

2차권선의 병렬연결에 따른 하이브리드형 초전도 한류기의 특성

황중선, 조용선, 최효상
남도대학, 조선대학교

Characteristics of Hybrid-Type SFCL according to the Parallel Connection of Secondary Windings

Jong-Sun Hwang, Yong-Sun Cho, Hyo-Sang Choi
Namdo College, Chosun University

Abstract - We have analyzed operating characteristics of hybrid-type superconducting fault current limiter (SFCL) according to the parallel connection of secondary windings with $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) films. The turn ratio between the primary and secondary windings of each reactor was 63:21. Hybrid-type SFCL using a transformer with parallel reactors could reduce the unbalanced quench caused by differences of the critical current density between YBCO films. We found that hybrid-type SFCL having parallel connection induced simultaneous quench between the superconducting elements. The quench-starting point at this time was almost same. When the applied voltage was 200V, the limiting current in the hybrid-type SFCL with a serial connection was lowered to 34 percent than that in the SFCL with a parallel connection. In the meantime, when the voltage generated in the superconducting elements was the same, the current value in the parallel connection was 60 percent less than in the serial connection. The voltage generated in the primary winding also showed the similar behavior. In conclusion, we found that the fault current was limited more effectively in the SFCL with the serial connection but the power burden of the superconducting elements was reduced in the parallel connection.

1. 서 론

초전도 기술을 이용한 전력용기기 중 가장 실용화 가능성이 높은 초전도 한류기는 전 세계적으로 가장 활발히 연구가 진행중인 초전도 전력용기기이다. 실용화를 위해서는 현 전력 시스템에 맞는 용량으로 초전도 한류기의 용량을 올리는 것이 중요하다. 이에 맞춰 상시 허용 용량 및 차단 용량이 높은 초전도 한류소자의 개발이 활발히 진행 중이다. 이러한 한류소자의 개발이 이루어진다면 하여도 초전도 한류기의 용량 증대를 위해 한류소자의 직, 병렬연결은 불가피하다.

본 연구진은 초전도 소자의 직, 병렬 연결시 우수한 켄치특성을 보이는 하이브리드형 초전도 한류기의 용량 증대 방안에 대해서 연구하였다. 하나의 철심을 통해 1, 2차측 리액터가 유도적으로 연결되는 하이브리드형 초전도 한류기는 임계전류밀도의 차이가 큰 초전도 한류소자

의 직렬 연결시 철심을 통한 상호 유도 작용으로 인해 초전도 소자가 동시적으로 켄치가 발생하도록 한다.

본 논문에서는 전류 등급을 올리기 위한 초전도소자의 병렬연결을 통해 하이브리드형 초전도 한류기의 용량을 증대시키고, 한류소자의 켄치특성 및 전류제한특성에 대해 분석하였다. 또한 소자 3개의 병렬연결 실험을 통해 하이브리드형 한류기의 실험데이터와 비교, 분석하였다.

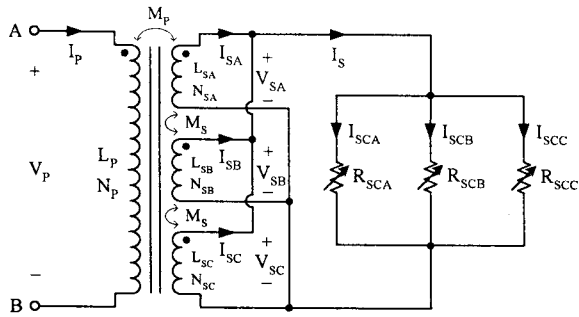
2. 본 론

2.1 동작원리

하이브리드형 한류기는 변압기의 구조에서 2차 리액터에 초전도 소자를 직렬로 연결한 구조를 가지고 있다. 하이브리드형 초전도 한류기의 병렬연결은 2차리액터를 병렬로 연결하고 소자를 병렬 연결하는 방법이다. 그림 1은 이에 대한 등가회로도를 나타낸 것이다.

하이브리드형 한류기는 사고전 2차측에 연결되어 있는 초전도 소자의 저항이 0이기 때문에 변압기로 인한 손실을 무시한다면 선로에 아무런 영향을 미치지 않는다. 그러나 사고후에는 급격한 선로전류의 증가로 인해 변압기의 변압비에 의해 변환된 사고전류가 2차측에 연결된 소자를 켄치시켜 소자에서 발생한 저항에 의해 전류는 제한된다.

그림에서 $I_p, I_{SA}, I_{SB}, I_{SC}, V_p, V_{SA}, V_{SB}, V_{SC}$ 는 각각 1차측과 2차측 리액터들에 흐르는 전류와 전압이며, $I_{SCA}, I_{SCB}, I_{SCC}$ 는 각각 초전도 소자에 흐르는 전류이다. $L_p, L_{SA}, L_{SB}, L_{SC}$ 는 각각 1, 2차측 리액터의 인덕턴스 값이다. M_p 는 1차측과 2차측간의 상호 인덕턴스를, M_s 는 2차측간 상호인덕턴스를 나타낸 것이다. $R_{SCA}, R_{SCB}, R_{SCC}$ 는 병렬로 연결된 각 초전도 소자를 나타낸다.



〈그림 1〉 2차권선의 병렬연결에 따른 하이브리드형 초전도 한류기의 등가회로도

1차측 코일과 2차측 코일의 상호 결합계수(k)가 1이고 각 초전도 소자에서 발생하는 저항은 Rsc로 동일하며, 각 2차측 리액터의 인덕턴스(LSA, LSB, LSC)는 LS로 같다고 가정하였을 때, 한류기에서 제한된 사고전류 Is와 제한 임피던스 Zlim, 초기에 제한된 사고전류 Ilim는 다음과 같다.

여기서, ZSB는 2차측 리액터에서 소자측으로 바라본 합성임피던스이고, 2차측 회로에 흐르는 전류 Is는 각 2차측 리액터에 흐르는 전류의 합과 같고, 각 소자에 흐르는 전류의 합과 같다.

초전도 소자에 흐르는 전류(ISC A, ISC B, ISC C)가 임계전

$$I_p = \frac{j\omega(L_s + 2M_s) + Z_{SB}}{-3j\omega M_p} \cdot I_s \quad (Z_{SB} = \frac{L_s \cdot R_{sc}}{2R_{sc} + 3j\omega L_s}) \quad (1)$$

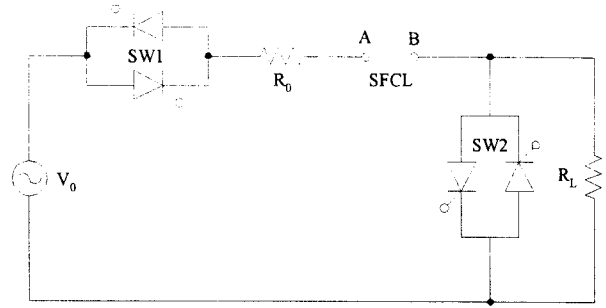
$$Z_{lim} = \frac{V_o}{I_p} = \frac{j\omega L_p(2j\omega M_s - 2j\omega L_s + Z_{SB})}{j\omega L_s + 2j\omega M_s + Z_{SB}} \quad (2)$$

$$I_{lim} = \frac{L_s + 2M_s}{-3M_p} \cdot I_c \quad (3)$$

류밀도(IC)에 도달하였을 때 초기 제한되는 전류(Ilim)는 식 1에 Rsc=0, Is=3·Ic, Ip=Ilim를 대입함으로써 식 (3)과 같이 구할 수 있다. 이 식을 통해서 초기 제한되는 전류는 1, 2차 인덕턴스(LP, LS)의 값을 조정함으로써 제어할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 이것으로 하이브리드형 한류기는 사고전류를 유연하게 제어할 수 있음을 알 수 있다.

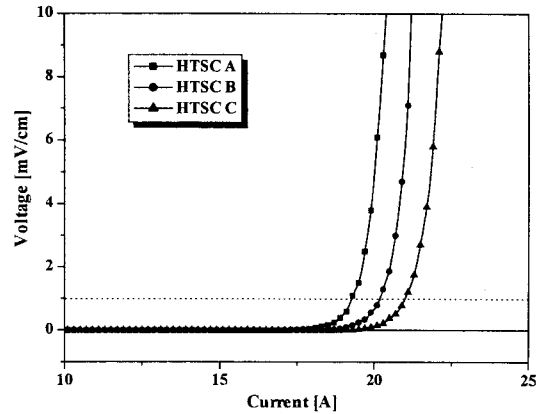
2.2 실험 방법

그림 2는 하이브리드형 초전도 한류기의 실험을 위해 구성한 실험회로도이다. 회로도에서 V0는 회로의 전원전압이고, R0와 RL은 선로의 전류를 측정하기 위한 저항과 부하저항을 나타낸 것으로 각각 1Ω과 50Ω으로 설정하였다. SW1과 SW2는 선로에 전원전압을 인가하기 위한 스위치와 선로의 단락사고를 발생시키기 위한 스위치로서 0도 사고를 발생시켰다. 초전도 소자는 지름 2inch의 YBa2Cu3O7 박막을 사용하였으며, 초전도 특성상 저온 용기에 담겨서 시험하였다.



〈그림 2〉 하이브리드형한류기의 실험회로도

그림 3은 실험에 사용된 3개의 초전도 소자에 대한 임계전류밀도(Jc)의 특성을 보여준다. 초전도 소자에 대한 자세한 설계 사양은 참고문헌[4]을 참조한다. 표 1은 하이브리드형 한류기에 사용된 변압기의 철심 및 리액터의 조건에 대해 나타낸 것이다.



〈그림 3〉 하이브리드형 한류기에 사용된 초전도 소자의 임계전류밀도 곡선

〈표 1〉 하이브리드형 한류기에 사용된 철심 및 리액터의 사양

Iron Core		Size	Unit
Outer Horizontal Length (Ioy)		340	mm
Outer Vertical Length (Iox)		340	mm
Inner Horizontal Length (Iiy)		210	mm
Inner Vertical Length (Iix)		210	mm
Thickness		155	mm
Coil Inductance		Value	Unit
Primary Winding	(LP)	126	Turns
	(LSA)	21, 42	Turns
	(LSB)	21, 42	Turns
Secondary Winding	(LSC)	21, 42	Turns

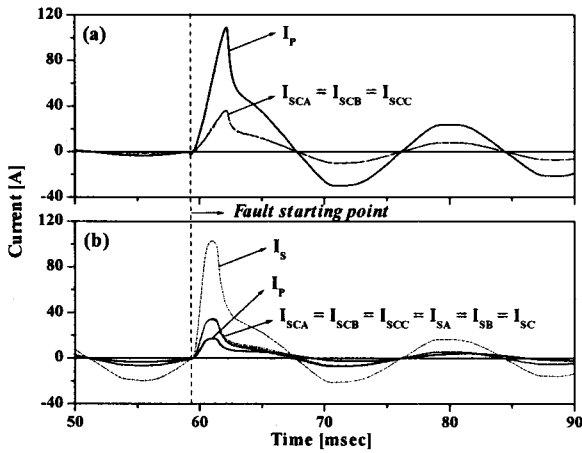
2.3 실험 결과

그림 4과 5는 초전도 소자 3개를 병렬 연결한 저항형 한류기와 2차 리액터를 병렬 연결한 하이브리드형 한류기에 대한 전류 및 전압 비교 그래프이다. 하이브리드형 한류기의 1차측 리액터의 턴수는 126턴이고, 2차측 3개의 리액터 턴수는 각각 21턴이다. 제한된 사고전류(IP)의

크기를 비교하면, 저항형 한류기는 109A이고, 병렬연결한 경우는 17.3A로 제한이 되었다. 하이브리드형 한류기는 사고시 2차측 리액터에 병렬로 연결된 초전도 소자가 2차측에 유도된 사고전류에 의해 켜치되어 2차 전류(I_s)를 제한하게 된다. 이때 1차측 전류(I_p)는 제한된 2차측 전류로부터 턴수비(N_s/N_p)에 비례하여 1차측 리액터에 유도되어 흐르게 된다. 병렬 연결한 하이브리드형 한류기의 경우 2차 리액터에 흐르는 전류가 102.8A로서 턴수비 $N_p:N_s=126:21$ 에 의해 1/6만큼 사고전류가 제한된다는 것을 확인할 수 있다.

그림 4를 통해서 각각의 초전도 소자에 흐르는 전류(I_{SCA} , I_{SCB} , I_{SCC})는 병렬연결이므로 2차측 리액터에 의해 흐르는 전류가 1/3로 분배된다는 것을 알 수 있다. 그러므로 2차 리액터의 병렬 연결된 하이브리드형 한류기의 초전도 소자에 흐르는 전류는 34.5A로서 비슷하다.

초전도 소자에 걸리는 전압을 그림 5를 통해서 비교해보면, 3개의 2차 리액터가 병렬로 연결된 경우 리액터 1개에 걸리는 전압이 각각의 초전도 소자에 걸리게 된다.



〈그림 4〉 초전도 소자 3개가 병렬연결된 저항형 한류기와 리액터 직병렬 연결된 하이브리드형 한류기의 전류 비교곡선 ($N_1:N_2=126:63$, 200V)
(a) 저항형 한류기 (b) 하이브리드형 한류기

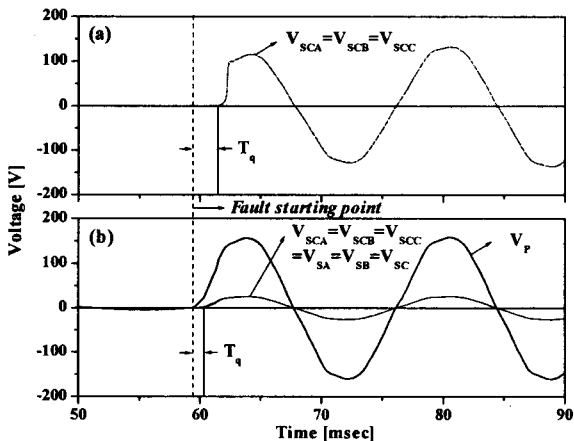
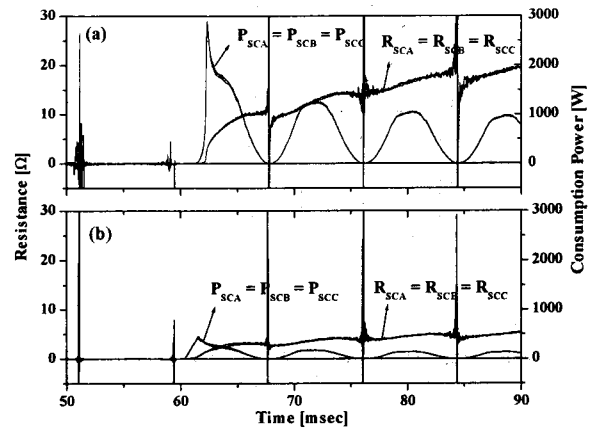


그림 5. 초전도 소자 3개가 병렬연결된 저항형 한류기와 리액터 직병렬 연결된 하이브리드형 한류기의 전압 비교곡선($N_1:N_2=126:63$, 200V)
(a) 저항형 한류기 (b) 하이브리드형 한류기



〈그림 6〉 초전도 소자 3개가 병렬연결된 저항형 한류기와 리액터 직병렬 연결된 하이브리드형 한류기의 저항, 소비전력 비교곡선 ($N_1:N_2=126:63$, 200V)
(a) 저항형 한류기 (b) 하이브리드형 한류기

병렬연결한 한류기의 초전도 소자에 걸리는 전압은 25.4V로서 저항형 한류기의 초전도 소자에 걸리는 전압인 116V에 비해 대략 1/6정도 적다는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 초전도 소자에서 발생하는 전압은 소자의 켜치시 발생하는 저항의 크기를 결정하는 직접적인 요인으로 작용하게 된다. 그림 6는 각각의 한류기에 연결된 초전도 소자에서 발생하는 저항과 소비되는 전력을 나타낸 그래프이다. 저항형 한류기의 경우 초전도 소자에서 발생하는 전압이 116V정도로서 2주기 이후 소자에서 발생하는 저항은 20Ω 정도였다. 2차 리액터 병렬연결한 하이브리드형 한류기의 경우 소자에서 발생하는 저항은 50Ω 정도였다. 이것으로 초전도 소자에 큰 전압이 걸림에 따라 각각의 초전도 소자에서 발생하는 저항이 커진다는 것을 확인할 수 있다.

초전도 소자에 걸리는 전압과 전류에 의해 사고 후 반주기동안 소자에서 소비되는 전력을 그림 6를 통해 비교하면, 저항형 한류기의 경우 2885W이고, 병렬 연결한 경우 460W이었다. 이것으로 2차 리액터의 병렬 연결한 경우 초전도 소자의 병렬연결로 인해 소자에 흐르는 전류가 적어지고, 2차 리액터의 병렬연결로 인해 2차측에 걸리는 전압이 작아져서 초전도 소자에서 소비되는 소비전력이 적어진다는 것을 확인할 수 있다.

그림 5에서 사고 후 초전도 소자에서 켜치로 인해 전압이 발생할 때까지 걸리는 시간(T_q)를 비교하면, 저항형 한류기의 경우 1.7msec가 걸리며, 병렬 연결한 한류기의 경우 0.7msec가 걸렸다. 초전도 소자에서 발생하는 전압의 시간이 짧아질수록 사고전류를 제한하는 시간이 짧아져 더욱 신속한 사고전류 제한이 이루어진다. 이것으로 2차 리액터의 병렬 연결한 하이브리드형 한류기가 더욱 신속한 사고전류를 제한한다는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

우리는 3개의 2차측 리액터가 병렬로 연결되고 3개의 초전도 소자가 병렬로 연결된 하이브리드형 한류기의 특성을 저항형 한류기와 비교하여 분석하였다. 1, 2차측 리액터의 턴수비는 병렬 연결한 하이브리드형 한류기의 경우 $N_p:N_s=126:21$ 이다. 2차 리액터가 병렬로 연결된 한류기의 경우 저항형 한류기보다 약 80%정도 더 제한이 된다는 것을 확인하였다. 이것은 2차측 리액터에 흐르는 제한된 전류를 상쇄시키기 위한 전류가 1, 2차측 리액터의 턴수비(N_s/N_p)에 비례하여 1차측 리액터에 흐르기 때문이다. 2차 리액터의 병렬연결이라는 구조적인 특성 때문에 2차 리액터에 흐르는 전류와 전압이 더 적게 흐른다. 이로부터 계산된 초전도 소자의 저항과 소비되는 전력을 비교해 보면 저항형 한류기보다 더 적게 된다는 것을 확인하였다. 사고후 초전도 소자의 켄치 시간을 비교하면, 병렬 연결한 한류기의 켄치 시간이 더 빠르다는 것을 확인하였다. 이로서 2차 리액터의 병렬 연결된 하이브리드형 한류기가 사고전류제한 및 소자의 부담, 켄치시간 특성이 더 우수하다는 것을 이번 실험을 통해서 분석할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [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] R. Wordenweber, J. Schneider, A. I. Zaitsev, R. Kutzner, T. Konigs, and P. Lahl, "Current limiting properties of superconducting $YBa_2Cu_3O_7$ films on various substrates," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 7, pp. 1021-1024, 1997.
- [3] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Krämer, P. Kummeth, H. W. Neumüller and S. Fischer, "Resistive current limiters with YBCO films," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 7, pp. 828-831, June 1997.
- [4] H.-S. Choi, O.-B. Hyun, H.-R. Kim, and K.-B. Park, "Switching properties of hybrid type superconducting fault current limiter using YBCO stripes," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 12, pp. 1833-1838, Sep. 2002.
- [5] H.-S. Choi, Y.-S. Cho, and S.-H. Lim, "Operational characteristics of hybrid-type SFCL by the number of secondary windings with YBCO films," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 16, pp. 719-722, June 2006.