

전압 증가에 따른 자속구속형 고온 초전도 전류제한기의 사고전류 제한 특성

조용선*, 박형민*, 임성훈**, 박충렬**, 한병성**, 최효상*, 현옥배***, 황종선****
 조선대학교 전기공학과*, 전북대학교 전기공학과**, 한국전력연구원***, 남도대학교****

The Fault Current Limiting Characteristics According to Increase of Voltage in a Flux-Lock Type High-T_c Superconducting Fault Current Limiter

Yong-Sun Cho*, Hyoung-Min Park*, Sung-Hun Lim**, Chung-Ryul Park**, Byoung-sung Han**,
 Hyo-Sang Choi*, Ok-Bae Hyun***, Jong-Sung Hwang****
 Chosun Uni*, Chonbuk National Uni**, KEPRI***, Jeonnam Provincial collage****

Abstract - In this paper, we analyzed the current limiting characteristics according to increase of source voltage in the flux-lock type high-T_c superconducting fault current limiter (SFCL). The flux-lock type SFCL consisted of two coils, which were wound in parallel each other through an iron core, and high-T_c superconducting (HTSC) element connected with coil 2 in series. The flux-lock type SFCL has the characteristics better in comparison with the resistive type SFCL because the fault current in the flux-lock type SFCL can be divided into two coils by the inductance ratio of coil 1 and coil 2. The fault current limiting operation of the flux-lock type SFCL can be different due to winding direction of the two coils. The winding method where the decrease of linkage flux between two coils in the accident happens is called the subtractive polarity winding and the winding method in case of the increase of linkage flux is called the additive polarity winding. The fault current limiting experiments according to the source voltage were performed for these two winding methods. Through the comparison and the analysis of the experimental data, we confirmed that the quench time was shorter, irrespective of the winding direction as the source voltage increased and that the fault current and the HTSC's resistance increased as the amplitude of the source voltage increased. The additive polarity winding made the fast quench time and the lower resistance of HTSC element in comparison with the subtractive polarity winding. The fault current of the subtractive polarity winding was larger than that of the additive polarity winding. In conclusion, we found that the additive polarity winding reduced the burden of SFCL because the quench time was shorter and the fault current was smaller than those of the subtractive polarity winding.

1. 서 론

전력 수요의 지속적인 증가로 인해 대단위의 발전설비가 증가되고 복잡해짐에 따라 전력 용량뿐만 아니라 사고전류 또한 증가하고 있는 실정이다. 이러한 사고전류 증가로 인해 전력계통과 관련된 각종전기설비의 전기적 및 기계적인 충격에 있어서 보다 높은 안정된 설비들을 요구하게 되었다. 그에 대한 많은 노력으로 차단내력이 큰 차단기로 교체하거나 전력계통의 모선을 분리하여 연계 운전을 실행하고 있다. 하지만 차단기교체와 같은 사고전류 대책은 차단기 구성요소를 포함한 차단기 동작

의 기술적인 한계에 다다랐으며, 또한 모선 분리에 의한 사고전류 저감대책은 인접한 선로에 전압 변동, 과부하 및 계통 안정도 저하와 같은 문제가 발생하고 있는 실정이다[1]. 이러한 상황에서 사고전류를 제한하는 방법으로 고온 초전도체를 이용하여 사고전류를 제한하는 방법에 초점을 두게 되었다. 고온 초전도 사고전류 제한기는 크게 퀀치형과 무퀀치형으로 분류가 된다. 퀀치형은 초전도체의 성질중 하나인 영저항 특성을 이용하여 초전도 상태에서 임계전류이상의 전류가 유입되면 상전도 상태로 상전이 발생하여 저항형과 마이스너 효과를 이용한 유도형으로 다시 분류할 수 있다[2-3]. 그리고 무퀀치형은 초전도 코일의 인덕턴스를 이용하여 정상 상태에서 코일에 전류를 저장하고 사고시에 급격한 사고전류의 증가를 억제하는 방법을 이용한다[4].

자속구속형은 사고 발생시 나타나는 사고전류가 인덕턴스를 통하여 초전도체에 유입되면서 임계전류의 초과로 인한 퀀치 발생을 이용하여 사고 전류를 제한한다는 점에서 저항형으로 분류할 수 있다.

저항형 고온초전도 전류제한기는 사고전류가 직접 소자에 도통하기 때문에 소자의 파손우려가 크다. 또한 용량의 증대를 위해 직병렬된 소자를 사용할 수 있지만 동시 퀀치 문제가 시급히 해결해야 할 과제로 남아있다. 이에 반면 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 사고전류가 1차 코일과 2차 코일에 의해 제한되어 초전도소자에 흐르지 때문에 소자의 부담을 줄일 수 있다[5-6].

본 논문에서는 코일 1과 코일 2의 결선방향에 따라 전원전압의 증가시 사고전류와 소자전류, 소자저항, 소자의 소비전력이 어떻게 변화하는지의 특성을 비교·분석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 자속구속형 고온 초전도 전류제한기의 구조 및 동작 원리

자속구속형 전류제한기의 구조는 그림 1과 같이 철심 코어에 코일 1과 코일 2가 병렬로 연결되어 있는 구조이다. 실험에서 사용된 고온 초전도 소자의 임계특성 및 설계사양은 표 1과 같다.

그리고 고온 초전도 소자는 임계온도 이하의 온도를 유지해야하기 때문에 액체 질소가 담겨진 Cryostat내부에 삽입을 하며 코일 2에 직렬로 연결된 구조를 갖는다.

자속구속형 고온 초전도 전류제한기의 동작 원리는 코일 1과 코일 2의 결선방향에 따른 쇄교자속의 증감 여부에 따라 감극 결선과 가극 결선으로 분류할 수 있다. N₁과 N₂는 코일 1과 코일 2의 권선수이며 각각의 코일에 유기되는 전압을 V₁과 V₂라 하면 각 코일의 전압은 식 (1)과 (2) 같이 표현할 수 있다.

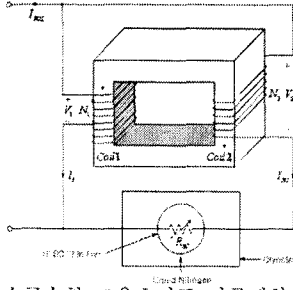


그림 1 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구조
Fig. 1 Scheme of Flex-Lock Type HTSC Fault Current Limiter

표 1 고온 초전도 소자(YBCO)의 임계특성 및 설계사양
Table. 1 Critical Characteristics and Design Specification of HTSC Thin Film

Parameter	Unit
Type	Meander Type
직경	2 inch
스트립 폭	2 mm
전체 길이	420 mm
임계 전류	18 [A]
임계 온도	87 [K]

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

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

사고 발생 전의 고온 초전도 소자의 양단 전압은 0 V 이므로 코일 1과 코일 2의 양단 전압은 같게 되어 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (3)에서 $N_1 \pm N_2 \neq 0$ 을 만족한다면 $d\phi/dt = 0$ 이 항상 성립할 것이다. 즉, 각 코일에 쇄교하는 자속은 시간적변화가 없이 구속되어 동작한다고 볼 수 있다. 따라서 사고전 각각의 코일에서는 전압이 유기되지 않고 항상 0 V라는 것을 알 수 있다.

사고발생 후, 임계전류를 초과하는 사고전류가 초전도 소자에 흐르게 되면 소자가 퀘칭되어 소자저항이 급격히 상승하게 된다. 발생된 이 소자저항으로 인해 코일 1과 코일 2의 쇄교자속에 시간적인 변화가 생겨 전압이 유기되고 이로 인해 사고전류는 급격히 제한된다.

그림 2는 감극 결선시 전압방향과 전류방향을 나타낸 것이며, 이 그림으로부터 식 (4)와 식 (5)와 같은 전압·전류 관계식을 얻을 수 있다.

$$I_{FCL} = I_1 + I_{SC} \quad (4)$$

$$V_1 = V_{SC} - V_2 \quad (5)$$

사고 전에는 코일 1과 코일 2에 쇄교자속의 시간적 변화가 없으므로 각각의 코일에 유기되는 전압은 0V이고, 전류는 동상의 전류가 흐르게 된다. 사고 발생과 동시에 고온 초전도 소자의 저항이 증가하게 되고, 이에 따라 코일 1의 전류가 감소하게 되면 코일 2의 전류 또한 감소하게 되어 사고 전류를 제한하게 된다.

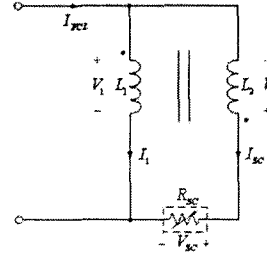


그림 2 감극 결선시 전류흐름 방향과 전압 극성
Fig. 2 Voltage polarity and Direction of current flow in case of subtractive polarity winding

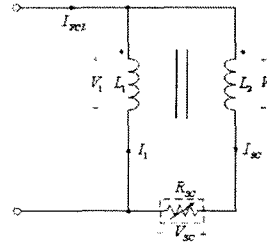


그림 3 가극 결선시 전류흐름 방향과 전압 극성
Fig. 3 Voltage polarity and Direction of current flow in case of additive polarity winding

그림 3은 가극 결선시 전압방향과 전류방향을 나타낸 것이며, N_1 과 N_2 에 흐르는 전류의 방향은 180°의 위상차가 발생한다. 감극 결선과는 달리 이렇게 180°의 위상차가 발생하는 이유는 2차 권선의 결선 방향에 따라 1차 권선과 쇄교하는 자속의 방향이 180°의 위상차를 가지고 있기 때문이다. 이 그림을 통해 식 (6)과 식 (7)과 같은 전압·전류 관계식을 얻을 수 있다.

$$I_{FCL} = -I_1 + I_{SC} \quad (6)$$

$$V_1 = V_{SC} + V_2 \quad (7)$$

2.2 실험장치 구성 및 방법

전압증가에 따른 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 전류제한에 대한 실험은 그림 4와 같은 회로 구조로 실시하였다. V_S 는 회로에 인가되는 전원전압으로 40 V_{rms}, 60 V_{rms}, 80 V_{rms}를 인가하여 실험하였다. $R_0(1\Omega)$ 는 회로 전류를 측정하기 위한 표준저항, $R_L(50\Omega)$ 은 부하 저항을 나타낸다. 그리고 코일 1과 코일 2의 권선수는 N_1 을 63번, N_2 는 21번으로 감았다. YBCO 박막은 표 1과 같은 형태로 설계·제작하였다.

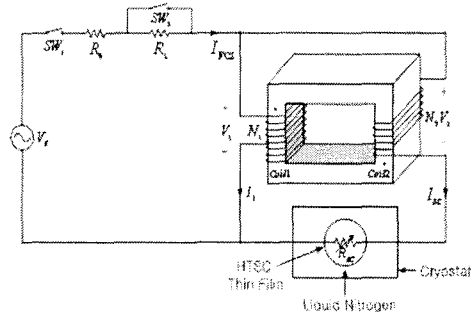


그림 4 실험 회로 구성도
Fig. 4 Diagram of the circuit for experiment

실험 방법은 코일 1과 코일 2를 감극 결선 또는 가극 결선한 후 그림 4의 SW₁을 닫아 선로에 전원전압을 인가해 준다. 이때에는 선로에 정상상태의 선로전류가 흐르기 때문에 초전도소자에는 켄치가 발생하지 않는다. SW₂를 닫아 부하저항을 단락시키면 회로에는 큰 사고전류가 흐르게 된다. 현재 선로에 사용중인 차단기의 차단 시간이 5주기인 것을 감안하여 부하저항의 단락시간도 5주기로 한다. 이때 초전도 소자의 임계전류를 넘게 되면 켄치가 발생하여 사고전류를 제한하게 된다. 전원 전압을 각각 40 V_{rms}, 60 V_{rms}, 80 V_{rms}로 달리하여 사고 발생시에 흐르는 선로전류(I_{FCL}), 코일 1에 흐르는 전류(I₁), 초전도 소자에 흐르는 전류(I_{SC}), 코일 1과 코일 2에 흐르는 양단전압(V₁, V₂), 초전도 소자 양단에 흐르는 전압(V_{SC})을 실험을 통해 측정하였다. 결선 방향에 따라 감극 결선시와 가극 결선시로 나누어 위의 실험방법으로 실행하여 전압증가에 따른 선로전류(I_{FCL}), 소자전류(I_{SC}), 소자전압(V_{SC})을 비교 분석하였다.

2.3 결과 및 고찰

그림 5와 그림 6은 감극 결선시에 전원전압을 40 V_{rms}, 60 V_{rms}, 80 V_{rms}로 나누어 인가하여 그때의 전압과 전류의 변화를 나타낸 것이다. 그림 6에서 사고 발생 이후 선로전류가 초전도소자의 임계전류를 초과할 때 켄치가 발생하여 초기 반주기 동안 사고전류가 제한되어 발생하고 다음 반주기 이후에는 제한되어 점점 안정화되

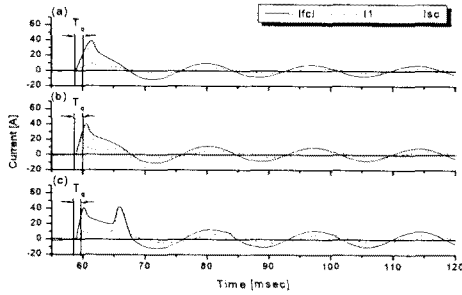


그림 5 감극 결선시의 전류 파형
Fig. 5 Current waveforms in subtractive polarity winding

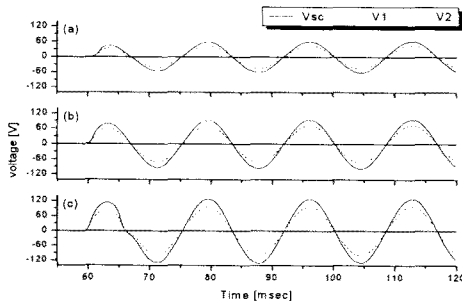


그림 6 감극 결선시의 전압 파형
Fig. 6 Voltage waveforms in subtractive polarity winding

는 것을 확인할 수 있다. 사고 발생부터 초전도 소자의 임계전류에 도달할 때까지의 시간, 즉 켄치시간인 T_q을 비교해 볼 때 40 V_{rms}일 때 1.4 msec, 60 V_{rms}일 때 1.02 msec, 80 V_{rms}일 때 0.81 msec로 점차 감소하는 것을 확

인할 수 있다. 전압이 증가하면서 켄치시간이 빨라지는 것을 볼 수 있지만 선로전류(I_{FCL})와 소자전류(I_{SC})는 거의 증가하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그리고 80 V_{rms} 인가시의 전류변화를 보면 초기 선로전류의 제한이후 점차 선로전류가 상승하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 철심의 포화현상 때문이다. 철심에서 사고전류에 의해 발생한 초기상호자속이 사고전류가 감소하여 상호자속이 감소한다고 하여도 철심의 자속은 0이 되지 않고 철심에는 잔류자속이 계속 남게 된다. 이 잔류자속이 증가하다 철심의 어느 기준을 초과하면 철심이 포화하게 된다. 그림 6에서 전압의 변화를 보면 사고 전에는 소자전압(V_{SC})이 0 V이었다가 사고전류가 발생하면 전압이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 9와 같이 켄치가 발생하면 저항이 급격히 증가하다 점점 증가폭이 줄어드는 것같이 전압 또한 그 증가폭이 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 그림 7과 그림 8은 가극 결선시에 전원전압을 위의 경우와 같이 인가하여 그때의 전압·전류 변화를 나타낸 것이다. 그림 7을 보면 식 (6)에서 코일 1(I₁)에 흐르는 전류가 코일 2(I₂)에 흐르는 전류와 극성이 반대라는 것을 확인할 수 있다.

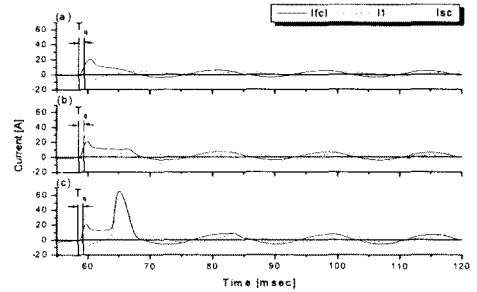


그림 7 가극 결선시의 전류 파형
Fig. 7 Current waveforms in additive polarity winding

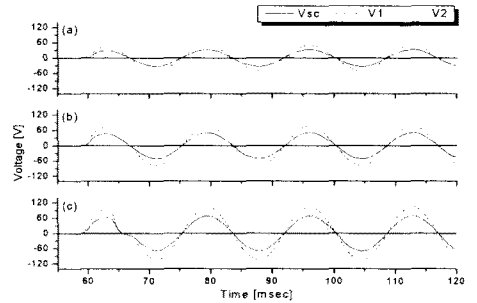


그림 8 가극 결선시의 전압 파형
Fig. 8 Voltage waveforms in additive polarity winding

인가된 전압별로 켄치시간(T_q)을 비교해보면 40 V_{rms}일 때 0.89 msec, 60 V_{rms}일 때 0.66 msec, 80 V_{rms}일 때 0.49 msec로 빨라지는 것으로 나타났고 감극결선시보다 켄치시간이 훨씬 빠르다는 것을 알 수 있다. 전압이 증가하면서 선로전류와 소자전류는 거의 증가하지 않지만 감극 결선과 비교해보면 선로전류가 훨씬 더 감소된다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 전원전압이 증가하면서 철심 포화에 의해 생기는 선로전류의 상승은 감극결선시보다 더 높다는 것을 볼 수 있다. 그림 8을 보면 전압이 증가하면서 감극 결선시보다 소자전압은 더 낮아지고 선

로전압은 더 높다는 것을 알 수 있다

[참 고 문 헌]

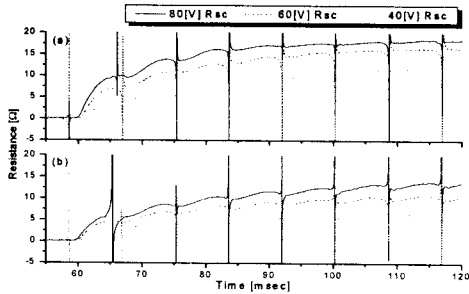


그림 9 감극 결선과 가극 결선의 저항 파형
(a)subtractive polarity
(b)additive polarity

Fig. 9 Resistance waveforms in subtractive and additive polarity winding

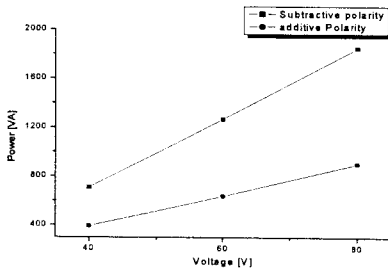


그림 10 감극결선·가극결선의 초전도소자의 소비전력
Fig. 10 The power of SFCL in subtractive and additive polarity winding

그림 9는 감극 결선시와 가극 결선시에 초전도소자의 퀀치 발생하는 소자의 저항 변화를 전원전압별로 나타낸 것이다. 사고 발생시 생기는 선로전류가 초전도 소자의 임계전류를 초과했을 때 소자의 저항이 급격히 증가했다가 일정해지는 것을 볼 수 있다. 전압이 증가할수록 초기에 발생하는 저항의 시간적인 변화량도 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 감극 결선시가 가극 결선시보다 소자에 발생하는 저항이 더 크다는 것을 알 수 있다. 그림 10은 전원전압의 증가에 따른 감극 결선과 가극 결선시 초전도 소자에서 소비되는 찻주기의 전력 변화를 나타내는 것이다. 감극·가극 결선 모두 전압의 증가에 따라 소비전력도 증가를 하지만 감극 결선의 경우에 그 증가량이 더 크다는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 자속구속형 고온 초전도 전류제한기를 코일의 결선방향에 따라 감극 결선과 가극 결선으로 나누어 전압증가에 따른 사고전류의 제한 특성을 분석하였다. 사고 발생후 전압 증가에 따라 감극 결선과 가극 결선 모두 선로전류를 제한하지만 가극 결선의 경우가 감극 결선보다 더 감소한다는 것을 알 수 있었다. 그리고 소자전압 또한 감극 결선보다 더 낮은 것으로 나타났다. 그리고 퀀치 발생시 생기는 소자저항도 감극 결선시에 더 많이 생기는 것으로 나타났다. 이것으로부터 가극 결선시에 소자의 부담이 더 적을 것이라 생각할 수 있다. 전원전압을 증가하면서 발생한 철심포화현상은 전압이 더 증가할수록 더욱 커질것으로 예상이 된다. 앞으로 이 철심포화문제는 자속 구속형 전류제한기의 용량 증대에 있어서 큰 과제로 남게 될 것이다.

- [1] 김준환, 이강완, "전력계통 고장전류 증대와 대응방안", *전기저널*, Vol. 1, pp.001-019, 1998.
- [2] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, W. Ianz, "Fault current limiter based on high temperature superconductors-different concepts, test results, simulations, applications", *Physica C*, Vol. 354, No.1-4, pp.27-33, May, 2001.[3] 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.
- [4] M. Yamaguchi, S. Fukui, T. Satoh, Y. Kaburaki, T. Horikawa, T. Honjo, "Performance of DC reactor type fault current limiter using high temperature superconducting coil", *IEEE Trans. on Appl.Supercond.*, Vol. 9, No. 2, pp.940-943, Jun. 1999.
- [5] Sung-Hun Lim, Hyo-Sang Choi, Byoung-Sung Han, "The fault current limiting characteristics of a flux-lock type high-Tc Superconducting Fault Current Limiter with a Tap charger", *IEEE trans. Appl., Supercond.*, Vol. 14, No. 1, Mar., 2004.
- [6] Hyo-Sang Choi, Hye-Rim Kim, Ok-Bae Hyun, "Operating properties of superconducting fault current limiters based on YBCO thin films", *Cryogenic*, Vol. 41, No. 3, pp.163-167, Mar., 2001.