자기장인가에 따른 YBCO 박막형 한류기의 동시퀜치 연구

Studies of Simultaneous Quench of Superconducting YBCO Flims for Fault Current Limiter Under the Influence of Magnetic Fields

†박권배, *이방욱, **강종성, ***오일성, ‡최효상, ‡‡현옥배

K. B. Park, B. W. Lee, J. S. Kang, I. S. Oh, H. S. Choi, O. B. Hyun

Abstract: The resistive falut current limiter (SFCL) is a very attractive device for power networks. But it has a serious problem in using YBCO films for fault current limiter is inhomogeneities caused by imperpect manufacturing. So simultaneous quenches are a difficult problem which elements for current limiting are connected in series for increasing voltage ratings. We investigated extended electric field-current characteristics for current limiting element of YBCO film when 0-130mT magnetic field is applied. And quench characteristics were investigated in over all element and between elements of YBCO films. From the experiments, it was shown that applied magnetic fields using solenoid coil induced uniform quench distribution for over all stripes and simultaneous quench in all elements for current limiting of YBCO film was realized. We have achieved resistive fault current limiter of 1.2kV/20A rating using magnetic field.

1. 서 론

전력계통에서 공급해야될 부하는 점점 증가하고 있으며, 이에 따른 사고전류가 계속 증가하고 있는 추세에 있다. 현재 특별한 경우에 대해 장애발생 억제할 목적으로 일부 상전도 공심리액터를 채용하고 있지만 정상운전시에도 전압강하가 발생되어 교류손실과 크기가 매우 크며, 경제성마저 떨어지는 단점을 가지고 있다. 그러나, 고온초전도체의 개발과 함께 새로운 개념의 초전도 한류기의 개발을 통한 전력계통상의 사고전류 제한을 꾀하고 있다.

초전도 한류기는 정상 운전시에도 임피던스가 없어 손실이 적으며, 단락사고가 발생하면 매우 빠른 속도로 원하는 임피던스를 선로에 투입시켜 사고전류를 효과적으로 제한 할 수 있다. 현재 개발중인 고온 초전도 한류기에는 크게 유도형과 저항형 한류기가 있다. 유도형 한류기는 철심코어 1차측은 상전도 코일로 권선하고 2차측은 링(ring) 모양의 벌크 초전도체를 삽입한 구조로 되어있다. 유도형 한류기는 정상 운전시에 2차측 초전도체는 임계전류이하로 유지하므로 자기차폐로 인해 철심에 자속이 존재하지 않아 매우 작은 임피던스만 존재하게 된다. 그러나 단락사고가 발생하게 되면 초전도체는 임계전류를 초과하게 되어 더 이상 차폐능력을 상실하므로 선로에 커다란 임피던스를 발생시켜 사고전류를 제한한다. ABB는 1996년에 1.2 MVA급 자기차폐 유도형 한류기를 개발하였다. 또한 요즘에는 새로운 개념의 유도형 한류기로 DC reactor 형태의 한류기가 개발중이며, 전력전자 소자인 SCR를 채용하므로 정류형 한류기라고도 부른다. 저항형 한류기는 사고감지 및 스위칭 동작이 일체형이므로 보다 구조가 간단하며 소형 경량화 할 수 있다는 커다란 장점을 지니고 있다. 저항형 한류기는 단락사고시 회로와 직렬로 접속되어 있어 사고전류가 직접 초전도체에 통전된다. 이와 같이 사고전류로 인하여 임계전류를 초과하면 초전도체는 재빨리 퀜치가 되어 수십 Ω의 저항이 발생되어 사고전류를 빠르고 효과적으로 제한할 수 있다. 전형적인 고온초전도 저항형 한류기 재료로는 YBCO 박막 및 후막, Bi-2212, Bi-2223 벌크가 사용되어지고 있다. 저항형 한류기는 소형 경량화에 큰 장점을 가고 있지만 퀜치발생시에 한류소자에 과도한 열발생에 따른 열분산을 해줘야한다는 문제점을 가진다. 또한 전압등급 향상을 위해 반드시 직렬연결하여 제작해야 되므로 한류소자간 동시 퀜치문제는 대단히 중요한 문제로 대두된다. 이와 같이 전압등급 향상을 위하여 병렬저항을 삽입하는 방법, 적절한 직·병렬조합에 의한 동시퀜치 등의 연구를 통하여 이를 극복하고자 많은 연구가 진행되고 있다[1]. 또한 Bi-2223 링(ring) 및 봉(rod)형을 이용한 초전도 한류기에 자기장 및 히터를 이용한 방법을 통하여 소자내에서 균일한 퀜치를 유도하는 방안도 제안되고 있다[2,3].

본 연구에서는 저항형 한류기의 용량증대 있어 가장 문제가 되는 동시퀜치 문제를 해결하고자 직렬연결된 한류소자를 솔레노이드 내부 수직 자기장의 영향 하에 놓이도록 기하학적으로 배치하여 동시퀜치를 꾀하였다. 또한 YBCO 박막형 한류소자에 적합한 무 땜납방식(non-soldering method)의 전류리드를 적용하여 시험하였다. 본 시험에서 자기장을 이용하여 최대 5장의 한류소자를 직렬 연결하여 1.2kV/20A급 한류기를 구현하는데 성공하였다.

2. 샘플 및 실험방법

본 연구에 사용된 샘플 및 시험장치는 그림 1과 같다. 그림 1의 (a)는 YBCO 박막형 한류소자로 2인치 합성 사파이어(Al_2O_3) 기판위에 300nm의 두께로 성

† 정 회 원 : LG산전 전력연구소 연구원
* 정 회 원 : LG산전 전력연구소 선임연구원
** 정 회 원 : LG산전 전력연구소 주임연구원
*** 정 회 원 : LG산전 전력연구소 책임연구원
‡ 정 회 원 : 한전 전력연구원 선임연구원
‡‡ 정 회 원 : 한전 전력연구원 책임연구원
원고접수 : 2002년 03월 30일
심사완료 : 2002년 05월 13일

장시켰으며, 그 위에 열분산 및 YBCO 초전도체를 보호할 목적으로 200 nm 두께의 금을 증착한 것이다. 여기서, 저항형 한류기에 필요한 저항 및 전계강도를 지니기 위해서 meander 와 bi-spiral 패턴으로 식각하여 각각 준비하였다. 그림 1-(a)의 meander 패턴에서 각각의 전압탭(voltage tap)은 단일 한류소자내의 퀜치분포 측정을 위함이며, bi-spiral 패턴은 무유도성으로 식각된 것이다. 그림 1-(b)는 초전도 한류소자와 퀜치가속코일(quench speed-up coil)이 직렬 연결된 기하학적인 형상을 나타낸 것이다. 여기서 퀜치가속코일은 사고전류를 이용하여 자기장을 발생시키며 한류소자가 초전도 상태에서 상전도 상태로 전이하는 속도를 증가시켜주는 역할을 한다. 직렬연결된 한류소자는 퀜치가속코일에 균일한 자기장 영역에 위치시켰으며, 20 A에서 대략 90 mT의 값을 갖는다. 그림 1-(c)는 한류특성 실험을 하기 위한 전체적인 시험회로를 나타낸 것이다. 특히, 자기장의 영향을 받는 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 퀜치특성을 조사하기 위한 것이다.

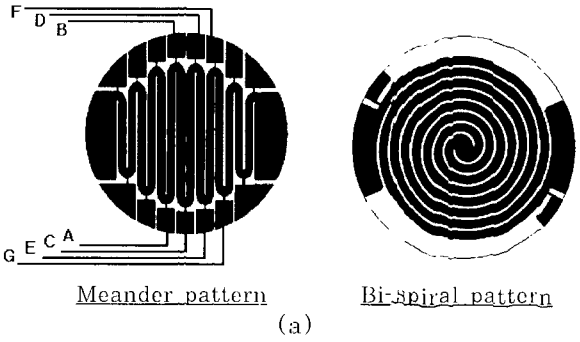

그림 1. 한류소자 및 시험회로 구성도
Fig. 1. Current limiting elements and test circuit

또한 YBCO 박막소자 전류리드로 카본(Carbon)에 구리(Copper)가 합금된 소재를 이용하여 기존의 160 ℃ 저온 땜납재료를 대신하여, 무 땜납방식을 이용하였다. 카본은 열전도 및 전기전도 특성이 우수하며, 열에 의한 변형이 적은 특성 및 화학적 안정도 높으며 정밀가공이 가능하므로 두께가 얇은 박막의 전류 접속리드로서 사용하였다[4].

본 연구에서는 자기장을 인가한 경우에 대하여 단일 한류소자에 대하여 퀜치분포를 조사하였으며, 직렬연결 특성시험에서 2장의 한류소자간 3장의 한류소자간 퀜치 특성을 조사하였으며, meander 패턴의 한류소자를 사용하였다. 그리고 5장의 한류소자간 퀜치특성을 조사하였고 이 경우에 대해서는 bi-spiral 패턴으로 시험하였다. 본 연구에서 사용된 한류소자는 매 시험마다 교체하여 한류소자의 개별특성에 무관하게 자기장하에서 퀜치특성을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 단일 한류소자인 YBCO 박막에 130mT까지의 자기장을 가변하며 인가했을 때 임계전류 및 n value를 나타낸 것이다. 본 실험에 사용된 YBCO 박막형 한류소자는 수직한 자기장이 20 mT이상 인가되면서 임계전류의 감소를 보이며, 130 mT에서는 $I_{c0}(B=0)$의 70 %정도의 대단히 큰 폭으로 감소하였다. 또한 n value값은 37에서 18로 감소하였다. 이는 한류소자에 직렬로 삽입된 코일에 의해 인가되는 90 mT의 자기장의 크기는 상당한 효과를 보일 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 3.는 YBCO 박막형 한류소자에 자장이 인가되지 않는 경우로 그림 1-(c)에서 솔레노이드 코일이 삽입되지 않은 경우에 해당되며, 그림 1-(a)의 6개 stripe에서 퀜치개시 후 전계분포를 조사한 결과이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 C-D stripe에서 가장 먼저 퀜치가 발생을 시작으로 가장 인근한 stripe 순서대로 퀜치가 진행됨을 알 수가 있다. 이것은 한류소자의 길이방향으로 재료의 불균일성이 기인하는 것이다. 냉각조건 및 특성이 가장 열악한 stripe에서 먼저 퀜치가 발생되어 hot spot을 형성하고 오직 열전달 특성에 의존하여 퀜치가 전파됨을 알 수 있다.

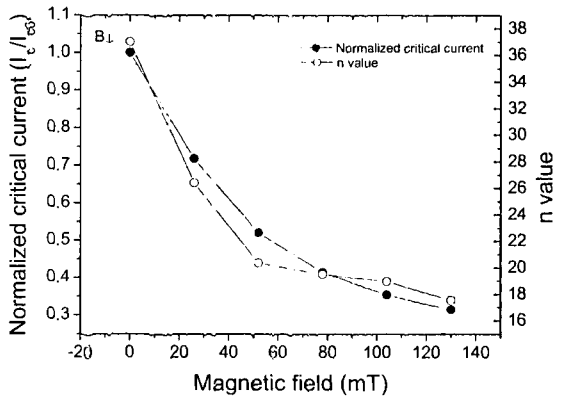

그림 2. 정규화된 임계전류 · n value - 자속밀도
Fig. 2. Normalized critical current · n value vs. magnetic field

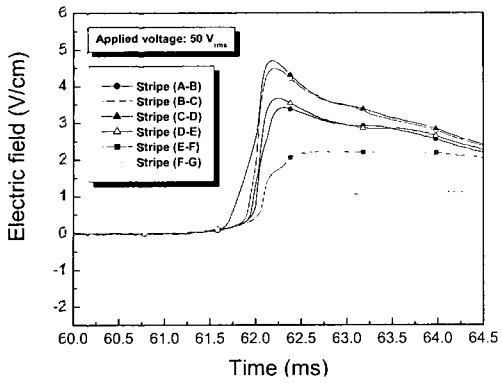

그림 3. 자기장이 없는 경우, 각각 stripe에서 퀜치개시 후 전계분포

Fig. 3. Distribution of electric field in each stripe after quench without magnetic field

그림 4는 YBCO 박막형 한류소자에 자장이 인가된 경우로 그림 1-(c)에서 솔레노이드 코일이 삽입된 경우에 그림 1-(a)의 6개 stripe에서의 퀜치분포를 조사한 결과이다. 그림 4의 결과에서 알 수 있듯이 퀜치개시 후 전체 stripe에서 균일한 전계분포를 갖는다는 것을 알 수가 있다. 이것은 특성이 가장 나쁜 stripe에서 퀜치가 가장 먼저 발생하지만 동시에 수직한 자기장이 한류소자에 인가됨으로써 열에 의한 퀜치의 전달 속도를 급격하게 증가시킴으로서 stripe간에 균일한 퀜치특성을 갖는 것으로 사료된다.

그림 5는 2장의 한류소자를 직렬 연결한 경우, 자기장이 인가되지 않았을 때 한류소자간 퀜치특성을 조사한 결과이다. 그림 5의 결과에서 알 수 있듯이 150 V_{rms}를 인가된 경우에 직렬연결된 한류소자의 퀜치는 한류소자 1에서만이 퀜치가 되었을 뿐, 소자 2는 전혀 퀜치가 되지 않았다. 이와 같이 한류기의 전압등급을 증대시키기 위해서 직렬연결이 불가피하지만, 작은 소자간 개별적인 특성 차에 의해서 비교적 임계전류특성이 떨어지는 한류소자 1만이 퀜치되어 인가되는 전압을 동일하게 분담하지 못하게 된다.

그림 6은 2장의 한류소자를 직렬 연결한 경우, 자기장이 인가된 경우의 결과를 나타낸 것이다. 여기서 사용된 2장의 한류소자는 길이가 서로 다르기에 전계값으로 표현하였다. 그림 5의 결과에서 알 수 있듯이 그림 5의 결과와는 달리 150 V_{rms}가 인가되었을 때 2장의 한류소자 모두가 퀜치됨을 알 수 있었다.

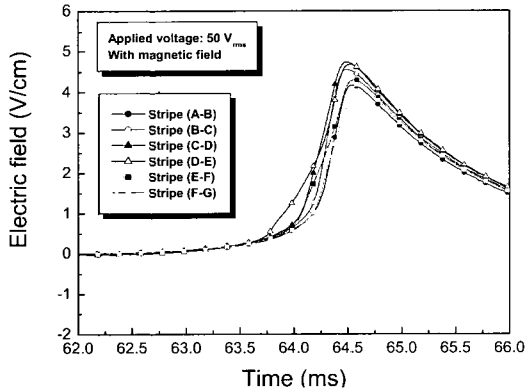

그림 4. 자기장이 인가된 경우, 각각 stripe에서 퀜치개시 후 전계 분포

Fig. 4. Distribution of electric field in each stripe after quench with magnetic field

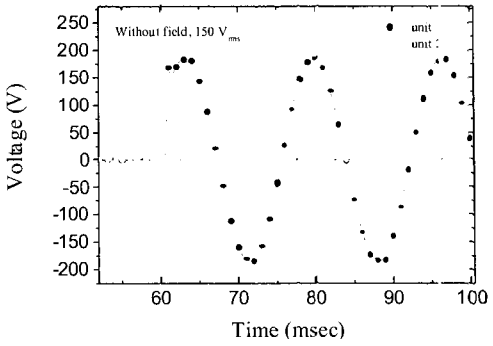

그림 5. 자기장이 없는 경우, 직렬 연결된 2장의 한류소자에서 전압강하

Fig. 5. Voltage drops on two elements for current limiting element connected in series without magnetic field

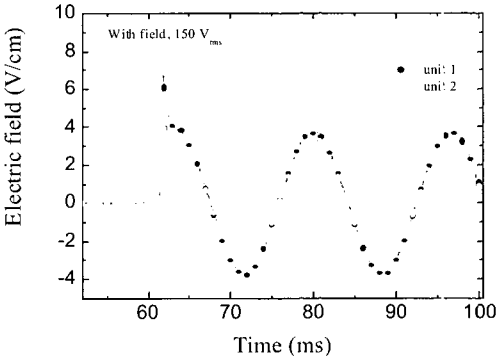

그림 6. 자기장이 인가된 경우, 직렬 연결된 2장의 한류소자에서 전계

Fig. 6. Electric fields on two elements for current limiting element connected in series with magnetic field

그림 7 및 그림 8은 3장의 한류소자를 직렬 연결한 경우, 자기장이 인가되지 않은 경우와 자기장이 인가된 경우에 소자간 퀜치특성을 조사한 결과이다. 여기서, 인가전압은 250 V_{rms}이다. 이는 그림 5 및 6의 결과와 마찬가지로, 자기장이 인가되지 않은 경우 즉, 코일이 직렬로 삽입되지 않은 경우로 한류소자 3만이 퀜치가 되었을 뿐 나머지 소자들은 전혀 반응하지 않았다.

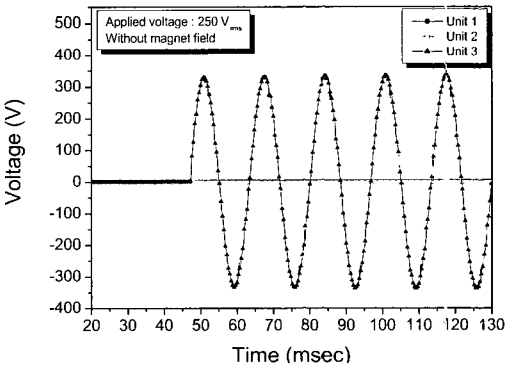

그림 7. 자기장이 없는 경우, 직렬 연결된 3장의 한류소자에서 전압강하

Fig. 7. Voltage drops on three elements for current limiting element connected in series without magnetic field

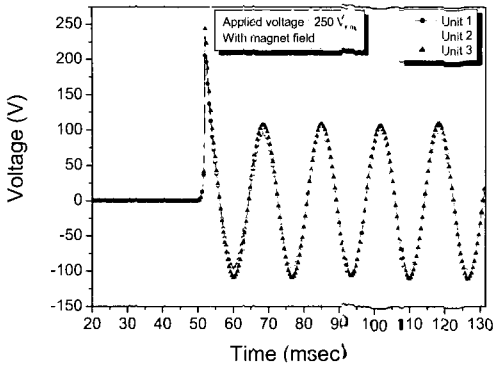

그림 8. 자기장이 인가된 경우 직렬 연결된 세개의 한류소자에서 전압강하

Fig. 8. Voltage drops on three elements for current limiting element connected in series with magnetic field

반면에 자기장이 인가된 경우, 즉 코일이 직렬로 삽입된 경우는 3장의 한류소자 모두가 퀜치가 됨을 알 수 있었으며, 인가 전압이 보다 증가함에 따라서 퀜치 정도도 보다 균일함을 보인다.

그림 9는 자기장이 인가된 경우와 그렇지 않은 경우에 대해서 퀜치이후에 저항성장을 비교한 결과이다. 그림 9의 결과에서 알 수 있듯이 한류소자에 자기장이 인가된 경우가 그렇지 않은 경우에 비해서 저항 성장 속도가 크게 증가하였으며, 빠른 시간 내에 포화됨을 알 수 있다. 이와 같이 임계전류 특성이 나쁜 한류소자에서 먼저 퀜치가 진행됨과 동시에 자기장의 인가는 재빨리 다른 한류소자 마저도 퀜치되게 하므로써 더욱 향상된 저항상승을 가져오고, 이는 동시퀜치에 기인하는 것으로 판단된다.

그림 10 및 11은 5장의 한류소자를 직렬 연결하여 자기장을 인가한 경우 각각 단위소자에서 전압강하 및 전체 전압강하에 대하여 각각 나타낸 것이다. 여기서 사용된 한류소자는 bi-spiral 패턴으로 식각되었으며, 한류소자 1은 300 K에서 금 박막의 저항은 40 Ω이고, 한류소자 2-5번은 대략 47 Ω의 저항값을 갖는 상이한 특성의 한류소자를 사용하였다. 그림 10의 결과도 이전 결과와 동일하게 자기장을 인가되어 5개의 한류소자 모두 퀜치가 됨을 알 수가 있다.

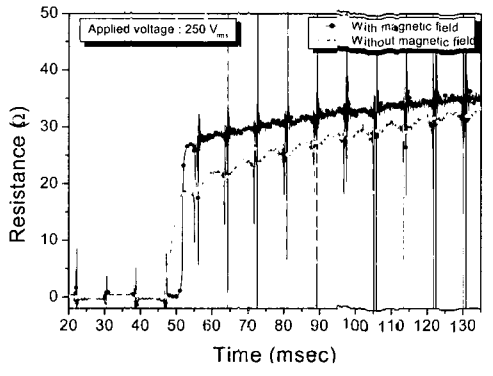

그림 9. 자기장이 인가된 경우 및 자기장이 없는 경우, 저항성장 곡선

Fig. 9. Resistance growth curve when applied magnetic field and without magnetic field

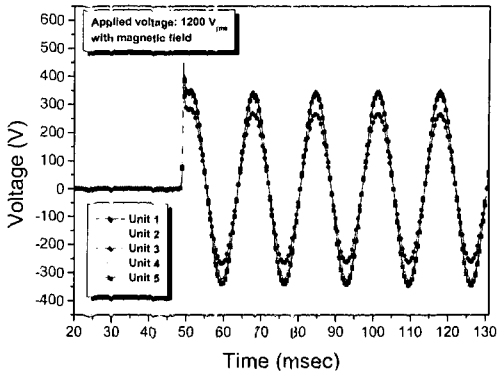

그림 10. 자기장이 인가된 경우 직렬 연결된 5개 한류 소자에서 전압강하

Fig. 10. Voltage drops on five elements for current limiting element connected in series with magnetic field

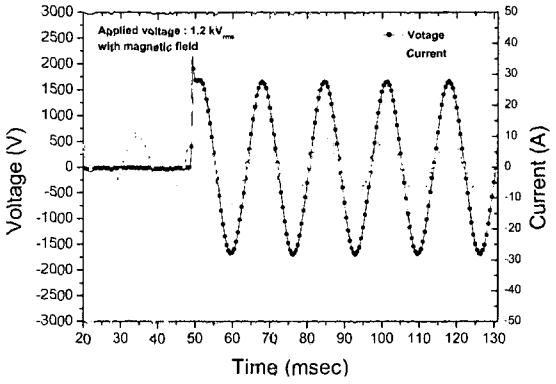

그림 11. 자기장이 인가된 경우, 5개 한류소자 전체 전압 및 전류(1.2kV/20A)

Fig. 11. The total voltage drop and current on 5 elements for current limiting element connected in series with magnetic field(1.2kV/20A)

여기서 한류소자 1은 퀜치이후 전압강하가 나머지 소자에 비해 다소 작은 값을 갖는 것은 금 박막의 저항값이 다른 소자에 비해 작기 때문이다. 또한 그림 11의 결과로 알 수 있듯이 YBCO 박막형 저항현 한류기에 동시퀜치에 문제가 없다면 5장의 한류소자로 충분히 1.2kV/20A용량의 한류기를 구현할 수 있음을 보여준다. 참고로 단위소자가 퀜치이후 온도 상승값이 250 K를 넘지 않도록 인가할 수 있는 최대 허용전압은 대략 250 V_{rms} 정도이다.

4. 결 론

YBCO 박막형 한류소자에 솔레노이드 코일을 직렬삽입되어 자기장의 인가가 한류소자의 퀜치특성에 미치는 영향을 요약하면 다음과 같다.

1. YBCO 박막형 단일 한류소자 내에서 자기장이 인가된 경우, 전 영역에서 균일한 퀜치특성을 보였다.
2. YBCO 박막형 한류소자를 2장 직렬연결 및 3장을 직렬연결시 자기장이 인가된 경우, 모든 한류소자에서 퀜치되는 결과를 보였다.

3. YBCO 박막형 한류소자에 자기장이 인가된 경우, 퀜치이후 저항상승 속도가 급격히 증가하였다.
4. YBCO 박막형 한류소자 5장 직렬연결로 자기장 인가방식에 의해서 최대전압인 1.2kV/20A용량까지 잘 감당함을 알 수 있었다.
5. YBCO 박막형 한류소자에 Carbon/Cu 전류리드를 적용한 결과 양호한 통전특성을 보임으로써 향후 박막형 한류기의 상용화에 기여할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Ok-Bae Hyun, Hyo-Sang Choi, Hye-Rim Kim, Hae-Ryong Lim, In-Seon Kim "Quench Characteristics of Resistive SFCL Elements in series", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.663-665, 2000.

[2] Onishi T, Sasaki K, Akimoto R "A proposal of fast self-acting and recovering magnetic shield type superconducting fault current limiter and the analyses of their characteristics", Presented at Korea-Japan Joint Workshop on Superconductivity and Cryogenics(in Korea), 2000.

[3] K Tekletsdik, MP Saravolac, A Rowley "Development of a 7.5 MVA Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 672-675, 1999.

[4] 박권배, 강종성, 이방욱, 오일성, 김혜림, 최효상 "YBCO 박막형 초전도 한류기에 적용가능한 전류리드 제작방안", 한국초전도·저온공학회학술대회 논문집, pp.219-220, 2002.

저 자 소 개

박권배(朴權培)
1972년 11월 09일생, 1998년 전남대학교 유전공학과 졸업, 2000년 전남대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 현재 LG산전 전력연구소 연구원

이방욱(李昉昱)
1968년 06월 20일생, 1991년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 LG산전 전력연구소 선임연구원

강종성(姜種成)
1972년 05월 15일생, 1996년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 LG산전 전력연구소 주임연구원

오일성(吳一成)
1960년 12월 22일생, 1986년 연세대학교 금속공학과 졸업, 1990년 미시간주립대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 LG산전 전력연구소 책임연구원

최효상(崔孝祥)
1966년 02월 21일생, 1989년 전북대공대 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

현옥배(玄鈺培)
1953년 02월 11일생, 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 미 아이오와주립대 물리학과 졸업(이학박사) 현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원