

두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 이중 피크전류제한 특성

(Double Peak Current Limiting Properties of Series Connection-Type SFCL with Two Magnetic Paths)

고석철* · 한태희 · 임성훈**

(Seok-Cheol Ko · Tae-Hee Han · Sung-Hun Lim)

Abstract

We proposed a series connection-type superconducting fault current limiter(SFCL) using E-I core that can prevent the internal magnetic flux generation of cores during normal operation, and prevent the saturation of cores due to a sudden magnetic flux generation at the initial stage of fault occurrence while limiting the peak current. Through a short-circuit simulation experiment, we analyzed the operating status of the two superconducting elements and limiting characteristics according to the size of the fault current peak before and after the failure. Further, the double peak current limiting characteristics according to the winding directions as well as the current and the voltage of each coil were compared and analyzed.

Key Words : The Superconducting Fault Current Limiter(SFCL), Two Magnetic Paths, Two Superconducting Elements, Double Peak Current Limiting

1. 서 론

초전도한류기의 국외 연구동향으로는 독일의 경우 정부가 지원한 CURL10 프로젝트로 10kV/800A급 3상 저항형 초저도 한류기를 2004년에 개발을 마치고 field test까지 성공하였고, RWE 계통 Netphen 변전소에 모선 연계용으로 설치해 시험 성공하였다. 영국의 경우 RollsRoys사가 선박용 초전도한류기 개발진행하고 있고, 이탈리아의 CESI도 배전급을 개발 중에 있다. 미국은 IGC-SuperPower가 참여하고 138kV급을 목표로 Matrix FCL 초전도한류기를 개발 중에 있

* 주저자 : 공주대학교 산학협력단 부교수
** 교신저자 : 송실대학교 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 16일
1차심사 : 2014년 3월 19일
심사완료 : 2014년 5월 9일

고, AMSC사는 DOE 지원 하에 Siemens사와 공동으로 115~138kV급의 저항형 초전도한류기를 개발하고 있다. 중국은 1980년대부터 개발역사를 가지고 있으며, 2005년도에 포화철심형 한류기로 정격전압 10.5kV인 정류형 초전도 한류기를 개발 운영하고 있다. 2007년에 Innopower사가 SCPower사와 제휴하여 35kV/1.5kA급 포화철심 리액터형 초전도한류기를 개발하여 시험 운전 중에 있다. 현재는 220kV급 초전도 한류기를 개발하고 있다. 일본은 Toshiba에서 Super-ACE 프로젝트를 수행하고 있으며, 송전급인 저항형 초전도한류기를 이용하여 6.6kV/750A급 한류기를 공장시험 중에 있다.

우리나라는 제조업 산업에 기반을 두고 있어 전력 수요는 해마다 늘고 있는 실정이며 이로 인한 발전 설비의 확장은 물론 계통의 루프화와 분산전원의 연계 등으로 계통의 고장전류 증가를 가속시켜 왔으며, 단락전류 저감을 위한 다양한 방안들이 적용·시도되고 있다[1-2]. 그 중에서도 평상시 전력손실 발생이 적고, 인접계통에 영향이 없는 초전도한류기에 대한 관심을 가져왔고 다양한 초전도한류기 개발이 진행되어 왔다[3-5]. 개발된 초전도한류기 중 자속구속형 초전도한류기는 평상시 두 코일에서 발생하는 자속이 서로 상쇄되지만 단락 발생시에는 고온 초전도 소자의 켄치발생으로 인한 저항발생으로 상쇄되지 않게 되어 두 코일에 전압이 유기되고 이로 인해 고장전류를 제한하게 된다. 이때 자속구속형 초전도한류기를 구성하고 있는 두 코일의 방향과 인덕턴스비를 조절함으로써 고장전류제한이 이루어지는 동작전류와 제한 임피던스를 조절할 수 있는 특징을 가지고 있다[6-8]. 기존에 제안한 초전도한류기는 고장전류 감지와 고장전류 제한동작이 동시에 이루어지므로 전류제한 동작기간 동안 고장전류를 모두 감당해야 하는 부담과 고장전류 크기에 따른 임피던스 조절을 개선한 구조의 동작특성과 유용성에 대해 보고하였다[9-10]. 우리가 기존에 발표되었던 고장발생 초기, 피크전류제한 동작을 갖는 자속구속형 초전도한류기는 하나의 철심을 매개로 두 개의 권선이 직렬 또는 병렬로 연결되고 초전도 소자가 두 개의 권선중 하나와 직렬 또는 병렬로 연결된

기존의 구조에 3차 권선과 또 다른 초전도 소자를 추가한 구조이다[11]. 또한 하나의 철심을 매개로 한 트리거 전류레벨을 갖는 변압기형 초전도한류기를 제안하여 두 개의 초전도 소자를 2차, 3차 권선에 각각 설치한 구조에 대한 피크전류 제한특성을 보고한 바 있다[12].

최근에 우리는 두 개의 철심을 매개로 하여 1차, 2차 권선간 병렬로 연결하고 3차 권선을 다른 철심에 감아 초전도 소자를 추가한 구조의 두 개의 자속경로를 갖는 병렬연결형 초전도한류기를 제안하여 피크전류 제한특성을 보고한 바 있다[13]. 이는 고장발생과 동시에 크게 상승한 고장전류를 제한하기 위해 철심 내부자속을 증가시켜 철심의 포화를 방지하고자 하였다. 그러나 한 개의 철심을 매개로 하여 두 개의 코일간 직렬로 연결하고 초전도 소자 한 개를 병렬로 연결한 기존의 발표한 구조에 한 개의 철심 대신에 E-I 철심으로 대체하고 E-I 철심의 오른쪽 다리에 3차 권선과 초전도 소자를 추가한 구조의 피크전류 제한특성에 대해서는 아직 발표되지 않고 있다[14].

본 논문에서는 평상시는 철심의 내부 자속발생이 일어나지 않도록 해주고, 고장발생 초기에 갑작스런 자속발생으로 철심의 포화를 방지하고 피크전류제한 동작을 가질 수 있도록 E-I 철심을 사용한 두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기를 제안하였다. 제안된 초전도한류기는 기존에 보고된 두 개의 철심을 매개로 하지 않고 하나의 E-I 철심을 매개로 1차 코일과 2차 코일간에는 직렬로 연결하고 3차 코일을 별도로 추가하여 최종적으로 초전도 소자 두 개가 연결된 구조로써 고장발생 초기 고장전류의 크기가 클 경우 두 번의 전류제한 동작이 이루어져 초전도 소자의 고장전류 부담을 줄이고자 하였다. 전기적인 등가회로부터 피크전류 제한동작을 위한 전류설정식을 도출하였으며, 단락모의실험을 통해 사고발생 전과 후의 사고전류피크 크기에 따른 두 초전도 소자의 동작여부와 고장전류 제한특성을 분석하였다. 또한 결선방향에 따른 이중 피크전류제한 특성과 각 코일의 전류와 전압 특성을 비교·분석하였다.

2. 본 론

2.1 구조 및 동작원리

본 연구의 실험에 사용한 E-I 철심은 E와 I의 결합된 형태으로써 인덕턴스 값을 높여주고 자속이 갑자기 포화되는 것을 방지해 준다. 또한, 철심이 자로로 형성하여 자기장이 다른 곳으로 빠져나가지 못하도록 해 준다. 재질은 규소강판으로서 연자성체 성질을 갖고 있고, 와전류 손실을 줄이기 위해 여러 장의 얇은 철판을 사용한다.

이중 피크전류제한 기능을 갖도록 제안한 초전도한류기는 그림 1에서와 같이 세 개의 다리를 가지고 있는 E-I 철심을 매개로 하여 세 개의 코일들과 두 개의 초전도 소자들로 구성되어 있다. 동작원리는 코일 1과 코일 2가 직렬로 연결된 권선에서 발생하는 자속이 정상시에는 서로 상쇄되지만 고장발생시에는 두 번째 권선과 병렬연결된 초전도 소자에서 퀘칭으로 인한 저항발생으로 상쇄되지 않게 되어 두 개의 권선에 전압이 유기되고 이로 인해 고장전류를 제한하게 된다. 이와 동시에 상쇄되지 않은 철심내부의 자속으로 인해 3차 권선에서도 전압이 유기되어 전류가 흐르게 된다. 이때 고장발생 초기에 고장전류의 크기가 클 경우 철심내부의 유기자속도 크게 상승하게 되어 3차 권선에 유기되어 흐르는 전류도 크게 상승하게 되고 3차 권선에 연결된 두 번째 초전도 소자의 임계전류를 초과하게 되면 퀘칭발생으로 저항이 발생하게 되어 두 번째 고장전류제한 동작인 피크전류 제한동작을 고장발생 초기에 수행하게 된다.

그림 2는 E-I 철심을 이용한 두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 전기적인 등가회로를 보여준다. L_1, L_2, L_3 는 각 코일의 인덕턴스를 나타내고, R_{sc1} 과 R_{sc2} 는 초전도 소자들의 각각의 저항을 나타낸다. 등가회로에 대한 해석을 간략하게 하기 위하여 코일간의 상호 인덕턴스를 생략하였다. 이 초전도한류기의 제한 임피던스 ZSFCL은 누설 인덕턴스, 각 권선의 저항들과 철손은 무시될 수 있다고 가정하여 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

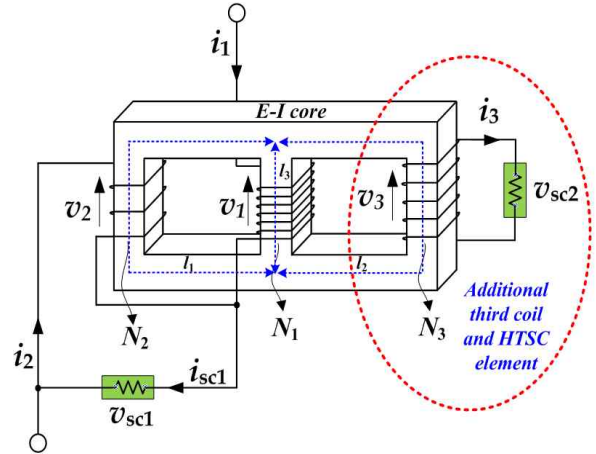


그림 1. 두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 구조

Fig. 1. Structure of a series connection-type SFCL with two magnetic paths

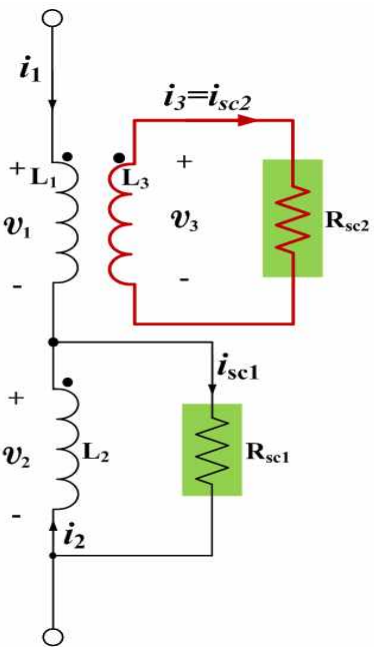


그림 2. 두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 등가회로

Fig. 2. Equivalent circuit of a series connection-type SFCL with two magnetic paths

$$Z_{SFCL} = \frac{j\omega [\mp (\sqrt{L_1} + \sqrt{L_2})^2 \cdot R_{sc1}] + \frac{\omega^2 L_1 L_3}{R_{sc2} + j\omega L_3}}{\mp R_{sc1} - j\omega L_2} \quad (1)$$

여기서 “+”은 1차 코일과 2차 코일간 감극결선한 경우를, “-”은 1차 코일과 2차 코일간 가극결선한 경우를 의미하며, ω 는 각 주파수이다. 두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 전류제한 동작이 시작되는 고장전류의 크기는 그림 2의 전기적인 등가모델로부터 유도할 수 있고, 식 (2)와 같이 첫 번째 고장전류 제한 동작에 대한 초전도한류기의 첫 번째 동작전류의 방정식은 1차와 2차 권선의 인덕턴스(L_1, L_2)와 2차 권선에 병렬로 연결된 초전도 소자 1의 임계전류값 (I_C)을 조절함으로써 설정할 수 있고, 두 번째 고장전류 제한동작에 대한 초전도한류기의 두 번째 동작전류의 방정식 (3)은 1차 권선과 3차 권선의 인덕턴스(L_1, L_3), 그리고 3차 권선에 직렬로 연결된 초전도 소자 2의 임계 전류값을 조절함으로써 설정할 수 있다.

$$I_{op1} = \frac{1}{1 \pm \sqrt{L_1/L_2}} \cdot I_C \quad (2)$$

$$I_{op2} = \pm \sqrt{L_3/L_1} \cdot I_C \quad (3)$$

여기서 첫 번째 동작전류 (I_{op1}) 에서 “+”은 1차 코일과 2차 코일간 가극결선한 경우를 의미하며, “-”은 1차 코일과 2차 코일간 감극결선한 경우를 의미하며, 두 번째 동작전류 (I_{op2}) 에서 “+”은 1차 코일과 3차 코일간 가극결선한 경우를 의미하며, “-”은 1차 코일과 3차 코일간 감극결선한 경우를 의미한다.

2.2 실험장치 구성

두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 설계 파라미터를 표 1에 나타내었다. 3차 코일을 포함하여 이 초전도한류기를 구성하는 두 개의 코일들은 E-I 철심에 같은 방향으로 감았다.

임계온도 87K를 갖는 YBCO 박막은 초전도 소자로써 사용되었으며, 이는 2차 코일과 3차 코일에 각각 연결되어 있다. 퀴치시 열 발생으로부터 박막소자를 보호하기 위해 200nm의 두께로 Au층을 증착하였다. 임계 전류값은 27A로 측정되었다.

고장발생을 모의하기 위해 그림 3과 같이 실험회로에 대한 구성도를 보여주고 있으며, 60Hz의 교류 전압 ($E_{in}=160V$), 선로 임피던스($L_1=1.82mH, R_1=0.097\Omega$), 부하저항($R_{Load}=41.2\Omega$) 그리고 E-I 철심을 이용한 두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기로 구성되어 있다. 스위치 SW1을 투입한 후 고장주기 동안 스위치 SW2를 작동하여 5주기 동안 단락사고를 유발시켜 선로를 포함한 세 개의 코일, 초전도 소자 1, 2에 흐르는 전류와 유기된 전압을 CT와 PT를 통해 측정하여 분석하였다.

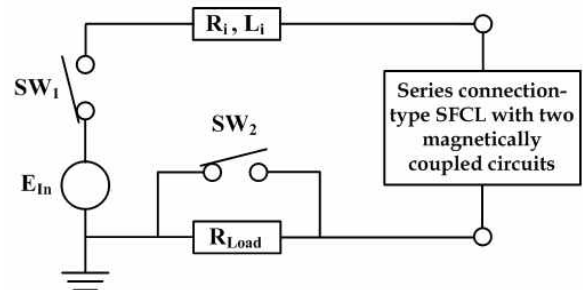


그림 3. 두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 실험회로 구성도

Fig. 3. Schematic diagram for the experimental circuit of a series connection-type SFCL with two magnetic paths

표 1. 두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 구성요소 사양

Table 1. Specifications of a series connection-type SFCL with two magnetic path

Iron Core	Value	Unit
Total Mean Length (l_2+l_3)	1,160	mm
Second Leg Length (l_1)	310	mm
Cross Sectional Area (Score)	2,790	mm ²
Two Coils	Value	Unit
Turn Number of Coil 1 (N_1)	45	Turns
Turn Number of Coil 2 (N_2)	15	Turns
Turn Number of Coil 3 (N_3)	30	Turns
HTSC Thin Film	Value	Unit
Material	YBCO	
Critical Temperature	87	K
Critical Current	27	A

두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 이중 피크전류제한 특성

2.3 실험결과 및 고찰

그림 4는 전원전압 0°를 기준으로 사고가 발생한 이후 1차 코일과 2차 코일의 권선방향에 따른 두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기에 대한 피크전류제한 특성을 보여준다. 그림 4 (a)에서 보는 것처럼 1차 코일과 2차 코일이 감극결선인 경우 고장발생 직후 첫 번째 초전도 소자의 켄치로 인한 저항발생으로 고장전류제한과 함께 3차 권선에 유기된 전류가 두 번째 초전도 소자의 임계 전류값을 초과함과 동시에 피크전류제한 동작이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 반면에 그림 4 (b)와 같이 1차 코일과 2차 코일

이 가극결선인 경우에는 고장발생 직후 첫 번째 초전도 소자와 두 번째 소자에서 켄치되지 않은 것을 볼 수 있다. 다만 2차 코일에 흐르는 전류는 큰데 비해, 초전도 소자 1에 흐르는 전류(i_{sc1})는 임계 전류값을 초과하지 않게 되어 피크전류제한 동작이 이루어지지 않고 있고, 두 번째 초전도 소자 또한 3차 권선에 유기된 전류가 임계 전류값을 초과하지 않게 되어 피크전류제한 동작이 이루어지지 않는 것을 관찰할 수 있다. 다만 2차 코일에 유기되는 전압은 초전도 소자 1에 유기되는 전압과 같으며, 고장발생 전후 2차 권선의 내부자속 발생으로 인한 것으로 추측할 수 있다.

그림 5는 전원전압 0°를 기준으로 사고가 일어났을

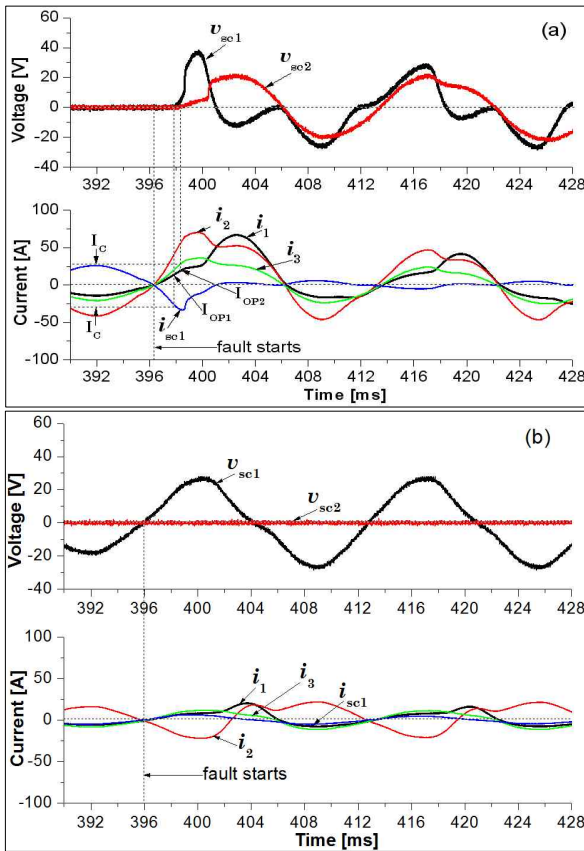


그림 4. 권선방향에 따른 초전도한류기의 피크전류제한 특성. (a) 감극결선. (b) 가극결선
Fig. 4. Peak current limiting characteristics of SFCL according to the windings direction. (a) The subtractive polarity winding. (b) The additive polarity winding

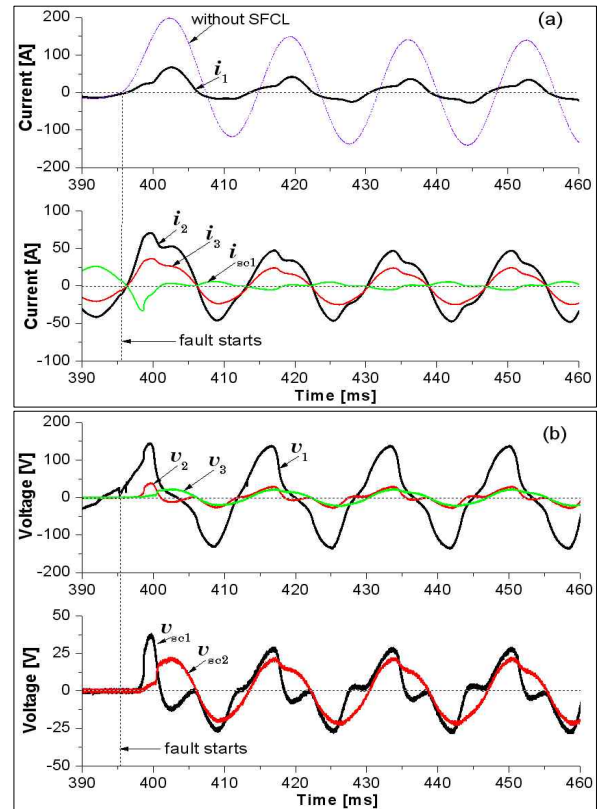


그림 5. 감극결선한 초전도한류기의 전압파형 및 전류제한 특성. (a) 각 코일에 흐르는 전류. (b) 각 코일에 유기된 전압파형
Fig. 5. Current limiting characteristics and voltage waveforms of SFCL in case of that subtractive polarity winding. (a) Current flowing in each coil. (b) The voltage waveform induced in each

때 1차 코일과 2차 코일간의 권선방향에 따른 감극결선인 경우의 E-I 철심을 이용한 두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 전류제한 특성과 각 코일의 전압 파형을 보여준다. 고장발생 후 첫 번째 초전도 소자에서 켄치발생으로 저항이 발생한 후 3차 권선에 유기된 전류가 두 번째 초전도 소자의 임계전류를 초과할 경우 피크전류제한 동작이 진행되는 것을 확인할 수 있으며, 이와 같이 피크전류 제한 동작이 이루어진 경우에는 가극결선보다는 고장전류제한이 다소 적게 제한되나, 고장전류 제한도 수행하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 또한 고장발생 후 첫 번째 초전도 소자에서 유기되는 전압은 2차 권선에서 유기되는

전압과 같은 크기로 유기되고 두 번째 초전도 소자에서 켄치발생으로 인해 유기되는 전압은 3차 권선의 전압과 같음을 알 수 있다. 또한 첫 번째 초전도 소자에서 유기되는 전압이 두 번째 초전도 소자에서 유기되는 전압보다 피크값이 크다는 것을 관찰할 수 있다.

그림 6은 1차 권선과 2차 권선간의 권선비가 0.33이고 가극결선일 경우, E-I 철심을 이용한 두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 피크전류 제한특성과 각 권선에 유기되는 전압파형을 보여준다.

그림 6 (a)와 같이 전원전압 0°를 기준으로 사고가 발생했을 때 감극결선일 때보다 가극결선인 경우가 피크전류제한 동작이 일어나지는 않았지만, 고장전류 제한이 이루어지는 것을 비교할 수 있다. 고장발생 직후 첫 번째 초전도 소자와 두 번째 소자에서 켄치되지 않은 것을 볼 수 있으며, 다만 2차 코일에 흐르는 전류는 큰데 대비, 초전도 소자 1에 흐르는 전류는 임계 전류값을 초과하지 않게 되어 피크전류제한 동작이 이루어지지 않고 있고, 두 번째 초전도 소자 또한 3차 권선에 유기된 전류가 임계 전류값을 초과하지 않게 되어 피크전류제한 동작이 이루어지지 않는 것을 볼 수 있다. 그림 6 (b)와 같이 3차 코일에 유기되는 전압은 거의 제로 이었으며, 2차 코일에 유기되는 전압은 초전도 소자 1에 유기되는 전압과 같음을 알 수 있다. 이로써 1차 권선에 유기되는 전압은 가극결선한 경우보다 감극결선한 경우에서 더 크다는 것을 비교할 수 있었다. 또한 가극결선한 경우보다 감극결선한 경우에서 피크전류제한효과가 더 잘 발생하고 있음을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서 피크전류 제한특성을 더 향상시킬 수 있도록 E-I 철심을 사용한 두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기를 제안하였다. 고장발생 초기, 고장전류 피크 크기가 클 경우 1차 코일과 2차 코일간의 결선방향에 따른 두 개의 초전도 소자의 피크 전류제한 동작여부와 고장전류제한 특성을 단락모의 실험을 통해 분석하였다. 분석결과 1차 코일과 2차 코일이 감극결선인 경우 고장발생 직후 첫 번째 초전도

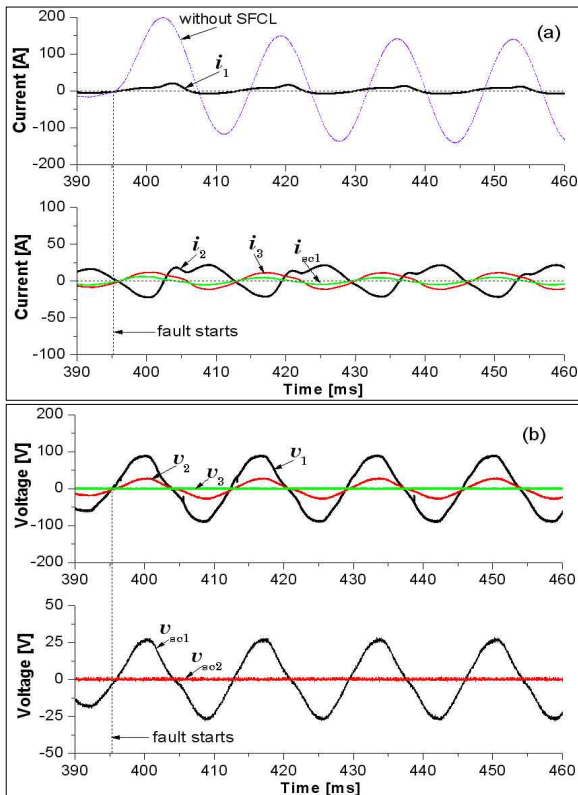


그림 6. 가극결선한 초전도한류기의 전압파형 및 전류제한 특성. (a) 각 코일에 흐르는 전류. (b) 각 코일에 유기된 전압파형

Fig. 6. Current limiting characteristics and voltage waveforms of SFCL in case of that additive polarity winding. (a) Current flowing in each coil. (b) The voltage waveform induced in each

두 개의 자속경로를 갖는 직렬연결형 초전도한류기의 이중 피크전류제한 특성

소자의 퀘칭으로 인한 저항발생으로 고장전류제한과 함께 3차 권선에 유기된 전류가 두 번째 초전도 소자의 임계 전류값을 초과함과 동시에 피크전류제한 동작이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 가극결선인 경우에는 고장발생 직후 첫 번째 초전도 소자와 두 번째 소자에서 퀘칭되지 않은 것을 확인할 수 있었다. 1차 권선에 유기되는 전압은 가극결선한 경우보다 감극결선한 경우에서 더 크다는 것을 비교할 수 있었으며, 가극결선한 경우보다 감극결선한 경우에서 피크 전류 제한효과가 더 잘 발생하고 있음을 확인할 수 있었다.

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

References

[1] T. Hara, T. Okuma, T. Yamamoto, D. Ito K. Tasaki, and K. Tsurunaga, "Development of a new 6.6kV/1500A class superconducting fault current limiter for electric power system," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 1, pp. 182-192, Jan. 1993.

[2] K.-W. Lee, "Power system fault current problems and superconducting fault current limiter," Superconductivity and Cryogenics, pp. 8-12, 2001.

[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] T. K. Ko, "Development of high-Tc superconducting fault current limiter with inductive type," Superconductivity and Cryogenics, pp. 18-22, 2003.

[5] H. Yamaguchi, T. Kataoka, K. Yaguchi, S. Fujita, K. Yoshikawa, and K. Kaiho, "Characteristics analysis of transformer type superconducting fault current limiter," IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 14, no. 2, pp. 815-818, June. 2004.

[6] 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.

[7] T. H. Han, H. S. Choi, S. H. Lim, N. Y. Lee, "Recovery characteristics of flux-lock type superconducting fault current limiter," Physica C, vol. 463-465, pp. 1209-1212, Oct. 2007.

[8] Sung-Hun Lim, Hyo-Sang Choi, Dong-Chul Chung, Seokcheol Ko, and Byoung-Sung Han, "Impedance

variation of a flux-lock type SFCL dependent on winding direction between coil 1 and coil 2," IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 15, no. 2, pp. 2039-2042, Jun. 2005.

[9] S. H. Lim, "Study on current limiting characteristics of SFCL with two trigger current levels," Physica C, vol. 470, pp. 1631-1635, Nov. 2010.

[10] Tae-Hee Han, Sung-Hun Lim, "Analysis on Current Limiting Characteristics of a Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) with a Peak Curmt Limiting Function," KIEEME, vol. 24, no. 1, pp. 47-51, Jan. 2011.

[11] S. H. Lim, I. K. You, and J. C. Kim, "Study on Peak Current Limiting Characteristics of a Flux-Lock Type SFCL Using Its Third Winding," IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 21, no. 3, pp. 1275-1279, Jun. 2011.

[12] Sung-Hun Lim, Seokcheol Ko, and Tae-Hee Han, "Analysis on current limiting characteristics of a transformer type SFCL with two triggering current levels," Physica C, vol. 484, pp. 253-257, Jan. 2013.

[13] S. C. Ko, T. H. Han, and S. H. Lim, "Study on peak current limiting characteristics of a flux-lock type SFCL with two magnetically coupled circuits," Physics Procedia, vol.45, pp.305-308, 2013.

[14] 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.

◆ 저자소개 ◆



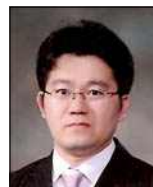
고석철(高錫喆)

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 송실대학교 전기공학부 부교수.