220Vrms/100Apeak급 초전도 사고전류제한기의 제작 및 특성실험

論 文
45~1~3

The Manufacture and Characteristic Experiment of 220Vrms/100Apeak Class Superconducting Fault Current Limiter

李 相 鎭* · 裵 俊 漢** · 吳 潤 相** · 高 太 國 ***
(Sang-Jin Lee · Joon-Han Bae · Yun-Sang Oh · Tae-Kuk Ko)

Abstract - We analyzed the characteristics of a power system with superconducting fault current limiter and showed the possibility of the application of a superconducting fault current limiter to a real power system through manufacturing of and experiment about 220Vrms/100Apeak class superconducting fault current limiter. We experimentally confirmed that the overvoltage of superconducting fault current limiter increased as the rate of current sharing to the limiting coil grew. The fault current could be limited within a few milliseconds when it was applied to a power system in series. Therefore, we could confirm that superconducting fault current limiter was effective in protection of a substation or power plant at short-circuit fault.

Key Words : superconducting fault current limiter, trigger coil, limiting coil, the increasing rate of resistance, current sharing

1. 서 론

70년대에 들어 전력수요가 급증하고, 계통의 용량이 커짐에 따라 사고시 사고전류를 제한할 필요성이 높아졌다. 이러한 필요에 따라 미국에서는 탄화규소(Silicon Carbide, SiC)로 된 비선형 저항기와 인 라인 스위치(In Line Switch)를 제작하여 145kV 송전선에서 단락사고시의 특성을 실험한 결과, 사고 발생 후 1.6ms 이내에 5.7kA로 예상되는 사고전류를 3.7kA로 제한하였다.[1] 그러나 이 사고전류제한기에는 수십 MJ 이상의 소비전력 에너지를 감당할 수 있는 저항기가 필요하며, 인 라인 스위치 개방을 위해 따로 콘덴서 뱅크를 설치하여야 한다. 또한 스위치의 개방이나 인터럽터의 동작은 모두 센서를 통해 감지된 계통의 상태에 따라 제어하였다.

이에 비해 전송전류가 임계전류를 넘어서면 저항이 나타나는 초전도체의 성질을 이용한 초전도 사고전류제한기는 초전도상태에서 상전도상태로의 전이시간이 짧아 전력기기의 보호에 매우 유리하다. 또한, 단순한 경제성만을 고려했을 때에도 550kV 이상의 계통에서는 초전도 사고전류제한기가 경제적인 것으로 알려져 있으나, 교류용 초전도선재의 개발에 따라 이 수치는 훨씬 낮아질 전망이다.[2]

초전도 사고전류제한기는 교류용 초전도선이 개발되기 훨씬 이전에는 직류송전선에서의 전류제한용으로 국한되어 왔다.[3] 그러나 1983년 프랑스에서 상용주파수에서 사용할 수 있는 교류용 초전도선재가 개발된 이래 초전도를 이용한 전력기기 중에서 실용화 가능성이 가장 큰 것으로 예측되고 있다. 선진국에서는 이미 초전도 사고전류제한기의 실용화에 대한 타당성 검토가 끝난 상태에 있지만 우리나라에서는 최근에서야 이에 대한 연구가 진행되고 있다.[4-6]

따라서, 본 논문에서는 초전도 사고전류제한기의 실용화 전단계로 220V/100A급 초전도 사고전류제한기를 제작하였고, 이에 대한 특성 실험을 통하여 초전도 사고전류제한기의 실계통 적용에 대한 가능성을 제시하였다.

2. 초전도 사고전류제한기의 제작

트리거코일로 사용되는 병렬 무유도 권선의 퀜치 후 특성이 초전도 사고전류제한기에 많은 영향을 미치기 때문에 본 논문에서는 트리거코일의 단독특성 실험을 통한 설계방법을 채택하였다.[7] 또한 본 논문의 설계 프로그램에서는 실험을 위한 시스템특성을 고려하였다. 표 1은 사고전류제한기의 제작에 사용된 초전도 선재의 제원이고, 표 2는 설계 프로그램을 통해 얻은 결과와 제작한 초전도 사고전류제한기의 제원이다.

리미팅코일은 초전도연선을 사용하여 3층으로 권선하였고, 트리거코일은 초전도 소선을 사용하여 무유도 형태의 병렬로 권선하였다. 즉, 트리거코일은 하나의 보빈에 홈을 내어 내측은 시계방향으로, 외측은 반시계방향으로 각각 단층으로 권선한 후 이를 한 쪽은 보빈에 설치된 전류단자에서, 다른 한 쪽은 저온용기 외부에서 서로 연결하여 병렬 무유도권선으로 제작하였다. 한 쪽을 저온용기의 외부에서 연결한 것은 각각에 흐르는 전류를 Hall-CT를 이용하여 측정하기 위함이다. 또한 표 2에서 설계결과와 제작결과를 비교해 보면 약간씩 차이가 나는 것을 알 수 있다. 먼저 리미팅코일의 권선수는 설계값이 175턴으로 3층 권선을 하는 것으로 되어 있는데 실제로는 168턴 씩 3층으로 권선하였다. 이는 리미팅코일에 사용되는 초전도연선의 절연피복이 폴리에스터(Polyester)로 되어있어 설계시 권선

*正 會 員 : 基礎電力工學共同研究所 專門委員 · 工博
**正 會 員 : 延世大 大學院 電氣工學科 博士課程
***正 會 員 : 延世大 工大 電氣工學科 敎授 · 工博
接受日字 : 1995年 5月 25日
1次 修正 : 1995年 9月 4日
2次 修正 : 1995年 10月 25日

표 1 초전도 사고전류제한기에 사용한 초전도 선재의 제원
Table 1 Specifications of the supercoducting wire

초전도 소선(strand)	
절연피막이 없을 때 직경	0.151 (mm)
절연피막을 포함한 직경	0.170 (mm)
filament diameter	0.4 (μm)
filament twist pitch	1.5 (mm)
insulation	Polyester varnish
matrix ratio (70Cu-30Ni : 90Cu-10Ni : Nb-46.5Ti)	0.4:1.7:1
DC critical current(4.2K)	36A at 1T
스텐레스 스틸 와이어 (SUS 304)	
절연피막이 없을 때 직경	0.15 (mm)
insulation	Esterimide vanish
초전도 연선 (cable)	
절연피막이 없을 때 직경	0.151 (mm)
절연피막을 포함한 직경	0.170 (mm)
초전도 소선의 수	6+1 (SUS)
cable twist pitch	7±3
DC critical current(4.2K)	216A at 1T

표 2 초전도 사고전류제한기의 제원
Table 2 Specifications of the supercoducting fault current limeter

		설계 결과	제작 결과
리미팅코일	저항	260Ω (상온)	265Ω (상온)
	인덕턴스	9.8mH	10.3mH
내측 트리거코일	저항	138Ω (상온)	143.7Ω(상온)
	인덕턴스	77μH	76μH
	권선피치	3.9mm	4.0mm
외측 트리거코일	저항	140Ω (상온)	143Ω (상온)
	인덕턴스	77.2μH	77.0μH
	권선피치	3.9mm	4.0mm
전체 인덕턴스		2.0μH	5.7μH
보빈 길이		120mm	120mm
리미팅코일 턴수		3×175turn	3×168turn

의 공극률을 10%로 고려하였음에도 불구하고 권선시 옆으로 눌리는 정도에 따라 권선수가 차이가 난 것으로 생각된다.

각 코일의 상전도 저항 값이 설계 값보다 늘어난 것은 예비장력으로 인하여 초전도선의 지름이 약간 씩 줄어든 결과이다. 초전도선의 경우 전류가 흘러 선이 움직이게 되면 퀜치전류가 감소하게 된다. 따라서 이를 방지하기 위하여 초전도선이 감당하여야 할 힘을 계산하여 권선시 미리 예비장력으로 가해야만 하는데, 본 실험에서는 예비장력을 리미팅코일의 경우 9kgf, 트리거코일의 경우 1kgf로 주었고, 이는 제작에 사용한 초전도선이 끊어지지 않고 견딜 수 있는 최대장력의 약 70%이다. 설계 프로그램에서는 이러한 예비장력에 대한 고려를 하지 않았기 때문에 실제 제작한 결과와 차이가 발생하였다. 권선이 끝난 후에는 에폭시 수지에 함침하여 초전도선의 움직임에 대한 보강을 하였다.

또한, 트리거코일의 권선피치는 설계 값이 안쪽과 바깥쪽이 각각 3.9mm와 4.0mm이었으나 보빈을 제작할 때 0.5mm 미만

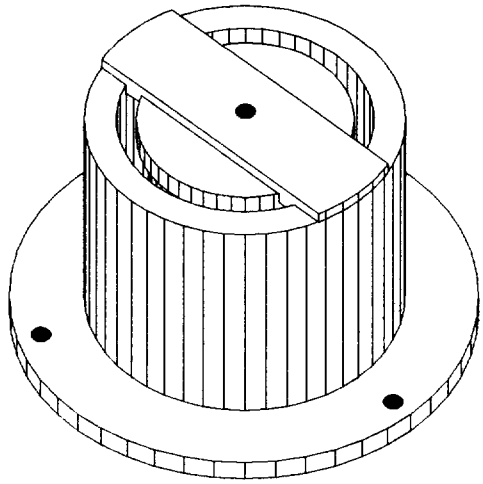

그림 1 리미터와 트리거의 조립도
Fig. 1 Construction of limiter and trigger

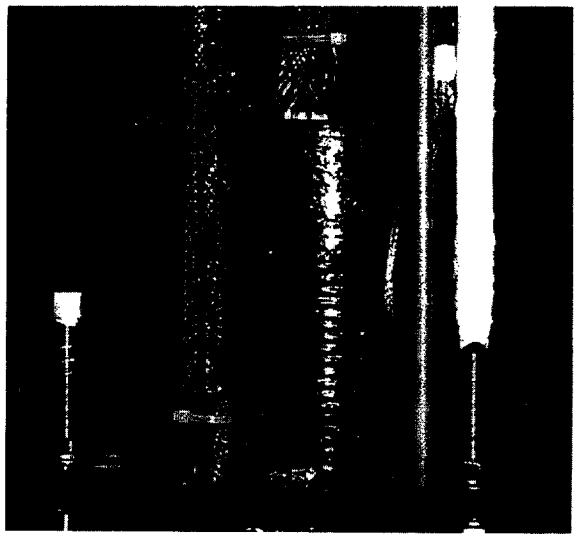

그림 2 전류도입선이 연결된 초전도 사고전류제한기
Fig. 2 Superconducting fault current limiter with current lead

의 피치는 홈 가공이 불가능하여 안쪽과 바깥쪽을 동일하게 4mm로 하였다.

그림 1은 리미팅코일을 안쪽에, 트리거코일을 바깥쪽에 두고 고정용 판을 이용하여 조립한 모습이며, 그림 2는 조립이 완료된 후 전류도입선을 연결한 초전도 사고전류제한기의 모습이다. 한편, 전류도입선에서의 열 손실을 최소화하기 위하여 초전도 선재를 전류도입선을 따라 길게 납땜하였다.

3. 동작특성 실험

초전도 사고전류제한기의 특성실험을 하기 위해 그림 3과 같이 시험회로를 구성하였다. 이 회로에서 전원으로 사용된 변압기는 본 실험의 성격상 단락사고 시 전압변동이 적도록 제작하였다. 변압기의 입력전압은 단상 220V이며 출력전압은 마그테틱 스위치를 이용하여 0V에서 440V까지 10V 단위로 증가시킬

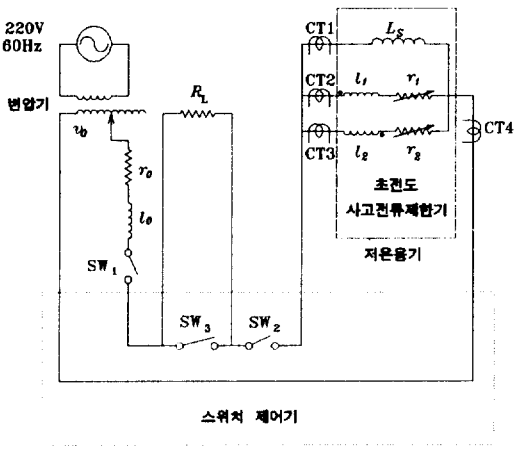

그림 3 초전도 사고전류제한기의 단락실험을 위한 회로

Fig. 3 Experimental circuit for fault simulation with switch control unit

수 있다. 내부저항은 0.1Ω, 내부 임피던스는 0.3mH로 측정되었다. 또한 원하는 시각에 단락사고를 일으키기 위하여 SCR로 이루어진 스위치 제어기를 만들었다. 그림 3에서 v_0는 입력전압, r_0와 l_0는 변압기의 내부 임피던스, l_1과 l_2는 각각 내외측 트리거코일의 인덕턴스이며, r_1과 r_2는 퀜치후 트리거코일에 나타나는 상전도저항을 표시한 것이다. 또한 L_S는 리미터의 인덕턴스이고 R_L은 부하저항을 의미한다. 스위치 제어기에서 SW_3은 원하는 사고각도에서 단락시킬 수 있으며, SW_2는 정상상태에서는 단락되어 있다가 사고전류제한기의 양단에 전압이 나타나면 이를 검지하여 입력된 시간 후에 개방되도록 설계하였다.

실험 순서는 SW_2는 on, SW_3는 off 상태에서, 변압기의 출력을 220V로 고정한 후 변압기의 돌입전류에 의한 초전도선의 퀜치를 방지하기 위해 SW_1을 이용하여 회로에 전원을 공급하였다. 이렇게 일정한 정상상태의 부하전류가 흐르고 있는 상태에서 스위치 SW_3을 이용하여 부하저항 R_L의 양단을 단락시켰다.

사고전류제한기의 양단전압과 변압기 출력전압, 그리고 각 권선에 흐르는 전류를 전압계와 후크미터를 이용하여 1단계로 측정하였으며, 전압은 디지털 오실로스코프를 이용하여, 전류는 Hall-CT를 이용하여 2단계로 측정하며, 마지막으로 이 값들을 14채널의 아날로그 데이터 레코더에 기록하였다.

4. 결과 및 고찰

다음의 그림 4, 5, 6은 전원전압 220V, 부하저항이 8Ω, 사고각 30°일 때의 단락실험 결과이다. 그림 4에는 변압기의 출력전압과 전류를, 그림 5에는 각 권선에 흐르는 전류를 표시하였고, 그림 6은 트리거코일의 양단전압과 퀜치후 나타나는 상전도저항이다.

그림 5에서 사고 전에는 트리거코일로만 약 38Apeak의 전류가 흐르다가 사고가 발생한 순간 약 95Apeak까지 전류가 증가하였다가 바로 57Apeak에서 안정되는 것을 볼 수 있으며, 사고 후 대부분의 전류는 리미팅코일로 흐르는 것을 알 수 있다. 이 값을 이용하여 계통전체의 임피던스를 계산해 보면 사고 전에는 8.25(= $\frac{\sqrt{2}\times 220}{38}$)Ω, 사고 후에는 약 5.5(= $\frac{\sqrt{2}\times 220}{57}$)Ω인 것으로 나타났다. 리미팅코일의 임피던스가 3.9Ω(Ls=10.3mH)인 것을 고려해 볼 때 사고 후 계통에는 새로운 임피던스가 발생하였으며, 이는 단락된 스위치에서의 전압강하로 해석된다. 즉, 사고를 시뮬레이션하기 위한 그림 3의 SW_3의 양단에 사고 전에는 부하저항으로 사용한 8Ω과 선로임피던스 0.25Ω의 합이 나타나 이상이 없었으나 사고 후에는 0Ω이어야 할 스위치 양단 저항 값이 선로 임피던스를 고려해 볼 때 약 1.35Ω으로 나타났다. 이러한 값은 스위치에 사용된 SCR의 단락저항으로 밝혀졌으며, 회로에 흐르는 전류에 따라 그 값이 상당히 크게 나타났다. 이러한 내용을 고려하여 사고전류제한기가 없을 때의 사고전류를 계산하면 약 1200Apeak 이상으로 약 1100Apeak의 전류가 제한된 것을 알 수 있었다.

또한, 트리거코일의 저항은 실험에서 측정된 트리거코일의 전류와 양단전압 파형을 실효치로 환산하여 구한 값으로 시간이 흐름에 따라 내측과 외측의 저항차가 커지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 트리거코일을 한 보빈에 권선하고 에폭시로 함침하였기 때문에 내측권선이 외측권선에 비해 액체헬륨으로의 열전달이 적게 이루어지는 것으로 판단된다.

한편, 초전도 사고전류제한기의 특성은 사고가 발생하는 위상각에 따라 많은 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 퀜치가 발생할 때 위상각에 따라 dI/dt값이 변하여 나타나는 결과로, 그림 7을 보면 이러한 현상이 잘 설명되어 있다. 즉, 사고각이 커질 수록 dI/dt값이 증가하여 초기 저항 값이 커지고, 그 결과 사고전류제한기의 양단전압도 증가하게 된다. 또한 이 경우 저항증가가 크기 때문에 트리거코일에서 리미팅코일로의 전류분류는 빠르게 진행되지만, 트리거코일에 흐르는 전류의 최고 값은 오히려 증가하는 것으로 나타났다.

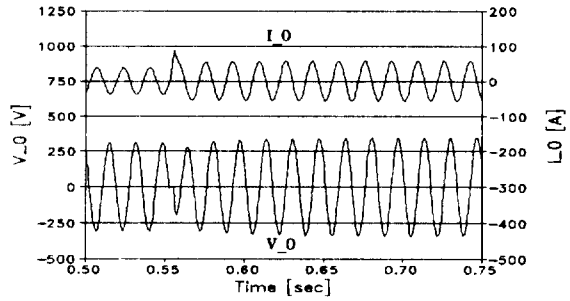

그림 4 단락시 전원전압(V_0)과 전체전류(i_0) 파형

Fig. 4 Waveform of source voltage and total current at fault

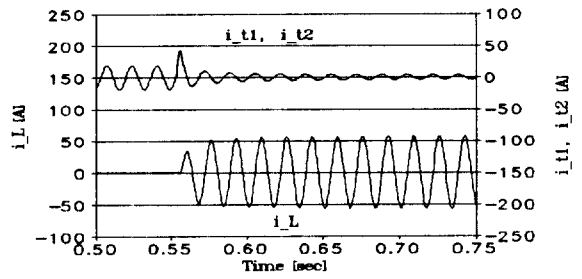

그림 5 단락시 트리거코일의 내측, 외측 전류(i_t2, i_t1)와 리미터전류(i_L)파형

Fig. 5 Waveform of trigger current and limiter current at fault

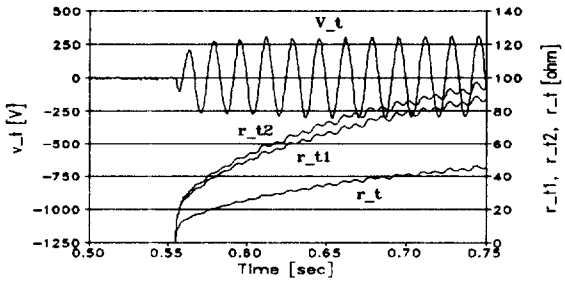

그림 6 단락시 양단전압(v_t)과 트리거코일의 내측, 외측, 전체저항(r_t2, r_t1, r_t)파형

Fig. 6 Waveform of terminal voltage and trigger resistance at fault

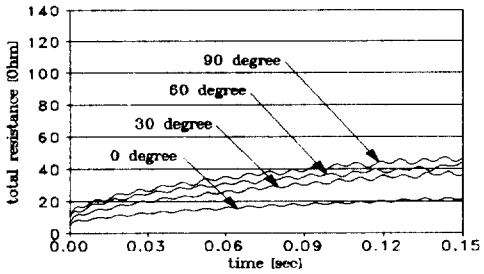

그림 7 사고각의 변화에 따른 트리거코일의 저항발생

Fig. 7 Resistance rise of trigger coil with respect to fault angle

이상의 실험 결과에서 알 수 있듯이 단락전류 즉, 사고전류는 트리거에서 발생되는 저항으로 인하여 사고 후 1 msec 이내에 리미팅코일로 분류되어 최종적으로 리미팅코일의 임피던스에 의하여 억제되는 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 초전도 사고전류제한기를 실계통에 적용하기 전 단계의 규모로 제작하였고, 특성실험을 통하여 실용화에 대한 가능성을 제시하였다. 즉, 초전도 사고전류제한기를 전원에 직렬로 설치할 경우 사고발생 후 1msec 이내에 사고전류를 억제할 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 사고전류는 리미터의 임피던스에 의하여 사고후 1msec 이내에 억제되었다

(2) 리미팅코일로의 전류분류가 빠를 수록 과전압이 크게 나타났다.

(3) 트리거코일을 무유도 형태로 권선하여 정상시 초전도 사고전류제한기에서의 전압강하는 거의 나타나지 않았다.

(4) 현재, 계통에서 운용되고 있는 차단기가 사고 발생 후 약 3주기가 지나서 동작한다는 점을 고려하면 단락사고시 변전소나 발전소를 보호하는데 초전도 사고전류제한기가 효과적이라는 점을 확인할 수 있었다.

본 연구는 1994년도 통상산업부의 에너지절약기술개발 사업비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] H. E. Gallagher, et. al., "145-kV Current Limiting Device-Field Tests", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. 99, No. 1, pp.69-77, 1980.2.

[2] K. E. Gray and D. E. Fowler, "A Superconducting Fault -Current Limter", Journal of Applied Physics, Vol. 49, No. 4, pp.2546-2550, 1978.4.

[3] A. Ulbricht, "Test results of a resistive sc-power switch of 40MW switching power at a voltage of 47kV", IEEE Trans. on magn., Vol. 15, No. 1, pp.172-174, 1979.

[4] T. Verhaege et al., "25kV Superconducting Fault Current Limiter", Proc. of the 11th Magnet Technology Conference, Tsukuba, pp.413-418, 1989.8.

[5] E. Thuries et al., "Towards the Superconducting Fault Current Limiter" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, pp.801-808, 1991.8.

[6] 최경달, 이상진, 김동수, 이지광, 김동훈, 차귀수, 한송엽, "유도형 초전도사고전류제한기의 동작특성", 전기학회 논문지 제44권 1호, pp.34-39, 1995.1.

[7] 배준한, 이상진, 오윤상, 고태국 "유도형 초전도 사고전류제한기의 설계", 대한전기학회 95년도 하계학술대회 논문집A, PP. 119~121, 1995. 7.

저 자 소 개

이 상 진 (李 相 鎭)

1962년 3월 3일생. 1988년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 기초전력공학공동연구소 전문위원

배 준 한 (裵 俊 漢)

1966년 4월 30일생. 1992년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 연세대 대학원 전기공학과 박사과정

오 윤 상 (吳 潤 相)

1964년 9월 20일생. 1988년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 연세대 대학원 전기공학과 박사과정

고 태 국 (高 太 國)

1955년 7월 4일생. 1981년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 미국 Case Western Reserve Univ. 졸업(석사). 1986년 동 대학원 졸업(공박). 1986년~1988년 미국 Cleveland State Univ. 조교수. 현재 연세대 공대 전기공학과 부교수