

# 초전도에너지 저장장치의 운전주기에 따른 최적교류손실 결정에 관한 연구

## Optimum AC losses Determination for Duty Cycle of Superconductive Magnetic Energy Storage

黃 錫 永\*  
(Seuk-Yong Hwang)

### 요 약

초전도 에너지 저장 장치(SMES)에서 그 근간이 되는 초전도 선재의 최적화는 경제성을 더욱 향상시킬 수 있다. 초전도 선재는 그것에 흐르는 전류가 직류이고 또 선재에 가해지는 외부자계가 시간적으로 변하지 않는 경우 이외는 교류손실이 생기며 그 크기는 자계나 전류의 변화 속도에 따라 달라진다.

교류손실을 줄이려면 초전도체의 굵기를 극히 가늘게 한 많은 filament(0.2-200 $\mu$ m)를 모체(matrix)속에 꼬아(twist)넣어 만든 소직경(0.5-5mm)의 복합선을 다수 연합하여 소요 전류용량의 초전도선이 되도록 하며 이렇게 함에는 그 만큼 제작비가 증가한다.

본 논문에서는 SMES에 있어서 운전주기에 따라 달라지는 초전도 선재의 교류손실(운전주기가 짧을수록 교류 손실이 커짐)에 의한 전력비와 교류손실 저감을 위한 제작비 관계에서 SMES의 운전주기와 관련한 SMES용 초전도 선재의 최적화 기법을, 제시하며 사례연구를 통하여 본 기법이 초전도 선재의 설계에 유용하게 쓰일 수 있음을 보인다.

사례연구 결과 본 기법은 운전주기가 짧아 교류손실이 큰 전력계통 안정화용 SMES의 초전도 선재 설계에만 효과적으로 이용될 수 있음을 확인하였다.

**Abstract-** Superconductor is consolidated, for required current capacity, with proper numbers of basic strands which are multifilamentary composites.

Although superconductors are perfectly loss-free under DC conditions of current and field, AC losses occur under time-varying condition of the current and field. The AC losses are a controllable inherent characteristics of superconductors. The AC losses dependent on the changing rate of current and field can be reduced by reducing the filament diameter. On the other hand, finer filament results in manufacturing cost increase.

Therefore, in this paper optimization technique of superconductor for SMES is proposed from the viewpoint of AC loss reduction and manufacturing cost increase. The case study shows that the technique can be effectively used for the design of superconductor for SMES, appreciating the influence of various parameters related to superconductor itself and operating condition of SMES.

As a result of the case study, it is confirmed that the technique is more effective for the design of superconductor for SMES for electric power system stabilization rather than SMES for energy storage.

## 1. 서 론

초전도 현상은 1911년에 Kamerlingh Onnes에 의해 발견[1]되었으나 이에 대한 주요 이론적 연구는 1957년에 제1종 초전도체에 관한 미시론적 해석 이론인 BCS이론이 발표되고[2], 또 Abrikosov가 실용성이 높은 제2종 초전도체의 존재를 이론적으로 제시한[3]후 부터이며 1961년에 Kunzler등이 제2종 초전도체의 일종인 Nb<sub>3</sub>Sn 으로 88[KG]의 강자계를 실현한 것을[4, 5]계기로 초전도에 관한 연구가 활기를 띠기 시작하였다.

최근에는 Bednorz등이 1986년에 Ceramic의 일종인 Perovskite에 속하는 물질(Ba-La-Cu-O계)에서 30[K] 정도의 높은 임계온도를 가지는 초전도성이 있음을 발표한 [6] 1년후 Chu등이 Perovskite의 성분 및 조성을 변경하여 100[K] 정도 되는 초전재료(Y-Ba-Cu-O)를 만들어 냄으로서 [7]초전도체의 고온화와 그 응용에 관한 연구의 열기가 크게 일고있다. 초전도체는 일반 상도체에 비하여 무저항 특성과 상도체의 수백배나 되는 높은 전류밀도 특성이 있으므로 발전기, 변압기, 송전선로 등의 고효율화, 고밀도화, 대용량화를 가능하게 하고 또 MHD 발전, 핵융합로의 플라즈마 격납, 자기부상열차, 에너지 저장장치(자기에너지형식으로)등과 같이 강자계를 이용하는 분야에 최적이다. 그리고 초전도체간의 극히 좁은 간격이나 약한 연결부분(weak link)에서 생기는 양자현상의 일종인 접합(junction) 효과는 초전도 측정기(SQUID), 초전도 전자소자(high speed Josephson electronics)등으로서의 응용도 크게 주목되어 초전도는 장차 전기의 이상적 이용에 대한 인류의 욕구를 충족시킬 것이 분명해지고 있다.[8~12]

초전도의 이러한 응용중 본 논문에서 다루고자 하는 에너지 저장 장치(superconducting energy storage: 이하 SMES라 함)는 1969년에 최초로 전력계통용으로서 SMES의 개념이 제시된 후[13] 미국[14~19]과 일본[20~23]에서 주로 많이 연구되어 왔으며 우리나라에서는 1984년 부터 연구가 시작되었다.[24]

양수발전 규모(5000MWH급)의 SMES에 대한 연구는 당초 개념설계 및 투자비 추정에서 출발하여 효과적인 운용방식과 더불어 신뢰성(보호 포함), 보수성, 시공성이 경제적으로 실현되도록 초

전도 코일 구조를 중심으로 SMES의 관련 각 부분의 재료 개발과 설계개선이 계속 연구되어 현재도 한계 건설비(break even capital cost)이하의 투자로 건설이 가능한 것으로, 즉 경제성이 있는 것으로 평가되고 있으며 전력 계통에의 실용은 2000년대 초엽으로 전망하고 있다. [14~16], [18~21][23]

이러한 SMES에 있어서 그 근간이 되는 초전도체의 최적화는 경제성을 더욱 향상시킬 수 있다. 초전도체는 그것이 흐르는 전류나 외부자계가 시간적으로 변하지 않는 경우 이외는 교류손실이 생긴다. [12] [25~29] 초전도체에서 생기는 교류손실의 적정여부는 교류손실을 초전도체가 요구하는 소요온도(극저온)를 유지하기 위한 냉각장치의 입력전력으로 환산 즉, 상온 환산한 값이 상도체(동선 등)의 손실보다 큰가 적은가 하는 손실비 개념으로 현재 취급되고 있으며 상용주파수의 교류용 초전도 선재의 개발단계에 이를 이용하고 있다. [30] [31]

초전도체의 교류손실을 줄이려면 초전도체의 굵기를 극히 가늘게 한 많은 필라멘트(2-200 $\mu$ m)를 모재(matrix)속에 꼬아(twist)넣어 만든 소직경(0.5-5mm)의 복합선(basic strand)를 다수 연합하여 소요전류 용량의 초전도선이 되도록 하며 이렇게 함에는 그만큼 제작비가 증가하게 된다.

따라서 초전도체의 교류손실 저감효과에는 제작비 증가라는 부담을 수반하며, 또 교류손실은 자계의 변화속도에 따라 달라지므로 본 논문에서는 SMES에 있어서 운전주기에 따라 달라지는 초전도체의 교류손실(운전주기가 짧을수록 교류손실이 커짐)에 의한 전력비와 교류손실 저감을 위한 초전도체의 제작비 관계에서 SMES의 운전주기와 관련한 SMES용 초전도체의 최적화기법을 제시하며 사례연구를 통하여 본 기법이 초전도 선재의 설계에 유용하게 쓰일 수 있음을 보인다.

## 2. SMES와 초전도체의 관련이론

SMES는 초전도체를 코일로 말아서 코일에 자기에너지 형태로 에너지를 저장하므로 SMES와 초전도체의 관련이론 및 특성을 살펴 보기로 한다.

### 2.1 SMES의 운용과 관련특성

SMES는 그림 2.1과 같이 초전도 코일의 저장에너지를 이용하기 위하여 전력계통과 초전도 코일

\*正 會 員 : 權國大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1990年 3月 7日

1次修正 : 1990年 6月 22日

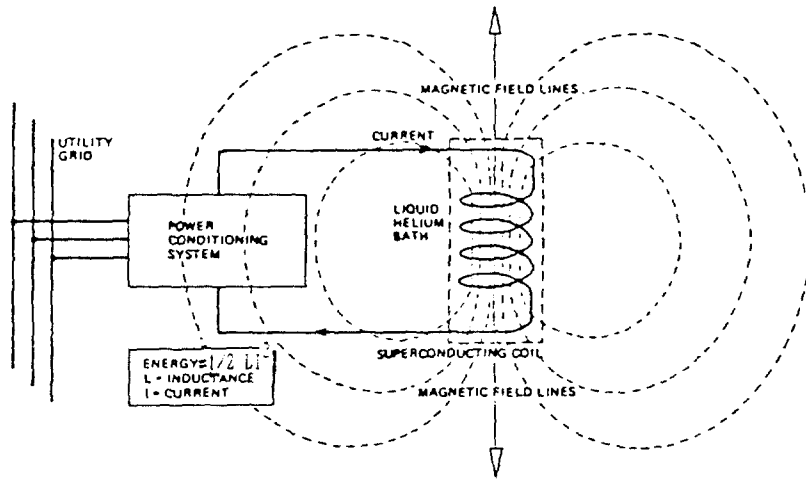


그림 2.1 SMES의 구성 개요도  
Fig. 2.1 Schematic diagram of SMES system

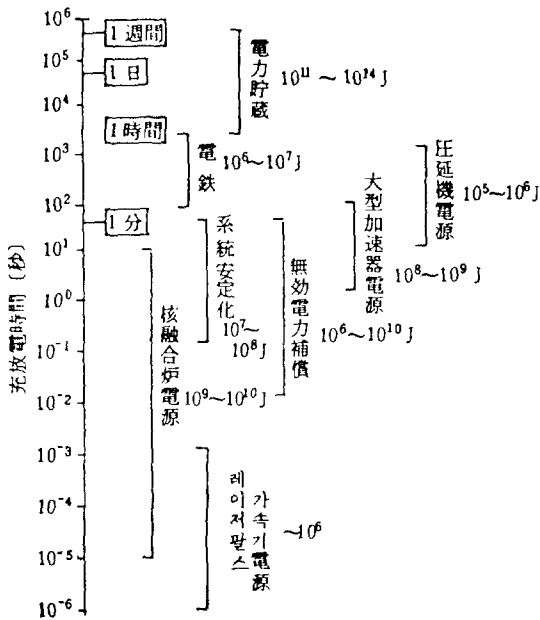


그림 2.2 SMES의 충전방전 시간과 에너지 저장 용량  
Fig. 2.2 Energy storage capacity and charging/discharging time for various SMES

간에는 전력변환 장치를 두어 저장에너지를 직접 변환하므로 에너지의 간접 변환형식인 양수 발전에 비하여 효율이 높고(90%이상), 제어의 속응성이 우수하다. [17~21]

초전도에너지 저장장치의 운전주기에 따른 최적교류손실 결정에 관한 연구

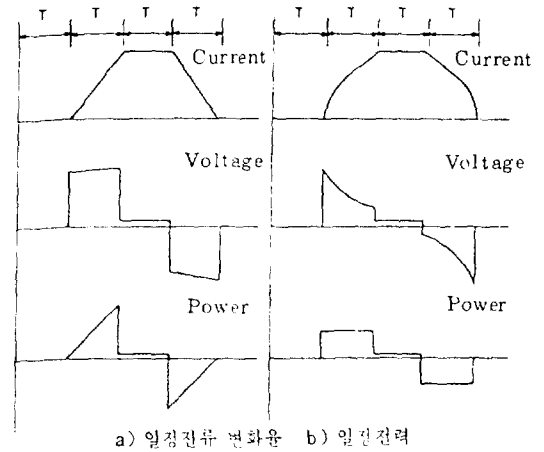


그림 2.3 SMES의 충전방전 방식에 따른 전류, 전압, 전력 변화  
Fig. 2.3 Pattern of current, voltage and power by operating method of SMES

초전도 코일의 저장에너지  $E$ 와 입출력  $P$ 는 다음 식과 같다.

$$E = 1/2 \cdot L \cdot I^2 \tag{2.1}$$

$$P = L \cdot dI/dt \cdot I \tag{2.2}$$

여기서  $L$ : 초전도 코일의 인덕턴스

$I$ : 초전도 코일의 전류

초전도 코일의 입출력  $P$ 는 전력 변환기(반도체 스위칭 소자로 구성)의 점호자 제어에 의하여 식

(2.2)의  $dI/dt$ 를 조정해서 행한다.

전류 변화율  $dI/dt$ 가 빠르나 느리냐에 따라 즉, 충방전 시간의 장단에 따라 교류손실이 달라진다. SMES의 충방전 시간과 에너지 저장용량에서 용도를 보면 그림 2.2와 같다.

양수 발전에 대응하는 대규모 에너지 저장용 SMES는 일일 내지 주간의 전력 조정이므로 충방전 시간이 긴 대신에 저장용량은 큰데 대하여 전력계통 안정용 SMES는 순시 동작용이므로 충방전 시간이 짧은 대신에 저장 용량이 적어지는 경향을 보이고 있다.

SMES의 충방전 방식을 일정 전력 방식과 일정 전류변화율 방식으로 할때 초전도 코일의 전류, 전력 변화는 그림 2.3와 같다.

SMES를 이와같이 운용할 때 초전도 선재에 생기는 교류손실에 관계하는 자계는 초전도 코일의 전류가 만듦으로 충방전 방식에 따라 변하는 전류 변화 형태와 같은 변화를 하며 그 주기는 충방전 시간의 합과 같다.

SMES의 교류손실은 자계의 세기와 변화주기에 따라 달라지는데 충방전 시간이 긴 SMES는 직류 마그네트에 준하고 짧은 것은 펄스 또는 교류 마그네트이다. 후자는 전자보다 자계의 변화율이 커서 교류손실이 많으므로 그것에 사용할 초전도 선재에 대해서는 제작비와 교류손실 관련비용에서 최적화가 요구된다.

### 2.2 초전도체의 특성 관련이론

초전도체는 그림 2.4와 같이 전류밀도  $J_c[A/m^2]$ , 자속밀도  $B[T]$ , 온도  $\theta[K]$ 에 대하여 자재료마다 초전도성을 유지하기 위한 범위가 있고 그 범위를 벗어나면 초전도성을 잃게 된다.

초전도체는 선재가 짧은 시편일 경우는 그림 2.4와 같은 성능을 나타내나 긴 길이로 해서 사용할 경우 그 성능이 그림 2.5에서 보는 바와 같이 저하(degradation)함[28]이 발견되었다.

부하운전시 그림 2.5에서 부하선  $L$ 와 선재의  $I-B$  특성곡선과의 교점  $CL$ 까지 운전되어야 하나 부하선상의 점  $Q$ 에서 켄치가 발생하여 그 이상은 사용할 수 없는 성능저하를 보인다. 이러한 성능저하는 초전도체의 자체특성에 관계되는 선재의 안정도 문제이다. 또 시간적으로 변화하는 자계에서 생기는 교류손실도 초전도체의 자체특성이다.

이와같이 초전도체의 자체특성인 초전도체의 안정도와 교류손실에 영향을 주는 제 정수의 관계를 보면 다음과 같다.

가. 초전도체의 안정도

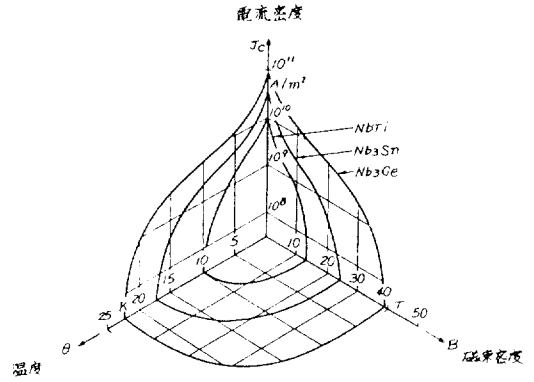


그림 2.4 초전재료의 초전도성을 유지하는 전류, 자계, 온도 범위

Fig. 2.4 Critical surface of superconducting materials

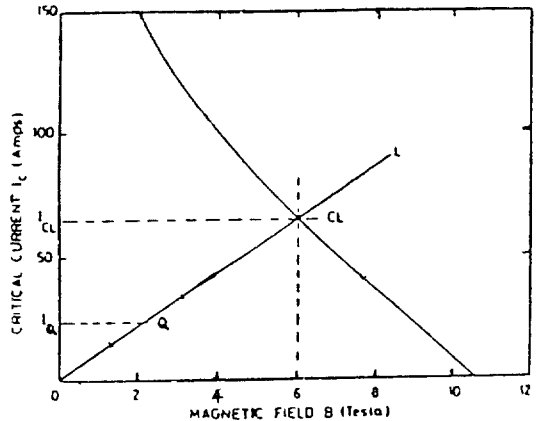


그림 2.5 초전도 선재의 성능저하 관계(0.3mmφ NbTi)

Fig. 2.5 Performance degradation of superconductor

초전도체는 자계의 침투를 방해하는 차폐전류에 의하여 내부 자계 분포가 정해진다. 어떤 원인으로 미소열량이 들어오면 초전도체의 온도가 상승하고 이로 인해 그림 2.2에서 보는 바와같이 임계전류가 감소한다. 자계의 침투를 차폐하던 조금전의 임계전류가 급속히 감소함에 따라 초전도체의 자체침투가 증가하면서 내부자계가 재분포하는 과정에 초전도체내에는 자속변화에 의하여 차폐전류를 증가시키는 방향의 전계가 유기된다. 이 전계와 차폐전류는 전력을 형성하여 발열한다.

이러한 자체발열은 외부침입 미소열에 대하여 초전도체의 실효 열용량을 감소시키는 결과가 되어 실효 열용량을 0으로 하는 자체 발열조건인 경우는 미소열량 침입시 초전도체의 온도상승은 급격히 증가하여 불안정하게 된다. 이와같이 온도상승에 의하여 초전도체 내부의 자계 재분포가 급격히 진행되면서 생기는 flux jump 불안정은 외부자계나 또는 자신의 통과 전류에 의해 생기는 자기 자계(self field)가 flux jump를 일으키는 flux jump 자계  $H_f$ 보다 클때 생긴다. [12][27][32]

극세 다심 복합 초전도체의 flux jump 불안정에 대한 안정화 이론은 flux jump에 의한 내부 발열을 포함한 온도 상승 계산에 있어서 단열(adiabatic)적으로 취급하는 단열 안정화 이론과 그리고 초전도체의 열전도도  $K_{sc}$ 와 모재(matrix)의 열확산을 고려하는 동적안정화 이론이 있다. 후자에서는 열전도 및 열확산만을 고려하므로 후자에 의한 안정 조건은 전자보다 엄격한 것이 된다.

극세 다심복합 초전도체에 대한 이러한 flux jump 안정화 이론은 flux jump에 의한 내부발열을 제한하는 것으로 다음 식과 같이 외부자계에 대해서 필라멘트의 직경을, 그리고 자기자계에 대해서는 복합도체의 직경을 제한하는 안정조건으로 표시한다. [12][18][27]

1) 필라멘트 직경  $d$ (외부자계)

· 단열 안정조건 :

$$d \leq \sqrt{10^9 f_i c_{sc} \Delta T_o / J_c} \quad (2.3)$$

· 동적 안정조건 :

$$d \leq \sqrt{8(k_{sc}/\rho_{st}) \Delta T_o(1-\lambda)/\lambda / J_c} \quad (2.4a)$$

$$\leq \sqrt{8(k_{sc}/\rho_{st}) \Delta T_o(1-\lambda) J_{av} / J_c} \quad (2.4b)$$

- 단  $d$  : 필라멘트 직경[cm]  
 $f_i$  : 모델에 따른 보정계수,  $2/\pi - 3/\pi$   
 $c_{sc}$  : 초전도체의 비열[J/cm<sup>3</sup>·K]  
 $\Delta T_o$  :  $J_c/(-dJ_c/dT)$ [K]  
 $J_c$  : 임계 전류 밀도[A/cm<sup>2</sup>]  
 $\rho_{st}$  : 모재(matrix)의 비저항[ $\Omega$  cm]  
 $\lambda$  : 초전도체의 체적 점유비  
 $J_{av} = \lambda \cdot J_c$  : 평균 전류 밀도[A/cm<sup>2</sup>]

2) 복합도체(strand)의 직경  $D$ (자기자계)

$$D \leq \sqrt{10^9 f_i c_{sc} \Delta T_o / \lambda J_c} \quad (2.5)$$

식(2.3)-(2.5)는 극세 다심 복합 초전도체가 flux jump에 대해 안정하기 위한 필라멘트와 복합선의 직경의 상한치가 있고 또 그것은 선재의 재료 정수의 개선에 의하여 제어할 수 있음을 보인

다.

극세 다심 복합 도체의 경우 안정화 재료로 쓰는 모재(matrix)속에 박혀 있는 다수의 필라멘트를 트위스트(twist)하지 않으면 그림 2.6과 같이 모재를 통하여 필라멘트 간에 회로를 구성 즉 전자적 결합을 하므로 필라멘트의 실효 직경을 증가시켜 안정도를 저해할 뿐만 아니라 교류 손실의 주요 부분인 결합 손실(와전류손)을 증가 시킨다.

그림 2.6에서 외부자계가  $z$ 축 방향으로 작용할 때  $x=0$  되는 단면에서 초전도체에 흐르는 전 결합전류의 합이 초전도체의 임계전류와 같게 되는 길이  $l_c$ 를 임계 길이이라 하며 이것은 다음식과 같이 표시된다. [27]

$$l_c^2 = \frac{2 \times 10^9 \rho_s J_c \lambda^{1/2} \cdot d \cdot w}{H} \quad (2.6)$$

단  $H$  : 자계 변화율[Oe/sec]

$\rho_s$  : 모재의 횡단 저항률[ $\Omega$ cm]

$w$  : 필라멘트간의 거리[cm]

임계길이  $l_c$ 는 필라멘트의 직경  $d$ 가 적을수록 또 자계의 변화율이 클수록 짧게 된다. 극세 다심 복합선의 필라멘트의 트위스트 피치를  $L_p$ 라 하면 그림 2.6과 식 (2.6)에서  $L_p=1/4l_c$ 를  $l_c$ 보다 적게 해야 필라멘트간의 결합을 줄일 수 있다.

$l_p/l_c \leq 0.2$  즉,  $L_p \leq l_c$ 의 경우 결합 손실이 약 90% 감소할 정도로 결합이 제거되고 또 안정측면에서 필라멘트의 실효 직경이  $d[1+(l_p/l_c)^2]$ 를 초과하지 않지만 트위스트 피치를 크게 하면 증가하

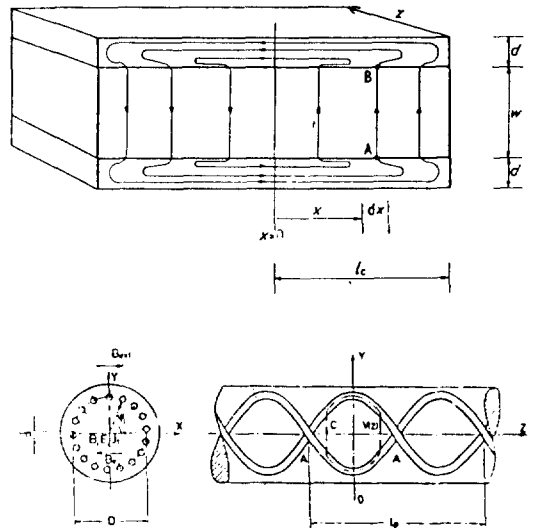


그림 2.6 임계길이와 트위스트 피치  $L_p$   
 Fig. 2.6 Critical length  $l_c$  and twist pitch  $L_p$

는 결과가 되므로 트위스트 핏치를 적게할 필요가 있다. 그러나 트위스트 핏치를 적게하는 것은 제작상의 문제가 있으므로 보통  $L_p/D=5-10$ 이 되는 핏치를 취한다. [27]

나. 초전도체의 교류 손실

초전도 선재는 flux jump 불안정에 대하여 안정화 하기 위하여 식 (2.3)-(2.5)에서 보는 바와 같이 필라멘트와 복합선(strand)의 직경을 상한치 이하로 하면서 안정화재로 쓰는 모재(matrix)속에 필라멘트를 식 (2.6)으로 정해지는 임계길이와 관련한 트위스트 핏치로 꼬아 넣은 극세 다심 복합선으로 한다.

극세 다심 복합선으로 하여 사용하는 통상의 초전도 선재는 변동하는 자계에 대하여 복합선을 이루는 초전도 재료(필라멘트)자체의 고유 손실인 히스테리시스 손실 이외에 필라멘트간이 모재를 통하여 전자적 결합을 함에 따른 결합 손실을 가진다. 초전도 선재의 교류손실은 히스테리시스 손실과 결합 손실이 주가 되며 이외에 선재의 외피(sheath)에서 생기는 통상의 와전류 손실도 고려된다.

초전도 선재의 이러한 교류손실중에서 선재의 외피에 생기는 통상의 와전류손실은 상도체 선재에도 고려되는 공통적인 손실이나, 히스테리시스 손실과 결합손실은 다같이 초전재료의 특성이 개재된 손실이므로 이 두 손실의 합은 초전도선재에 특유한 교류손실이다.

초전도 선재의 안정화 이론에서는 미소외부침입 열량에 의한 선재의 온도변화에 기인한 선재의 내부자계의 재분포 즉 온도변화에 기인한 자계변화에 의한 손실이 온도상승을 더욱 초래하느냐 않느냐에 따라 안정판정을 행하는 것에 반하여 교류손실은 온도변화가 없는 조건에서 외부인가자계나 또는 선재의 통과전류의 시간적변화(정상상태)에 기인한 자계변화에 의한 손실로서 일종의 정상손실이다.

결합 손실은 그림 2.6에서 보는 바와 같이 다수의 필라멘트가 안정화재를 매개하여 임의로 조합되는 루프에는 교번자계의 변화에 응하여 유도전류가 생기고 그 유도전류가 통하는 안정화재에서 생기는 저항손에 의한 것이다. 이 손실은 모재(matrix)를 절연재로 하면 없앨 수 있으나 flux jump 안정화를 위해서 열전도도가 높고 또 전류의 분류가 용이한 저저항의 동을 모재로 쓰기 때문에 불가피하므로 이를 줄이기 위한 선재 설계를 행해서 해결한다.

히스테리시스 손실은 초전재료인 필라멘트에서

생기는 손실이다. 초전재료의 자계차폐 특징은 차폐전류의 밀도를 그림 2.4에서 정해지는 임계전류 밀도로 취하고 또 차폐전류는 자계변화에 대하여 항상 표면에서부터 대응하여 흐르기 시작하며 또 자계의 침투깊이는 인가자계의 크기와 초전재료의 형상, 치수에 관계된다. 초전재료의 히스테리시스 손실은 자계변화가 생기는 표면과 침투깊이까지 부분에서 자계변화에 기인한 전계와 차폐전류가 만드는 전력에 의한 것이므로 일반 자기재료의 히스테리시스 손실과 달리 형상, 치수에 관계되는 특성이 있다. [25][26]

복합초전도선의 교류손실은 자계의 크기, 인가 방향, 변화주파수에 따라 다르며 그 계산은 매우 복잡하고 어려워 많은 근사와 가정을 해서 행하므로 정확도는 실측치와 비교할 때 20-50%범위이며 이 오차에는 재료정수의 불확실성도 개재한다. [25]

이와같은 복합초전도선의 교류손실에 대하여 본 논문에서 다루고자 하는 SMES용의 복합초전도선의 교류손실식은 다음과 같다.

전력 계통용 SMES는 그림 2.3의 충방전 시간에서 자계 변화 주파수를 보면 충방전 시간이 짧은 전력 계통 안정용은 0.01-10[Hz]의 범위이고, 충방전 시간이 긴 전력저장용은  $10^{-6}-10^{-3}$ [Hz]의 범위이다. 또 선재에 작용하는 자계는 SMES용 초전도 코일이 대부분 솔레노이드형이므로 선재의 축과 주로 직각 방향이며 그 크기는 에너지 저장 장치인 점에서 보통 2-5[T]의 범위를 취하므로 필라멘트의 완전 침투 자계  $H_{fp}$ 에 비하여 상당히 크다.

따라서 이러한 SMES용 극세 다심 복합 초전도선의 교류손실은 저주파수 영역에 속하면서 필라멘트의 침투자계보다 큰 자계가 가해진 경우의 교류손실로서 저교류손실의 극세 다심 복합 초전도 선재의 설계에 이용되는 다음식 [12]으로 표시된다.

1) 히스테리시스 손실전력  $\dot{Q}_h$  (외부자계,  $H_m > H_{fp}$ )

$$\frac{\dot{Q}_h}{V} \cong \left( \frac{8}{3\pi \times 10^8} \right) \cdot \lambda \cdot d \cdot J_c \cdot H_m \cdot f [w/cm^3] \tag{2.7}$$

- 단,  $V$  : 복합 선재의 체적[ $cm^3$ ]
- $H_m$  : 교번자계의 최대치[Oe]
- $f$  : 교번자계의 주파수[cycle/sec]
- $H_{fp}=0.4d J_c$ [Oe]

2) 결합 손실 전력  $\dot{Q}_e$

$$\frac{\dot{Q}_e}{V} \cong \left( \frac{1}{2 \times 10^6} \right) \left( \frac{L_p^2}{\rho_c} \right) H_m^2 f^2 [W/cm^2] \quad (2.8)$$

3) 자기 자체 히스테리시스 손실 전력  $Q_{hs}$

$$\frac{\dot{Q}_{hs}}{V} = \eta_{sf} \cdot \left( \frac{5\pi}{10^{10}} \right) (\lambda_c D)^2 \cdot f [W/cm^2] \quad (2.9)$$

단  $\eta_{sf}$  : 0.05-0.29, 단위 (per unit) 전류와 전류의 변화 모양에 따른 계수로서 교류의 경우 0.29, 한방향에서 변하는 전류 ( $0 \Rightarrow \max \Rightarrow 0$ )의 경우 0.05

5) 적용 주파수  $f$

$$f \ll f_{c1} = \frac{10^9 \rho_c}{L_p^2} [Hz] \quad (2.10)$$

단  $f_{c1}$  : 차폐 관련 특성 주파수

식 (2.7)-(2.9)은 히스테리시스 손실 전력이 주파수에, 결합손실 전력은 주파수 자승에 비례하고 또 싸이클당 히스테리시스 손실전력량은 주파수에 무관하고, 결합손실 전력량은 주파수에 비례함을 나타낸다.

저주파수 영역 ( $f < f_{c1}$ )에서는 교류손실을 위와 같이 분리 표시할 수 있으나 주파수가 높게 되면 ( $f > f_{c1}$ ) 결합이 강해져서 각 손실 성분은 서로 간섭을 하게 되어 손실의 분리 표시는 쉽지 않을 뿐

만 아니라 그 의미가 적다. 그림 2.7은 이를 잘 나타내고 있다.

그림 2.7은 복합 초전도 선재가 외부 자계의 변화에 의해서 생기는 싸이클 당 합성 손실 에너지의 주파수 특성이다.  $f < f_{c1}$ 되는 영역의 손실 에너지는 주파수와 무관한 것과 비례하는 것으로 분리가 용이하나,  $f > f_{c1}$ 되는 영역의 것은 그렇지 않음을 보여준다. 또 주파수  $f$ 가  $f_{c1}$ 일 때 싸이클 당 합성 교류손실 에너지는 최대치로 되는데 그림 2.7b는 식 (2.10)에서와 같이  $f_{c1}$ 이 트위스트 핏치  $L_p$ 에 의해 변함에 따라 최대치가 이동함을 보인다.

### 3. SMES용 초전도 선재의 최적화 이론

초전도 선재는 2절에서 본 바와 같이 자체 고유성질인 flux jump 불안정과 교류손실 발생에 대하여 안정하고 또 교류손실이 적정한 값이 되도록 설계한다.

안정측면에서 볼 때 식 (2.3) ~ (2.5)에서와 같이 초전도 선재는 극세다심 복합선으로 하여 필라멘트와 복합선의 직경의 크기가 안정상한치를 초과하지 않도록 하여야 한다.

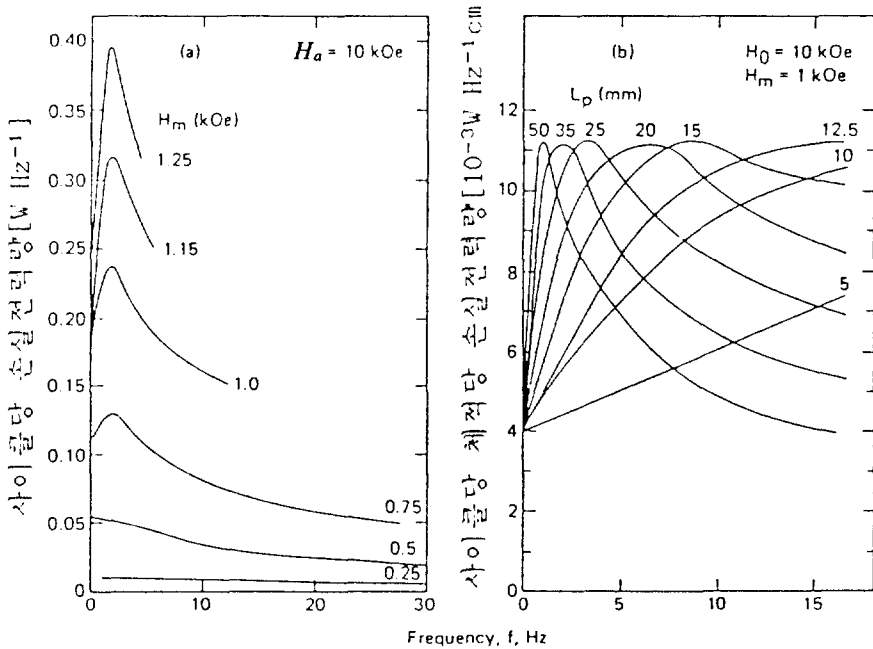


그림 2.7 싸이클 당 손실에너지의 주파수 특성

Fig. 2.7 Frequency characteristics of energy loss per cycle in case of applied field  $H_a = H_a + H_m \sin \omega t$

SMES용 초전도선은 이와같은 극세사심 복합선을 기본선(basic strand)으로 하여 소요전류용량에 필요한 수 만큼의 기본선들을 그림 3.1과 같이 전위시키면서 점적율(packing factor)이 좋게 연합하여 만든다.

논문에서는 SMES용 초전도선재의 기본선에 대하여 운전비(running cost)를 초래하는 교류손실과 교류손실 저감을 위한 기본선의 제작비 관계에서 그것의 최적화이론을 제시한다.

본 최적화이론에서는 식(2.7)-(2.9)의 교류손실식에서 기본선의 필라멘트의 직경  $d$ 의 감소에 따른 교류손실의 상온환산 전력비와 필라멘트의 직경  $d$ 의 감소를 위한 제작비 및 재료비 즉 기본선의 투자비에 대한 이자및 감가상각비의 합을 최소로 하는 필라멘트의 직경을 다음과 같이 구한다.

식(2.7)-(2.9)의 교류손실 전력을 한 운전주기당 전력량[KwH/cycle]로 표시하면 다음식과 같이 각 손실전력량은 모두 필라멘트의 직경  $d$ 로 표시된다. 한 운전주기는 그림 2.4에서 충전시간, 저장시간, 방전시간의 합이나 전류의 변화 즉 자계의 변화가 없는 저장시간동안에는 교류손실이 안생기므로 여기서는 한 운전주기  $T$ 를 전류의 변

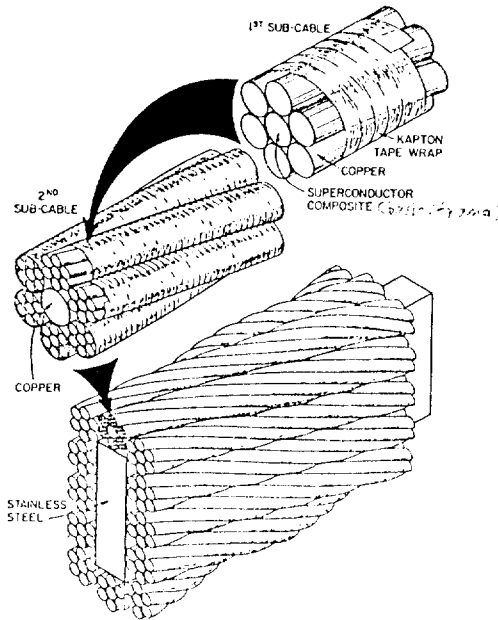


그림 3.1 대전류 용량을 위한 기본선의 축차연선 방식  
 Fig. 3.1 High current of superconducting wire by subcable technique from basic strand

화 즉 교류손실이 생기는 충전시간과 방전시간의 합을 취한다.

또 위식의 교류손실 전력은 자계의 최대치가  $H_m$ 인 교번자계에 대한 식이므로 이를 SMES에 적용 시는 자계변화가 그림 2.4의 전류변화 모양과 같은 점에서 근사적으로 SMES의  $H_m$ 값의 절반을 위식에서 대입하는 것으로 한다.

1) 1주기당 히스테리시스 손실 전력량  $Q_h$ (외부자계)

$$\frac{Q_h}{V} = \frac{\dot{Q}_h}{fV} \cong \left(\frac{8}{6\pi \times 10^8}\right) \lambda J_c H_m d [W \cdot \text{sec} / \text{cm}^3 \cdot \text{cycle}] \quad (3.1a)$$

$$\cong \left(\frac{1}{3.6 \times 10^6}\right) \left(\frac{8}{6\pi \times 10^8}\right) \lambda J_c H_m d [KwH / \text{cm}^3 \cdot \text{cycle}] \quad (3.1b)$$

$$\cong K_h \lambda T_c H_m d [KwH / \text{cm}^3 \cdot \text{cycle}] \quad (3.1c)$$

단  $K_h = \left(\frac{1}{3.6 \times 10^6}\right) \left(\frac{8}{6\pi \times 10^8}\right)$

2) 1주기당 결합손실 전력량  $Q_e$

$$\frac{Q_e}{V} = \frac{\dot{Q}_e}{f \cdot V} \cong \left(\frac{1}{2.4\pi \times 10^8}\right) K_c^2 \sqrt{\lambda} J_c H_m d [w \cdot \text{sec} / \text{cm}^3 \text{cycle}] \quad (3.2a)$$

$$\cong \left(\frac{1}{3.6 \times 10^6}\right) \left(\frac{1}{2.4\pi \times 10^8}\right) K_c^2 \sqrt{\lambda} J_c H_m d [KwH / \text{cm}^3 \text{cycle}] \quad (3.2b)$$

$$\cong K_e K_c^2 \sqrt{\lambda} J_c H_m d [KwH / \text{cm}^3 \text{cycle}] \quad (3.2c)$$

단  $K_c = \frac{L_p}{l_c}$

$$K_e = \left(\frac{1}{3.6 \times 10^6}\right) \left(\frac{1}{2.4\pi \times 10^8}\right) = \frac{1}{3.2} K_h$$

식(3.2)는 트위스트 핏치  $L_p$ 를 보통 식(2.6)의 임계길이  $l_c$ 와 같게 취하나 이를 일반화하여 식(2.8)의  $L_p$ 대신에 식(2.6)의  $l_c$ 의  $K_c$ 배를 대입하고 또  $l_c$ 에 표시된  $\dot{H}$ 는 SMES의 경우  $0.6(2\pi f H_m/2)$ 가 되므로 이를 고려하여 필라멘트의 직경으로 환산한 식이다.

식(3.2)는  $L_p = K_c l_c$ 로 할때 1주기당 결합손실 전력량은 모재의 횡저항율  $\rho_s$ 의 값과 무관하고 대신에  $K_c^2$ 이 반영됨을 보인다.

3) 1주기당 자기자계 히스테리시스 손실전력량  $Q_{hs}$

$$\frac{Q_{hs}}{V} = \frac{\dot{Q}_{hs}}{f \cdot V} \cong 10^{-2} \left(\frac{k_c}{k_p}\right)^2 \frac{\rho_s J_c^3 \lambda^{\frac{5}{2}}}{H_m \cdot f} d [w \cdot \text{sec} / \text{cm}^3 \cdot \text{cycle}] \quad (3.3a)$$



$$\cong \left( \frac{1}{3.6 \times 10^6} 10^{-2} \left( \frac{k_c}{k_p} \right)^2 \frac{\rho_c J_c^3 \lambda^{\frac{5}{2}}}{H_m \cdot f} d \right) \quad [KwH/cm^2 \cdot cycle] \quad (3.3b)$$

$$\cong K_{hs} \left( \frac{k_c}{k_p} \right)^2 \frac{\rho_c J_c^3 \lambda^{\frac{5}{2}}}{H_m \cdot f} d \quad [KwH/cm^2 \cdot cycle] \quad (3.3c)$$

$$\text{단 } k_p = \frac{L_p}{D} = \frac{k_c \ell_c}{D} = 5 \sim 10 \quad (3.3d)$$

$$K_{hs} = \left( \frac{1}{3.0 \times 10^6} \right) 10^{-2} = \frac{3}{4} \pi \times 10^6 k_h \quad (3.3e)$$

식 (3.3)은 식 (3.3d)에서 기본선의 직경  $D$ 대신에  $k_c \ell_c / k_p$ 를 식 (2.9)에 대입하여 한 주기당 손실전력량을 필라멘트의 직경  $d$ 로 나타낸 것이다. 식 (2.9)의 계수  $\eta_{sf}$ 는 SMES의 자계변화가 그림 2.4의 진류변화와 같으므로 0.05를 취한 것이다.

기본선의 필라멘트의 직경  $d$ 와 수  $N$ 의 관계는 다음 식과 같다.

$$Nd^2 = \lambda D^2 \quad (3.4a)$$

$$= \lambda \left( \frac{L_p}{k_p} \right)^2 = \lambda \left( \frac{k_c}{k_t} \ell_c \right)^2 \quad (3.4b)$$

식 (3.4b)에 식 (2.6)의  $\ell_c$ 를 대입하면 다음식과 같이  $d$ 와  $N$ 의 곱은  $\rho_c, f, H_m, J_c, \lambda, K_p, k_c$ 에서 정해지는 값과 같게되는 관계를 가진다.

$$N \cdot d = \left( \frac{10^9}{3\pi} \right) \left( \frac{k_c}{k_p} \right)^2 \frac{\lambda^{\frac{3}{2}} \rho_c J_c}{H_m \cdot f} \quad (3.5)$$

식 (3.5)는  $D$ 를  $\ell_c$ 와 관련시킬 때 식 (3.5)의 우변이 같은 조건일 경우는 기본선의 필라멘트의 수  $N$ 는 직경  $d$ 에 반비례함을 보인다. 또 이 경우 기본선의 직경  $D$ 는 식 (3.4b)에서 다음식과 같다.

$$D = \frac{k_c}{k_p} \ell_c \cong \sqrt{\frac{10^9}{3\pi} \left( \frac{k_c}{k_p} \right)^2 \frac{\rho_c J_c d \sqrt{\lambda}}{H_m \cdot f}} \quad (3.6)$$

식 (3.6)은 기본선의 직경  $D$ 가 필라멘트의 직경  $d$ 의 제곱근의 비례함을 보인다. 즉 기본선의 직경  $D$ 는 일정한 것이 아니라 필라멘트의 직경에 따라 변한다.

기본선의 가격  $C$ 는 다음식과 같이 재료비  $C_R$ 과 제작비  $C_m$ 의 합인데 제작비는 필라멘트의 수  $N$ 의 함수이다.

$$C = C_R + C_m \quad [원/cm^2] \quad (3.7)$$

$$C_R = \lambda C_{R1} + (1 - \lambda) C_{R2} \quad [원/cm^2] \quad (3.8)$$

$$C_m = C_m(N) \quad [원/cm^2] \quad (3.9)$$

단  $C_{R1}$  : 초전재료의 재료비 [원/cm<sup>2</sup>]

$C_{R2}$  : 모재의 재료비 [원/cm<sup>2</sup>]

$\lambda$  : 초전재료의 체적 점유비

SMES용 초전도선의 기본선을 최적화하기 위하여 식 (3.1)-(3.3)의 교류손실에 의한 전력비와 세선화에 따른 식 (3.7)-(3.9)의 제작비의 관계에서 SMES의 전 수명기간 동안의 총비용을 최소화하는 필라멘트의 직경을 구하면 다음과 같다.

SMES의 전 수명기간 동안의 총비용  $R$ 을 현재가로 환산한 연간비용으로 표시하면 다음식과 같다.

$$R = (C_R + C_m(N))(r_i + r_a) + P \cdot U \cdot Q(d) / \eta \quad [원/cm^2] \quad (3.10)$$

단  $r_i$  : 기본선의 투자비(가격)에 대한 연이자율 [ $p, u$ ]

$r_a$  : 기본선의 투자비(가격)에 대한 연간 가상자율 [ $p, u$ ]

$Q(d)$  : 1주기의 전 교류손실전력량 [KWH/cm<sup>2</sup> cycle]

$P$  : 수명기간동안의 전력요금의 현재가 환산치 [원/KWH]

$U = K_y \cdot t_y / K_t \cdot T$  : 연간 SMES의 운용회수 [cycle]

$K_y$  : 연간 SMES의 이용률  
 $t_y = 365 \times 24 \times 3600$  : 1년의 초단위 표시량 [sec]

$K_t = T' / T$  : 전 주기(저장시간 포함)  $T'$ 의  $T$ 에 대한 배수

$T$  : 주기 [sec]  
 $\eta = 0.0005 \sim 0.0038$  : 냉각시스템의 총합 효율 [ $p, u$ ]

$Q(d) / \eta$  : 상온환산 1주기의 교류손실 전력량 [KWH/(cm<sup>2</sup> cycle)]

식(3.10)에서 총비용  $R$ 을 최소화하는 필라멘트의 직경  $d^*$ 를  $\partial R / \partial d = 0$ 에서 식(3.5)를 이용하여 구하면 다음식과 같다.

$$d^* = \sqrt{\frac{N \cdot d \cdot C'_m(N) \cdot (r_i + r_a)}{L'(d) \cdot \eta}} \quad (3.11)$$

단  $L'(d) = P \cdot U \cdot Q(d)$  :  $d$ 일때의 연간 손실 전력비(상온환산전)

$L'(d) = \frac{dL(d)}{dd}$  :  $d$ 에 대한  $L(d)$ 의 변화율

$C'_m(N) = \frac{dC_m(N)}{dN}$  :  $N$ 에 대한  $C_m(N)$ 의 변화율

$$N \cdot d = \frac{10^9}{3\pi} \left( \frac{K_c}{K_p} \right)^2 \frac{\lambda^3 \rho_c J_c}{H_m \cdot f} \quad (\text{식 3.5}) \quad \text{참조}$$

식(3.11)의  $L'(d)$ 는 식(3.1)-(3.3)에서 다음과 같다.

$$L'(d) = P \cdot U \left( K_n \lambda J_c H_m + K_{ev} \sqrt{\lambda} K_c^2 J_c H_m + K_{hs} \left( \frac{K_c}{K_p} \right)^2 \frac{\rho_c J_c^3 \lambda^{\frac{5}{2}}}{H_m \cdot f} \right) \quad (3.12a)$$

$$L'(d) \cdot d = L(d) \quad (3.12)$$

단  $f = 1/T$  [Hz]

$T$  : 운전주기 [sec]

식(3.11)을 써서 어떤 주어진 기본선의 필라멘트 직경  $d_n$ 을 조금씩 변화시켜 가면서 최적직경  $d^*$ 를 구한다고 할 때  $L'(d) \cdot d = L(d)$ 되는 관계에서 다음과 같은 반복식으로 표시된다.

$$d_{n+1} = \frac{N_n C'_n (N_n)(r_i + r_d) \eta}{L(d_n)} \cdot d_n \quad (3.13a)$$

$$= M(d_n) d_n \quad (3.13b)$$

단  $N_n, d_n$  : 주어진 기본선의 필라멘트 수, 직경

$L(d_n)$  : 주어진 기본선의 연간 손실 전력비 (상온환산전)

$M(d_n)$  :  $\frac{N_n C'_n (N_n)(r_i + r_d) \eta}{L(d_n)}$  : 판정계수

$N_n C'_m (N_n) = \Delta C_m (N_n)$  : 제작비 증가분

식(3.13)의 판정계수  $M(d_n)$ 의 크기를 1과 비교하여 현재의 필라멘트 직경  $d_n$ 의 적정여부를 다음과 같이 판정하여 필라멘트의 직경을 조정하면 더욱 현실성이 있을 것으로 본다.

$$\begin{aligned} M(d_n) > 1 & : \text{현 직경 } d_n \text{이 과소함} \\ M(d_n) = 1 & : \text{현 직경 } d_n \text{이 최적임} \\ M(d_n) < 1 & : \text{현 직경 } d_n \text{이 과대함} \end{aligned} \quad (3.14)$$

식(3.14)는 상온환산 연간 교류손실 전력비  $L(d_n)/\eta$ 가 제작비 증가에 따른 비용  $N_n C'_m (N_n)(r_i + r_d)$ 보다 적은가, 같은가, 큰가에 따라 현 직경  $d_n$ 의 적부를 판정하는 식이다. 이 식은 SMES의 전수명기간(40년)동안 장래 자연 에너지 자원의 고갈에 따라 예상되는 전력요금의 상승까지 고려하는 이점이 있다.

초전도 선재의 설계에는 전술과 같이 교류손실의 관점에서 행하는 최적화 설계와 fluxjump 불안정에 대한 안정화 설계가 있다. 후자가 전자보다 우선하므로 전자에서 구한 식(3.11)과 같은 필라멘트의 최적직경  $d^*$ 과 기본선의 직경  $D^*$ (식(3.6)

참조)을 식(2.3)-(2.5)의 안정설계기준에서 구한 필라멘트와 기본선의 직경의 상한치  $d_{max}, D_{max}$ 과 비교하여 필라멘트 및 기본선의 직경  $d$  및  $D$ 를 다음과 같이 취한다.

$$\begin{aligned} d^* < d_{max} & & d = d^* \\ D^* < D_{max} \text{의 조건일 때} & & D = D^* \end{aligned} \quad (3.15a)$$

$$\begin{aligned} d^* > d_{max} & & d = d_{max} \\ D^* > D_{max} \text{의 조건일 때} & & D = D_{max} m \end{aligned} \quad (3.15b)$$

#### 4. 사례연구

현재 실용되고 있는  $N_b T_i$  초전도선재(극세다심 복합선재)에 본 논문에서 제시한 최적화기법을 사례연구를 통하여 고찰하기로 한다.

교류손실관점에서 정해지는 필라멘트 및 기본선의 최적직경  $d^*$  및  $D^*$ 와 필라멘트의 수  $N^*$ 는 먼저 식(3.11)에서  $d^*$ 를 구하고 그것을 식(3.6), 식(3.5) 또는 식(3.4)에 대입하여  $D^*, N^*$ 를 얻는다. 또 안정화 관점에서 정해지는 필라멘트 및 기본선의 직경의 상한치  $d_{max}, D_{max}$ 는 식(2.3)-(2.5)에서 구한다. 이렇게 구한  $d^*, D^*, d_{max}, D_{max}$ 를 비교하여 식(3.15)과 같이 필라멘트 및 기본선의 직경  $d$  및  $D$ 를 선정한다.

상기 식(3.11)(3.6)(3.5)(2.3)-(2.5)에는 많은 변수들이 작용한다. 이를 변수중 SMES의 운전

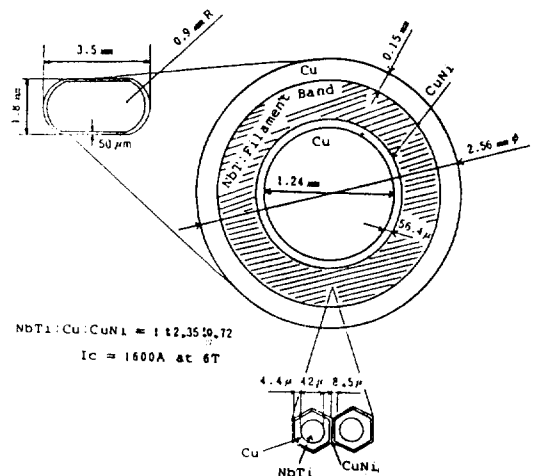
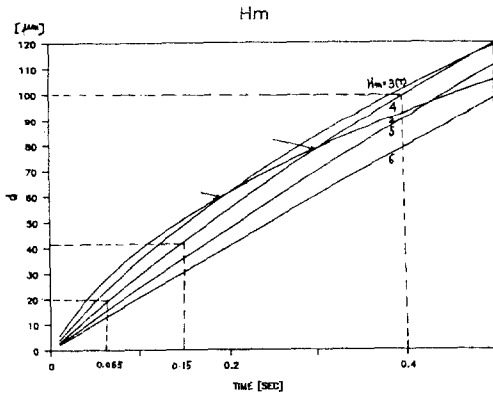
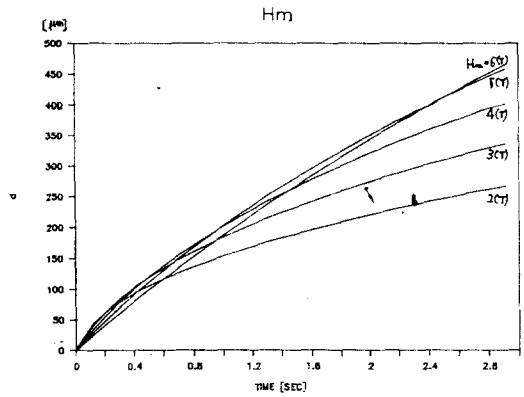


그림 4.1 기존 선재의 구조  
Fig. 4.1 Configuration of sampled multifilamentary composite



a)  $H_m$  별 필라멘트 직경  $d$



b)  $H_m$  별 필라멘트 직경  $d$

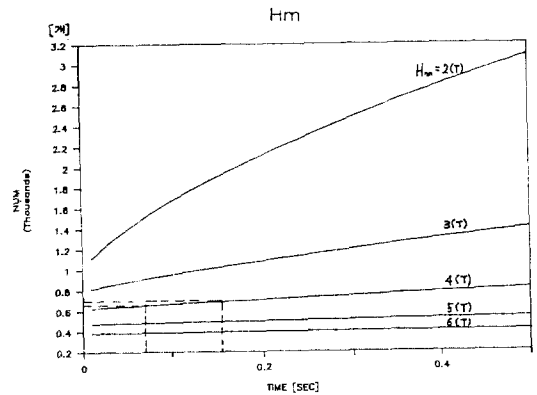
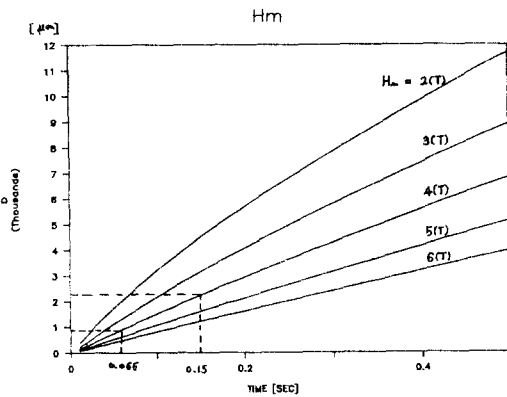


그림 4.2 운전주기  $T$ 에 대한 최대자계  $H_m$ 별  $d^*$ ,  $D^*$ ,  $N^*$   
 Fig. 4.2  $d^*$ ,  $D^*$ ,  $N^*$  for optimum AC losses by  $H_m$

관한 변수(operating parameter)는  $H_m$ ,  $T$  또는  $f, U$ 이고, 재료특성에 관한 변수(material parameter)는  $\rho_L, J_c, C_{sc}, \rho_{st}, \Delta T_o$ 이며 그리고 선재의 구성, 형상에 관한 변수 (geometrical parameter)는  $\lambda, d, k_c, k_p$ 이고, 주변조건에 관한 변수(enviromental parameter)는  $P$ 이다.

여기서는 기존선재의 재료정수인  $\rho_L, C_{sc}, \rho_{st}, \Delta T_o, J_c-H_m$  특성과 구성비(초전재료의 체적비)인  $\lambda$ 를 기준값으로하여 상기 제 변수의 영향을 보기로 한다. 이와 같이 행할 최적화 설계를 위한 기존선재로는 일본의 소화전선회사에서 제작한 다음 그림과 같은 1600A(at 6T)급  $N_b T_i$  초전도 선재를 취한다. 그림 4.1에 표시된 선재의  $\rho_L, C_{sc}, \rho_{st}, \Delta T_o, \lambda$ 는 다음 표와 같고  $J_c-H$  관계 특성은 그림 2.2의  $N_b T_i$ 의 것과 같다.

표1의 정수값을 식(3.11)에 대입해서 SMES의 주기  $T$ 에 대하여 최대자계  $H_m$ 에 따른 필라멘트

의 직경  $d^*$ , 수  $N^*$ 와 기본선의 직경  $D^*$ 를 구하면 그림 4.2와 같다.

그림 4.2는 식(3.11)의 제 변수중 표 1의 것이 의는 다음과 같이 설정하여 계산한 것이다.

- $K_y/K_t = 0.8$  : SMES의 년이용율  $K_y$ 와  $K_t = T'/T \geq 1$ 를 종합하여 0.8즉 80%로 본 것임.
- $K_m = C_m'(N)\eta/P = 3.8 \times 10^{-3}$  : 전력요금  $P$ 를 30 [원/kWh], 냉각시스템의 효율  $\eta$ 를 1/700, 초전도 선재의 필라멘트 수  $N$ 의 증가에 대한 제작비 증분  $C_m'(N)$ 는 80[원/ $N$ ]로 본다.  $C_m'(N)$ 는  $N_b T_i$  선재가격이 6,000-9,000[원/ $KA \cdot m$ ]임을 고려한 것임.
- $K_c, K_p$ 를 보통 취하는 값인  $K_c, K_p = 5$ 로, 그리고  $r_1$ 와  $r_a$ 는 각각 0.08과 0.05로 본것임.

그림 4.2는 같은 주기  $T$ 에 대하여  $H_m$ 이 클수록 기본선의 직경  $D$ 와 필라멘트의 수  $N$ 는 적어지고

또 주기  $T$ 가 길수록 같은  $H_m$ 에 대하여  $d$ 와  $D$ 가 커짐을 보인다. 이에 대하여 필라멘트의 직경  $d$ 는 주기가 어떤 주기(그림 4.2a에서 0.2sec)보다 짧은 경우는 상기와 유사한 특성을 가지나, 그 주기보다 긴 경우는  $H_m$ 이 적을수록  $T$  증가에 따른  $d$  증가의 기울기가 완만하여 어떤 긴 주기(그림 4.2d에서 0.48sec) 이상 부터는 같은 주기에 대하여  $H_m$ 이 클수록  $d$ 가 커짐이 유리함을 보인다.

또 그림 4.2에서  $K_y/K_t, K_m$ 의 값이 상기 기준값과 다를 때의 영향은 식(3.11)에서  $K_y/K_t, K_m$ 가 다같이 계수로 작용하므로 기준값을 취하여 구한 그림 4.2에서 쉽게 환산된다. 즉 전력요금  $P$ 가 많거나 냉각계통효율이 나빠서  $K_m$ 이 적을 경우는  $K_m^{1/2}$ 에 비례하여 필라멘트 직경  $d$ 가 적어야 하며 그로인해 기본선의 직경  $D$ 과 필라멘트의 수  $N$ 는 식(3.6)과 식(3.4)에서 각각  $K_m^{1/4}$ 과  $K_m^{-1/2}$ 에 비례하여  $D$ 는 적어야하나,  $N$ 는 증가한다.  $K_y/K_t$ 도  $K_m$ 과 유사하게 환산하여 그것의 영향을 고찰할 수 있다.

초전도선재의 설계에서 중요재료정수인 모재의 횡저항율  $\rho_L$ 의 영향을 보면 그림 4.3과 같다.

그림 4.3은 그림 4.2의 조건중  $H_m=4[T]$ 로 고정하고  $\rho_L$ 를 표 4.1의 기준값이외의 다른 여러값에 대하여 주기별  $d^*, D^*, N^*$ 를 표시한 것이다.  $\rho_L$ 가 클수록 같은 주기에 대하여  $d^*, D^*, N^*$ 의 값이 커지고 또 같은  $\rho_L$ 값에 대하여 주기가 길수록

$d^*, D^*, N^*$ 의 값이 커져감을 보인다. 특히  $D^*$ 와  $N^*$ 의 값은  $\rho_L$ 에 대하여  $d^*$ 보다 민감하게 영향을 받음을 알 수 있다.

$\rho_L$ 가 크게하면  $d^*, D^*, N^*$ 를 크게하여 제작이 유리한 부차적효과가 있으나 flux jump 안정관점에서 구한 식(2.3)-(2.5)의  $d_{max}, D_{max}$ 가 그림 4.4와 같이 적게 되어 식(3.15)에서와 같이  $d$ 와  $D$ 의 결정은 제한을 받는다.

그림 4.4a는 단일안정조건식인 식(2.3)을 써서 구한  $H_m$ 별 필라멘트 직경의 상한치  $d_{max}$ 를 나타내고 그림 4.4b는 동적안정조건식인 식(2.4)를 써서 구한  $d_{max}$ 를 나타낸다. 그림에서 동적안정조건이 단일안정조건보다 엄격하며( $d_{max}$ 가 적음)또 동적안정조건은  $\rho_L$ 가 클수록  $d_{max}$ 가 적어짐을 보인다. 본 사례연구에서 취한 기본선의 것은  $\rho_L = 7 \times 10^{-6}$ 의 것으로  $d_{max}$ 는  $100[\mu m]$ 이다.

$\rho_L$ 는 안정측면과 교류손실측면에서 구한 필라멘트 직경에 대한 영향이 그림 4.3, 그림 4.4.에서와 같이 상반된다. 이러한  $\rho_L$ 의 크기는 그림 4.1에서와 같이 필라멘트 주위를 둘러싼은 저저항율의 동(Cu)과 주위를 저항장벽을 만들기 위하여 둘러싼은 고정저항율의 쿠프로 니켈(CuNi)의 성분조합으로 조정한다.

이와같이 재료적으로 조정된  $\rho_L$ 는 안정측면에서 구하는 필라멘트 직경의 상한치계산(식 2.4)에는 그대로 반영되나, 교류손실측면에서 구하는 필라멘트의 직경에는 식(3.11)에서  $(K_c/K_p)^2$ 이란 계수가  $\rho_L$ 에 곱하게 되므로  $(K_c/K_p)^2$ 의조정이 추가되어 필라멘트의 직경결정에는 다소 신축성이 있다.

필라멘트와 기본선의 직경결정은 식(3.15)에서와 같이 교류손실측면에서 구한 값과 안정조건에서 구한값과 비교하여 행한다. 이에 대하여 표 4.1과 같이 취한 기준선재의 조건으로  $H_m=4[T]$ 에 사용할 경우 최적설계결과는 다음과 같다.

1) 안정측면에서 구한  $d_{max}, D_{max}$

표 4.1 최적화를 위한 기준선재의 제정수  
Table 4.1 Parameters of existing basic strand used for optimization design

$\rho_L = \rho_{st}$	$C_{sc}$	$K_{sc}$	$\Delta T_o$	$\lambda$
$7 \times 10^{-6}$ [ $\Omega \cdot Cm$ ]	$5.3 \times 10^{-3}$ [ $J/cm^2 \cdot k$ ]	$2 \times 10^{-3}$ [ $W/cm \cdot K$ ]	4.8 [K]	0.25 [p.u]

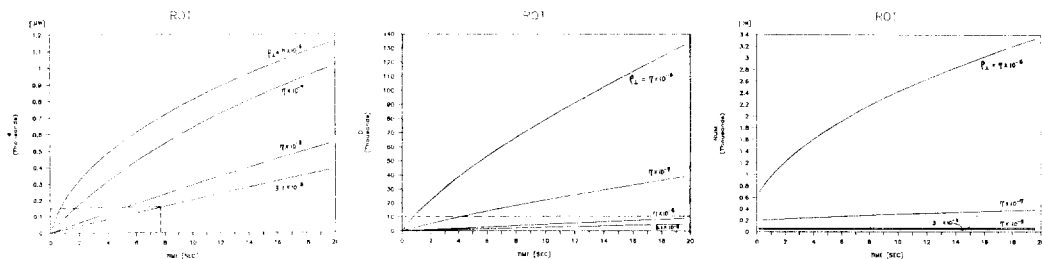


그림 4.3 운전주기에 대한  $\rho_L$  별  $d^*, D^*, N^*$   
Fig. 4.3  $d^*, D^*, N^*$  상별 for optimum AC loss by  $\rho_L$

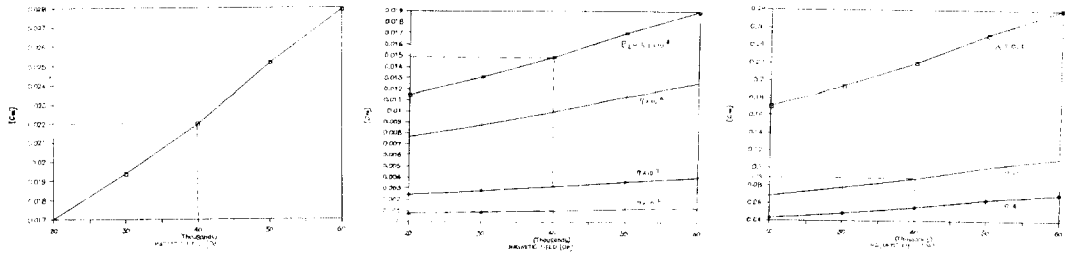


그림 4.4 flux jump 안정측면에서 본  $d_{max}$ ,  $D_{max}$   
 Fig. 4.4  $d_{max}$ ,  $D_{max}$  for flux stability

그림 4. 4에서  $H_m=4[T]$ 에 해당하는  $d_{max}$ ,  $D_{max}$ 를 구하면

a) 필라멘트 직경  $d_{max}$

· 단열안정조건 :  $d_{max}=220[\mu m]$  (4.1a)

· 동적안정조건 :  $d_{max}=100[\mu m]$  (4.1b)

b) 기본선의 직경  $D_{max}$

· 단열안정조건 :  $D_{max}=900[\mu m]$  (4.2a)

· 동적안정조건 :  $D_{max}=2,260[\mu m]$  (4.2b)

식(4.1) (4.2)의 안정조건중 그림 4.2에서 볼때  $D_{max}$ 와  $d_{max}$ 에 대응되는 주기중 전자의 것이 짧기 때문에  $D_{max}$ 가 보다 엄격한 조건이다. 여기서 식(4.2)의  $D_{max} 900[\mu m]$ 와  $2,260[\mu m]$ 에 대한 주기는 그림 4.2c에서 각각  $0.065[sec]$ ,  $0.15[sec]$ 이다. 이 주기보다 긴 주기에 대하여 교류 손실측면에서 구한 것은 그림 4.2에서 보는 바와 같이 안정조건을 만족하지 못하므로 의미가 없다.

따라서 교류손실 측면에서 구한 것은 상기주기보다 짧은 SMES에만 유효하다. 초전도선재의 안정조건과 교류손실조건을 모두 만족하는  $H_m=4 [T]$ 용 초전도 선재는 다음과 같다.

1)  $D_{max}=900[\mu m]$ 의 경우

주기  $T \leq 0.065[sec] \cong 15[Hz]$   
 $d \leq 20[\mu m]$  (4.3)  
 $D \leq 900[\mu m]$   
 $N \leq 650[개]$

2)  $D_{max}=2,260[\mu m]$ 의 경우

주기  $T \leq 0.15[sec] \cong 6.7[Hz]$   
 $d \leq 42[\mu m]$   
 $D \leq 2,260[\mu m]$  (4.4)  
 $N \leq 700[개]$

식(4.3) (4.4)에서 SMES의 실제주기에 대한  $d$ ,  $D$ ,  $N$ 은 각 주기에 대하여 교류손실조건에서 구

한 값 즉 그림 4.2에서 취하면 된다.

이상에서 볼때 교류손실 조건에서 구하는 본기법은 선재의 안정조건에서 제한되는  $D_{max}$ 를 크게 취해  $10[mm]$ 로 한다해도 그림 4.3에서 본기법이 적용될 수 있는 최대주기는  $\rho_L$ 의 값에 따라 ( $\rho_L$ 가 클수록 최대주기는 짧게 됨)  $0.1$ 에서  $10 [sec]$ 정도 이므로 주기가 이값보다 적은 SMES 즉 전력계통안정용 SMES의 초전도선재의 설계에 유효하고 또 최적화에 관계하는 여러변수의 영향을 쉽게 고찰할 수 있으며 또한 변수의 변경에 따라 환산에 용이하여 SMES용 선재의 유용한 기법임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 운전주기에 따라 달라지는 SMES의 교류손실에 의한 냉각전력비와 이를 저감하기 위한 제작비를 최소로하는 초전도선재의 최적설계기법을 제시하였다.

SMES는 운전주기에 따라 저장용량이 다르나 입출력이 커서 SMES의 전류용량은 크다. SMES용 대전류용량의 초전도선재는 선재의 안정화를 위하여 극세 다심 복합선을 기본선(basic strand)으로 하여 이를 연합하여 소요전류용량이 되도록 한다.

극세 다심 복합선으로된 기본선의 최적화설계를 위하여 기본선의 교류 손실을 이루는 히스테리시스 손실, 결합손실, 자기자계손실을 모두 필라멘트의 직경으로 표시하는 손실식으로 환산하여 필라멘트의 직경크기에 따른 교류손실에 의한 전력비와 그리고 그것에 따른 제작비를 최소화하는 필라멘트의 직경을 구하고 또 그것을 써서 기본선의 직경과 필라멘트의 수를 정하는 최적화식을 도출하였다.

본 기법에서는 상기와 같은 교류손실 조건에서 구한 필라멘트와 기본선의 직경이 선재의 안정조건에서 구한 범위에 들어가면 본 기법에서 구한 것을 취하고 그렇지 않을 경우는 안정조건이 우선하므로 안정조건에서 구한 것을 취하는 것으로 하였다.

본 기법을 기존선재에 적용한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 본 기법은 선재의 안정조건에서 제한되는 기본선의 최대직경의 크기를 크게 취해 10[mm]로 취한다해도 본 기법 즉, 교류손실조건이 적용될 수 있는 최대주기는 0.1에서 10[sec] 이어서 이보다 짧은 주기인 SMSE 즉 전력계통안정용 SMES의 초전도선재의 설계에 유용한 기법이다.
2. 본 기법에서 제시한 최적화식은 여러변수의 영향을 쉽게 평가할 수 있고 또 변수의 변경에 따른 환산이 용이하므로 SMES의 운전조건인 운전주기, 이용율, 자장의 세기 등과 관련하여 SMES 용 초전도선재의 설계를 다각적으로 행할 수 있다.
3. SMES의 운전주기가 짧을수록 그 SMES에 사용할 초전도선재의  $\rho_L$ 은 그림 4.3과 그림 4.4에서 크게 하여야 하고 운전주기가 긴 전력저장용 SMES의 것은  $\rho_L$ 의 값을 적게해도 문제가 되지 않는다.
4. 주기가 긴( $10^3-10^6$ sec) 전력저장용 SMES의 초전도선재의 설계는 본 기법에서 제시한 교류손실 최적화보다 선재의 안정화 조건이 설계대상임을 확인하였다.
5. 본 기법에서 제시한 최적화를 위한 반복식(식 3.13)은 교류용 초전도선재의 개발에 유용하게 이용될 수 있다고 본다.
6. 장차 고온초전도체가 개발, 실용될때 그것의 교류손실 및 제작비 관계자료를 본 기법에 적용하면 고온 초전도체에도 확장될 수 있다.

본 연구는 국외파견연구 계획의 일환으로 이루어진 것임.

### 참 고 문 헌

[1] B.S. Deaver, Jr, "H. Kamerlingh Onnes, Symposium on the 75th Anniversary of the Discovery of superconductivity" IEEE Trans. on Magnetics, vol. MAG-23, no.2, March 1987,

pp.354-370.

[2] J. Barden, L.N. Cooper and J.R. Schrieffer, "Theory of Superconductivity". Physical Review. vol. 108, no. 5 Dec. 1957, pp. 1175 ~ 1204.

[3] A.A. Abrokosov, "The Magnetic Properties of superconducting Alloys", Journal of Physics and Chemics of Solids, vol. 2, 1957, pp. 199~208.

[4] J.E. Kunzler, E. Buhler, F.S. Hsu and J.H. Wernick, "Superconductivity in Nb<sub>3</sub>Sn at High Current Dinsity in a Magntic Field of 88 KGauss", Physical Review Letters, vol. 6, no. 3, Feb., 1961, pp. 89~91.

[5] T.G. Berlincourt, "Type II Superconductivity: Quest for Understanding", IEEE Trans. on Mag., vol. MAG-23, no. 2 March 1987, pp. 403~412.

[6] J.C. Bednorz and K.A. Muller, "Poissible High Tc Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System" Z. Phys. B-Condensed Matter 64, 1986, pp. 189~193.

[7] M.K. Wu, J.R. Ashburn, C.J. Tormg and C.W. Chu, "Superconductivity at 93K in a New Mied-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure", Phys. Rev. Letters, vol. 58, no. 9, March 1987, pp. 908~910.

[8] A.P. Malozemoff, W.J. Gallagher and R.E. Schwall, "Application of High-Temperature Superconductor", Chermistry of High-Temperature Superconductors, American Chimical Society, 1987, Chapter 27.

[9] T.H. Gelalle and T.K. Hulm, "Superconductors in Electric-Power Technology", Scientific American, vol. 243, no. 5, Nov. 1980, pp. 138-166.

[10] David C. Larbalester, "Superconducting Materials-A Review of Recent Advances and Current Problems in Practical Materials", IEEE Trans. on Magnetics, vol. MAG-17 no. 5 Sep. 1981, pp. 1668~1686.

[11] EPRI Journal, Sep. 1987.

[12] E.W. Collings, Applied superconductivity, vol. 1. vol. 2, 1986, Plenum Press.

[13] M. Ferrier, "Stockag e d'energie dans um enroulement supra-conductor," in Low Temperature and Electric Power, Pergamon.

- London, 1970, pp. 425~432.
- [14] Wisconsin Superconductive Energy Storage Project, Vols 1-4, Engineering Experiment Station, College of Engineering, University of Wisconsin-Madison, 1974-1981.
- [15] E.V. Hassenzahl, B.L. Baker and W.E. Keller, "The Economics of Superconducting Magnetic Energy Storage System for Load Levelling: A comparison with Other System," Los Alamos National Lab. Report LA-5377-MS. Aug. 1973.
- [16] B.M. Winer and J. Nicol. "An Evaluation of Superconducting Magnetic Energy Storage," IEEE Trans. on Magnetics, vol. MAG-17, no. 1. Jan. 1981, pp. 336~339.
- [17] R.W. Boom, "Superconductive Energy Storage for Diurnal use by Electric Utilities", IEEE Trans, on Magnetics, vol. MAG-17, no. 1 Jan. 1981, pp. 340~343.
- [18] R.J. Loyd, J.D. Rogers, "A Feasible Utility Scale Superconducting Magnetic Energy Storage Plant", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. EC-1, no. 4, Dic. 1986, pp. 63~68.
- [19] R.J. Loud, D.M. Schoenung, T. Nakamura, W.V. Hassenzahl, and J.D. Rogers, "Design Advances in Superconducting Magnetic Energy Storage for Electric Utility Load Levelling", IEEE Tras. on Manatics, vol. Mag-23 no. 2, Mar. 1987, pp. 1323-1330.
- [20] M. Masuda and T. Shintomi, "Superconducting Magnetic Energy Storage", Cryogenics, Nov 1977, pp. 607~612.
- [21] 초전도 에너지 저장시스템에 관한 조사연구, Vol. I - III, 재단법인 미래공학연구소, 1982~1984.
- [22] H. Kaminosono, T. Tanka, T. Ishikawa and S. Akita, "Characteristics of Superconducting Magnectiv Energy Storage(SMES) Energized by a High Voltage SCR Converter", IEEE Trans. on magnetics, vol. MAG-19, no. 3, May 1988, pp. 1063~1066.
- [23] M. Masuda and T. Shintomi, "The Conceptual Design of Utility-Scale SMES", IEEE Trans. on Magnetics, vol. MAG-23, no. 2, Mar. 1987, pp. 549~552.
- [24] 초전도 전력에너지 저장장치에 관한연구, vol. I-IV, 한국전력공사 기술연구원, 1984-1989.
- [25] W.J. Carr, Jr., AC Loss and Macroscopic Therory of Superconductors, Gordon and Breach Science Publisher, Inc. 1983:
- [26] I. Hlasnik, "Review on AC Loss in Superconductors", IEEE Trans. on Magnetics, vol. MAG-17, no. 15, Sep. 1981, pp. 2261~2269.
- [27] Superconducting Applications Group, Rutherford Lab., Experimental and theoretical studies of filamentary superconducting composities", J. Physics, D3, 1970, pp. 1517~1587.
- [28] Simon Foner and B.B. Schwartz, Superconductor Materials Science-Metallurgy, Fabrication and Applications, Plenum Press, 1981.
- [29] H. Brechna, Superconducting Magnet Systems, Springer-Verlag, 1973.
- [30] I. Hlasnik, "Could a cryoturlogenerator armature winding be superconducting", Cryogenics, sep. 1983, pp. 508~514.
- [31] Y. Kubata, H. Okon and T. Ogasawara, "Development of a Nb<sub>3</sub>Sn multifilamentary Composite Conductor for A.C. Use", Cryogenics, vol. 26, Dec. 1986, pp. 654~659.
- [32] P.S. Swartz and C.P. Bean, "A Model for Magnetic Instability in Hard Superconductor", J. Apple. Physics vol. 39, 1968, pp. 4991~4998.