

# The Study on Current Limiting Characteristic Analysis of Magnetic Shielding Type Fault Current Limiter

Jae Lee\*, Sung-Hun Lim\*, Hyeon-Gon Kang\*, Seok-Cheol Ko\*, Byoung-Sung Han\*

\*The Research center of Industrial Technology, Engineering Research Institute, Chonbuk National University, Chonju, Korea

Received August 20, 2001

## 자기 차폐형 전류 제한기의 전류제한 특성해석 연구

이 재\*, 임성훈\*, 강형곤\*, 고석철\*, 한병성\*

### Abstract

In this paper, we investigated the current limiting characteristic in the magnetic shielding type fault current limiter(MSFCL). The circuit analysis was executed by using finite differential method(FDM). This paper suggests that the current limiting performance can be achieved in two ways ( resistive and inductive one ), according to design parameter. By comparing current limiting characteristics in two ways and surveying the important parameters which determine the operational way after fault occurs in the design of MSFCL, it is shown that the magnetic shielding type fault current limiter can be operated in either resistive or inductive way.

Keywords : current limiting characteristic, magnetic shielding type fault current limiter(MSFCL), finite differential method(FDM)

### 1. 서 론

국내 전력 계통의 수요는 날로 증가하고 있으며 발전설비 까지 증설되고 있다. 국내 전력 수요 증가율은 2001 년~2005 까지 년 5.5%, 2006 년~2010 년까지 3.3% 가 증가 할 것이라고 한다. 또한 증가하는 전력량으로 고장용량 또한 증가할 것이다. 고온 초전도 한류기는 전력계통의 용량증가로 인한 차단기의 용량 증가 시 발생하는 추가비용을 피할 수 있으므로 세계 각 국의 연구팀들은 상용화를 목표로 연구 진행 중이다[1-2]. 지금까지 개발된 고온 초전도 전류 제한기의 전류 제한방식에는 저항형과

유도형으로 크게 분류할 수 있으며 저항형은 구조가 간단하고 고속차단이 가능하지만 파손 우려가 있고, 유도형은 초전도체에 손상은 적으나 소형화 제작이 어려운 장단점이 있다 [3-7].

본 논문에서는 이러한 문제점들을 개선하고자 차폐 유도형 타입을 설계하여 저항형이나 유도형으로 전류제한특성이 이루어질 수 있는 고온 초전도 전류 제한기 개념 설계와 함께 실제 계통에 적용한 차폐 유도형 전류 제한기의 특성 변화를 예측하기 위한 모의 회로를 설계한 전류 제한기와 함께 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제한기의 설계 파라미터에 따른 차폐 유도형 전류 제한기의 동작특성을 비교 분석하고자 한다.

\*Corresponding author. Fax : +8 2 063 270 6368

e-mail : dolphine@shinbiro.com

2. 차폐 유도형 고온초전도 전류 제한기의 모델설정 및 특성해석

2.1 차폐 유도형 고온초전도 전류 제한기의 구조 및 동작원리

본 연구에서 제안한 차폐 유도형 전류 제한기의 구조는 일반변압기구조에 비해 자속 포화를 감소시킬 수 있어 용량을 보다 증가시킬 수 있는 EI변압기용 철심코어에 동선코일과 튜브 형태의 고온 초전도체를 Fig. 1과 같이 가운데 코어를 중심으로 설치한 구조를 갖는다.

1차측의 동선에 흐르는 전류에 의해 EI변압기용강자성체코어의 가운데 레그에 발생된 자속은 동선코일과 공심으로 구성된 튜브형 고온 초전도체의 차폐전류에 의해 상쇄되어 제한기의 임피던스는 매우 낮아진다. 그러나 사고 시는 고온 초전도 튜브내에 유기된 차폐전류가 빠른 시간에 임계 전류값을 초과하여 튜브내부로 자속통과와 동시에 온도증가와 높은 상전도

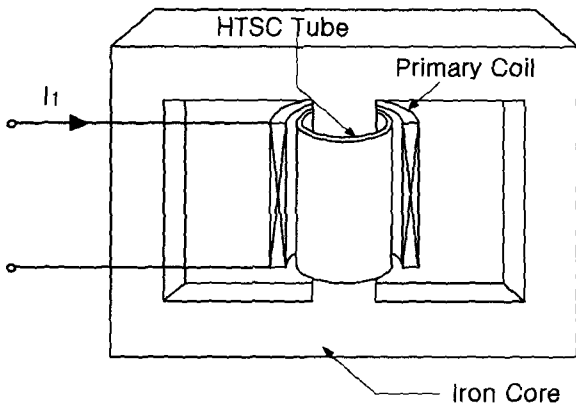


Fig. 1. Structure of the shielded inductive SCFCL

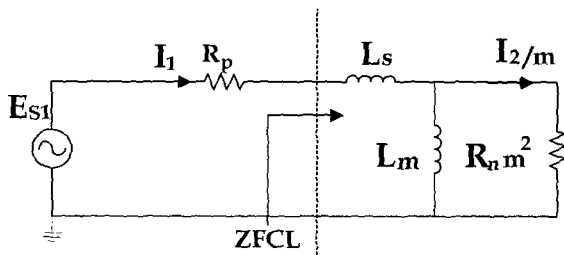


Fig. 2. Equivalent circuit of the shielded inductive SCFCL in occurrence of accident

저항이 발생된다. 이와 같이 발생한 상전도 저항은 제한기 임피던스 증가로 작용 함으로서 사고 시 전류를 제한할 수 있게 된다.

2.2 차폐 유도형 고온초전도 전류 제한기의 특성해석을 위한 설계 파라미터 결정

$$E_1 = R_p I_1 + L_{11} \frac{dI_1}{dt} - L_m \frac{d}{dt} \left( \frac{I_2}{m} \right) \quad (1)$$

$$0 = m^2 R_n \left( \frac{I_2}{m} \right) - L_m \frac{dI_1}{dt} + L_m \frac{d}{dt} \left( \frac{I_2}{m} \right) \quad (2)$$

Fig. 1의 차폐유도형제한기의 모델로부터 얻게 되는 사고시 등가회로는 그림 2와 같고 등가회로에 대한 제한기의 지배방정식은 아래식과 같이 유도할 수 있다. 여기서 계산을 단순화시키기 위해 철심코어의 포화는 발생하지 않는다고 가정하였다.

위의 지배방정식에서 사용한 각각의 인덕턴스는 철심코어, 동선코일 및 튜브형 고온 초전도체로 구성된 제한기의 설계모델(Fig. 3)로부터 아래식과 같이 구할 수 있다.

$$L_{11}(H) = \pi \mu_0 \frac{m^2}{h} (r_{pr}^2 - r_{co}^2 + \mu(H)r_{co}^2) \quad (3)$$

$$= K \cdot L_{11} + (1 - K) \cdot L_{11} = L_m + L_s$$

$$L_{12}(H) = \pi \mu_0 \frac{m}{h} (r_{sci}^2 - r_{co}^2 + \mu(H)r_{co}^2) \quad (4)$$

$$L_{22}(H) = \pi \frac{\mu_0}{h} (r_{sci}^2 - r_{co}^2 + \mu(H)r_{co}^2) \quad (5)$$

$$K = L_{12} / \sqrt{L_{11} \cdot L_{22}}$$

$\mu(H)$  : 철심코어의 유효 투자율

$r_{pr}$  : 철심코어 중심에서 동선코일까지의 거리

$r_{sci}$  : 초전도 튜브의 안쪽 반지름

$r_{co}$  : 철심 코어의 반지름

$K$  : 결합 계수

Fig. 2의 사고시 등가회로와 설계모델로부터 유도할 수 있는 각각의 인덕턴스식으로부터 사고시 전류제한 방식을 좌우하는 파라미터는 누설 인덕턴스는 무시한다고 할 때 1차권선에 의한 인덕턴스  $L_{11}$  과 1차 권선의 턴수,  $m$ 에 의해 지배 되어짐을 알 수 있다.

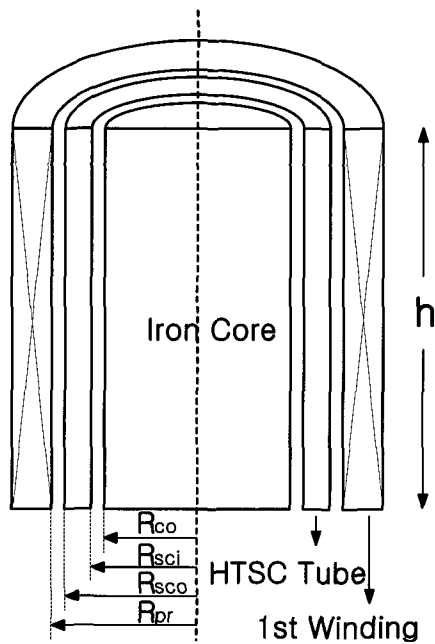


Fig. 3. The cross section of iron core installed with HTSC tube and 1st winding for design parameter

Table 1. Specification on Main Voltage, Superconducting Tube and Load for simulation

Parameter	Unit
<b>Main &amp; Load</b>	
Main voltage	156 [V]
Line Impedence	
$R_{in}$	1 [Ohm]
$L_{in}$	1.2 [mH]
Load Impedence	20 [Ohm]
<b>Superconducting Tube</b>	
$R_{sci}$	0.016 [m]
$R_{scs}$	0.023 [m]
$h$	0.16 [m]
$I_c$	400 [A]
$R_n$	0.011 [Ohm]

Fig. 4, 5는 고온 초전도튜브의 사양(Table 1)이 결정되었을 때 철심코어의 크기와 1차 권선의 턴 수에 따른 리액턴스 성분과 저항성분의 변화를 보여준다. 이 두 성분의 상대적인 크기에 따라 사고시 전류 제한기의 동작형태가 결정된다. 즉 주어진 두 그래프를 이용하여 턴수비와 코어반경을 결정 함으로서 차폐 유도형 전류제한기의 전류제한의 동작방식을 설계할

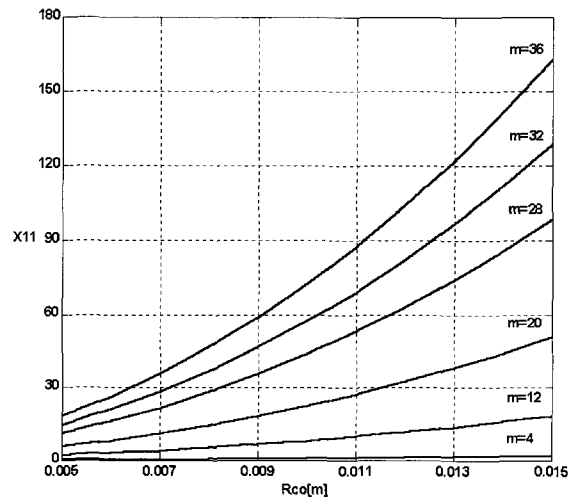


Fig. 4. The amplitude of reactance( $X_{11}$ ) dependent on the number of turn and the radius of iron core

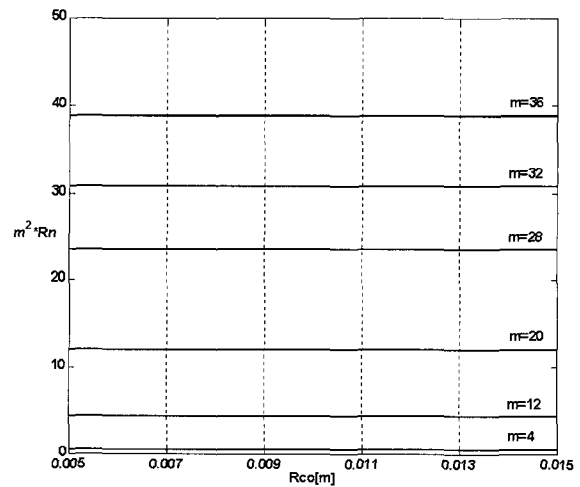


Fig. 5. The amplitude of resistance( $R * m * m$ ) dependent on the number of turn and the radius of iron core

수 있다.

### 2.3 차폐 유도형 전류 제한기의 FDM 에 의한 특성 해석

등가회로부터 구한 방정식을 풀기 위해 수치 해석 법으로 FDM을 사용하였으며 FDM을 적용하여 주어진 방정식은 아래와 같이 전개된다.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & -L_m \\ -L_m & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ m \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$V = R \cdot I + L \cdot \bar{I} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} V(n) &= R(n) \cdot I(n) + \frac{L(n)}{\Delta t} (I(n+1) - I(n)) \\ \Delta t V(n) &= \Delta t R(n) \cdot I(n) + L(n) \cdot I(n+1) \\ &\quad - L(n) \cdot I(n) \\ I(n+1) &= L(n)^{-1} [L(n) - \Delta t R(n)] \cdot I(n) \\ &\quad + L(n)^{-1} \cdot \Delta t V(n) \end{aligned} \quad (9)$$

전류 제한기의 단락사고시의 동작특성을 구현하기 위해 시뮬레이션에서 사용한 초전도 튜브의 저항변화는 기존의 벌크로 제작한 유도형 전류 제한기의 전류제한 실험으로부터 얻은 곡선을 시뮬레이션에 도입하였다. 또한 동작특성 해석을 위한 시뮬레이션 프로그램에는 철심코어의 반지름, 초전도 튜브의 크기 등과 같은 설계 파라미터에 따른 자기 차폐형 전류 제한기의 각각의 인덕턴스를 구하는 루프가 포함되어 있다.

### 3. 특성 시뮬레이션 및 결과 분석

먼저 1차권선의 턴수비에 따른 선로전류파형을 보면(Fig. 6), 사고발생시 턴수비가 증가함에 따라 전원단의 위상과 제한되는 전류의 위상차가 적어짐을 볼 수 있으며 이는 Fig. 4, 5에서 볼 수 있듯이 턴수비가 증가함에 따라 한류기 제한 임피던스의 저항성분은 완만한 증가를 보

인데 반해 리액턴스 성분은 급수적으로 증가하게 되므로 턴수비가 증가될수록 사고시 사고전류가 저항성분( $R \cdot m \cdot m$ )으로 흐르게 되므로 사고전류파형과 전원전압의 위상차가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 즉 턴수비가 증가되면 설계한 자기 차폐형 전류 제한기는 전류제한방식이 저항형으로 이루어지며 제한되는 전류 또한 항상

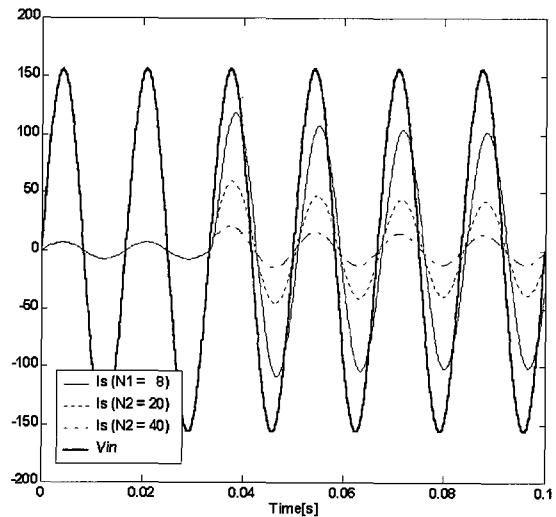


Fig. 6. Line current waveforms dependent on the number of turns in the 1<sup>st</sup> winding

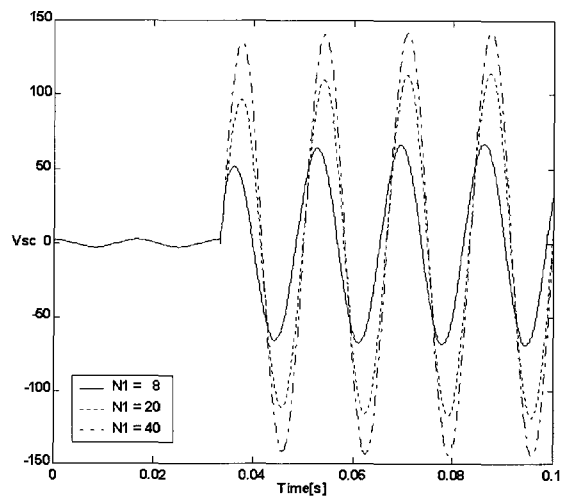


Fig. 7. Terminal voltage waveforms of FCL dependent on the number of turns in the 1<sup>st</sup> winding

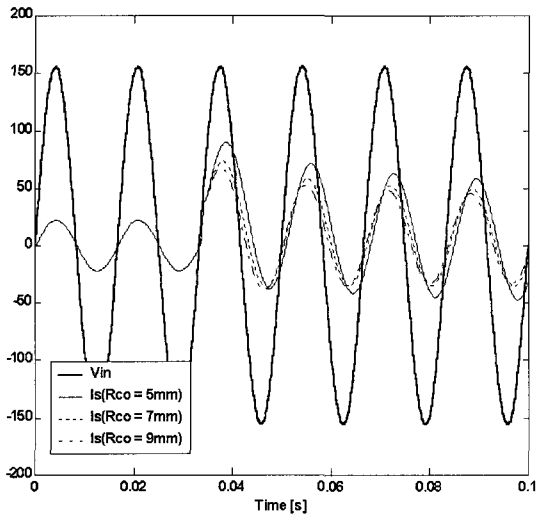


Fig. 8. Line current waveforms dependent on radius of iron core ( $m = 12$ )

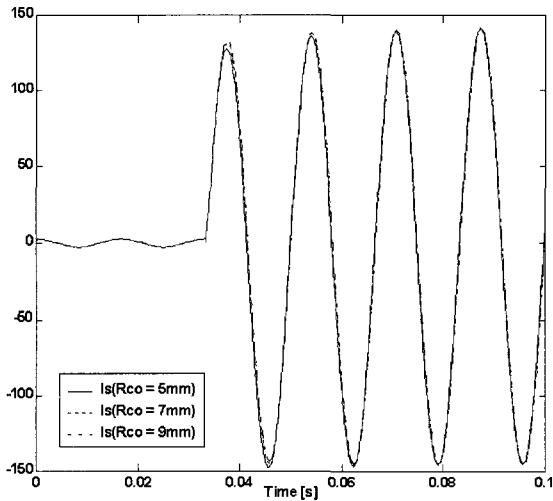


Fig. 9. Terminal voltage waveforms of FCL dependent on radius of iron core ( $m = 12$ )

됨을 확인할 수 있다. 이는 고온초전도체를 직접 직렬 연결하여 전류를 제한하는 방식인 저항형의 한류기보다 효율적으로 전류제한이 이루어짐을 보여주는 결과이다. 턴수비 증가에 따른 한류기 양단전압과형(Fig. 7)에서도 턴수비 증가에 따라 전체 한류 임피던스가 증가함으로 사고시 한류기 양단전압이 전원전압의 크기가 가까워짐을 볼 수 있다.

Fig. 8은 1차 코일의 턴수를 12[Turns]으로 설계하고 코어반경에 따른 사고시 선로 전류를 비교한 과형이다. 마찬가지로 사고시 한류기의 저항성분은 코어반경에 관계없이 일정하지만 리액턴스 성분의 경우 코어반경이 증가함에 따라 커지게 되므로 대부분의 사고전류가 증가회로의 저항성분( $R \cdot m \cdot m$ )으로 흐르게 되므로 전류제한방식이 저항형으로 이루어짐을 전원전압의 위상과 사고시 전류의 위상차로부터 확인할 수 있다. 철심코어반경에 따른 제한기 양단전압은(Fig. 9) 한류기 증가 임피던스의 크기변화가 적음으로 인해 반경에 따른 과형변화는 없음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 과

본 논문에서는 저항형의 한류기에 비해 용량 증가를 기대할 수 있는 차폐 유도형 타입의 전류 제한기를 설계하여 저항형이나 유도형으로 전류제한특성이 이루어질 수 있음을 설계과라미터에 따라 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 전류제한방식이 유도형으로 동작되도록 설계한 경우보다 저항형으로 설계할 경우 사고시 전류 제한특성이 우수함을 볼 수 있었고 이는 1 차 측 코일의 턴수나 철심코어의 반경을 증가 시켜줌으로서 설정할 수 있고 직접사고전류를 흐르게 함으로서 전류를 제한하는 기존의 저항형의 한류기보다 제한전류특성이 개선됨을 볼 수 있는데 이는 차폐 유도형 전류 제한기를 대용량급에 적용이 가능함을 입증해주는 결과로 사료된다.

#### References

- [1] 장재원, 최경달, 권영길, 성기철, 현옥배, 성태현, 김상준, "초전도 전력응용기술 세미나", 한국 전력 공사 전력 연구원 (KERI), pp.001-143 VOL. 1, 2001
- [2] V. D. Pham Y. Laumoud T. Verhaege\* A. Fevrier\* M. Collet M. Bekhaled, "Towards The Superconducting Fault Current Limiter", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, No. 2, pp. 801-808 VOL. 6, April 1991

- [3] Min seok Joo and Tae Kuk Ko, "The Analysis of the Fault Currents According to Core Saturation and Fault Angles in an Inductive High-Tc superconducting Fault Current Limiter", *TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, NO. 2, pp. 62-67, VOL. 6, JUNE 1996
- [4] B. Gronoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies and H.-W. Newmuller, Siemens AG, "Resistive Fault Current Limiters with YBCO films - 100kVA Functional Model", *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, NO. 2, pp. 656-659, VOL. 9, JUNE 1999
- [5] H. Kado and M. Ichikawa, "Performance of A High-Tc Superconducting Fault Current Limiter -Design of A 6.6kV Magnetic Shielding Type Superconducting Fault Current Limiter", *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, NO. 2 pp. 993-996, VOL. 7, JUNE 1997
- [6] Chanjoo Lee, Seungje Lee, Ok-Bae Hyen and Tae Kuk ko, "Design and characteristic Analysis of a Rod Type High-Tc Superconducting Fault Current Limiter through Electromagnetic Analysis", *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, NO. 1, pp. 2102 - 2105, VOL. 11, MARCH 2001
- [7] Kazuhiro Kajikawa, Katsuyuki Kaiho and Noriharu Tamada, "Design and Current-Limiting Simulation of Magnetic-Shield type Superconducting Fault Current Limiter High Tc Superconductors", *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, NO. 4, pp. 2667-2670, VOL. 32, JULY 1996
- [8] J. Acero, L. Garcia-Tabares, M. Bajko and J. Calero. X. Granados and S. Piflol, "Current Limiter Based on Melt Processed YBCO Bulk Superconductors", *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, NO. 2, pp. 1071-1074, VOL. 5, JUNE 1995
- [9] Hiroshi Kato, Osuke Miura, and Daisuke Ito, "Quench Behaviors of QMG Current Limiting Elements under the Influence of Magnetic Field", *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, NO. 1, pp. 869-872, VOL. 10, MARCH 2000