2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2002.7.10-12

전류재분배에 의한 저항형 초전도 한류기의 퀜치 특성

최효상*, 김혜림, 차상도, 현옥배, 황시돌
한국전력공사 전력연구원

Quench properties of a resistive superconducting fault current limiter by current redistribution

Hyo-Sang Choi*, Hye-Rim Kim, Sang-Do Cha, Ok-Bae Hyun, Si-Dole Hwang
Korea Electric Power research Institute

Abstract - We improved quench properties of a superconducting fault current limiter (SFCL) based on YBCO thin films by their serial and parallel combinations. The SFCL consisted of 6 switching elements fabricated of 4 inch-diameter YBCO thin films. Simple serial connection resulted in imbalanced power dissipation between switching elements even at the quench current difference of 0.6 A. On the other hand, 2×2 and 3×2 stack combinations produced simultaneous quenches. The 3×2 stack combination showed better simultaneous quench behavior than the 2×2 stacks. This is suggested to be because the currents between switching elements in parallel connection of the 3×2 stacks were more effectively redistributed than the 2×2 stacks.

1. 서 론

초전도 한류기는 전력계통에서 발생하는 고장전류를 효과적으로 저감할 수 있을 뿐만 아니라 환경친화적이며 수명이 반영구적인 장점을 갖고 있어 연구가 활발히 진행되고 있다[1-6]. 초전도 한류기는 크게 저항형과 유도형으로 나눌 수 있는 바, 이중 YBCO 박막을 이용한 저항형은 구조가 간단하고 크기가 작을 뿐만 아니라 module별 확장이 용이한 특징을 갖고 있어 배전급 초전도 한류기에 우선적으로 적용될 것으로 예상된다. 본 논문에서는 YBCO 박막을 이용한 저항형 초전도 한류소자를 제작하고, 이의 전압등급을 높이기 위해서는 한류소자간 직렬연결이 필수적인데 이때 수반되는 파워분담의 불균형을 개선하고자 6개의 한류소자를 직·병렬 조합함으로써 퀜치특성 개선방안을 모색하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 시편제작 및 시험회로 구성

실험에 사용된 한류소자의 패턴모양은 참고문헌[4]에 표시한 바와 같이 4 inch YBCO 박막을 meander형태로 식각하여 직·병렬로 조합하였다. 대표적인 측정회로도는 그림 1과 같이 구성하였으며, 측정방법은 참고문헌에 나타내었다[2-6].

2.2. 실험방법 및 결과

기 발표한 논문의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 한류소자간에 통전전류를 높이기 위한 병렬연결은 전류재분배 현상에 의하여 큰 문제가 없으나 운전전압을 높이기 위한 직렬연결은 Iq의 작은 차이에도 불구하고 심한 파워불균형에 의한 퀜치시점의 상이를 가져온다[6]. 따라서 본 논문에서는 6개의 한류소자를 준비한 다음, 단순직렬, 한류소자 4개를 이용한 2×2 stack 조합, 그리고 한류소자 6개를 이용한 3×2 stack 조합에서 전체적인 ΣIq의 편차가 같도록 구성하여 퀜치특성을 조사하였다. 이를 위하여 우선 6개의 한류소자 각각에 대한 Iq값을 측정한 후 표 1에 나타내었다. 이때 Iq값은 1 μV/cm 기준을 사용하여 측정하는 것이 통상적이나 본 연구의 실험 목적상 Iq의 절대값보다는 상대적인 편차가 중요하기 때문에 측정의 편의상 여기서는 1 mV/cm의 기준을 사용하였다.

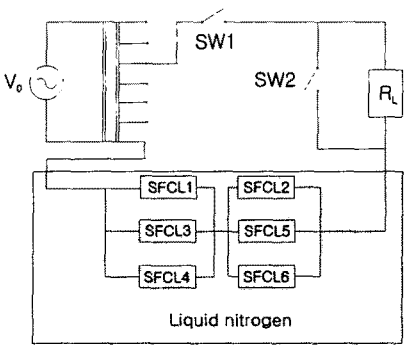


그림 1. 측정회로의 개략도 (3×2 stack 조합의 경우)

먼저, ΣIq의 편차가 단순직렬연결에서는 0.6A, 2×2 stack 조합은 1.2A, 그리고 3×3 stack 조합은 1.7A가 되도록 함으로써 전체적으로 ΣIq의 편차에 대한 %비율이 동일하도록 구성하였다. 이를 위하여 단순직렬연결의 경우 SFCL3과 SFCL4를 선택하였다. 2×2 stack 조합의 경우는 stack1에 SFCL3과 SFCL5를 병렬로 연결하고 stack2에 SFCL4와 SFCL6을 병렬로 연결한 다음 stack1과 stack2를 각각 직렬로 연결하여 조합회로를 구성하였다. 3×2 stack 조합은 stack1에 SFCL1, SFCL3, 그리고 SFCL4를 병렬로 연결하고 stack2에 SFCL2, SFCL5, 그리고 SFCL6을 병렬로 연결한 다음, 마찬가지로 stack1과 stack2를 직렬로 연결하였다(그림 1에 3×2 stack 조합 구성도를 대표적으로 표시함).

표 1. 각 한류소자의 Iq값

순번	Iq값(A)
SFCL1	33.9
SFCL2	34
SFCL3	34.2
SFCL4	34.8
SFCL5	35
SFCL6	35.6

그림 2에 200 V_{rms} 인가전압에 대한 단순직렬연결, 2×2 stack 조합, 그리고 3×2 stack 조합에 대하여 각 stack별 한류소자의 퀜치특성을 대표적으로 보여주고 있으며 측정 기준을 설정하기 위하여 사고직후 첫번째 peak에서 stack1과 stack2에서 한류소자에 발생되는 전압차를 ΔV_{d1}이라 정의하고 사고가 발생한 다음 5주기가 지난 다음의 stack1과 stack2에서 한류소자에 발생되는 전압차를 ΔV_{d5}이라 정의하였으며 이를 그림에 표시하였다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 단순 직렬연결에서는 ΔIq값이 상대적으로 낮은 SFCL3에서 먼저 퀜치가 발생하여 power를 감당함으로써 SFCL4에는 거의 퀜치가 발생하지 않는 것을 볼 수 있다(그림 2(a)). 이 경우 SFCL3의 전압한계 이상으로는 인가전압을 높일수 없게 되어 전압등급을 높이기 위한 한류소자의 직렬연결이 그 의미를 상실하게 된다. 그림 2(b)의 2×2 stack 조합연결에서는 같은 인가전압(200 V_{rms})에서 사고직후 stac2도 동시에 퀜치가 발생함을 볼 수 있다. 한편, 그림 2(c)의 3×2 stack 조합연결의 경우는 사고 직후 stack2의 한류소자에 발생되는 전압이 더욱 상승함을 확인 할 수 있다. 이는 같은 조건(개별 한류소자에 흐르는 전류와 전압이 동일하고 ΣIq의 편차에 대한 %비율이 동일)하에서 동시퀜치를 유도할 수 있다는 점에서 주목할 만한 결과이다. 즉, 직렬연결된 한류소자간에 Iq의 편차 때문에 발생되는 퀜치시작 시점의 차이를 stack에 새로운 한류소자를 병렬로 연결함으로써 먼저 퀜치된 시편의 퀜치시작 시점을 지연시키는 효과를 가져오게 된다. 따라서 나중에 퀜치되는 시편이 곧바로 퀜치될 수 있는 시간을 제공하는 것으로 해석할 수 있다.

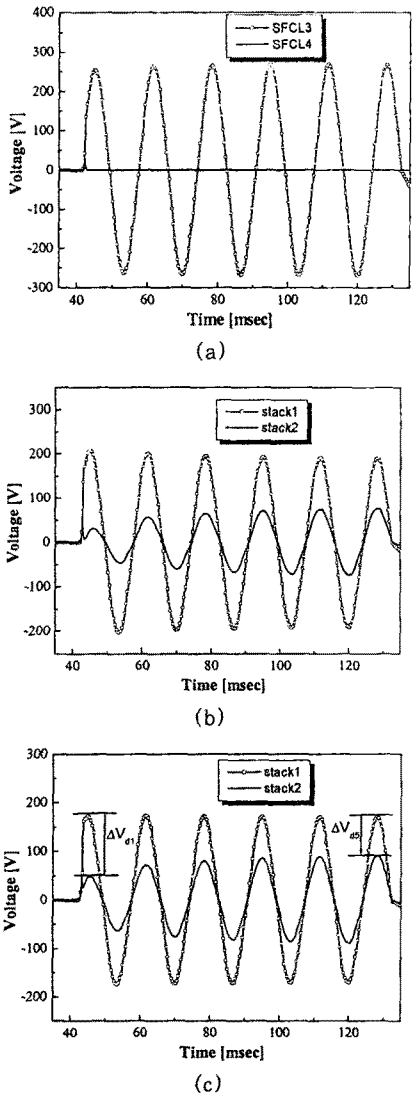


그림 2. 초전도 한류소자의 퀜치특성 (ΔV_{d1}과 ΔV_{d2}가 정의됨)
(a) 단순직렬연결 (b) 2×2 stack 조합
(c) 3×2 stack 조합

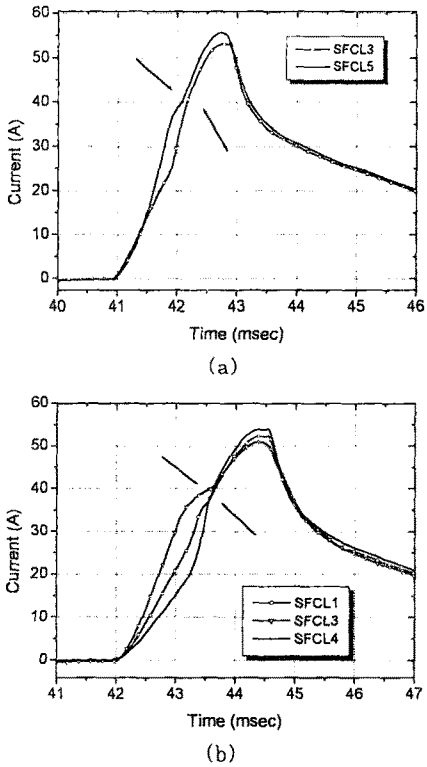
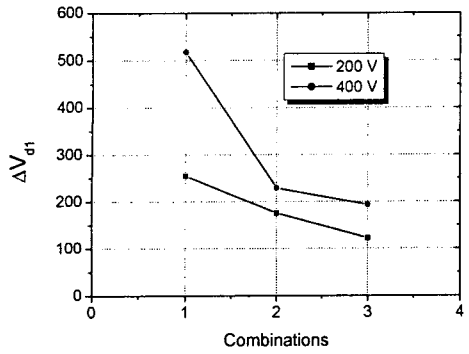
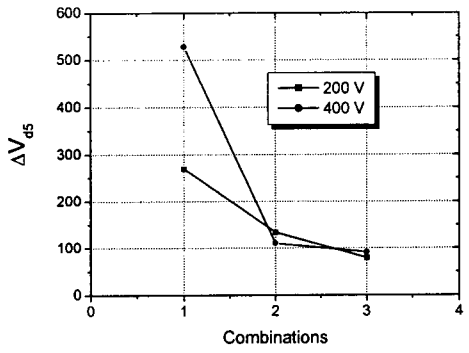


그림 3. 각 한류소자의 전류거동 (인가전압 : 200 V_{rms})
(a) 2×2 stack 조합 (b) 3×2 stack 조합

그림 2에서 보여주는 퀜치시작 시점의 개선효과를 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 2×2 stack 조합연결과 3×2 stack 조합연결에서 stack1내의 각 한류소자에 흐르는 전류의 흐름을 그림 3에 나타내었다. 2×2 stack 조합인 그림 3(a)에서 화살표로 표시한 부분을 보면 SFCL3의 전류가 먼저 상승하였으나 화살표로 표시한 부분에서 전류가 병렬연결된 한류소자 사이를 이동하면서 먼저 퀜치된 한류소자의 퀜치진행 속도를 둔화함으로써 퀜치시작 시점의 불균형을 감소해 나가는 것을 볼 수 있다. 3×2 stack 조합인 그림 3(b)를 보면 이러한 현상은 더욱 두드러지게 나타나고 있으며 화살표로 표시한 지점을 지나면서 한류소자간 전류의 편차를 점차 줄이는 방향으로 수렴해 가고 있음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 4. 조합 유형별 ΔV_{d1} 과 ΔV_{d5} 의 추이

그림 4는 그림 2(c)에서 정의한 ΔV_{d1} 과 ΔV_{d5} 의 단순직렬연결, 2×2 stack 조합, 그리고 3×2 stack 조합에 대한 인가전압별 추이를 보여준다. 여기서 가로축의 1, 2, 3은 각각 단순직렬연결, 2×2 stack 조합, 그리고 3×2 stack 조합을 의미한다. 사고직후 최초로 발생한 peak를 나타내는 그림 4(a)를 보면 단순직렬연결에 비하여 2×2 stack 조합에서 현저히 편차가 줄어들며 이러한 편차는 3×2 stack 조합에서 더욱 좁혀짐을 확인할 수 있다. 한편, 인가전압이 상승하면서 2×2 stack 조합과 3×2 stack 조합의 특성이 거의 비슷해졌는데 이는 인가전압의 상승으로 인하여 2×2 stack 조합에서 통전전류의 증가로 인해 전류재분배가 빠르게 진행되었기 때문으로 생각된다. 사고 발생 후 5주기가 지난 시점의 편차를 보여주는 그림 4(b)의 ΔV_{d5} 에서도 이러한 현상은 비슷하게 나타났으며 2×2 stack 조합과 3×2 stack 조합의 차이는 더욱 좁혀지는 것으로 보아 시간이 지나면서 전류재분배를 각 한류소자에 흐르는 통전전류가 일정해짐으로써 평형점을 찾아 가는 것으로 해석할 수 있다.

3. 결 론

박막형 초전도 한류기의 전압등급을 높이기 위해서는 단위 한류소자의 직렬연결이 필수적이다. 또한 한류소자를 구성하는 박막재료가 갖는 특성으로 인하여 단위 한류소자의 Iq를 동일하게 만들 수는 없다. 따라서 이러한 한류소자를 단순하게 직렬연결하면 먼저 퀜치된 시편이 파워를 감당함으로써 다른 시편이 퀜치되지 않는 파워불균형 현상이 발생하게 된다. 이러한 문제점을 개선하고자 ΣIq의 편차가 단순 직렬연결과 동일한 조건(본 실험에서는 ΣIq의 편차에 대한 %비율을 0.6 A로 함)에서 2×2 stack 조합 및 3×2 stack 조합을 통하여 동시퀜치 유도 실험을 수행하였다. 2×2 stack 조합 과 3×2 stack 조합 연결에서 동시퀜치가 구현되었으며, 첫 번째 peak에서 stack1과 stack2에서 한류소자에 발생되는 전압차를 나타내는 ΔV_{d1}값과 사고가 발생한 다음 5주기가 지난 다음의 stack1과 stack2에서 한류소자에 발생되는 전압차를 나타내는 ΔV_{d5}값에서 모두 병렬연결 stack이 증가할수록 동시퀜치 특성은 양호하게 나타났다. 이는 병렬연결된 한류소자 사이에서 전류재분배 현상이 발생되어 먼저 퀜치된 시편의 퀜치속도를 지연시키기 때문인 것으로 생각된다.

6개의 단위 한류소자를 3×2 stack 조합연결함으로써 최고 1.2kV/70A급 초전도 한류기를 제작하고 양호한 전류제한 특성을 보임을 확인하였다. 션트저항과 같은 다른 부가설비 없이 초전도 한류소자만으로 구현하였기 때문에 구조가 간단하면서 크기를 최소화 시킬 수 있는 점이 장점이라고 할 수 있겠다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] M. Noe and B. R. Oswald, "Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems", IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 9, pp. 1347-1350, June 1999.[3]

[2] Hyo-Sang Choi, Hye-Rim Kim, Ok-Bae Hyun and Sang-Joon Kim, "Quench properties of Y-Ba-Cu-O films after overpowering quenches", IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 11, pp. 2418- 2421, Mar. 2001.

[3] Hye-Rim Kim, Hyo-Sang Choi, Hae-Ryong Lim, In-Seon Kim and Ok-Bae Hyun, "Initial quench development in uniform Au/Y-Ba-Cu-O thin films", IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 11, pp. 2414-2417, Mar. 2001.

[4] Hyo-Sang Choi, Hye-Rim Kim and Ok-Bae Hyun, "Operating properties of supercon- ducting fault current limiters based on YBCO thin films", Cryogenics, vol. 41, pp. 163-167, 2001.

[5] Hye-Rim Kim, Hyo-Sang Choi, Hae-Ryong Lim, In-Seon Kim and Ok-Bae Hyun, "Quench distribution in superconducting fault current limiters at various voltages", Cryogenics, vol. 41, pp. 275-280, 2001.

[6] Hyo-Sang Choi, Ok-Bae Hyun, Hye-Rim Kim, "Quench characteristics of resistive superconducting fault current limiters based on YBCO films", Physica C, vol. 351, pp. 415-420, 2001.