

## 초전도자석내의 국부적 상변이에 대한 열적·전기역학적 해석 및 훈치보호시스템의 설계 및 특성해석

추 응, 배준한, 김호민, 장미혜, 주민석, 고태국, 김기만, 정상권  
연세대학교 전기공학과, 삼성전자(주) 에너지연구실, 한국과학기술원 기계공학과

### The Analysis of Quench Protection System through Thermo-Electrodynamics of Resistive Transition in SC Magnet

Y Chu, J H Bae, H M Kim, M H Jang, M S Joo, T K Ko, K M Kim, S K Jeong  
Dept. of E.E., Yonsei University, Samsung Electro.Energy Lab., Dept of M.E., KAIST

**Abstract** - The detection of the normal zones in the coil winding and the initiation of the proper dump sequence have been one of the most important areas in the superconducting magnet technology. In this paper, the process to derive optimal dump sequence has been investigated through quench simulation and analysis of magnetically coupled superconducting magnet system. The magnet terminal voltage and maximum temperature rise in the quench initiated point are calculated with respect to various input variables such as operation current, dump resistance, etc. The experimental system is comprised of sc solenoidal coil, data aquisition device, external circuit breakers and dump resistor. The quench behavior of the magnet(e.g., temperature profile and the voltage signal) was measured. From this results, theoretical predictions were found to coincide with the experimental observations.

#### 1. 서 론

초전도체가 초전도성을 유지하기 위해서는, 전류 밀도, 자계, 온도를 세 축으로 갖는 임계곡면의 아래에서 동작하여야만 한다. 한편, 어떠한 이유에 의하여(주로 기계적 에너지 교란) 자석 내부에서 국부적으로 초전도상태를 벗어나게 되는 부분이 발생할 때, 그러한 국부점에서 동작점이 임계곡면 위에 위치하게 되며, 따라서 임계곡면에서 이탈한 양만큼 상전도상태의 발열을 하게된다. 이러한 발열량은 확산을 통하여 인접 선체에 파급되며 파급된 부분은 다시 상전도상태로 천이하게 된다. 어떤 조건 하에서는 이러한 일련의 과정들, 즉 상전도상태로의 천이, 발열, 인접으로의 확산, 확산된 곳에서 다시 상전도상태로 천이되는 과정들이 급격히 진행된다. 초전도 자석에서의 이러한 훈치발생은, 자석 내부의 불균일한 자장분포에 의해서 항상 점에서 발

생하게 되며, 상전도 영역이 권선을 통하여 전파되고, 이 과정중 훈치발생점은 항상 가장 높은 온도를 가지게 된다. 이러한 국부적 온도상승이 절연물을 파괴시키기도 하고 이것은 권선간의 단락에 이어져서, 자석에 심각한 소손을 가져오게 한다. 따라서 초전도자석의 훈치의 검출 및 보호장치는 매우 중요한 요소가 된다.

본 논문에서는 일반적인 초전도자석 시스템의 훈치 검출·보호장치의 시뮬레이션을 통하여 설계요소를 도출하였으며, 소형 초전도자석의 제작 및 실험을 통해 이를 입증하였다.

#### 2. 설계조건

초전도자석의 훈치검출·보호시스템은 훈치시 발생할 수 있는 여러 가지 최악의 상황을 피할 수 있도록 설계되어져야한다. 이는 훈치초기 발생점에서 발생하는 최대온도상승을 적절한 한계 이하로 제한 할 수 있어야 하며, 에너지 방출시 전압강하에 의한 절연파동의 문제를 고려하여야만 한다. 먼저 이러한 2가지 관점을 소형 초전도자석에서 해석하여 시스템의 구성을 하고자 한다.

##### 2.1 훈치초기발생점의 최대온도상승

훈치초기발생점의 상전도 영역에 의한 발생열량이 모두 내부에너지의 축적으로 이어져 그 에너지에 의한 온도상승을 계산하는 것이다.

$$A_{cd}C_{cd}(T) \frac{dT}{dt} = \frac{\rho_m(T)I(t)^2}{A_m} \quad (1)$$

여기서,  $A_{cd}$ ,  $C_{cd}(T)$ 는 각각 도체의 전체 단면적, 도체의 전체 비열을 나타내고,  $A_m$ ,  $\rho_m(T)$ 은 안정화모재의 매트릭스의 단면적과 온도에 대한 비저항을 나타낸다.  $I(t)$ 는 시간에 대한 자석 전류를 나타낸다. 이식을 각각 온도  $T$ 와 시간  $t$ 에 관해서 부분적분법을 적용하면, 아래와 같이 된다.

$$\frac{C_{cd}(T)}{\rho_m(T)} dT = \left(\frac{1}{A_m A_{cd}}\right) I(t)^2 dt \quad (2)$$

$$\int_{T_i}^{T_f} \frac{C_{\alpha}(T)}{\rho_m(T)} dT = Z(T_i, T_f) \geq \left( \frac{1}{A_m A_{\alpha}} \right) \int_0^{\infty} I(t)^2 dt \quad (3)$$

여기서,  $T_i$  은 초기의 온도를 나타내고,  $T_f$  는 최대 상승온도를 나타낸다.  $Z$ 함수는 안정화모재의 종류에 따라 결정된 값이므로,  $T_f$  와 식(3)의 맨 오른쪽항을 계산하게 되면, 최대 상승온도를 계산할 수 있다.

표1 초전도 자석용 초전도선재 제원

구 분	초전도 마그네트용 선재	
	내 용	비 고
선 재 종 류	NbTi/Cu	
비절연 선재지름 [mm]	0.941	$0.940 \pm 0.005$
절연시 선재지름 [mm]	1.003	$1.000 \pm 0.010$
필라멘트 수 [본]	24	
필라멘트 지름 [ $\mu m$ ]		
트위스트 피치 [mm]	53	$50 \pm 10$
Cu / NbTi 비	7.4	$7 \pm 1$
임계 전류 [A] @4.2[K], 10[ $\mu V/m$ ]	300	$\geq 265(@3[T])$
임계 온도 [K]	9.4	$\geq 210(@4[T])$
$R_{300K} / R_{10K}$	129	$\geq 100$
단위길이당 무게 [g/m]	6.20	

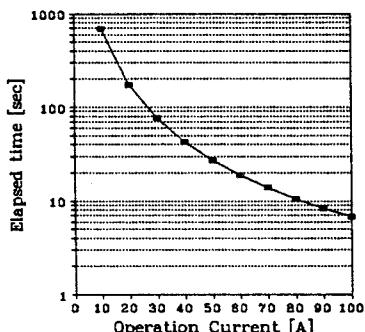


그림1. 전송전류에 따른 동작한계온도 도달시간

그림1은 표1에서 보여지는 선재에서 펜치발생시 검출·보호시스템이 없는 경우, 전송전류에 따라서 한계온도를 300[K]로 설정하였을 경우, 그 온도까지 도달하는데 걸리는 시간을 나타내고 있다. 이러한 시간은 펜치의 검출시 매우 중요한 파라미터로 작용한다.

## 2.2 덤프과정 시 설계요건

대전류 통전을 하는 초전도자석의 경우, 보호시스템의 필수적인 요소는 초전도상태로의 회복이 불가능한 상전도영역을 검출하는 것이다. 이것은 그림1에서 보여지는 한계온도 도달시간보다 빠르게 검출할 수 있어야 하며, 물론 자석에 장착된 센서에 의해 이루어진다. 이러한 검출시간은 빠를수록 좋지만, 펜치여부의 정확한 판단 및 신호들을 처리하여 자석의 저장에너지를 방전시키는 덤프모드를

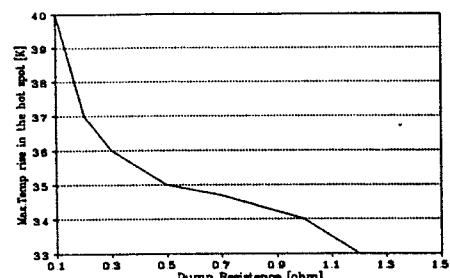


그림2. 덤프저항에 따른 펜치발생점의 최대상승온도(at 80[A])

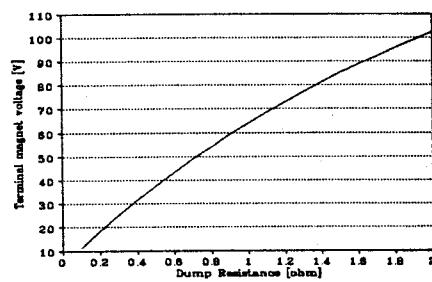


그림3. 덤프저항에 따른 자석 최대양단전압(at 80[A])

형성하는데 걸리는 시간등을 고려하여 설정되어진다. 표1의 선재로 형성된 80[mH]의 초전도자석에서 1.5[sec]의 검출시간이 소요되어졌을 경우, 최대온도와 최대양단전압을 보여준다. 덤프저항이 클수록, RL시정수가 짧기 때문에 온도상승을 크게 억제할 수 있으나, 덤프모드로 동작시 발생하는 자기전압에 의한 높은 전압상승은 이와 비례하여 커지게 된다. 따라서, 이러한 관계에 의해 덤프저항의 크기가 적절히 선택되어져야 한다.

## 2.3 시스템 구성

초전도자석의 검출 및 보호시스템이 장착된 시스템 구성은 위의 그림과 같다. 펜치의 검출되어지면, MCCB1(Magnetically controlled Circuit Breaker)이

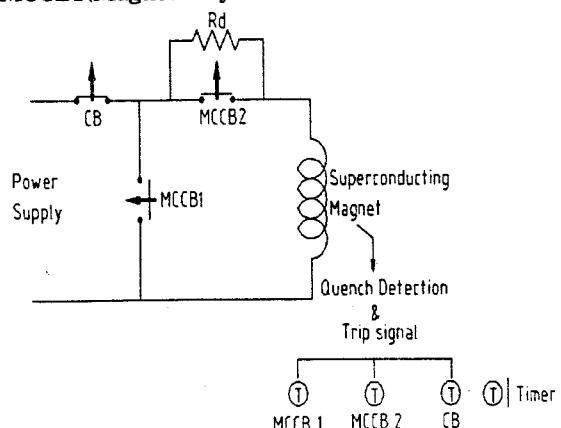


그림4. 초전도자석 시스템

닫히며, 적절한 시간간격에 의해 MCCB2와 CB가 순차적으로 동작하게 된다. 이러한 동작이 완료되면, 자석의 에너지는 덤프저항  $R_d$ 에 의해 소비되어 진다.

### 2.3.1 검출신호 흐름

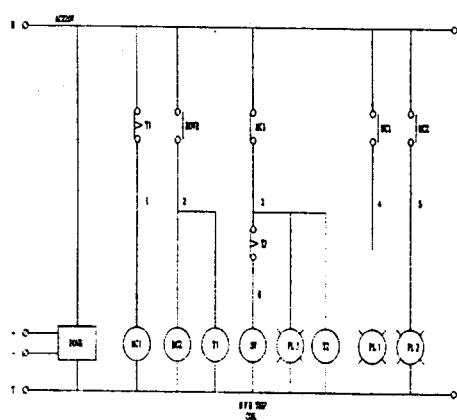
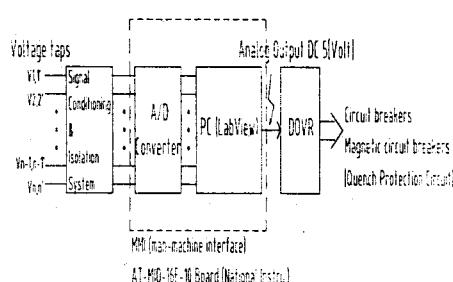
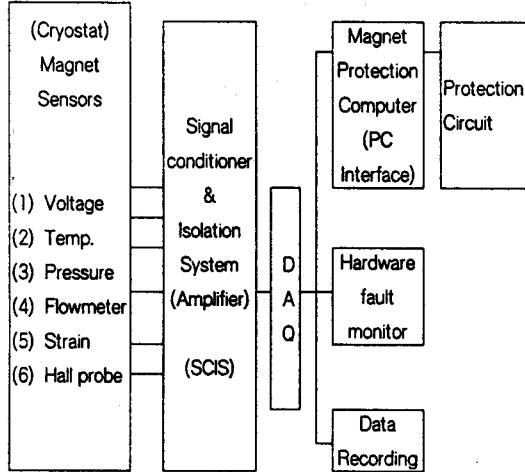


그림5. Data Aquisition(DAQ) 시스템, 신호처리 및 외부시스템 제어회로

그림5는 자석에 장착된 센서들을 받아들여 그 신호들을 처리하여 펜치의 여부를 판단하기 위한 모

니터링 및 MMI(Man-Machine Interface)를 보여준다. 일반적인 펜치의 검출은 전압텝 신호를 이용하는 것이며, 펜치가 검출되면 외부스위치제어회로로 일정신호를 보내게 된다. 앞선 DAQ에서의 신호를 받은 DOVR(Dc Over Voltage Relay)은 그림4의 각각의 스위치에 트립신호를 보내주게 되며, 순차는 타이머등을 이용하여 제어된다.

### 3. 결 론

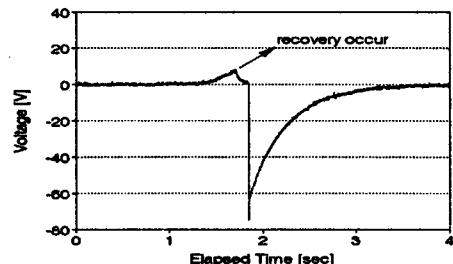


그림6. 전송전류80[A]의 경우 펜치보호회로작동시  
자석양단전압 및 최대상승온도파형

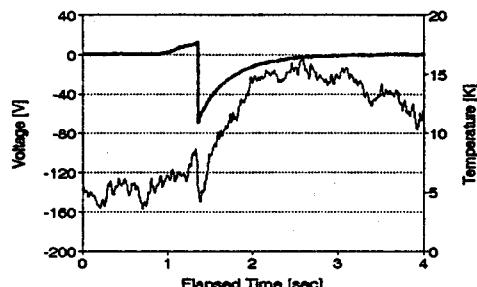


그림7. 전송전류100[A]의 경우 펜치보호회로작동시  
자석양단전압 및 최대상승온도파형

그림6과7은 덤프저항이  $1.25[\Omega]$ 이고 초기펜치에너지가  $300[mJ]$ 인 경우, 발생 저항에 의한 양단전압의 상승이 일정값에 도달하면, 그것을 초전도상태로의 회복이 불가능하다고 판정하며, 보호회로를 구동하게 된다. 판정에서 구동시 요구하는 시간은 스위치 작동시간 및 프로그램 동작시간등을 고려하면 0.3[sec]정도로서 그림7에서는 이 시간동안 상전도 영역은 빠르게 전파되어 큰 전압강하가 나타나는 것을 볼 수 있으나, 그림6에서는 신호처리과정에서 회복되는 과정이 보이며, 이러한 경우는 그 설정전압값이 오류라는 것을 알 수 있다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Joel H.Schultz, et al, "Superconducting Magnet Protection System for the Tokamak Physics Experiment", IEEE Trans.on Mag., Vol30, No.4, pp2102-2105,1994
- [2] Yukikazu Iwasa, "Case Studies in Superconducting Magnet", pp323-374,1994