Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2014) 28(8) : 62~68
http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2014.28.8.062 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)

논문 28-8-9

3차권선이 추가된 직렬연결형 초전도한류기의 전류제한 및 회복 특성 향상

(Improvement of Current Limiting and Recovery Characteristics in Series Connection Type SFCL with Added Third Winding)

고석철* · 한태희 · 임성훈**
(Seok-Cheol Ko · Tae-Hee Han · Sung-Hun Lim)

Abstract

The series connection type superconducting fault current limiter (SFCL) with added third winding, which was magnetically coupled in one iron core, was proposed. The proposed SFCL was expected to be more improved by just adding third winding into the conventional series connection type SFCL with two coils. To analyze the contribution of the third winding for the current limiting and the recovery characteristics of the SFCL, the short-circuit tests for the series connection type SFCL with the added third winding were performed together with the analysis on its electrical equivalent circuit. From the comparative analysis on the amplitude of the limited fault current and the power burden of the high-T_C superconducting (HTSC) element comprising this SFCL, the improved current limiting and recovery characteristics of the series connection type SFCL using the third winding could be confirmed.

Key Words : Current limiting and Recovery Characteristics, Series Connection Type, Superconducting Fault Current Limiter(SFCL), Third Winding

1. 서 론

전력수요의 급격한 증가와 함께 대단위 발전설비의 증가는 전력계통의 복잡화 계통 임피던스 감소와 함께 단락사고로 인한 고장전류의 증가를 낳게 되었다. 단락전류 증가로 인한 차단기 교체와 이에 따른 비용 상승을 포함하여 모선분리에 따른 계통안정도 저하 및 정상 운전시 계통에 미치는 영향 등의 문제를 해결할 수 있는 새로운 개념의 보호기기기 개발에 대한 관심이 모아져 왔다[1-3]. 점점 증가하고 있는 단락전류

* 주저자 : 공주대학교 산학협력단 부교수
** 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수
* Main author : Industry-University Cooperation Foundation, Kongju National University
Tel : 041-850-0528, Fax : 041-850-0544
** Corresponding author : Professor in the Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University
Tel : 02-828-7268, Fax : 02-817-7961
E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr
접수일자 : 2014년 3월 19일
1차심사 : 2014년 3월 21일
심사완료 : 2014년 6월 7일

Copyright ⓒ 2014 KIIEE All right's reserved

를 제한할 수 있는 전류제한장치 개발을 위한 노력에 힘입어 사고전류를 보다 효과적으로 제어 또는 제한할 수 있는 방안으로 초전도한류기에 대한 연구가 진행되어 왔다[4-6]. 한 개의 철심을 매개로 한 개의 고온 초전도 소자만으로 동작하는 자기결합을 이용한 초전도한류기 중에 두 코일간 병렬 또는 직렬로 연결된 구조를 갖는 초전도한류기는 전류제한 용량을 조절할 수 있을 뿐만 아니라 고온 초전도 소자의 저항이 저항형 초전도한류기보다 높게 또는 낮게 조절할 수 있음이 보고된 바 있다[7-9].

본 논문에서는 자기결합을 이용한 또 하나의 초전도한류기 모델로 한 개의 철심을 매개로 하여 두 코일과는 직렬로 연결되는 3차권선을 추가하여 두 코일 중 2차코일과는 병렬로 초전도소자와는 직렬로 연결된 구조를 갖는 초전도한류기를 제안하였다.

제안한 초전도한류기의 전기적인 등가회로로부터 동작전류와 제한기 임피던스를 전개하였으며, 모의단락실험을 통해 제안한 초전도한류기의 3차권선 설치 유무에 따른 고장전류제한 특성과 회복 특성을 비교 · 분석하였다. 또한 3차권선 설치시 2차코일과 3차권선간의 결선방향에 따른 초전도소자의 저항발생과 함께 고장전류제한 및 회복특성을 분석하였다.

등가회로와 단락모의실험을 통한 분석을 통해 3차권선을 적용한 경우 2차코일과 3차권선의 결선방향을 가극결선으로 구성하여 설계시 초전도소자의 부담을 감소시킴과 동시에 고장전류를 보다 효과적으로 제한할 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. 장치구성 및 결과분석

2.1 구조 및 동작원리

기존의 두 코일간 직렬연결된 자기결합을 갖는 초전도한류기의 구조는 크게 자기결합된 두 코일과 초전도 소자로 구성되나, 제안한 구조는 그림 1과 같이 하나의 철심을 매개로 하여 1차코일과 2차코일을 같은 방향으로 직렬연결하고 3차권선을 추가하여 2차코일과 병렬로 연결되며, 초전도 소자와는 직렬로 연결된 구조를 갖는다.

고장전에 초전도한류기를 구성하고 있는 초전도 소자는 초전도 상태에 있기 때문에 영저항을 유지하고 있으며, 각 코일에 흐르는 전류에 의해 발생되는 철심 내부의 자속은 서로 상쇄되기 때문에 두 코일에는 영전압이 유지되며 이로 인해 초전도한류기의 전체전압도 영전압을 유지하게 된다. 고장이 발생할 경우, 초전도 소자에 흐르는 전류가 임계값을 넘어 상전도로 전이되어 저항이 발생됨과 동시에 초전도 소자에 전압이 유기되며, 이로 인해 각 코일에 전압이 유기되어 초전도한류기의 임피던스가 발생됨으로서 고장전류를 제한하게 된다.

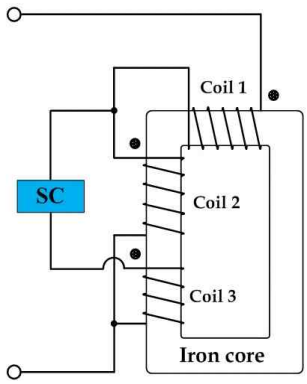


그림 1. 3차권선이 추가된 두 코일간 직렬연결형 초전도 한류기의 구조

Fig. 1. Structure of series connection type SFCL between two coils with added third winding

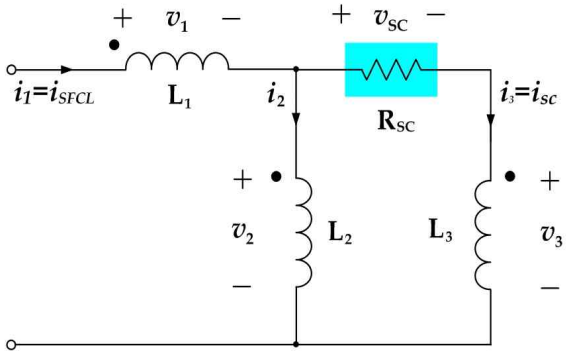


그림 2. 3차권선이 추가된 두 코일간 직렬연결형 초전도 한류기의 전기적 등가회로

Fig. 2. Electrical equivalent circuit of series connection type SFCL between two coils with added third winding

그림 2는 3차권선이 추가된 두 코일간 직렬연결된 초전도한류기의 전기적인 등가회로를 보여준다. L_1, L_2, L_3는 각 코일의 인덕턴스를 나타내고, R_{sc}는 초전도 소자의 상전도저항을 나타낸다. 등가회로에 대한 그림을 간단하게 도시하기 위해 코일간의 상호 인덕턴스를 생략하였다. 누설인덕턴스, 각 권선의 저항들과 철손은 무시될 수 있다고 가정하면 초전도한류기의 제한임피던스 Z_{SFCL}은 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$Z_{SFCL} = \frac{j\omega R_{sc}\left(\sqrt{L_1}+\sqrt{L_2}\right)^2}{Rsc+j\omega\left(\mp\sqrt{L_2}+\sqrt{L_3}\right)^2} \quad (1)$$

여기서 ω는 각 주파수이다. 3차권선이 추가된 자기결합을 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 전류제한 동작이 시작되는 동작전류의 크기는 그림 2의 전기적인 등가회로로부터 유도할 수 있고, 1차와 2차코일의 자기인덕턴스(L_1, L_2), 3차권선의 자기인덕턴스(L_3) 그리고 3차권선에 직렬로 연결된 초전도 소자의 임계전류값(I_C)을 조절함으로써 식 (2)와 같이 설정할 수 있다.

$$I_{SFCL} = I_1 = \frac{\sqrt{L_2}\mp\sqrt{L_3}}{\sqrt{L_1}+\sqrt{L_2}}\, I_c \quad (2)$$

여기서 "+"은 2차코일과 3차권선간 감극결선한 경우를 의미하며, "-"은 2차코일과 3차권선간 가극결선한 경우를 의미한다.

2.2 실험장치 구성

3차권선이 추가된 자기결합을 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 전류제한 특성과 회복 특성을 분석하기 위하여 단락모의회로를 그림 3과 같이 60Hz의 전원전압(E_{In})과 선로임피던스(Z_{In}), 부하임피던스(Z_L)로 구성하였다. 부하단에서의 고장을 모의하기 위해 스위치 S_1를 투입하여 전원전압을 인가하였으며, 스위치 S_1이 투입된 후 설정한 고장각에서 스위치 S_2를 투입함으로써 단락을 모의하였다. 또한 S_2를 일정주기인 5주기동안 투입한 후 개방시킴으로써 고장을 제거하였다. 초전도소자는 임계온도 87K를 갖는 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$(YBCO) 박막을 사용하였으며, 2차코일과는 병렬로 연결하고 3차권선과는 직렬로 연결하였다. 퀜치시 발생한 열로부터 박막소자를 보호하기 위해 200nm의 두께로 Au층을 증착한 초전도 소자를 사용하였고, 이때 임계전류값(I_C)은 27A였다.

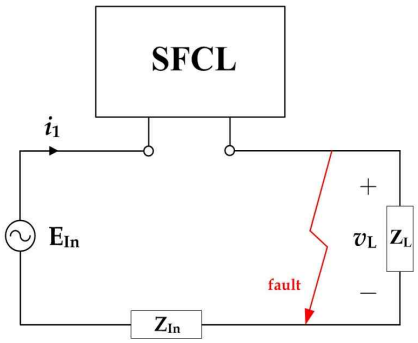


그림 3. 고장발생을 모의하기 위한 실험회로 구성도
Fig. 3. Structure of experimental circuit to simulate the fault generation

2.3 결과 및 분석

그림 4는 3차권선이 추가된 자기결합을 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 2차코일과 3차권선간의 결선방향에 따른 고장발생후 고장제거시 고장전류제한 특성을 보여준다. 그림 4 (a)는 2차코일과 3차권선간에 가극결선한 경우 2차코일에 흐르는 전류가 3차권선에 흐르는 전류와 반전되는 것을 관찰할 수 있다. 고장발생주기 동안 고장전류 제한효과를 비교하기 위해 초전도한류기를 설치하지 않았을 경우의 고장전류파형도 함께 도시하였다.

그림 4 (b)와 같이 감극결선한 경우에는 2차코일에 흐르는 전류가 거의 0에 가깝게 되고, 1차코일의 전류($i_{SFCL}=i_1$)와 초전도 소자에 흐르는 전류($i_3=i_{sc}$)가 유사한 크기로 제한되는 것을 볼 수 있다. 이는 1차코일과 3차권선의 결선방향이 반대되는 구성이 되기 때문에 1차코일과 3차권선에 정방향인 같은 방향으로 전류가 흐르게 되면 철심내부의 자속이 대부분 서로 상쇄되어 2차코일에 자속쇄교가 감소하게 되어 쇄교되는 자속을 상쇄시키기 위한 2차코일의 전류 또한 0에 가깝

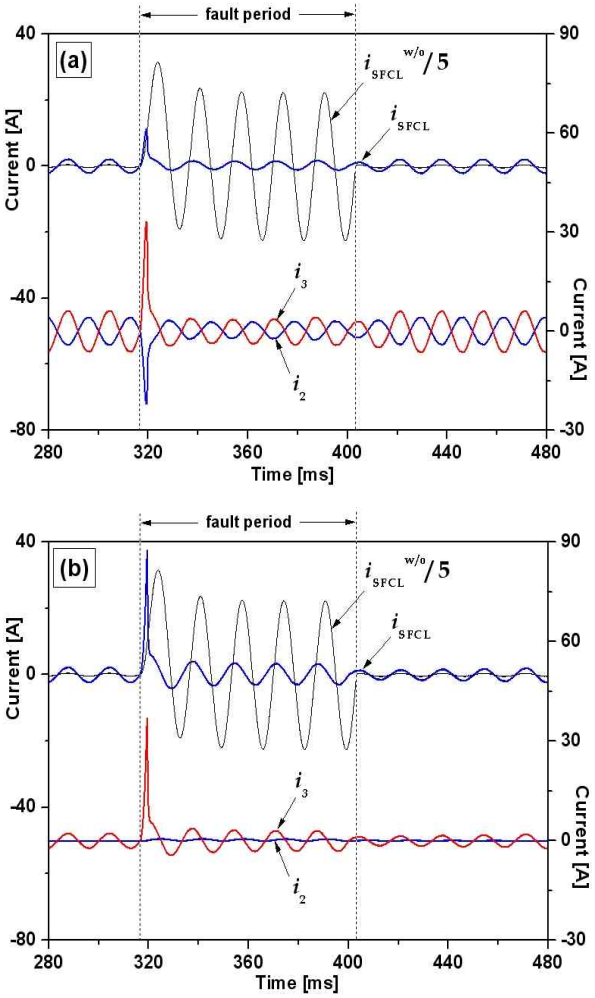


그림 4. 3차권선이 추가된 자기결합을 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 고장발생후 제거시 2차코일과 3차권선간의 결선방향에 따른 고장전류파형.
(a) 가극결선한 경우. (b) 감극결선한 경우

Fig. 4. Fault current wavefroms dependent on the winding direction between coil 2 and 3rd winding of series connection type SFCL with the 3rd winding in case that the fault removes after the fault occurs. (a) In case of additive polarity winding. (b) In case of subtractive polarity winding

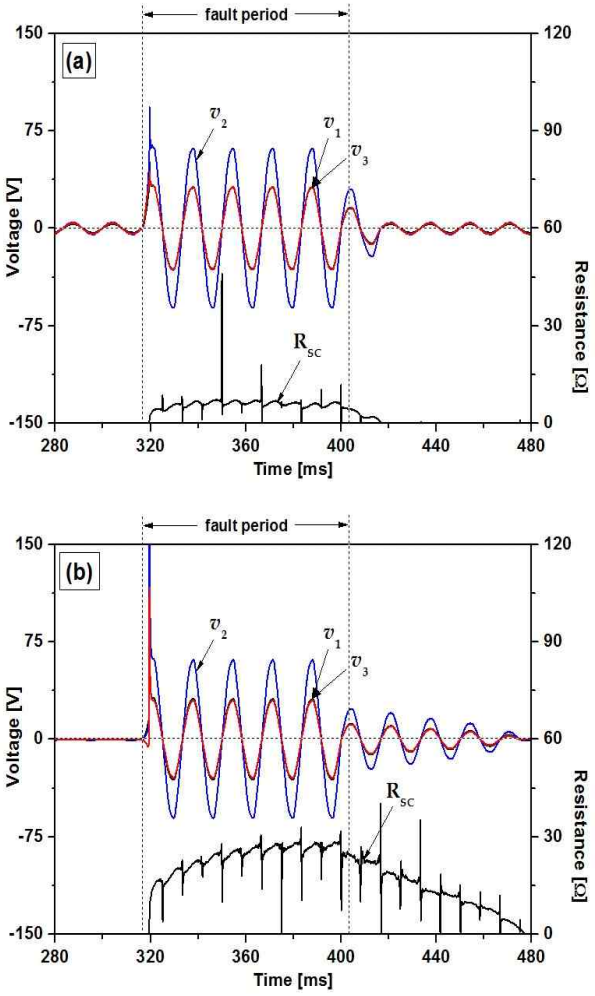


그림 5. 3차권선이 추가된 직렬연결형 초전도한류기의 결선방향에 따른 초전도소자의 저항발생곡선 및 각 코일 및 권선에 유기되는 전압파형.
(a) 가극결선한 경우. (b) 감극결선한 경우

Fig. 5. Resistance curves of HTSC element and waveforms of the induced voltage in each coil and winding dependent on the winding direction of series connection type SFCL with the added third winding. (a) In case of additive polarity winding. (b) In case of subtractive polarity winding

게 감소되기 때문이다. 결국 1차코일에 흐르는 전류의 대부분이 3차권선으로 흘러가게 되므로 i_1과 i_{sc}는 같게 된다.

그림 5는 3차권선이 추가된 직렬연결형 초전도한류기의 2차코일과 3차권선간의 결선방향에 따른 초전도소자의 고장발생과 회복에 따른 각 코일에 유기되는 전압파형과 초전도소자의 저항발생곡선을 보여준다.

그림 5 (a)는 2차코일과 3차권선을 가극결선한 경우

로써 고장발생으로 초전도소자의 퀜치로 인해 저항이 발생함에 따라 1차코일과 2차코일에 유기되는 전압크기의 비가 두 코일의 권선비인 1 : 2로 유기되는 것을 볼 수 있으며, 3차권선에 유기되는 전압은 1차코일과 권선비가 같기 때문에 1차코일과 동일한 크기의 전압이 유기되는 것을 확인할 수 있다.

그림 5 (b)는 2차코일과 3차권선을 감극결선한 경우로써 각 코일과 권선의 비가 그림 5 (a)의 가극결선한 경우와 동일하기 때문에 초전도소자에서 저항이 발생한 후 1차코일과 2차코일, 3차권선에 유기되는 전압크기가 그림 5 (a)의 가극결선한 경우와 고장발생직후를 제외하고 동일함을 비교할 수 있다. 고장발생직후 전류제한 동작이 시작되는 고장전류의 크기는 2차코일과 3차권선간 감극결선한 경우가 가극결선한 경우보다 크기가 크게 설계되는 것을 식 (1)에서 분석할 수 있다. 따라서 그림 4에서 비교할 수 있었던 것처럼 감극결선한 경우가 가극결선한 경우보다 고장발생직후 전류제한 동작시작이 지연되어 초기고장전류가 크게 상승하는 것을 관찰할 수 있다. 더불어 고장발생 이후 초전도소자에 인가되는 전압은 감극결선한 경우는 2차코일과 3차권선에 유기되는 전압의 합만큼, 가극결선한 경우는 유기되는 전압의 차만큼 각각 인가되기 때문에 감극결선한 경우에 보다 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 고장발생기간동안 크게 상승한 초전도소자의 저항은 고장제거후에도 초전도상태로 회복되기까지 긴 시간이 소요되는 것도 가극결선한 경우와 감극결선한 경우 상승한 각각의 초전도소자의 저항곡선으로부터 비교할 수 있으며, 가극결선한 경우가 감극결선한 경우보다 초전도한류기의 전류제한 측면과 초전도한류기의 회복측면에서 보다 유리하다는 것을 분석할 수 있다.

그림 6은 3차권선을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우, 고장발생직후 2차코일과 3차권선간 결선방향에 따른 직렬연결형 초전도한류기를 구성하고 있는 초전도소자의 도통전류와 유기전압 및 한류기 전체전류 및 초전도소자 소모전력을 보여준다. 고장발생과 동시에 초전도소자에 흐르는 전류가 증가하고여 임계전류(I_C)를 초과한 후부터 퀜치발생으로 초전도소자에 전압이 유기되는 것을 볼 수 있다.

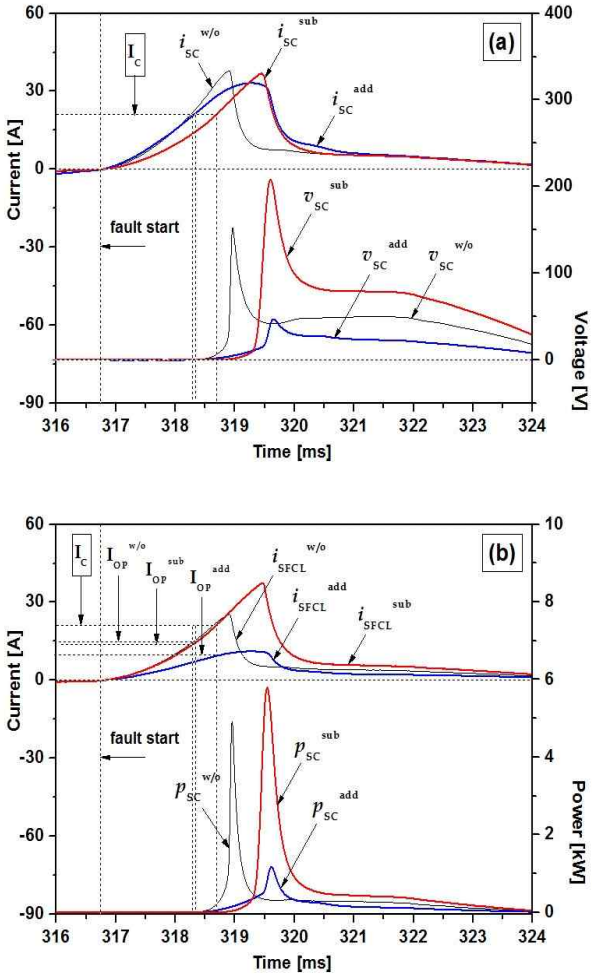


그림 6. 고장전류발생직후 직렬연결형 초전도한류기의 3차권선유무 및 권선방향에 따른 고장전류, 초전도소자 도통전류, 유기전압 및 소모전력
(a) 초전도소자에 유기전압 및 전류파형
(b) 고장전류 및 초전도소자 소모전력

Fig. 6. Fault current, conducting current, induced voltage and consumped power in the HTSC element according to existence of 3rd winding and winding direction of series connection type SFCL directly after fault occurrence. (a) The induced voltage and currentwaveform in HTSC element (b) Fault current and power of HTSC element

3차권선을 적용하지 않은 경우 초전도소자에 흐르는 전류가 적용한 경우와 근소의 차이로 먼저 임계전류값에 도달하여 퀜치발생으로 전압이 유기되기 시작

하는 것을 그림 6 (a)에서 관찰할 수 있으며, 고장발생 직후 최고값에 도달되는 초전도소자에 유기되는 전압 크기는 3차권선을 적용한 경우의 가극결선한 경우보다는 크고, 감극결선한 경우보다는 작음을 그림 6 (a)에서 비교할 수 있다. 또한 3차권선을 적용한 경우 고장발생직후 초전도 소자에 유기되는 전압의 크기는 감극결선한 경우가 가극결선한 경우보다 크게 유기되는 것을 비교할 수 있으며, 위의 비교분석으로부터 3차권선을 적용한 경우 초전도소자의 부담은 감극결선한 경우가 가극결선한 경우보다 크다는 것도 확인할 수 있다.

고장발생직후 한류기 전체전류 및 초전도소자 소모전력을 보여준 그림 6 (b)에서도 초전도소자의 임계전류를 초과함에 따라 고장발생직후 고장전류제한이 시작되어 최대값에 도달되는 고장전류의 크기는 3차권선을 적용한 경우의 감극결선한 경우가 가장 최대값에 도달되었고 가극결선한 경우가 최소값에 도달되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 고장발생직후 임계전류값에 도달한 경우 한류기에 의한 고장전류제한이 시작되는 동작전류를 유도한 식 (2)과 일치하는 것을 분석할 수 있다.

고장발생직후 초전도소자에서 소모되는 전력은 초전도소자의 도통전류가 최대값에 도달되는 전류크기를 비교한 그림 6 (a)에서 비교한 것처럼 3차권선 유무와 결선방향에 따라 큰 차이가 없었으나, 초전도소자에 유기되는 전압에서는 큰 차이가 발생함에 따라 유기전압의 크기와 유사하게 3차권선을 적용한 경우 감극결선한 경우와 가극결선한 경우에 소모전력에서 최대값과 최소값이 각각 발생하는 것을 분석할 수 있었다.

위의 분석으로부터 3차권선을 적용한 경우 2차코일과 3차권선의 결선방향을 가극결선으로 구성하여 설계시 초전도소자의 부담을 감소시킴과 동시에 고장전류를 보다 크게 제한할 수 있음을 등가회로분석과 단락모의실험을 통해 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 두 코일이 하나의 철심에 직렬연결된 초전도한류기에 3차권선의 적용유무에 따른 한류기를 구성하고 있는 초전도소자의 전력부담과 함께 고장전류제한 및 회복특성을 비교분석하였다. 분석을 통해 고장전류제한과 회복측면에서 2차코일과 3차권선을 같은 방향인 가극으로 결선한 경우가 감극결선한 경우보다 초전도소자부담감소와 함께 향상된 전류제한 효과를 보여주었으며, 3차권선을 적용하여 가극결선한 경우가 3차권선을 적용하지 않은 경우보다 초전도한류기의 고장전류제한과 회복 특성이 향상됨을 모의실험을 통해 검증할 수 있었다. 3차권선을 적용하여 감극결선한 경우에는 고장전류제한과 회복 특성이 3차권선을 적용하지 않은 경우보다 향상되지 않음을 분석할 수 있었으며, 이는 1차코일과 3차권선의 결선방향이 반대되는 구성이 되기 때문에 1차코일과 3차권선에 정방향인 같은 방향으로 전류가 흐르게 되어 철심내부의 자속이 서로 상쇄됨에 따라 쇄교되는 자속을 상쇄시키기 위한 2차코일의 전류 또한 영에 가깝게 감소되어, 1차코일을 통해 흐르는 고장전류의 대부분이 초전도소자와 직렬연결된 3차권선으로 흘러가게 된 결과에 기인된 것으로 분석할 수 있었다.

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임.
(2013R1A1A2004916)

References

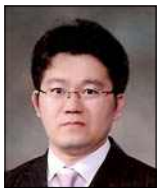
[1] S. H. Lim, H. S. Choi, D. C. Chung, Y. H. Jeong, Y. H. Han, T. H. Sung, B. S. Han, "Fault current limiting characteristics of resistive type SFCL using a transformer," IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 15, no. 2, pp. 2055-2058, Jun. 2005.
[2] H. Kado and M. Ichikawa, M. Shibuya, M. Kojima, M. Kawahara, T. Matsumura, "Inductive type fault current limiter using Bi-2223 thick film on MgO cylinder with Bi-2212 buffer Layer," IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 15, no. 2, pp. 2051-2054,Jun. 2005.
[3] H. Shimizu, Y. Yokomizu, T. Matsumura, and N. Murayama, "Proposal of flux flow resistance type fault current limiter using Bi2223 high Tc superconducting bulk," IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 12, no. 1, pp. 876-879, Mar. 2002.
[4] S. H. Lim, T. H. Han, S. W. Yim, H. S. Choi, B.S. Han, "Current limiting characteristics of a flux-lock type SFCL

dependent on fault angles and core saturation," IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 17, no. 2, pp. 1827-1830, Jun. 2007.
[5] H. S. Choi, and S. H. Lim, "Operating performance of the flux-lock and the transformer type superconducting fault current limiter using the YBCO thin films," IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 17, no. 2, pp. 1823-1826, Jun. 2007.
[6] Seckcheol Ko, Sung-Hun Lim, and Tae-Hee Han, "Analysis on fault current limiting and recovery characteristics of a flux-lock type SFCL with an isolated transformer," Physica C, vol. 484, pp. 263-266, Jan. 2013.
[7] S. H. Lim, H. S. Choi, "Quench characteristics of HTSC elements in series-connected flux-lock type SFCLs through magnetic flux-linkage," Physica C, vol. 445-448, pp. 1073-1077, Oct. 2006.
[8] S. H. Lim, "Operational characteristics of flux-lock type SFCL with series connection of two coils," IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 17, no. 2, pp. 1895-1898, Jun. 2007.
[9] S. H. Lim, "Comparative study on current limiting characteristics of flux-lock type SFCL with series or parallel connection of two coils," Physica C, vol. 468, pp. 2076-2080, Sep. 2008.

◇ 저자소개 ◇

고석철(高錫喆)
1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003~2004년 한국기초과학지원연구원 전주센터 연구생. 2005~2008년 전남테크노파크 정책기획단 책임연구원. 2008~2012년 충남테크노파크 정책기획단 팀장. 2012년~현재 공주대학교 산학협력단 부교수.

한태희(韓太熙)
1991년 전북대학교 금속공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 중원대학교 첨단소재공학과 조교수.



임성훈(林成勳)
1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 부교수.