

전도냉각에 의한 1.2 kV/80 A 급 유도형 고온초전도 한류기의 설계, 제작 및 테스트에 관한 연구

A Study on Design, Fabrication Techniques and Test Results of 1.2kV/80A Inductive Superconducting Fault Current Limiter by Conduction-Cooled System

강형구*, 전우용**, 이승제[†], 안민철*, 배덕권*, 운용수*, 고태국***

Hyoungku Kang*, Wooyong Jeon**, Min Cheol Ahn[†], Duck Kweon Bae*, Tae Kuk Ko***

Abstract: The inductive superconducting fault current limiter (SFCL) limits the fault current with its dc reactor. To fabricate the optimal dc reactor for inductive SFCL, several design and manufacturing technologies are necessary. In this paper, the manufacturing technology for dc reactor and cryogenic cooling method are described in detail. GM-cryocooler was used enlarge the critical current of dc reactor by cooling down the temperature of dc reactor about 20 K. Moreover, the results of short circuit test were described.

Finally, the thermal characteristics of conduction-cooled system were discussed and then, sub-cooled nitrogen system was proposed to enhance the thermal stability of dc reactor.

Key Words: SFCL, inductive SFCL, dc reactor, conduction-cooled system, cryocooler-cooled system, BSCCO-2223, superconducting magnet

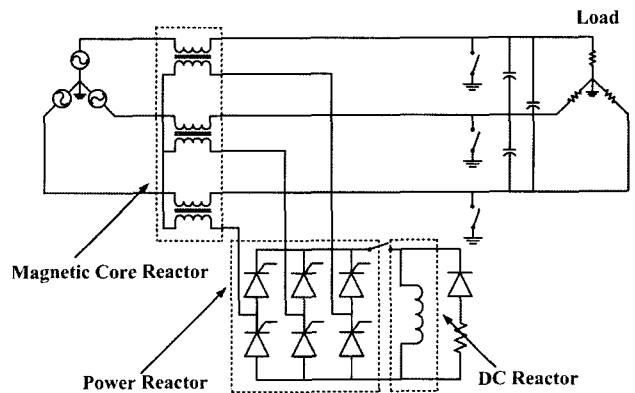


그림 1. 3상 DC리액터형 고온초전도 한류기 개략도
Fig. 1. Schematic drawing of three-phase DC reactor type HTS-SFCL

다. 그림 1은 유도형 초전도 한류기의 개략도이다. 본 연구에서는 전도냉각방식을 적용한 DC리액터를 설계, 제작하여 1.2 kV/80 A 급 초전도 한류기의 단락실험을 수행하여 결과를 살펴보았다.

1. 서 론

초전도 한류기는 전력기기의 용량이 증가됨에 따라 기기의 보호를 위해 차단기의 용량을 증가시키는데 필요한 비용을 줄일 수 있기 때문에 전력시스템에서 그 필요성이 증대되고 있다. 이런 이유로 여러 나라에서 초전도 한류기의 상용화를 위해서 개발이 진행되고 있다. 초전도 한류기는 별도의 제어가 없이 사고 전류를 제한할 수 있으며 전력계통에 쉽게 적용할 수 있는 등의 많은 우수한 면을 가지고 있다. 그러므로 초전도 한류기는 전 세계에서 연구 개발되고 있다.

유도형 초전도 한류기는 크게 전력변환기, 자기철심리액터, DC리액터의 세 부분으로 나눌 수가 있다. 전력변환기는 교류를 직류로 변환하여 주며 자기철심리액터는 계통에서의 에너지를 DC리액터로 전달하여준다. 그리고 DC리액터는 인덕턴스에 의해 사고전류를 제한하여준다.

* 학생회원:연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정
** 학생회원:연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정
*** 정 회 원:연세대 공과대 전기전자공학과 교수
원고접수:2003년 7월 31일
심사완료:2003년 9월 22일

2. Bi-2223 선재의 특성

2.1. 초전도선재의 전압-전류 특성

DC리액터를 제작하는데 Bi-2223 고온초전도선재가 사용되었다. 이 선재는 AMSC사에서 제작하였으며, 얇은 SUS 315L로 강화된 선재이다. 표 1에서 이 선재의 사양을 나타내었다.

표 1. 강화 고온초전도선재의 사양
Table 1. Specifications of reinforced wire

2.2. 접합특성

현재 상용화된 강화 초전도선재의 길이는 200 m 인 반면 1.2 kV/80 A급 유도형 초전도 한류기의 DC리액터를 제작하는데 필요한 길이는 약 800 m 이다. 그러므로 DC리액터를 제작하기 위해서 4개의 강화 초전도선재를 접합해야한다. 우선 SUS 315L이 강화 초전도선재의 모재보다 더 높은 저항을 가지고 있으므로 초전도선재의 접합부의 SUS 315L을 벗겨내고 사포와 알코올을 사용하여 선재에 남아있는 잔여물을 제거한 후 PbSn 액상솔더를 사용하여 340 °C의 열을 가하여 선재를 접합하였다.

선재 접합 후 접합된 선재의 임계전류를 측정해 보았

다. 선재의 임계전류값은 부분적으로 조금씩 달랐으며 최소 115 A에서 최대 134 A를 유지하는 것으로 측정되었다. 또한 다음의 실험에서 사용된 접합을 하지 않은 선재의 임계전류는 134 A 이었으며, 접합된 선재의 임계전류는 약 85 %인 115 A로 감소하였다. 실험결과는 표 2에 나타내었다.

표 2의 괄호 안에 있는 숫자는 전압 탭의 길이를 나타낸다. 접합된 선재의 임계전류는 solder와 접합부의 길이, 접합 온도 등에 의해 결정되지만, 접합부의 개수와는 관련이 없었다. 약 100시간 동안 직류 100 A의 전류를 접합된 초전도선재에 흘렸을 때 임계전류와 기계적 특성을 살펴보았을 때 나타난 접합된 선재에서의 기계적, 전기적 열화는 없었다.

3. 1.2 kV/80 A 급 유도형 한류기의 DC리액터

3.1. DC리액터 설계

DC리액터형 초전도 한류기는 DC리액터의 인덕턴스에 의해 사고전류를 제한한다. 그러므로 DC리액터의 인덕턴스는 제작 시 고려할 중요한 요소이다. DC리액터의 인덕턴스는 선재의 길이와 DC리액터의 모양에 가장 크게 의존한다. 1.2 kV/80 A 급 유도형 한류기의 DC리액터는

표 2. 다양한 접합 조건에 따른 임계전류
Table 2. Critical current with respect to various joint condition

접합부 수 \ 접합길이	2 cm	5 cm
#1	110 A(12 cm)	115A(10 cm)
#2	110 A(12 cm)	115A(15 cm)
#3	110 A(12 cm)	115A(18 cm)



Fig 2. 권선기를 이용하여 더블 팬케익 코일을 감는 모습
Fig. 2. Winding the double pancake coil with winding machine

제작이 쉽고 인덕턴스를 쉽게 증가시킬 수 있는 더블 팬케익형 코일로 제작하였다. 권치는 전력계통에 심각한 손상을 가져오거나 안정성을 해칠 수 있으므로 DC리액터는 전력계통의 안정성을 위해서 초전도 상태에서 운전되어야 한다. 한류기의 효율은 인덕턴스의 크기에 의존한다. 따라서 DC리액터 설계에서 안정성과 효율은 중요한 요소이다. Newtonian 방법에 의해 사고전류를 제한하기 위한 적절한 인덕턴스 값을 구하였고 FEMLAB를 이용하여 주어진 형상에 대하여 인덕턴스와 DC리액터의 임계전류를 시뮬레이션 하였다 [1]. Newtonian 방법에 의해 구해진 1.2 kV/80 A급 유도형 초전도 한류기의 인

덕턴스 최적값은 약 240 mH이었다. 또한 제작된 DC리액터는 200 m 길이의 초전도선재가 직렬로 연결된 4개의 더블 팬케익형 코일로 이루어져 있다.

고온초전도선재 특성인 이방성에 의해 수송전류로 인해 발생된 자속밀도의 방향은 선재의 임계전류를 예측하는데 중요한 요소가 된다. 자속밀도의 방향은 크게 고온초전도선재의 표면에 수직인 방향과 평행한 방향으로 나눌 수 있으며, 임계전류는 DC리액터의 바깥쪽 상단 끝부분에서의 선재에 수직인 방향의 자속밀도에 의해 결정된다. 결과적으로 온도와 선재표면에 수직인 방향으로 생긴 자속밀도의 최대값이 DC리액터 설계에 가장 중요한 요소가 된다.

3.2. DC리액터 제작

각 더블 팬케익 코일은 극저온에서의 온도변화에 대한 기계적 강도가 뛰어나고 전기적 절연성이 뛰어난 G-10으로 싸여있는 구리 보빈에 권선하였으며 구리 보빈은 와전류 생성을 막기 위해 4부분으로 나누어 각각을 절연 물질로 분리하였다. DC리액터용 보빈의 바깥지름은 400 mm, 높이는 52 mm 이다.

4개의 DC리액터는 자체 제작한 권선기로 권선하였다. 권선기는 일정한 장력으로 권선이 가능하도록 설계되었으며 그림 2는 DC리액터 코일을 권선기를 이용하여 감는 모습이다.

권선할 때 선재에 가해지는 장력은 마그네틱의 임계전류에 영향을 미치므로, 권선 시 적절한 장력을 일정하게 가해야 할 필요가 있었다. 본 연구에서 실험적으로 찾은 장력의 최적값은 1~1.5 kg·f 이었다. [2]

200 A 급 DC리액터를 제작을 위하여 DC리액터 끝부분에서의 수직인 방향 자속밀도를 계산하여 20 K에서 자속밀도 방향에 따른 임계전류의 특성을 비교하였다. 자속밀도 방향에 따른 임계전류의 특성표는 제조사에서 제공해주는 값을 사용하였으며, 시뮬레이션을 이용해 구한 DC리액터에서의 임계전류는 200 A였고 DC리액터의

표 3. DC리액터의 사양
Table 3. Specifications of dc reactor

더블 팬케익 코일	4개	
전체 길이	780 m	
내 경	0.4 m	
외 경	0.452 m	
인덕턴스	# 1	17.5 mH
	# 2	19.6 mH
	# 3	16.8 mH
	# 4	19.2 mH
	전 체	230 mH

끝부분에서 수직인 방향의 최대 자속밀도는 약 1.38 T 였다. 이 시뮬레이션 결과를 그림 3에 나타내었다. 강화초전도선재 위에는 같은 너비의 캡톤테이프를 붙였으며 더블 팬케익 코일 사이에는 절연을 위해 G-10으로 만들어진 스페이서를 삽입하였고 구리보빈사이에는 열전도가 잘 되도록 인듐을 발랐다.

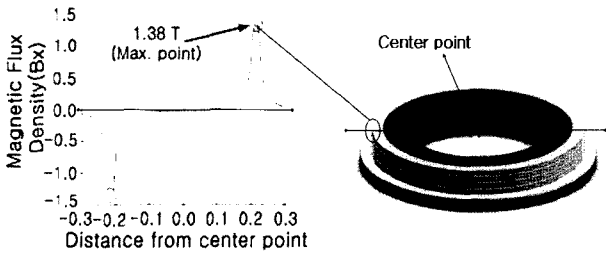


그림 3. DC리액터의 자장분포도
Fig. 3. Distribution of magnetic flux density in DC Reactor

DC리액터의 사양은 표 3에 나타내었다. 각각의 더블 팬케익 코일의 인덕턴스는 약 20 mH였으며 4직렬 DC리액터의 전체 인덕턴스는 230 mH이었다. 이 수치는 인덕턴스는 마그넷의 길이 제공에 비례한다는 사실과 잘 일치한다.

4. 전도냉각 시스템

4.1. 전도냉각 시스템의 제작

DC리액터는 1.2 kV/80 A_{rms} 급으로 설계되어 DC리액터의 목표 임계전류는 200 A이었다. 목표 임계전류인 200 A는 DC리액터가 안정적인 상태에서 동작할 수 있는 운전전류인 113 A_{peak}보다 2배 정도 큰 값이다. 전도냉각 시스템에서 열적인 문제가 전체 시스템의 불안정성에 크게 영향을 미치게 되므로 설계 시 더욱 안전한 운전 조건을 고려해야만 한다.

더블 팬케익 코일형 DC리액터는 큰 자속밀도를 가지므로 임계전류가 크지 않다. 약 20 K 온도의 환경에서 DC리액터를 동작시키기 위해서 GM 냉동기를 사용하여 냉각을 하였다. 강화초전도선재의 임계전류는 AMSC사에서 제공한 특성표에 의해 20 K에서는 77 K보다 대략 5

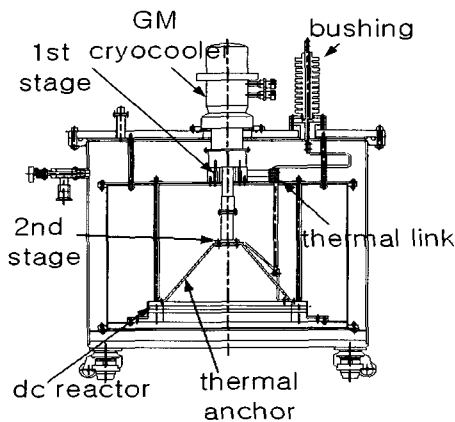


그림 4. 전도냉각 시스템 개략도
Fig. 4. Schematic view of conduction-cooled system

배 정도 더 커지게 되므로 초전도 시편의 임계전류는 20 K에서 약 570 A가 된다. 전도냉각에 사용된 GM 냉동기

의 열용량은 80 K일 때 1단에서는 100 W 이며, 20 K일 때 2단에서는 5 W이다. 그림 4와 같은 전도냉각 시스템 방식을 이용하여 유도형 고온초전도 한류기를 냉각하였으며, cernox와 실리콘다이오드와 같은 온도센서는 DC리액터의 안쪽과 바깥쪽 윗부분과 아랫부분을 포함하여 총 6군데에 설치되었다.

본 연구에서는 1.2 kV/80 A 급 전도냉각 방식의 초전도 한류기 시스템을 설계, 제작하여 실험을 수행하였다. 여기에서 thermal link는 극저온냉동기의 1단과 고온초전도선재의 전류도입부를 연결해주며, 고온초전도선재의 전류도입부는 thermal link를 통해서 40 K까지 냉각된다. 냉동기와 전류도입부는 무산소동으로 열적으로 연결하였고 캡톤필름을 사용하여 전기적으로 절연시켰다. thermal anchor는 적층된 무산소동 박판을 통해서 2단으로부터 DC리액터를 20 K까지 냉각한다. 또한 thermal anchor는 극저온에서 변형될 수 있으므로 무산소동 박판을 적층하여 DC리액터와 냉동기의 2단을 연결하였다. current linker는 전류도입부에서 DC리액터로 직류 전류를 수송해준다. 전류도입부는 구리블록과 thermal anchor처럼 생긴 적층된 구리박판과 고온초전도선재로 구성된다. 적층된 구리박판은 극저온에 의해 linker가 변형되는 것을 막아줄 뿐만 아니라 직류 전류를 효과적으로 전달해주는 역할을 한다. 그림 5에는 전도냉각 시스템을 제작하는 과정을 나타내었다.

5. 실험 결과

5.1. 냉각특성

DC리액터는 수송전류를 흘리지 않은 상태에서 GM 냉동기로 약 60시간 냉각하여 20 K에 도달하였다. DC리액터는 다른 열적인 외란이 없을 경우 20 K으로 냉각되었는데 그 결과는 그림 6에 나타내었다. 또한 동시에 DC리액터의 임계전류를 측정하기 위해 수송전류를 흘릴 경우의 냉각 특성을 보았다.

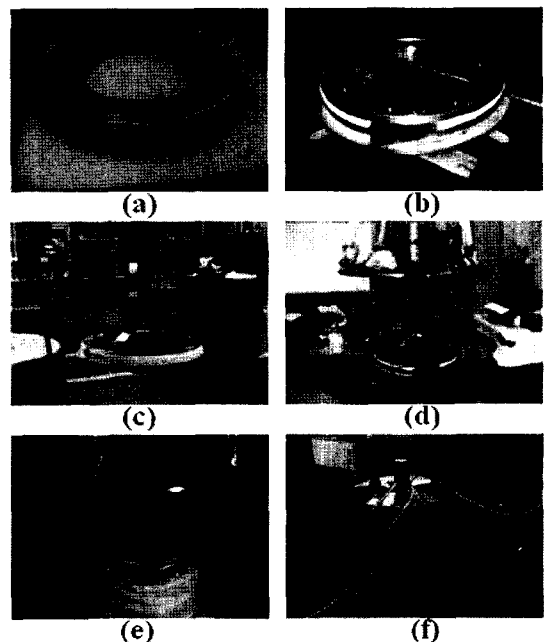


그림 5. 전도냉각 시스템 조립 과정
Fig. 5. Procedure of assembling conduction cooled system

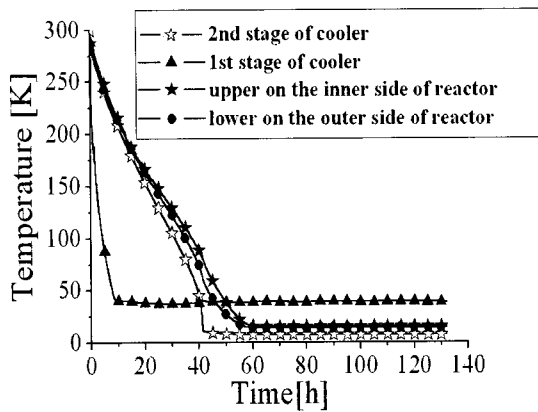


그림 6. DC리액터의 시간에 따른 냉각 특성
Fig. 6. The cooldown time characteristics of dc reactor

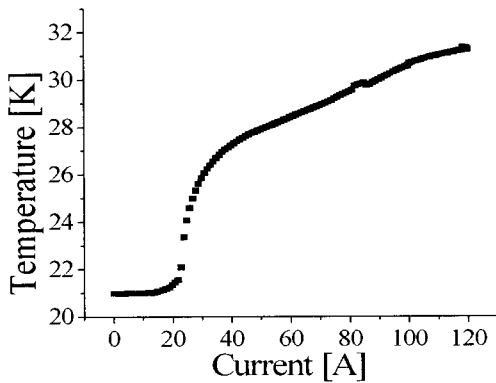


그림 7. 수송전류에 따른 DC리액터의 온도
Fig. 7. Temperature of dc reactor with respect to applied current

DC리액터의 온도는 20 A 주위에서 급격하게 증가하여 30 K 이상까지 도달하였으며, 이 결과를 그림 7에 나타내었다. 30 K에서의 임계전류는 20 K에서의 임계전류보다 작으므로, 이와 같은 DC리액터의 온도상승 결과는 임계전류의 감소를 초래하게 된다.

AMSC사에서 제공하는 온도에 대한 임계전류의 곡선으로부터 DC리액터의 임계전류는 30 K에서 약 150 A 정도로 추정될 수 있었다. DC리액터의 목표 임계전류 값은 약 200 A였다. 하지만 DC리액터의 임계전류는 예상했던 값보다 작은 약 120 A이었다. 열적 외란을 고려할 때, DC리액터의 임계전류는 약 150 A이어야 한다. 그러나 실제로 임계전류는 접합부와 제작 시 생긴 열화로 인해 120 A까지 감소하였다.

5.2. 단락실험 특성

DC리액터의 전류제한특성을 확인하기 위해서 단락실험을 수행하였다. 표 4는 단락실험의 정격이다. DC리액터는 2.8 kA의 사고전류를 480 A까지 제한하였다. 그림 8에서 보이는 바와 같이 DC리액터는 처음에는 사고전류를 제한했지만, 전류가 1.6 kA까지 증가한 후에는 DC리액터가 켄치되었다. 이와 같은 결과는 낮은 민감도와 hall current transducer의 느린 반응 시간 등의 특성으로 인해 사고전류를 감지할 수 없었기 때문이다. 그러므로 hall current transducer에 의한 간접적인 측정방법 보다는 셉트 저항을 사용하여 직접적으로 사고전류를 감

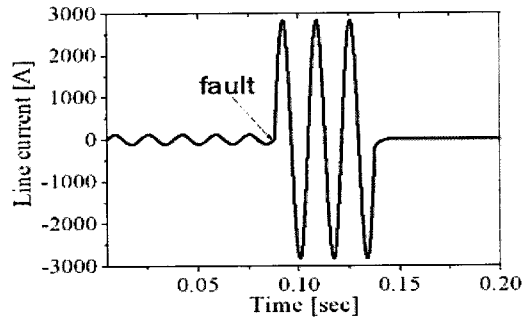
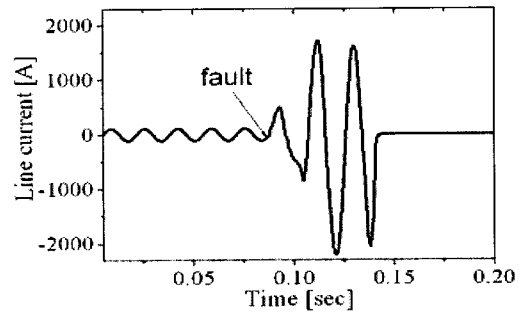


그림 8. 전류제한 실험 결과 파형
(위) 한류기가 없을 경우의 전류 파형
(아래) 한류기가 있을 경우의 전류 파형
Fig. 8. Observed waveforms of the current-limitation test
(up) current traces without SFCL
(down) current traces with SFCL

표 4. 단락실험의 정격
Table. 4. Ratings of short-circuit test

정격 전압	1.2 kV
정격 전류	80 Arms
단락 전류	2 kA
사고 시간	0.05 s

지하는 방법이 필요하다. 그러나 본 실험을 통해서 DC리액터를 사용한 유도형 초전도 한류기에서 사고전류의 제한특성을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 DC리액터를 설계 및 제작하여 유도형 초전도 한류기에 설치하는 방법을 소개하였다. 또한 전도냉각의 개념과 방법에 대해 자세하게 기술하였다. 설계 방법, 접합 방법, 권선 방법, 열전도와 관련된 초전도 선재의 절연, 전기적 절연, 열적 절연, 전도냉각시스템의 결합 등과 관련된 여러 기술과 함께 실험 결과에 대하여 설명하였다. 전도냉각시스템은 고온초전도선재의 임계전류를 극저온 특성에 의해 현저하게 증가시킬 수 있으므로 DC리액터를 냉각하는데 사용되었다. 본 연구를 통해 얻은 주요 연구결과 및 결론은 다음과 같다.

- [1] 강화 초전도선재의 접합 방법과 특성이 자세하게 제시되었다.
- [2] 자속밀도의 방향에 따른 고온초전도선재의 임계전

류를 예측하는 방법에 대하여 연구하였다.

[3] 전도냉각시스템이 적용된 초전도 한류기의 DC리액터 보빈의 설계 및 제작 방법에 대하여 소개하였다.

[4] thermal link, thermal anchor와 current linker 등의 고온초전도용 전도냉각시스템에 사용되는 요소들의 제작방법을 자세하게 기술하였다.

[5] 극저온에서 나타나는 DC리액터의 열적 불안정성은 주로 flux flow state에서 가해지는 전류의 크기, 전류의 급격한 증가율, 직류전류의 리플, thermal anchor의 부족한 열용량에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

[6] 전도냉각시스템은 열적 외란과 급격한 전류의 변화에 민감하여 안정화하기가 힘들다.

[7] 유도형 고온초전도 한류기는 안정한 상태에서 사고 전류를 효과적으로 제한할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 고온초전도 DC리액터의 온도증가는 초전도 한류기에 복잡한 문제를 발생시켰고, 한류기의 성능을 저하시켰다. 이와 같은 문제가 있었음에도 154 kV/2 kA급 유도형 고온초전도 한류기에 적용할 수 있는 몇 가지 긍정적인 결론을 얻을 수 있었다. 즉, 유도형 한류기용 냉각시스템의 열적 안정성과 DC리액터의 임계전류값 향상을 위해서는 전도냉각방식 시스템을 대신한 극저온 냉동기를 이용한 과냉질소 시스템을 고려해야 하며, 발생자장값이 국부적으로 집중되며 열전달 특성이 안 좋은 더블 팬케익 형식의 DC리액터를 대신한 열전달 특성이 우수한 보다 큰 직경의 솔레노이드 형식의 DC리액터에 대한 연구가 진행되어야 한다. 이에 따라 솔레노이드 형식의 DC리액터와 과냉질소 냉각시스템을 이용한 유도형 고온초전도 냉각장치의 개발에 관한 연구가 이루어졌으며, 그 결과는 추후 관련 논문에 게재할 예정이다.

감사의 글

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

참고 문헌

[1] Ho-Jun Suh, Seungje Lee, "Optimal Design of 6.6kV-200A dc Reactor Type High-Tc Superconducting Fault current Limiter", Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, vol.1, No. 4, pp. 99-104, May, 2002.

[2] Min Cheol Ahn, Min Chul Kim, duck Kweon Bae, "Characteristics of critical current of high-Tc superconducting magnets wound with various tensions", IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 13, No. 2, pp. 2080-2083, June 2003.

[3] William V. Hassenzahl, "Applications of Superconductivity to Electric Power systems", IEEE Power Engineering Review, pp. 4-7, May, 2000.

[4] M. Noe, "Technical and Economical Benefits of Superconducting Fault Current Limiters in Power systems", IEEE Trans. Applied

Superconductivity, vol. 9, No. 2, pp. 1347-1350, June 1999.

[5] E. Leung, "Testing of the World's Largest Bi-2223 High Temperature Superconducting Coil", IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 10, No. 1, pp. 865-868, March, 2000.

[6] Yong Ku Kim, Hyoungku Kang, "The Study of Designing the Parameters of dc Reactor for Inductive Superconducting Fault Current Limiter by Using Finite Element Method", KIASC Conference, pp. 326-329, February, 2002.

[7] Istvan Vajda, Sandor Semperger, Tamas Porjeszm "Three Phase Inductive HTS Fault Current Limiter for the Protection of a 12kVA Synchronous Generator", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol.11, No.1, pp. 2515-2518, March, 2001.

저자 소개



강형구(姜亨求)

1973년 8월 4일생, 1997년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기전자컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정



전우용(全禹勇)

1976년 11월 06일생, 2002년 연세대 공대 기계전자공학부 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정



이승제(李乘濟)

1974년 5월 30일생, 1997년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2003년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사), 현재 프리컴시스템(주) 연구원



안민철(安敏哲)

1976년 9월 20일생, 1999년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정



배덕권(裴德權)

1971년 8월 16일생, 1998년 광운대 공대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정



윤용수(尹庸銖)

1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대학교 전기공학과 졸업, 1995년 연세대학교 대학원 전기공학과 공학석사, 2001년 동대학원 전기전자공학과 공학박사, 현재 안산공과대학 전기과 조교수



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 석사 졸업(M.Sc), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 박사 졸업(Ph. D), 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수