

전력용 반도체 소자를 적용한 하이브리드 초전도 한류기 동작 신뢰도 향상

Reliability Enhancement of Hybrid Superconducting Fault Current Limiter adopting Power Electric Device

심정욱¹, 현옥배^{2,*}, 박권배¹, 임성우², 김혜림², 이방욱¹, 오일성¹

J. Sim¹, O. B Hyun^{2,*}, K. B. Park¹, S. W. Lee², H. R. Kim², B. W. Lee¹, I. S. Oh¹

Abstract: The current limiting characteristics of hybrid SFCL with additional power electronic devices was investigated in order to improve operation reliabilities. The hybrid SFCL developed consists of a superconducting trigger (S/T) part, a fast switch (F/S) module and a current limiting (C/L) part. Although hybrid SFCL had shown a excellent current limiting characteristics, this device was rather vulnerable to the residual arc currents which could exist during fast switch operation. This undesirable arc should be extinguished as quickly as possible in order to implement perfect fault current commutation. So, in order to eliminate the residual arcs between fast switch contacts, the power electronic devices (IGBT or GTO) were connected in series between the S/T part and the interrupter of the F/S module. According to the fault tests conducting with an input voltage of 270 V_{rms} and a fault current of 5 kA_{rms}. The power electronic devices could perfectly remove the arc generated between the contacts of the interrupter within 4 ms after the fault occurred. From the test analysis, it was confirmed that the hybrid SFCL could enhance the operation reliability by adopting additional power electronic devices.

Key Words: Hybrid SFCL, fault current, arc, power electronic device.

1. 서 론

최근 들어 미국과 유럽을 중심으로 전력계통의 안정도 향상 및 친환경을 목적으로 초전도 한류기의 개발이 급속히 진행되어지고 있다. 이는 계통에 사고가 발생함에 따른 대규모 정전사태에 대한 경제적, 사회적 손실이 매우 크기 때문이고, 최근에 들어서 이에 대한 대책 마련이 매우 시급해 지고 있기 때문으로 여겨진다.

근래에 개발된 초전도 한류기로서는 저항형 초전도 한류기와 유도형 초전도 한류기로 구분된다. 이러한 초전도 한류기는 대부분 전초전도 방식이 주를 이루어

왔다[1-6]. 기존의 초전도 한류기는 정상상태에서는 저항이 0인 상태에서 계통에 존재하다가 사고전류가 유입될 경우 초전도한류기가 켜치가 됨으로 저항이 발생되어 사고전류를 제한하는 특징을 가지고 있다. 하지만 이 경우 초전도 한류기에 발생된 저항에 의해 한류기에 다량의 에너지가 집중하게 된다. 따라서 초전도 한류기를 운전하는 계통의 전압이 클수록, 초전도한류기에 발생하는 임피던스에 의한 사고전류 제한에 따라 초전도 한류기에 유입되는 에너지가 커지게 된다. 따라서 이러한 초전도 한류기에서 발생하는 에너지 분담을 줄이기 위해 초전도 한류기를 제작할 때 많은 양의 초전도체를 사용해야한다. 하지만 현재 초전도체의 가격이 고가이고 다량의 초전도체를 사용할 경우 부피 증가로 인한 설치비용, 교류손실의 증가에 따른 초전도체의 냉각 비용 등의 부대비용이 증가되는 단점이 있다.

최근 LS산전과 KEPRI는 위에서 언급한 바와 같은 기존의 전초전도 한류기의 단점을 극복한 새로운 개념의 배전급 하이브리드 초전도 한류기의 개발 및 시험에 성공하였다. 이는 초전도체의 고유특성과 상용화 되고 있는 차단 기술을 접목시키는 방식으로, 기존의 전초전도 한류기에 비해 매우 적은 양의 초전도체를 사용함으로써 교류손실 및 냉각비용 그리고 한류기 크기를 획기적으로 줄일 수 있게 되었고, 이를 바탕으로 다양한 형태의 하이브리드 초전도 한류기를 개발하게 되었다. Fig. 1은 하이브리드 초전도 한류기와 기본회로이다.

그림에서 나타난 바와 같이 하이브리드 초전도 한류기는 크게 상시전류 통전 및 사고전류를 감지하기 위한 초전도체와 사고전류를 고속으로 우회시키며 초전도체를 보호하기 위한 고속스위치, 그리고 사고전류를 한류 하는 한류부인 보조회로로 구성되어 있다.

대략적인 동작 원리는 정상적인 상태에서는 전류는 S/W1과 초전도체로 구성된 주회로를 통해 흐른다. 하지만 사고가 발생할 경우 초전도체에서는 임피던스가 발생하게 된다. 이 순간 사고전류는 구동코일(DC)로 우회하면서, 구동코일이 동작하여 S/W1을 개로(open)하고 S/W2를 차단(close)하게 된다. 이로써 주회로 측에 남아있는 사고전류를 완전히 차단하게 되고, 우회된 사고전류는 S/W2를 통해 한류부로 전달되어 사고전류가 제한된다.

그림에서 나타난 바와 같이 하이브리드 초전도 한류기는 크게 상시전류 통전 및 사고전류를 감지하기 위한 초전도체와 사고전류를 고속으로 우회시키며 초전도체를 보호하기 위한 고속스위치, 그리고 사고전류를 한류 하는 한류부인 보조회로로 구성되어 있다.

¹정 회 원 : LS산전(주) 전력연구소

²정 회 원 : 한전 전력연구원 초전도그룹

*교신저자 : hyun@kepri.re.kr

원고접수 : 2007년 8월 13일

심사완료 : 2007년 9월 13일

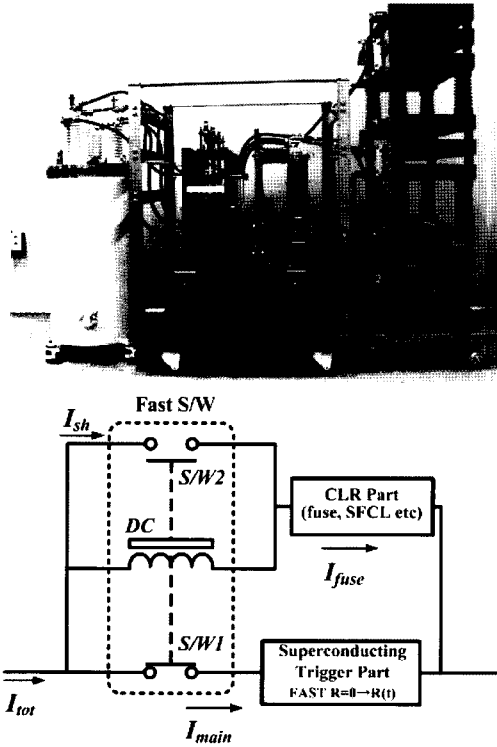


Fig. 1. Hybrid Superconducting Fault Current Limiter and circuit diagram.

하지만 이와 같은 사고전류 제한 동작 과정에서 주회로와 보조회로간의 임피던스 차이가 작을 경우, 즉 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 초전도체와 직렬로 결선되어 있는 S/W1의 개로 과정에서 S/W2가 닫힘으로 인해 보조회로의 한류소자의 동작이 수행되기 직전에 S/W1의 접점양단에는 개로 과정에서 발생하는 아크가 충분히 소호되지 않고 유지될 수 있다. 이후 주회로와 보조회로의 임피던스 차이에 따라 S/W1의 접점 양단의 아크가 재발화가 되어 아크 임피던스가 급속히 감소하게 된다. 이 경우 보조 회로 측으로 우회되었던 사고 전류는 상전도체로 전이된 초전도체와 아크로 인해 도통되고 있는 S/W1으로 구성된 주회로 측으로 다시 통전하게 된다(I_{main}). 따라서 상전도체로 전이된 초전도체에 다시 전압이 집중하고, 이에 따라 발생하는 에너지에 의해 초전도체가 손상되는 문제점이 있다.

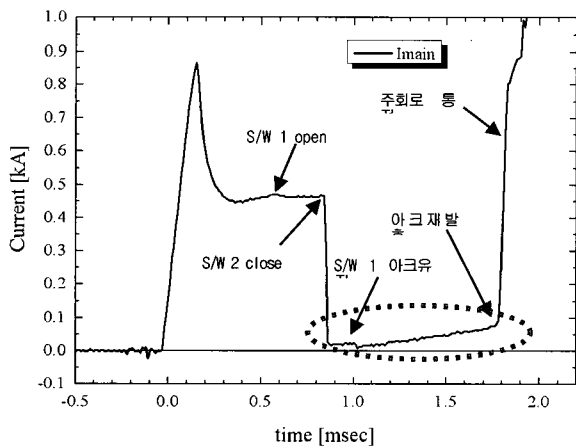


Fig. 2. Main circuit current(I_{main}) in case of arc generation at S/W1.

본 논문은 하이브리드 초전도 한류기의 한류과정에 발생될 수 있는 아크전류를 확실하게 차단하는 방안을 제시하는 것으로서, 반도체 전력전자 소자를 사용함으로써 하이브리드 초전도 한류기의 동작 신뢰도를 향상시켰다. 여기서 사용되는 반도체 전력전자 소자는 앞에서 언급한 S/W1에서 발생하는 아크전류를 차단하는 역할을 하는 것으로서 하이브리드 초전도 한류기의 설계 마진을 여유롭게 할 수 있다. 본 논문에서 실험한 반도체 전력전자 소자는 IGBT와 GTO 소자로서, 한류 과정에서 아크가 발생되게끔 제작된 하이브리드 초전도 한류기에 적용하여 아크 차단 능력을 비교하였다.

2. 실험 구성

2.1. 초전도 트리거 소자 및 반도체 전력전자소자

본 논문의 초전도 한류기에 적용되는 초전도 한류소자는 100×20 mm 크기의 bar 형태의 YBCO 박막 4장을 병렬 결선하여 사용하였고 트리거 소자의 전체 임계전류는 약 400A이다. Fig. 3은 실험에 사용된 하이브리드 초전도 한류기의 YBCO박막 모듈이다.

하이브리드 초전도 한류기의 한류과정에 있어서 반도체 전력전자소자의 차단 시점은 사고전류(수~수십kA)와 같은 대전류가 통전되는 시점이 아니다. Fig. 2에서 나타난 바와 같이 초전도 트리거 소자가 켜진 이후 S/W1이 개방되면서 접점 양단에 잔존하게 되는 미량의 아크전류(수~수십A)가 유지될 때 차단된다. 즉 반도체 전력전자 소자가 높은 크기의 사고전류를 감당하지 않기 때문에 대용량의 반도체 소자를 사용하지 않아도 구동이 가능하다. 따라서 정상통전전류와 사고 발생 직후 초전도 트리거소자가 켜지는 순간의 전류만큼만 만족시키면 충분하다. 또한 한류과정에서 반도체 소자가 S/W1의 아크전류를 차단시키면 이후의 전압은 S/W1에 인가되므로 반도체 소자의 전압용량도 고전압일 필요가 없다.

Fig. 4는 실험에 사용된 반도체 전력소자들이다. 각 소자는 도시바의 1.2kV/300A급 IGBT소자와 ABB의 4.5kV/4kA급 IGCT 소자이다. IGCT 소자는 GTO소자와 구동회로가 함께 포함되어 있는 형태로 구성되어 있다.

각 소자들은 별도의 독립된 구동전원에 의해 동작을 하며, 초전도 한류기의 한류과정에 있어서 S/W2가 닫힐 때 발생하는 트리거신호에 의해 off가 되도록 설정하였다.

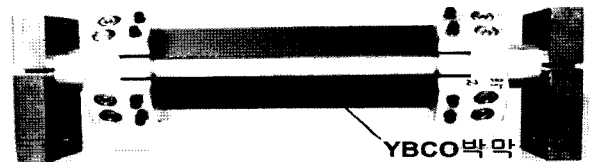


Fig. 3. YBCO film module of the hybrid SFCL.

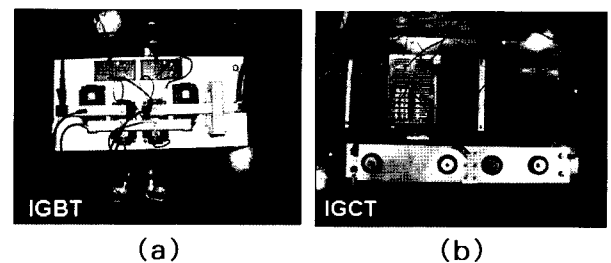


Fig. 4. The power electronic devices (a) IGBT (b) IGCT.

2.2. 실험회로 구성

Fig. 5는 실험조건을 위해 구성된 하이브리드 초전도 한류기의 개략적인 회로이다. 회로에 나타난 바와 같이 반도체 전력전자 소자는 초전도체와 S/W1으로 구성된 주회로와 직렬로 결선되어있다.

실험조건은 입력전압 270V_{rms}, 사고전류 5kA_{rms}인 조건에서 수행하였다. 반도체 전력전자소자는 Fig. 3의 회로에 나타난 바와 같이 S/W1과 초전도체로 구성된 주회로와 직렬로 결선이 된다.

또한 S/W1의 아크차단 여부를 확실하게 구현시키기 위해 한류파트의 저항을 10mΩ 수준으로 낮춰서 한류 과정에서 S/W1에 아크가 발생되도록 조절하였다. 그리고 사고발생 직후 아크차단을 위한 반도체 전력전자 소자의 구동신호를 주기위해 S/W2의 접점이 닫히는 순간 트리거 신호가 발생되도록 구성하였다.

3. 실험결과

Fig. 6은 Fig. 5의 시험회로에서 반도체 전력전자 소자가 없을 경우의 주회로에 통전되는 전류 I_{main}과 초전도체 양단전압 V_{hts}이다. 사고 발생 직후 I_{main}은 약 1.32ms만에 1.1kAp까지 상승하였고 이 순간 초전도체 양단 전압은 77.8Vp이다. 이후 3.1 ms만에 S/W2가 닫혀 한류부로 전류가 도통되어야 하지만 한류부와의 임피던스 차이 때문에 S/W1에는 아크가 계속 유지되고

있어 주회로에 지속적으로 전류가 통하고 있음을 알 수 있다. 이에 따라 이후 초전도체 양단전압 V_{hts}는 약 75Vp수준의 전압이 유지됨을 알 수 있다. 본 실험에서는 아크전류 차단이 목적이기 때문에 입력전압이 270V 정도로 낮은 조건에서 실험을 진행하였고, 한류부의 저항이 10mΩ 정도이기 때문에 초전도체 양단에 걸리는 전압은 매우 낮은 수준으로 인가 되었다. 하지만 만약 입력전압이 10kV 이상이고 한류부의 한류임피던스가 수Ω 수준으로 높을 경우에는 초전도체 양단에는 매우 높은 전압이 유기되므로 초전도체가 소손될 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 동일한 입력전압, 전류조건에 대하여 주회로에 IGBT 소자를 직렬로 결선한 경우의 시험 결과 이다. 시험 결과는 Fig. 6의 경우와 마찬가지로 사고전류는 사고발생 직후 1.3ms만에 1.1kAp까지 상승하였다가 우회되어 감소하였고 3.1ms만에 S/W2가 닫혀 주회로 측 전류 I_{main}이 급격히 감소하였다. 앞서도 언급한 바와 같이 반도체 전력전자 소자는 S/W2의 동작과 동시에 트리거 신호가 인가 되도록 되어있다. 따라서 S/W2가 닫힌 이후 약간의 시차를 두고 트리거 신호가 발생하였고, 이후 0.18ms만에 IGBT가 off되면서 아크전류가 차단되어 I_{main}이 0이 되었음을 알 수 있다. 또한 이 순간 초전도체 양단전압 V_{hts}도 I_{main}이 차단됨으로 0V로 감소하였다.

Fig. 8은 동일한 조건에서 주회로에 IBCT 소자를 적용할 경우의 시험결과이다. 시험결과는 앞에서 언급된 상황과 동일하였다.

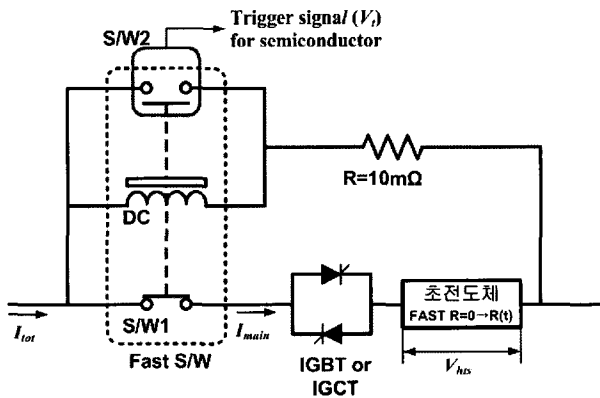


Fig. 5. Hybrid SFCL using power electronic device.

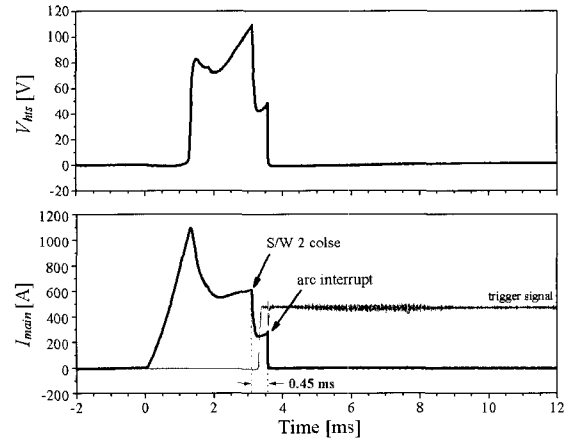


Fig. 7. V_{hts} and I_{main} with IGBT.

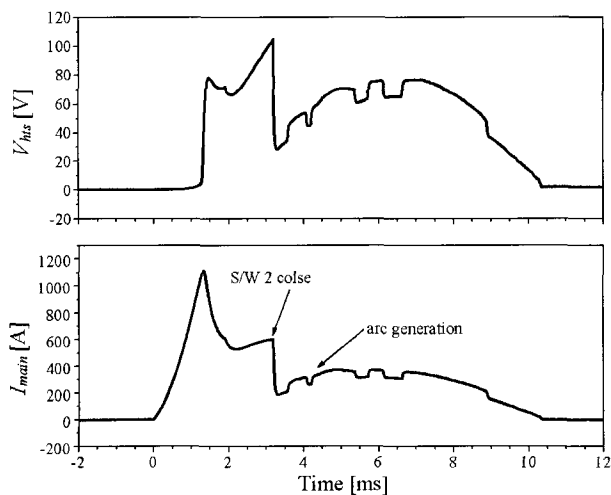


Fig. 6. V_{hts} and I_{main} without power electronic device.

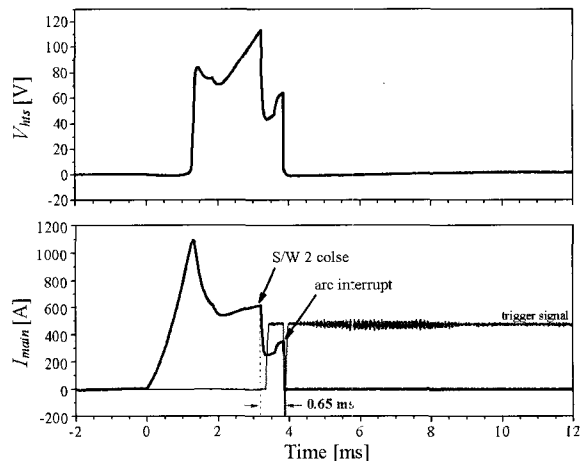


Fig. 8. V_{hts} and I_{main} with IGCT.

그림에서 나타난 바와 같이 사고전류는 1.3ms만에 1.1kAp까지 상승하였다가 우회되어 감소하였고 3.1ms만에 S/W2가 단락 주회로 전류 I_{main} 이 크게 감소하였다. 이후 트리거 신호가 발생하였고 트리거 신호 입력 후 0.43ms만에 IGCT가 off되면서 아크전류를 차단시켰다. 이때도 IGBT와 동일하게 I_{main} 및 V_{hts} 는 0으로 감소하여 아크전류를 확실하게 차단시켰음을 알 수 있다.

Fig. 7과 8에서 나타난 바와 같이 주회로 측에 직렬로 반도체 전력전자 소자를 사용함으로써 하이브리드 초전도 한류기의 한류과정에서 주회로에서 발생할 수 있는 아크전류를 차단하여 하이브리드 초전도 한류기의 동작특성을 개선할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 7의 결과에서 보는 바와 같이 실험에 사용된 IGBT소자에 초기에 통전된 피크 전류는 1.4ms만에 1.1 kAp 까지 도달함으로써, Table 1에 나타난 IGBT의 순간 통전전류(1ms) 용량을 볼 때 사용하기에 부족한 부분이 있음을 알 수 있다. 따라서 현재의 조건에 있어서는 동작특성의 안전을 고려해볼 때 소자의 정상상태 통전전류의 크기가 최소 1,500A이상인 소자를 사용하는 것이 적절하다고 본다. 궁극적으로는 초전도 트리거 소자의 사양에 따라 초기 피크전류의 크기가 변경되기 때문에 하이브리드 초전도 한류기를 설계할 때 고려하여 적합한 사양의 전력전자소자를 사용하면 된다. Fig. 8의 IGCT의 경우에는 S/W2가 동작한 이후 Fig. 7의 IGBT보다 차단 속도가 0.25ms정도 느리지만 아크전류를 차단하는데 있어서는 크게 문제가 되지 않았다. 또한 Table 2에 나타난 바와 같이 전압 및 전류통전용량이 높기 때문에 배전급 하이브리드 초전도 한류기에 적용하더라도 충분하다고 여겨진다.

4. 결 론

반도체 전력전자 소자를 하이브리드 초전도한류기의 주회로 측에 적용함으로써 한류과정에서 발생할 수 있는 아크전류를 확실하게 차단함으로써 한류특성이 개선되는 방안에 대하여 연구하였다. 실험은 입력전압 270 V_{rms}, 사고전류 5kA_{rms} 상황에 대하여 하이브리드 초전도 한류기 회로에 아크가 발생되게끔 구성하였고, IGBT 및 IGCT소자를 적용하는 경우에 대하여 한류특성을 비교하였다. 시험결과 두 경우 모두 S/W1에서 발생하는 아크전류를 재발호가 되기 전에 차단하였다. 또한 초전도 트리거소자의 초기 켄치 특성에 따라 반도체 전력전자 소자의 사양을 결정해야함을 알았다.

특히, 반도체 전력전자소자를 하이브리드 초전도한류기에 적용하는데 있어서 해결해야할 중요한 요소로는 반도체소자의 동작신뢰성과 발열로 인한 손실 및 장기운전에 따른 열화문제 그리고 가격적인 측면을 들 수 있다. 그럼에도 반도체 전력전자소자는 현재 다양한 형태로 개발이 진행되고 있는 하이브리드초전도 한류기의 동작 신뢰성을 향상시키는데 많은 도움이 될 것으로 예상하고 있다.

감사의 글

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

Table 1. Characteristic of the IGBT.

Characteristic	Symbol	Rating
Collector-Emitter Voltage	V_{CES}	1,200V
Collector Current	DC	I_C 400A
	1ms	I_{CP} 800A
Forward Current	DC	I_F 300A
	1ms	I_{FM} 600A
Collector Power Dissipation	P_c	2,000W

참 고 문 헌

- [1] O. B. Hyun, H. R. Kim, J. Sim, Y. H. Jung, K. B. Park, J. S. Kang, B.W. Lee, and I. S. Oh, "6.6 kV resistive superconducting fault current limiter based on YBCO films," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 15, no. 2, pp. 2027-2030, June 2005.
- [2] J. Bock, F. Breuer, H. Walter, S. Elschner, M. Kleimaier, R. Kreutz, and M. Noe, "CURL 10: Development and field-test of a 10 kV/10MVA resistive current limiter based on bulk MCP BSCCO-2212," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.15, no.2, pp. 1955-1960, June 2005.
- [3] M.W.Rupich et. al. "The Development of Second Generation HTS Wire at American Superconductor," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.17, no 2, pp.3379 - 3382, 2007
- [4] Y. Y. Xie, K. Tekletsadik, D. Hazelton, and V. Selvamanickam, "Second Generation High-Temperature Superconducting Wires for Fault Current Limiter," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.17, no.2, pp.1981 - 1985, 2007
- [5] M. Chen, W. Paul, M. Lakner, L. Donzel, M. Hoidis, P. Unternaehrer, R. Weder, and M. Mednik, "6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi-2212 superconductor," Physica C, vol. 372.376, pp.1657-1663, Aug. 2002.

Table 2. Characteristic of the IGCT.

Characteristic	Symbol	Rating
Rep. peak off-state voltage	V_{DRM}	4,500V
	I_{TGM}	4,000A
Max. peak non-repetitive surge on-state current	I_{TSM}	32×10^3 A
Threshold voltage	$V_{(To)}$	1.4 V
Slope resistance	r_T	0.325 mΩ
Permanent DC voltage for 100 FIT failure rate of GCT	V_{dlink}	2,800V

[6] H.-P. Kraemer, W. Schmidt, B. Utz, and H.-W. Neumueller, "Switching behavior of YBCO thin film conductors in resistive current limiters," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 13, pp. 2044-2047, June 2003.

저 자 소 개



심정욱(沈政煜)

1970년 10월 10일생. 1996년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 1998년 동대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사). 2003년 동대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사), 현재 LS산전 전력연구소 선임연구원.



현옥배(玄鉦培)

1953년 2월 11일생. 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 Iowa State Univ. 대학원 물리학과 졸업(이학박사), Ames Lab., NIST, ISTEC 연구원 역임, 현재 한전 전력연구원 수석연구원.



박권배(朴權培)

1972년 11월 09일생, 1998년 전남대학교 유전공학과 졸업, 2000년 전남대학교 전기공학과 대학원 졸업(석사), 현재 LS산전 전력연구소 선임연구원.



임성우(任星禹)

1973년 2월 28일생, 1997년 전북대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동대학교 전기공학과 (석사), 2004년 동대학교 전기공학과 졸업 (공학박사), 현재 한전 전력연구원 연구원.



김혜림(金惠林)

1957년 3월 15일생. 1979년 서울대 물리학과 졸업, 1981년 미 아이오와 주립대 대학원 물리학과 졸업(석사), 1991년 미 코넬대 대학원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한전 전력연구원 책임연구원.



이방욱(李昉昱)

1968년 6월 20일생, 1991년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 LS산전 전력연구소 수석연구원.



오일성(吳一成)

1960년 12월 22일생, 1986년 연세대학교 금속공학과 졸업, 1990년 미시간주립대학원 재료공학과 졸업(석사), 1995년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 LS산전 전력연구소 연구위원.