

# YBCO소자의 연결방법에 의한 자속구속형 초전도 한류기의 켄치특성의 향상

論 文

57P-3-20

## Improvement of Quench Properties of a Flux-Lock Type Superconducting Fault Current Limiter by the Connection Method of YBCO Elements

鄭壽福\* · 朴炯旼\*\* · 崔孝祥†

(Soo-Bok Chung · Hyoung-Min Park · Hyo-Sang Choi)

**Abstract** - We investigated the quench characteristics of a flux-lock type superconducting fault current limiter (SFCL) depending on the methods of the serial and parallel connections between the superconducting elements. The flux-lock type SFCL consists of two coils. The primary coil is wound in parallel to the secondary coil through an iron core, and the secondary coil is connected to the superconducting elements in series and parallel. In this paper, the analyses of voltage, current, and resistance of the superconducting elements connected in serial and parallel were performed to increase the power capacity of the flux-lock type SFCL. A part of the superconducting elements was not quenched in 2×2 serial connection between the elements and then the power burden of the quenched elements was increased. However the elements with 2×2 parallel connection was all quenched. This means that the power burden of each superconducting element can be reduced under the same conditions. We found that 2×2 parallel connection was more profitable for the current limiting effects and the increase of the power capacity.

**Key Words** : The Flux-Lock Type SFCL, Serial and Parallel Connections, Superconducting Element, Power Capacity

### 1. 서 론

1911년에 온네스에 의하여 물체의 영 저항 특성을 갖는 초전도 성질이 발견된 이후 선진 외국에서는 연구를 꾸준히 계속하여 왔다. 그 결과 1986년에 액체질소 온도인 77K를 넘는 고온 초전도체가 발견되어 초전도 연구에 일대 혁신을 가져왔다. 초전도의 기술은 초전도 전동기, 초전도 전력케이블, 초전도 변압기, 초전도 한류기등 여러 분야에서 활발하게 적용되고 있다[1]-[6]. 그중에서도 초전도 한류기는 국내 전력계통에 사고가 발생하였을 시 고장전류를 저감할 수 있는 이상적인 한류기이다. 초전도 한류기의 특징은 정상시에 임피던스가 제로이고 사고시 초전도의 켄치특성에 의하여 고 임피던스가 발생한다. 또한 사고전류에 대하여 빠른 동작 및 회복시간을 갖는 신개념의 보호기기이다. 다양한 종류의 초전도 한류기들 중 자속구속형 초전도 한류기는 영저항 특성을 이용하는 것으로 저항형 초전도 한류기로 볼 수 있다. 자속구속형 한류기는 결선방향과 인덕티스 조절등의 설계 구조적인 장점으로 인해 사고 발생시 고장 전류가 분담되어 초전도 소자의 부담이 적어짐에 따라 기존의 저항형 한류기보다 사고시 동작특성이 우수하였다. 또한, 철심에 감

겨진 리액터의 인덕티스를 조정하여 고장전류 크기를 조절할 수 있는 장점이 있다[7]-[9]. 자속구속형 초전도 한류기를 전력계통에 적용하기 위해서는 전압용량과 전류용량의 증대를 위하여 초전도 소자의 직·병렬연결이 필수적이다. 병렬연결은 전류재분배로 용량증대에 큰 문제가 없으나 직렬연결인 경우 개별 초전도 소자간에 약간의 켄치특성이 차이가 발생하기 때문에 켄치 불균일의 문제가 있다. 본 논문에서는 자속구속형 초전도 한류기의 용량증대를 위하여 초전도 소자를 2×2 직렬우선 병렬연결과 2×2병렬우선 직렬연결을 통하여 초전도 소자 연결구조에 따른 켄치특성을 비교 분석하였다.

### 2. 실 험

#### 2.1 자속구속형 한류기의 실험방법

그림 1은 초전도 소자 4개의 직·병렬 연결조합에 따른 실험회로도를 나타내고 있다.  $R_{in}$ 은 전압변화를 측정하기 위한 표준저항 1Ω이며, 부하저항  $R_L$ 은 시스템에서 정상상태와 단락상태의 부하를 모의하기 위해 선로에 연결하였으며 그 값은 50Ω으로 하였다. 1차권선과 2차권선을 감극으로 결선한 후 그림 1에서 스위치  $SW_1$ 을 닫아 회로에 전압을 인가했다. 회로에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하지 않았기 때문에 자속구속형 고온초전도 한류기는 단락선로처럼 동작하게 된다. 스위치  $SW_2$ 를 닫아 단락사고를 발생시키면 고온초전도 소자에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하게 되고 켄치가 발생한다. 이때 회로에 흐르는 선로전류( $I_{FCL}$ ), 1차 권선에 흐르는 전류( $I_1$ ), 초전도소자에 흐르는 전류( $I_2$ ), 1

\* 正 會 員 : 朝鮮大學校 電氣工學科 教授

\*\* 正 會 員 : 朝鮮大學校 電氣工學科 博士課程

† 교신저자 正會員 : 朝鮮大學校 電氣工學科 助教授 · 工博

E-mail: hyosang@chosun.ac.kr

接受日字 : 2008年 5月 7日

最終完了 : 2008年 5月 22日

2차권선의 양단전압( $V_1, V_2$ )과 초전도소자 양단전압( $V_{sc}$ )을 측정하였다. 1, 2차권선의 턴수비는 182:36으로 하였고 전원 전압은  $240\sqrt{2}$  V로 인가하였다. 차단기가 5주기 안에 동작하는 것을 감안하여 사고 각 0도에서 사고주기를 5주기로 설정하여 실험하였다. 그림 1을 통해서 전압과 전류의 관계식을 다음 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_1 = V_2 + V_{sc} \quad (1)$$

$$I_{FCL} = I_1 + I_2 \quad (2)$$

변압기 1, 2차측의 권선에서 누설 인덕턴스가 없다고 가정하고 초전도 소자에서 발생하는 합성저항이  $R_{sc}$ 라 할 때, 전체 임피던스는  $Z_{FCL}$ , 1차측 전류  $I_1$ 과 초전도 소자에 흐르는 전류  $I_2$ 를 그림 1의 실험회로도로부터 다음 식(3),(4),(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega L_1 R_{sc}}{j\omega L^2 + R_{sc}} \quad (3)$$

$$\frac{I_2}{I_{FCL}} = \frac{j\omega(L_1 + \sqrt{L_1 L_2})}{j\omega L^2 + R_{sc}} \quad (4)$$

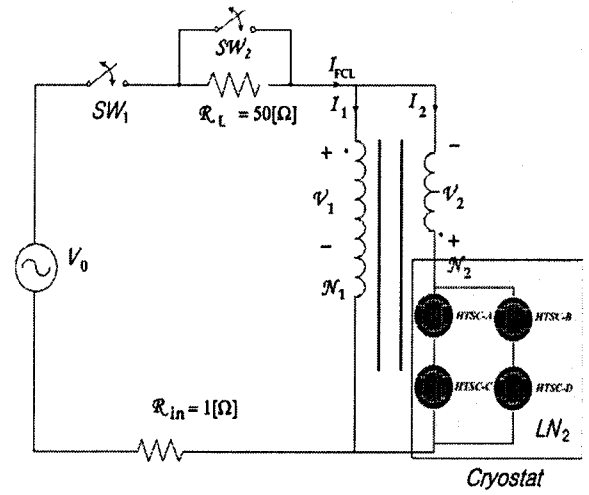
$$\frac{I_1}{I_{FCL}} = \frac{j\omega\sqrt{L_1 L_2} + j\omega L_2 + R_{sc}}{j\omega L^2 + R_{sc}} \quad (5)$$

이때 2x2 직렬우선 연결의  $R_{sc1}$ 과 2x2 병렬우선 연결의  $R_{sc2}$ 는 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다. 식 (6)을 보면 2x2 직렬우선 연결의 경우 초전도 소자 A, B가 직렬로 연결되고 C, D가 직렬로 연결되어 초전도소자의 임계전류 불균형으로 인하여 동시켄치가 발생하지 않을 수 있다. 그러나 식 (7)를 보면 초전도 소자 A, C가 병렬로 연결되고 B, D가 병렬로 연결되어 동시켄치에 유리할 수 있고 모든 초전도 소자가 켄치가 되어 임피던스 값도 직렬우선 연결보다 커질 수 있다는 것을 알 수 있다.

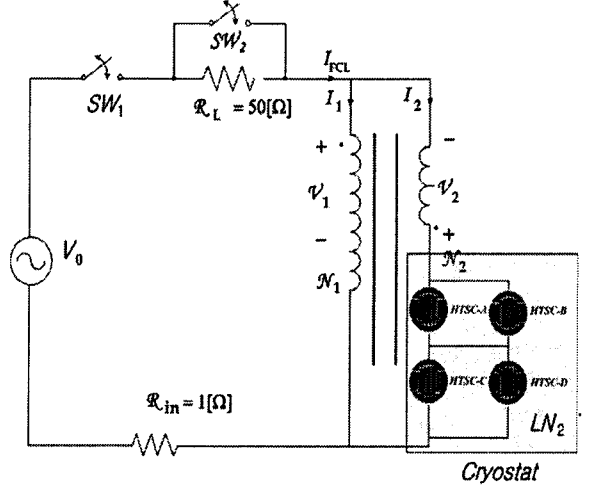
$$R_{sc1} = \frac{(R_{scA} + R_{scB}) \cdot (R_{scC} + R_{scD})}{R_{scA} + R_{scB} + R_{scC} + R_{scD}} \quad (6)$$

$$R_{sc2} = \frac{R_{scA} \cdot R_{scC}}{R_{scA} + R_{scC}} + \frac{R_{scB} \cdot R_{scD}}{R_{scB} + R_{scD}} \quad (7)$$

초전도 한류소자는 직경 2 inch의 합성 사파이어  $Al_2O_3$  기판위에 성장된 두께  $0.3\mu m$ 의  $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 박막을 meander-line으로 설계하였다. 박막은 독일 THEVA사에서 제작하였으며 임계온도와 임계전류밀도는 각각 87~88K와  $2\sim 3MA/cm^2$ 으로 박막전면에서  $\pm 0.5\%$  이내로 균일하였다. YBCO 박막은 제조공정상 불균일성 때문에 생기는 hot spot에서 열이 발생하게 된다. 열의 분산을 위해서 YBCO 위에  $0.1\sim 0.2\mu m$  두께의 금을 증착하였다. 표 1은 초전도 소자의 제원과 이번 실험에 사용한 소자 A, B, C, D의 임계전류 값을 보여주고 있다.



(a)



(b)

그림 1 초전도 소자를 직·병렬연결한 실험회로도  
(a) 2x2 직렬우선조합 (b) 2x2 병렬우선조합

Fig. 1 Experimental circuit of flux-lock type SFCL with secondary Winding connected to the superconducting elements in series and parallel  
(a) 2x2 serial connection between superconducting elements  
(b) 2x2 parallel connection between superconducting elements

표 1 초전도소자의 임계전류 값

Table 1 The Critical Current Values ( $I_c$ ) of Superconducting element

Parameter	HTSC-A	HTSC-B	HTSC-C	HTSC-D
Critical Current Values ( $I_c$ )	19.8 A	19.7 A	18.9 A	19.1A

3. 실험 결과 및 고찰

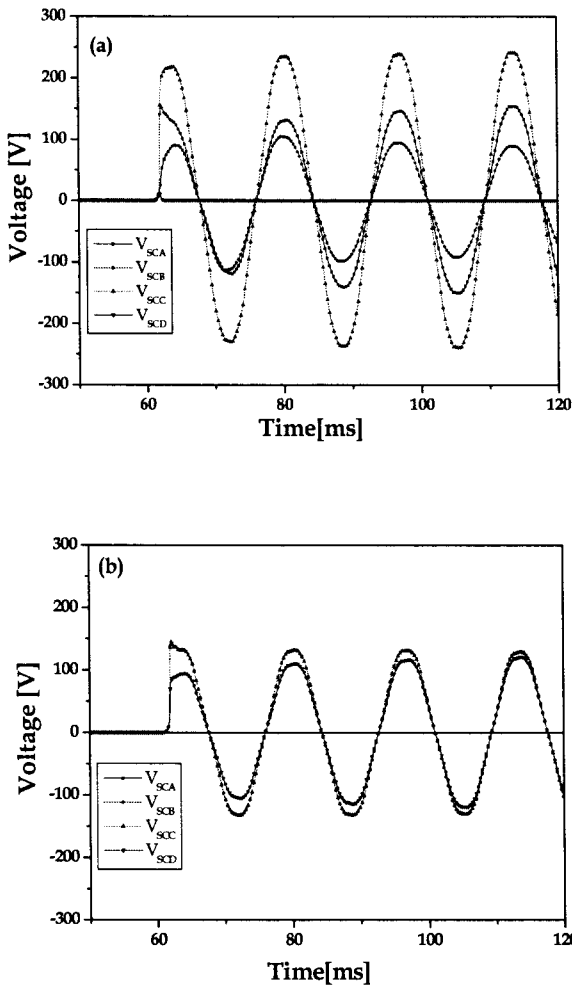


그림 2 초전도 소자 전압특성

(a) 2×2 직렬우선조합 (b) 2×2 병렬우선조합

Fig. 2 Voltage properties of superconducting element

(a) 2×2 serial connection between superconducting elements  
 (b) 2×2 parallel connection between superconducting elements

그림 2는 자속구속형 한류기의 감극결선시 2차측 권선에 초전도 소자 4개를 직·병렬연결 하였을 때 초전도 소자의 전압특성을 보여주고 있다. 그림 2(a)의 2×2 직렬우선조합시 초전도소자 A, B, C는 켄치가 되지만 D소자는 켄치가 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 첫 주기때 초전도 소자 C의 전압 값은 217V<sub>peak</sub>까지 상승하였고 B는 130V<sub>peak</sub>, A는 90V<sub>peak</sub>까지 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 A, B소자간 직렬로 연결되어 두소자가 전류를 분배하여 제한하지만 C, D소자간에 D가 켄치가 발생하지 않아 C소자만 전류를 제한함으로써 C소자에 부담이 증가함을 알 수 있다. 그림2(b)는 2×2 병렬우선조합시 초전도 소자의 전압특성을 나타내고 있다. 초전도소자 A, B, C, D 모두에서 켄치가 발생하는 것을 알 수 있다.

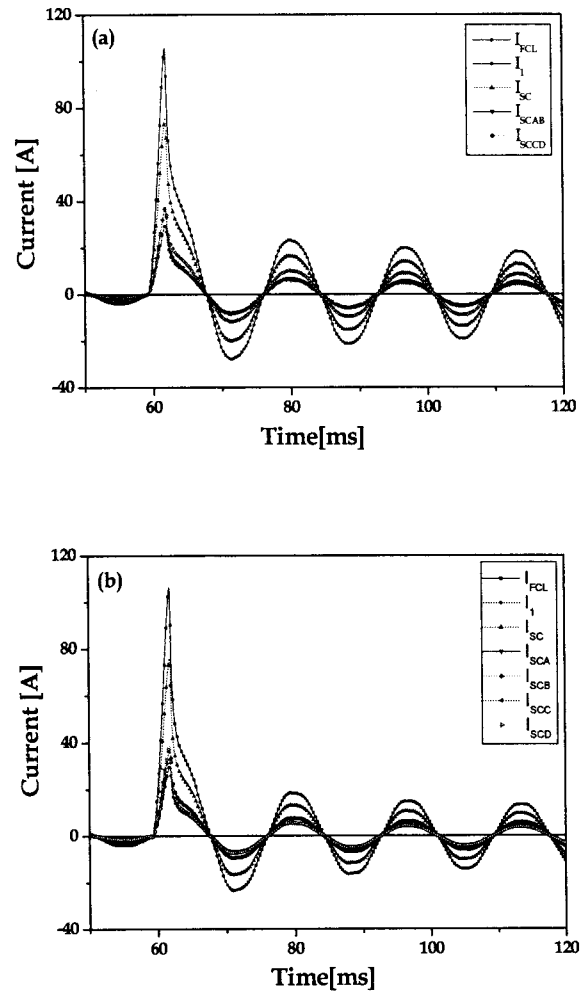


그림 3 선로전류 및 초전도소자 전류특성

(a) 2×2 직렬우선조합 (b) 2×2 병렬우선조합

Fig. 3 Current characteristics of the power line and the superconducting elements

(a) 2×2 serial connection between superconducting elements  
 (b) 2×2 parallel connection between superconducting elements

초전도 소자 A, C의 전압 값은 첫 주기때 132V<sub>peak</sub>까지 상승하였고 초전도 소자 B, D는 95V<sub>peak</sub>까지 상승하였다. 이는 초전도 소자를 병렬우선 연결함으로써 초전도 소자 A, C가 동시켄치되고 초전도 소자 B, D가 동시켄치됨을 알 수 있다. 또한 첫 주기때 초전도소자 A, C와 B, D의 전압피크값의 간격차는 37V<sub>peak</sub>였지만 4주기 이후 간격차는 9V<sub>peak</sub>로써 제한되는 시간이 지남에 따라 전압분배가 양호하게 이루어짐을 알 수 있다. 2×2 병렬우선 연결조합시 2×2 직렬우선 연결조합보다 초전도 소자의 켄치특성이 우수함을 알 수 있고 초전도소자 보호측면과 용량증대시 유리함을 알 수 있다. 그림 3은 선로 및 초전도소자의 전류특성을 나타내고 있다.

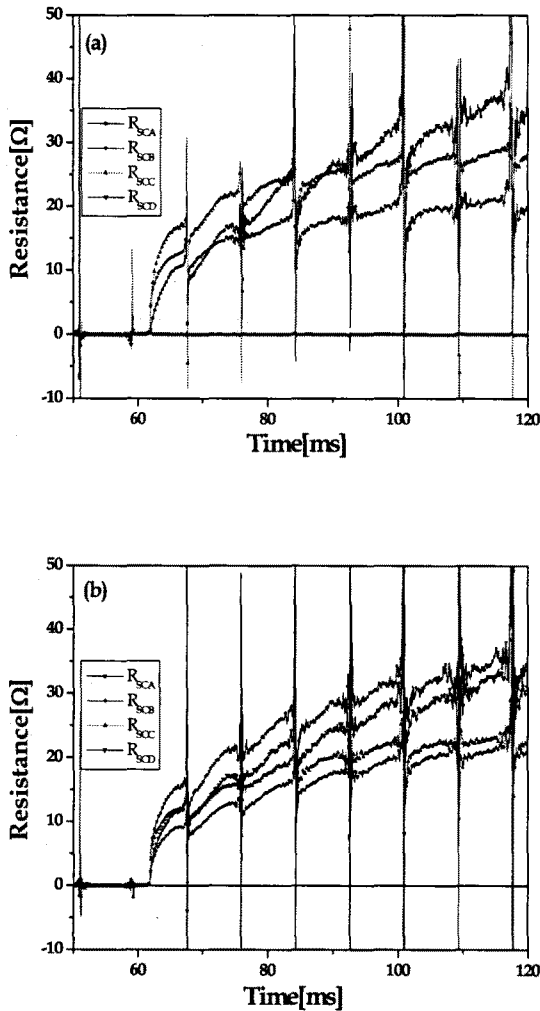


그림 4 초전도 소자 저항특성  
 (a) 2×2 직렬우선조합 (b) 2×2 병렬우선조합  
 Fig. 4 Resistance characteristics of superconducting elements  
 (a) 2×2 serial connection between superconducting elements  
 (b) 2×2 parallel connection between superconducting elements

그림 3(a)를 보면 사고가 발생하였을 때 선로전류가 105A<sub>peak</sub>까지 상승하여 1주기 만에 23A<sub>peak</sub>로 제한하였고 4주기이후에는 18A<sub>peak</sub>로 제한하였다. 초전도소자에 흐르는 전류는 첫 주기에서 37A<sub>peak</sub>까지 상승하지만 1주기 이후에 초전도 소자 A, B에 흐르는 전류는 6A<sub>peak</sub>, 초전도 소자 C, D에 흐르는 전류는 10A<sub>peak</sub>로 제한되어 A, B에 흐르는 초전도 소자전류가 더 낮음을 알 수 있다. 이는 초전도 소자 A, B는 켄치되어 두 소자가 전류를 제한하지만, C, D에 흐르는 전류는 초전도 소자 C만 켄치되어 A, B에 흐르는 전류보다 높아져서 전류제한 효과는 감소함을 알 수 있다.

그림 3(b)는 2×2 병렬우선 연결시 전류특성을 보여주고 있다. 선로전류는 2×2 직렬우선 연결시와 마찬가지로 106A<sub>peak</sub>까지 상승하지만 1주기 만에 18A<sub>peak</sub>로 제한되었고

4주기이후 13A<sub>peak</sub>까지 제한함을 알 수 있다. 이는 2×2 병렬우선 연결시 초전도 소자 4개가 켄치되어 전류를 제한함으로써 2×2직렬우선 연결조합보다 전류제한특성이 우수함을 알 수 있다. 또한 2×2의 직렬우선 연결시 전류제한률은 78%였고 2×2 병렬우선 연결시 전류제한률은 82%로써 수치적으로 평가하여도 병렬우선 연결이 전류를 제한하는데 우수함을 알 수 있다.

그림 4는 초전도 소자 4개의 저항특성을 나타내고 있다. 그림 4(a)에서 2×2 직렬우선연결의 저항특성을 보면 초전도 소자 D는 저항이 발생하지 않아 직렬연결된 초전도 소자 C가 C, D에 흐르는 사고전류 모두를 감당함으로써 사고초기에 소자 A, B보다 높은 저항이 발생하나, 시간이 지남에 따라 소자 A, B가 전류를 제한하기 때문에 점진적으로 초전도 소자 C에 흐르는 전류가 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 4(b)는 2×2 병렬우선 연결의 저항특성곡선인데 초전도 소자 4개가 모두 저항이 발생하는 것을 알 수 있고, 4주기 이후에 초전도 소자 A, D가 C, B보다 저항 값이 높음을 알 수 있다. 2×2 병렬우선 연결이 직렬우선 연결시보다 초전도 소자 4개가 모두 저항이 발생하여 효과적으로 사고전류를 제한 할 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 자속구속형 초전도 한류기의 용량증대 방안을 위하여 감극결선시 초전도 소자를 직·병렬 연결하였을 때 전압과 전류 및 저항특성을 비교분석하였다. 2×2 직렬우선 연결시 전압특성은 초전도 소자 A, B, C는 켄치가 발생하지만 소자 D가 발생하지 않아 소자 C가 사고전류를 감당하여 소자 파손의 우려가 있음을 알 수 있었다. 2×2 병렬우선 연결시 전압특성은 초전도 소자 A, B, C, D에서 켄치가 모두 발생하였고 초전도 소자 피크 값도 2×2 직렬우선 연결시 보다 적음을 알 수 있었다. 이는 2×2 병렬우선 연결이 소자 켄치특성과 소자보호 측면에서 우수함을 의미한다. 사고가 발생하여 초기 사고전류의 피크 값은 비슷하였지만 4주기 이후에 2×2 병렬우선 연결시 2×2 직렬우선 연결시 보다 5A정도 낮아 효과적이었다. 이는 2×2 병렬우선 연결시 전류제한 특성이 보다 우수함을 의미한다. 자속구속형 한류기의 직·병렬 연결조합에 따른 켄치특성 비교분석 결과 2×2 병렬우선 연결이 2×2 직렬우선 연결보다 전류제한 특성, 소자보호 측면에서 우수하기 때문에 용량증대시 유리함을 확인 하였다.

### 감사의 글

이 논문은 2008년도 조선대학교 학술 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

### 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] T. Matsumura, T. Uchii, and Y. Yokomizu, “Development of flux-lock type current limiter with high-Tc superconducting element,” IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 7, pp. 1001-1004, June 1997.

[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, pp. 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] S. Elschner, F. Breuer, M. Breuer, M. Noe, T. Rettelbach, H. Walter, and J. Bock, “Manufacturing and testing of MCP 2212 bifilar coils for a 10 MVA fault current limiter,” IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 13, pp. 1980-1983, June 2003.

[6] 임성훈, 최명호, 이현수, 한병성, “차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성 시뮬레이션”, 전기학회논문지, Vol. 48C, No. 3, pp.173-178, 1999.

[7] 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, No. 1-2, pp. 34-38, 2004.

[8] S. H. Lim, H. G. Kang, H. S. Choi, S. R. Lee, and B. S. Han, “Current limiting characteristics of flux-lock type high-Tc superconducting fault current limiter with control circuit for magnetic field”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 13, No. 2, pp. 2056-2059, 2003.

[9] 박형민, 임성훈, 박충렬, 최효상, 한병성, “자속구속형과 저항형 초전도 전류제한기의 특성비교”, 전기전자재료학회논문지, 18권 4호 pp. 363-369, 2005.

저 자 소 개



**정수복 (鄭壽福)**

1945년 1월 23일생, 1969년 조선대학교 전기공학과 졸업, 1980년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 대한전기학회 광주전남지회지회장, 현재 조선대학교 전기공학과 교수.

Tel : 062-230-7027

Fax : 062-230-7020

E-mail : sbjung@mail.chosun.ac.kr



**박형민 (朴炯旻)**

1978년 4월 12일생, 2003년 조선대학교 전기공학과 졸업, 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 062-230-7054

Fax : 062-230-7020

E-mail : kakanova@naver.com



**최효상 (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, 2006년 대한전기학회 전기설비전문위원회 학술위원장, 2008년 대한전기학회 논문지 P권 편집위원장, 현재 조선대학교 전기공학과 교수.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr