

超傳導電流制限器의 스위칭 特性

車 貴 守* 韓 松 隣
 順天鄉大學校 電氣工學科 서울大學校 電氣工學科

Switching Characteristics of
a Superconducting Current Limiter

Guesoo Cha Songyop Hahn

Dept. of EE, SCH Univ.

Dept. of EE, SNU.

ABSTRACT

According to the rapid growth of transmission power, fault current level approaches to the maximum capacity of circuit breaker. This paper has been proposed a superconducting current limiter (SCL) to reduce the fault current to appropriate level. Superconductor for SCL has been examined and design criterion of each triggering method has been shown. Superconducting current limiter was fabricated using thin film and switching characteristics were shown, where thermal and current triggering were adopted.

1. 서 론

전력계통이 대용량화됨에 따라서 고장전류도 이에 비례해서 증가하고 있다. 고장전류가 차단기 차단용량의 한계치에 접근하게 되어, 이를 제한해서 차단기의 부담을 경감시킬수 있는 장치가 요구되고 있다. 또한 전력계통의 송전효율을 향상시키고 대전력의 발생 및 전송을 가능하게 하기 위해 초전도기기가 연구되고 있고 초전도발전기, 초전도변압기, 초전도에너지저장장치 그리고 초전도케이블 등의 기존의 전력기기에 비해서 단락용량이 대단히 적은 초전도전력기기의 실용화가 다가옴에 따라서 高速의 遮斷器 혹은 電流制限器의 필요성이 더욱 절실하게 되고있다.[1],[2]

超傳導電流制限器는 이와같은 요구를 충족시킬수 있으므로, 선진 외국에서는 이미 1960년대부터 대전력용 전류제한기 뿐만 아니라 초전도정류기용 초전도 스

위치, 트랜지스터특성을 갖는 초전도스위치, 초전도에너지저장장치용 초전도 스위치 등에 관한 연구가 지속되어 오고 있다.[3],[4]

국내에서도 초전도발전기, 초전도변압기, 초전도에너지저장장치 등의 초전도 전력기기 분야의 연구가 시작되었거나 계획되고 있으나, 이들 분야의 기초적인 역할을 하는 초전도전류제한기에 관한 연구는 아직 시도되지 않은 실정이다.[5],[6]

본 연구는 이와같은 실정에 비추어 초전도전류제한기의 설계 및 제작에 관한 기초이론을 확립하기 위해서 전류제한기용으로 사용되는 초전도체의 특성을 검토하고 초전도전류제한기를 상전도체로 만들기 위한 트리거방식의 설계조건을 검토한다.

그리고 초전도전류제한기를 제작해서 고장전류 제한특성과 저항변화를 검토 한다. 초전도체로서는 저항율이 높은 박막초전도체를 사용하고 트리거방식은 온도트리거와 전류트리거를 사용한다.

2. 超傳導電流制限器의 特性

초전도기기에서는, 초전도고유리 超傳導-常傳導轉移가 발생한다. 즉, 사고시에 전류가 증가해서 초전도체의 임계전류를 넘으면 초전도체가 상전도체로 바뀌고 이에따라 초전도체는 고저항체가 되고 여기에서의 발열에의해 기기전체로 전이가 파생된다.

사고시에 전류를 차단한 후, 고장을 제거해서 정상전류로 회복된 후에도 냉각에 의해 다시 초전도상태로 돌아오는데 시간이 소요되고, 이 사이에는 전력전송이 불가능하게 된다. 경우에 따라서는 발열에 따르는 국부 온도상승과 이에 따른 냉각매체인 액체헬륨의 증발에 의해서 압력이 급상승해서 기기가 회복불능의 손상을

받을 위험이 있다. 따라서 超傳導電力시스템을 구축하기 위해서는 사고시에도 순간에 전류의 급격한 증가를 억제할 수 있는 한류기를 설치할 필요가 있다.

이와같은 목적으로 超傳導電流制限器가 적합하다. 초전도전류제한기는 초전도체에 가해지는 전류, 전압, 자계 중의 하나 이상이 임계치를 넘으면 초전도체에 저항이 발생해서 전류가 증가하는 것을 막는다. 전력계통에 사고가 발생해서 과도한 단락전류가 흐르는 경우, 초전도-상전도 전이에 의한 켄치(Quench)에 의해서 큰 저항이 발생하고 이 저항에 의해서 단락전류를 제한한다.

초전도에서 초전도-상전도의 상전이를 발생시키는 요인인 電流, 溫度 그리고 磁界는 서로 연관을 맺고 있다. 이 세가지 변수를 따로 이용하거나 적절히 조합하므로 초전도체의 상전이를 임의로 발생시킬 수 있다. 초전도상태와 상전도상태의 가장 큰 차이는 저항의 변화로서, 초전도상태에서는 저항이 없는 데에 반해서 상전도상태에서는 저항이 발생한다. 초전도스위치는 이 두가지 상태의 저항의 차이를 이용한 것으로 초전도상태에서는 스위치가 닫혀 있고, 상전도상태에서는 스위치가 개방되어 있다고 생각할 수 있다.

3. 超傳導電流制限器의 設計條件

초전도전류제한기는 초전도체가 상전이를 해서 상전도체가 되었을 때 발생하는 저항을 이용하는 것이므로, 스위치용으로 쓰이는 초전도체의 성능을 결정짓는 가장 중요한 요인은 상전도가 발생하는 임계온도에서의 저항을 이다. 상전도시 초전도체의 저항은 저항률 ρ 및 전체저항 R 에 의해서 좌우되기 때문에 ρ 와 R을 크게 하기 위한 여러가지 방법이 고안되고 있다. 초전도스위치로 사용되는 초전도체에는 초전도선과 박막초전도체가 있다.

3.1 超傳導線

초전도선을 사용하는 모재로서는 초전도선의 안정성을 높이기 위해서 전기저항율이 낮은 Cu 혹은 CuNi를 사용한다. 이에 따라 상전도 시에 초전도선의 저항율이 낮아지는 결점이 있다. 또한 초전도선은 일반적으로 임계자계가 대단히 높기 때문에 다음에 검토하는 트리거 방식 중에서 자계트리거방식을 사용하기가 어렵다는 문제가 있다.

사고시에 초전도전류제한기에서 발생하는 抵抗을 R 이라고 할 때에, R을 발생시키기 위한 초전도선의 길이

L은 다음식으로 표시된다.

$$L = \rho RS \tag{1}$$

여기에서 S는 초전도선의 단면적이다.

표 1은 NbTi로 제작된 3가지 초전도선의 전기저항율 ρ이다.

표 1 NbTi의 電氣抵抗率 ρ

	구 성	T _c [K]	ρ at T _c [μΩ-cm]	ρ at 300K [μΩ-cm]
1	Nb47%Ti	9.20	56.14	67.82
2	Nb56%Ti	9.91	60.25	74.77
3	Nb37%Ti	9.37	61.49	68.30

위에서 설명한 초전도선의 문제점을 해결하기 위한 방법으로 薄膜超傳導體가 이용된다. 박막초전도체는 석영, 사파이어 또는 유리등의 기판위에 Nb혹은 NbN을 수 마이크로미터의 두께로 입힌 것이다.

박막초전도x L류제한기에서는 초전도선에서 모재로 쓰이는 전기저항율이 낮은 Cu 혹은 CuNi 등의 성분 이 없으므로 상전도시의 저항이 100[μΩ-cm] 이상으로 제작할수가 있어서 초전도선에 비해 2배 이상의 저항율을 갖고, 두께가 대단히 얇으므로 열전달특성이 우수하다.

3.2 트리거방식

초전도전류제한기의 동작시간은 초전도-상전도의 狀轉移에 필요한 시간에 의해서 좌우된다. 상전이는 電流, 溫度 또는 磁界를 臨界值 이상으로 증가시킴으로 발생하고 이를 트리거(Trigger) 라고 한다. 이와 같은 트리거를 신속하게 수행하기 위한 여러가지 방법이 발표되었고 여기서는 온도트리거, 자계트리거 및 전류트리거의 설계조건을 검토한다.

a) 溫度트리거

이 방식에서는 히터를 사용해서 초전도전류제한기의 온도를 임계온도 이상으로 증가시킨다. Δt 시간동안 내부에 축적된 열량 ΔQ는 다음과 같다.

$$\Delta Q = 0.24(ALJ^2/\rho)\Delta t + k(T) \frac{dT}{dx} \Delta t \tag{2}$$

여기서 A는 단면적, L은 길이, J는 전류밀도이고 k는 열전도도로서 온도 T의 함수이다.

초전도전류제한기에서의 온도상승은 Δt 가 熱時定數에 비해서 작은 경우에는 다음과 같다.

$$\Delta T = \Delta Q / (C_p V) \quad (3)$$

여기서 C_p 와 V 는 각각 도체의 비열과 체적이다.

트리거를 발생시키는 최소온도상승 T_{min} 은 초전도체의 임계온도에서 열류의 역화온도를 뺀 $T_c - 4.2$ 이므로

$$T_{min} = \frac{\Delta Q}{C_p V} = \frac{0.24 A I J^2}{\rho C_p V} \Delta t < \Delta T \quad (4)$$

의 관계를 만족하도록 A , J 및 Δt 를 선정한다.

溫度트리거方式的의 長點은 構造가 簡單하고 다음에 설명하는 자계트리거에 비해서 임계자계의 영향을 받지 않는다는 점이다.

b) 磁界트리거

초전도전류제한기에 인접해서 트리거용 코일을 설치함으로써 臨界磁界 H_c 이상을 인가하여 초전도전류제한기를 트리거시킬수 있다.

특히 박막초전도체에 사용되는 1종 초전도체의 임계자장은 대부분이 수백 가우스 정도이므로 비교적 낮은 자계로서도 트리거가 가능하다. 뿐만아니라 수백가우스 이하의 낮은 자계에서도 시간당의 자계변화율(dH/dt)이 커지면 교류손실에 의한 발열이 커져서 트리거가 가능하다.

트리거용코일의 動作速度를 증가시키기 위해서는 자기인덕턴스를 최소로 해야하고 이를 위해서는 bifilar구조를 이용한다. 트리거용코일의 구조에는 솔레노이드구조와 토로이드구조가 있으나 솔레노이드구조가 적합하다. 그 이유는 초전도전류제한기에 가해지는 자계의 방향이 수평방향보다는 수직방향이 더 효과적이기 때문이다.

트리거용 솔레노이드코일은 내반경이 a , 외반경이 b 이고 길이가 $2l$ 일 때에 코일의 中心에서의 磁場 B_0 가 다음의 조건을 만족하도록 설계해야 한다.

$$B_0 = \mu_0 J a \ln \left[\frac{(b/a) + \sqrt{(b/a)^2 + (L/a)^2}}{1 + \sqrt{1 + (L/a)^2}} \right] \Delta t > B_0 \quad (5)$$

c) 電流트리거

초전도전류제한기의 양단에 전류펄스를 올리면 이 부분의 전류가 임계전류 밀도 J_c 를 넘어서 상전도가 발생한다. 이것이 전류트리거이고 트리거용 전류펄스는 커패시터에 충전된 에너지를 이용한다.

트리거시에 초전도체에 흐르는 전류밀도를 J 라고 하면 J 는 정상전류 J_0 와 트리거전류 J_t 의 합으로 표시되고

$$J = J_0 + J_t = J_0 + \frac{V}{R} \left[\frac{1 - \text{EXP}(-L/R)t}{A} \right] > J_c \quad (6)$$

의 조건을 만족해야 한다. 식에서 보는 바와 같이 J 는 트리거회로의 저항 R , 인덕턴스 L 및 커패시터의 충전전압 V 에 의해서 결정된다.

4. 薄膜超傳導電流制限器의 스위칭 特性

$Nb1XZr$ 로 만들어진 박막초전도체를 bifilar로 배치해서 製作한 초전도전류 제한기의 스위칭특성을 보인다.

4.1 超傳導電流制限器

초전도전류제한기에 사용되는 초전도체로서는 薄膜超傳體를 사용한다. 사용된 박막초전도체는 $Nb1XZr$ 로 제작되어 있고 두께는 $20[\mu m]$ 이다.

스위치를 좁은 공간내에서 길게할 때에 발생하는 인덕턴스를 최소로 할 수 있는 無誘導構造를 택했다. 그림 1과 같이 초전도체를 배치하면 정방향과 역방향의 전류에서 발생하는 자속이 서로 상쇄되어서 인덕턴스가 최소로 된다.

표 2. 초전도전류제한기의 사양

재질	$Nb1XZr$	길이	1.3[m]
폭	4[mm]	상전도저항	52[Ω]
임계전류	10 [A]		

4.2 트리거 요소

온도트리거 장치이외에 전류트리거특성을 관찰하기 위해서 전류트리거 장치를 설치한다. 전류트리거를 위해서는 커패시터를 사용한다.

4.3 特性實驗

초전도전류제한기의 스위칭특성을 실험하기 위한 實驗裝置의 構成은 그림 2와 같다. 사용된 전원장치는 정전압특성과 정전류특성을 선택할 수 있는 초전도 마그네트용 직류공급기로서 최대전압은 5[V]이고 최대전류는 100[A]이다.

부하로서는 1.0[Ω]짜리 저항을 사용했다. 초전도전류제한기는 계통에 고장이 발생했을때에 동작하게 되므로, 계통고장상태를 만들기 위해서 부하용 저항을 단락시켰다.

그림 3은 히터를 사용해서 트리거를 실시한 경우로서 a)는 전류이고 b)는 스위치요소의 저항변화이다. 전류는 정상상태에서 3.5[A]이고 부하용 저항을 단락했을 때에 17[A] 까지 증가했다가 스위치요소의 저항증가에 따라서 9[A]까지 감소한다.

그림 3 에서 볼수 있는 바와 같이 초전도전류제한기가 선로에 연결되므로 인해서 고장전류의 크기를 5배에서 2.5배 정도로 감소시킬 수 있다.

스위치특성 중에서 가장 중요한 요인의 하나인 동작速度를 그림 4를 통해서 알 수 있다. 부하가 단락된 후에 스위치의 저항이 증가하기까지는 60[μsec] 정도가 소요되고 고장 전류의 크기가 3배이하로 감소하기까지는 대략 300[μsec]정도가 소요된다.

5. 결론

超傳導電流制限器용으로 사용가능한 초전도체의 특성을 檢討하고, 트리거 방식에 따르는 設計條件을 提示했다. 박막초전도체로 초전도전류제한기를 製作해서 特性實驗을 行했다. 트리거방식으로는 온도트리거방식과 전류트리거 방식을 사용했다.

실험에 의해서 고장발생시 전류는 초전도전류제한기가 있을 때에 5배가 증가하는 것에 비해서, 있을 때에는 2.5배 증가에 그치는 것을 확인했다. 이 증가율은 초전도체의 길이를 증가시키면 임의의 수준까지 제한할 수 있다.

참 고 문 헌

1. A. Fevrier et. al., "Preliminary tests on a Superconducting Power Transformer," IEEE Trans. Magnetics, Vol.24, No.2, pp.1477-1480, March, 1988
2. R. J. Loyd and S. M. Schoenung, "Design Advances in SMES for Electric Utility Load Leveling," IEEE Trans. Magnetics, Vol.MAG-23, No.2, pp. 1477-1480, March 1988
3. R. J. Mulder, "A High-Power Magnetically Switched Superconducting Rectifier Operating at 5 Hz," IEEE Trans. Magnetics, Vol.MAG-23, No.2, pp.595-598, March 1987

4. J. D. G. Lindsay, "Development of a Superconducting Switch for SMES," IEEE Trans. Magnetics, Vol.MAG-11, No.2, pp.594-597, March 1985
5. Songyop Hahn et. al., "Finite Element Modeling of Electromagnetic Shielding in Superconducting AC Generator," Magnet Technology-11, Tsukuba, Japan, Aug. 1989, In Print
6. Guesoo Cha, Songyop Hahn and Jongsoo Won, "Asymmetrically Controlled 6 Pulse Converter for SMES," IEEE IAS Annual Meeting, Denver, USA, pp.710-715, Sep. 1986

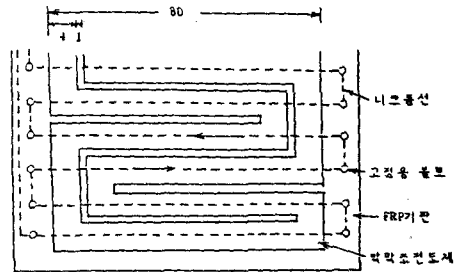


그림 1. 초전도전류제한기의 구조

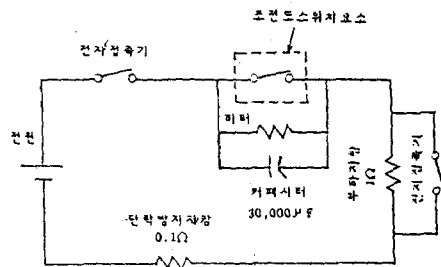


그림 2. 실험회로의 구성

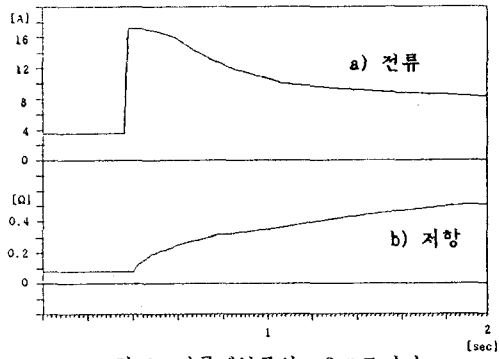


그림 3. 전류제한특성, 온도트리거

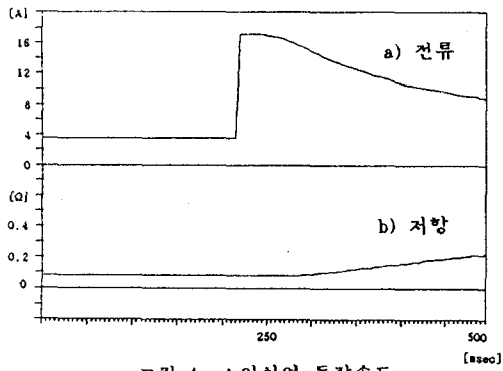


그림 4. 스위치의 동작속도