

철심의 자화곡선을 이용한 자기차폐형 고온초전도 전류제한기 특성

Characteristic of Magnetic Shielding Type High-Tc Superconducting Fault Current Limiter Using Magnetization Curve of Iron Core

이 재*, 임성훈*, 송재주**, 김준혁*, 한병성*

(Jae Lee*, Sung-Hun Lim*, Jae-Joo Song**, Jun-Hyuok Kim*, Byoung-Sung Han*)

Abstract

In this paper, we compared the characteristic of fault current limiting in the magnetic shielding type High -Tc superconducting fault current limiter(FCL) using both piecewise linear magnetization curve and real magnetization one of iron core. From this paper, the characteristics of fault current limiting in both cases showed many differences. The latter has higher fault current than the former, because the saturation of iron core was reflected and more accumulated during fault. It is expected that the more exact characteristic of magnetic shielding type High-Tc superconducting FCL was obtained in the case of design and modeling.

Key Words : current limiting characteristic, fault current limiter(FCL), Saturation iron core

1. 서 론**

자기차폐형 고온초전도 전류제한기는 평상시에 는 초전도체가 갖는 마이스너 효과에 의해 철심에 결선된 코일에 자속쇄교가 일어나지 않지만 사고 가 발생될 경우 코일에 자속쇄교가 발생됨으로서 임피던스가 증가되어 선로의 전류를 제한할 수 있게 된다. 그러나, 이와 같은 동작을 위한 철심에 대한 설계가 적절하지 못할 경우, 사고 발생시 철 심의 포화로 인해 효과적인 사고전류를 제한하지 못하게 되는 문제점이 발생된다. 또한, 철심이 갖 는 비선형적인 자화 특성으로 인한 해석의 어려움 때문에 정확한 자화특성을 반영한 모델링이 이루 어지지 않고 있으며, 단지 사고시 포화가 발생되지 않도록 과 설계하는 데에 그치고 있다. 이와 같은

과 설계는 결국 고온초전도 튜브의 부피증가와 더 붙어 전체시스템의 가격상승을 야기하게 된다.

따라서 기존의 차단기와 연계된 동작을 이용할 경우, 차단기의 부담을 감소시킬 뿐 아니라 자기차 폐형 전류제한기의 포화발생에 따른 정확한 사고 전류를 계산함으로써, 요구되는 차단기의 성능과 용량을 결정할 수 있다면, 효과적인 연계동작시스 템을 구성할 수 있어, 철심코어의 포화를 반영한 자기차폐형 전류제한기에 대한 모델링과 이에 대 한 해석이 필요하다.

본 논문에서는 EI 철심의 비선형 특성을 갖는 자화인덕턴스를, 부분선형모델과 실제의 특성모델 을 도입한 경우에 대해, 1차권선의 턴수에 따른 사 고시 전류제한특성을 비교하였다.

2. 특성해석을 위한 등가모델 및 파라미터 설정

2.1 특성해석을 위한 등가모델

자기차폐형 전류제한기의 구성은 철심코어를 포

* : 전북대학교

** : 순천청암대학

Fax : 0 6 3 - 2 7 7 - 0 9 1 8

E-mail : jlee7004@shinbiro.com

함한 1차권선과 튜브 또는 링형태의 고온초전도체로 구성되며, 일반적인 철심형상에 비해 자속포화를 감소시킬 수 있는 EI형 철심을 이용하여 그림 1과 같이 구성된다. 선정된 EI형 철심과 고온초전도 튜브의 설계파라미터는 표 1과 같다. 그림 1의 구조에 대한 자기등가회로와 전기등가회로를 얻을 수 있으며 자기회로와 전기회로의 매개변수는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} L_1 &= N_1^2 \mu_0 \mu_r S_1 / l_1 \\ L_2 &= N_1^2 \mu_0 \mu_r S_2 / l_2 \\ L_3 &= N_1^2 \mu_0 \mu_r S_3 / l_3 \end{aligned} \quad (1)$$

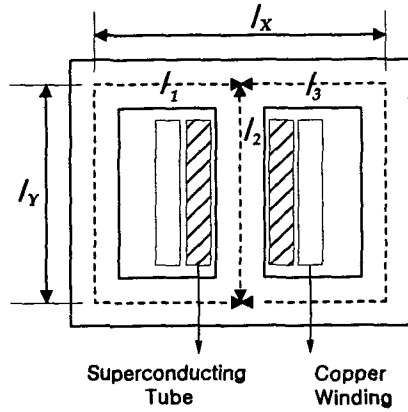


그림 1. 차폐유도형 전류제한기의 구조
Fig. 1. Structure of magnetic shielded SFCL

전기등가회로의 자화인덕턴스 성분은 식 (1)의 파라미터의 조합으로 나타나며 이에 대한 비선형특성을 그림 2와 같은 자화곡선을 수치해석에 도입하였다. 또한 사고시 고온초전도 튜브에 발생하는 저항변화를 기존의 전류제한 실험 값으로부터 얻은 결과를 바탕으로 상전도 상태로 전이되기 전의 혼합상태($t_0 \sim t_1$)을 고려하여 그림 3과 같이 근사화된 곡선을 이용하였다.

표 1. 고온초전도 튜브, 철심코어 및 1차 코일의 설계파라미터
Table 1. Design Parameters of superconducting tube, core and primary coil

Parameter	Unit
Superconducting Tube	
r_o external radius	0.0265 [m]
r_i internal radius	0.0215 [m]
h tube height	0.088 [m]
l_{sc} total length	$2 \cdot \pi \cdot 0.024$ [m]
S_{sc} cross section area	0.00044 [m ²]
I_c critical current	2000 [A]
ρ_n normal conduction resistivity	$100 \cdot 10^{-6}$ [Ω m]
Core	
l_x horizontal length	0.16 [m]
l_y vertical length	0.12 [m]
l_1 magnetic path length of left and right leg	0.28 [m]
l_2 magnetic path length of center leg	0.09 [m]
S_1 cross section area in left leg	0.03^2 [m ²]
S_2 cross section area in center leg	0.03^2 [m ²]
μ_r relative permeability	30,000
B_m maxium magnetic flux density	1.8 [T]
Primary coil	
N_1 1st side winding turns	80 [Turns]
R_{in} line resistance	1 [Ω]
L_{in} line reactance	2 [mH]

2.2 파라미터 결정 및 수치해석 적용

표 1에서 결정된 설계파라미터와 전기등가회로로부터 사고 전에는 초전도 튜브내의 전류가 임계전류(I_c)를 넘지 않아야 되며 사고시엔 임계전류이상의 전류가 유기 되도록 입력저항(R_{in})값과 부하저항(R_{Load})값을 결정해야 하며 다음과 같은 과정으로 설정할 수 있다.

1. 상전이시 고온초전도 저항($R_{sc}(t)$)값 결정

$$R_{sc}(t) = \rho_{sc}(t) l_{sc} / A_{sc} \quad [\Omega] \quad (2)$$

2. 입력저항(R_{in})과 부하저항(R_{Load})값 결정

$$I_{sc} = N_1 \frac{E_1}{R_{in} + R_{Load}} < I_c \quad (3)$$

$$I_{sc} = N_1 \frac{E_1}{Z_{lim} + R_{in}} > I_c \quad (4)$$

$$Z_{lim} = \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{1}{N_1^2 \cdot R_{SC}}\right)^2 + \left(\frac{1}{w \cdot L_m}\right)^2\right]}} \quad (5)$$

$$L_m = \frac{L_2 \cdot (L_1 + L_3)}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (6)$$

식 (5), (6) 으로부터 계산된 Z_{lim} , L_m 으로부터 식 (3)과 (4)를 만족하는 입력 저항값과 부하 저항값을 설정할 수 있다.

앞에서 구한 입력저항과 부하저항을 포함한 파라미터로 구성된 전기등가회로부터 구한 미분방정식의 해를 구하기 위해, 수치해석법으로 FDM(Finite Difference Method)을 사용하였으며 FDM에 의해 전개한 미분방정식은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{Load} + R_{in} + r_p & 0 \\ 0 & N_1^2 R_{SC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \frac{I_2}{N_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{pl} + L_m & -L_m \\ -L_m & L_m + L_{sl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \frac{\bar{I}_2}{N_1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

R_{in} : 입력단 저항

r_p : 1차 코일 동선 저항

L_{pl} : 1차측 누설 인덕턴스

L_{sl} : 2차측 누설 인덕턴스

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

$$V(n) = R(n) \cdot I(n) + \frac{L(n)}{\Delta t} (I(n+1) - I(n)) \quad (9)$$

$$\Delta t V(n) = \Delta t R(n) \cdot I(n) + L(n) \cdot I(n+1) - L(n) \cdot I(n) \quad (10)$$

$$I(n+1) = L(n)^{-1} \cdot [L(n) - \Delta t R(n)] \cdot I(n) + L(n)^{-1} \cdot \Delta t V(n) \quad (11)$$

위에서 전개된 미분방정식에서 매시간 구한 해로부터 자화인덕턴스에 흐르는 전류를 구한 다음 그림2 에 나타난 자화 곡선으로부터 투자율을 구하도록 모델링 함으로서 비선형 특성을 갖는 철심의 자화 특성을 반영하였으며 비포화 영역에서 포화영역의 전 영역에서 동작하는 자기차폐형 전류제한기의 동작특성을 분석하였다.

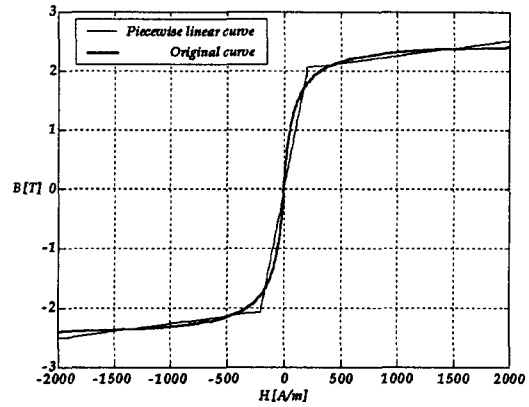


그림 2. 철심의 자화 곡선
Fig. 2. Magnetization Curve of iron core

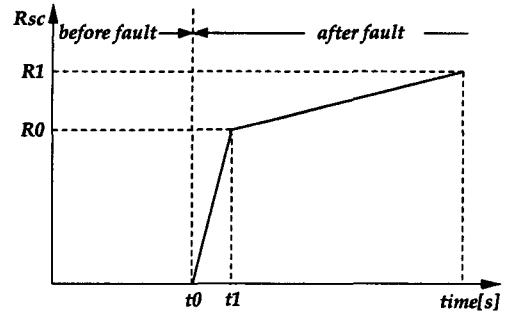


그림 3. 사고전후의 고온초전도 튜브의 근사저항곡선
Fig. 3. Approximate Resistance curve of HTSC tube before and after fault occurs.

3. 결과 및 고찰

앞에서 FDM에 의해 전개한 미분방정식에 철심의 비선형 특성을, 등가 부분선형직선과 실제의 자화곡선(그림 2)를 도입하여 1차권선의 턴수(N_1)에 따른 전류제한특성을 비교분석 하였다.

그림 4는 철심의 자화곡선을 부분선형직선으로 모델링한 경우의 일차 권선 턴수에 따른 선로전류(I_1)와 한류기 양단전압(V_{sc})의 궤적을 비교한 것으로 권선의 턴수가 증가함에 따라 사고시 전류가 효과적으로 감소되는 것을 확인할 수 있으며 이는 권선의 턴수 증가는 사고시 철심의 자화 특성이 비포화 영역에서 동작되도록 작용함으로서 사고전류를 더욱 제한하게 되는 것을 확인할 수 있다.

실제의 자화곡선을 도입하여 모델링한 경우(그림 5)도 마찬가지로 턴수 증가에 따라 사고시 선로전

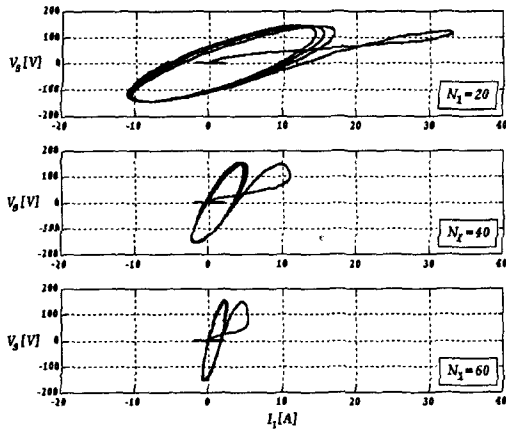


그림 4. 부분선형 B-H 곡선을 이용한 경우의 1차 권선의 턴수에 따른 선로전류와 한류기 양단전압궤적

Fig. 4. Quadrature of line current and terminal voltage dependent on 1st winding turns using piecewise linear B-H curve

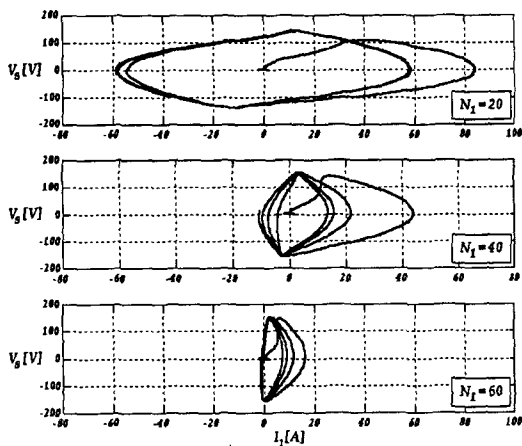


그림 5. 실제의 B-H 곡선을 이용한 경우의 1차 권선의 턴수에 따른 선로전류와 한류기 양단전압궤적

Fig. 5. Quadrature of line current and terminal voltage dependent on 1st winding turns using original B-H curve

류제한효과가 증가함을 볼 수 있으나 부분선형직선으로 자화 특성을 모델링한 경우보다 사고전류 제한효과가 저하됨을 발견할 수 있다. 이는 선형직선 모델을 이용, 철심코어의 자화 특성을 이용하여

비포화 영역에서 동작되도록 자기차폐형 고온초전도 전류제한기를 설계할지라도 실제의 동작시에는 포화의 발생을 예상할 수 있으며 이러한 포화방지를 위해 철심을 포함한 자기차폐형 전류제한기의 설계가 실제 계산한 결과보다 크게 설계될 수밖에 없음을 보여준다. 또한 사고시 자기차폐형 전류제한기가 포화가 발생될지라도, 실제의 철심이 가지고 있는 자화 특성을 반영한 모델을 이용하여 정확한 사고전류크기를 계산할 수 있다면 고온초전도 한류기와 연계된 장치들의 용량과 요구되는 동작성능(차단시간 등)을 결정할 수 있어 효과적인 계통시스템을 구성할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

자기차폐형 고온초전도 전류제한기가 사고시 철심에 대한 설계가 적절하지 못할 경우 철심의 포화로 효과적인 사고전류를 제한하지 못하는 문제점은 모델링을 통해 확인하였다. 이것은 비선형적인 자화특성의 어려운 해석 때문에 전류제한기의 과 설계로 한류기의 부피증가와 가격상승을 야기하게 된다. 본 논문에서는 E[철심의 비선형 특성을 갖는 자화 인덕턴스를 선형 모델과 실제의 특성 모델을 도입하여 1차 권선의 턴수에 따른 사고시 전류제한 특성을 비교하였다. 철심코어의 자화 특성은 선형 모델과 실제의 특성 모델을 도입하여 정확한 사고전류 크기를 계산할 수 있다면 자기차폐형 한류기와 연계된 장치들의 용량과 동작성능을 결정할 수 있는 효과적인 계통시스템을 구성할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] Kazuhiro Kajikawa, Katsuyuki Kaiho and Noriharu Tamada, "Design and Current-Limiting Simulation of Magnetic-Shield type Supercond. Fault Current Limiter High Tc Supercond.", IEEE Trans. on Appl. Supercond., NO. 4, pp. 2667-2670, Vol. 32, Jul., 1996.