

## The Analysis of the Fault Currents According to Core-Saturation and Fault Angles in an Magnetic Shielding Type High-Tc Superconducting Fault Current Limiter

### 고온초전도한류기가 도입된 회로의 철심 포화와 사고각에 따른 사고전류 해석

Chanjoo Lee, Seungje Lee, Mihye Jang, Taejung Kim\*, Okbae Hyun\*\* and  
Taekuk Ko

이찬주, 이승제, 장미혜, \*김태중, \*\*현옥배, 고태국

134, Shinchondong, Seodaemun-gu, Seoul, Korea, Applied Superconductivity Laboratory,  
Yonsei University

\*Sungnam, Kyungkido, Sungnam Polytechnic College

\*\*Yusong, Taejeon, Korea, Power Utilization Technology Group, Power System  
Laboratory, Korea Electric Power Research Institute (KEPRI)

서울특별시 서대문구 신촌동 134 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 초전도연구실

\*경기도 성남시 성남기능대학 생산자동화학과

\*\*대전광역시 유성구 문지동 한국전력연구원 전력계통연구실 전기이용그룹

본 논문은 고온초전도한류기가 투입된 회로에 사고가 발생했을 경우 사고각에 따른 사고전류의 패턴에 관한 연구이다. 계통에 심각한 영향을 끼치는 이러한 사고전류의 순간 특성을 해석하기 위해 유도형 고온초전도한류기를 직접 제작하였으며 임의로 다른 각도에서 사고를 발생시켜 실험하였다. 임의의 사고각을 위해 triac으로 구성되어 있는 위상각제어 및 사고 발생기를 부하와 직렬로 연결하였다. 또한, 순간적으로 큰 사고전류의 유입은 철심을 포화시키기에 충분하며 철심의 포화로 인해 상대투자율이 작아짐으로서 고온초전도한류기의 임피던스가 작게 발생하게 된다. 본 논문에서는 이러한 영향으로 인한 사고전류의 패턴에 관하여 연구하였다.

## 1. 서론

최근의 전기 이용의 급속한 증가로 인해 사고 전류 레벨 또한 같이 증가하고 있다. 사고 전류에 의한 불안정한 현상을 줄이기 위해 여러 가지 형태의 사고전류 제한기가 개발되어 왔다. 초전도 사고전류 제한기는 초전도 상태에서 상전도 상태로 전이하는 비선형적인 특성을 이용하여 사고전류를 제한하게 된다. 최근에는 고온초전도체

를 이용하여 낮은 냉각 비용으로도 운전이 가능한 고온초전도 사고전류 제한기가 개발되고 있다.[1]-[6]

회로 소자를 보호하기 위해 한류기는 변압기와 차단기 사이에 직렬로 연결되어 있다. 정상 상태에서는 한류기에 의한 전력 소모는 가능한 한 낮아야 하며, 사고가 발생하면 갑작스런 임피던스 변화를 일으켜 사고전류를 제한한다. 한류기가 설치되는 계통에 따라 사고 전류의 크기는 상당

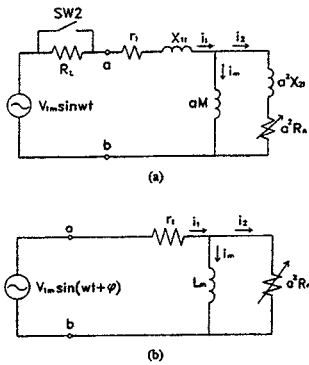


그림 1. (a) 고온초전도한류기의 개략적인 등가회로. (b) 사고전류 계산을 위해 단순화된 회로

Fig.1. (a) Approximate equivalent circuit of the SFCL (b) Simple circuit for calculating the fault current

히 차이가 있으며 그러한 차이에 의해 한류기의 종류 및 크기가 결정되어 진다. 따라서 사고 전류에 따른 한류기의 동작원리를 파악할 필요가 있으며 그 중 하나가 사고가 나는 여러 각도에서의 사고전류 변화를 해석하는 것이 필요하다. 또한, 자기차폐형 고온초전도한류기의 경우 철심에서의 포화로 인한 임피던스의 감소가 우려되며 이로 인해 급속한 사고전류의 제한이 이루어지지 않을 수 있다.

## 2. 고온초전도한류기의 개념

### 2-1. 유도형 고온초전도한류기

유도형 고온초전도한류기는 구리 권선과 초전도체가 철심으로 자기적으로 연결된 형태로 각각 1차 권선과 2차 권선의 역할을 한다. 정상 상태의 경우 초전도체에 의해 1차 권선에서 발생하여 철심으로 투과되는 자장은 모두 상쇄되어 임피던스는 0이 된다. 사고가 발생하면 초전도체에 흐르는 전류가 임계전류를 넘게되고 따라서 철심에서의 자장은 다시 나타난다. 이 때 임피던스가 발생하며 이 것으로 사고전류는 제한된다. 그림 1은 유도형 고온초전도한류기의 회로를 간단히 한 모델이다. 그림 1 (b)는 사고가 발생할 때의 사고 전류를 계산하는 회로이며 그에 의한 사고 전류의 식은 아래와 같다.

$$I_{Lim} = V_1 \cdot \sqrt{(1/\omega a M)^2 + (1/a^2 R_n)^2}, \quad (1)$$

for  $r_1 \ll Z_{ab} (= j\omega a M / a^2 R_n)$

여기서  $\omega$ 는 각도,  $V_1$ 은 공급전원,  $R_n$ 은 고온초전도체의 상전도 저항,  $M$ 은 상호 인덕턴스,  $a$ 는 턴수를 나타낸다.

### 2-2. 사고 전류

사고 상태에서 발생하는 갑작스런 사고 전류를 표현하기 위해서는 철심의 포화, 초전도체의 켈치 등 상당히 여러 가지 요소들이 복잡하게 얽혀 있는 함수가 될 것이다. 고온초전도한류기의 최대 정격을 결정하기 위해서나 전력 기기들을 보호하기 위해서 사고 전류의 최대 크기를 알아내는 것이 중요하다.

간단히 하기 위해 누설자속에 의한 임피던스는 생략하고, 철심에서의 와전류 손실 또한 생략한다. 그림 1(a)는 정상상태에서의 고온초전도한류기가 설치된 등가회로이며, (b)는 사고 발생시의 등가회로이다. 사고각에 의한 효과를 해석하기 위해 공급전원을  $V_{1m} = \sin(\omega t + \phi)$ 로 대체한다.

$$v_1 = r_1 i_1 + N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

$$i_1 = i_m + i_2 \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 결합하고 Laplace Transform을 시키면 자속  $\phi(t)$ 에 관한 식을 구할 수 있다.

$$\phi(t) = \phi_m \cdot [\sin(\beta - \phi) e^{-(r_1 L_m Z) t} + \sin(\omega t + \phi - \beta)] \quad (4)$$

여기서

$$\beta = \tan^{-1}(\omega L_m Z / r_1), \quad Z = (r_1 + a^2 R_n) / a^2 R_n,$$

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

이다.

일단 자속이 최고점에 도달하면 즉, 포화점에 도달하면 자화 인덕턴스  $L_m$ 은 급격히 줄어들게 된다. 이 때의 철심에서 나타나는 최대 자속은  $\phi_m + \phi_r - B_s S$ 이며 전류의 최고값은 아래와 같다.

$$i_{peak} \approx N_1(\phi_m + \phi_r - B_s S) / L_0 \quad (5)$$

여기서,  $\phi_m$ 은 최대 자속 크기이며,  $B_s$ 는 철심의 포화 자속 밀도,  $S$ 는 철심의 단면적,  $L_0$ 는 철심이 포화되었을 경우의 임피던스,  $\phi_r$ 은 잔류 자속의 크기이다.

식 (5)에서 사고 전류가 가장 크게 발생하는 경우는 전압이 0이 될 때와 잔류자속이 최대일 때 나타난다는 것을 알 수 있다.

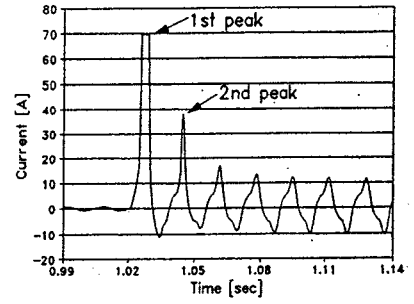
표 1. 한류기 특성값  
Table I. Limiter Characteristics

Parameter	Unit
<b>Superconducting Ring</b>	
$\phi_o$ (outer diameter)	36 mm
$\phi_i$ (inner diameter)	23 mm
$l_w$ (mean length)	92.67 mm
$A_w$ (cross section)	19.6 mm <sup>2</sup>
<b>Iron Core Reactor</b>	
$d_{core}$ (mean length)	338 mm
$A_{core}$ (cross section)	256 mm <sup>2</sup> (leg), 512 mm <sup>2</sup> (yoke)
$N_r$ (variable turns)	80, 100 turns
$R_r$ (resistance)	0.09 $\Omega$ , 0.12 $\Omega$
$L_m$ (magnetizing inductance)	31.3 mH

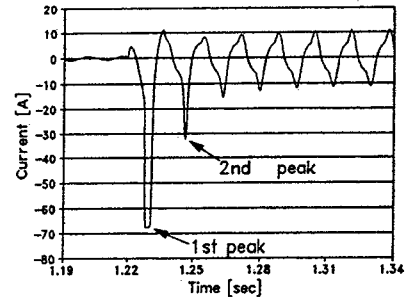
### 3. 실험

실험 회로는 공급전원, 부하저항, 고온초전도한류기 그리고, 사고 발생기로 나뉘진다. 고온초전도한류기의 1차 권선은 턴수의 변화를 줄 수 있도록 탭을 내었다. 초전도 링은 철심의 다른 쪽 레그에 위치시켰으며 초전도체에 흐르는 전류를 측정하기 위해 로고우스키 코일과 함께 위치하였다. 사고 발생기는 사고의 각도를 조절할 수 있도록 triac으로 구성되어 있으며 부하저항과 병렬로 연결되어 있다. 모든 실험은 60Hz, 10V의 공급전원에서 수행하였다. 철심 및 고온초전도한류기의 변수는 표 1과 같이 나타난다. 와전류 손실을 줄이기 위해 철심은 절연된 강판을 적층시켜 제작하였다. 고온초전도체는 YBCO로 MPMG 기법[7]으로 제작하여 약결합 문제를 해결하였으며 pinning center를 효과적으로 도입하였다. 제작된 YBCO 링은 임계전류가 약 240~250 Arms이다.

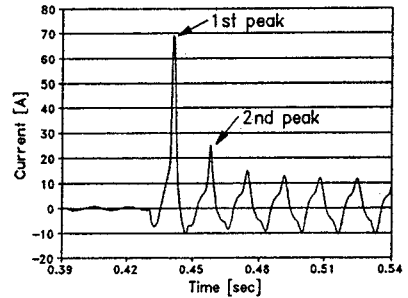
### 4. 실험 결과 및 토의



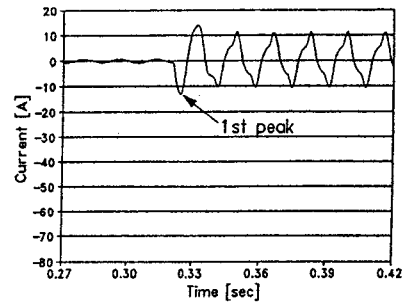
(a)  $\psi = 0^\circ$



(b)  $\psi = 150^\circ$



(c)  $\psi = 315^\circ$



(d)  $\psi = 270^\circ$

그림 2. 단락실험 파형 ( $R_L = 18\Omega$ , 80turn)

Fig. 2. Wave form of short circuit test

실험 데이터는 사고전류가 시험회로에서 어떤 값으로 제한됨을 보여준다. 그림2에서 보여지듯이 과도사고전류는  $0^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $315^\circ$  의 각도범위에서 70A의 최대값을 가진다. 이때 부하저항은  $18 \Omega$ 이고 1차권선의 턴수는 80턴이다.  $270^\circ$  에서 과도사고전류는 13A로 떨어졌으며, 이는 주로 사고각의 변화에 따른 dc flux의 변화와 상전도영역의 전파속도에 기인한다. 식(4)와 (5)에서 보듯 phase angle이 2사분면 또는 3사분면에 있을 경우 최대 전류는 음의 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 1주기 후에 2차 최대전류는 phase angle이 증가함에 따라 감소하며, 이는 각각 다른 자속감쇄율과 상전도화에 의한 각기 다른 저항에 의한 것이다. 2주기 후에 SFCL은 자기인덕턴스  $L_m$ 에 의해 결정된 전류로 사고전류는 감쇄한다. 그림 2(d)에서 저항에 제한이라기 보다는 유도적인 제한으로 사고전류가 바람직하게 제한되었다. 그림 2(a)-(c)에서 보듯이 각각 최초의 최대 전류는  $\omega t$ 가  $120^\circ$ ,  $330^\circ$ ,  $220^\circ$  일 때 발생하였다. 계산된 최초의 사고전류의 값은 240, -208, 187A였으며, 두 번째 최대 전류는 각각  $\phi$ 가  $0^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $315^\circ$  에서 48, -30, 19A이다. 실험 데이터와 계산된 데이터사이의 차이점이 발견되는데 이는 주로 단순화된 모델을 사용하였기 때문이다. 그 모델에서는 누설 자속과 hysteresis 특성이 제외되었다.

## 5 결론

본 논문에서는 고온초전도한류기의 기본적인 기능에 대해 실험을 통해 보여주었고 사고전류의 최대값이 회로의 사고전류를 제한하는데 있어 어떤 영향을 끼치는지 살펴보았다. 사고전류의 최대값을 낮추는 몇 가지 방법을 유추할 수 있는데, 첫 번째는 잔류 자속이 적은 철심을 사용하는 것이며, 두 번째는 고온초전도체가 빠른 퀀치를 일으키도록 하는 것이다.

잔류 자속이 적은 철심은 철심을 절연시킨 강판을 이용하여 구성하면 해결할 수 있으며, 빠른 퀀치가 일어나도록 하는 것은 고온초전도한류기의 정상 상태에서의 동작 전류를 적당히 맞추어 고온초전도체에 흐르는 전류가 임계전류보다 약간 작은 정도로 설정해 주면 된다.

## 참고문헌

- [1] Yu. A. Bashikirov, L.S. Fleishman, T.Yu. Patsayeva, A.N.Soboler, and A.B.Vdovin, "Current limiting reactor based on high-Tc superconductors", IEEE Trans.Mag., vol. 27, pp. 1089-1092, Mar. 1991
- [2] L.S.Fleishman, Y.Brissette, and J.R.Cave, "Design considerations for an inductive high Tc superconducting fault current limiter", IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol.3, pp.570-573, Mar., 1993
- [3] V. M. Vladimir, V. L. Sokolovsky, M.Slomin, G.E.Sheter and G.S.Grader, "Testing of an inductive current limiting device based on high Tc superconductors", IEEE Trans.Appl.Superconduc. vol.3, pp3033-3036, Sept. 1993
- [4] L.Salasoo, A.F.Imece, R.W.Delmerice, and R.D.Wyatt, "Comparison of superconducting fault current limiter concepts in electric utility application", IEEE Trans. Appl. Superconduc. vol.5, pp. 1079-1082, June 1995
- [5] W.Paul, T.Baumann, J.Rhyner, and F.Platter, "Tests of 100kW high Tc superconducting fault current limiter", IEEE Trans. Appl. Superconduc. vol.5, pp.1059-1062, June 1995
- [6] J.X.Jin C. Grantham, H.K. Liu and S.X.Dow, "Prototype fault current limiter with a high Tc superconducting coil", IEEE Trans. Appl. Superconduc. vol. 5, 00.1051-1054, June 1995
- [7] M.Murakami, "Processing of bulk YBaCuO", Supercond. Sci.Technol., Vol. 5, pp.411-429, 1992