2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

자속 구속형 고온초전도 전류제한기의 동작특성 분석

박충렬, 임성훈*, 박형민**, 이종화, 고석철, 최효상**, 한병성, 현옥배***, 정동철****
전북대학교 전기공학과, 전북대학교 공업기술연구센터*, 조선대학교 전기공학과**, 전력연구원***,
우석대학교 정보통신공학부****

The Analysis of Operation Characteristics of Flux-Lock Type High-Tc Superconducting Fault Currents Limiter

Chung-Ryul Park, Sung-hun Lim*, Hyoung-Min Park**, Jong-Hwa Lee, Seokcheol, Ko, Hyo-Sang Choi**,
Byoung-Sung Han, Ok-Bae Hyun***, Dong-Chul Chung****
Chonbuk National Uni., The Reach Center of Industrial Technology*, Chosun Uni**., KEPRI***, Woosuk Uni.****

Abstract - In this paper, we investigated the operational characteristics of the fault current limiting in the The flux-lock type high-Tc superconducting fault current limiter. The flux-lock type high-Tc superconducting fault current limiter was consisted of primary and secondary copper coils that flux was locked on iron core and YBCO thin film. The operational characteristic of a flux-lock type SFCL dependent on winding direction of coil 1 and coil 2, and the number of turns of coil 1 and coil 2, inductances of the coils, saturation in iron core, the properties of superconducting element etc. In this cases, we investigated the fault currents limiting characteristics of the flux-lock type SFCL when winding direction of coil 1 and coil 2 was subtractive polarity winding.

1. 서 론

지속적인 전력수요의 증가와 더불어 대단위 발전설비가 증가됨에 따라 전력전송 용량이 날로 증가하게 되었다. 전력전송 용량의 증가는 단락사고로 인한 사고전류의 증가를 야기 시켰고, 증가된 사고전류는 전력계통과 장비들의 안정도 문제에 심각한 영향을 주게 되었다[1]. 증가된 고장전류로 인한 계통 보호 방안으로 여러 가지 초전도 전류제한기가 제안되었다[2-5].

본 논문에서는 영저항 특성 때문에 저항형으로 분류되는 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 동작 특성을 분석하였다. 이는 정상 작동시 철심에 교류자속이 발생되지 않지만 사고전류가 임계전류를 넘으면 고온 초전도 소자에 저항이 발생하게 된다. 소자의 저항발생으로 인한 쇄교 자속에 시간적인 변화가 생기고 결국 각 코일에 전압이 유기되어 사고 전류를 제한하는 방식이다[6-7]. 이를 위해 인가된 전압에서 5주기 동안 사고를 발생시켰을 때, 사고시 선로와 1차 권선, 초전도 소자에 흐르는 전류를 측정하였고, 1, 2차 권선과 초전도 소자양단 전압을 측정하였다. 병렬로 연결된 1,2차 권선의 결선 방향이 감극이었을 때 선로 전류는 코일 1과 코일 2의 합으로 나타나고 초전도 소자에 유기되는 전압은 코일 1과 코일 2의 양단 전압의 합으로 나타난다.

2. 본 론

2.1. 자속 구속형 고온초전도 전류제한기의 구조 및 동작원리

자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구조는 그림 1과 같이 강자성체 철심에 코일 1과 코일 2가 각각 N_1, N_2번 권선되어 선로에 병렬연결되어 있다. 고온초전도소자(YBCO박막)는 임계온도 특성을 고려해 액체질소가 담겨진 Cryostat 내부에 존재하며 코일 2에 직렬 연결되어 있다. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 동작특성은 병렬로 연결된 코일 1과 코일 2의 결선 방향에 따라 가극성과 감극성으로 나누어진다. 코일 1과 코일 2에 유도되는 전압을 V_1과 V_2라 하면 각 코일의 전압은 식 (1)과 (2)와 같이 표현된다.

$$V_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \tag{1}$$

$$V_2 = \pm N_2 \frac{d\Phi}{dt} \tag{2}$$

정상 작동시 고온초전도 소자 양단전압은 0이므로 코일 1과 코일 2의 양단 전압은 같게 되어 식 (3)과 같이 표현된다.

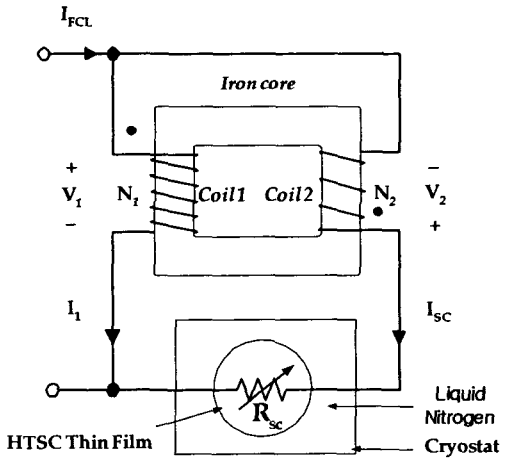


그림1. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구조

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

식 (3)에서 $N_1 \pm N_2 \neq 0$이 만족한다면 $d\Phi/dt=0$은 언제나 성립된다. 이것은 각 코일에 쇄교되는 자속은 시간적으로 변하지 않고 구속되어 있는 것처럼 동작한다.

사고전류가 고온초전도 소자의 임계전류를 초과하면 소자의 퀜치 발생으로 저항(R_{sc})이 발생되고 이로 인해 전압(V_{sc})이 유기된다. 이로 인해 식 (3)은 더 이상 성립되지 않는다. 따라서 코일의 쇄교 자속은 시간에 따른 변화가 생기게 되고 이로써 사고전류는 제한된다.

코일 1과 코일 2의 감극 결선시 사고전류의 제한 동작을 자세히 살펴보면 다음과 같다. 코일 1과 코일 2가 감극 결선일 경우에는 그림 2에서처럼 코일 1과 코일 2가 상호자속을 상쇄시키는 방향으로 결선되어 있다. 그림 2의 회로로부터 사고시 식 (4)와 식 (5)와 같은 전압 전류관계를 얻을 수 있다.

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

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

고온초전도 소자의 저항이 증가함에 따라 코일 2에 흐르는 전류가 감소하게 되고 코일 1의 전류도 감소하게 되어 선로전류를 제한하게 된다.

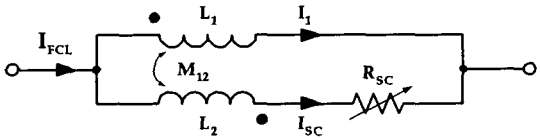


그림 2. 감극 결선시 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로

2.2 실험 장치 및 방법

자속구속형 고온초전도 전류제한기의 결선 방향에 따른 전류제한 실험 회로도는 그림 3과 같이 나타난다. V_s는 $60V_{rms}$로 인가된 전원 전압이고 R_{in}은 전류변화를 측정하기 위한 1Ω짜리 기준저항을 나타내며 부하저항 R_L은 5Ω으로 설정하였다. YBCO박막은 직경 2inch, 전체 길이 420 mm, 스트립 폭 2 mm, 임계전류 18 A, 임계온도 87K의 제원을 가지고 있다.

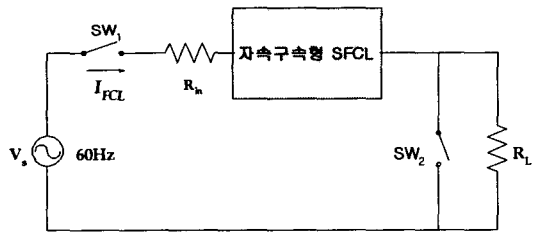


그림 3. 자속구속형 고온초전도 전류제한기 회로도

코일 1과 코일 2를 감극으로 결선한 후 그림 3에서 스위치 SW_1을 닫아 회로에 전압을 인가하면 회로에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하지 않았기 때문에 자속구속형 SFCL은 단락선로처럼 동작했다. 스위치 SW_2를 닫아 단락사고를 발생시키고 회로에 흐르는 선로전류(I_{FCL}), 코일 1에 흐르는 전류(I_1), 초전도소자에 흐르는 전류(I_{SC}), 코일 1,2의 양단전압(V_1, V_2)과 초전도소자 양단전압(V_{SC})을 측정하였다. 측정된 전류, 전압 데이터로부터 코일 1과 2의 감극 결선시 전류제한 특성을 살펴보았다.

2.3 실험 결과 및 분석

그림 4는 코일 1과 코일 2를 감극 결선하여 사고 발생 후 반주기 동안의 전류, 전압, 저항의 동작 파형을 보여준다. 그림 4(a)의 전류 동작파형과 그림 4(b)의 전압 동작파형은 코일 1과 코일 2가 감극 결선되어 있기 때문에 식 (4)와 (5)같이 나타남을 확인할 수 있다. 그림 4(a)와 (b)에서처럼 사고후 반주기 동안 동작모드는 크게 3가지 모드로 나누어 분석할 수 있다. 모드1은 사고발생으로 각 코일에 흐르는 전류가 급격히 증가하는 구간이며 코일 2에 흐르는 전류(I_{SC})가 임계전류(I_C)에 도달하면 끝나게 된다. 그림 4 (b)에서 나타나 듯 모드 1에서의 전압과 저항은 발생하지 않았다. 모드 2는 코일 2에 흐르는 전류(I_{SC})가 고온초전도 소자의 임계전류를 넘어선 다음부터 첫 번째 피크값에 도달되기까지의 구간이다. 이 구간에서는 고온초전도 소자의 퀜치로 인해 코일 1의 양단전압(V_1), 코일 2의 양단전압(V_2), 고온초전도 소자 양단전압(V_{SC})과 고온초전도 저항(R_{SC})이 서서히 발생되기 시작하는 것을 그림 4(b)에서 확인할 수 있다. 만약 고온초전도 소자에 빠른 퀜치가 발생되었을 경우, 모드 1과 모드 2의 구간은 보다 짧아지게 되는 것을 예측할 수 있다. 모드 3은 고온초전도 소자에서 발생된 저항(R_{SC})으로 코일 2에 흐르는 전류(I_{SC})가 감소하는 구간이다. 이 구간에서는 코일 2에 흐르는 전류(I_{SC})가 감소됨에 따라 코일 1에 흐르는 전류(I_1)가 감소되고, 선로에 흐르는 총 전류(I_{FCL})도 감소됨을 그림 4(a)에서 확인할 수 있다.

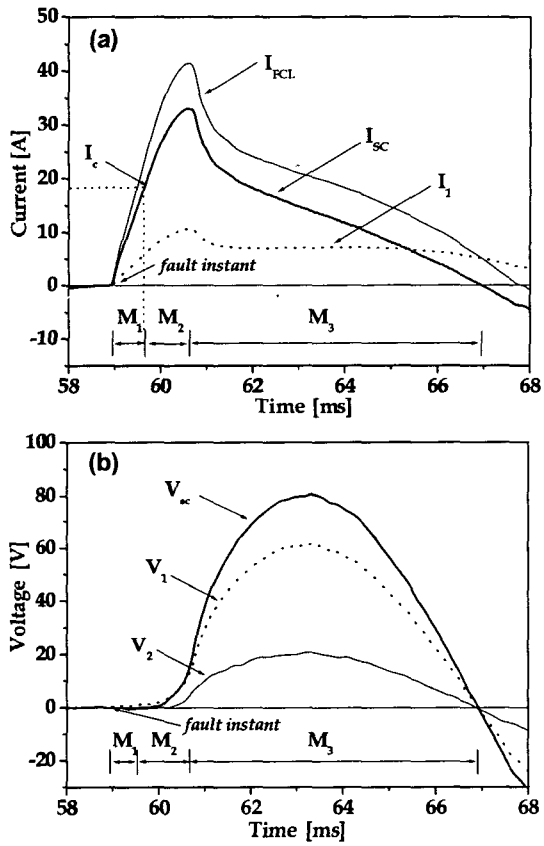
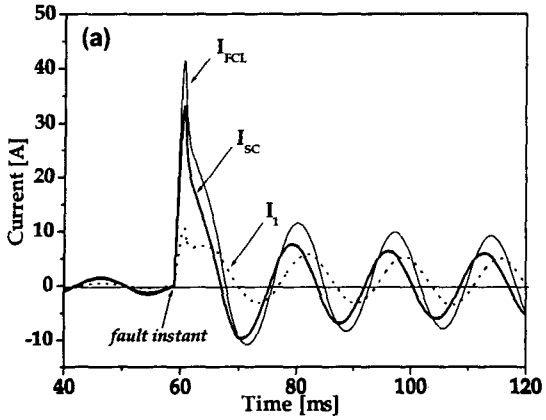


그림 4. 감극 결선시 모드분석을 위한 파형
(a) 전류 (b) 전압

사고 반주기 이후의 동작은 고온초전도 소자의 점진적인 저항 증가와 전원 전압의 크기에 따라 모드 3과 같이 동작하게 되고 이것을 그림 5에서 확인할 수 있다.

그림 5는 코일 1과 코일 2의 감극 결선시 사고후 4주기 동안의 전류, 전압파형을 나타낸 것이다. 고온초전도 소자의 상전도 저항으로 코일 2에 흐르는 전류(I_{SC})가 감소되는 순간 코일 2의 전류(I_1)와 선로전류(I_{FCL})가 제한되는 것을 그림 5(a)를 통해 확인할 수 있다.

전류의 위상차는 코일 1과 코일 2의 인덕턴스에 기인한 것이다. 앞서 식 (5)에서 고찰한 고온초전도 소자 양단전압(V_{SC})은 코일 1과 코일2의 전압의 합으로 나타나는 것을 그림 5(b)에서 확인할 수 있다.



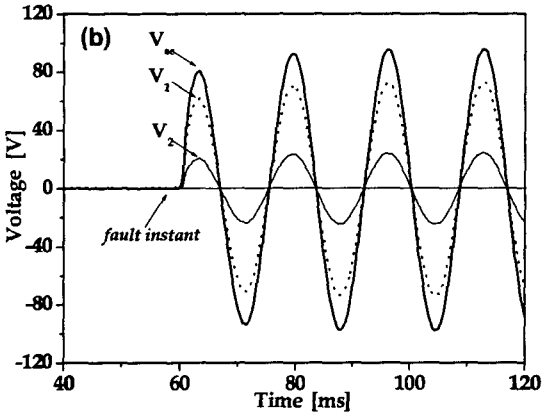


그림 5 감극 결선시 (a)전류 (b)전압 파형

그림 6은 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 상전도 저항의 파형을 나타낸다. 그림 5의 전류, 전압곡선과 비교해 보면 저항은 전류가 초전도 소자의 임계전류를 넘어선 시점에서부터 서서히 발생하는 것을 확인할 수가 있고, 또한 저항곡선과 전압곡선의 관계에서 전류제한정도를 확인할 수 있다.

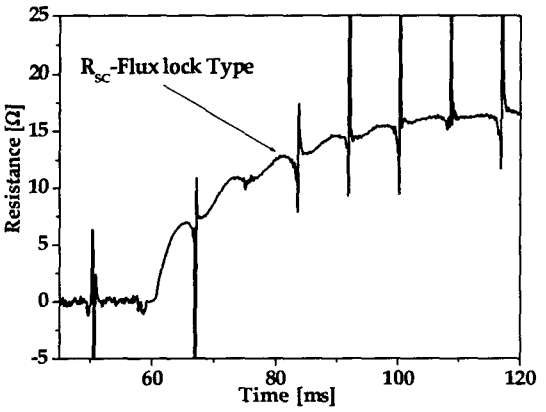


그림 6 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 상전도 저항

3. 결 론

고온초전도 YBCO박막을 고온초전도 소자로 이용하여 자속 구속형 고온초전도 전류제한기를 설계, 제작하였고, 이를 이용하여 코일 1과 코일2의 결선방향을 달리하면서 전류제한 실험을 수행하였다. 코일 1과 코일 2를 감극으로 결선하고 사고 발생 후 반주기동안 전류와 전압을 세 개의 동작모드로 나누어 살펴보았다. 모드 1은 사고발생 후부터 고온초전도 소자의 임계전류에 도달될 때까지 이며 각 코일에 전류가 급속하게 변화한다. 모드2는 코일에 흐르는 전류가 첫 번째 피크점에 도달되면 끝나게 되고, 이때 서서히 코일과 고온초전도 소자 양단에 전압이 유기된다. 모드 3은 초전도 소자의 발생된 저항으로 인해 전류제한이 이루어지는 구간임을 확인할 수 있었다. 이런 각 모드별 분석을 통해서 자속구속형 전류제한기에서 어떻게 전류제한 동작이 이루어지는지 살펴보았다. 향후 코일 1과 코일 2을 쇄교 자속이 증가하는 방향으로 결선 즉, 가극 결선한 경우의 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 동작특성을 분석하고자한다

[참 고 문 헌]

[1] 김준환, 이강완, "전력계통, 고장전류 증대와 대응방안", 전기저널, pp.19 31, 1998
[2] E. Thuries, V.D Pham, Y. Laumond, T. Verhaege, A. fevrier. M. Collet and M. Bekhaled, "Towards the superconducting fault current limiter" IEEE Trans. on Power Del. Vol 6, pp.801 808, 1991
[3] W. paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, W. Lanz, "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
[4] 임성훈, 최명호, 이현수, 한병성, " 차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성 시뮬레이션", 전기학회논문지, Vol. 48C, No. 3, pp.173-178, 1999
[5] W. T. Norris and A. power, "Fault current limiters using superconductors" Cryogenics, Vol. 37, pp.657-665, Oct., 1997
[6] 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 using series resonance", Cryogenics, Vol. 44, pp.249 254, April, 2004