

## 자기결합형 고온초전도한류기의 과도전류 해석

\*주민석, 추 용, 임도현, 고태국  
연세대학교 전기공학과

### The Analysis of Transient currents in a Magnetic coupling High-Tc superconducting Fault Current Limiter

\*Min-Seok Joo, Yong Chu, Do Hyun Yim, Tae-Kuk Ko  
Dept. of Electrical Engineering, Yonsei University

**Abstract** - In this paper, we investigated transient fault currents in a magnetic coupling High-Tc superconducting current limiter(HCL). It has an important effect on the reliability and stability of the power system. In order to analyze transient fault characteristics of HCL, we fabricated a magnetic coupling HCL and tested it in different fault conditions. An important parameter of design and manufacture which makes HCL inherently reliable is reduction of inrush fault currents. Without inrush fault currents, the currents flowing under such conditions can be limited to a desired-value within one cycle. Inrush fault current depends on saturation, normal spot propagation velocity, turns ratio and the fault angle.

### 2. 동작특성해석

#### A. 자기결합형 고온초전도한류기

자기결합형 고온초전도한류기(HCL)는 1차측의 동선과 2차측의 단락된 고온초전도링으로 구성되어있으며 이는 서로 자기적으로 결합되어있다. HCL이 정상상태에서 동작하고 있을 때, 초전도 링의 차폐전류로 인해 HCL의 임피던스는 매우 작다. 사고 중에는 YBCO 링에 유기된 전류가 임계전류를 초과하면서 HCL의 임피던스의 급격한 증가를 초래한다. 제한된 사고전류는 아래와 같다.

$$I_{LIM} = \frac{V_0}{\sqrt{(1/j\omega L_m)^2 + (1/a^2 R_n)^2}} \quad (1)$$

단,  $\omega$  는 각주파수,  $V_0$  는 전원전압,  $R_n$  초전도링의 상전도 저항,  $L_m$  은 여자인덕턴스 'a' 는 권선비이다.

### 1. 서 론

전력계통에서 전력 이용량의 증가는 사고전류수준을 증가시킨다. 이러한 높은 사고전류의 불안한 영향을 제거하기 위해서 새로운 전류제한기가 개발되었다. 초전도상태에서 상전도 상태로의 비선형 전이특성을 이용한 초전도사고전류제한기는 전력계통에서 회로를 보호하는 소자로서 중요한 역할을 할 수 있다. 최근에 냉각비용의 절감과 안정도가 뛰어난 고온초전도체를 이용한 다양한 모델들이 소개, 제안되었다[1]-[5]. 유도성 형태의 한류기는 전류도입선이 없기때문에 접촉저항에 의한 손실과 열전도손실이 없다. 한류기는 회로소자를 보호하기 위해서 공급전원과 전력선 사이에 직접 직렬연결한다. 적절한 초전도전류제한기는 어떠한 제어장치 없이 매우 빠르게 자동적으로 스위칭 작용을 하여야하고 과도전류가 너무 커지는 것을 방지하여야 한다. 사고 후에 시스템에 흐르는 전류와 전압의 값을 결정하는 것은 매우 중요한 문제이며 한류기는 사고의 치명적인 영향을 최소화하고 감지하여야 하는데 초점이 맞춰져야한다. 만약 그것의 임피던스가 사고전류를 제한할 수 있을 정도로 크지 않다면 전력계통에서 파괴적인 손상이 일어날 수 있다. 빠른 시간 안에 사고를 없애는 것은 안정도와 다른 원인으로 매우 중요하기 때문에, 순간돌입전류를 감소시키는 것은 중요하다.

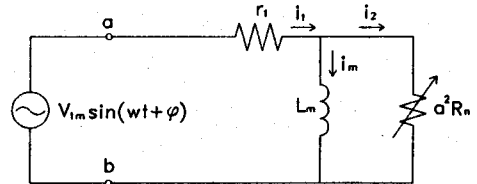


그림 1. 과도전류를 구하기 위한 간단한 등가회로

#### B. 과도전류

과도전류는 코어에서의 포화, 사고각 그리고 고온초전도링에서의 느린 켄치현상 등 몇몇 복잡한 요인이 결합되어있다. 정상상태시 여자 전류는 정상전류의 무시될 정도의 양이다. 그러나 과도기간에는 여자전류가 매우 크게 증가할 가능성이 있다. 회로를 간단히 하기 위해서 누설인덕턴스와 core-loss 저항을 무시하면 HCL의 근사동가모델은 그림 2에서 돌입전류를 계산할 수 있다. 자속을 구해보면 아래와 같은 식이 된다.

$$\phi(t) = \phi_m [ \sin(\beta - \varphi) e^{-(r/L_m)t} + \sin(\omega t + \varphi - \beta) ] \quad (2)$$

단,  $\beta = \tan^{-1}(\omega L_m Z / r_1)$ ,

$$Z = (r_1 + a^2 R_n) / a^2 R_n,$$

$$\phi_m = \frac{V_{1m} \cdot L_m}{N_1 \sqrt{r_1^2 + (\omega L_m Z)^2}}.$$

$R_n$ 은 상전도영역전파속도에 의존하는 초전도링의 상전도저항이다.

$\phi_m + \phi_r$ 의 자속에 대하여  $\phi_m + \phi_r - B_s S$  [Wb]가 포화치 이상의 자속이 된다. 이와 같은 잉여의 자속에 대해서는 철심이 포화되고  $L_m$ 은 급격히 감소한다. 이때 순간입전류의 최대치는 다음과 같다.

$$i_{max} = N_1(\phi_m + \phi_r - B_s S) / L_0 \quad [A] \quad (3)$$

단,  $B_s$ 는 포화자속밀도,  $S$ 는 코어의 단면적,  $L_0$ 은 공심 리액터의 인덕턴스,  $\phi_r$ 은 코어내에 존재하는 잔류자속이다. 교변(sinusoidal) 공급전압이 크기가 0인 순간의 투입 그리고 잔류자속이 양(+)의 최대크기일 때 가장 최악의 경우가 된다.

### 3. 실험

양질의 시편을 만들기 위해서, MPMG[6] 공정이 도입되었다. 효과적인 피닝센터의 증가와 약결합 문제를 극복하기 위한 MPMG법의 도입으로 YBCO 링의 높은 임계전류  $J_c$ 를 얻었다.  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ ,  $CuO$ 을 시작분말로 하여  $Y_{1.6}Ba_{2.3}Cu_{3.3}$ 의 조성으로 공기중 900°C에서 24시간 하소하였고 1400°C에서 용융시킨 후, 차거운 구리 판으로 납작하게 급랭시켰다. 용융-급랭된 시편은 미세한 분말로 분쇄되었고 균일하게 혼합되었다. 그후 분말은 원하는 형태의 링으로 프레스한 후 1100°C에서 20분 동안 가열한 후 1000°C까지 가능한 한 빨리 냉각시킨 후 940°C까지 1°C/h의 비율로 서냉시킨다. 마지막으로 링은 48시간동안 산소분위기에서 후열처리하였다. YBCO 링의 제원은 외경이 36mm, 내경이 23mm, 높이가 2.8mm. YBCO 링의 수송임계전류의 측정은 유도성, 무접촉법을 이용하였다. 측정된 시편의 임계전류는 240~250 A<sub>rms</sub>이다.

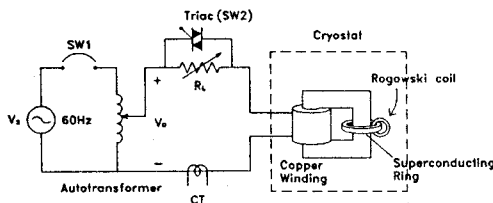


그림 2. 고온초전도환류기의 모의실험도

그림 2에서 보여지는 시험회로는 공급전원으로 사용되는 자동변압기와 가변 부하저항과 HCL로 구성된다. HCL은 권선 수의 작은 변화를 위해 1차권선에 직렬로 전압 탭을 내었다. 다양한 사고조건을 시뮬레이션하기 위해 트라이악으로 구성된 사고각-제어기를 부하저항에 병렬로 연결하였다. 트라이악의 트리거각을 제어함으로써 다양한 사고각이 시험되었다. 모든 시험은 10V의 실효치를 갖는 60Hz의 공급전원에 의해서 수행되었다. 코어의 제원과 HCL의 설계파라미터는 표1에 나와있다.

표 1. 고온초전도환류기의 제원

Parameter		Unit
Superconducting Ring		
$\phi_o$	(outer diameter)	36 mm
$\phi_i$	(inner diameter)	23 mm
$l_{sc}$	(total length)	92.67 mm
$A_{sc}$	(cross section)	19.6 mm <sup>2</sup>
Core		
$d_{core}$	(total length)	356 mm
$A_{core}$	(cross section)	256 mm <sup>2</sup>
$N_1$	(total turns)	80, 100 turns
$R_p$	(resistance)	0.25Ω, 0.32Ω
$L_m$	(magnetizing inductance)	1.32 H (no saturation)

### 4. 실험 결과 및 토의

과도시 사고전류는 실험회로에서 어떤 값으로 제한된다. 과도돌발사고전류는 그림 3에서 보여지며 부하저항 18Ω이고 권선수가 80이고, 위상각이 각각 0도, 135도일 때 전류피크치는 70A이다. 270도에서는 과도전류의 피크치는 13A로 줄어들었으며 이는 사고각에 따른 DC 자속량의 차이와 상전도영역전파속도의 차이에 기인한다.

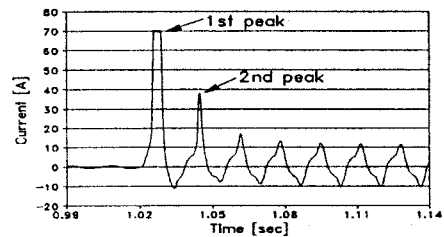


그림 3(a). 사고전류파형 ( $\phi = 0^\circ$ ,  $Z_L = 18\Omega$ , 80 turns)

식 (2)와 식 (3)에서 피크전류의 크기는 위상 각이 2, 3사분면에 있을 때 음의 값을 가진다.

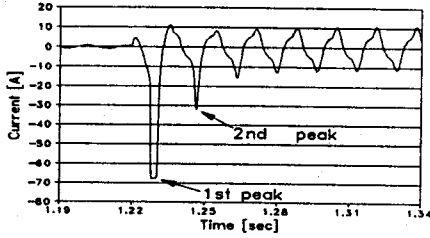


그림 3(b). 사고전류파형 ( $\phi = 135^\circ$ ,  $Z_L = 18\Omega$ , 80 turns)

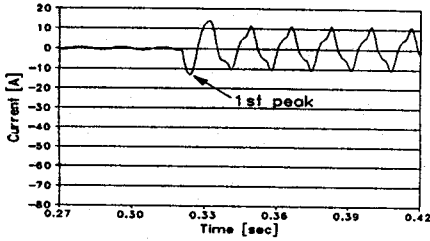


그림 3(c). 사고전류파형 ( $\phi = 270^\circ$ ,  $Z_L = 18\Omega$ , 80 turns)

1주기후 두 번째 피크는 위상각이 증가할 수록 감소 하며 이는 상전도 상태로의 빠른 전환에 의한 저항 값의 변화에 기인한다. 2주기후, SFCL은 리액터처럼 사고전류를 여자 인덕턴스에 의해 결정되는 전류 값으로 제한된다. 그림 3(c)에서 사고전류피크가 생기기전에 만족할 만한 제한이 이루어졌고 저항형이기 보다는 유도형이다. 결과적으로 본 실험에서는 과도돌발사고전류는 상전도전파속도와 코어포화와의 사고각에 의존한다는 것을 확인하였다.

## 5. 결 론

이 논문에서는 HCL의 기본기능과 과도사고전류가 회로 상에서 흐르는 전류에 어떠한 영향을 미치는 가를 보였다. 돌입전류를 감소시키기 위해서 몇 가지 방법을 제안할 수 있는데, 그중 하나는 코어의 잔류자속을 감소시키는 것이며 다른 하나는 코어의 구조를 변경함으로써 보다 높은 전류에서 자기포화가 이루어지게 하는 것이다. 잔류자속의 감소는 interleaved lamination된 코어를 사용하고 코어에 air-gap을 도입함으로써 얻어진다. SFCL의 2차속전류가 임계전류에 보다 가깝게 설계해야 쥘치가 빠르게 나타나며 이것은 권선수의 증가, 부하저항의 감소 등이 있으나, 초전도체의 임계전류의 조정이 제일 효과적이다. 현재까지 공정상 임계전류를 마음대로 조정하기는 어려우며 초전도체의 단면적감소 또는 산소열처리시간의 조정으로 어느정도 얻어질 수 있다. 하지만 돌입전류가 없이 효과적으로 스위치가 닫히는 사고각에 대한 제어법은 없다.

## 참 고 문 헌

- [1] Yu.A.Bashkurov, et al., "Current-limiting reactor based on High-Tc superconductors," IEEE Trans. Mag. Vol. 27, pp.1089-pp.1092 Mar. 1991.
- [2] L.S.Fleishman, et al., "Design considerations for an inductive High Tc superconducting fault current limiter," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 3, pp.570-pp.573 Mar. 1993.
- [3] V.M.Vladimir, et al., "Testing of an inductive current-limiting device based on High-Tc superconductors," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 3, pp.3033-pp.3036 Sept. 1993.
- [4] T.Ikeami, et al., "Application of High-Tc superconductor to current limiting devices," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 3, pp.566-pp.569 Mar. 1993.
- [5] M. Lindmayer, et al., "Resistive fault current limiters with HTSC-measurements and simulation," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 3, pp.884-pp.888 Mar. 1993.
- [6] M. Murakami, et al., "Processing of bulk YBaCuO," Supercond. Sci. Technol. 5 pp.411-pp. 1992.
- [7] R. Spyker, et al., "Measurement of transport critical current of Y-Ba-Cu-O using an inductive method," IEEE Trans. Mag. Vol. 27, pp.1093-pp.1096 Mar. 1991.
- [8] M.K. Chyu and C.E. Oberly, "Effects of transverse heat transfer on normal zone propagation in metal-clad high temperature superconductor coil tape," Cryogenics, Vol. 31, pp.680-pp.686, July, 1991.
- [9] V.S. Vystsky, et al., "Normal zone origination and propagation in superconducting wire and fast changing current," IEEE Trans. Mag. Vol. 30, pp.1998-pp.2001 July. 1991.
- [10] J. Schwartz, et al., "Dynamic stability of edge-cooled superconducting tapes," Cryogenics Vol 21, pp.21-pp.32 Jan. 1991.
- [11] V.S. Vystosky, et al., "Quench characteristics of a two-strand superconducting cable and its influence of its length," IEEE Trans. Mag. Vol. 28, pp.743-pp.750 Jan. 1992.