

## 고온초전도체를 이용한 차폐유도형 전류제한기의 설계

임성훈, 강형곤, 박경국, 한태희, 조동언, 한병성  
전북대학교 전기공학과

### design of shielded inductive SFCL made of high T<sub>c</sub> superconductor

Sung-Hun Lim, Hyeong-Gon Kang, Kyung-Kuk Park, Tae-Hee Han,  
Dong-Eon Cho, Byoung-Sung Han  
Chonbuk National Univ., Dept. of electrical eng.

**Abstract** - In this paper, the characteristics of the shielded inductive superconducting fault current limiter was designed and simulated. Parameters of design for superconducting tube, core and primary coil were first determined. And then according to the system characteristics such as load resistance, fault angle and source voltage, the simple power system composed of shielded inductive FCL was simulated by computer-aided numerical analysis. The flowing currents under the fault condition can be limited to about 10 A.

### 2.2 차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 모델 설정 및 설계파라미터결정

Shielded inductive SCFCL의 동작특성을 시뮬레이션하기 위해 설계해야 할 요소는 SFCL의 임피던스, 1차측의 턴수 그리고 코어와 튜브형고온초전도체의 크기와 길이이다. 또한 제한기의 스위칭시간은 켈치현상과 밀접한 관계가 있기 때문에 상전도 영역 전이 속도를 입력조건에 포함시켜 사고각에 따른 제한기의 전류제한특성을 살펴보았다. 앞에서 언급한 특성을 고려하여 얻게 되는 등가회로는 그림 2와 같고 등가회로에 대한 제한기의 지배방정식은 아래식과 같다.

### 1. 서 론

본 연구논문에서는 고온초전도의 응용분야중 가장 실현가능성이 높은 것으로 기대되는 고온초전도를 이용한 새로운 형태의 사고전류제한기에 관한 것으로 이를 전력 시스템에 연결하였을 경우 부하저항, 사고각 그리고 전원전압크기에 따른 차단특성을 컴퓨터시뮬레이션을 통해 해석함으로써 차단기로서 동작할 수 있음을 확인하였다. 회로차단기가 없는 경우 1000A가량의 큰 전류가 흘러 계통이 보호되지 않지만 본 논문에서 제안한 차단기를 설치하였을 경우 사고전류를 성공적으로 10A정도로 제한됨을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안한 고온초전도전류제한기를 단순화된 계통에 설치하고 컴퓨터시뮬레이션을 통해 고온초전도제한기의 특성해석과 함께 실제 제작을 위한 설계파라미터를 얻고자 한다.

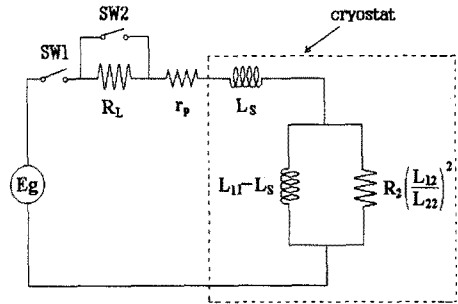


그림 2. 차폐유도형전류제한기의 등가회로

### 2. 본 론

#### 2.1 차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 구조

본 연구에서 제안한 전류제한기의 구조는 EI변압기용 철심코어에 동선코일과 튜브형태의 고온초전도체를 그림 1과 같이 가운데코어를 중심으로 설치한 구조를 갖는 차폐유도형전류제한기이다.

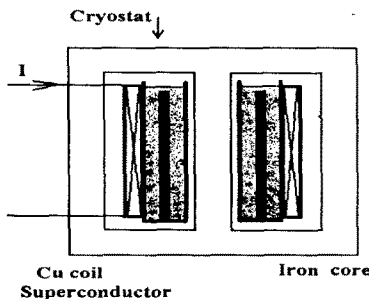


그림 1. 차폐유도형전류제한기의 대략도

$$E_1 = R_1 I_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (1)$$

$$0 = R_2 I_2 + L_{12} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

$$H = (nI_1 + I_2)/h \quad (3)$$

$$c \frac{dT}{dt} = R_2 I_2^2 - P_c \quad (4)$$

그림 2에서 rp는 코일의 내부저항, L<sub>11</sub>, L<sub>22</sub>은 자기인덕턴스, L<sub>12</sub>, L<sub>21</sub>는 상호인덕턴스 그리고 m는 턴수비를 나타낸다. 위의 지배방정식을 가지고 자기차폐형고온초전도전류제한기의 차단동작특성해석을 위해 사용한 정격주파수는 60Hz이고 선로저항은 동선코일의 권선저항과 계통의 선로저항을 포함한 것으로 해석하였다.

철심코어, 동선코일 및 튜브형 고온초전도체의 설계치수로부터 지배방정식에서 사용한 각각의 인덕턴스는 아래식에 의해 구할 수 있다.

$$L_{11}(H) = \pi \mu_o \frac{n^2}{h} (r_{pr}^2 - r_{co}^2 + \mu(H)r_{co}^2) \quad (5)$$

$$L_{12}(H) = \pi\mu_o \frac{n}{h} (r_{sc}^2 - r_{co}^2 + \mu(H)r_{co}^2) \quad (6)$$

$$L_{22}(H) = \pi \frac{\mu_o}{h} (r_{sc}^2 - r_{co}^2 + \mu(H)r_{co}^2) \quad (7)$$

- $I_1$  : 동선코일의 전류 (A)
- $R_1$  : 동선코일의 저항 ( $\Omega$ )
- $I_2$  : 초전도튜브의 전류 (A)
- $R_2$  : 초전도튜브의 저항 ( $\Omega$ )
- $H$  :  $I_1$ 과  $I_2$ 에 의해 발생한 자계 (A/m)
- $T$  : 초전도튜브온도 (K)
- $n$  : 동선코일의 권선비 (Turns)
- $h$  : 동선코일과 튜브초전도의 높이 (m)
- $c$  : 초전도체의 열용량 ( $J/m^2K$ )
- $P_c$  : 액체질소로 전달된 열량 (J/sec)
- $\mu(H)$  : 철심코어의 유효투자율
- $r_{pr}$  : 동선코일의 반지름 (m)
- $r_{sc}$  : 초전도튜브의 반지름 (m)
- $r_{co}$  : 철심코어의 반지름 (m)

그림 2에서 누설인덕턴스  $L_s$  는 다음과 같이 구할 수 있고 보다 효율적으로 동작하기 위해서는  $r_{sc} = r_{pr}$  이어야 하나 실제로는 불가능하므로  $r_{sc} \approx r_{pr}$  가 되도록 설계한다.

$$L_s = \pi\mu_o \frac{n^2}{h} (r_{pr}^2 - r_{sc}^2) \quad (8)$$

식(5),(6),(7),(8)로부터  $L_{11}$ ,  $L_{12}$ ,  $L_{22}$ ,  $L_s$ 가 결정되면 식 (1)과 (2)에서 전류제한특성과 초전도튜브내에 흐르는 전류를 구할 수 있다.

표1. 시뮬레이션에 사용된 SFCL 및 코어의 설계제원

parameter	Unit
<b>Superconducting tube</b>	
$\phi_{out}$ external diameter	38 [mm]
$\phi_{in}$ internal diameter	28 [mm]
$h$ tube height	90 [mm]
$l_{sc}$ total length	$2\pi \cdot 33$ [mm]
$S_{sc}$ cross section area	450 [mm <sup>2</sup> ]
$I_c$ critical current	900 [A]
$J_c$ critical current density	900/4.5 [A/cm <sup>2</sup> ]
$\rho_n$ normal conduction resistivity	$10^{-6}$ [ $\Omega m$ ]
<b>Core</b>	
$l_{core}$ total length	420 [mm]
$S_{core}$ cross section area	100 [mm <sup>2</sup> ]
$\mu_r$ relative permeability	30,000
$B_{max}$ maximum magnetic flux density	1.6 [T]
<b>Primary coil</b>	
$N_1$ total turns	100 [Turns]
$r_p$ resistance	$5.5 \times 10^{-6}$ [ $\Omega$ ]

### 2.3 차폐유도형전류제한기의 시뮬레이션

그림 1의 형태와 그림 2의 등가회로를 갖는 차폐유도형전류제한기에 대해서 사고전의 부하저항, 사고발생각, 전압레벨에 따라 동작특성을 시뮬레이션하였다.

부하저항에 따른 차폐유도형SFCL의 차단특성을 그림 3, 그림 4에 나타내었다. 임계전류는 1000A로 설정하였고 상전도저항증가율은 0.05( $\Omega/sec$ ), 사고각은 90°로 설정하였다. 부하저항이 25 $\Omega$ , 10 $\Omega$ , 5 $\Omega$ 인 모든 경우에 사고후 선로전류가 1주기정도의 과도상태를 거친 후 10A정도로 차단되어짐을 볼 수 있었다.

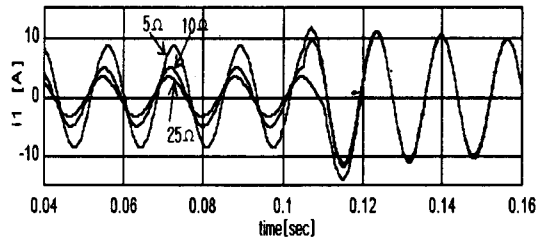


그림 3. 부하저항에 따른 차단기의 차단특성( $I_1$ )

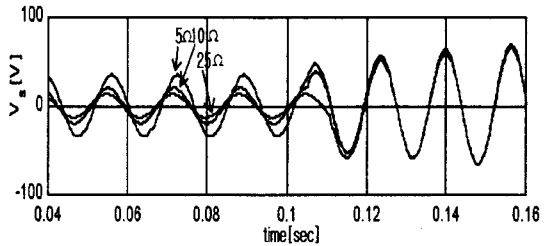


그림 4. 부하저항에 따른 차단기의 차단특성( $V_s$ )

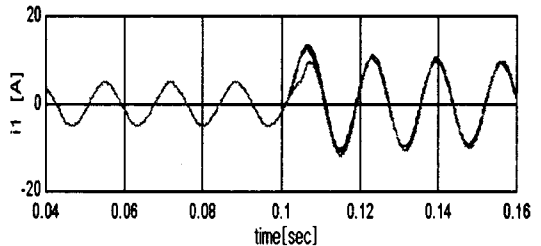


그림 5. 사고각에 따른 제한기의 차단특성( $I_1$ )

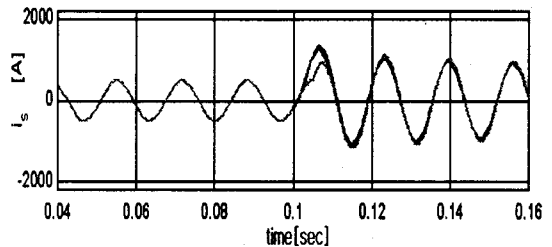


그림 6. 사고각에 따른 제한기의 차단특성( $I_s$ )

사고각에 따른 제한특성에서는 사고각이 90°일 때 보다 효과적으로 전류를 제한하는 것을 볼 수 있으나 설계 시에는 가장 큰 순간피크전류값을 갖는 0°의 사고각을 기준으로 설계해야 할 것으로 생각된다.

마지막으로 전원전압에 따른 전류제한특성에서도 전원전압이 50V, 100V, 180V으로 증가함에 따라 제한전

류도 5A, 10A, 19A로 증가했으나 차단기가 설치되지 않았을 때보다 효과적으로 제한되어짐을 볼 수 있었다.

Superconducting Fault Current Limiters", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, pp. 832-835, Jun. 1997.

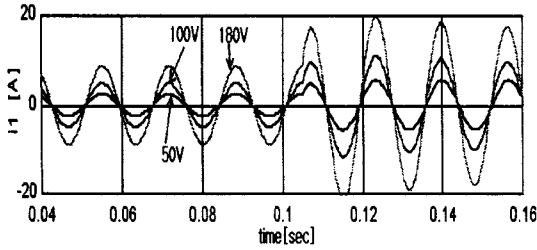


그림 7. 전원전압크기에 따른 제한기의 차단특성 ( $I_1$ )

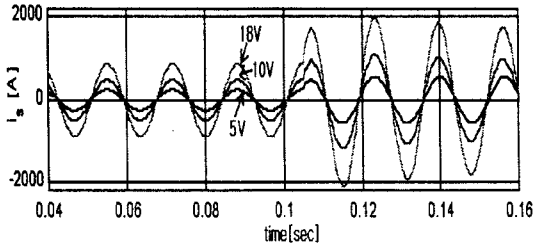


그림 8. 전원전압크기에 따른 제한기의 차단특성 ( $I_2$ )

### 3. 결 론

본 논문에서는 초전도체성질 중 하나인 마이스너효과를 이용하여 정상상태에는 강자성체인 차폐현상을 보여 강자성체인 코어의 투자율보다 낮은 공기의 투자율이 적용되기 때문에 비교적 낮은 임피던스를 가지지만 사고시는 자기차폐가 일어나지 않아 코어에 자속의 쇄교가 일어남으로서 임피던스가 증가하여 전류를 제한하는 방식인 자기차폐형 (shielded inductive) SFCL을 채택하였다.

정상상태시의 부하용량과 사고시의 단락용량에 따라 실제계통에 적용한 자기차폐형전류제한기의 특성변화를 예측하기 위해 모의계통과 연결한 제한기를 가지고 선로나 부하 그리고 제한기의 실제파라미터에 따른 제한기의 스위칭시간, 제한용량등을 계산하였고 특성변화를 예측하기 위한 모의회로를 제한기와 연결하여 시뮬레이션을 통해 각각의 파라미터에 따른 제한기의 동작특성에 대한 비교분석을 하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] M. Lindmayer, H. Mosebach, "Quenching of High-Tc-Superconductors and Current Limitation -Numerical Simulations and Experiment", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, pp. 1029-1032, Jun. 1997.
- [2] Minseok Joo, Tae Kuk Ko, "Novel Design and Operational Characteristics of Inductive High-Tc Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, pp. 1005-1008, Jun. 1997.
- [3] W. Paul, Th. Baumann, J. Rhyner, "Tests of 100kW High-Tc Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, pp. 1059-1062, Jun. 1995.
- [4] E. Thuries, et al., "TOWARDS THE SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER", IEEE Trans. on Power Del. Vol. 6, pp. 801-808, April, 1991.
- [5] J. R. Cave, D. W. A. Willen, R. Nadi, W. Zhu, A. Paquette, R. Boivin and Y. Brisette, "Testing and Modelling of Inductive