수록 향상되어 1900년 후반에 가서는 양수발전규모의 실용화가 전

망된다.

전력회사에서 양질의 전력공급책무를 수행함에 있어 다음과 같은 애로점이 있는것은 주지의 사실이다.

- 1) 정확한 수요증가에 관한 수요 상정이 어렵다.
- 2) 첨두부하와 심야 경부하와의 차이가 현격하게 클 뿐만 아니라 부하 지속곡선의 pattern도 변하고 있다.
- 3) 효율 및 경제성이 좋은 신에 발전소(화력, 원자력)는 그 용량이 클 뿐만 아니라 출력 조정폭이 좁고 부하 추종성이 좋지 않으며 기동 손실이 크다.
- 4) 기 이용 화석 에너지 자원의 고갈 현상에 의한 화석연료의 무기화 및 고가로 고효율 발전설비의 도입이 요망되고 또 대체에너지의 개발 결과로 등장하는 원자력, 조력, 태양열등의 발전소의 출력특성은 경제성등의 이유로 부하의 Load cycle 과 무관하므로 이들의 유효이용을 위해서는 특히 전력저장이 필요하게 된다.

전력회사에서는 상기한 문제점에 대하여 수력, 화력, 가스터빈, 원자력, 양수발전등을 적절히 조합하여 심야의 경부하에서 첨두부하사이로 수시 변동하는 부하요구에 가장 효과적으로 응할 수 있도록 전력설비의 계획과 운용을 행하고 있다. 변동부하에 대처하는 것으로는 현재는 수력과 중소용량의 효율이 낮은 첨두부하용 화력과 양수발전인데 이중에 양수발전은 전력저장 설비로서 의미를 갖고 있으나 그 효율이 65 ~ 70 %로 낮아서 밀이 뚫린 항아리에의 저장과 같아서 전력의 저장이라기 보다는 첨두시에 수급관계의 개선용이라고 볼 수 있다.

이상과 같은 문제점은 고효율의 전력저장 설비의

*正會員：檀國大 工大 電氣工學科 副教授

표 1.1. 각종에너지 저장방식과 성능

저장 방법	저장에너지형태	규모 [MWH]	종합효율 (%)	에너지밀도 (KCoH/m ³)	비 고
양수 발전	위치에너지	1,000~10,000	65~70	0.3~0.5	효율불량, 대용량
축전지 (Pb NaS)	화학에너지	1~100	60~75	30	고에너지밀도, 고단가, 단수명, 저효율, 중용량
	회전에너지	1~50		10	고에너지밀도, 저효율, 소요량
수소 저장	화학에너지	-			효율불량, 이동용이
압축 공기	압력에너지	~1,000		1	저효율, 대용량, 폐유전이용
초전도에너지저장	자기에너지	1,000~1,000	> 90	1~3	고효율, 중.대용량, 속응성

출현시 전력설비의 계획과 운용은 발전과 전력저장이란 이원적 (二元的) 측면에서 쉽게 해결 할 수 있으며 피크셰이빙 (peak shaving) 을 행하여 전력설비의 부하율 향상(설비의 유효이용)과 발전효율 향상을 통하여 워에너지의 절약은 물론 염가의 전력을 공급 할 수 있다.

초전도 에너지 저장은 표 1.1 에 있는 다른 어떤 저장 방법과는 달리 전기 에너지를 직접저장(자기 에너지 형태) 및 방출을 하므로 효율이 높고 (90% 이상) 속응성이 우수하며 (수십 ms 정도) 이외에 대규모 전력저장에 있어서 현행의 양수 발전에비하여 저장에너지 밀도가 높고 (2~3배) 또 대용량화 및 입지조건에서 상당히 유리하므로 발전설비의 대형화에 따른 이점을 최대로 활용할 수 있게 하는 명실상부한 전력저장 장치라 할 수 있다. 따라서 이것이 실용화되면 워에너지 절약 및 염가의 전력공급에 큰 몫을 할 수 있는바 이 지면을 통하여 초전도에너지 저장방법과 문제점을 소개하며 우리나라에서도 이에 관심을 갖고 조기적용의 바탕을 구축함이 바람직 하다고 본다.

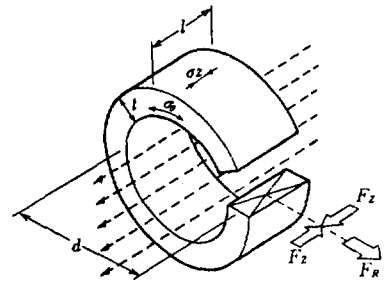
② 초전도 에너지 저장의 원리 및 특징과 응용

초전도 에너지 저장의 원리는 코일에 전류를 흘릴 때 저장되는 자기에너지 (1/2 LI²) 를 이용하는 것으로 코일을 이루는 도체가 초전도체이므로 초전도체의 특성과 손실 측면에서 다음과 같은 특징이 있다.

- 1) 무손실 : 원리적으로는 손실 (양수경우는 누수) 이 없는 영구 저장이 가능하다.
- 2) 철심 불필요 : 대전류로 코일의 저항손을 발생하지 않고 강자계를 만들 수 있으므로 포화특성과 철

손이있는 철심등의 자기재료가 필요없다.

3) 에너지밀도와 전자력 : 강자계일 수록 에너지 저장밀도 $\frac{B^2}{2\mu_0}$ [J/m³] 가 높으나 전자력 $\frac{B^2}{2\mu_0}$ [N/m²] 이 또한 커지므로 [그림 (2.1) 참조] 코일의 기계적 강도 및 지지문제와 초전도성의 임계치 (전류 밀도, 온도, 자계) 등에서 자계를 정한다.



徑方向的膨脹力 $F_R = \pi d l \cdot \frac{B^2}{2\mu_0}$ [N]

Hub 應力 $\sigma_\theta = \frac{d}{2t} \cdot \frac{B^2}{2\mu_0}$ [N/m²]

軸方向的壓縮力 $F_z = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{B^2}{2\mu_0}$ [N]

卷線의壓縮應力 $\sigma_z = \frac{d}{4t} \cdot \frac{B^2}{2\mu_0}$ [N/m²]

그림 2.1. 원형코일에 작용하는 전자력과 응력

4) 초전도성 유지대책 : 초전도성은 그림 (2.2) 와 같이 임계치 이내에서만 초전도체가 되고 이것을 벗어나면 상도체가 되는데 이 경우 상도체화에 따른 전기저항에서 국부적으로 발생한 열은 다시 인접부분을 가열하여 또다시 상도체화하는 현상이 눈사태식

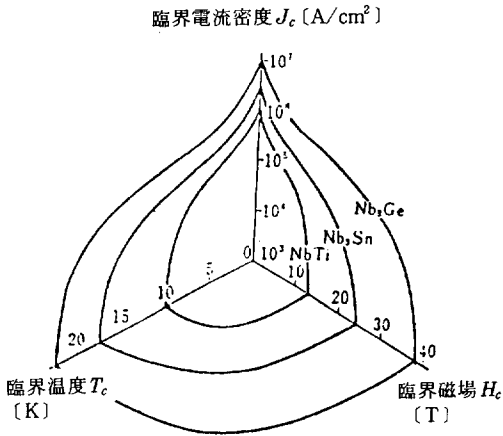


그림 2.2. 초전도체의 임계치

으로 확대되는 즉 갑작스러운 대규모 상도체 전이를 Quench 라 하는데 이것은 양수발전의 댐붕괴에 해당 하는 것으로 이의 발생 방지 대책이 필요하다.

이를 위해서는 그림 2.3과 같이 초전도 복합선을 써서 국부적으로 상도체화한 부분의 전류는 열 및 전기의 전도도가 좋은 안전화재료 (동 또는 알루미늄) 에 바이패스시켜 상도체화의 확대방지 및 초전도성의 회복을 기하는 완전 안전화이론 (식 2.2참조)과 초전도체의 제작 및 가공의 고신뢰화 기법으로 해결한다. 초전도 복합선의 안전조건은

$$I^2 \phi l / A < S l h \Delta T \quad (2.2)$$

I : 전류, ϕ : 안전화 재료의 비저항, l : 상도체 발생부분길이 A : 안전화재료의 단면적 S : 복합선의 외주장 h : 액체 He 의 열전달 계수 ΔT : 복합선과 액체 He 의 온도차

초대형 코일로되면 안전화재료를 포함한 초전도선의 평균 전류밀도는 동으로 만든 코일과 같은 정도로 전류밀도는 높지 않으나 전기저항이 0인 점에서 그 의의를 찾게 된다. 저장에너지가 클 수록 전류밀도는 코일의 지지 및 보호를 위하여 식 (2.3) 과 같이 낮게 된다.

$$E J^2 \approx 10^{23} \quad (2.3)$$

E : 저장에너지 [J]

J : 전류밀도 [A/m^2]

5) 초전도 코일지지 : 초전도 코일의 소요 극저온 유지와 강한 전자력에 견디도록 하는 방법에는 저온 지지 구조와 상온 지지 구조가 있다.

저온지지 구조는 소형에 적합한 것으로 코일 및 코일 지지물 일체를 액체 He 속에 넣는 구조이며 살은

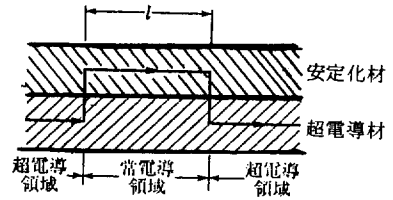


그림 2.3. 초전도 복합선의 전류경로

구조는 코일만 액체 He 속에 넣고 코일 지지물은 양반에 치탱되도록 하고 코일 간을 열전연 하도록 한 구조로서 대형에 적합하다.

6) 코일의 모양 : 코일의 모양에는 슬레 노이드와 같은 축대칭형의 것과 트로이덜과 같은 비축대칭형이 있는데 대용량의 것은 경제성의 면에서 슬레노이드형이 채용되며 또 코일에 가해지는 장력을 줄이기 위하여 그림 (2.4) 와 같이 리플 (ripple) 구조를 취한다.

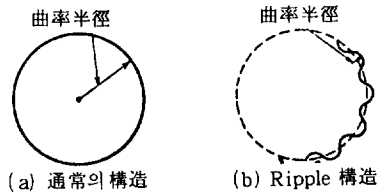


그림 2.4. Ripple 구조

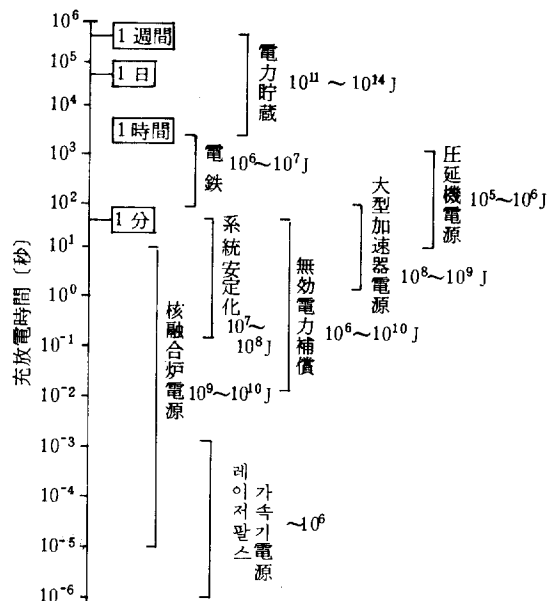


그림 2.5. 충전시간과 초전도 에너지 저장의 응용

7) 초전도에너지 저장의 응용과 충방전 시간: 초전도 코일의 에너지 저장 (충전) 및 회수 (방전) 시간에 관련한 초전도 에너지 저장의 응용은 그림 2.5와 같다. 충방전시간이 짧은 것은 (Pulse magnet) 충방전시간 긴 것과 달리 교류성분이 크므로 설계 개념이 다르다.

즉 충방전시 와류손과 히스테리시스손을 감소시키기 위하여 코일의 선재는 연선음 사용하고 권선의 감이틀등의 와류손을 줄이기 위하여 비자성체 재료를 사용하며 또 냉각 채널을 충분히 두어 손실열의 냉각을 좋게한다.

③ 초전도 에너지 저장 계통의 구성 및 운용

3.1 초전도 에너지 저장 계통의 구성

초전도 에너지 저장 장치는 전력계통과 연계하여 임여 전력을 저장하고 계통 공급 전력 부족시는 저장 에너지를 방출(발전)하여 피크 셰이빙 (Peak shaving)을 하는바 전력 계통의 일부로서 설치상상도는 그림 (3.1)과 같으며 초전도 에너지 저장 계통에 대하여 1) 초전도 코일 2) 초전도 코일의 냉각 및 단열지지 계통 3) 전력 계통과의 연계 계통으로 나누어 개관하면 다음과 같다.

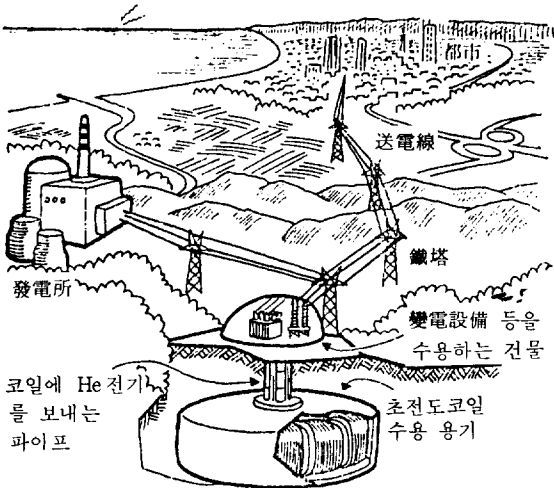


그림 3.1. 초전도 에너지 저장장치의 설치구상도

1) 초전도 코일

초전도 코일은 냉각 측면에서 볼때 a) 코일의 권선 중에 액체 He 이 통할 채널을 만들어 초전도선이

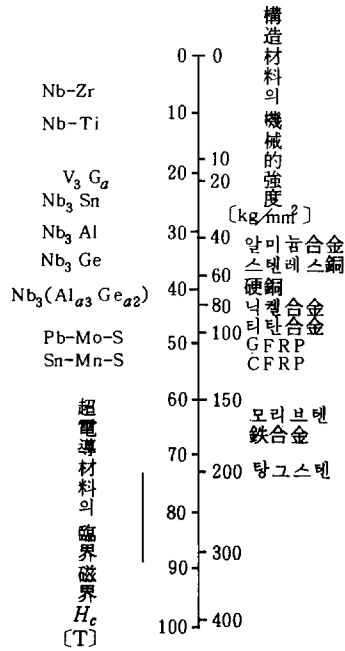


그림 3.2. 각종 초전도체의 임계자계와 구조재료의 강도

확실히 액체 He 에 접촉하여 냉각이 좋도록 한 浸漬形과 b) epoxy 수지에 함침한 함침형과 c) 초전도 선 내부에 액체 He 을 통하게 하는 내부 냉각형이 있고, 코일 모양은 앞에서 설명한 바있는 축대칭형과 비축대칭형이 있으며, 전자력의 분산을 위하여 전코일을 여러부분으로 나누는 분산형과 비분산형이 있다. 그리고 각종 초전도체 코일이 만들 수 있는 임계자계 (Tesla)와 그것에 대응하는 전자력 및 구조재료의 기계적 강도를 표시하면 그림 3.2와 같은데 그림에서 동이나 스테인레스강을 코일 구조재료로 사용하면 발생 자계의 한계는 30 (T)전후이며 임계자계가 높은 새로운 초전체료가 개발되어 보다 높은 자계를 만들려면 보다 강도가 큰 구조재료의 초전도체의 개발이 요구된다.

2) 초전도 코일 냉각 및 단열지지 계통

초전도 코일의 극저온 유지를 위한 냉각계통은 그림 3.3과 같다.

그림3.3 에서 He액화 냉동장치, He 콘덴서, He회수 장치는 저온 구조와 상온 구조에 공통되며 저온 구조에서는 cryostat의 벽이 최종적인 코일의 지지체 이나 상온 구조에서는 cryostat의 벽을 다시 그림 3.4와 같이 단열 지지물을 통하여 암반이 최종적인

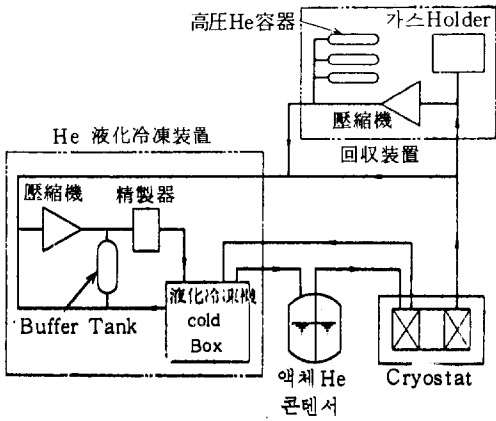


그림 3.3. He 냉각계통

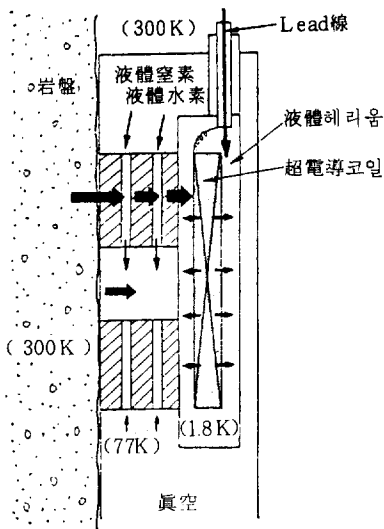


그림 3.4. 상온지지구조

지지체가 되도록 한다.

a) He 냉각계통

He는 임계점이 5.2°K, 2.25 atm으로 상태는 포화 He, 과냉각 He, He 가스, 초임계 He, 초유동 He으로 나눌 수 있는데 특히 초유동 He (1.9°K, 1.3 atm)은 점성이 없는 초유체와 점성이 있는 상유체의 혼합 상태로서 이것은 초전도체에서 액체 He으로의 열전도도가 다른 상태의 것에 비하여 상당히 커서 초전도체와 액체 He과의 온도차를 적게 할 수 있어 초전도 코일의 안정성이 향상되므로 전류밀도와 자계를 높일 수 있는 반면에 냉동부하가 증가하나 이의 이점이 크므로 초유동 냉각법의 연구 개발이 주목된다. 실용되고 있는 He 액화 냉동 사이클의 대표적인 것

은 Claude 사이클이며 초전도 코일의 냉각법은 액체 He에의 단순한 침적 냉각법에서 초임계 He 강제 냉각법이나 초유동 He 냉각법 등으로 다양한데 냉각계에서는 냉동효율 향상, 냉각속도, 시간을 포함한 초기 냉각문제, He의 소요량 저감등의 연구과제이다. 그리고 He의 생산은 천연가스중의 He 분을 정제하여 만들며 천연가스중에 0.3%이상 He이 함유되어야 경제적 채산이 맞다고 하는데 이 He 자원은 지역적으로 미국, 소련, 폴란드, 캐나다등에 편재 되어 있어 이의 회수 사용과 더불어 확보대책이 요망된다. 예로서 1,000 MWH급 초전도 에너지 저장장치의 소요 액체 He 량을 추정하면 약 1.25×10^6 [l]로서 상당한 양이 된다

b) 단열지지 계통

초전도 코일은 단열지지 구조로된 극저온보존 용기 (Cryostat) 안에서 액체 He에 의하여 극저온으로 유지하는데 저온용기의 단열법은 이중 Casing 내부의 고전공 지지구조재의 저열방사 및 저열전도의 3가지의 기본적인 단열법을 조합하여 단열한다. 단열구조 재료는 초전도 코일의 극저온 유지와 코일에서 발생하는 강력한 자계에 의한 전자력의 지지 및 자계의 영향 등에서 구조재로서 필요한 특성은 다음과 같다.

- ① 극저온에서 기계적 강도가 높을 것
- ② 비자성자체 일 것
- ③ 열 전도율이 낮을 것
- ④ 전기 저항치가 높을 것
- ⑤ 열 수축율이 초전도선의 것에 근사할 것
- ⑥ 비중이 적을 것
- ⑦ 기계 가공 및 용접이 용이 할 것

단열 구조재에는 금속재료와 복합재료(비금속)가 있는데 열 침입량을 억제하고 큰 전자력에 견디는 특성에 대한 평가지수 f 는 식(3.1)과 같고 각종

$$f = \frac{\delta}{K} \tag{3.1}$$

δ : 재료의 강부강도 [kg/mm²]

K : 열 전도도 [mw/cm k]

단열재료의 평가지수 f 는 표 3.1과 같으며 f 가 클 수록 단열 구조재로서 양호한 것이 된다.

또 방사에 의한 열침입을 막기 위하여 방사를 반사하는 알미늄을 증착한 얇은 플라스틱 필름과 유리 섬유를 수백장 적층한 것을 고온부와 저온수 사이에 넣는다.

상온지지 구조에서는 최종의 전자력 지지체인 암반의 강도에 맞게 지계의 강도를 선정할 필요가 있

표 3.1 각종 단열재료의 f

재료명	온도영역 (°K)	밀도 ρ (g/cm ³)	강복강도 σ ₆ (kg/mm ²)	평균열전도도 K (mw/cm ² K)	f (δ / K)
유리섬유강화 (GFRP)	300-77	2.0	84	8.0	10.5
	77-4.2		100	2.9	34.5
탄소섬유강화수지 (CFRP)	300-77	1.5	124	27	4.6
	77-4.2		107	1.5	71.3
스테인레스강 (SUS 316)	300-77	8.0	23	107	0.22
	77-4.2		49	50	0.98
티탄 합금 Ti-5Al-2.5Sn	300-77	4.5	72	60	1.2
	77-4.2		124	35	3.5

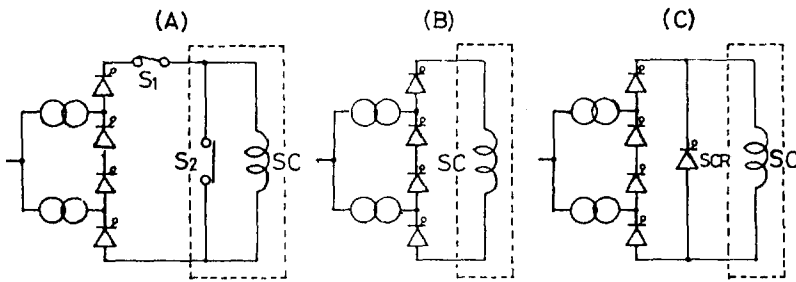


그림 3.5 전력계통과의 연계 계통

으며 지진에도 지지구조에 이상이 없도록 하여야 한다. 즉 지진에 의하여 암반에 금이 가서 급속으로 만든 단열진공벽(코일과 액체 He 수용 Cryostat의 벽)이 파손하면 액체 He 에의 급격한 열침입으로 He 이 비등하여 Quench 를 유발하기 때문이다.

그리고 이 구조에서는 그림 3.4에서와 같이 액체 질소(77°K)와 액체수소(20°K)에 의한 열차폐부를 설치하여 냉각에 필요한 전력을 최소가 되도록 한다.

3) 전력 계통과의 연계 계통

초전도 에너지 저장 장치는 교류의 전력계통에서 저장시에는 교류에서 직류로 변환하여 저장하고 발전(방전)에는 직류에서 교류로 변환할 필요가 있으며 이를 위해서는 그림 3.5와 같이 계통 전압을 맞추어 주는 ①변압기와 교류에서 직류 또는 직류에서 교류로 변환하는 ② SCR 전력 변환 계통과 계통의 보호 및 조작을 위한 ③ Switchgear 와 초전도체 코일과 외부와를 연결하는 ④전류도선으로 구성된다.

그림 3.5에서 S, C는 초전도 코일을 표시한 것이다.

전류리드선에는 증발하는 He 가스로 리드선의 표면을 냉각하는 가스 냉각 리드선과 가스로 냉각하지 않는 단열 리드선이 있으며 전류도선의 열침입량

표 3.2 전류리드선의 열침입량

	최적현상 LI/S	열침입량 Q/I
가스냉각리드선	2~3×10 ⁷ A/m	0.001~0.002W/A
단열냉각리드선	~5×10 ⁶ A/m	0.04~0.05W/A

L : 길이, S : 단면적, I : 전류, Q : 열침입량

은 도체의 단순한 열의 전도에 의한 것과 전기저항으로 인한 동손에 의한 것이 있는데 전류도선의 단면적과 길이와 통과 전류간에는 열침입을 최소로하는 최적 조건이 존재하는 바 그 최적 조건은 표 3.2와 같다.

3.2 초전도 에너지 저장 장치의 운용

전력계통용 초전도 에너지 저장 장치의 운용은 그림 2.5에서 알 수 있는 바와 같이 저장용량이 양수발전 규모로 크고 (10¹¹ ~ 10¹⁴ J) 또 충방전시간이 긴 (1시간 ~ 1주) 전력저장용과 저장용량이 적은 반면에 (10⁶ ~ 10⁸ J) 충방전시간이 짧은 (10⁻²초 ~ 1분) 전력계통 안정용 및 무효전력 보상용으로 볼수 있는데 후자는 충방전시간이 짧으므로 2장에서 설명한 초전도 펄스 마그네틱트를 사용하는데 계통안정용은 계통사고시 유효전력의 과부족을 흡수 또는 방출

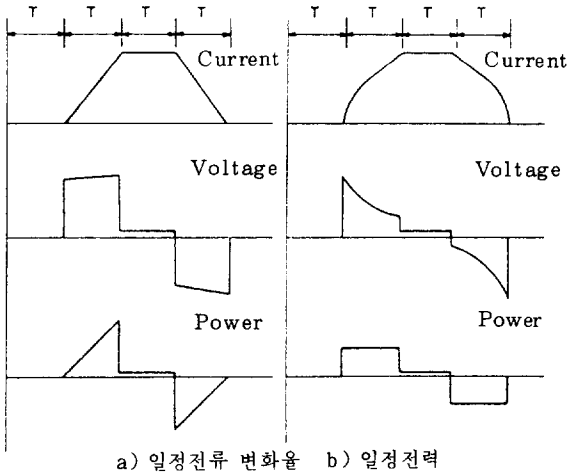


그림 3.6. 전력저장용의 충방전 방법

에 의하여 계통안정을 도모하고 무효전력 보상용은 계통의 무효전력을 흡수 또는 방출에 의하여 계통의 무효전력을 보상한다.

전력저장용의 충방전 방법에는 그림 3.6 과 같이 일정 전류 변화율 방법과 일정전력방법이 있는데 일반적으로 전자를 채용한다.

4 초전도 전력저장 장치의 효율

본 장치의 효율은 저장에너지 ES 에 대하여 손실로 소비된 에너지 ΔE 를 감한 것에 대한 비로서 식으로 표시하면

$$\eta = \frac{ES - \Delta E}{ES} \times 100 \text{ [%]} \quad (4.1)$$

ΔE 에는 다음 4 과정의 손실로 나눌수 있다.
 (a) 충전시
 (b) 저장시
 (c) 방전시 (발전 시)
 (d) 휴지시 (휴지시의 방각계의 손실) 이 중에서 (d)항의 손실은 효율계산에서 고려하는 경우도 있고 무시하는 경우도 있다.

손실 발생 부분으로 파서는

- (a) SCR 변환계통의 손실 : SCR, 변압기 및 배선 손실
 - (b) 냉각계의 손실 : 초전도 코일의 발열에 의한 열부하와 외부열침입에 의한 열부하
- 이 중 (a)항의 손실은 충방전 시간동안에 저항손의 적산량으로 충방전 시간이 길수록 크다.

그림 3.4와 같은 상온지지구조의 초전도 전력저장 장치의 저장용량별 냉각계의 손실을 보면 표 4.1 과 같다.

이상의 것을 종합하여 초전도 전력저장 장치의 효율을

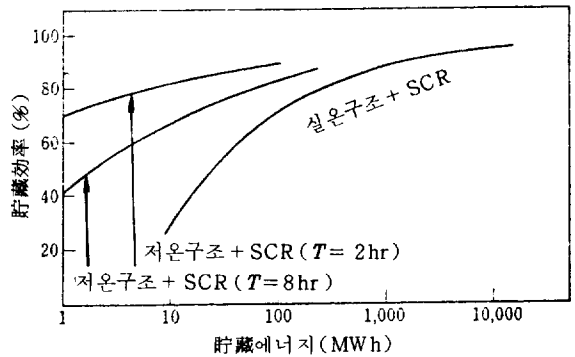


그림 4.1. 초전도 전력저장 장치의 효율

표 4.1. 초전도 전력저장장치의 냉각계의 부하(MWH)

손실		용량	10(MWH)	1,000(MWH)	10,000(MWH)
코일 발열	히스테리시스손		0.231	5.15	23.94
	와전류 손		0.084	0.90	0.96
	Twist 손		0.455	4.93	5.20
	기계적히스테리시스손		0.004	0.08	0.39
열 침입	FRP 지리대				
	1.8°K에서 침입		1,649	35.00	164.90
	20°K에서 침입		1,759	37.34	175.90
	77°K에서 침입		1,745	37.04	174.50
	복사		0.515	1.09	5.15
	리드선		0.90	0.90	0.90

도시하면 그림 4.1과 같다. 저장용량이 클 수록 S - CR 변환계통의 손실의 비율이 적어져서 대용량화 가 용이한 실온구조의 것은 저장용량이 1000MWH 급 에서 부터 효율이 90%이상이 된다.

5 초전도 전력저장 장치의 안전대책

양수발전의 댐붕괴에 해당하는 Quench 방지책 과 누설자계의 인체 및 기타에 대한 영향문제가 이 장 치의 안전대책의 주종이 된다.

5.1 Quench방지대책

(1) 완전안전화한 초전도체 사용

2장에 설명한 완전 안전화 이론에 입각하여 제 작 한 초전도체를 사용하고 초전코일의 현장 가공 조립 시에는 제작자의 추천 시공법에 따라 고신뢰화 기법 으로 시공한다.

(2) 안전을 고려

초전도체의 임계치에서 실제 적용할 전류밀도, 자 계, 온도는 안전을 고려하여 정한다.

(3) 보호저항 설치

Quench가 발생하면 그것을 방지할 경우에는 초 전도 코일이 소손할 뿐만 아니라 저항열에 의하여 액체 He은 증발, 고압화하여 안전변으로 분출하여 막대한 량의 He 증기는 He의 유실은 물론 주위에 냉해를 주는 큰 재해를 유발한다. 따라서 만약의 경 우 Quench가 발생한다 해도 그림 5.1과 같이 초전 도 코일의 외부에 설치한 보호저항과 전력계통에 저 장에너지를 급속히 방출하도록 하여 앞에서와 같은 사태를 일으키는 온도상승이 일어나지 않도록 한다.

보호저항 R의 값은 코일 양단 전압 I.R의 크기 (절연문제)와 초전도 코일의 극저온 보존용기의 온 도상승을 고려하여 정하는데 대용량 코일에서는 단 일 보호는 불가능하여 코일을 분할하여 보호하는 분 할보호법을 쓴다. 그리고 보호저항 회로의 투입은 Quench검출에 의하여 작동되며 Quench검출법에는

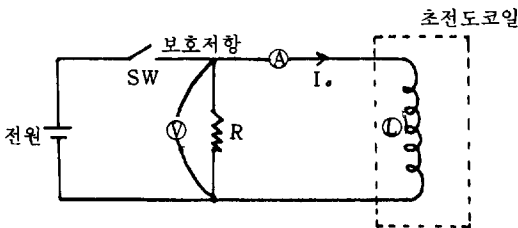


그림 5.1. 보호저항 접속도

전압법, 자계법, 온도법, 음향법 등이 있으나 현재 사용하는 검출법은 전압법이다.

5.2 누설자계의 영향

이것에 대해서는 명확한 의학적 data가 부족한 상 태이며 미국의 스탠포드 직선 가속기 센터에서 채용 하고 있는 허용 자기 피폭량은 표 5.1과 같다.

표 5.1. 허용자기피폭량

	장기(시간단위)	단기(분단위)
전선 혹은 머리	200G	2,000G
손 및 팔	2,000G	20,000G

10,000 MWH급 장치에서 불매 코일 중심에서 반 경 530 m이내는 200 G에 해당한다. 따라서 자기 차 페는 물론 원자력 발전소에서와 같이 비거주지역 설 정을 고려할 필요가 있다.

6 초전도 전력저장장치의 경제성 및 개념설계 사양

실용 단계가 아니고 연구 개발 단계에서 추정한 cost는 cost 산정의 기준으로 되고 있는 가정 그것 이 불안정한 요소를 포함하고 있어 정확하다고 할 수 없으나 미국 위스컨신 대학의 연구진이 행한 발 전 cost는 표 6.1과 같이 설계방침, 신재료의 개발 등으로 해를 거듭할 수록 경제성이 향상되고 있고 또 가스 터빈보다는 경제적임을 보인다. 그리고

표 6.1. SMES의 발전 cost 평가의 시대추이

평가연대	발전 Cost(mill 1 KWH)	
	연간 365일 가동	연간 260일 가동
1970	10.1	
1974	22.1	
1976	18.7	
1978	19.2	24.8

표 6.2. 용량별 상대적 건설단가

용 량	상대적 건설 단가
10,000(MWH)	0.46
5,000(MWH)	0.58
1,000(MWH)	1.00
100(MWH)	2.14

본 SMES는 대형화 할 수록 표 6.2에서 보는 바와 같이 유리함(Scale Merit)을 보인다.

이 장치의 경제성 도모는 초전도 코일 선재의 임계치(임계전류, 임계자속밀도, 임계온도)의 상승에 의한 재료절약, quench방지를 위한 안전화 기법 개선에 의한 재료절약, quench 및 누설 자속에 대한 안전성 향상, 강력한 전자력의 지지를 위한 열 절연 지지개 및 지지방법의 개발, 양호한 운전특성 및 효율을 위한 전력계통과의 인터페이스 부분의 부품 및 제어방법 개발, 냉각 계통의 열 전연 및 냉각 효율 향상, He의 소요량 감소 및 회수 방법의 개발 등을 통하여 계속 연구 중에 있으며 1900년대 후반에 현재의 양수 발전규모가 실용화 될 전망이다.

참고로 미국 wisconsin 대학의 연구진이 행한 1,000 MWH 급 및 10,000 MWH 급의 개념설계사양을 보면 표 6.3과 같다.

표 6.3. SMES의 개략 사양

	1,000MWH	10,000MWH
자 속 밀 도	5T	5 T
도 체 온 도	1,8°K	1,81,8°K
코 일 직 경	96m	206m
코 일 높 이	48m	103m
도 체 직 경	8 cm	8 cm
도 체 재 료	NbTi Cu Al	
코 일 권 수	1,968	3,660
인 탁 탁 스	157,000H	157,000H
사 용 Al 량	8,000t	36,000t
액 체 He 량	1.25×10 ⁶ l	6×10 ⁶ l
총반경방향응력	1.15×10 ¹¹ N	5.32×10 ¹¹ N
총축방향응력	1.10×10 ¹¹ N	5.10×10 ¹¹ N
Nb-Ti 중 량	160t	710t

7 결론

초전도 에너지 저장의 전력계통에의 응용으로서 총방전시간이 긴 양수발전 규모의 전력저장용과 총방전시간이 짧고 용량은 적어도 되는 전력계통 안정용 및 무효전력 보상용을 들 수 있는데 이중 전력저장용은 높은 효율(90%이상), 우수한 속응성(수 m/sec), 대용량화의 용이성, 입지선정의 자유도가 큰 점등에서 명실 상부한 전력저장 장치로서 이것이 실용화되면 현행의 양수 발전에 대치 될 것이며 이의 실용화는 1900년대 후반으로 전망된다.

따라서 우리나라에서도 이의 연구 개발에 관심을 갖고 조기 적용의 기반을 구축함은 이장치의 매력적인 이점을 그만큼 조기 향유 할 수 있어 전력 수요자의 이익은 물론 국가적 이익면에서 그 의의는 크다고 본다.

참 고 문 헌

- 1) Kunzler, J. E.; Superconductivity in High Magnetic Fields at High Current Densities, Review of Modern Physics, 33, 4, p.501 (1961)
- 2) Kolm, H., Lax, B., Bitter, F. and Mills, R. (eds.) ; High Magnetic Field, John Wiley & Sons(1961)
- 3) 太刀川, 他; 17.5T超電導マグネット, 低温工学, 11, p.252 (1976)
- 4) Nagamine, K.; Pulsed μ SR Facility at KEK Booster, Hyperfine Interactions 8, p.787 (1981)
- 5) Koepke, K. et al.; Fermilab Doubler Magnet Design and Fabrication Techniques, IEEE Trans. MAG-15, p.658 (1979)
- 6) Shimamoto, S. et al.; Test Results and Perspectives of the Cluster Test Program, 7th Int. Conf. on Magnet Technology, Karlsruhe (April. 1981)
- 7) Schleich, A.; Superconductors for the Magnet Coils of the Omega Spark Chamber at CERN, Brown Boveri Boveri Review, 59, p.73 (1972)
- 8) Keilin, V. E. et al.; Some Problems of Forced-cooled Superconducting Magnet System, Proc. 5th ICFC, p.413 (Kyoto, 1974)
- 9) Annual Report on Research Development 1979 of the Institute für Technische Physik, KfK 2933 p.4. (May, 1980)
- 10) Gegalle, T. H. and Hulm, J.K.; Superconductors in Electric-Power Technology, Scientific American, p.138 (November, 1980)
- 11) Montgomery, D. B.; High Magnetic Field Research and Facilities, National Research Council, National Academy of Science (1979)
- 12) Hart, P. J.; Universal Tables for Magnetic Fields of Filamentary and Distributed Circular Currents, American Elsevier Publishing Company, New York(1967)
- 13) Boom, R. W. et al.; Superconducting Solenoids. Proc. IRE, 50, p.274 (March, 1962)

- 14) Trowbridge, C. W. ; Progress in Magnet Design by Computer, Proc. 4th Int. Conf. on Magnet Technology, p.555 (1972)
- 15) 電氣学会：電氣工学ハンドブック, p.72 (1978)
- 16) 林：多層円筒形空心コイルに作用する電磁力の計算式およびこれの電力用リアクトルへの適用, 電氣学会雑誌, 81, p.1456 (1961)
- 17) Boom, R. W. et al. ; Wisconsin Superconductive Energy Storage Project, 1, p. III-6, NSF-RA-N-74-065 (1974)
- 18) Yamada, T. and Iwamoto, M. : Aspect of Structural Designs of Large Superconducting Energy Storage, Proc. Int. Symp. Superconductive Energy Storage, Proc. Int. Symp. on Superconductive Energy Storage, Osaka (1979)
- 19) 安河内：BEBC超電導マグネットの故障, 低温工学, 9, p.265 (1974)
- 20) Tollstrup, A. V. : Progress Report-Fermilab Energy Doubler, IEEE Trans. MAG-15, p.647 (1979)
- 21) Green, M. A. : Large Superconducting Detector Magnets with Ultra Thin Coils for Use in High Energy Accelerators and Storage Rings, 6th Int. Conf. on Magnet Technology, Bratislava, Czechoslovakia August 29, 1977.
- 22) 小山, 小笠原, 安河内：超電導マグネットのエネルギーと電流密度, 低温工学, 14, p.184 (1979)
- Purcell, J. R. : Experience with Quench Protection of Multi-megajoule Superconducting Coils. Int. Symp. on Superconductive Energy Storage, p.216, Osaka (1979)
- 24) Wang, S. T. and Kim, S. H. : Argonne National Laboratory Superconducting Pulsed Coil Program, Proc. Int. Symp. Superconductive Energy Storage, p.90, Osaka (1979)
- 25) Masuda, M. and Shintomi, T. : Superconducting Magnetic Energy Storage, Cryogenics, 17, p.607 (1977)
- 26) International Seminar on Superconductive Magnetic Levitated Train, Miyazaki, Japan, Nov.9-10, 1978
- 27) Toscano, W. M. and Kudirka, F. J. : Thermodynamic and Mechanical Design of the FNAL Central Helium liquefier, Advances in Cryogenics, 23, p.456 (Boulder, 1977)
- 28) 岩木：超電導発電機の開発の現況について, 低温工学, 16, p.69 (1981)
- 29) Storobridge, T. R. : Refrigeration for Superconducting and Cryogenic System IEEE Trans, Nuclear Science, NS-16 (1969)
- 30) 田中：ヘリウムの利用とその需要, 高圧ガス, 16, p.59 (1979)