

박막 저항형 초전도 한류기의 용량증대를 위한 방안

차상도*, 김해림, 최효상, 현옥배
한전 전력연구원 신에너지그룹

Increase of resistive type superconducting fault current limiter capacity

Sang-Do Cha*, H. R. Kim, H. S. Choi, O. B. Hyun
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - The resistive type superconducting fault current limiter(SFCL) is a current limiter using the quench mechanism of superconductors. When quench occurs in superconductors, the resistance of superconductors increases abruptly. In order to increase SFCL capacity, current limiting elements were connected in series. If the quench current of each element was different, voltage distribution was imbalanced. This imbalance could be removed by arrangement including series and parallel connection of elements. Based on this result, an SFCL of 1.8kV/50A was designed and experimented, especially, in terms of increasing the voltage rating.

1. 서 론

한류기는 전력계통에서 계통 사고 시 발생하는 고장전류를 억제하여 계통 안정성 및 신뢰성 증대 역할을 한다. 상용 한류장치로는 직렬리액터가 대표적이는데, 이것은 정상시에 항상 손실이 발생하고 리액턴스 성분으로 파형을 변화시키는 단점이 있다. 초전도체를 이용한 한류기는 초전도체의 특징으로 정상시 저항이 낮으므로 손실이 없고 임계전류밀도가 크므로 기기를 소형화할 수 있는 장점이 있다. 초전도체를 이용한 한류방식 중 저항형 초전도 한류기는 고장 전류 발생으로 인하여 초전도 소자가 감당할 수 있는 임계전류를 초과하면 초전도 상태에서 상전도상태로 급격하게 전이하는 특성을 이용한다. 초전도체에 임계전류 이상의 사고 전류가 흐르면 저항이 발생하고 저항성분에 의한 줄열로 인하여 초전도 소자가 켄치 되고, 선로에 수 ms 이내에 수십 옴의 저항이 발생하여 신속하고 효과적으로 사고전류를 제한한다[1-2]. 현재 연구중인 저항형 초전도 한류기는 전류등급을 올리기 위하여 단위 소자를 병렬로, 전압등급을 올리기 위하여 직렬로 연결하여 전체 한류 용량을 결정한다. 하지만 직렬 연결시 각 한류소자간의 임계전류 차이가 크면 전압분배가 불균일해져 전체 전압등급을 높이는 데 문제가 발생한다. 이 문제를 해결하기 위하여 한류소자 양단에 분로저항 또는 분로리액터를 연결하는 등 각 한류소자에 분배되는 전압을 균등하게 하는 연구가 이루어졌다[3-4].

본 논문에서는 한류 용량을 증대시키는 방안으로 임계 전류가 다른 각각의 한류소자를 직·병렬로 연결하고 이의 특성을 기술하고자 한다. 또한, 외부회로 연결 없이 임계전류가 다른 각 한류소자가 동시 켄치됨을 실험적으로 확인하고자 한다.

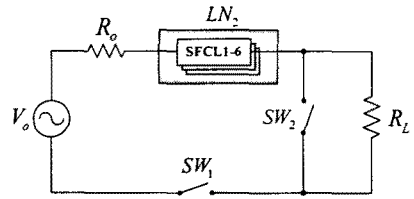
2. 본 론

2.1 실험구성

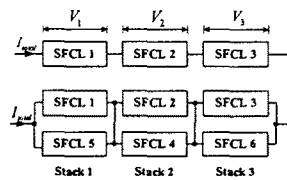
전력 계통에서는 각종 계통 사고로 인해 전류가 증가한다. 이것을 그림 2.1(a)와 같이 실험 장치를 구성해

계통 사고 모의를 하였다. V_0 는 전원전압, R_0 는 전압 변화를 측정하기 위한 표준저항, R_L 은 부하 임피던스, SFCL은 초전도 한류기를 나타낸다. 각 한류소자의 연결은 그림 2.1(b)와 같다. 그림 2.1(c)는 SFCL 단위 한류소자를 나타낸 것이다. 한류소자로 사용된 박막 $YBa_2Cu_3O_7$ 초전도체는 독일의 THEVA社에서 구입한 후 광리토그래피(photo-lithography) 방법으로 제작하였다.

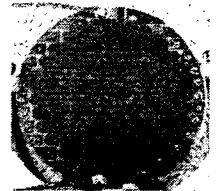
사고 모의는 다음과 같다. R_L 이 결정된 회로에서 스위치 SW_1 을 닫으면 정상시 전류가 흐르다가 스위치 SW_2 를 닫으면 회로의 전류가 증가한다. SW_2 가 닫히는 순간 모의된 사고전류는 약 V_0/R_0 까지 증가한다. 초전도체에 불필요한 과도전류가 흐르지 않도록 차단기가 보통 3 cycle에서 작동하는 점을 고려할 때, SW_1 이 3~9 cycle 후에 개방되도록 실험 장치를 구성하였다.



(a) 실험 회로도



(b) 한류소자의 연결도



(c) YBCO 박막 초전도체 그림 2.1

2.2 단위 소자의 한류 용량

4인치 박막 YBCO를 상전도 상태에서 일정한 저항값을 갖도록 meander line 형태로 제작하였다. Meander line의 폭과 평균 길이는 각각 3.0[mm], 1.42[m]이다. 초전도체 표면은 습기로부터 초전도체 보호와 열분산을 목적으로 금박막으로 코팅되었다. 상온에서는 한류소자의 전체 저항은 금박막에 의해서 결정된다. 금박막의 저항이 온도에 따라 선형적으로 변하는 것을 이용해 금박막의 저항으로부터 한류소자의 온도를 유추할 수

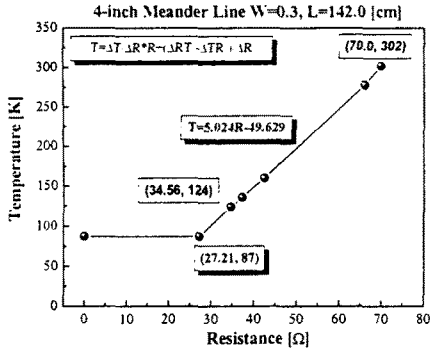


그림 2.2 4인치 단위 한류소자의 저항-온도 특성

있다. 그림 2.2는 제작된 단위 한류소자의 온도에 대한 저항 특성을 나타낸 그림이다. 상전도상태에서 초전도상태로 전이하는 임계온도는 THEVA社에서 제공된 자료이고 이를 통하여 임계저항을 유추하였다. 초전도체의 온도가 200[K]이하에서 안정적으로 동작하도록 한 개의 한류소자가 부담하는 전압등급을 결정한다.

그림 2.3은 한 개의 한류소자를 갖고 그림 2.1(a)와 같이 회로를 구성한 후 실험한 결과이다. 외부 전원을 600[V_{rms}] 인가한 후, 약 30[ms] 지점에서 스위치 SW₂를 닫으면 순간 전류가 증가하고 수 ms 사이에 전류가 제한된다. 이 때 초전도체는 켜치되어 한류소자 양단에 600[V_{rms}]가 발생한다. 그림 2.4는 한 개의 한류소자에서 시간에 따라 발생하는 저항을 나타낸 그림이다. 약 3 cycle 정도 지나면 50[Ω] 정도 유지되며 이 때 한류소자의 온도는 약 200[K] 정도로 예상된다.

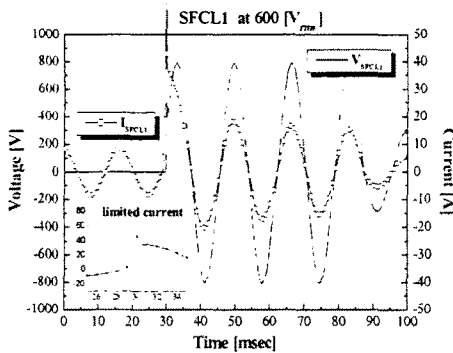


그림 2.3 단위 소자의 전류·전압특성

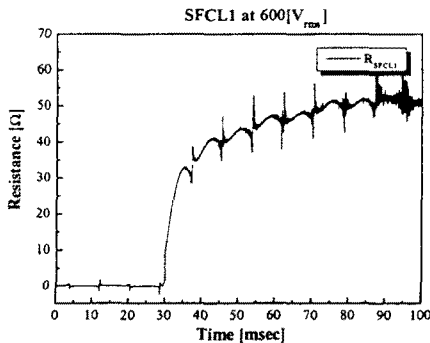


그림 2.4 단위 소자의 저항 변화 특성

2.3 직·병렬 연결에 의한 한류 용량

제작된 6개의 한류소자 임계전류는 표 1과 같다. 초전도 한류기의 전압증대를 위하여 임계전류가 비슷한 단위 소자 3개를 그림 2.1(b)와 같이 직렬로 연결하였다. 직렬로 연결된 한류기의 전류·전압 특성은 그림 2.5와 같다. 각 한류소자가 부담하는 전압이 거의 균일하게 분포하므로 이와 같이 구성된 한류기의 전체 전압은 1.8kV까지 전압을 증가시킬 수 있다.

표 1. 각 한류소자의 임계전류

한류소자	SFCL1	SFCL2	SFCL3	SFCL4	SFCL5	SFCL6
임계전류	34.0 A	34.2 A	33.9 A	34.8 A	35.0 A	35.6 A

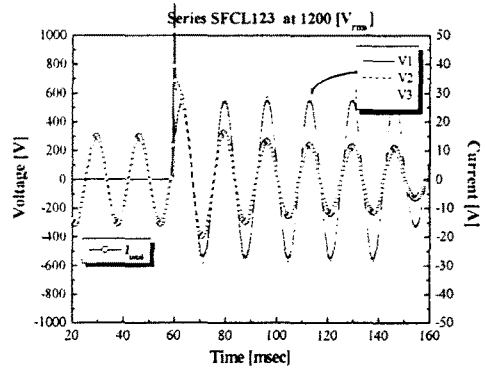


그림 2.5 단위 한류소자 1,2,3으로 구성된 한류기의 전류·전압특성

그림 2.6은 임계 전류밀도가 비슷한 한류소자 2개와 이것에 비해 임계 전류밀도가 큰 한류소자 1개를 직렬로 연결한 후 한류 특성을 실험 한 결과이다. SFCL1과 SFCL2는 동시에 켜치되는 반면 임계 전류밀도가 상대적으로 큰 SFCL6은 켜치되지 않았다. 따라서 이와 같은 구성에서 SFCL6은 한류 역할을 하지 못한다.

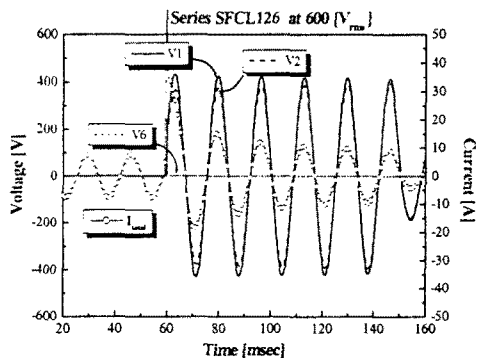


그림 2.6 단위 한류소자 1,2,6으로 구성된 한류기의 전류·전압특성

다음은 임계전류 차이가 0.2[A]인 SFCL4와 SFCL5를 직렬연결하고 이것과 상대적으로 임계전류가 작은 SFCL3를 연결하였다. 그림 2.7은 실험결과를 나타낸다. 임계전류가 작은 SFCL3가 먼저 켜치되어 인가 전압 전체가 양단에 발생한다.

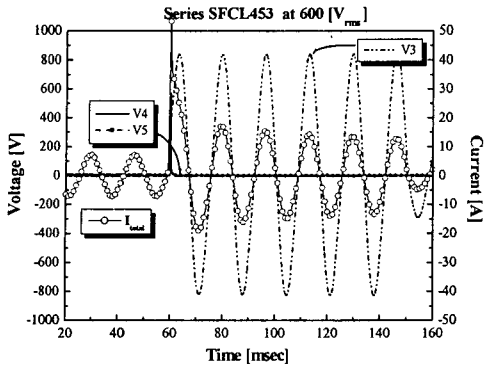


그림 2.7 단위 한류소자 3,4,5로 구성된 한류소자의 전류·전압특성

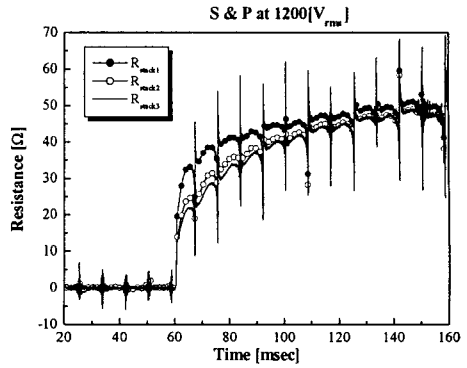


그림 2.9 직·병렬 연결된 한류소자의 저항 변화 특성

그림 2.6과 그림 2.7의 결과로부터 임계전류가 다른 한류소자에 비해서 작은 한류소자는 먼저 켜치되어 전압분담이 불균일해진다. 이는 초전도체 이용률이 떨어지고 따라서 전체 전압등급을 증가시킬 수 없다. 이와 같은 문제는 초전도체의 전류밀도 분포가 균일하면 간단히 해결되지만 전류밀도 분포가 균일하거나 상대적으로 차이가 작게 만드는 것은 제작상의 어려움이 따른다.

다음은 전압·전류 부담을 증가시키기 위하여 6개의 한류소자를 평균임계전류 차이가 가장 작게 되는 조합으로 2개씩 병렬 연결한 후 3개의 직렬군으로 구성하였다. 각 직렬군의 평균 임계전류는 각각 34.75[A], 34.5[A], 34.5[A]이다. 그림 2.8은 실험결과를 나타낸 것이다. 1/2 cycle 동안 양단 전압이 다른 직렬군에 비해 크게 발생했지만 시간이 지나면서 점차 전압분배가 균일해졌다. 이 실험결과로부터 임계전류가 다른 6개의 한류소자를 각 군의 임계전류 차이가 작게 병렬로 연결하여 구성하면 전체적으로 동시 켜치가 발생함을 알 수 있다. 실험상의 제약으로 최대 인가전압을 1.2[kV_{rms}]까지만 인가했지만 각 직렬군의 전압부담을 고려할 때 1.8[kV_{rms}]까지 상승시킬 수 있을 것으로 기대된다.

그림 2.9는 각 직렬군의 한류소자에서 발생하는 저항을 나타낸 것이다. 직렬군 1의 저항이 다른 직렬군에 비해 크게 발생했지만 점차 시간이 지나면서 전체적으로 균일해졌다. 이 실험결과와 병렬 연결된 한류소자 사이의 시간에 따라 변하는 저항값에 따라 전류 재분배에 기인되는 것으로 생각된다.

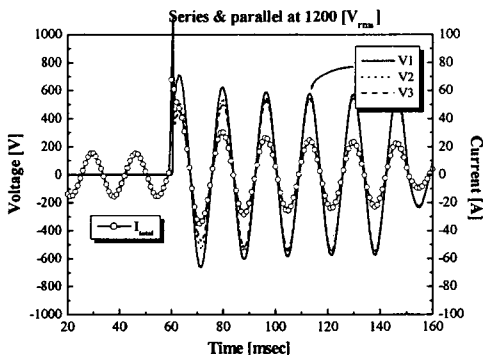


그림 2.8 직·병렬 연결된 한류소자의 전류·전압특성

3. 결 론

박막 초전도체를 이용한 저항형 초전도 한류기는 전압 등급 증대를 위해서 각 개별 소자를 직렬로 연결한다. 이 때 각 한류소자간의 임계전류 차이가 크면 동시 켜치가 이루어지지 않아 전압 분배가 불균일해진다. 전류 등급 증대를 위해서 병렬로 연결할 때 각 직렬군 사이의 평균 임계전류의 차이가 작게 연결하면 전체적으로 동시 켜치를 이룰 수 있었다. 따라서, 단위 한류소자가 부담할 수 있는 전압을 증대시킬 수 있도록 설계한 후 같은 전류 등급을 갖도록 병렬 연결하면 기타 외부 연결회로 없이 각 한류소자의 동시 켜치 문제를 해결하면서 한류기 전체의 용량을 증대시킬 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 최효상 외, "1.2kV/70A급 박막형 초전도 한류기의 전류제한 특성", 한국초전도·저온공학회 2002년도 학술대회 논문집 pp368-370.
- [2] 김혜림 외, "크기가 다른 박막형 초전도 한류소자에서의 저항 분포", 한국초전도·저온공학회 2002년도 학술대회 논문집 pp281-284.
- [3] 최효상 외, "YBCO 박막을 이용한 초전도 한류기의 안정적인 동작조건", 전기학회 논문지, 49B권 9호, pp.584-590, 2000.
- [4] 현옥배 외, "직렬연결된 초전도 한류기의 분로 저항에 의한 동작특성", 전기학회 논문지, 49B권 11호, pp737-742, 2000.