

유도형 초전도사고전류제한기의 켄치특성

최 경달⁰, 이 상진^{*}, 김 동수^{**}, 이 지광^{**}, 김 동훈^{**}, 차 귀수^{***}, 한 승엽^{***}
 0: 기초전력공학공동연구소 *; 연세대학교 전기공학과 **; 서울대학교 전기공학과 ***; Soonchunhyang Univ.

Quench Characteristics of a Inductive Superconducting Fault Current Limiter

K.D. Choi⁰, S.J. Lee^{*}, D.S. Kim^{**}, J.K. Lee^{**}, D.H. Kim^{**}, G.S. Cha^{***} and S. Y. Hahn^{***}
 0: EESRC *; Yonsei Univ. **; Seonl National Univ. ***; Soonchunhyang Univ.

Abstract - Recently a superconducting fault current limiter(SFCL) has public attentions for the solution of large fault currents of power systems. Though a SFCL has more effective characteristics than the other current limiting devices, there are many problems to apply it to real power systems. For the analysis of transient fault characteristics of the SFCL, we designed and fabricated a inductive SFCL and tested it in 35V line. The superconducting cable of the SFCL was quenched at lower current(49A) than the designed critical current, but it limited the fault current to the lower value(150A) than the one expected without SFCL(250A). And within one period the fault current decreased lower than normal load current.

1. 서론

근래에 이르러 전력계통의 용량이 커짐에 따라 1선지락과 같은 사고시 단락전류가 매우 커져 계통의 차단기 용량을 초과하는 등의 문제가 발생하게 되었다. 이 사고전류를 차단하는 데는 최소 4주기 이상의 시간이 필요하며 이 기간동안 계통에서는 사고전류를 감당할 수 있어야 한다. 따라서 사고전류를 더 빨리 차단하거나 사고전류 그 자체를 제한시킬 필요성이 대두되어, 비선형 저항기등을 이용한 사고전류제한방식이 연구되어 왔다.

한편 초전도체에는 호르그 있던 전류가 임계전류를 넘어서면 상전도상태로 바뀌어 저항을 띄는 성질이 있으므로 이 특성을 스위치나 사고전류제한기에 응용하려는 연구가 70년대말부터 시작되었다.^[1] 초기에는 교류손실때문에, 교류계통에서도 초전도체에 호르는 전류는 직류로 바꾸어 제한하는 방식이 연구되었으나, 교류용 초전도선이 개발된 이후에는 여러가지 형태의 초전도사고전류제한기가 발표되었다.^[2,3]

초전도사고전류제한기는 기존의 차단기나 사고전류제한기에 비해 반응속도가 매우 빨라 사고발생후 한주기 이내에 사고전류를 억제할 수 있으며, 초전도변압기와 함께 설치되는 경우에는 냉각시스템을 하나로 할 수 있어 경제성도 향상된다.

그러나 초전도사고전류제한기는 극저온에서 동작해야 하므로 실용화에 어려움이 많고, 초전도마그네트등과 같은 직류용분야와는 달리 교류 과전류에 의해 발생하는 켄치현상에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 더구나 국내에는 초전도현상을 응용하는데 필요한 소재나 기반기술이 취약하여, 90년대에 들어서야 초전도전류제한기에 대한 연구가 시작되었다.^[4]

본 논문에서는 초전도사고전류제한기의 사고시 과도현상을 알아보기 위하여, 단락전류를 제한하는 리미터(limiter)가 리액터(reactor)로 구성되는 유도형 초전도사고전류제한기를 설계·제작하였고, 전원전압 35V의 모계통에 초전도사고전류제한기를 연결하여 부하측이 단락되었을 때 전류제한기의 동작특성을 실험하였다. 사고전 정상상태시 부하는 저항부하 1.2Ω, 단락후에는 사고전류가 50A로 제한되도록 설계하였고 사고발생후 한주기 이내에 단락전류가 제한되는 것을 확인할 수 있었다.

2. 초전도 사고전류제한기의 구조 및 특성

초전도 사고전류제한기는 트리거(trigger)와 리미터로 구성된다. 트리거에는 정상상태시 대부분의 부하전류가 손실없이 흐르다가, 사고가 발생하여 전류가 증가하면 켄치되어 상전도상태로 전이되어서 큰 저항값이 나타나고, 리미터는 트리거가 켄치된 후 대부분의 사고전류를 감당하고 아울러 이 사고전류를 제한하는 역할을 한다. 리미터의 형태를 저항으로 하는가 아니면 리액터로 하는가에 따라 저항형과 유도형으로 구분된다.

상전도상태로 바뀐 초전도선의 저항은 선재를 구성하고 있는 물질들의 점적율과 그 물질의 비저항을 이용하여 구할 수 있다. 초전도선이 Cu, CuNi, NbTi로 이루어졌을 때 그 점적율을 λ_{Cu} , λ_{CuNi} , λ_{NbTi} 라고 하고 온도 θ 일 때 각 물질의 저항과 초전도선의 저항을 $R_{Cu}(\theta)$, $R_{CuNi}(\theta)$, $R_{NbTi}(\theta)$, $R_w(\theta)$ 라고 하면 단면적은 식(1), 저항은 식(2)로 구할 수 있다.

$$A_{Cu} = \frac{A_w \lambda_{Cu}}{\lambda_{Cu} + \lambda_{CuNi} + \lambda_{NbTi}}$$

$$A_{CuNi} = \frac{A_w \lambda_{Cu}}{\lambda_{Cu} + \lambda_{CuNi} + \lambda_{NbTi}}$$

$$A_{NbTi} = \frac{A_w \lambda_{NbTi}}{\lambda_{Cu} + \lambda_{CuNi} + \lambda_{NbTi}}$$
(1)

$$R_{Cu}(\theta) = \rho_{Cu}(\theta) \cdot \frac{l_w}{A_{Cu}}$$

$$R_{CuNi}(\theta) = \rho_{CuNi}(\theta) \cdot \frac{l_w}{A_{CuNi}}$$

$$R_{NbTi}(\theta) = \rho_{NbTi}(\theta) \cdot \frac{l_w}{A_{NbTi}}$$

$$R_w(\theta) = \frac{1}{\frac{1}{R_{Cu}}(\theta) + \frac{1}{R_{CuNi}}(\theta) + \frac{1}{R_{NbTi}}(\theta)}$$
(2)

A_w : 초전도선 단면적

l_w : 초전도선의 길이

$\rho_{Cu}(\theta)$: 온도 θ 일 때 Cu의 비저항

$\rho_{CuNi}(\theta)$: 온도 θ 일 때 CuNi의 비저항

$\rho_{NbTi}(\theta)$: 온도 θ 일 때 NbTi의 비저항

온도가 증가하면 비저항은 일정 저온범위에서 선형적으로 증가하는데, 그 관계는 다음과 같다.

$$\rho(\theta) = \rho_o \times \frac{\theta}{\theta_o}$$
(3)

ρ_o : 온도 θ_o 일 때 비저항

4.2K에서 Cu, CuNi, NbTi의 비저항은

$$\rho_{Cu}(4.2) = 0.801 \times 10^{-10} [\Omega \cdot m],$$

$$\rho_{CuNi}(4.2) = 14.0 \times 10^{-9} [\Omega \cdot m],$$

$$\rho_{NbTi}(4.2) = 6.7 \times 10^{-7} [\Omega \cdot m]$$

로써 구리의 비저항이 다른물질에 비해 1/1000이하이므로, 초전도선에 구리가 포함되어 있으면 상전도상태의 저항은 구리의 점적율에 따라 거의 결정된다.

초전도선에 퀸치가 발생하면 식(1)~(3)으로 구한 4.2K일 때의 상전도저항값이 바로 나타나는 것은 아니다. 직류를 이용한 초전도마그네트에서는 초전도선이 외부나 내부의 발열요인에 따라 퀸치될 때 나타나는 저항의 변화를 구하기 위해, 한 극소지점이 상전도상태로 전환되고 여기서 발생한 열로 상전도영역이 사방으로 전파되어 나가는 모델을 사용하고 있다. 이 때의 퀸치전파 속도 v_{qd} 는 단열조건하에서 식(4)와 같이 된다.^[5]

$$v_{qd} = \frac{J_0}{\gamma C} \left(\frac{\rho \cdot k}{\theta_s - \theta_0} \right)^{1/2} = \frac{J_0}{\gamma C} \left(\frac{L_0 \cdot \theta_0}{\theta_s - \theta_0} \right)^{1/2} \quad (4)$$

J_0 : 전류밀도 [A/m²]
 γC : 비열 [J/m³]
 L_0 : Lorentz number [ΩK^2]
 θ_s : 퀸치 발생 온도
 θ_0 : 냉매 온도

이와 같은 관계에 따라 퀸치된 초전도선은 순간적으로 상전도 저항을 갖는 것이 아니라, 점차 저항값이 증가하는 형태로 나타나며 증가율은 퀸치전파속도에 따라 결정된다. 초전도선 전체가 상전도상태로 바뀌면 저항은 선의 온도증가에 따라 변화한다.

교류용 초전도선에서 임계전류를 넘어설 때 나타나는 퀸치전파속도는 직류마그네트의 경우보다 훨씬 빠른 것으로 알려지고 있다.^[6,7] 식(4)의 퀸치전파속도는 온도에 의한 퀸치를 가정하고 있다. 즉 그림1(a)와 같이 온도 θ_0 , 전류밀도 J_0 인 상태에서 물리적인 원인에 의해 한 극부지점이 온도가 상승하면 임계전류밀도가 J_0 인 온도 θ_s 에서 퀸치가 발생하고 이 온도에 따라 퀸치전파속도가 결정된다.

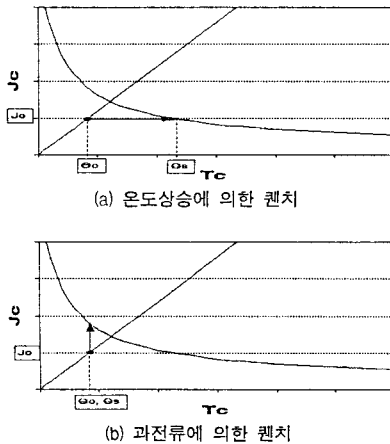


그림1 초전도선의 퀸치발생모델

Fig. 1 Models for the quench generation of superconducting wire

초전도변압기나 초전도사고전류제한기에서 과전류로 퀸치가 일어나는 경우는 이와 유사하게 설명할 때 그림1(b)와 같이 된다. 즉 온도상승에 의한 퀸치가 아니라 전류상승에 의한 퀸치이므로 퀸치발생 온도 θ_s 는 θ_0 와 같아져 식(4)의 해석모델을 적용하면 퀸치전파속도는 무한대가 된다.

실제로 다른 실험결과를 보면 동일한 선체에 대해 온도상승에 의한 퀸치전파속도는 수십m/s인데 비해 과전류에 의한 퀸치전파속도는 수km/s로 측정되었다.^[7] 교류용 초전도선에서 임계전류를 넘어설 때 나타나는 이 급격한 전이현상은 사고전류를 제한시키는 용도에는 더 적합하다.

3. 초전도 사고전류제한기의 설계 및 제작

실험에 사용된 초전도선체의 제원은 표1과 같다. 리미터와 트리거에 사용되는 초전도선은 몇가지 점에서 서로 다른 것으로 선택해야 한다. 트리거에는 정상상태에서 모든 전류가 흐르고 리미터에는 사고시에만 단락전류가 흐르며 이 전류의 크기는 리미터의 임피던스에 의해 결정된다. 따라서 트리거에 사용되는 초

전도선은 정상상태에서는 교류손실이 적고 사고가 일어난 후 상전도상태로 되었을 때에는 고저항을 띄도록 제작된 것이라야 한다. 이런 특성을 얻기 위해서는 초전도선중에서 모재(matrix)가 CuNi로만 이루어져 있는 것을 선택해야 하고, 리미터용 초전도선은 사고 발생후 흐르는 전류에 의해 상전도로 바뀌지 않도록 선체 안정화가 고려된 것을 선택해야 한다.

본 논문에서는 트리거와 리미터에 같은 규격의 초전도선을 사용해야 해서, 두가지 조건을 절충하여 구리함유량이 5.3%인 것을 선택하였다. 구리함유량이 5.3%정도이면 4.2K에서 초전도체가 상전도상태로 전이되었을 때 1m당 9.86m Ω 의 저항을 띄게 된다. 같은 조건에서 만일 구리가 전혀 포함되지 않고 CuNi만 안정화제로 사용되면 1m당 3.17 Ω 의 큰 저항을 가질 수 있다.

표1. 초전도선체의 제원

Table 1. Specifications of the superconducting cable

초전도와이어	
절연피막이 없을 때 직경 (mm)	0.14
절연피막을 포함한 직경 (mm)	0.15
필라멘트 평균직경 (μ m)	0.51
트위스트피치 (mm)	1.4
Cu/CuNi/NbTi 비	0.2/2.3/1
필라멘트 수	19,800
스텐레스스틸와이어	
절연피막이 없을 때 직경 (mm)	0.137
절연피막을 포함한 직경 (mm)	0.16
초전도케이블	
절연피복을 포함한 직경(mm)	0.6
초전도와이어수	6
임계전류(A, DC), 2T 4.2K에서	70

설계시 트리거보다 리미터의 정격전류를 높이기 위해, 리미터는 2개의 공심리액터를 병렬로 연결하여 구성하였다. 트리거는 73회씩 2층으로 권선하였고, 각 층에 흐르는 전류 방향은 반대가 되도록 하였다. 측정결과 인덕턴스는 37 μ H이었다. 리미터는 같은 층에 55회씩 2층으로 같은 2개의 리미터를 병렬로 연결하였고, 따라서 전체 리미터는 4층으로 구성되며 내부 2층과 외부 2층 사이에는 냉각채널을 형성하기 위해 두께 1 mm의 스페이서를 넣었다. 리미터의 인덕턴스는 2.01mH로 측정되었다. 리미터에는 85m, 트리거에는 69m의 초전도선을 사용하였다. 리미터와 트리거 모두 권선후에 예폭시수지로 굳혀 초전도선의 움직임을 방지하였다. 표2에 리미터와 트리거의 제원을 나타내었으며, 그림2은 완성된 초전도사고전류제한기의 모습이다.

표2 리미터와 트리거의 제원

Table 2 Specifications of the limiter and trigger

	권선수	상온시저항 (Ω)	인덕턴스 (mH)	소요된 선체 길이(m)
리미터	내층	55 \times 2	66.3	33.2
	외층	55 \times 2	66.3	33.2
트리거	73 \times 2	102.3	0.037	69.1

트리거의 정격전류와 사고시 퀸치되는 임계전류는 NbTi의 임계전류밀도(J_c)-임계자속밀도(B_c)특성에 초전도선체의 측정임계전류값(2T에서 70A)을 대입한 임계전류(I_c)-임계자속밀도(B_c)특성으로부터 구한다.

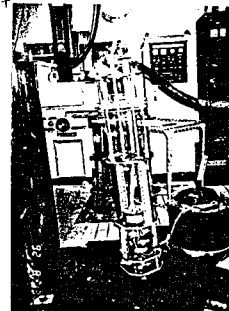


그림2 완성된 초전도사고전류제한기

Fig. 2 Finished superconducting fault current limiter

직경 0.6mm의 초전도선재에 인가되는 자속밀도는 권선된 층수에 따라 식(5)과 같이 된다.

$$B = 2.095 \times 10^{-3} \times I \times N \quad [T] \quad (5)$$

N : 권선된 층수

리미터는 4층으로 권선되었으므로 초전도선의 임계전류는 125A이지만, 두 솔레노이드가 병렬로 연결되었기 때문에 근사적으로 250A(순시값)의 전류까지 흘릴 수 있다. 트리거의 내부자속밀도는 거의 영(0)이 되지만 1층권선과 2층권선사이에서는 2층 솔레노이드마그네트와 거의 같은 자속밀도가 존재하게 되어 임계전류는 145A가 된다.

4. 특성실험

초전도사고전류제한기의 특성실험을 위해 35V 모의계통을 구성하였다. 전원측에 직렬로 전류제한기를 연결하였고 부하로는 1.2Ω의 저항을 사용하였다. 전압을 증가시켜가면서 각 전압별로 부하 양단에 연결한 단락용 스위치를 단았을 때 리미터와 트리거에 흐르는 전류와 각부의 전압을 측정하였다. 표3은 전압별로 측정된 단락시의 리미터전류와 트리거전류값이다.

표3 전압별 단락전류

Table 3 Fault currents by voltages 단위 (A)

전압 (V)	트리거		리미터		전원전류	
	단락전	단락후	단락전	단락후	단락전	단락후
10	8.2	3.0	0.1	11.3	8.2	12.4
15	12.5	4.0	0.2	17.2	12.6	18.3
20	16.7	4.2	0.3	23.1	16.8	24.2
25	20.9	4.1	0.4	28.7	23.0	30.0
30	24.3	4.2	0.4	34.1	24.6	35.5
35	28.9	4.1	0.5	39.6	29.1	41.1

부하측을 단락시킨 상태에서 전원전압을 서서히 상승시켜가며 전류를 증가시켰을 때 측정된 퀘칭전류는 순시최대값으로 49A였는데 이 값은 설계값 145A에 훨씬 못미치는 값이었다. 이에 대한 원인으로는 전류도입선 연결부에서 초전도선의 고정이 불안정하여 이 부분의 움직임으로 퀘칭전류값이 감소했을 것으로 생각된다.

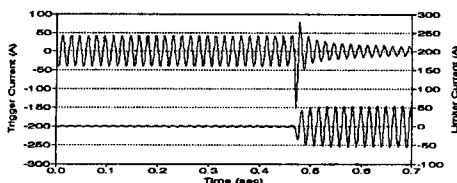


그림3 단락사고시 트리거(위)와 리미터전류(아래)(사고각 170도)

Fig.3 Trigger (upper) and limiter current(lower) at fault

그림3은 전원전압 35V에서 부하전류 29A가 흐르다가 단락되었을 때 트리거전류와 리미터전류를 측정된 것이며 단락시점(사고각)은 170°이다. 35V 가변전원의 내부임피던스는 0.2Ω으로 초전도사고전류제한기가 없다면 사고전류는 직류성분이 없어도 최대 250A(순시값)가 된다.

사고전류의 최대순시값은 150A로써 최대 250A의 사고전류를 60%수준으로 제한시킬 뿐만 아니라 2주기 후에는 사고전 부하전류보다 감소하였다. 기존의 차단기로는 3주기 후에야 사고전류를 차단할 수 있음에 비해 빠른 속도로 사고전류를 제한할 수 있음을 알 수 있다.

단락사고시 트리거 전류와 그 양단전압을 측정하였으며, 이 값을 이용하여 트리거의 저항변화를 구하였다. 각 측정값의 시간간격은 0.5ms이어서 한 주기에 33번의 측정이 이루어진다. 퀘칭전에 측정된 양단전압과 전류로부터 구한 트리거의 접촉저항과 인덕턴스는 0.02Ω과 21.2μH이었다.

따라서 이 성분은 의해 나타나는 전압성분을 측정전압값에서 빼면 순수하게 트리거의 퀘칭저항에 따라 나타나는 전압이 된다. 이 전압을 전류로 나누면 저항의 변화를 구할 수 있지만 전류값이 0(영)부근에서는 정확한 저항을 알 수가 없다. 본 논문에서는 전압과 전류의 실효값을 구해 저항변화를 구하였다. 33개의

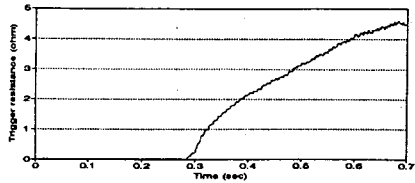


그림4 단락사고시 트리거저항의 변화

Fig. 4 Variation of trigger resistance at fault

데이터를 묶어 실효값을 구한 다음, 다음 스텝의 측정값을 포함시키고 최초의 측정값을 빼어 한 스텝(0.5ms)별로 실효값을 순차적으로 구해 나갔다. 이렇게 구한 퀘칭후의 트리거 저항변화를 그림4에 나타내었다.

5. 결론

초전도사고전류제한기를 전원측에 직렬로 설치할 경우 사고발생 후 한주기 이내에 사고 전류를 억제할 수 있음을, 유도형 초전도사고전류제한기를 제작하여 특성실험을 통해 확인하였다.

전원전압 35V, 부하저항 1.2Ω으로 실험회로를 구성하였고 단락사고시험을 통해 트리거전류와 리미터전류의 변화를 구하였다. 또한 트리거전류의 변화시 트리거양단전압의 변화를 측정해 이 값들로부터 트리거저항의 변화를 구하였으며, 최대 250A로 예상되는 사고전류를 60%수준으로 제한할 수 있었다.

트리거의 퀘칭 전류는 선재의 제원으로부터 계산한 임계전류보다 작게 나타났는데 이는 권선된 초전도선과 전류도입부에서 전류가 흐를 때 움직임이 있었던 탓으로 분석된다. 트리거에 사용된 초전도선의 길이는 69m로 4.2K에서 초전도선 전체가 상전도상태로 전이되어도 0.68Ω밖에 되지않아 사고직후 단락전류의 급격한 상승을 충분히 억제할 수 없었다. 사고후 한주기이내에 단락전류를 제한하려면 모체에 구리가 포함되지 않은 초전도선을 사용해야 하며, 필요한 초전도선의 길이를 결정할 수 있으면 좀더 많은 실험을 통한 연구가 계속되어야 할 것으로 생각된다.

실험결과에서 알 수 있듯이 단락전류 즉, 사고전류는 트리거에서 발생하는 저항으로 사고발생후 수ms 이내에 억제된다. 현재, 계통에서 운용되고 있는 차단기가 사고발생후 3주기가 지나서 동작하고, 사고전류의 감지는 현재의 기술로 2주기가 지나야 가능하며 이론적으로도 1주기 이내에는 불가능하다는 점을 고려하면 단락사고시 변전소나 발전소를 보호하는데 초전도사고전류제한기가 효과적이라는 점을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

1. K.E.Gray and D.E.Fowler, "A Superconducting Fault-Current Limiter," Journal of Applied Physics, Vol. 49, No.4, April, 1978, pp. 2546-2550.
2. T.Verhaege et. al, "25 KV Superconducting Fault Current Limiter," Proc. of the 11th Magnet Technology Conference, Tsukuba, Aug, 1989, pp. 413-418.
3. D. Ito et. al, "Test on Superconducting AC Fault Current Limiter," Proc. of the 11th Magnet Technology Conference, Tsukuba, pp 449-454.
4. 차귀수, 한승엽, "초전도전류제한기의 스위칭 특성," 대한전기학회 논문지, 제39권, 제12호, 1990년 12월, pp 1239-1245.
5. M.N.Wilson, "Superconducting Magnet," Clarendon Press, Oxford, England, 1983.
6. D. Ito et al., "6.6kV/1.5kA-Class Superconducting Fault Current Limiter Development," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 28, No. 1, Jan. 1992, pp 438 -441.
7. M.Iwakuma et al., "Quench Analysis in a 72KVA Superconducting Four Winding Power Transformer," Cryogenics, Vol. 29, Nov. 1989, pp 1055- 1062.