

BSCCO 초전도 한류기의 동시퀀치 및 내력 시험

심정욱*, 박권배*, 이방욱*, 오일성*, 임성우**, 김혜림**, 현옥배**
 *LS산전 전력연구소, **한전 전력연구원

Equal Quench and Endurance Test of the BSCCO Superconducting Fault Current Limiter

Jungwook Sim*, Kwon -Bae Park*, Bang -Wook Lee*, Il -Sung Oh*, Sung -Woo Yim**, Hae -Rim Kim**, Ok -Bae Hyun**
 *Electrotechnology R&D Center LS Industrial Systems, **Korea Electric Power Research Institute

Abstract - We fabricated and tested a resistive type superconducting fault current limiter (SFCL) based on BSCCO-2212 bulk coils. Each bulk coils of the SFCL was designed to have the rated voltage of 220 V_{rms} and the critical current(I_c) of 320~340 A at 77K. Ten components in series, make the SFCL having the rated voltage of 2.2 kV_{rms} for equal quench test. The fault test was conducted at an input voltage of 2.2 kV_{rms} and fault current of 25 kA_{rms}. In addition, we examined the endurance characteristics for all bulk coils through repeat fault test. Test results shows that the SFCL successfully limited the fault current of 25kA_{rms} to below 7~8kA_p within minimum 1.1msec after fault occurred. All bulk coils quenched together upon faults and shared the rated voltage evenly. The endurance test results show an equivalent among repeat fault test. During the quench process, average temperature of all bulk coils did not exceed 250 K, and the SFCL was totally safe during the whole operation.

〈표 1〉 MCP BSCCO-2212 bulk coil 사양

길이	320 mm	외경	58 mm
통전길이	4,500 mm	턴수	24 턴
초전도체 단면적	9×3.7 mm ²	백동단면적	9×2 mm ²

폭의 비가 크지만 새로이 제작된 초전도 bulk coil은 소자의 지름이 50mm로 기존의 것보다 크고 턴 수도 많지만 두께와 폭의 비가 거의 비슷한 수준으로 임계전류의 크기는 크게 차이가 없다.

지금까지 사용했던 기존 소자는 퀀치 발생시 초전도체 외각에 감긴 shunt coil쪽으로 전류가 분류되고, 이때 발생하는 자장으로 초전도체의 퀀치 특성을 향상시키는 방법을 사용했지만, 새로 제작된 소자는 사고전류 유입시 초전도 한류소자와 전 영역에 걸쳐 전기적으로 접합된 백동 코일로 사고전류를 우회시킴으로 국부적인 퀀치를 방지함과 동시에 기존 소자에 비해 우수한 기계적 강도를 가지고 있다. 표 1은 실험에 사용된 초전도 한류소자의 사양이다. 단자를 포함한 총길이는 32 cm이고 직경은 5.8 cm이며 coil형태로 가공된 전체 전류통전길이는 450cm이다.

1. 서 론

현재 개발이 진행되는 초전도 한류기로는 Nexans Superconductor Gumb의 BSCCO bulk를 이용한 110kV급 초전도 한류기가 있고 미국의 SuperPower와 AMSC-Siemens에서도 2G전체를 이용한 초전도 한류기를 개발하고 있다[1]. 이러한 초전도 한류기의 방식은 저항형 초전도 한류기로서 사고전류가 유입될 경우 이때 한류과정에서 발생하는 대부분의 에너지를 초전도 한류소자가 감당하게 되는 방식이다. 즉 초전도 한류기는 정상시에는 초전도 상태로 계통에 없는 듯 존재하고 있다가 사고가 발생하면 사고전류에 의해 퀀치되어 임피던스가 발생하게 된다. 이때 발생된 임피던스의 크기에 따라 사고전류가 한류되고 초전도 한류기 양단에 전압이 인가됨으로 다량의 에너지가 발생하게 된다. 따라서 초전도 한류기가 적용되는 계통의 전압등급에 따라서 초전도 한류소자의 사용량이 결정되며 전압용량이 증가할수록 초전도체의 사용량이 증가하게 된다. 이에 따라 전압 등급이 높은 만큼 유입되는 에너지량도 증가되기 때문에 사고발생에 따른 에너지를 동시 퀀치를 통해 초전도체의 전영역에 골고루 분산시켜야 한다[2]. 이러한 부분들은 고전압 용량의 저항형 초전도 한류기개발의 가장 큰 단점으로 볼 수 있다.

본 논문에서는 21세기 프론티어 배전급 초전도 한류기 개발과제에서 진행된 BSCCO-2212 bulk coil의 직렬 결선에 따른 동시퀀치 및 내력 시험의 결과이다. 총 10개의 BSCCO-2212 bulk coil소자를 직렬 결선함으로써 한전 배전계통의 최대 사고전류 인 25kA_{rms} 사고에 대한 동시퀀치 여부와 반복 시험을 통해 초전도 한류기의 안정성을 평가하였다.

2. 본 론

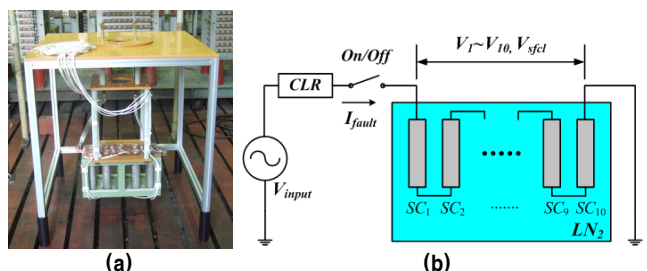
2.1 BSCCO-2212 초전도 한류소자

그림 1은 실험에 사용된 MCP BSCCO-2212 bulk coil 이다. 실험에 사용된 초전도 한류소자는 Nexans SuperConductivity Gumb에서 제작되었다. 그림 1의 초전도 한류소자는 본 연구과제에서 기존에 사용하였던 초전도 한류소자의 기계적 강도의 취약점을 보완한 소자이다[3]. 기존의 BSCCO-2212 bulk coil은 bulk의 지름과 턴수가 작고 두께와

2.1 동시퀀치 및 내력시험

실험에 사용되는 소자의 전압용량은 각각 220V로서 전압용량에 따라서 직렬로 결선해서 사용해야 한다. 이때 전압용량의 향상에 따라 각 초전도 한류소자에는 퀀치시 동일한 전압이 인가되어야 한다.

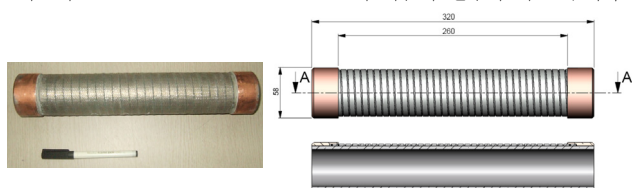
표 2는 시험에 사용한 초전도 한류소자의 임계전류(I_c)이다. 각 소자의 임계전류는 77K을 기준으로 320~340A에 걸쳐 분포하고 있다. 그림 2는 단락시험을 위한 시험회로이다. 각 소자는 직렬로 결선되었고 입력 전압 V_{input} = 2,200V_{rms}, 사고전류 I_{fault}=25 kA_{rms}, 5 주기 사고 조건에서 대칭 및 비대칭 시험을 통해 모든 소자의 동시퀀치 여부를 확인하였고, 이후 동일한 입력전압, 사고전류에 대하여 비대칭 조건에서 총 20회의 단락사고를 발생시키는 소자내력시험을 통해 초전도 한류소자들의 동시퀀치의 재연성과 소자의 이상 유무를 확인하였다. 각각의 결과를 확인하기 위해 전류 I_{fault}와 각 소자의 전압 V₁~V₁₀를 측정하였다. 표 3은 시험조건 및 소자의 임피던스이다.



〈그림 2〉 a.동시퀀치 시험 및 내력시험을 위한 초전도 한류소자 b.단락 시험회로도

〈표 2〉 각 소자의 임계전류 (I_c, @77K)

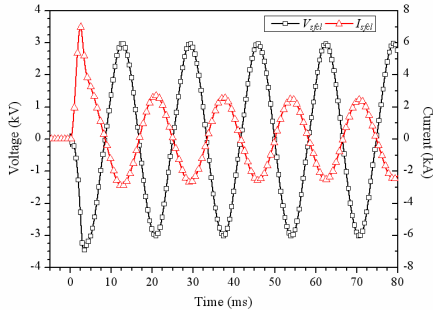
	Comp. No	I _c		Comp. No.	I _c
S1	021	335 A	S6	015	325 A
S2	009	340 A	S7	007	320 A
S3	003	330 A	S8	016	335 A
S4	006	320 A	S9	024	330 A
S5	025	340 A	S10	004	330 A



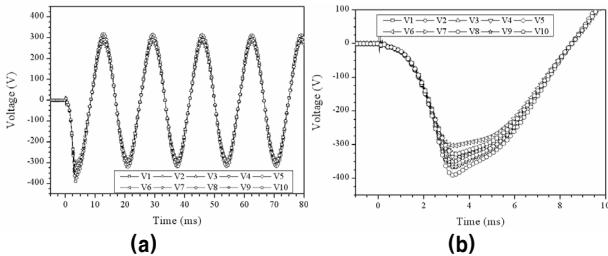
〈그림 1〉 BSCCO-2212 bulk coil

〈표 3〉 동시켄치 및 내력시험을 위한 조건

시험조건	
V_{input}	2,200V _{rms}
I_{fault}	25kA _{rms}
사고주기	5 주기
사고 반복 횟수	20 회
R_{sfcl} (@Room Temp.)	1.33 Ω
L_{sfcl}	53 μH



〈그림 3〉 2,200V_{rms}, 25kA_{rms}, 비대칭 사고에서의 V_{sfcl}과 I_{sfcl} (4번째 시험)

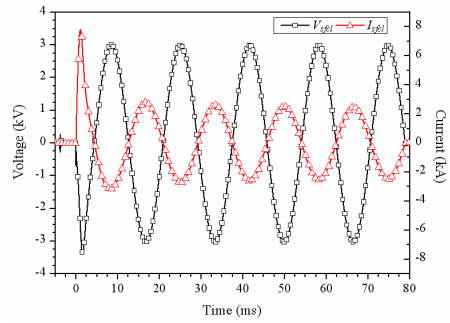


〈그림 4〉 (a) 각 소자 전압 V1~V10 (b) 첫 반주기를 확대한 그림

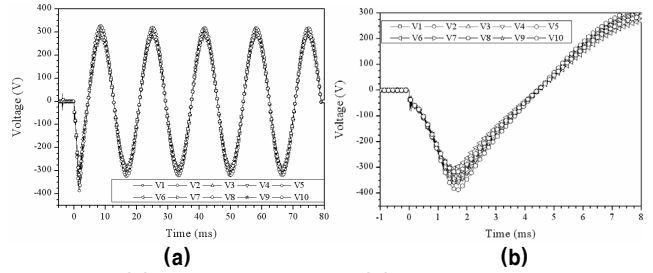
그림 3은 2,200V_{rms}, 25kA_{rms} 비대칭, 5주기 시험의 4번째 시험 결과이다. 비대칭 시험이므로 초기 상승 전류의 최대값은 사고전류의 rms값의 약 2.6 배이다. 따라서 초기 피크전류는 66.2 kA_p이다. 이때의 초전도 한류소자의 양단전압은 약 2,120 V_{rms}가 인가되었고 사고전류는 초기 7 kA_p까지 상승한 후 1.7 kA_{rms} 수준으로 안정된 수준으로 한류됨을 알 수 있다. 이때 10개의 직렬 결선된 소자들의 전압은 그림 4에 나타났다. 그림을 보면 V1~V10까지의 각 소자에 발생된 전압은 초기 3.2 msec만에 300~380 V_p까지 상승한 후 280~320 V_p 수준으로 분포가 되어 소기간에 비교적 균일한 전압분배가 이루어졌음을 알 수 있다. 이것은 25 kA 비대칭 사고조건에서 모든 소자가 동일하게 켄치가 되었음을 나타낸다. BSCCO의 경우는 YBCO의 경우보다 n-value가 낮고 소자의 부피가 매우 크기 때문에 켄치에 따른 상전이 속도가 느리다. 따라서 상전이 속도가 빠른 YBCO의 경우처럼 소자를 직렬 결선할 경우 임계전류 차이에 따른 국부적인 켄치에 의한 손상으로부터 비교적 안전하다고 할 수 있다.

그림 5는 그림 3과 동일한 전압, 전류 및 사고주기 조건에 대하여 대칭사고의 경우에 대한 시험결과이다. 시험회수는 6번째가 된다. 앞에서 언급한 비대칭 사고의 경우는 사고발생시 계통에 직류성분이 추가되는 상황으로 초기 피크전류값이 높지만 사고전류 상승속도는 느리다. 하지만 대칭사고의 경우는 직류성분이 없으므로 초기 상승전류의 크기는 비대칭의 경우보다 낮지만 사고전류 상승속도는 빠르다. 따라서 사고전류 유입에 따른 초전도체의 상전이를 바탕으로 하는 한류기의 입장에서 사고전류의 유입속도가 한류소자의 상전이 속도와 직결되므로 이에 따른 동시켄치의 여부도 상당히 중요한 부분이다. 그림 5의 시험결과를 보면 사고전류는 사고발생 직후 1.1 msec만에 7.7 kA_p까지 상승한 후 한류하였고 이후 1.7 kA_{rms} 수준으로 한류가 되었다. 따라서 동일한 전압, 사고 전류조건인 비대칭사고의 경우와 비교해볼 때 초기 피크전류는 0.7 kA 정도 높고 이후의 한류전류는 동일한 크기로 한류 됨으로서 초기치를 제외한 나머지 값은 동일한 결과를 나타내었다. 또한 그림 6의 각 소자의 전압을 보면 비대칭의 경우와 마찬가지로 10개의 모든 소자에서의 동시에 동일한 크기의 전압이 발생됨으로 동시켄치가 원활하게 발생함을 알 수 있다.

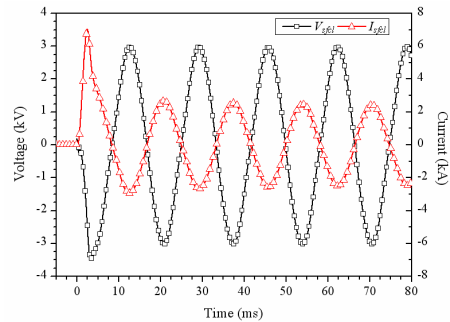
그림 7은 내력시험의 최종 시험으로서 동일한 사고 전압, 전류조건에 대하여 20번째 사고에 따른 시험 결과이다. 그림 3의 4번째 사고 상황의 시험결과와 비교해보면 전체전류 V_{sfcl}과 한류된 전류 I_{sfcl}의 크기가 서로 동일한 크기임을 알 수 있다. 따라서 배전계통의 최대 사고전류의 조건 (25 kA_{rms})에서 다수의 사고가 발생하더라도 초전도 한류소자의 내구력



〈그림 5〉 2,200V_{rms}, 25kA_{rms}, 대칭 사고에서의 V_{sfcl}과 I_{sfcl} (6번째 시험)



〈그림 6〉 (a) 각 소자 전압 V1~V10 (b) 첫 반주기를 확대한 그림



〈그림 7〉 2,200V_{rms}, 25kA_{rms}, 비대칭 사고에서의 V_{sfcl}과 I_{sfcl} (20번째 시험)

이 배전급 사고 상황에 대해 충분히 견딜 수 있음을 알 수 있고 기존소에서 극복하기 어려웠던 소자의 불안정성을 충분히 해소하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 배전급 초전도 한류기 개발에 필요한 MCP BSCCO-2212 bulk coil의 동시켄치 시험 및 내력시험을 수행하였다. 10개의 직렬 결선된 초전도 한류소자에 대하여 입력전압 2200V, 사고전류 25kArms, 사고주기 5주기 사고에 대한 단락 모의 시험을 통해 동시켄치를 확인하였고 20여회의 시험을 통해 초전도 한류소자의 내력시험을 수행하였다. 시험결과 10개의 모든 소자가 안정적으로 동시 켄치를 하였고 비대칭 및 대칭사고 상황에서도 안정적으로 동시켄치 하였다. 또한 20 회의 내력시험에서도 초기의 시험파형과 20 번째의 시험파형이 일치함으로 소자의 건전성을 확인하였다.

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

〔참 고 문 헌〕

[1] 2007 Wire Development and Applications Workshop, U.S. Department of Energy, Superconductivity Program for Electric Systems, <http://www.energetics.com/wire07/agenda.html>
 [2] J. Sim, H. -R. Kim, O.-B.Hyun, "Simultaneous Quench Analysis of a Three-Phase 6.6 kV Resistive SFCL Based on YBCO Thin Films," Progress in Superconductivity, Vol.6 No.1, pp46-51, 2004
 [3] 심정욱 외 8명, "배전급 초전도 한류기 개발을 위한 Bi-2212 초전도 한류소자의 사고전류 제한 특성," 대한전기학회논문지, 56권, 2호, P277-281, 2007