

직렬 연결된 초전도 한류기의 퀘치 및 한류 특성

현옥배, 최효상, 김혜림, 임해룡 †, 김인선 †
한전 전력연구원, †한국표준과학연구원

Quench Characteristics of Resistive SFCL Elements in series

Ok-Bae HYUN, Hyo-Sang CHOI, Hye-Rim KIM, Hae-Ryong LIM, and In-Seon KIM
Korea Electric Power Research Institute, †Korea Research Institute of Standards and Science

Abstract - We fabricated resistive superconducting fault current limiters (SFCL) based on YBCO thin films grown on 2-inch diameter sapphire substrates. Two SFCLs with nearly identical properties were connected in series to investigate the simultaneous quench. There was a slight difference in the rate of voltage increase between two SFCL units when they were operated independently. This difference, however, resulted in significantly unbalanced power dissipation between the units. This imbalance was removed by connecting a shunt resistor to an SFCL in parallel. The appropriate values of the shunt resistances were 80Ω at $75 V_{rms}$, 100Ω at $100 V_{rms}$ and 110Ω at $120 V_{rms}$, respectively. Increased power input at high voltages also reduced the initial imbalance in power dissipation, but with increase in film temperature to higher than 200 K.

를 수 있어 hot spot이 발생한다. 이러한 hot spot에서 발생하는 국부적인 열을 분산하기 위하여 YBCO 박막위에 $0.2 \mu m$ 두께의 금을 *in-situ*로 증착하였다. 금 박막층은 상전도 상태의 YBCO보다 비저항이 훨씬 작기 때문에 (약 1000분의 1) quench된 hot spot으로부터 전류를 우회시켜서 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열을 줄여준다. 이외에 금 박막층은 YBCO 박막의 표면을 주변으로부터 보호하는 역할도 한다.

시편은 직렬연결을 통한 용량증대 및 quench특성을 조사하기 위하여 그림 1과 같이 정확히 두 부분으로 나누어 제작하였으며 각각 독립된 한류소자로 구성하였다. 이때 각 한류소자의 길이는 26 cm, 폭 1 mm이고 그림처럼 meander 형태로 이루어져 있으며 상온에서 저항값은 43Ω 이었다.

1. 서 론

고온 초전도 한류기는 크게 저항형과 유도형으로 나눌 수 있는데, 각 형태에 따라 다른 특성과 장단점이 있다. 유도형은 여러 가지가 있는 바, 대표적인 자폐형은 대용량화에 유리한 반면 기기의 크기가 크다 [1]. 다른 유도형으로 정류형 (혹은 dc reactor형)은 퀘치를 이용하지 않는다는 장점이 있는 반면 초전도 코일의 경비문제가 따른다. 저항형은 초전도체 퀘치시 저항이 발생함을 이용하는데, 크기가 작고, 파형 변형이 적으며 상대적으로 설치비가 낮을 것으로 기대된다 [2-7].

박막형으로 대표되는 저항형은 배전급의 응용에 적합하다고 예측되고 있다. 저항형은 용량증대를 위해서 단위 한류소자를 직렬하는 과정이 필요한데, 특히 직렬 연결시 각 한류소자의 퀘치가 동시에 일어나도록 하여 급격한 임피던스 발생에서 오는 충격을 감소 및 분산시키는 기술개발이 필요하다.

본 논문에서는 박막형 초전도 한류소자 2개를 직렬로 연결하였을 때 발생하는 전류 및 전압특성을 살펴본 다음, 개별 한류소자간에 존재하는 약간의 특성차이 때문에 발생하는 동시 quench의 문제를 살펴보고 이러한 문제점을 극복하는 방법에 대한 실험 data를 제시하고자 한다

2. 본 론

2.1. 퀘치 실험 구성

본 실험에서 사용된 초전도 한류소자는 직경 2 inch의 sapphire 기판위에 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 박막을 두께 $0.3 \mu m$ 로 성장시킨 다음, 이를 meander형으로 식각 (lithography)한 것이다. YBCO 박막은 독일의 Theva사가 제작하였다. 임계온도와 임계전류밀도는 각각 87 K와 $3 MA/cm^2$ 이었다. YBCO 박막은 재료의 불균일성 (inhomogeneity)으로 인하여 국부적으로 임계전류가 다

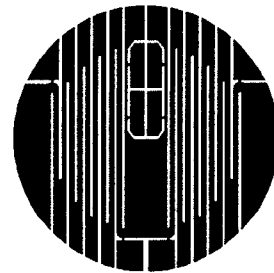


그림 1. Meander 형태의 초전도 한류소자

Fig. 1. Superconducting current limiting elements patterned in the meander form

그림 2는 실험에 사용한 측정회로도를 보여주고 있으며 여기서 V_0 는 전원전압, R_0 는 전체전류 측정용 위한 저항, R_F 는 사고전류를 제어하기 위한 조정저항, 그리고 R_L 는 부하저항을 각각 나타낸다. SFCL1과 SFCL2는 초전도 한류소자를 나타내며, 정상상태 운전시 초전도 상태를 유지하기 위하여 액체질소 용기에 담겨진 채로 실험하였다. 실험조건에 따른 회로소자값 산정을 위한 방정식은 아래와 같다.

$$V_0 = (R_0 + R_L) i \quad (1)$$

$$V_0 = (R_0 + R_F + R_{SFCL1} + R_{SFCL2}) i \quad (2)$$

$$V_0 = V_m \sin \omega t \quad (3)$$

실험과정을 보면, SW1을 닫아 회로를 형성한 다음 SW2를 닫아 사고를 모의한다. 일정 시간 (주로 3주기) 후의 전류 zero 점에서 SW2를 열어주고 이어 SW1을 열어 한 과정을 끝낸다. 각 부분에서의 신호는 다중 채널 digitizer를 통해 기록되고 분석된다.

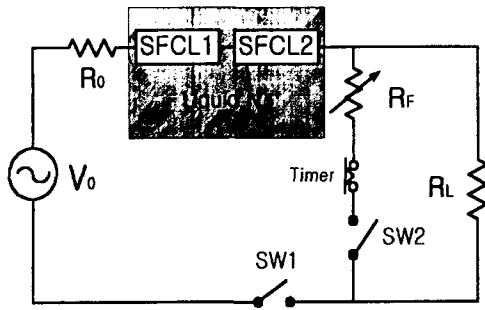


그림 2. 동시켄치 측정을 위한 실험 회로도
Fig. 2. Experiment circuit for measurements of simultaneous quench

2.1. 켄치 실험 결과

초전도 한류기를 실계통에 적용하기 위해서는 전체적인 용량을 높여야 한다. 초전도 한류소자를 적절히 조합하는 것이 한 방법이며 이를 위해 병렬연결과 직렬연결을 생각할 수 있다. 이 중에서 병렬연결은 적용전류를 증대하는 방법으로 사용된다. 시편의 특성이 거의 같은 SFCL1과 SFCL2를 병렬연결 하였을 때, 그림 3과 같이 동시에 quench가 발생하여 소자의 열분담이 균일하였다. 이는 회로 특성상 전류의 상호 분류가 잘 일어나기 때문으로 생각된다.

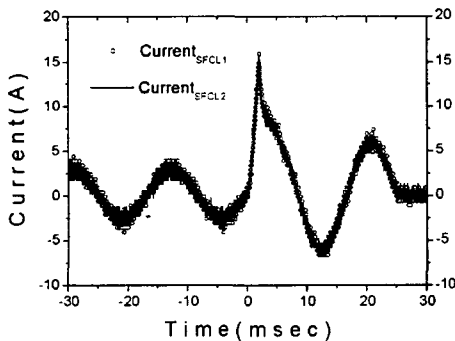


그림 3. 병렬연결시 개별 초전도 한류기의 quench 특성
Fig. 3. Quench characteristic of each SFCL in parallel connection

그러나 위에서 언급한 바와 같이 직렬연결은 한류소자간의 특성이 약간의 차이만 있더라도 quench 시작시점이 현저하게 차이가 나게된다. 초전도 한류소자의 특성이 정확히 같도록 제작하면 문제는 해결되겠지만 이는 제작공정상 현실적인 어려움이 많으며 대안을 찾아야 한다.

우선 사고가 발생한 경우 인가전압 100 V_{rms}, 부하저항 $R_L = 27 \Omega$, 조정저항 $R_F = 0 \Omega$ 일 때 한류소자 각각에 대한 개별 전압발생 파형을 그림 4에 보여준다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 전체적으로 거의 동일한 특성을 보여주며, 그래프내의 확대한 그림을 보면 SFCL1이 quench후 전압상승률에서 SFCL2보다 약간 높음을 알 수 있다.

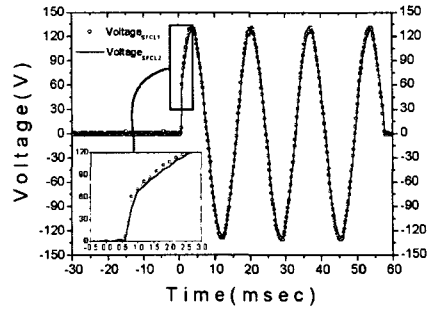


그림 4. 개별 초전도 한류기의 전압특성
Fig. 4. Voltage properties of individual SFCLs

이번에는 한류소자 2개를 직렬 연결한 시편에 대하여 사고가 발생한 후 각각의 전압발생 파형을 살펴보았다. 그림 5에서 두 시편간에 존재한 약간의 전압발생률의 차이가 초기 quench 시작 시점에서 큰 차이를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이처럼 직렬연결의 경우 한쪽 한류소자에서 quench가 먼저 발생하면 다른 소자는 켄치되지 않게 되므로 전체 임피던스가 전체전압에 비해 너무 작아 과도한 전력이 켄치된 한쪽 소자에 주어지는 불균형이 발생한다. 즉, 그 시간동안 발생한 모든 열을 한 한류소자가 감당해야 하기 때문에 적용전압을 올릴 수가 없게 된다. 즉 직렬연결에서는 사고직후 한류소자간 동시 quench가 대단히 중요함을 알 수 있다.

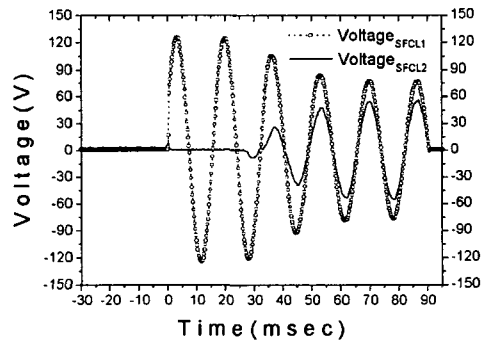


그림 5. 직렬연결시 초전도 한류기의 전압 특성
Fig. 5. Voltage properties of SFCLs in series connection

전체적인 전류 및 초전도 한류기 양단의 전압발생 파형을 그림 6에 보여준다. 전체전류는 초전도 한류소자의 온도상승에 의한 저항발생으로 사고 초기에 14.2 A_{peak}까지 상승하였으나 점차 감소하는 모습을 볼 수 있다. 즉 발생저항이 완만하게 증가하고 있다. 인가전압을 120 V_{rms}로 높이면 전체적인 추세는 그림 5와 동일하나 SFCL1의 전압이 발생할 후 약 1주기만에 SFCL2의 전압이 발생하여 한류소자간 편차가 상대적으로 줄어들었다. 다시 말해 인가전압이 상승할수록 편차는 줄어들고 있으나, 사고발생 초기에 한류소자가 받는 충격이 가장 크고 3주기 이후의 초전도 한류소자의 온도상승이 그만큼 높아지는 점을 감안하면 사고발생 초기의 동시 quench 방안을 강구하여야 한다.

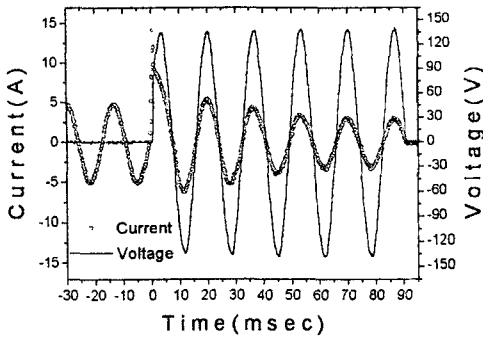


그림 6. 인가전압 100 V_{rms}에서 전체적인 전압 및 전류 특성

Fig. 6. Properties of the total current and voltage at 100 V_{rms}

한류소자간의 초기 소비에너지의 불평형을 해소하기 위하여, SFCL1과 병렬로 shunt 저항 R_s를 삽입함으로써 SFCL2와의 소비에너지 균등화를 꾀하였다 [4]. 이때 인가전압 V₀ = 75, 100, 120 V_{rms}의 각각에 대하여 R_s = 120 ~ 40 Ω까지 10 Ω씩 단계적으로 낮춰가면서 실험을 수행하였다. 적정저항은 SFCL1과 SFCL2에서 quench 시작시점은 동일하면서, 사고후 3 cycle되는 지점에서 발생된 열에 의한 각각의 온도가 동일하게 되는 저항값을 기준으로 선정하였다. 표 1에 실험에 의하여 선정된 인가전압과 shunt 저항별 적정 저항값을 나타내었다. 인가전압이 증가할수록 적정 shunt 저항값이 비례적으로 증가하였다. 즉, 인가전압의 상승과 함께 shunt 저항의 영향이 점차 줄어들어 알 수 있다.

표 1. 인가전압별 적정 shunt 저항값

Table 1. Optimal values of shunt resistors at various applied voltages

75 V _{rms}			100 V _{rms}			120 V _{rms}		
R _s (Ω)	#1 (Ω)	#2 (Ω)	R _s (Ω)	#1 (Ω)	#2 (Ω)	R _s (Ω)	#1 (Ω)	#2 (Ω)
80	14.19	14.41	100	17.64	17.63	110	18.11	18.24

여기서 #1 = SFCL1와 R_s의 병렬저항값, #2 = SFCL2의 저항값이다. 그림 7에 인가전압 120 V_{rms}에서 shunt 저항 R_s = 110 Ω인 경우의 초전도 한류소자별 quench 특성을 나타내었다. 사고후 quench 시작시점은 각 한류소자별로 동일하였으며, 발생 전압은 약간 달랐지만 계산된 저항값은 표 1과 같이 거의 같았다.

3. 결 론

YBCO film을 이용한 초전도 한류소자 2개를 제작하고 용량증대를 위하여 직렬 연결한 시편에 대해 동시 quench 및 전류제한 특성을 고찰하였다.

인가전압 100 V_{rms}, 부하저항 R_L = 27 Ω일 때 한류소자 각각에 대한 개별 전압발생 파형은 사고후 전압상승률에서 약간의 차이를 보였을 뿐 거의 동일한 특성을 보여주었다. 먼저 인가전류를 높이기 위한 초전도 한류소자간 병렬연결은 개별소자의 약간의 특성차이에도 불구하고 소자간 전류분류가 효과적으로 일어나 열분담이

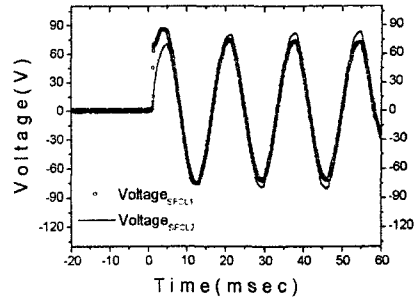


그림 7. 각각의 한류소자의 전압 곡선 (V₀ = 120 V_{rms}, R_s = 110 Ω)

Fig. 7. Voltage curves of each SFCL (V₀ = 120 V_{rms}, R_s = 110 Ω)

동일하였다. 그러나 소자간 직렬

연결의 경우 이러한 약간의 전압상승률의 차이가 먼저 quench된 소자에 열발생을 촉진함으로써 소비전력이 모두 그 소자에 부담되는 문제를 야기하였다. 초전도 한류소자간의 초기 소비에너지의 불평형을 해소하기 위하여 SFCL1와 병렬로 shunt 저항 R_s를 연결한 결과 적정저항은 75 V_{rms}에서 R_s = 80 Ω, 100 V_{rms}에서 R_s = 100 Ω, 125 V_{rms}에서 R_s = 110 Ω를 각각 나타내었다.

Shunt저항은 초전도 한류소자에 병렬로 삽입되기 때문에 근본적으로 정상상태에서 영향은 거의 없으나 전압상승률의 증가, 전류제한값의 조절 등과 같은 방법으로 shunt 저항의 영향을 더욱 줄이는 방법을 현재 강구중에 있다.

본 연구의 일부는 과학기술부 중점연구개발사업의 지원으로 수행되었음

[참 고 문 헌]

- [1] M. Chen, T. Baumann, P. Unternahrer and W. Paul, "Fabrication and characterisation of superconducting rings for fault current limiter application", Physica C, vol. 4, pp. 282-287, 1997.
- [2] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Kramer, P. Kummeth and H. W. Neumuller, "Resistive current limiters with YBCO films", IEEE Trans. on Appl. Supercon., vol. 7, no. 2, pp. 828-831, 1997.
- [4] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Kramer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies and H. W. Neumueller, "Resistive Fault Current Limiters with YBCO Films - 100 kVA Functional Model", IEEE Trans. on Appl. Supercon., vol. 9, no. 2, pp. 656-659, 1999.
- [5] M. Lindmayer and H. Mosebach, "Current limiting properties of YBCO-films on sapphire substrates", IEEE Trans. App. Supercon., vol. 9, no. 2, pp. 1369-1372, 1999.
- [6] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, 김상준, 문승현, 한병성, "YBCO 박막의 저항형 초전도 한류기에 대한 동작 특성", 전기학회논문지, 48B권, 10호, pp. 537-543, 1999.
- [8] 김혜림, 현옥배, 최효상, 황시돌, 김상준, "저항형 초전도 한류기에서의 퀘치 전파", 한국전기전자재료학회논문지, 제13권, 4호, pp. 337-342, 2000.