

차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성시물레이션

論 文

48C-3-3

The Simulation on the Design and the Characteristic of Shielded Inductive High-T_c Superconducting Fault Current Limiter

林成勳*, 崔明鎬, 李賢洙, 韓秉誠**

(Sung-Hun Lim* · Myung-Ho Choi · Hyun-Soo Lee · Byoung-Sung Han**)

Abstract - In this paper, the characteristics of the shielded inductive superconducting fault current limiter(FCL) were simulated and analyzed. After determining parameters of design for superconducting tube, iron core and primary coil, simple power system composed of shielded inductive FCL was simulated by the numerical analysis. The currents flowing under the fault condition could be limited below 50 A successfully. It was suggested that as the important factors of operational characteristics, the turns of primary coil and size of iron core play a major role for whether the shielded inductive SCFCL operated as inductive type or resistive type FCL.

Key Words : shielded inductive superconducting fault current limiter, inductive type, resistive type

1. 서 론

날로 증가하고 있는 전력요구로 인해 복잡하고 증대된 전선망을 형성하게 됨에 따라 이로 인한 단락사고나 단락전류도 증가하지 않을 수 없게 되었다. 이러한 단락전류는 정상상태전류의 수배내지 수십배에 이르게 되어 전기선로뿐 아니라 각종 전기기기류에 대한 열적 기계적인 충격에 있어 보다 높은 안정성을 요구하게 되었다. 따라서 기술적으로나 경제적인 측면에서 볼 때 단락사고로 인한 단락전류를 제한할 수 있는 방법모색과 함께 장치개발이 필수적이게 되었다.

단락전류를 제한할 수 있는 일반적인 방법으로 변압기의 리액턴스를 증가시키거나 부가적인 리액터를 설치하는 방법이 있지만 정상상태에서 전체시스템에 영향을 미치게 된다. 또 다른 방법으로 전력퓨즈를 사용할 경우엔 매사고시마다 교체해야만 하는 번거로움이 따른다. 최근에는 전류제한기능을 갖는 회로차단기가 발표되기도 하였으나 이들 또한 제한된 범위에서만 동작할 뿐 이상적인 사고전류제한기로의 역할에는 어려움이 따른다[1-2]. 이와 같이 보다 효과적인 전류제한장치에 대한 개발의 노력에 힘입어 전류제한장치로서 초전도체를 이용할 경우, 정상운행시 전체시스템에 대한 영향이 적고 신속한 동작속도와 트리거와 같은 외부장치의 도움이 필요하지 않는 등 많은 잇점들이 보고되었고 이러한 초전도체만이 갖는 특성을 이용한 여러종류의 고온초전도체 한장치가 개발되어왔다[3-6].

지금까지 개발된 고온초전도전류제한기의 형태는 HTSC의 가공방법에 따라 선재형, 벌크형, 후막형 그리고 박막형으로 나누어지고 차단기로서 동작되는 트리거방식에 따라

온도트리거, 자계트리거, 전류트리거형으로, 전류제한방식에 따라 저항형과 유도형으로 크게 분류할 수 있으며 유도형은 다시 자기결합형, 자기차폐형 그리고 권선형으로 분류된다. 그중에서 자기선로와 고온초전도벌크링의 자기적 결합을 통해 초전도체내의 급격한 상전도저항전이를 이용하여 전류를 제한하는 방식인 자기결합형은 초전도체에 직접사고전류가 흐르지 않아 저항형에 비해 회복시간이 빠르고 용량 또한 증가하는 잇점이 있어 동작특성에 대한 해석과 실험이 많이 이루어지고 있다. 그러나 국외의 경우 자기결합형전류제한기와 더불어 자기차폐형전류제한기에 대한 설계 및 동작실험이 이미 완료된 상태이고 실제계통에 설치되어 그 우수성을 입증하였지만 국내의 경우는 자기차폐형전류제한기에 대한 연구가 아직 이루어지지 않고 있는 실정이다[7-11].

따라서 본 논문에서는 초전도체성질 중 하나인 마이스너 효과를 이용하여 정상상태에는 강반자성체특성인 차폐현상을 보여 비교적 낮은 임피던스를 가지지만 사고시는 자기차폐가 일어나지 않아 코어에 자속의 쇄교가 일어남으로서 임피던스가 증가하여 전류를 제한하는 방식인 자기차폐형(shielded inductive)SFCL에 대한 개념설계와 함께 실제계통에 적용한 자기차폐형전류제한기의 특성변화를 예측하기 위한 모의회로를 제한기와 연결하여 컴퓨터시물레이션을 통해 제한기의 설계파라미터에 따른 제한기의 동작특성을 비교분석하고자 한다.

2. 차폐유도형고온초전도전류제한기의 모델설정 및 특성해석

2.1 차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 구조 및 동작원리

본 연구에서 제안한 차폐유도형전류제한기의 구조는 일반 변압기구조에 비해 자속포화를 감소시킬 수 있어 용량을 보다 증가시킬 수 있는 EI변압기용 철심코어에 동선코일과 튜브형태의 고온초전도체를 그림 1과 같이 가운데코어를 중심으로 설치한 구조를 갖는다.

* 正 會 員 : 全 北 大 學 電 氣 工 學 科 博 士 科 程

** 正 會 員 : 全 北 大 學 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 1998年 9月 30日

最 終 完 了 : 1999年 1月 27日

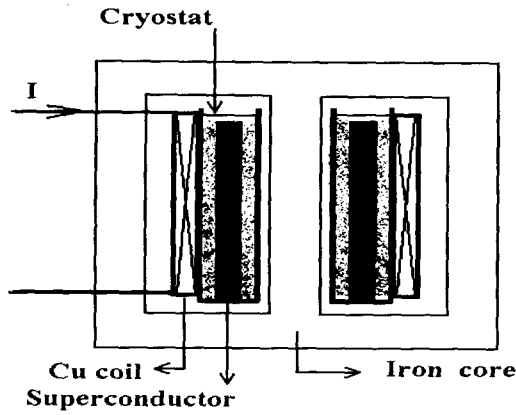


그림 1. 차폐유도형전류제한기의 개략도
Fig. 1. Scheme of shielded inductive SCFCL

그림 1에서처럼 2차측으로 튜브형태의 고온초전도체를 사용하고 1차측은 사고로부터 보호하기 위한 계통이 동선코일과 직렬로 연결된다. 1차측의 동선에 흐르는 전류에 의해 EI변압기용강자성체코어의 가운데레그에 발생된 자속은 동선코일과 공심으로 구성된 튜브형 고온초전도체의 차폐전류에 의해 상쇄되어 누설자속과 권선저항을 무시한다면 제한기의 임피던스는 매우 낮아진다. 그러나 사고시는 고온초전도튜브내에 유기된 차폐전류가 빠른 시간에 임계전류값을 초과하여 튜브내부로 자속 통과와 동시에 온도증가와 높은 상전도저항이 발생된다. 이와 같이 발생한 상전도저항은 제한기임피던스증가로 작용함으로써 사고시 전류를 제한할 수 있게 된다.

2.2 차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 특성해석을 위한 모델설정

그림 1의 차폐유도형제한기의 모델로부터 얻게되는 등가회로는 그림 2와 같고 등가회로에 대한 제한기의 지배방정식은 아래식과 같다. 여기서 계산을 단순화시키기 위해 철심코어의 포화는 발생하지 않는다고 가정하였다.

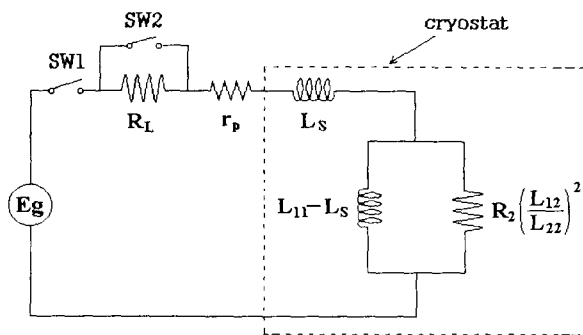


그림 2. 차폐유도형전류제한기의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the shielded inductive SCFCL

$$E_1 = R_1 I_1 + L_{11} \frac{dI_1}{dt} + L_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad (1)$$

$$0 = R_2 I_2 + L_{12} \frac{dI_1}{dt} + L_{22} \frac{dI_2}{dt} \quad (2)$$

$$H = (mI_1 + I_2)/h \quad (3)$$

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

I_1	: 동선코일의 전류	[A]
R_1	: 동선코일의 저항	[Ω]
I_2	: 초전도튜브의 전류	[A]
R_2	: 초전도튜브의 저항	[Ω]
H	: I_1 과 I_2 에 의해 발생한 자계	[A/m]
T	: 초전도튜브온도	[K]
m	: 동선코일의 권선비	[Turns]
h	: 동선코일과 튜브초전도의 높이	[m]
c	: 초전도체의 열용량	[J/m ² · K]
P_c	: 액체질소로 전달된 열량	[J/sec]

그림 2에서 r_p 는 코일의 내부저항, R_L 은 부하저항, L_{11} , L_{22} 은 자기인덕턴스, L_{12} 는 상호인덕턴스 그리고 L_s 는 누설인덕턴스를 나타낸다. 또한 지배방정식에서 사용한 각각의 인덕턴스는 철심코어, 동선코일 및 튜브형 고온초전도체로 구성된 제한기의 설계모델로부터 아래식과 같이 구할 수 있다.

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

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

$$L_{22}(H) = \pi \frac{\mu_o}{h} (r_{sc}^2 - r_{co}^2 + \mu(H)r_{co}^2) = \frac{L_{12}}{m} \quad (7)$$

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

$\mu(H)$:	철심코어의 유효투자율
r_{pr}	: 철심코어중심에서 동선코일까지의 거리 [m]
r_{sc}	: 초전도튜브의 반지름 [m]
r_{co}	: 철심코어의 반지름 [m]

위의 지배방정식을 가지고 자기차폐형고온초전도전류제한기의 차단동작특성해석을 위해 정격주파수는 60[Hz]로 하였고 선로저항은 동선코일의 권선저항과 계통의 선로저항을 포함한 것으로 해석하였다.

2.3 설계된 FCL과 철심코어의 구조 및 설계파라미터결정

shielded inductive SCFCL의 동작특성을 조사하기 위한 철심코어, 동선코일 그리고 튜브형태의 고온초전도의 구조와 설계파라미터를 표 1과 그림 3에 나타내었다.

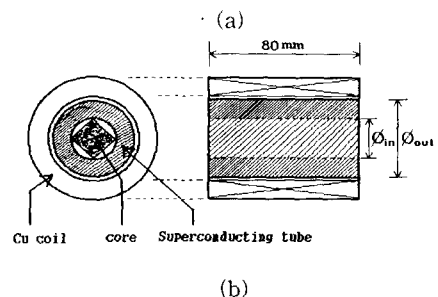
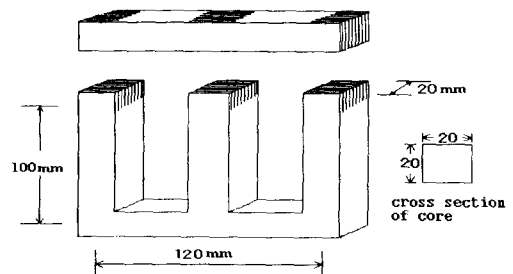


그림 3. 차폐유도형 전류제한기의 구조

- (a) 차폐유도형 전류제한기의 철심코어구조
- (b) 차폐유도형 전류제한기의 고온초전도튜브와 동선코일의 구조

Fig. 3. The structure of shielded inductive SCFCL

- (a) Structure of Iron core of shielded inductive SCFCL
- (b) Structure of superconducting tube and Cu coil of shielded inductive SCFCL

표 1. 시뮬레이션에 사용된 초전도튜브, 코어 및 1차코일의 설계제원

Table 1 Specification on superconducting tube, core and primary coil used in simulation

parameter	Unit
Superconducting Tube	
ϕ_{out} external diameter	38 [mm]
ϕ_{in} internal diameter	30 [mm]
h tube height	80 [mm]
l_{sc} total length	2*pi*17 [mm]
S_{sc} cross section area	320 [mm ²]
I_c critical current	2000 [A]
J_c critical current density	2000/3.2 [A/cm ²]
ρ_n normal conduction resistivity	10 ⁻⁶ [Ω m]
Core	
l_{core} total length	500 [mm]
S_{core} cross section area	pi*(15) ² [mm ²]
μ_r relative permeability	30,000
B_{max} maxium magnetic flux density	1.6 [T]
Primary coil	
m total turns	100 [Turns]
r_p line resistance	0.05 [Ω]

사고발생시 튜브내로의 자속통과로 인한 철심코어의 포화가 발생하지 않도록 적절한 크기의 철심코어를 설정하여 식 [5],[6],[7],[8]로부터 L_{11} , L_{12} , L_{22} , L_s 가 결정되면 식 [1]과 [2]에서 전원측전류와 초전도튜브내에 흐르는 전류를 구할 수 있다.

초전도튜브내에 흐를 수 있는 최대전류 I_c 는 $I_c = J_c \cdot S_{sc}$ 이고 원하는 상전도저항을 얻기 위한 초전도체튜브의 둘레길이 l_{sc} 는 다음식으로 구할 수 있으므로 이로부터 튜브의 두께와 내외반지름을 결정할 수 있다.

$$l_{sc} = S_{sc} \cdot R_n / \rho_n = (I_c \cdot R_n) / (\rho_n \cdot J_c) \quad [m] \quad (9)$$

사고후 시간에 의존하는 임피던스, $Z(t)$ 는 권선수가 m 인 1차측과 2차측은 단락된 한 선으로 된 변압기에 대한 모델로부터 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$|Z(t)| = [(m^2 R_{sc}(t))^{-2} + (wL)^{-2}]^{-1/2} \quad [\Omega] \quad (10)$$

$$\theta(t) = \text{Arctan}[m^2 R_{sc}(t) / wL] \quad [\text{rad}] \quad (11)$$

$$R_{sc}(t) = \rho_{sc}(t) l_{sc} / A_{sc} \quad [\Omega] \quad (12)$$

- $R_{sc}(t)$: 초전도체의 저항
- $\rho_{sc}(t)$: 초전도체의 저항률
- A_{sc} : 초전도체 튜브벽의 단면적
- l_{sc} : 초전도체 튜브의 둘레길이

이때 제한기에 의해 제한되는 전류 I_{lim} 은 식 (13)과 같이 등가회로로부터 구할수 있으므로 사고시 결정된 상전도저항과 인덕턴스값으로부터 제한전류 I_{lim} 를 구할 수 있다.

$$I_{lim} = E_g \cdot [(\frac{1}{m^2 \cdot R_n})^2 + (\frac{1}{w \cdot L})^2]^{1/2} \quad (13)$$

마찬가지로 사고시 제한기 양단에 나타나는 사고전압크기 $V_{lim}(t)$ 는 초전도체내를 순환하는 전류($I_{sc}(t)$) 및 사고시 선로에 흐르는 전류와 관계가 있으며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_{lim}(t) = I_{sc}(t) \cdot m \cdot R_{sc}(t) \quad (14)$$

$$V_{lim} = I_1 \cdot Z \quad (15)$$

마지막으로 정상상태시 초전도체 튜브는 자기차폐역할을 하며 초전도내전류 I_{sc} 는 1차측전류 I_1 와 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있다.

$$I_{sc} = m \cdot I \quad \text{when } I_{sc} < I_c \quad [A] \quad (16)$$

2.4 차폐유도형전류제한기의 FDM에 의한 특성해석

등가회로부터 구한 방정식을 풀기 위해 수치해석법으로 FDM을 사용하였으며 FDM에 의해 주어진 방정식은 아래와 같이 전개된다.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{12} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$V = R \cdot I + L \cdot \dot{I}$$

$$V(n+1) = R(n) \cdot I(n+1) + \frac{L(n)}{\Delta t} (I(n+1) - I(n))$$

$$\Delta t V(n+1) = \Delta t R(n) \cdot I(n+1) + L(n) \cdot I(n+1) - L(n) \cdot I(n)$$

$$I(n+1) = (\Delta t R(n) + L(n))^{-1} \cdot (\Delta t V(n+1) + L(n) \cdot I(n))$$

전류제한기의 단락사고시의 동작특성을 구현하기 위해 시뮬레이션에서 사용한 부하저항의 변화와 초전도튜브의 저항변화를 그림 4에 나타내었고 초전도튜브의 저항변화는 기존의 벌크로 제작한 유도형전류제한기의 전류제한실험으로부터 얻은 곡선이다.

부하저항의 변화를 나타내는 단락사고발생시간을 t_{sh} 라 했을 때 초전도튜브의 저항전이는 튜브내 전류가 임계전류값을 넘어서야 켜치되어 상전도저항이 증가하므로 켜치발생시간을 t_q 라 하여 $t_q > t_{sh}$ 가 성립되도록 설정하였고 t_q 이후에는 R_s 가 표 1로부터 계산된 일정한 상전도저항(R_n)에 도달되도록 시뮬레이션에 도입하였다.

그림 5에는 차폐유도형전류제한기가 설치된 계통선로에서의 동작특성해석을 위한 시뮬레이션흐름도를 나타내었고 흐름도에는 철심코어의 반지름, 초전도튜브의 크기등과 같은 설계과라미터에 따른 차폐유도형전류제한기의 각각의 인덕턴스를 구하는 부프로그램이 포함되어 있다.

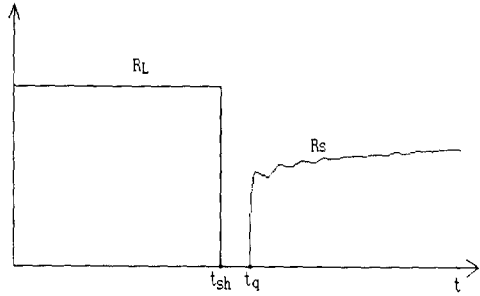


그림 4. 사고전후의 부하저항과 고온초전도튜브의 저항변화곡선
 Fig. 4. The characteristics of load and HTSC Tube resistance when the fault occurred

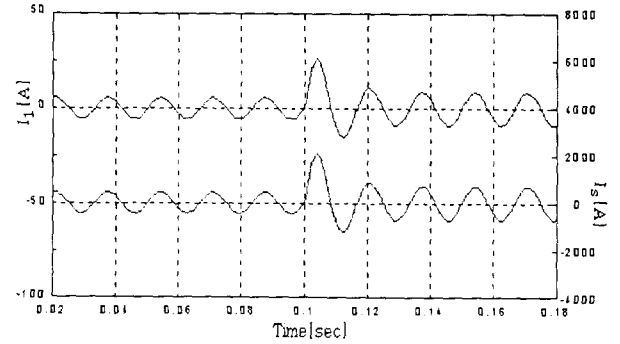


그림 6. 사고각 0° 에서 선로전류 및 튜브내전류
 Fig. 6. Line current and Tube current in fault angle 0°

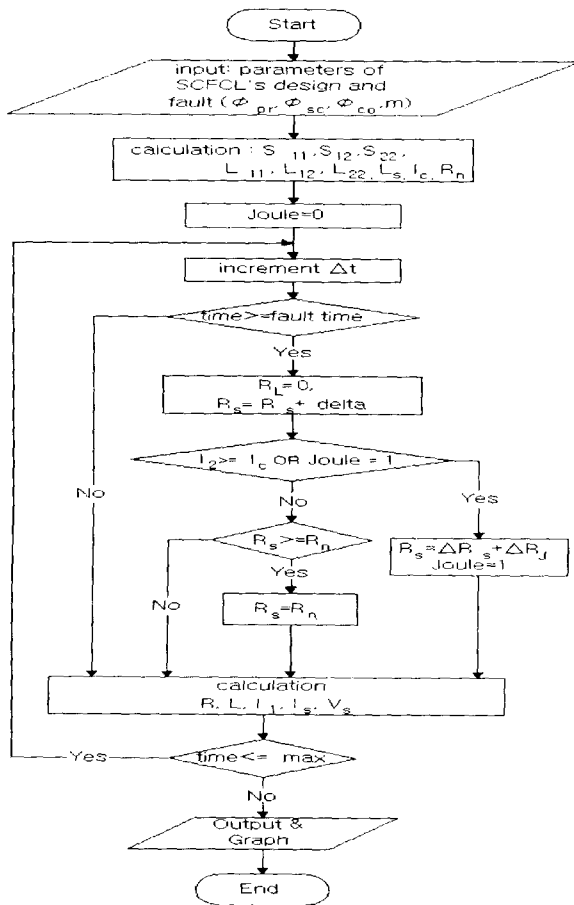


그림 5. 차폐유도형전류제한기의 동작특성해석을 위한 시뮬레이션흐름도
 Fig. 5. Flow chart for the analysis of operational characteristics of the shielded inductive SFCL

3. 특성시뮬레이션 및 결과 분석

차폐유도형 SCFCL의 동작특성에 영향을 줄 수 있는 설계파라미터로서 철심코어 및 고온초전도튜브의 크기와 길이 그리고 1차측의 권선수를 입력변수로 설정하여 제한기의 동작특성을 비교분석하였다. 또한 사고발생시의 동작변수로서 사고각에 따른 고온초전도제한기의 제한특성을 조사하였다.

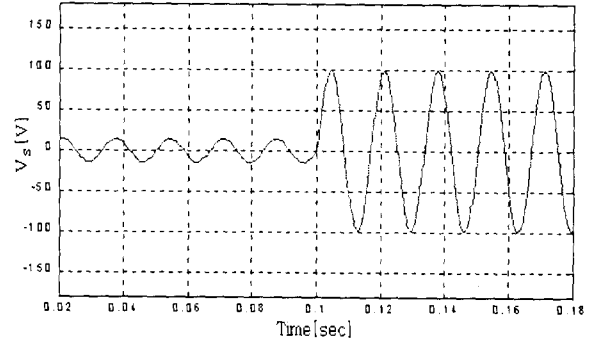


그림 7. 사고각 0° 에서 제한기양단전압
 Fig. 7. Terminal voltage of limiter in fault angle 0°

그림 1의 모델과 그림 2의 등가회로를 갖는 자기차폐형전류제한기의 동작특성을 시뮬레이션하기 위해 입력전압을 70 [Vrms], 부하저항을 15[Ω], 임계전류를 2000 [A], 일차측권선수를 100 [Turns]으로 하였고 $r_{pr} = 0.022$ [m], $r_{sc} = 0.017$ [m], $r_{co} = 0.015$ [m], 튜브의 높이를 0.08 [m], 상전도저항증가율 0.05 [Ω/sec]에서 사고발생각을 각각 0°와 90°로 설정했을때 전계선로전류와 튜브내전류변화를 그림 6, 8에 나타내었다. 사고시 선로의 사고전류가 고온초전도제한기에 의해 사고각 90° ($I_0=31.5[A]$)에서보다 0° ($I_0=27[A]$)에서 보다 효과적으로 제한됨을 볼 수 있다. 따라서 고온초전도제한기설계시 사고각 90°을 기준으로 설계해야 보다 효율적인 것으로 예상된다. 사고전의 제한기양단전압(그림 7, 9)은 제한기의 누설자속에 의한 인덕턴스성분 때문에 작은 값을 보이지만 사고후에는 입력전압의 대부분이 제한기양단에 인가됨을 볼 수 있다.

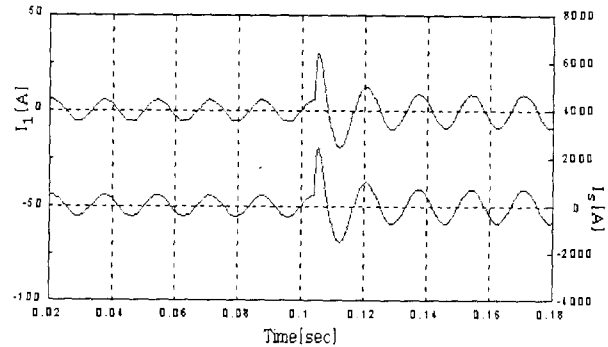


그림 8. 사고각 90° 에서 선로전류 및 튜브내전류
 Fig. 8. Line current and Tube current in fault angle 90°

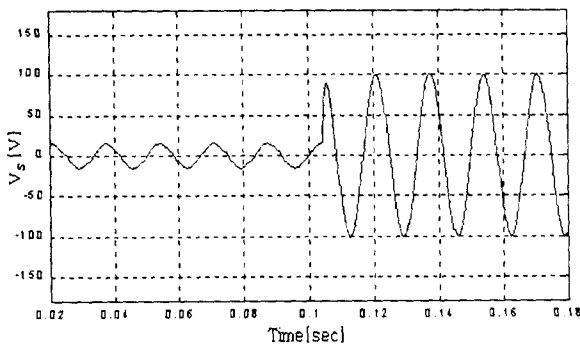


그림 9. 사고각 90° 에서 제한기양단전압
 Fig. 9. Terminal voltage of limiter in fault angle 90°

그림 10는 $r_{pr} = 0.041$ [m], $r_{sc} = 0.028$ [m]일때 철심코어의 크기, r_{co} 가 0.025[m]와 0.027[m]일때의 제한기양단전압 및 선로전류의 변화를 보여주고 있다. r_{co} 가 0.027[m]일 경우 ($L_{11} - L_s$)값이 $m^2 R_2$ 값에 비해 상당히 큰 값을 가져 사고후에도 대부분의 전류가 $m^2 R_2$ 으로 흐르게 되어 선로전류가 초기에 제한된 값을 유지하고 있는 것을 볼 수 있다. 반면에 r_{co} 가 0.025[m]일 경우엔 ($L_{11} - L_s$)값이 $m^2 R_2$ 값과 비슷하게 되어 사고전류가 ($L_{11} - L_s$)와 $m^2 R_2$ 으로 분배되어 흐르게 되어 사고전류크기가 초기차단전류보다 조금씩 감소되었다.

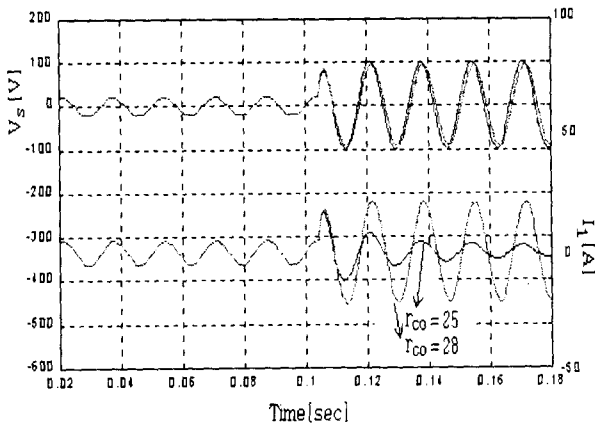


그림 10. 철심코어크기에 따른 제한기양단전압 및 선로전류
 Fig. 10. Terminal voltage of limiter and line current in $r_{co} = 0.025$ and 0.027 [m] ($r_{pr} = 0.041$ [m], $r_{sc} = 0.028$ [m])

그림 11에 보여준 1차권선비에 따른 제한기의 양단전압 및 선로전류에서도 1차권선비 m 에 따라 전류제한이 두가지 형태로 이루어지고 있음을 알 수 있다. 위의 1차권선비와 철심코어의 크기에 따른 사고전류제한형태로부터 ($L_{11} - L_s$) >> $m^2 R_2$ 이면 전류제한이 저항형으로 이루어지고 ($L_{11} - L_s$) << $m^2 R_2$ 이면 전류가 유도형으로 제한됨을 짐작할 수 있다. 즉 L_{11} 은 r_{co} , m , μ (H)의 함수이므로 철심코어 크기와 1차권선비에 따라 전류제한이 저항형이나 유도형 또는 이 둘의 혼합형으로 이루어지도록 설계할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 알 수 있었고 실제제작을 위해 이를 고려한 적절한 파라미터설정값을 앞으로의 연구를 통해 조사해

야 될것으로 사료된다.

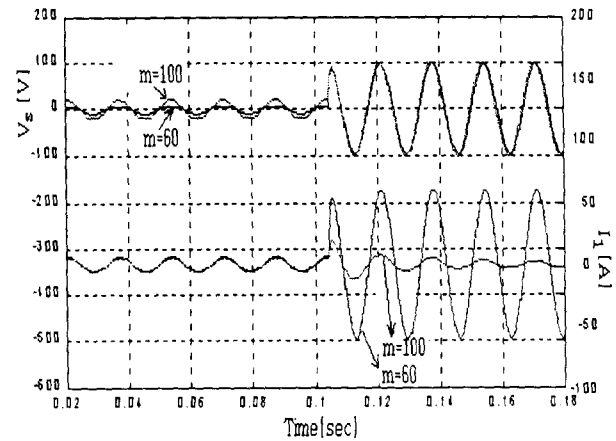


그림 11. 1차권선비에 따른 제한기의 양단전압 및 선로전류
 Fig. 11. Terminal voltage of limiter and line current in $m = 60$ and 100 ($r_{pr} = 0.029$ [m], $r_{sc} = 0.019$ [m])

4. 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) SFCL에 대한 개념설계와 함께 실제 계통에 연결한 자기차폐형전류제한기의 특성변화를 예측하기 위해 모의회로를 제한기와 연결하여 컴퓨터시뮬레이션을 통해 제한기의 설계파라미터에 따른 제한기의 동작특성을 비교분석하였다.

자기차폐형전류제한기의 모델과 등가회로로부터 추출한 파라미터를 입력상수로하여 제한기의 제한특성을 사고각과 1차권선비 및 철심코어의 크기에 따라 분석하였으며 철심코어크기와 1차권선비에 따라 ($L_{11} - L_s$) >> $m^2 R_2$ 을 만족하면 전류제한이 저항형으로, 설계가 ($L_{11} - L_s$) << $m^2 R_2$ 을 만족하도록 되면 유도형으로 동작할 수 있을 뿐 아니라 이 둘의 혼합형으로도 이루어지도록 설계할 수 있다는 중요한 결과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] R. K. Smith, P. G. Slade, M. Sarkozi, E. J. Stacey, "SOLID STATE DISTRIBUTION CURRENT LIMITER AND CIRCUIT BREAKER : APPLICATION REQUIREMENTS AND CONTROL STRATEGIES", IEEE Trans. on Power Del., Vol. 8, pp.1155-1164, Jul., 1993.
- [2] C. A. Falcone, J. E. Beehler, W. E. Mekolites and J. Grazen, "Current Limiting Device - A Utility's Need", IEEE Trans. on PAS, Vol. 93, pp.1768-1775, Nov.,1974.
- [3] E. Thuries, et al., "TOWARDS THE SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER", IEEE Trans. on Power Del., Vol. 6, pp.

- 801-808, April, 1991.
- [4] W. Paul, J. Rhyner, Th. Baumann and F. Platter, "Fault Current Limiters Based on High Temperature Superconductors", Inst. Phys. Conf. Ser. No 148, pp.73-78, (1995)
 - [5] E. M. Leung, et al., "High Temperature Superconducting Fault Current Limiter Development", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, pp.985-988, Jun., 1997.
 - [6] Lembit Salasoo, "Comparison of superconducting fault limiter concepts in electric utility applications", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, pp.1079-1082, Jun., 1995.
 - [7] J. R. Cave, D. W. A. Willen, R. Nadi, W. Zhu, A. Paquette, R. Boivin and Y. Brisette, "Testing and Modelling of Inductive Superconducting Fault Current Limiters", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, pp.832-835, Jun., 1997.
 - [8] Willi Paul and Makan Chen, " Superconducting control for surge currents", IEEE Spectrum, pp. 49-54, May, 1998.
 - [9] 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.
 - [10] 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.
 - [11] 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.

저 자 소 개



임 성 훈(林成勳)

1973년 11월 1일 생. 1996년 전북대 전기공학과 졸업, 1998년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정



최 명 호(崔明鎬)

1965년 12월 5일생. 1992년 2월 전북대학교 공대 전기공학과 졸업. 1995년 2월 전북대 전기공학과 졸업(석사) 현재 동대학원 박사과정.



이 현 수(李賢洙)

1959년 12월 5일생. 1984년 2월 명지대학교 전기공학과 졸업. 1986년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사)
1989년 12월-1991년 2월 일본 나고야대학 공동연구원. 1993년 3월-현재 마산대학 조교수



한 병 성(韓秉誠)

1951년 12월 22일생. 1988년 프랑스 루이파스퇴르대학 박사학위취득. 1988년 프랑스 CNRS(프랑스 국립과학연구소)연구원. 현재 전북대 공대 전기공학과 교수
전북대 공업기술연구소 연구원.