

동일 병렬 저항을 이용한 초전도 저항형 한류소자 직렬연결방안 및 전압용량 증대

論文
52B-7-5

Increase of the Voltage Rating of Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter Using Equal Shunt Resistors

車相道* · 金蕙林** · 沈政煜*** · 韓鏞熙§ · 玄鉦培§§
(Sang-Do Cha, Hye-Rim Kim, Jungwook Sim, Yong-Hee Han*, Ok-Bae Hyun)

Abstract - We have investigated the quench behavior of the series connection of resistive type superconducting fault current limiter (SFCL) components based on YBCO films. Equal shunt resistors R_s across individual SFCL components successfully produced simultaneous quenches for 5 components in series, resulting in equal application of voltage to all components. If the two components having the highest and the lowest critical currents (I_c) quench safely, others quench altogether. The highest shunt resistance is to guarantee the safe quenches of all components, leading to the equal voltage applications within the first half cycle after a fault in the short circuit test. The highest R_s was found to be 28 [Ω] for the components in the given quench environment. Considering the safe quenches and protection coordination, the optimal R_s was suggested to be approximately a half of the highest $R_{s,}$, allowing wide selection of R_s and I_c 's. This design provides a practical way of connecting small SFCL components in series for high voltage application.

Key Words : fault current limiter, SFCL, shunt resistor, R_s

1. 서 론

한류기는 전력계통에서 사고 발생 시 순간 상승하는 전류를 감소시키는 역할을 한다. 기존 한류기와는 다른 개념의 한류장치로서 최근에 초전도체를 이용한 한류기가 활발히 연구되고 있다. 여러 종류의 초전도 한류기 중에서 저항형은 구조와 원리가 간단하기 때문에 제작이나 운용 면에서 다른 형태에 비교하여 많은 장점이 있다[1,2].

초전도 저항형 한류기는 초전도체에 임계전류 이상의 전류가 흐를 때 상전도체로 전이하면서 발생하는 저항으로 인해 회로의 전류가 감소하는 원리를 이용한다. 한 개의 초전도 한류소자는 제작 상 크기가 한정되어 있기 때문에 허용 전압·전류가 전력계통의 전압·전류에 대해 상대적으로 작다. 따라서 한류기의 허용 전압·전류 등급을 증가시키기 위해서는 다수 개의 초전도 한류소자를 연결해야 한다. 한류기의 전류 등급을 상승시키기 위해서 초전도 한류소자를 병렬로 연결하고, 전압 등급을 상승시키기 위해서는 초전도 한류소자를 직렬로 연결한다. 어느 경우에도 모든 소자의 동시-안전-켄치가 절대 중요하다. 동시-안전-켄치는 모든 소자가 동시에 켄치됨으로서 저항체로 바뀌고, 한류에 참여하며, 전류 및 전압을 균등하게 담당하는 조건이다. 특히 한류소자의 저항

발생이 고르지 않은 사고 후 첫 1/2주기에서 각 소자에 걸린 전류 및 전압이 소자의 정격용량 이하로 유지되어야 한다.

병렬 연결시 각 초전도 한류소자간에 켄치 시 전류 재분배로 허용 전류등급을 상승시키는 것은 상대적으로 수월하다. 그러나, 직렬연결 시는 YBCO 박막 같은 초전도체의 초고속 켄치 특성 때문에 약간의 임계전류가 달라도 동시켄치가 이루어지지 않고, 임계전류가 작은 일부 소자만 켄치되어 사고 전류를 제한하지만, 나머지 소자는 초전도 상태로 남아 한류 작용에 기여하지 못한다. 그러면 인가된 회로 전압은 켄치된 일부 소자에만 집중되어 과전압이 걸리게 되고, 열발생이 과다하여 소자 열화의 원인이 된다. 따라서 허용 전압등급을 상승시키는데는 어려움이 있다[3]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 선행 연구된 내용 중에는 초전도 한류소자 양단에 병렬 저항을 연결하여 각 저항값을 조절하여 전력 분배를 해줌으로써 동시 켄치를 이루는 방안이 있다[4,5]. 하지만 위와 같은 동시 켄치 방법은 수백 개의 초전도 한류소자를 직렬로 연결할 때 각각의 저항값을 산정하는데 어렵고 또한, 한 개의 초전도 한류소자가 고장일 때 임계전류가 다른 것으로 대체하면 다시 저항값을 조절해야 하기 때문에 설계, 제작, 운용 시 많은 작업이 필요하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 최근 동일한 병렬저항을 초전도 한류소자 양단에 연결함으로써 동시켄치를 이루고, 사용 전압을 증대시킬 수 있음을 원리적으로 입증하고 기초 실험 결과를 발표한 바 있다 [6,7].

본 논문에서는 동일한 병렬저항을 이용하여 동시 켄치시키는 원리를 구체적으로 실험으로 입증하고, 직렬개수가 많아질 때 적용 가능성을 보일 것이다. 임계전류가 다른 여러 개의 초전도 한류소자를 직렬 연결할 때 동시켄치되어 각 소자가 전압을 절절히 균등 분담함을 실험적으로 확인하며, 안전켄치

* 正會員 : 忠南大學 電氣工學科 工學碩士
** 正會員 : 韓電 電力研究院 前任研究員 · 理博
*** 正會員 : 韓電 電力研究院 委囑研究員 · 工博
§ 正會員 : 韓國電力公社 · 博士修了
§§ 正會員 : 韓電 電力研究院 責任研究員 · 理博
接受日字 : 2003年 3月 10日
最終完了 : 2003年 6月 18日

범위 안에서 최대 저항값을 산정할 수 있는지 논의하고, 적절한 저항값을 제안할 것이다. 동시에 병렬저항값의 변화에 따라 각 초전도 한류소자에 걸린 전압 특성을 실험적으로 확인하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1. 실험장치구성

전력계통에서 각종 사고 발생 시 순간 증가하는 사고전류를 그림 1(a)와 같이 실험 장치를 구성해 전력사고를 모의하였다. v_o 는 전원 전압, R_o 는 표준저항, R_L 은 부하 저항, SFCL은 초전도 한류소자를 표현한 것이다. 초전도 한류소자와 병렬저항이 연결된 회로는 그림 1(b)에 상세히 나타내었다. R_s 는 병렬저항, V_{1-5} 는 SFCL 양단의 전압강하를 나타낸다.

계통사고 모의는 다음과 같다. 스위치 SW_L 을 닫으면 정상 시 전류 i_L 이 흐르고 스위치 SW_F 를 닫으면 사고 전류 i_F 가 흐른다. i_L 과 i_F 는 식(2), (3)과 같다.

$$v_o = V_o \sin(\omega t + \theta) \tag{1}$$

$$i_L = v_o / (R_o + R_L + R_{SFCL}) \tag{2}$$

$$i_F = v_o / (R_o + R_{SFCL}) \tag{3}$$

초전도체에 불필요한 과전류가 흐르지 않도록 차단기가 보통 사고 감지 후 3주기 내에서 작동하는 점을 고려하여 SW_L 이 5주기 이후에 개방되도록 실험 장치를 구성하였다.

2.2 단위 한류소자의 특성

그림 2와 같이 직경 2" YBa₂Cu₃O_{7-x} (YBCO) 박막을 사용하여 허용 전류와 회로에 필요한 저항을 고려하여 초전도 한류소자를 제작하였다. YBCO 박막은 두께 300[nm]이며 임계

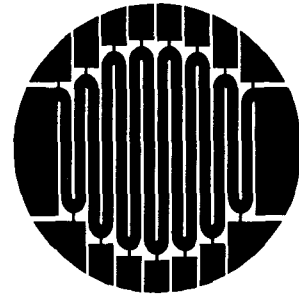


그림 2 직경 2" 초전도 한류소자
Fig. 2 2" diameter SFCL unit

전류밀도 2.5 [MA/cm²]를 갖는다. 그 위에 200 [nm] 두께의 금 박막으로 코팅하여 hot spot 발생 시 전류분포 작용을 도모하였다[4,5]. YBCO가 퀴친된 후 전류는 금 박막을 통하게 되어 온도상승의 원인이 된다.

그림 3은 각 소자의 전류-전압 관계이고, 표 1은 실험에 사용된 5개의 초전도 한류소자 각각의 임계전류(1 [μ V/cm] 기준)와 상온(300 [K])에서 저항 R 을 나타낸 것이다.

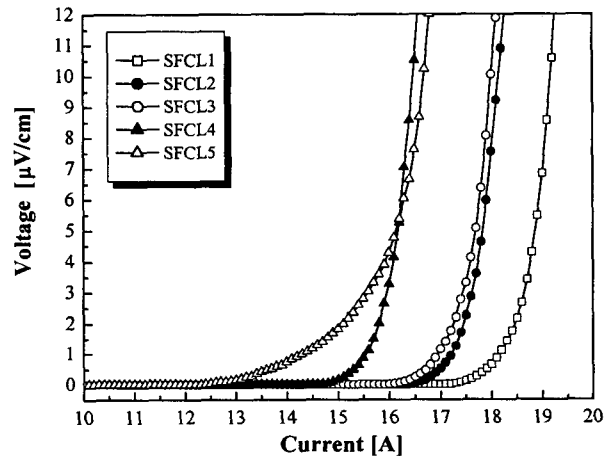
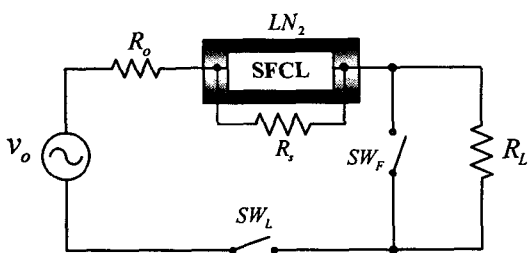


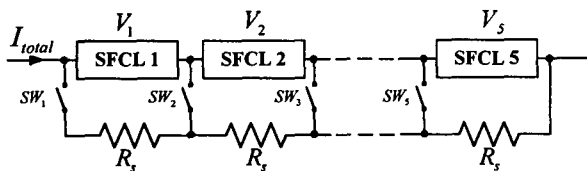
그림 3 각 소자의 전류-전압 특성 (77 [K])
Fig. 3 voltage - current relation of the SFCLs at 77 [K]

표 1 77 [K]에서의 임계전류, 상온 저항 및 기타 사항
Table 1 Critical currents at 77 [K], room temperature resistances and other facts

SFCL 번호	1	2	3	4	5
I_c at 77[K]([A])	18.2	17.2	17.0	15.6	14.4
R at 300[K]([Ω])	33	30	31	36	35
기타 사항	SFCL 소자 제작 - 2인치 sapphire 기판, YBCO 300 [nm], Au 200[nm] - Meander로 식각, 폭 2 [mm] - 정상전압 200[V _{rms}], 온도한계 250 [K]				



(a)



(b)

그림 1 (a) 실험 회로도 (b) 션트저항을 포함한 직렬 연결된 한류소자

Fig. 1 (a) Test circuit (b) series-connected SFCLs
 R_s =shunt resistance, V_{1-5} = voltages across the SFCLs

본 실험에서 퀘치 후 초전도체내의 온도한계를 250 [K] 이하로 정하였는데, 이 조건에서 소자는 반복 퀘치에도 안전함이 입증되었다[4]. 실험에서 사용한 직경 2" YBCO 박막소자에서는 퀘치 후 온도를 250 [K]으로 하여 안전 퀘치가 확보된, 그리고 회복까지도 고려한 전압은 200 [V_{rms}]이며, 이를 정상전압으로 한다. 그리고 이 값에서 여유분 10%를 허용한 전압을 기준전압으로 정하기로 한다. 회복시간 변경 없이 개개의 한류소자는 기준전압 이하에서 안전하다. 따라서 직렬 연결 조건은 각 소자에 걸린 전압이 어떤 경우에도 기준전압을 초과하지 않도록 하는 것이다. 특히 한류소자의 저항발생이 고르지 않은 사고 후 첫 1/2주기에서 각 소자에 걸린 전압이 기준전압 이하임을 입증하는 것이 중요하다.

그림 4는 초전도 한류소자가 안정적인 퀘치조건 하에서 퀘치될 때, 시간에 따라 발생하는 저항 R_{SFCL} 의 일반적인 변화를 보여준다. 그림 5는 1개의 한류소자에 200 [V_{rms}]를 인가했을 때 양단에 발생하는 전압을 나타낸 것이며, 5개 소자에 대해 각각의 퀘치 특성은 거의 차이가 없다.

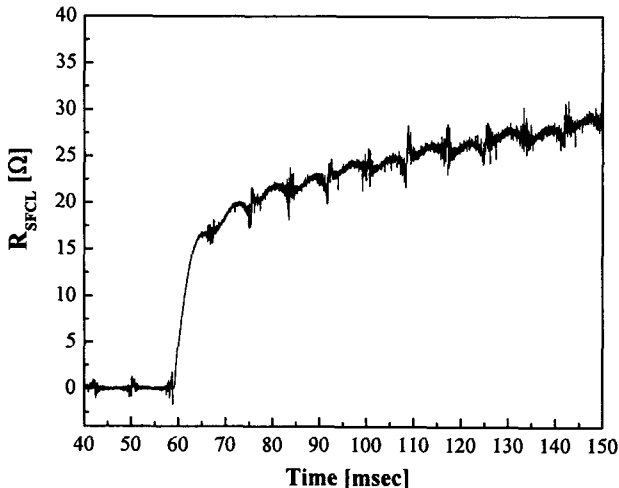


그림 4 2" 초전도 한류소자의 퀘치시 저항발생
Fig. 4 Resistance development of the SFCL component during quench

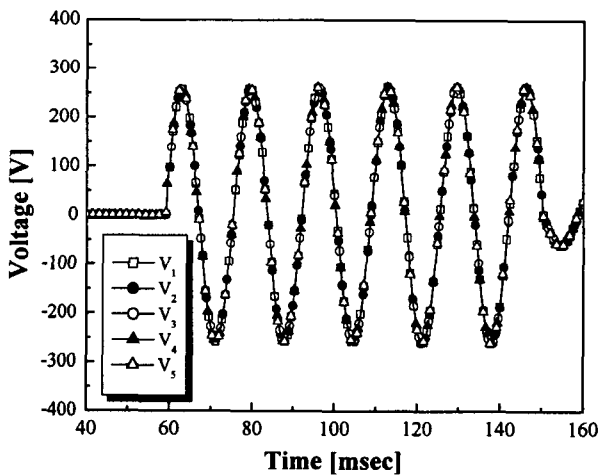


그림 5 2" 초전도 한류소자별 퀘치시 전압 특성.
Fig. 5 Voltages across the individual SFCLs during quench

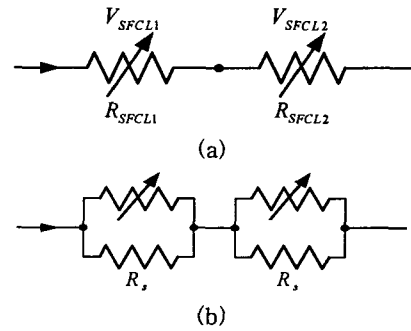


그림 6 (a) 직렬 초전도 한류소자 등가 회로 (b) 병렬저항을 SFCL에 삽입한 등가회로
Fig. 6 Equivalent circuit of series-connected SFCLs (a) without shunt resistors, (b) with shunt resistors

2.3 병렬저항값 산정

다양한 퀘치 조건하에서 일률적으로 병렬저항 값을 산정하기는 어렵다. 본 연구에서는 아래의 가정을 이용하여 동시퀘치를 유도할 수 있는 R_s 를 개략적으로 예측해보고자 한다.

그림 6(a)는 초전도 한류소자 두 개를 직렬로 연결한 등가 회로를 나타낸 것이다. 초전도 한류소자를 비선형 가변저항으로 가정한다. SFCL1의 임계전류를 I_{c1} , SFCL2의 임계전류를 I_{c2} 라 하면 $I_{c1}=I_{c2}$ 일 경우 초전도 한류소자는 동시에 퀘치되어 전체 전압이 균등하게 분배된다. 하지만 $I_{c1}>I_{c2}$ 이면 SFCL2가 먼저 퀘치 되고, 이에 따라 전류가 제한되어 SFCL1은 퀘치되지 않고 한류작용에 기여하지 못한다. SFCL1이 퀘치 되기 위해서는 I_{c1} 이상의 회로전류가 흘러야 한다. 이를 위해 그림 6(b)와 같이 초전도 한류소자 양단에 병렬 저항 R_s 를 연결함으로써 I_{c1} 이상의 회로전류가 흐를 수 있도록 하였다. 이런 경우 두 개의 초전도 한류소자가 동시에 퀘치됨으로써 전체 전압을 각 한류소자가 균등하게 부담하고 한류작용에 모든 한류소자가 기여하게 된다.

병렬 저항값이 작을수록 본로전류가 커져 직렬 연결된 초전도 한류소자는 모두 퀘치된다. 하지만 병렬 저항값이 작으면 대전력용 저항이 필요하고, 저항에서 전력소비가 커지며, 적정 한류를 위해 소자 개수가 증가하는 등 전체적으로 한류기 이용률이 떨어진다. 따라서 적절한 저항값 산정이 필요하다.

직렬 연결된 초전도 한류소자 중에서 임계전류가 가장 큰 값을 I_{c-MAX} 라 할 때, 모두 동시 퀘치되기 위한 병렬저항 R_s 의 산출 과정은 다음과 같다.

$$I_{c-MAX} \leq \frac{V_{SFCL}}{R_T}, \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{SFCL}} + \frac{1}{R_s} \quad (4)$$

$$R_s \leq \frac{R_{SFCL} \cdot V_{SFCL}}{I_{c-MAX} \cdot R_{SFCL} - V_{SFCL}} \quad (5)$$

n 개 한류소자의 직렬 연결에서 동시 퀘치되면 단위 초전도 한류소자에 의한 전압강하 V_{SFCL} 은 식 (6)과 같다.

$$V_{SFCL} = \frac{V_o}{n}, (R_o를 무시) \quad (6)$$

시험 회로에서 $R_0 = 1[\Omega]$ 인데 반해 선트저항 및 소자의 켄치후 저항이 $10[\Omega]$ 이상이므로 대략적 계산에서 R_0 를 무시하였다. V_{SFCL} 은 단위 초전도 한류소자가 안정하게 켄치되는 최대전압이며 동작 허용온도에 따라 결정된다. 최고 $250[K]$ 이하에서 운용할 때 각 소자의 정상전압은 $200[V_{rms}]$ 이므로 $V_{SFCL} = 200[V_{rms}]$ 으로 한다. 순시전압 보다 rms 값을 쓴 것은 소자에 주입, 축적된 열에너지가 rms 값에 비례하기 때문이다.

그림 7은 단위 초전도 한류소자가 안정하게 켄치되는 최대 전압 이하에서 $I_{c-MAX} = 18.2[A]$ (SFCL1)일 때, 식 (4)에 의해 계산된 R_{SFCL} 과 R_s 의 관계를 나타낸 그래프이다. R_{SFCL} 이 매우 크면 R_s 는 약 $15[\Omega]$ 에 가까워진다. 실험에 사용된 초전도 한류소자 SFCL4의 저항 R_{SFCL} 은 $300[K]$ 에서 $36[\Omega]$ 이고, 저항-온도 관계로부터 계산하면 $250[K]$ 에서 약 $30[\Omega]$ 이 되므로[8], 이 때 R_s 의 최대값은 식 (4)에 따라 $28[\Omega]$ 이 된다. 아래 실험에서 보듯 이 값이 동시켄치되는 R_s 와 일치하나, 식(4 - 5)의 많은 불확정성으로 보아 다소 행운일 수도 있다.

3. 직렬연결 방안 및 실험 결과

3.1. 단순 직렬

YBCO 소자와 같이 고속 스위칭 특성을 갖는 저항형 초전도 한류소자를 직렬연결할 때 약간의 임계전류 차이에도 두 소자는 동시에 동작하지 않는다. 5개 소자의 경우, 인가된 전압에 따라 상이하지만, 0도 사고에서 전류가 증가함에 따라 전부 flux flow 상태로 들어가 저항을 보인다. 그러나 1개의 소자의 상태가 켄치로 발전하면 저항이 급상승하여 전류를 제한하므로 다른 소자는 flux flow 상태에서부터 초전도 상태로 복귀한다. 여기서 중요한 점은 초기 켄치가 I_c 가 가장 작은 SFCL5가 아니라 그보다 큰 SFCL4에서 발생했다는 점이다. 소자가 flux flow 상태에 있을 때 약간의 열이 축적되지만 액체질소 속에서 끊임없이 냉각되기 때문에 켄치는 발전하지 못한다. 그러므로 켄치가 냉각을 극복하고 발전하기 위해서는 일정 에너지가 주입되어야 하므로 I_c 이상의 전류가

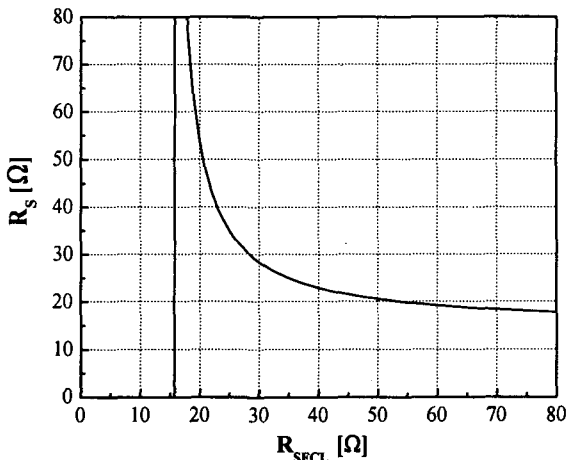
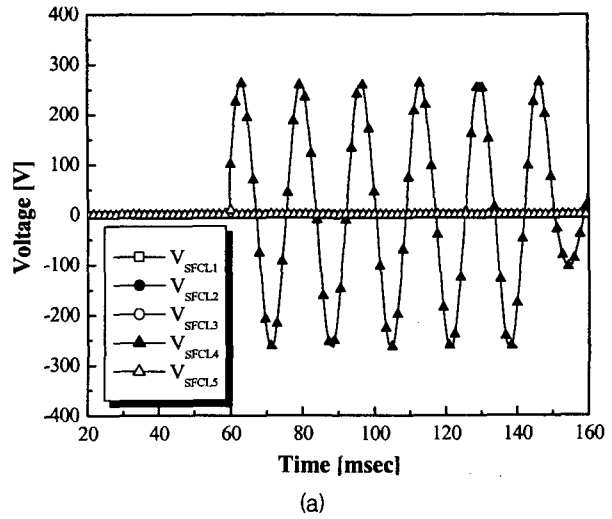


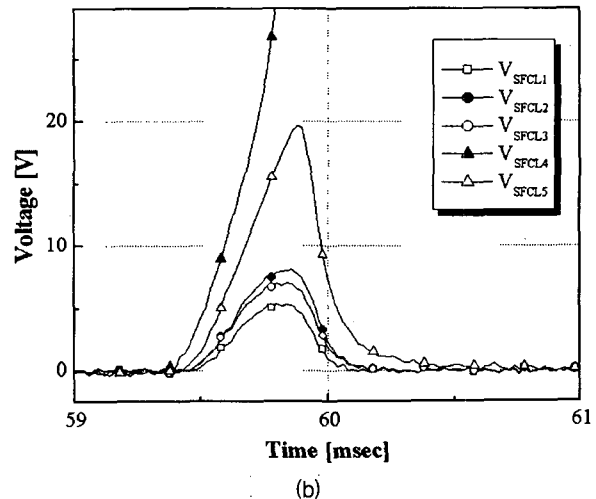
그림 7 R_{SFCL} 변화에 따른 R_s , 곡선 아래가 직렬소자의 안전 켄치 영역

Fig. 7 R_s against R_{SFCL}

일정 시간 이상 흘러야 한다. 액체질소 직접 냉각 및 60 [Hz]의 교류 전류 등의 주어진 켄치 환경 하에서 켄치가 발전하는 최소 전류를 켄치전파전류(quench propagation current) I_q 로 한다. 실험을 통해 SFCL4가 먼저 켄치되는 것으로부터 $I_q(SFCL4) < I_q(SFCL1,2,3,5)$ 임을 알 수 있다 (그림 8 참조). 즉 I_q 는 I_c 를 정하는, 평균전기장 $1[\mu V/cm]$ 보다 더 높은 전압, 적어도 $5[\mu V/cm]$ 이상에서 결정되고 있음을 알 수 있다. 그림 3에서 $10[\mu V/cm]$ 를 기준으로 지정하면 $I_q = 19.2[A]$ (SFCL1), $18.1[A]$ (SFCL2), $18.0[A]$ (SFCL3), $16.5[A]$ (SFCL4), $16.7[A]$ (SFCL5)로 추정 된다. 이 I_q 순서대로 5개의 소자는 켄치된다. 단, SFCL2과 SFCL3의 I_q 가 유사하여 실제 켄치순서는 역전되고 있다. 필경 더 큰 손실상태에서는 SFCL2과 SFCL3의 전류-전압 곡선이 역전되고 있을 수도 있음을 뜻한다.



(a)



(b)

그림 8 (a) 5개 직렬 연결된 초전도 한류소자 양단의 전압차. 인가전압 200 Vrms, 선트저항 없음. (b) 사고 직후 켄치시점 확대 그림

Fig. 8 (a) Voltages across 5 SFCL components connected in series without shunts at 200 Vrms. (b) Detailed quench behaviors right after the fault

그림 8은 5개 소자를 선트저항 없이 단순 직렬연결 후 200[V_{rms}]를 인가시 각각 초전도 한류소자에 걸린 전압을 나타낸 것이다. 그림 8(b)에서처럼 초기에는 모두 flux flow 저항상태로 되지만, SFCL4만이 켜치를 진행하고 나머지는 중단하고 있다[4]. 전체 전압이 SFCL4에 집중되어 있어 전압 증가시 SFCL4에 과도한 열발생이 예상된다. 선트저항은 이를 피하고자 함이다. 전원 전압이 높아지면 다른 소자도 켜치되지만, 먼저 켜치된 소자에 과도한 전압이 인가되므로 전압등급 상승은 불가하다.

3.2. 동일 선트저항 효과와 동시켄치

그림 1(a)의 회로를 구성하였고, 1(b)와 같이 직렬 연결된 SFCL 각각의 양단에 병렬 저항 R_S를 연결하였다. 단위소자의 정격전압이 200[V_{rms}]이므로 단락시험시 인가된 전원 전압은 (소자개수 × 200[V_{rms}]), 즉 2, 3, 4, 5개의 직렬 소자에 대해 각각 400, 600, 800, 1000[V_{rms}]이다. 선트 저항은 소자가 켜치되어 저항증가로 전류가 감소할 경우 선트저항으로 전류를 우회시켜 전체 전류를 다음 소자의 켜치전류 이상으로 유지하고자 함이다. 병렬저항이 작으면 동시켄치에 도움이 되지만 전력소비가 커지고 일정 한류저항을 만들기 위해 더 많은 소자가 필요하게 되므로 저항 값을 최적화할 필요가 있다. 이를 위해 여러 가지 저항 값에서 켜치 실험을 실시하였다. 우선 작은 저항 값으로부터 점차 큰 값까지 변화시키면서 동시켄치 및 전압분배를 보았다. 다수의 소자가 켜치되면 전압을 등분배할 것이다. 그러므로 1개 소자의 전압이 특히 사고후 첫 1/2주기에서도 기준전압을 초과하지 않는 범위에서 가장 큰 R_S가 최대값 R_{S-MAX}이 된다. 본 실험에서 사용한 5개 소자의 경우 주어진 켜치환경하에서 R_{S-MAX}은 28[Ω]이었다. R_S > R_{S-MAX} 이면 특히 사고후 첫 1/2주기에서 전압 불균형이 심해져서 기준전압 이하로 전압분배가 불가능하였다.

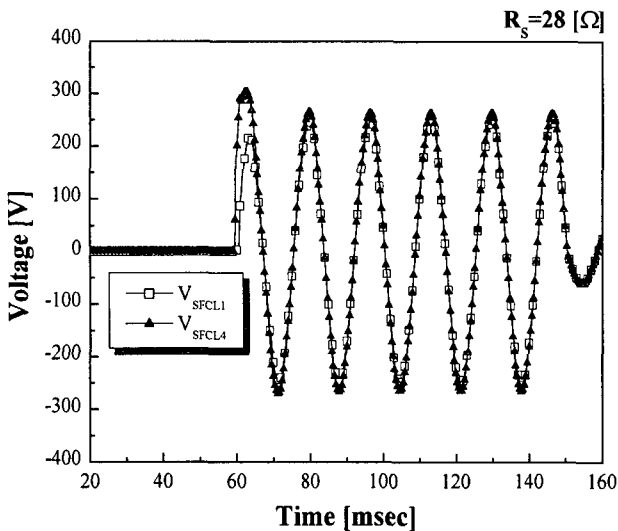


그림 9 병렬저항이 연결된 2개의 초전도 한류소자 양단에서 rm의 전압차, R_S = 28 [Ω]

Fig. 9 Voltages across two series-connected components with R_S = 28 [Ω]

그림 9는 I_q가 최대 및 최소인 두 소자 SFCL 1과 SFCL 4를 R_S와 함께 직렬 연결 (그림 1(b) 참조), R_S = 28 [Ω]일 때 실험결과를 나타낸 것이다. 직렬 연결된 초전도 한류소자가 동시에 켜치되었고, 각 한류소자에 의한 전압강하는 기준 전압 이하로 유지되었다. 이 상태를 동시-안전-켄치가 이루어졌다고 표현하였다. 그림에서 보듯 동시켄치의 문제는 사고 후 첫 1/2주기에서 가장 심각하고 그 이후는 자동으로 문제가 해소되었다. 그러므로 주로 최초 1/2주기에서의 상태를 논의하였다.

실험에 사용된 초전도 한류소자의 최대 임계전류는 18.2 [A]이므로 이보다 임계전류가 작은 한류소자를 직렬로 연결하여도 모두 켜치될 것으로 예측된다. 그림 10은 각 초전도 한류소자에 연결된 병렬 저항값을 28 [Ω]으로 동일하게 설정한 한 후 한류소자 개수가 증가할 때 각각의 한류소자 양단에서의 전압차를 나타낸 것이다. 단락시험 회로의 전압은 200 [V_{rms}]에 한류소자 개수를 곱한 값으로, 3, 4, 5소자 직렬의 경우 각각 600, 800 및 1,000 [V_{rms}]이다. 이 결과로부터 직렬 개수가 증가하여도 모두 안정적인 조건하에서 켜치됨을 알 수 있다. 임계전류 차이가 사고 발생 후 첫 1/2주기 내에는 약간의 전압분담 불균형이 있지만 1/2주기 후에는 균등하게 분담되었다. 사고 후 첫 1/2주기에서 소자간 전압 불균형이 있음에도 소자간 전압차는 정상전압의 10[%]를 넘지 않은, 즉 어느 초전도 한류소자에 걸린 전압도 기준전압을 초과하지 않았음을 주시해야 한다. 이는 5소자 직렬연결이 인가전압 1 [kV_{rms}]인 회로에서 잠재적 사고전류 크기와는 관계없이 안전하게 작동하는 한류기 조합임을 입증하고 있다.

이상과 같이 5개소자의 켜치 거동을 보았는데, 흥미로운 것은 모두 조건이 같음에도 직렬 개수와 관계없이 켜치 곡선이 동일하다는 점이다. 즉, 임계전류가 가장 큰 소자와 가장 소자를 켜치시킬 수 있는 조건이면 나머지 소자가 전부 켜치된다는 것이다. 이렇게 다수의 소자를 연결할 때 켜치 조건이 단순화 된다는 것은 흥미로운 사실이며, 다수의 소자를 직렬연결 할 때 좋은 지침이 된다.

3.3. 최적 저항

그림 11은 병렬 저항값이 15 [Ω]일 때와 28 [Ω]일 때 사고 후 첫 1/2주기에서 각 초전도 한류소자 양단에서 발생하는 전압차를 비교한 것이다. R_S = 15 [Ω]일 때, 켜치 후 각 초전도 한류소자 양단의 전압은 안정적인 켜치 전압조건인 피크치 283 [V] 이하에 근사하였고, 사고 후 첫 1/2주기 내의 최고 발생전압과 최소 발생전압 차이가 현저히 줄어들음을 알 수 있다. 사고 후 첫 1/2주기 전압에서 R_S = 28 [Ω]의 경우 초전도 한류소자간 최대 및 최소 전압차 ΔV_(R_S=28) = 72 [V] 임에 비해 ΔV_(R_S=15) = 37 [V]로써 소자간 전압이 훨씬 균등하게 분담되고 있음을 보여준다. 따라서 동 직렬연결의 동작 조건은 R_S ≤ 28 [Ω]이며, 실제 동작은 소자간 특성 편차에 대한 마진, 안전 및 경제성 등을 고려하여 R_S ≤ 15 [Ω]에서 운용하는 것이 타당하다 하겠다. 이 결과를 종합한 것이 그림 12이다.

그림 12는 초전도 한류소자 5개가 직렬 연결된 상태에서 병렬 저항값이 변할 때, 소자간 전압 중 사고 후 첫 1/2주기 동안 발생하는 최대 전압 V_{highest}와 소자간 전압 편차 ΔV를

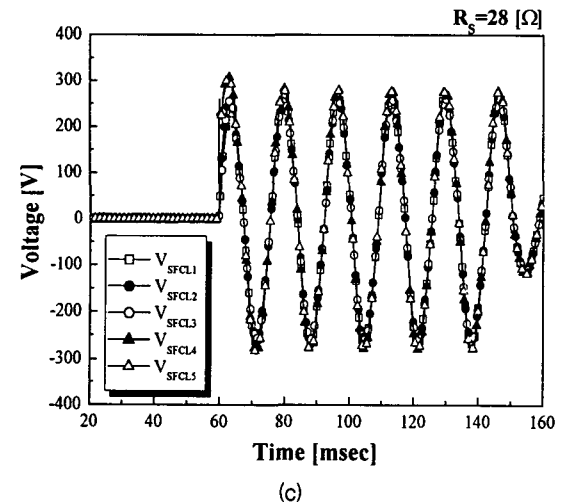
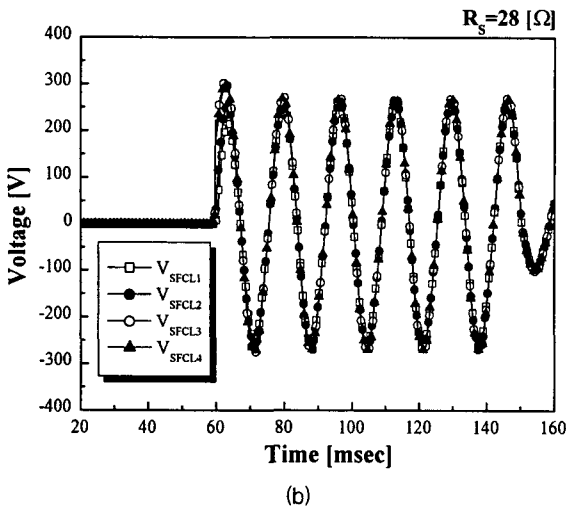
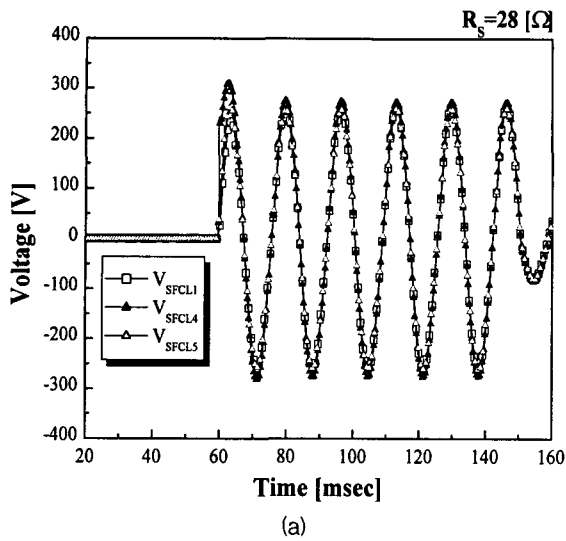


그림 10 $R_s=28[\Omega]$ 일 때 직렬 개수의 변화에 따른 동시 퀘칭 특성. (a) 3개 소자 직렬, (b) 4개 소자 직렬, (c) 5개 소자 직렬

Fig. 10 Quench characteristic of series-connected SFCL components for $R_s=28 [\Omega]$. (a) 3 components, (b) 4 components, and (c) 5 components in series

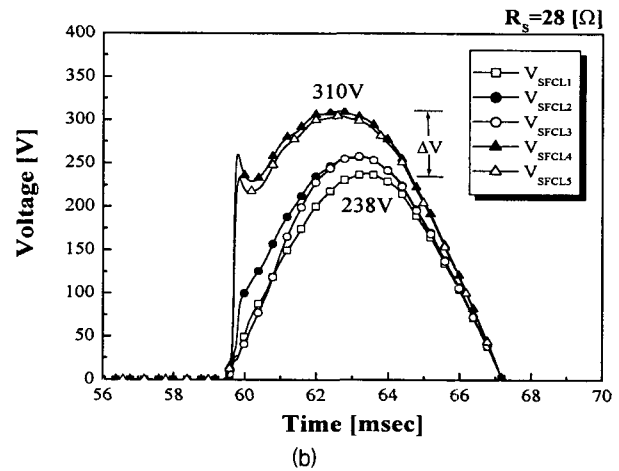
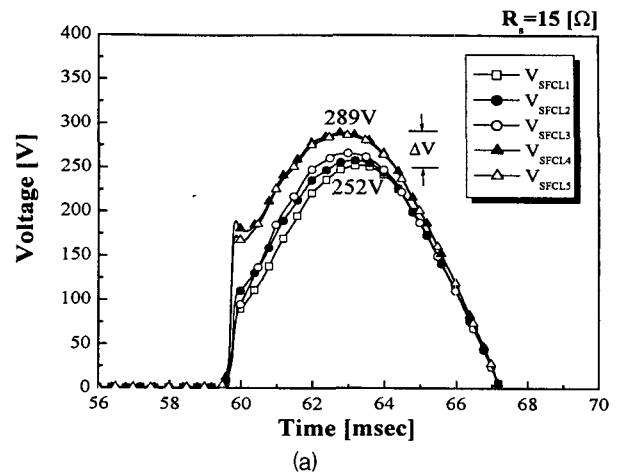


그림 11 직렬 5개, 사고 후 첫 1/2주기에서의 퀘칭 특성 (a) $R_s = 15 [\Omega]$, 그리고 (b) $R_s = 28 [\Omega]$

Fig. 11 Quench characteristic of 5 series-connected SFCL components at the first 1/2 cycle after quench. (a) with $R_s = 15 [\Omega]$ and (b) with $R_s = 28 [\Omega]$

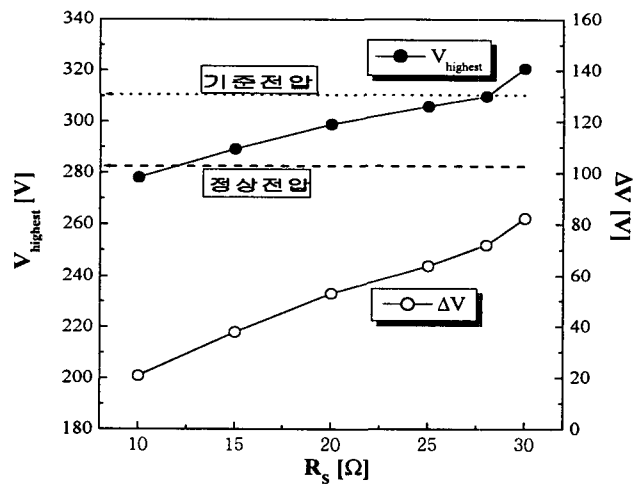


그림 12 병렬 저항값 변화에 따른 퀘칭 후 최초 1/2주기에서의 $V_{highest}$ 와 ΔV . $R_s \leq 28 [\Omega]$ 에서 $V_{highest} <$ 기준 전압.

Fig. 12 $V_{highest}$ and ΔV with various R_s at the first 1/2 cycle after quench

나타낸 것이다. 병렬 저항값이 증가할 수록 $V_{highest}$ 와 ΔV 가 증가함을 알 수 있다. $R_S = 28 [\Omega]$ 일 때 5개 초전도 한류소자 중 최고의 전압은 310 [V]로써, 기준전압 이내이므로 동시 켄치를 위한 최대 병렬 저항값은 28 [Ω]이다. $R_S \geq 28 [\Omega]$ 이면 최대전압이 기준전압을 초과하게 되며, 따라서 병렬 저항으로써 부적절하다.

그림 13은 5개의 초전도 한류소자를 직렬 연결한 후 병렬 저항이 28 [Ω]의 한류 소자를 1 [kV_{rms}]의 회로에서 단락시험을 수행한 결과로써, 안정된 한류 특성을 보여주고 있다. 사고시점 60 [msec]에서 급격히 증가하던 사고전류가 2 밀리초 이내에 한류가 완료되었다. 이렇게 5개의 한류소자가 정상전압 1000 [V_{rms}]를 안정적으로 감당한다. 따라서 본 실험에 사용된 초전도 한류기는 1 [kV_{rms}]/10 [A_{rms}], 혹은 10 [kVA]급 한류용량을 갖는다. $R_S = 15 [\Omega]$ 의 경우는 병렬 저항 감소로 인하여 소자간 전압분배가 더욱 균등해지므로 더 안전하게 되며, 사고 후 컷 1/2주기 후 전류값이 약 20% 증가하지만 사고 직후 전류값을 포함하여 다른 특성은 동일하다.

4. 전압등급 증대 및 안정적 동작조건

저항형 한류소자의 경우 단위소자에 대한 전류 및 전압등급은 초전도 한류소자 제작상의 문제로 제한될 수밖에 없다. 더하여, 소자간 특성 차이, 특히 임계전류의 차이 또한 제작상의 품질관리 하에서 다소 상이함을 전제로 해야 한다. 이렇게 크기가 제한되고 품질이 일정 범위 안에서 다른 초전도 한류소자들을 직·병렬하여 고전압, 대전류용 한류기를 제작하는 것이다. 직렬연결의 경우 성공여부는 각 소자의 동시 켄치를 통하여 전체 전압을 각 소자에 균등하게 분배할 수 있느냐에 달려있다. 그러면서도 실제 활용에 있어 신뢰성 보장 및 비용 절감을 위해서는 디자인에 융통성을 주면서 제작 공정을 최소화할 필요가 있다.

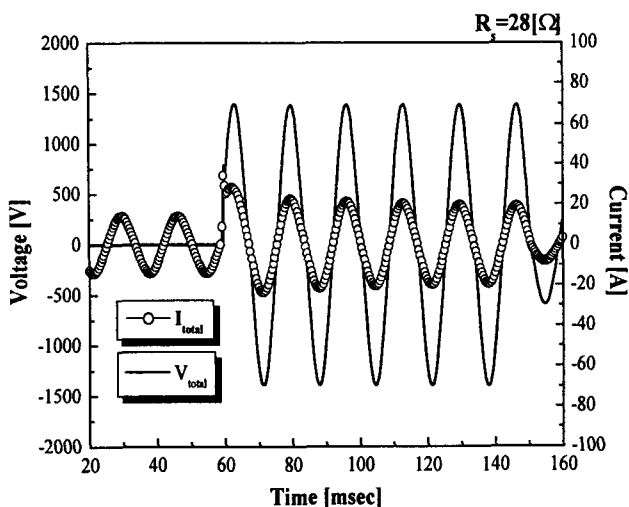


그림 13 직렬 5개, $R_S = 28 [\Omega]$ 일 때 한류특성
 Fig. 13 Short circuit test of 5 SFCL components in series with $R_S = 28 [\Omega]$ at 1 [kV]

본 실험에서 사용된 2" YBCO 박막은 특별히 선정된 것이 아닌, 제조사에서 공급된 그대로인 바, I_c 차이가 14.4~18.2 [A]에 이를 정도로 편차가 있었다. 그럼에도, 상기 설명에서 본 바와 같이, 동일한 병렬저항을 이용하여 5개의 초전도 한류소자를 동시 켄치 시키고 각 소자에 걸린 전압을 기준전압 이하로 유지할 수 있었다. 최대 허용 병렬저항값은 최대 I_c 를 갖는 소자를 켄치시킬 수 있도록 하는 저항 값으로 본 실험에서는 $R_S\text{-MAX} = 28 [\Omega]$ 이다. 켄치 후 저항이 아주 크다고 가정하면 필요한 식(5)에서 병렬저항은 $R_S = 14 [\Omega]$ 인 바, 이는 대략적으로 적정 운용 값의 크기를 정해준다. 실제로 $R_S = 15 [\Omega]$ 의 경우 사고 후 1/2 주기에서 초전도 한류소자간 전압차가 $\Delta V = 40 [V]$ 이내이고, 최대 전압이 289 [V]로써 정상전압에서의 최고치 283 [V] 보다 불과 2.1[%] 증가에 불과하다. 이상 5개 소자 직렬이 1 [kV_{rms}]의 회로에서 안정된 한류소자임을 보였거니와, 이러한 조건이면, 10개의 초전도 한류소자를 직렬로 연결하는 경우도 같은 병렬저항으로 2 [kV_{rms}]의 선로 전압하에서 안정되게 한류작용을 보일 것이라는 확신을 준다.

전압 등급 증대에 있어 동일 병렬저항을 사용하는 방안은 한류소자 디자인, 조립 및 보수 등 전반에 걸쳐 큰 이점을 주고 있다. 우선 디자인에 다양성을 주고 있다. 적정 병렬저항 하에서 동시 켄치는 한류소자간 I_c 의 불균일도에 민감하지 않아서 단위소자의 크기, 모양, 배치 등에 영향이 거의 없다. 더하여, 같은 병렬 저항이므로, 그리고 박막의 품질에 상당 범위에서 무관하므로, 일정 품질 관리하에서 생산된 단위소자를 개별 품질 조사 없이 그대로 사용해도 무방하게 된다. 이는 조립 과정을 크게 단순화시킨다. 일부 소자 교체 시에도 현장에서 품질 조사할 필요가 없는 등, 본 방안은 전압등급 증대를 위한 실용적 방안이라 판단된다.

5. 결 론

저항형 초전도 한류기의 전압등급을 올리기 위하여 초전도 한류소자를 직렬로 연결 시 동일 병렬 저항을 이용하는 방안에 대해 상세하게 조사하였다. 단위 초전도 한류소자는 제작상 특성이 일정범위 안에서 상이하므로, 이들을 동시에 켄치 시키고 전압을 균등하게 분담시키는 것이 목적이다. 직렬연결시 켄치 불균형은 잘 알려진 문제이다. 본 실험은 동일 선트저항을 이용하여 소자 전체를 동시에 켄치시키고 전압을 분담시키는 것이다. 본 연구에서 흥미로운 발견은 최대 및 최소 임계전류를 갖는 두 소자를 켄치시킬 수 있으면 나머지도 전부 켄치시킨다는 것이다. 이는 YBCO 박막 소자의 스위칭이 비록 빠르기는 하지만 아직도 순간 동작이기에 충분히 느리다는 것을 말해준다. 이 결과는 다수의 소자를 직렬 연결할 때 좋은 지침이 된다.

동일 선트저항에 의한 동시켄치를 위하여 2" YBCO 박막을 사용하여 제작한 초전도 한류소자 5개에 병렬저항을 부착하고 전원 전압 $5 \times 200 [V_{rms}] = 1 [kV_{rms}]$ 를 인가하고 직렬연결에 대한 단락시험을 실시하였다. 이 실험에서 $R_S = 28 [\Omega]$ 이하로 하여 5개 소자 모두 동시 켄치 시키고 전압분담을 기준전압 이하로 하는데 성공하였다. 소자간 특성 편차 등을 고려하여 최적 운용 조건으로 $R_{S\text{-optimal}} = 15 [\Omega]$ (≈

$R_{S-MAX}/2$)을 제시하였다. 본 실험으로 미루어 볼 때 초전도 한류소자 개수가 10 혹은 그 이상에서도 R_S 를 포함하여 동일한 한류소자 구성 조건이 적용된다. 적절한 선타저항이 선정되면 동일 선타저항 방식이 작은 소자를 직렬연결하여 고전압에 적용할 수 있는 방안으로 적절하다. 이 방안은 한류소자 디자인, 조립 및 보수 등 전반에 걸쳐 큰 이점을 줄 수 있는, 전압등급 증대를 위한 실용적인 방안이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, and W. Lanz, "Fault current limiter based on high temperature superconductors different concepts, test results, simulations, applications," *Physica C*, vol. 354, pp.27-33, 2001.
- [2] M. Chen, et al., "6.4MVA resistive fault current limiter based on Bi2212 superconductor," *Physica C*, vol. 372, pp.1657-1663, 2002.
- [3] K. Shimohata, S. Yokoyama, T. Inaguchi, S. Makamura, and Y. Ozawa, "Design of a large current-type fault current limiter with TBCO films," *Physica C*, vol. 372, pp. 1643-1648, 2002.
- [4] H. S. Choi, O. B. Hyun, and H. R. Kim, "Quench characteristics of resistive superconducting fault current limiters based on YBa2Cu3O7 films," *Physica C*, vol. 351. pp.415-420, 2001.
- [5] 현옥배, 최효상, 김혜림, 임해용, 김인선, "직렬 연결된 초전도 한류기의 분로저항에 의한 동작특성," 전기학회 논문지, 49B권, 11호, pp. 737-740, 2000.
- [6] T. Hoshino, M. Nishikawa, K. M. Salim, T. Nakamura, and I. Muta, "Preliminary studies on characteristics of series-connected resistive type superconducting fault current limiter for system design," *Physica C*, vol. 354, pp.120-124, 2001.
- [7] O. B. Hyun, S. D. Cha, H. R. Kim, H. S. Choi and S. D. Hwang, "Shunt-Assisted Simultaneous Quenches of Series-Connected Resistive SFCL Components," preprint (submitted to ASC2002, Houston, TX.)
- [8] H. R. Kim, H. S. Choi, H. R. Lim, I. S. Kim and O. B. Hyun, "Quench distribution in superconducting fault current limiters at various voltages," *Cryogenics*, vol. 41, pp.275-280, 2001.

저 자 소 개



차 상 도(車 相 道)

1973년 3월 29일생. 1999년 충남대 전기공학과 졸업, 2002년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 한전 전력연구원 위촉연구원

E-mail : meson3810@hanmail.net



김 혜 림(金 蕙 林)

1957년 3월 15일생. 1979년 서울대 물리학과 졸업, 1981년 미 아이오와 주립대학원 물리학과 졸업(석사), 1991년 미 코넬대 대학원 물리학과 졸업(이박), 현재 한전 전력연구원 선임연구원

E-mail : hrkim@kepri.re.kr



심 정 옥(沈 政 煜)

1970년 10월 10일생. 1996년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 1998년 동대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2003년 동대학원 전기전자공학과 졸업(공학), 현재 한전 전력연구원 위촉연구원

E-mail : jwsim@kepri.re.kr



한 용 희(韓 鎬 熙)

1948년 2월 13일생. 1975년 전북대 전기공학과 졸업, 1983년 연세대 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력산업 구조개편팀 팀장

E-mail : hanyh@kepeco.co.kr



현 옥 배(玄 錡 培)

1953년 2월 11일생. 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 Iowa State Univ. 대학원 물리학과 졸업(이박), Ames Lab., NIST, ISTEK 연구원 역임, 현재 한전 전력연구원 책임연구원

E-mail : hyun@kepri.re.kr