

## 고온 초전도 케이블의 켄치 보호를 위한 검출기 설계

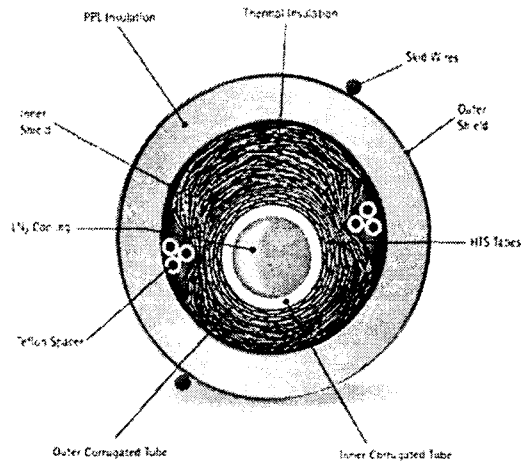
최용선\*, 황시돌, 임성우, 최효상, 현옥배  
한전 전력연구원 신에너지그룹

### Design of quench detector for protection of HTS cable

Yong-Sun Choi, Si-Dole Hwang, Seong-Woo Yim, Hyo-Sang Choi, Ok-bea Hyun  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - High Temperature Superconducting (HTS) devices make it possible to operate with no electrical loss by resistance. If, however, the applied current is over its critical current, the phase of HTS devices is changed to normal state, so called, quench. In this case, since resistance of HTS is increased abruptly, it can not be avoidable to damage the whole apparatus. In this study, quench detector to protect HTS devices was proposed. We designed the quench detecting circuit and tested the performance of the circuit. The detecting circuit was consisted of Op-Amp and low pass filter etc. to detect very low voltage around  $1\mu V$ . The circuit detected effectively the low voltage when over current is applied to HTS tapes. At the next step, we are going to apply and test the circuit to protect the prototype HTS cable.

에 의해서 켄치가 발생하게 되면 온도를 상승시켜서 초전도체를 상전도 상태로 변화시키는 연쇄적인 결과가 발생된다.



[그림 1] 초전도 케이블 단면도

## 1. 서 론

초전도 케이블을 실제통에 적용하는데 있어서 켄치는 초전도 케이블의 성능을 저하시킬 수 있는 하나의 커다란 문제가 될 수 있다. 근본적으로 켄치가 발생되지 않도록 설계와 보호 장치를 만든다 하더라도 초전도체의 특성상 여러 가지 예기치 않은 상황에서 켄치가 발생할 수 있다. 이를 대비하여 초전도 케이블에 켄치가 발생되었을 때 이를 사전에 검출하여 케이블을 보호하기 위한 전압 켄치 디텍터를 제안하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 초전도 케이블의 기본

그림 1과 같은 형태로 초전도 케이블은 초전도 선재를 포함한 여러 가지 복잡한 구조로 이루어져 있다. 이중, 주요 구성요소는 초전도 선재와 초전도체를 냉각시키기 위한 액체 질소로 이루어져 있다.

#### 2.1.1 초전도체의 켄치<sup>[3]</sup>

초전도체의 특징 중 하나는 작은 면적으로 대전류를 수송하는 바, 전류가 어떤 값 즉 임계전류, 이상이 되면 상전도로 급격히 바뀌는 현상이 발생하게 된다. 이를 초전도에서는 켄치가 발생하였다고 규정을 하게된다. 초전도체에 켄치가 발생되었을 때는 제로인 저항이 상전도 상태의 저항으로 바뀌면서 많은 전압이 걸리게되는데, 이에 따른 급격한 온도상승과 저항 값의 증가와 더불어 주변으로 켄치를 파급시키게 되어 모든 초전도체를 상전도체로 바꿀 수 있다. 초전도 케이블에서의 켄치의 발생으로 인하여 상전도 상태로 바뀌게 되면 초전도 선재에 손상을 입게 되어서 복구가 불가능한 상태가 될 수도 있다. 이러한 초전도체에서 켄치 요소 3가지는 온도와 전류 그리고 자기장이다. 이는 각각 독립된게 아니라 전류

### 2.1.2 초전도 케이블에서의 켄치 보호

켄치 보호란 켄치가 발생하기 전에 이를 감지하여 켄치를 억제하거나 감소시키는 작용을 뜻한다.

초전도 케이블에서 켄치가 발생되어 손상을 입게 된다면 허용전류가 감소하여 초전도 케이블의 성능을 저하시키는 것은 물론 케이블의 수손이라는 심각한 문제가 발생될 수 있다. 이러한 관점에서 초전도 케이블에서의 켄치의 검출과 검출에 따른 보호가 있어야 한다.

본 논문에서 제시하는 켄치 보호는 선재의 켄치 개시 전압( $1\mu V/cm$ ) 이전의 신호를 검출하여 냉동기의 출력을 증가시킴으로써 임계전류를 올리는 방법등이다. 이러한 방법을 적용하기 위해서는 켄치가 발생되는 시점을 정확히 잡아내야 하는 켄치 디텍터의 설계가 선행되어야 한다.

### 2.2 켄치 디텍터 설계와 실험

기존 케이블에 사용된 디텍터 방법들은 켄치가 발생되었을 때 켄치 발생 위치를 알아내기 위해 사용될 수 있다. 그러나 초전도 케이블의 특성상 켄치가 발생되었다면 케이블 자체에 손상을 입었다고 보아야 하기 때문에 케이블에 대한 신뢰가 떨어지게 된다. 초전도 케이블 설계시 많은 여유를 두고 설계하게 되더라도 예상치 못한 요인에 의해서 켄치가 발생되기도 하는데 이때 켄치가 발생되기 전에 검출하여 케이블 전역에 켄치를 방지하기 위한 신호 분석기 즉, 켄치 디텍터가 필요하다. 켄치 검출에 따른 대응책은 켄치의 검출이 가능하다는 전제하에

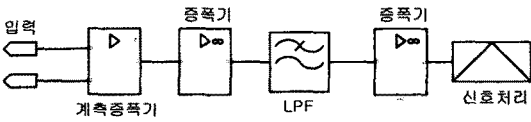
서 세워져야 하기 때문에 디텍터의 설계가 중요하다.

### 2.2.1 캔치 검출 요소

초전도 케이블에서 캔치를 판단할 수 있는 요소를 찾을 수 있다. 요소들로는 초전도체의 주변 상황으로 판단이 가능한 액체질소의 압력 상승, 온도상승 등이 있고, 초전도체의 직접적인 상황으로는 저항 발생, 온도 상승, 허용 전류의 증가 등이 있다. 주변 요소인 질소의 압력과 온도의 검출은 케이블의 장거리와 순환의 특성상 균일하지 못한 분포 때문에 캔치의 판단이 어렵고 광대역인 만큼 계측기의 채널 수가 많이 필요하다. 그리고 직접적인 요소 중 선재의 온도 변화 검출 또한 많은 계측기의 접점을 요구한다. 반면 허용 전류의 초과여부 측정 은 간단한 편이지만 임계전류는 질소의 온도와 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 전류의 양으로만 캔치를 판단한다는 것은 위험할 수 있다. 본 논문에서는 제안한 캔치의 검출 방법은 직접적으로 선재의 저항의 변화를 측정하는 것, 즉 선재 양단에 걸리는 전압을 측정하는 것이다. 이 방법은 캔치가 발생하는 초전도체를 근본으로 하기 때문에 외부의 상황에 영향을 받지 않고 캔치를 측정할 수 있다.

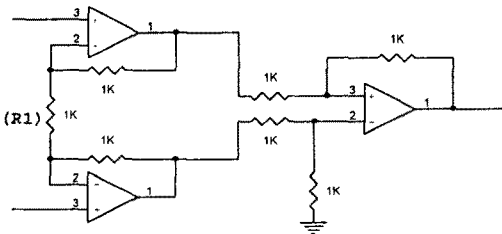
### 2.2.2 전압 캔치 디텍터

그림 2의 개념도를 기반으로 하여서 캔치 디텍터를 설계하였다. 디텍터의 기본 소자를 증폭과 필터링이 쉬운 Op-Amp로 선택하였다.



[그림 2] 캔치 디텍터 개념도

디텍터의 입력은 초전도 선재 양단의 전압을 받아들이게 되는데 초전도 선재에 흐르는 전류의 양이 크기 때문에 저항을 최대한 무한대에 가깝게 만들어야 하고, 또한 선재 양단의 전압차이를 계측해야하는 차동 증폭기로 구성되어야 한다. 이러한 조건을 만족하기 위해서 계측증폭기(instrumentation amplifier)<sup>(1)</sup>로 입력 신호를 받아 들었다. 계측 증폭기의 회로도는 그림 3에 나타내었다.



[그림 3] 계측 증폭기

그림 3에서 입력단의 저항을 수MΩ을 가진 Op-Amp가 직렬 연결되어 있어 측정하고자 하는 회로에 영향을 미치지 않고 원하는 전압을 얻을 수가 있다.

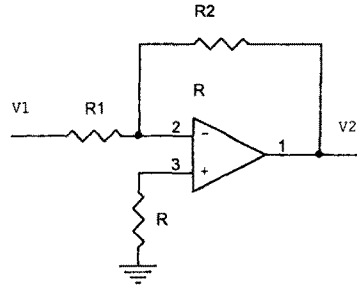
계측증폭기의 이득은 식 (1)과 같다.

$$V_o = -(1 + \frac{2R}{R_1})(V_1 - V_2) = k(V_1 - V_2) \quad (1)$$

본 논문에서 사용된 계측 증폭기는 원래 초전도체의 차동 신호를 3배 증폭 효과를 가지도록 설계하였다.

차동 신호가 작을 경우 LPF(Low Pass Filter)의 캐패시터에서 신호가 왜곡되는 경우가 발생하게 되므로 5V이상의 신호로 만들어 주어야 한다. 이를 위해서 본

논문에서는 그림 4의 정이득 배율기<sup>(2)</sup>를 이용하여 LPF 전단에 부착하였다.

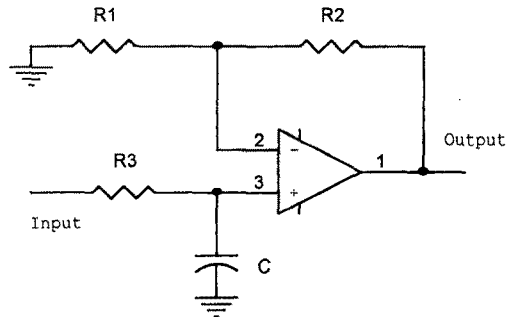


[그림 4] 정이득 배율기  
정이득 배율기의 이득은 식 (2)와 같다.

$$A = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

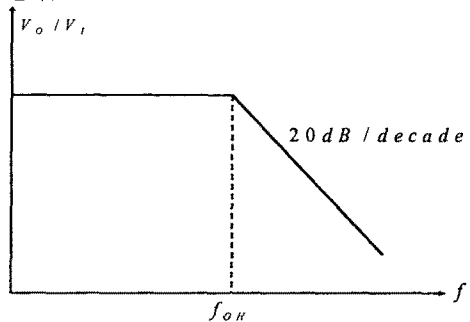
본 논문에서는 R<sub>2</sub>를 가변 저항을 사용하여 원하는 전압 이득을 발생하도록 설계하였다.

초전도 케이블은 캔치 신호가 미약하기 때문에 노이즈가 원래 신호 값을 왜곡시키는 경우가 발생된다. 이러한 노이즈와 원래의 전압이 혼합된 신호를 LPF를 통과시킴으로써 노이즈만 제거한 후 우리가 얻고자 하는 전압 신호를 찾아내고자 하였다. 본 논문에서는 그림 5에서 나타낸 1계 저역통과 능동필터<sup>(2)</sup>를 이용하였다.



[그림 5] Low Pass Filter

1계 저역통과 능동필터의 필터 응답특성은 그림 6과 같이 정의되는데 1계 저역통과 능동 필터의 이득은 식 (3)과 같고 이 때의 차단주파수는 식 (4)와 같이 결정된다.



[그림 6] 1계 저역통과 능동필터 응답특성

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_3} \quad (3)$$

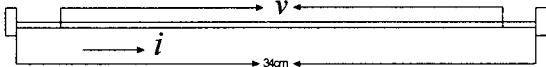
$$f_{OH} = \frac{1}{2\pi R_3 C} \quad (4)$$

본 논문에서는 차단 주파수의 변경을 위하여  $R_3$ 를 가변 저항으로 대체하여 원하는 주파수를 선택할 수 있도록 설계하였다. 노이즈가 제거된 신호를 최종적으로 Peak가 12V까지 증폭시킨 후 신호 처리부를 통해서 인식 될 수 있는 신호로 바꾸도록 하였다.

켄치 디텍터의 설계를 위해 고려해야 할 것이 있다. 첫째로 저항의 사용이다. 증폭기 자체가 저항의 비율로 이루어지기 때문에 온도에 따른 저항의 변화나 저항이 가지고 있는 오차만으로도 원하는 비율로 정확히 증폭되지 않을 수가 있다. 이는 같은 저항 값을 사용거나 고정밀 저항을 사용하여 해결 할 수 있다. 둘째로 Op-Amp의 offset의 문제이다. 이는 offset보정 회로나 low offset Op-Amp를 사용하여 해결 할 수 있다. 셋째로 계측 증폭기의 입력인 양단 전압의 신호선의 길이이다. 신호선이 길면 전압 강하가 일어나는데 초전도 선재를 사용하면 해결 할 수 있다.

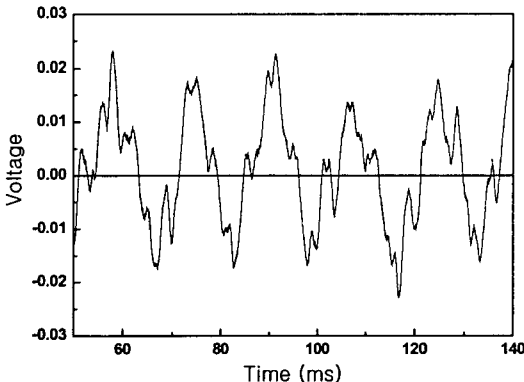
### 2.3 실험

본 논문에서 제안된 켄치 디텍터의 성능을 실험하였다. 먼저, 주파수 발생기에서 발생하는 사인파는 노이즈가 처리되었다. 그런 다음 초전도체의 실험을 위해서 지름이 3cm의 포머에 피치각 15°를 주고 34cm의 초전도 선재를 감았다. 전압 탭은 전류단자로 부터 2cm떨어진 곳에 설치하였다. 선재의 임계전류는 64A이다. 실험에 쓰인 선재의 개략도는 그림 7에 나타내었다.



[그림 7] 켄치 디텍터 실험 선재 개략도

초전도 선재의 실험을 위해 액체 질소로 냉각 후 초전도 선재의 원래 신호와 켄치 디텍터로 처리된 신호를 비교하기 위해서 VXI시스템을 이용하였다. 원활한 실험을 위해 임계전류보다 125% 높은 80A의 전류를 인가하여 켄치 신호보다 큰 신호를 발생시켰다. 그림 8에 초전도 선재의 켄치 신호를 나타내었다. 측정된 신호는 원래의 신호와 노이즈의 혼합된 신호이고, 또한 사용된 VXI 시스템의 전압 프로브의 감쇄비가 50X인 복합적인 요인에서 완전한 신호가 검출되지 않았다.

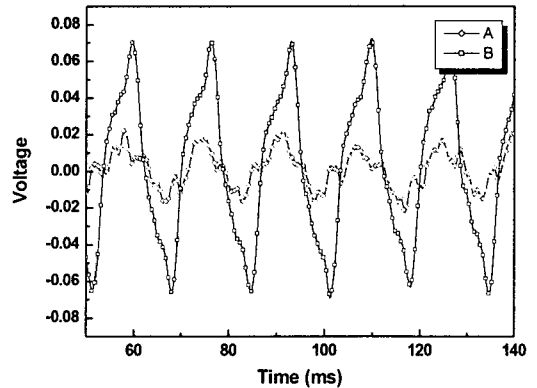


[그림 8] 초전도 선재의 켄치 신호

그림 9는 2개의 서로 다른 채널에 원래의 초전도 선재 신호와 켄치 디텍터를 통과시킨 신호를 나타내었다. B신호가 디텍터를 거친 신호이다. 그림 9의 신호에 사용된 디텍터는 계측 증폭기와 차단 주파수 1kHz인 LPF

만 사용하였다. 원래의 신호보다 디텍터를 거친 신호가 원래의 신호보다 초전도 특성을 잘 나타내어진다. 그림 9에서 디텍터의 신호가 Op-Amp와 LPF의 지연 시간 때문에 원래의 시간 보다 조금 늦게 나타나게 된다. 이러한 시간 지연의 문제는 켄치를 파악하는데 중요한 요인이 되지 않는다.

이론상으로는 계측 증폭기의 이득 때문에 3배의 신호가 나타나야하지만 원래의 신호가 불분명하기 때문에 정확한 비율을 그래프 상에서 확인하기 힘들다. 이를 위해서 증폭 계측기를 이용하여 원래의 신호를 측정하면 수직상으로 디텍터의 성능을 나타낼 수 있다.



[그림 9] 켄치 디텍터를 통한 초전도 켄치 신호

### 3. 결 론

본 논문에서 제안한 켄치 디텍터는 Op-Amp의 증폭과 커패시터와 저항을 조합한 LPF로 만들어진 간단한 회로이다. 간단한 회로인 만큼 저렴하게 만들 수 있는 장점을 가지고 있을뿐더러 원칩으로 만들어진 계측 증폭기와 LPF를 사용하면 소형화를 할 수 있다.

실험에서 보듯이 미약한 초전도 켄치 신호를 증폭하고 노이즈를 제거함으로써 원하는 목적에 부합하는 기능을 가지고 있다.

추후 연구 방향은 신호의 검출에 따른 주변 기기의 동작 제어 등 켄치 보호를 위한 후속 조치들에 관한 연구를 하고자 한다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Sedra/Smith, "마이크로전자회로", Fourth Edition, 2001년, Oxford
- [2] Floyd, "전자회로", Fourth Edition, 1997년, 광문각
- [3] J.L. Augueres, "Quench detector and analyser for a unk superconducting string", IEEE, 1992