

자속구속형 고온초전도 전류제한기 동작 특성

임성훈¹, 최효상², 강형곤³, 고석철⁴, 이종화¹, 최명호⁵, 송재주⁶, 한병성⁷
전북대학교¹, 조선대학교², 광주보건대학³, 청암대학⁴

Operational characteristic of flux-lock type HTSC-FCL

Sung-Hun Lim¹, Hyo-Sang Choi², Hyeong-Gon Kang³, Seok-Cheol Ko⁴, Jong-hwa Lee¹,
Myung-Ho Choi⁵, Jae-Joo Song⁶, Byoung-Sung Han⁷
Chonbuk National Uni.¹, Chosun Uni.², Kwangju Health College³, Sun Cheon Chongam College⁴

Abstract

The operational characteristics of flux-lock type high-T_c superconducting fault current limiters(HTSC-FCLs) was described and currents equation at each coil was derived from equivalent circuit. YBa₂Cu₃O_{7-x}(YBCO) thin film was used as the current limiting elements of the flux-lock type HTSC-FCL, which were fabricated by etching the YBCO thin film into 2 mm wide and 420 mm long meander line consisting of fourteen stripes with different length. The 2nd peak on the current of coil 2 after a fault disappeared by current of the 3rd winding, which was installed in the flux-lock type HTSC-FCL

Key Words : flux-lock type HTSC-FCL, current limiting elements

1. 서 론

해마다 증가되는 전력수요의 증가에 따라 사고전류를 포함한 송전용량이 증가되고 있다. 특히 사고전류의 증가는 기존 차단기의 차단용량의 초과로 이에 따른 교체의 필요성과 함께 계통에 관련된 기기에 심각한 부담을 안겨주고 있다. 이를 해결할 수 있는 유일한 대안으로 고온초전도체를 이용한 사고전류제한기가 적합할 것으로 기대되고 있으며 매년 증가되고 있는 전력요구와 전력공급으로 인한 전력계통의 용량증가로 기존의 차단기의 용량증가와 성능향상을 위해 발생하는 추가비용을 줄일 수 있다는 장점이 상용화를 위한 연구를 지속시키고 있다[1-2].

최근에 발표된 고온초전도체를 이용한 자속구속형 전류제한기는 사고시 별도의 전원없이 자체를 발생시켜 상전도 상태에서의 저항을 크게 할 수 있는 특징이 있으며 고온초전도체가 갖는 재료적인 취약성을 극복할 수 있는 장점으로 이에 대한 관심이 고조되고 있다[3].

본 논문에서는 자속구속형 고온초전도 전류제한기에 대한 동작특성에 대해 분석한 다음, 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 사고시 선로전류를 포함한 각 코일에 흐르는 전류파형을 분석하였다.

이때, 사고시 3차권선에 흐르는 전류가 각 권선에 흐르는 전류에 미치는 영향을 분석하여 향후 철심을 포함한 자속구속형 전류제한기의 구성요소에 대한 설계 자료로 활용하고자 한다.

2. 본 론

2.1 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 동작특성

2.1.1 구조 및 동작원리

자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구성은 그림 3.1 에 보인바와 같이 철심코어를 매개로 코일 1, 2는 병렬로 쇠교자속의 증감 여부에 따라 가극성 또는 감극성으로 연결되고 코일 2에 고온초전도 소자가 연결된다.

N₁, N₂ 를 각 코일 1, 2의 턴수라 하고 각 코일에 유기되는 전압을 V₁, V₂ 라 하면 각 코일의 전압은 식 (1)과 (2)와 같이 표현된다.

$$V_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

$$V_2 = \pm N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

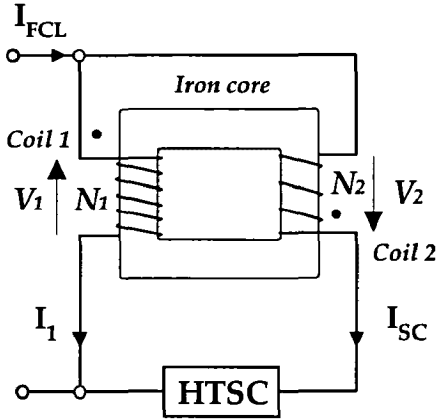


그림 1. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구조
Fig. 1. Schematic diagram of the flux-lock type SFCL

사고전의 고온초전도소자의 양단전압은 0이 되므로 코일 1과 2의 양단전압은 같게 되어 다음식이 성립된다.

$$(N_1 \pm N_2) \frac{d\Phi}{dt} = 0 \quad (3)$$

여기서 $N_1 \pm N_2 \neq 0$ 이 성립하면 $\frac{d\Phi}{dt} = 0$ 이 성립되며 각 코일에 쇄교하는 자속은 시간적으로 변하지 않게 되므로 각 코일에 유기되는 전압은 식 (4)과 같이 제로가 된다.

$$V_1 = V_2 = 0 \quad (4)$$

자속구속형의 특징은 식 (4)에서 알 수 있듯이 정상시에는 철심에 교류자속이 발생되지 않으므로 철손이 발생되지 않는 장점이 있다.

사고가 발생되어 임계전류를 넘는 전류가 고온초전도소자에 흐르게 되면 발생된 고온초전도 저항으로 인해 쇄교자속에 시간변화가 생겨 각 코일에 전압이 유기되고 이로 인해 사고전류는 제한된다.

이때 3차권선을 추가로 설치할 경우 사고시에 시간적인 변화를 갖는 쇄교자속으로 인해 3차권선에

전압이 유기되며, 이와 동시에 3차권선에 전류가 흐르게 된다. 3차권선에 고온초전도 소자를 내부에 포함하여 수직자계가 인가될 수 있는 솔레노이드 형태의 코일을 설치할 경우 사고와 동시에 코일에 흐르는 전류로 인해 고온초전도 소자에 교류자계를 인가하게 된다. 이때 인가된 교류자계로 인해 고온초전도 소자의 저항은 더욱 증가할 수 있으며 동시에 사고전류를 제한하게 된다. 이와 같은 구조는 사고시 별도의 전원이나 사고검출 장치없이 자계 인가가 이루어지는 자기검출 자계발생 장치로 동작하게 된다.

2.1.2 특성해석을 위한 등가회로

그림 1에 자계코일과 함께 3차코일이 설치된 구조로부터 그림 2의 등가회로를 유도할 수 있으며 사고시 발생된 고온초전도 소자의 상전도 저항을 R_{SC} 라 하면 제한기의 한류임피던스 Z_{lim} , 고온초전도 소자를 도통하는 전류 I_{SC} 를 포함한 코일 1의 전류 I_1 및 코일 3에 도통하는 전류 I_3 는 그림 2의 등가회로로부터 식(5), (6), (7), (8)과 같이 유도할 수 있다.

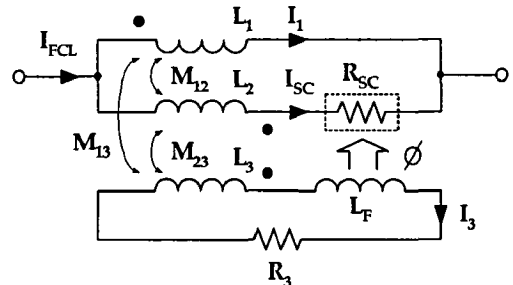


그림 2. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로

Fig. 2. Equivalent circuit of the flux-lock type

$$Z_{FCL} = \frac{R_{SC} L_1 (-\omega^2 L_f + j\omega R_3)}{X} \text{ SFCL} \quad (5)$$

$$\frac{I_{SC}}{I_{FCL}} = \frac{-\omega^2 \sqrt{L_1} L_f L + j\omega \sqrt{L_1} L R_3}{X} \quad (6)$$

$$\frac{I_1}{I_{FCL}} = \frac{R_{SC} R_3 - \omega^2 L_f L (L - \sqrt{L_1})}{X} \quad (7)$$

$$+ j\omega \frac{LR_3(L - \sqrt{L_1}) + R_{SC}(L_f + L_3)}{X}$$

$$\frac{I_3}{I_{FCL}} = \frac{j\omega \sqrt{L_1 L_3} R_{SC}}{X} \quad (8)$$

$$X = R_3 R_{SC} - \omega^2 L_f L^2 + j\omega(L^2 R_3 + L_f R_{SC} + L_3 R_{SC})$$

여기서 L_1, L_2, L_3 는 각 코일의 인덕턴스, L_f, R_3 는 자계 인가회로의 인덕턴스 및 저항, ω 는 각주파수, I_{FCL} 는 제한기에 의해 제한되는 선로전류를 나타낸다. 위 식에서 L 는 $\sqrt{L_1} \pm \sqrt{L_2}$ 으로 + 또는 -부호는 1, 2차 권선에 의한 자속의 증감에 따라 결정된다.

마찬가지로, 식 (5)에서 식 (8)로부터 L_3 와 L_f 에 제로값을 대입하고 $R_3 = \infty$ 로 할 경우 3차권선이 없는 그림 1의 등가회로에 대한 제한기 임피던스와 각 권선에 도통되는 전류를 유도할 수 있다.

2.2 자속구속형 고온초전도 전류제한기 실험장치구성

자속구속형 고온초전도 전류제한기를 구성하는 고온초전도 소자는 금 코팅된 $YBa_2Cu_3O_7$ 박막을 이용하였으며 photolithography기술을 이용하여 폭 2mm, 전체길이 420mm인 14개의 스트립을 갖는 meander형태로 제작하였다.

표1. 자속구속형 고온초전도 전류제한기

설계파라미터

Table 1. Design parameters of the flux-lock type SFCL

Iron Core (Laminated Si)	Size	Unit
Outer Horizontal Length	106	mm
Outer Vertical Length	171	mm
Inner Horizontal Length	41	mm
Inner Vertical Length	106	mm
Thickness	85	mm
Coil 1, 2 and 3	Value	Unit
Self Inductance of Coil 1 (Number of turns)	42(42)	mH (Turns)
Self Inductance of Coil 2 (Number of turns)	1.63(14)	mH (Turns)
Self Inductance of Coil 3 (Number of turns)	0.9 (7)	mH (Turns)
	1.63(14),	(Turns)
	3.8 (28),	(Turns)
	42 (42)	(Turns)

철심코어를 매개로 누설인덕턴스를 최소화하기 위해 1,2,3차 코일을 동일레그에 적층하여 자속구속형 리액터를 제작하였으며 제작된 철심의 크기와 각 코일의 자기인덕턴스를 표 1에 나타내었다.

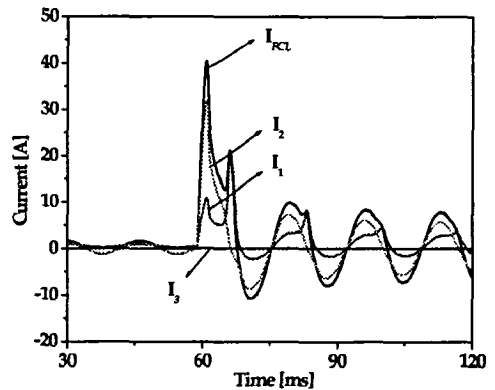
3. 결과 및 고찰

설계한 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 편지특성 및 전류제한 특성측정을 위한 회로를 구성하였으며 실험을 위한 전원전압은 50 V_{rms}, 선로저항 및 부하저항은 각각 1 Ω, 50 Ω으로 하였으며 사고조건은 0도 사고를 5주기동안 유지시켰다.

그림 3은 3차권선이 없는 감극결선시 선로전류 (I_{FCL})를 포함한 각 코일(I_1, I_2, I_3)의 전류를 보여준다.

그림 3. 3차권선이 없는 제한기의 전류파형

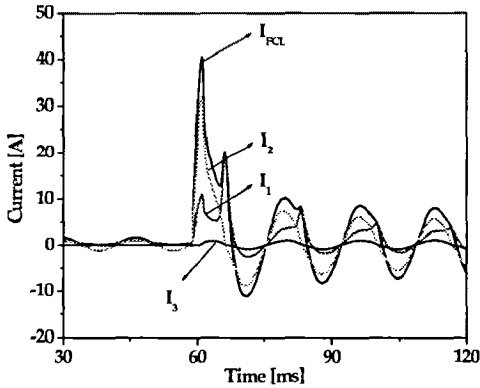
Fig. 3. Current waveforms of SFCL without



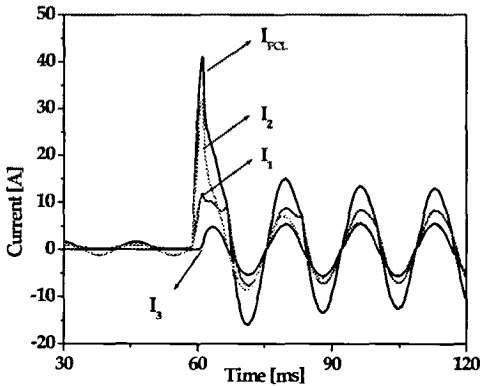
the 3rd winding

사고발생직후 고온초전도소자에 흐르는 전류가 임계전류값을 넘는 시점에서부터 고온초전도 소자에 저항이 발생되기 시작하고 일정크기의 저항이 발생되어 코일 2에 전류크기가 감소되기 시작하면 자기적인 결합으로 인해 코일 1의 전류도 감소되며 이에 따라 선로전류도 그 크기가 감소되어 제한되는 것을 볼 수 있다. 그후 고온초전도 소자가 연결된 2차코일에 흐르는 전류의 위상이 코일 1의 위상보다 앞서게 됨에 따라 2차코일의 전류가 먼저 0으로 떨어지는 시점에서 코일 1의 전류가 다시 증가되는 피크가 나타남을 확인할 수 있다.

이와 같은 1차전류의 피크현상은 고온초전도 소자의 저항이 어느정도 증가되어 그 증가량이 작아진 시점부터는 그 효과가 감소되는 것을 그림에서 확인할 수 있다.



(a) $L_3 = 7mH$



(b) $L_3 = 42mH$

그림 4. 3차권선이 설치된 제한기의 전류파형
 Fig. 4. Current waveforms of SFCL with the 3rd winding

그림 4는 3차권선에 저항 $R_3 = 10\Omega$ 이 연결되었을 경우 3차권선의 인덕턴스크기에 따른 전류제한 특성을 보여준다. 사고전에는 3차권선에 전류가 흐르지 않게 되지만 사고가 발생됨과 동시에 3차권선의 인덕턴스에 비례하여 유기되는 전류가 증가됨

을 볼 수 있다. 사고시 3차권선에 흐르는 전류가 증가함에 따라 사고초기 1차권선에 흐르는 전류에 나타났던 두 번째 피크가 사라지는 것을 볼 수 있으며 이는 사고시 철심에 축전된 자기적인 에너지가 3차권선의 전류에 비례하여 방전된 결과로 해석할 수 있다.

4. 결 론

자속구속형 고온초전도 전류제한기의 동작특성에 대해 분석하고 등가회로를 이용하여 각 권선에 흐르는 전류와 제한기 임피던스를 유도하였다. 고온초전도 박막을 이용하여 자속구속형 전류제한기의 동작특성을 실험하였으며 자속구속형 전류제한기의 사고직후 1차권선의 나타났던 피크가 3차권선을 설치하였을 경우 3차권선의 전류가 증가함에 따라 그 영향이 나타나지 않음을 확인하였다.

이는 철심의 포화와 관련 것으로 향후 철심의 구조를 고려하여 이에 대한 분석을 하고자 한다.

참고 문헌

- [1] Yu Jiang, Shi Dongyuan, Duan Xianzhong, Tang Yuejin, Cheng Shijie, "Comparison of superconducting fault current limiter in power system", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 1, pp.43-47, 2001.
- [2] Lin Ye, LiangZhen Lin, Klaus-Peter Juengst, "Application Studies of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Systems", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 12, No. 1, pp.900-903, Mar., 2002.
- [3] Sung-Hun Lim et al., "Current limiting characteristics of flux-lock type High-Tc superconducting fault current limiter with control circuit for magnetic field", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, to be published, 2003.
- [4] X. Grandos, T. Puig, J. Teva, E. Mendoza and X. Obradors, "Quench Behavior of the Switching Elements of a Hybrid HTS Current Limiter", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 11, No. 1, pp.2406-2409, Mar. 2001.