

# 2차회로의 수에 따른 하이브리드형 초전도 한류기의 동작 특성

論 文  
55A-2-3

## Characteristics of Hybrid-Type SFCL by the Number of Secondary Windings with YBCO Films

趙 鎔 善\* · 崔 孝 祥\* · 朴 炯 旻\*

(Yong-Sun Cho · Hyo-Sang Choi · Hyoung-Min Park)

**Abstract** - We investigated the characteristics of the hybrid-type superconducting fault current limiter (SFCL) by the number of secondary windings. The SFCL consists of a transformer, which has a primary winding and several secondary windings with serially connected YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> films. In order to increase the capacity of the SFCL, the serial connection between each current limiting unit is necessary. Resistive-type SFCL has a difficulty in quenching simultaneously between the units due to slight differences of their critical current densities. The hybrid-type SFCL could achieve the simultaneous quenching through the electrical isolation and the mutual flux linkage among the units. We confirmed that the capacity of the SFCL could be increased effectively through the simultaneous quenching among the units. In addition, the power burden of the system could be reduced by adjusting the number of secondary windings. We will investigate the method to increase the capacity through serial and parallel connections among current limiting units.

**Key Words** : 하이브리드형 초전도 사고전류제한기, 전력부담, 동시켄치, 2차권선의 개수

### 1. 서 론

현재 전력 수요의 증가로 인해 계통의 사고시 사고전류의 크기는 급격히 증가하고 있는 추세이다. 이로 인해 전력계통의 보호기기들은 큰 차단내력을 필요로 하게 되었다. 이에 대한 여러 대응 방안들이 모색되고 있으나 경제성, 신뢰성 등의 문제들이 뒤따르고 있다. 이러한 상황에서 초전도 한류기의 등장은 현재 전력계통의 사고전류 문제점을 해결할 수 있는 가장 최선의 해결방안으로 급부상하게 되었다. 사고전류를 빠르게 제한하는 초전도 한류기의 개발은 차단기의 용량증대 효과, 보호 기기들의 차단내력 향상 등의 효과를 가져 올 수 있다[1]-[3].

초전도 한류기에는 저항형, 자속구속형, 하이브리드형, 차폐유도형 등 여러 종류가 있으며, 현재 여러 나라에서 활발히 연구 중에 있다. 초전도 소자의 영저항 특성을 이용하는 저항형 한류기는 매우 간단한 구조를 가지고 있다. 그러나 초전도 소자의 동시켄치 문제와 용량 증대 문제를 가지고 있다. 동시켄치 문제는 초전도 소자의 미소한 임계전류밀도의 차이로 인해 발생한다. 이러한 차이는 초전도 소자의 제조 공정상 불가피한 문제이다. 용량 증대 문제는 이러한 초전도 소자의 직·병렬연결로 인한 동시켄치 문제로 인해 발생한다[4]-[9].

본 논문에서 제시한 하이브리드형 SFCL은 1차권선과 초전도 소자를 갖는 2차권선으로 구성된 변압기를 이용하였다. 하이브리드형 SFCL은 사고시에 1·2차 권선의 인덕턴스 비로 인해 유도된 2차 전류에 의해 초전도 소자가 켄치되어 사고 전류를 제한하게 된다.

본 논문에서는 하이브리드형 사고전류제한기를 구성하고 있는 변압기의 2차권선 회로수를 증가시켜 사고 전류의 제한 등급과 초전도 소자의 전력 부담에 대해 저항형 SFCL과 비교하여 분석하였다.

### 2. 실 험

#### 2.1 하이브리드형 초전도 한류기의 원리

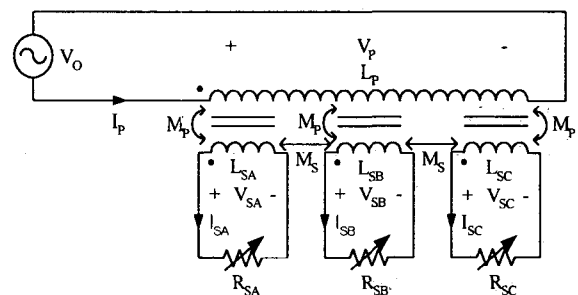


그림 1. 3개의 2차 회로를 갖는 하이브리드형 SFCL의 등가회로도

Fig. 1. Equivalent circuit of the hybrid-type SFCL with three secondary windings

\* 교신저자, 正會員 : 朝鮮大 工大 電氣工學科 助敎授 · 工博  
E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

\* 學生會員 : 朝鮮大 工大 電氣工學科 碩士課程  
接受日字 : 2005年 11月 17日  
最終完了 : 2005年 12月 16日

하이브리드형 SFCL은 1차권선과 초전도 소자가 직렬로 연결된 2차 권선으로 이루어진 변압기의 형태이다. 사고전에는 2차측에 연결된 초전도 소자의 저항이 0이기 때문에 선로 전류( $I_P$ )는  $I^2R$  손실없이 흘릴 수 있다. 사고후에는 2차 권선의 인덕턴스 비에 의해 유도된 전류( $I_{SA}$ ,  $I_{SB}$ ,  $I_{SC}$ )로 인해 초전도 소자가 켜치되어 사고전류를 제한하게 된다.

그림 1은 3개의 2차회로를 갖는 하이브리드형 사고전류제한기의 등가회로도를 나타낸 것이다.

$L_P$ 는 변압기 1차측 인덕턴스를 나타내며,  $L_{SA}$ ,  $L_{SB}$ ,  $L_{SC}$ 는 2차측 회로의 인덕턴스를 각각 나타내며  $L_S$ 로 동일하다.  $R_{SA}$ ,  $R_{SB}$ ,  $R_{SC}$ 는 초전도 소자에서 발생하는 저항을 나타내며,  $I_{SA}$ ,  $I_{SB}$ ,  $I_{SC}$ 는 2차측 회로에 흐르는 전류를 각각 나타낸다.  $M_P$ 는 1차권선과 2차권선 사이의 상호 인덕턴스로 9.08mH이며,  $M_S$ 는 2차권선간의 상호 인덕턴스로서 3.5mH이다. 이러한 상호 인덕턴스는  $k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$ 에 의해서 계산할 수 있다.

변압기의 1차측과 2차측이 서로 자기누설자속이 없고 상호자속만 존재하며 결합계수( $k$ )가 1이며 초전도 소자에 흐르는 전류( $I_{SA}$ ,  $I_{SB}$ ,  $I_{SC}$ )가  $I_S$ 로 동일하다고 가정하였을 때, 다음 식 (1), (2), (4), (5), (7), (8)과 같이 2차측 회로의 개수에 따라 제한되는 사고전류의 크기( $I_S$ )와 초기에 제한되는 전체 임피던스( $Z_{lim}$ )를 나타낼 수 있다.

1. 1개회로의 2차권선을 갖는 하이브리드형 SFCL

$$I_S = \frac{-j\omega M_P}{R_{SC} + j\omega L_S} \cdot I_P \quad (1)$$

$$Z_{lim} = \frac{V_0}{I_P} = \frac{\omega^2 L_P L_S + j\omega L_P R_{SC} - \omega^2 M_P^2}{R_{SC} + j\omega L_S} \quad (2)$$

$$I_{lim} = \frac{L_S}{-M_P} \cdot I_C \quad (3)$$

2. 2개회로의 2차권선을 갖는 하이브리드형 SFCL

$$I_S = \frac{-j\omega M_P}{R_{SC} + j\omega(L_S + M_S)} \cdot I_P \quad (4)$$

$$Z_{lim} = \frac{V_0}{I_P} = \frac{\omega^2 L_P(L_S + M_S) + j\omega L_P R_{SC} - 2\omega^2 M_S^2}{R_{SC} + j\omega(L_S + M_S)} \quad (5)$$

$$I_{lim} = \frac{L_S + M_S}{-M_P} \cdot I_C \quad (6)$$

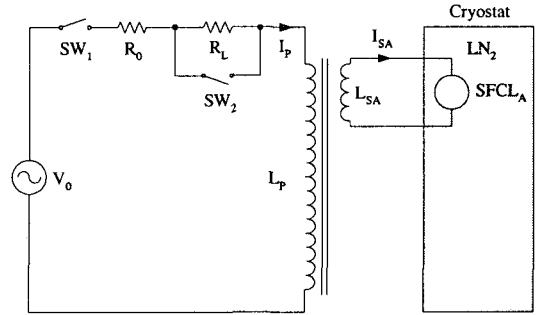
3. 3개회로의 2차권선을 갖는 하이브리드형 SFCL

$$I_S = \frac{-j\omega M_P}{R_{SC} + j\omega(L_S + 2M_S)} \cdot I_P \quad (7)$$

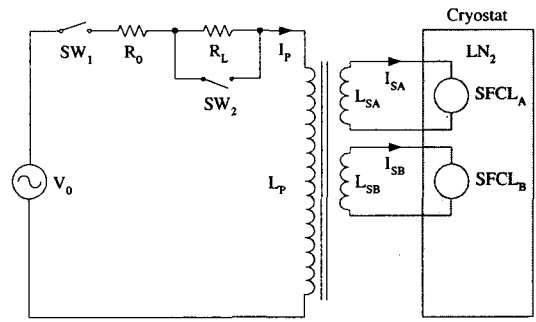
$$Z_{lim} = \frac{V_0}{I_P} = \frac{\omega^2 L_P(L_S + 2M_S) + j\omega L_P R_{SC} - 3\omega^2 M_S^2}{R_{SC} + j\omega(L_S + 2M_S)} \quad (8)$$

$$I_{lim} = \frac{L_S + 2M_S}{-M_P} \cdot I_C \quad (9)$$

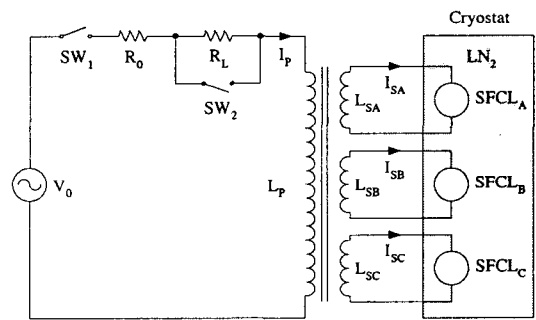
위의 식에서 알 수 있듯이 2차측 회로의 개수가 증가할수록 2차측 권선들 간에 상호 쇄교하는 자속  $M_S$ 가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것으로 식 (2), (5), (8)을 통해 사고시



(a)



(b)



(c)

그림 2. 2차측 회로의 증가에 따른 하이브리드형 SFCL의 실험회로도

(a) 1개의 2차측 회로, (b) 2개의 2차측 회로, (c) 3개의 2차측 회로

Fig. 2. Experimental circuits of the hybrid-type SFCL according to increase of secondary windings (a) one circuit, (b) two circuits, (c) three circuits

표 1. 1·2차 코일과 초전도 소자의 설계파라미터  
 Table 1. Design parameters of HTSC thin films, primary and secondary windings

Parameter		Values		
1·2차 권선의 턴수 (N <sub>1</sub> :N <sub>2</sub> )	1차권선	63[Turn]		
	2차권선	21[Turn]		
초전도 소자의 임계전류값 (I <sub>c</sub> )		SFCL A	SFCL B	SFCL C
		24.6[A]	24.4[A]	22.5[A]

전체임피던스의 크기가 커지므로 제한되는 사고전류의 크기가 감소한다는 것을 식 (1), (4), (7)을 통해 알 수 있다. 2차 권선의 증가에 따른 하이브리드형 SFCL에서 사고발생 후 초전도 소자에 흐르는 전류(I<sub>SA</sub>, I<sub>SB</sub>, I<sub>SC</sub>)가 임계전류 (I<sub>c</sub>)에 도달하였을 때의 초기 제한전류를 I<sub>ini</sub>라고 정의하였을 때, 식 (1), (5), (7)에 R<sub>sc</sub>=0, I<sub>s</sub>=I<sub>c</sub>, I<sub>p</sub>=I<sub>ini</sub>를 대입하면 다음 식

(3), (6), (9)와 같이 유도할 수 있다. 이 식을 통해서 2차권선의 인덕턴스(Ls)와 2차측 권선들 간의 상호 쇄교자속의 크기(Ms)에 따라 초기 제한되는 사고전류의 크기를 조절할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

2.2 실험 방법

그림 2는 2차측 회로의 증가에 따른 실험회로도를 나타낸 것이다. 여기서 인가전압 V<sub>0</sub>는 200/√3V<sub>rms</sub>로 고정시켰으며, I<sub>p</sub>, I<sub>SA</sub>, I<sub>SB</sub>, I<sub>SC</sub>는 1차권선과 초전도 소자를 갖는 2차 권선에 흐르는 전류이다. SW<sub>1</sub>을 통해 선로에 전압을 인가하고 SW<sub>2</sub>로 5주기 동안 0도 사고를 모의하였다. R<sub>0</sub>와 R<sub>L</sub>는 각각 선로전류를 측정하기 위한 1Ω저항과 부하저항 50Ω을 나타낸다. 실험에 사용한 초전도 소자는 직경 2inch의 YBCO박막을 사용하였으며 상세한 제원은 참고문헌 [7]에 나타내었으며, 이들의 임계전류 값은 다음 표 1과 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

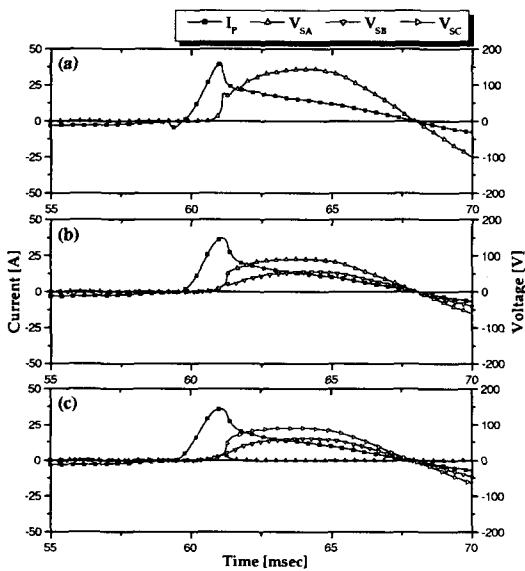


그림 3. 초전도 소자의 증가에 따른 저항형 SFCL의 전류 제한 파형

(a) 1개의 초전도 소자를 연결한 저항형 SFCL의 전류제한 파형, (b) 2개의 초전도 소자가 직렬 연결된 저항형 SFCL의 전류제한 파형, (c) 3개의 초전도 소자가 직렬 연결된 저항형 SFCL의 전류제한 파형

Fig. 3. Fault current limiting curves of resistive-type SFCL according to the number of the serial connection for three superconducting units

(a) Waveforms for the connection composed of a superconducting unit, (b) Waveforms for serial connection composed of two superconducting units, (c) Waveforms for serial connection composed of three superconducting units

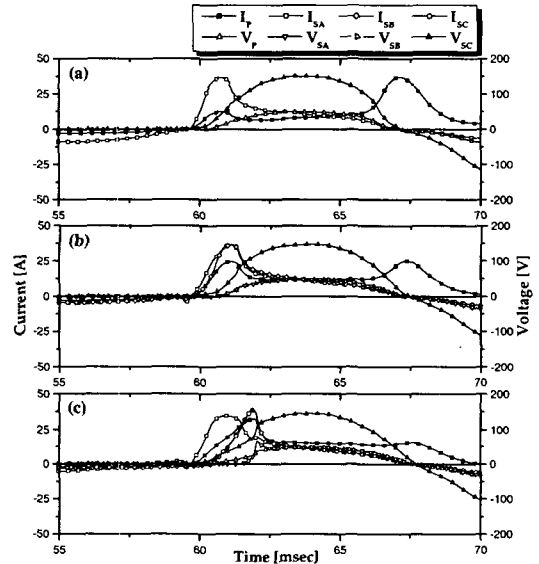


그림 4. 2차측 회로의 증가에 따른 하이브리드 SFCL의 전류제한 파형

(a) 1개 회로를 가진 하이브리드형 SFCL의 전류제한 파형, (b) 2개 회로를 가진 하이브리드형 SFCL의 전류제한 파형, (c) 3개 회로를 가진 하이브리드형 SFCL의 전류제한 파형

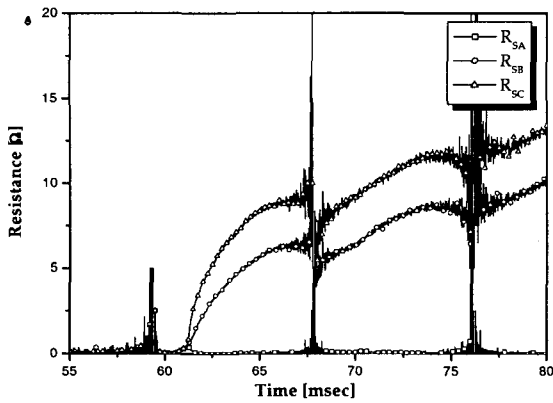
Fig. 4. Fault current limiting curves of hybrid-type SFCL according to the number of the secondary windings for three superconducting units

(a) The curves of the secondary winding with a superconducting unit, (b) The curves of the secondary windings with two superconducting units, (c) The curves of the secondary windings with three superconducting units

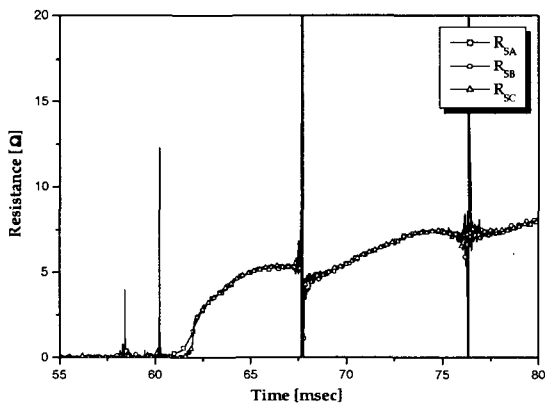
하이브리드형 SFCL의 특성을 분석하기 위하여 1차권선

과 3개의 2차권선의 회로를 가진 변압기를 제작하였다. 1차 권선은 63턴으로 하였고, 2차회로가 증가하면서 2차권선도 21턴씩 증가시켰다. 초전도 소자 3개의 직렬연결에 따른 저항형 SFCL의 실험은 하이브리드형 SFCL의 비교 자료를 얻기 위해 수행하였다.

그림 3은 저항형 SFCL에서 전류제한 파형으로써 초전도 소자 3개를 직렬로 연결하면서 실험한 전류제한 파형이다. 초전도 소자의 수가 증가하면서 초전도 소자의 켄치가 불규칙하게 발생하여 초전도 소자에서 발생하는 전압이 일정하지 않다는 것을 그래프를 통해 알 수 있었다. 이것은 초전



(a)



(b)

그림 5. 저항형과 하이브리드형 SFCL의 초전도 소자에서 발생하는 저항의 비교 파형

(a) 저항형 SFCL의 초전도 소자에서 발생하는 저항곡선, (b) 하이브리드형 SFCL의 초전도 소자에서 발생하는 저항곡선

Fig. 5. The resistance curves generated in the superconducting units of resistive and hybrid-type SFCL (a) The resistance curves generated in three superconducting units of resistive-type SFCL, (b) The resistance curves generated in three superconducting units of hybrid-type SFCL

도 소자의 임계전류 밀도(Ic)의 차이로 인해 켄치시 발생되는 초전도 소자의 저항 값이 다르기 때문이라는 것을 그림 5(a)를 통해 알 수 있다. 또한 초전도 소자 SFCL A에서는 전압  $V_{SA}$ 가 거의 발생하지 않았다. 그러므로 켄치가 발생한 초전도 소자(SFCL B, SFCL C)의 전력 부담은 가중되고 전압도 더욱 크게 발생하게 되었다.

그림 4는 변압기 2차측 회로의 증가에 따른 하이브리드형 SFCL의 제한되는 전류와 전압의 파형을 나타낸 것이다.

저항형 SFCL과는 달리 하이브리드형 SFCL은 변압기의 2차측 회로가 증가하면서 초전도 소자가 동시에 켄치가 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 켄치시 발생하는 초전도 소자의 전압과 저항이 거의 같은 값을 갖게 된다. 3개의 2차측 회로를 갖는 하이브리드형 SFCL의 소자발생전압은 각각 47, 66, 66V로써 저항형에서 3개의 초전도 소자의 직렬연결에 따른 발생전압인 15, 59, 89V와 비교하여 그 차이가 많이 줄었다. 이것은 변압기 1·2차측의 상호유도원리에 의해 2차측 회로들간에 켄치에 따른 전류분배가 발생되기 때문이다.

그림 3에서 저항형 SFCL의 초기 제한되는 사고전류의 피크값( $I_p$ )은 초전도 소자의 직렬연결에 따라 39.5, 37.5, 36.2 A로써 거의 비슷한 제한 특성을 가진다. 그러나 그림 4에서 하이브리드형 SFCL의 초기 제한되는 사고전류의 피크값( $I_p$ )은 변압기의 2차측 회로의 증가에 따라 각각 12.4, 24.5, 32.4A로써 저항형 초전도 한류기보다 더 큰 폭으로 사고전류를 제한하고 있음을 확인하였다. 하이브리드형 SFCL은 변압기의 상호유도원리를 이용하기 때문에 저항형 SFCL보다 사고 전류의 제한에 더 유리하다는 것을 알 수 있었다.

저항형 SFCL에서 초전도 소자의 켄치시 발생하는 저항 값의 차이가 많이 난다는 것을 그림 5을 통해서 알 수 있다. 3개의 초전도 소자를 연결한 그림 5(a)의 저항형 SFCL의 저항 파형을 보면 초전도 소자 1개가 켄치되지 않은 것을 볼 수 있다. 저항형 SFCL의 경우 초전도 소자를 직렬로 연결할수록 불규칙적인 켄치가 발생하여 전력 부담의 불균형이 이루어진다는 것을 알 수 있다. 그러나 2차측 회로의 증가에 따른 하이브리드형 SFCL의 경우 그림 5(b)와 같이 사고시 초전도 소자가 동시 켄치되므로 발생하는 저항이 같은 값을 나타내고 있다. 이처럼, 초전도 소자의 동시 켄치는 초전도 소자의 전력 부담을 균일하게 분담시켜 초전도 소자간의 전력 부담을 최소화시킨다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 변압기의 구조를 가진 하이브리드형 SFCL의 운전 특성을 저항형 SFCL과 비교하여 분석하였다. 하이브리드형 SFCL은 변압기의 상호유도원리를 이용하기 때문에 사고시 2차측 회로간의 전류분배를 통하여 초전도 소자의 동시켄치를 유도하게 된다. 저항형 SFCL과 비교하여 하이브리드형 SFCL이 초전도 소자의 동시 켄치에 더 유리하다는 것을 확인하였으며, 초전도 소자의 저항 또한 같은 값으로 발생된다는 것을 확인하였다. 저항형 SFCL의 경우 초전도 소자의 불규칙 켄치로 인해 초전도 소자의 전력 부담 불균형이 발생하지만, 하이브리드형 SFCL은 초전도 소자의 동시켄치로 인해 초전도 소자의 전력 부담이 균형을 이루어 전력 부담이 최소화된다는 것을 확인하였다.

**감사의 글**

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2005-B-145) 주관으로 수행된 과제임.

**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, p. 27-33, 2001.
- [2] V. Meerovich, V. Sokolovsky, J. Bock, S. Gauss, S. Goren and G. Jung, "Performance of an inductive fault current limiter employing BSCCO superconducting cylinders," IEEE Trans. Appl. Superconduct., Vol. 9, p. 4666-4676, 1999.
- [3] H.-S. Choi, H.-R. Kim, O.-B. Hyun, and S. - J. Kim, "Quench properties of Y-Ba-Cu-O films after overpowering quenches," IEEE Trans. Appl. Superconduct., Vol. 11, p. 2418-2421, 2001.
- [4] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Krämer, P. Kummeth, H. W. Neu müller and S. Fischer, "Resistive current limiters with YBCO films," IEEE Trans. Appl. Superconduct., Vol. 7, pp. 828-831, 1997.
- [5] 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, p. 1833-1838, 2002.
- [6] S.-H. Lim, H.-S. Choi, and B.-S. Han, "Fault current limiting characteristics due to winding direction between coil 1 and coil 2 in a flux-lock type SFCL," Physica C. Vol. 416, p. 34-42, 2004.
- [7] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, "15kVA급 박막형 초전도 전류제한기의 한류특성," 전기전자재료학회 논문지, 13권, 12호, p. 1058, 2000.
- [8] 김혜림, 현옥배, 최효상, 황시돌, 김상준, "저항형 초전도 전류제한기 한류특성," 전기전자재료학회 논문지, 13권, 4호, p. 1058-1062, 2000.
- [9] 김태중, 강형구, 고태국, "유도형 고온초전도 한류기용 prototype 직류 리액터의 설계 및 제작", 전기전자재료학회논문지, 16권, 12호, p. 1292, 2003.

**저 자 소 개**



**조 용 선 (趙 鎔 善)**

1980년 1월 15일생, 2005년 조선대학교 전기공학과 졸업, 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 062-230-7054

Fax : 062-230-7020

E-mail : cys5144@hotmail.com



**최 효 상 (崔 孝 祥)**

1966년 2월 21일생, 1989년 전북대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2003년~한전 전력연구원 선임연구원, 현재 조선대학교 전기공학과 교수.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr



**박 형 민 (朴 炯 旻)**

1978년 4월 12일생, 2003년 조선대학교 전기공학과 졸업, 2004~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 062-230-7054

Fax : 062-230-7020

E-mail : kakanova@naver.com