

배전급 초전도한류기 및 전력 IT 응용을 위한 실시간 모니터링 시스템 개발

論 文
57-3-10

Development of Distribution Superconducting Fault Current Limiter and its Monitoring System for Power IT Application

朴東瑾* · 姜亨求† · 石福烈** · 高太國***
(Dong-Keun Park · Hyoungku Kang · Bok-Yeol Seok · Tae-Kuk Ko)

Abstract - Recently, the development of superconducting fault current limiters (SFCLs) has been required as power demands increase in the power system. A distribution-level prototype resistive SFCL using coated conductor (CC) has been developed by Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. and Yonsei University for the first time in the world. The ratings of the SFCL are 13.2 kV / 630 A at normal operating condition. A novel non-inductive winding method is used in fabricating coils so there is almost zero impedance during normal operation. The distribution SFCL is cooled by sub-cooled liquid nitrogen (LN₂) of 65 K and 3 bar to enhance cryo-dielectric performance, critical current density, and thermal conductivity. In order to make reliable operation of an SFCL in real power systems, we monitored and controled its operation conditions by using supervisory control and data acquisition (SCADA) method. Thus, a monitoring system for the SFCL employing information technology (IT) is proposed and developed to be on the lookout for the operation conditions such as inside temperature, inside pressure, LN₂ level, voltage and current. Since operation temperature should be kept constant, bang-bang control for temperature feedback with a heater attached to the cold head of cryo-cooler is applied to the system. Short-circuit tests with prospective fault current of 10 kA and AC dielectric withstand voltage tests up to 143 kV for 1 minute were successfully performed at Korea Electrotechnology Research Institute. This paper deals with the development of a distribution level SFCL and its monitoring system for reliable operation.

Key Words : Control, Fault Current Limiter, Monitoring System, Real Time Monitoring, Short Circuit Test

1. 서 론

최근 산업사회의 발달로 인하여 급격하게 증가하고 있는 전력 수요와 그에 따른 발전소 및 선로 증설에 의해 단락 용량이 기존의 차단기 용량을 넘어서는 사태가 자주 발생하고 있다. 높은 고장 전류로부터 계통 내 전력 설비를 보호하기 위해 모선분리, 직렬 리액터의 삽입, 그리고 대용량 전력퓨즈의 사용 등과 같은 많은 방법들이 제안되고 있지만 안정성 및 효율성 측면에서 많은 단점을 보이고 있다. 이와 같은 여러 가지 대안들 중에서 초전도한류기는 높은 고장 전류를 별도의 센서 없이 순간적으로 제한할 수 있는 신개념 전력기기로서 다가오는 미래에 전력계통의 안정성을 높여줄 수 있는 대안으로 평가되고 있다. 이러한 초전도한류기는 정상 시에는 초전도체의 고유 특성으로 인하여 임피던스가 거의 발생하지 않으므로 손실이 없지만, 초전도체의 임계전류를 초과하는 사고가 발생하면 순간적으로 높은 임피

던스가 발생하여 고장전류를 효율적으로 제한할 수 있다. 현재 전 세계의 많은 중전기업체를 비롯하여 연구소와 대학에서 여러 종류의 초전도한류기 연구가 제안되고 개발이 진행되고 있지만, 실 계통에 적용되어 운전 중인 사례는 아직 보고된 바 없고, 실증시험 수준의 연구, 개발이 이루어진 상태이다 [1]. 국내에서도 여러 연구기관에서 한류기 개발에 관한 연구가 진행되었으며, 특히 2006년 12월에는 현대중공업(주)과 연세대학교가 공동으로 과학기술부 21C 프론티어 사업의 일환으로 박막형 고온초전도 선재인 CC를 사용한 무유도 권선형 초전도한류기의 개발을 성공적으로 수행하였다. 이는 현재 한류기 응용에 가장 유리한 것으로 평가되고 있는 고온초전도재료인 CC를 이용한 초전도한류기로서 세계 최대 용량인 13.2 kV / 630 A의 배전급을 성공적으로 개발하였다는데 큰 의의가 있다. 초전도한류기는 기존의 전력기기와는 달리 초전도 상태를 유지하기 위한 극저온 냉각 시스템이 필수적으로 필요하다. CC를 이용한 초전도한류기용 한류코일의 동작특성 및 안정성은 냉각조건과 밀접한 영향을 미친다. 또한 극저온 고전압 응용에서의 냉각조건 유지는 매우 중요하다. 특히, 초전도한류기는 계통에 투입되어 장시간 운전되어야 하므로, 다양한 외부조건에 의해서 변동되어질 수 있는 냉각조건 및 초전도한류기 내부 환경을 실시간으로 감시 및 제어하고 문제가 발생했을 때, 경보 기능이 초전도한류기의 상용화에 앞서 반드시 필요하다.

본 논문에서는 배전급 단상 정격인 13.2 kV / 630 A급 초전도한류기의 제작과 단락 및 내전압 절연특성 시험 결과

* 學生會員 : 延世大學校 電氣電子工學科 博士課程
** 正 會 員 : 現代重工業 機械電氣研究所 責任研究員 · 工學博士
*** 正 會 員 : 延世大學校 電氣電子工學科 教授 · 工學博士
† 교신저자, 正會員 : 現代重工業 機械電氣研究所
先任研究員 · 工學博士

E-mail : maglev@nate.com

接受日字 : 2007年 12月 31日

最終完了 : 2008年 2月 12日

를 다루고, 실제 계통에 적용할 경우에 한류기의 안정적인 동작을 위한 모니터링 시스템 개발에 관한 연구를 다루고 있다. 배전급 초전도한류기용 모니터링 시스템은 기존의 IT 기술을 신개념의 전력기기인 초전도한류기의 계통적용에 접목하여 응용한 시스템으로서 전력 IT 분야의 새로운 시도라는 점에서 큰 의의가 있다.

2. 배전급 초전도한류기 제작

2.1 초전도한류기의 개념 설계 및 제작

CC는 현재까지 개발된 많은 초전도재료 중에서 초전도한류기 응용에 가장 적합한 특성을 가지고 있다고 평가되고 있다. 초전도한류기용 초전도코일 제작에는 American Superconductor (AMSC)사에서 개발한 스테인리스 안정화 재를 갖는 344s CC를 사용하였다. 솔레노이드형 무유도 권선법을 사용하여 초전도코일을 제작하여, 정상전류가 통전될 때 손실을 최소화할 수 있도록 하였다. 동일 회사에서 제조된 구리 안정화재를 갖는 344 CC와 344s CC를 사용한 소용량 초전도한류기를 각각 제작하고, 전류제한 및 저항발생 특성실험을 진행하여, 대용량 초전도한류기 개발에 더 적합한 선재를 선택하였다 [2]. 100 ms의 단락주기 동안 최대 도달 온도에 따른 과냉각조건에서의 기포발생을 고속카메라로 관측하였고, 열 및 전기적 절연 문제를 고려하여 최대 도달 온도를 300 K로 결정하였다. 최대 도달온도를 결정하기 위해서 다음의 식 (1)을 이용하였다.

$$E = \sqrt{\frac{C_v \times \nabla T \times \rho}{\nabla t}} \quad (1)$$

여기에서 E 는 단위길이 당 허용 인가전압을 의미하여 단위는 V/m 이고, C_v 는 초전도선재의 비열로서 단위는 $J/cm^3 \cdot K$ 이고 ∇T 는 액체질소의 온도상승값으로 단위는 K 이며, ρ 는 초전도선재의 비저항으로서 단위는 $\Omega \cdot m$ 이고 ∇t 는 최종 온도상승이 이루어진 시점까지의 경과시간 즉, 사고 지속시간으로 단위는 s 이다. 사고 지속시간 동안 344s CC의 온도가 300 K에 도달하기 위해서 인가되는 전압은 40 V/m로 결정된다. 본 연구에서의 배전급 초전도한류기는 13.2 kV의 정격 전압을 가지므로 최소 330 m 이상의 초전도선재가 필요하고, 630 A를 통전하기 위해 8 병렬 선재를 사용하여 총 길이 2.64 km의 선재를 사용하였다 [3]. 이때의 초전도 한류코일의 임계전류는 1,200 A로서 본 초전도한류기는 정상 통전 시 임계전류의 74 % 운전을 하도록 설계되었다. 초전도코일은 동심원 구조를 가지는 7개의 무유도 코일로 이루어져 있으며, 각 코일은 구리 단자를 통하여 직렬로 연결되어 있다 [3]. 초전도코일의 자세한 사항은 표 1에 명시하였다. 조립이 완성된 무유도 코일은 지름 0.9 m, 높이 0.5 m의 크기를 가진다.

표 1 무유도 초전도 한류코일의 명세

Table 1 Specifications of non-inductively wound superconducting coils

무유도 코일 번호	코일 반경 [mm]	상온 저항 [Ω]	인덕턴스 [μH]
1	300	1.5	1.7
2	325	1.59	2
3	350	1.78	2.6
4	375	1.93	2
5	400	2	2
6	425	2	2
7	450	2.3	1.9
조립 완성된 코일		13.1	21

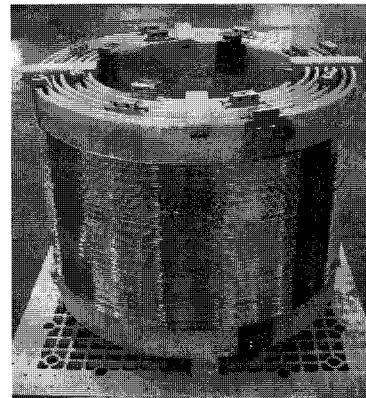


그림 1 완성된 CC 한류 코일

Fig. 1 Photograph of completely assembled CC coils

65 K의 과냉각조건 하에서 CC는 초전도 상태가 되어 저항 성분이 사라지게 되고, 구리 단자의 저항인 약 6.6 $\mu\Omega$ 과 인덕턴스 성분인 21 μH 가 남지만, 무시할 수 있을 정도로 작은 값이라고 할 수 있다. 그림 1은 제작이 완료된 초전도한류코일의 외형을 보여준다. 과냉각소 냉각시스템의 온도인 65 K에서는 77 K에서의 임계전류보다 2.5 배 증가된 임계전류가 측정되었다. 또한 시스템의 압력이 높을수록 사고시에 발생하는 기포의 양이 현저하게 줄어들어 전기적 절연 측면에서 매우 유리하다 [4]. 따라서 완성된 초전도코일은 임계전류의 증가와 절연특성 향상을 위하여 65 K, 3 기압의 과냉각조건에서 운전되었다.

2.2 배전급 초전도한류기용 모니터링 시스템

초전도한류기를 계통에 적용하기 위하여 전류제한의 효율성과 더불어 가장 중요하게 요구되는 것은 동작의 신뢰성이다. 안정적인 장시간 운전을 위해서는 초전도한류기가 일정한 조건에서 동작해야 한다. 계통에서의 단락사고로 인한 초전도한류기의 온도상승은 계산이 가능하기 때문에 안정적으로 설계할 수 있지만 예상하지 못한 외부로부터의 열 침입, 물리적 진동 및 충격 등의 모든 경우에 대비하여 설계하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 실시간으로 초전도한류기를 감시하고 제어할 수 있는 모니터링 시스템이 반드시 필요하다. 본 연구에서 개발된 모니터링 시스템은 다음과 같은 대표적인 기능을 갖는다.

- 1) 웹을 통한 동작 조건의 실시간 감시
- 2) 피드백 자동 온도제어
- 3) 정보 시, SMS 및 음성 메시지 통보 기능

표 2에는 초전도한류기의 동작조건을 감시하기 위해 필요한 센서의 종류 및 용도에 관하여 명시하였다. 정상 및 사고발생 시의 순시 전류를 각각 측정하기 위해 직류변류기를 사용하였고, 20 kV까지 견딜 수 있는 고전압용 전압 분배기를 사용하여 전압을 측정하였다. 온도는 냉동기의 각 부 및 구리 냉각판에 센서를 부착하였지만 초전도코일에는 절연적인 문제로 인하여 부착하지 않았다. 또한 냉각시스템의 질소조 상·하부에 각각 포트를 내고 차압계로 액체의 압력을 측정하여 액체질소의 수위를 추정하였다. 모니터링 시스템 내부에 데이터베이스 서버를 구비하고, 각각의 센서로부터 나오는 신호를 초당 2,000개의 샘플을 받는 고속 DAQ 보드 및 초당 10개 샘플을 받는 저속 DAQ 보드를 각각 통하여 실시간으로 저장하였다. 온도는 가장 중요한 동작조건 중 하나이다. 온도가 상승하면 초전도선재의 임계전류가 낮아지고, 온도가 63.5 K 이하로 낮아지면 질소가 고체화되는 문제가 발생할 수 있다.

표 2 초전도한류기용 모니터링 센서의 종류
Table 2 Sensors for the SFCL monitoring system

항목	개수	센서	용도 및 특징
전류	3	5 kA (직류변류기:DCCT)	순간 고장 전류 측정
	1	1 kA (직류변류기:DCCT)	정상전류 측정
전압	1	Voltage divider 1/2,000	20 kV 내전압
온도	8	PT-100 (백금저항 온도센서)	45 K ~ 300 K
압력	1	전자식 압력계	가압 측정
LN ₂ 수위	1	차압계	차압으로 질소 수위 계산

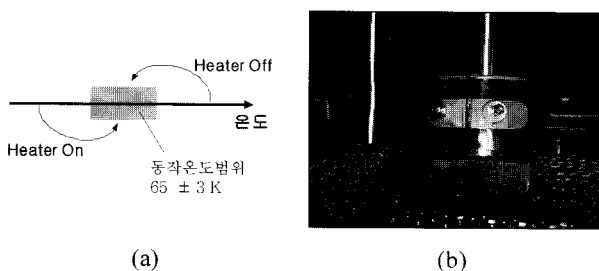


그림 2 온도 제어 (a) bang-bang 제어를 이용한 피드백 개념도, (b) 냉동기 cold-head에 부착된 히터

Fig. 2 Temperature control (a) a schematic of bang-bang control, (b) a heater attached to the cold-head of a cryo-cooler

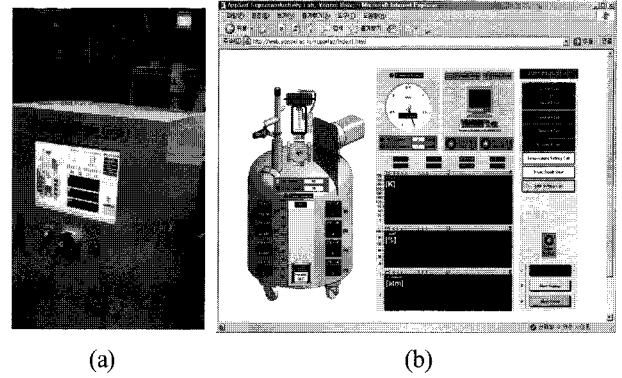


그림 3 한류기 모니터링 시스템 (a) 외형, (b) TCP/IP를 이용한 웹 기반 감시프로그램 화면

Fig. 3 SFCL monitoring system (a) the exterior, (b) a display of the web-based monitoring program using TCP/IP method

따라서 동작 온도범위를 설정하고 이를 벗어날 경우 냉동기의 쿨드헤드에 부착된 히터를 피드백 점멸 제어 (bang-bang control)하여 일정 온도범위를 유지하도록 하였다. 그림 2는 동작 개념도와 부착된 히터를 보여준다. 온도 및 내부압력, 질소수위는 모두 일정 범위 내에서 동작해야만 한다. 자동으로 제어될 수 없는 경우, 또는 외부 요인에 의한 예기치 못한 사고발생의 경우 설정한 범위를 벗어난 신호가 감지되면 경보를 울리고, SMS 및 음성 메시지를 전송하여 관리자 및 관계자에게 상황을 알리도록 하였다. 모니터링 시스템의 서버는 고정 IP를 가지고 TCP/IP 프로토콜을 통하여 웹서버 기능을 하며, 따라서 감시 및 제어상황, 그리고 정보 등의 모든 정보는 인터넷이 연결된 모든 곳에서 접속하여 확인하고 제어할 수 있도록 하였다. 그림 3은 개발된 모니터링 시스템의 외형과 웹 접속 화면을 보여준다.

3. 13.2 kV / 630 A급 초전도한류기 시험 결과

2006년 12월, 공인인증 시험기관인 한국전기연구원의 대전류 시험장에서 제작된 배전급 초전도한류기의 단락 및 내전압 시험을 수행하였다. 실험에 앞서 질소 주입과 과냉각 액체질소 조건을 만들기 위해 냉동기 및 진공펌프를 사용하였다. 이 때, 모니터링 시스템의 동작특성을 확인하였다. 하지만 단락 및 내전압 시험에서는 안전을 위하여 모니터링 시스템을 초전도한류기와 분리하여 실험하였다.

3.1 단락시험 결과

그림 4는 단락시험의 등가회로를 나타낸다. 13.2 kV 정격 전압의 선로에 초전도한류기를 직렬로 연결하고 정상운전시 630 A의 전류를 통전하였다. 초전도한류기와 병렬로 2 Ω의 바이패스 저항을 삽입하여, 배전 계통에서 요구하는 사고발생 시의 발생저항 크기를 만족시킬 수 있었다. 단락시험에 앞서 예상 고장전류의 크기를 결정하고 조정 시험을 수행하였다. 초전도한류기가 연결되지 않은 상태에서 10

kA_{rms}의 예상 고장전류가 발생하는 단락시험을 수행하였고, 선로 내에서의 인덕턴스 성분과 저항 성분의 비로 발생하는 직류 성분으로 인하여 비대칭 돌입전류가 발생하여 최대 약 30 kA_{peak}의 고장전류가 발생하였다. 그림 5는 100 ms 동안의 단락사고 발생 시 초전도한류기와 바이패스 저항으로 흐르는 예상 전류의 측정값을 보여준다. 그림 4에서와 같이 바이패스 저항을 삽입하여 계통을 구성하였을 때, 초전도한류기는 30 kA의 고장 전류를 9.5 kA로 제한하여 약 31.5%로 제한하였고, 초전도한류기로 흐르는 전류의 크기는 3.6 kA이다. 초전도한류기로 흐르는 전류와 이 때 발생하는 저항 곡선은 그림 6에 나타내었다. 정현파의 전류파형이 조금 왜곡된 것을 볼 수 있는데, 이것은 변압기가 포화되어 전압원이 왜곡되었기 때문이다. 초전도한류기는 1/4주기 만에 약 4.4 Ω의 저항을 발생하였고, 최종적으로 100 ms가 지난 후 11.5 Ω을 발생하였다. 이로부터 최종 도달온도는 250 K 정도까지 상승하였음을 추정할 수 있었다. 이 값은 설계값보다 낮은 수치이며, 바이패스 저항을 병렬로 연결하여 초전도한류기 양단에 인가되는 전압이 더 낮았기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 내전압시험 결과

일반적으로 전력기계의 계통적용을 위해서는 단락시험과 더불어 내전압시험을 실시하여 안정성을 확인한다. 앞서 단락시험을 통하여 단락시험에 대한 안정성을 확인할 수 있었다. 다음으로 초전도한류기의 절연내력 특성을 확인하기 위하여 내전압시험을 실시하였다. 초전도한류기는 정상상태일 때에 초전도성을 유지하기 때문에 인가되는 전압의 크기는 '0'이다. 그러나 초전도한류기용 전류도입선은 냉각효율을 고려하여 구리 재질을 사용하여 제작하였으므로 그로 인한 전압이 인가된다. 또한 계통 내에 사고가 발생하면 초전도코일에 켄치가 발생하고 그로 인하여 저항이 발생하며, 이로 인하여 계통 내의 전압이 초전도코일 양단에 직접 인가된다. 따라서 초전도한류기의 안정적인 동작을 위하여 고전압에 대한 내구성 시험이 반드시 필요하다. 본 연구팀이 개발한 13.2 kV 배전급 초전도한류기의 경우, 교류 차단기의 내전압 특성 시험 기준으로 사용되고 있는 IEC 60694 프로토

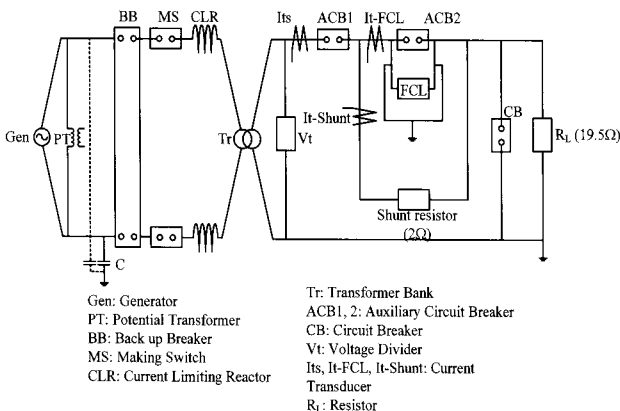


그림 4 13.2 kV급 단락 시험 회로도
Fig. 4 Equivalent circuit of short circuit test at 13.2 kV

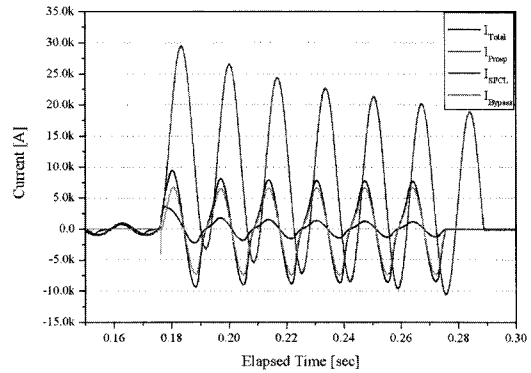


그림 5 단락사고 시 고장전류의 파형
Fig. 5 Current waveform during short circuit

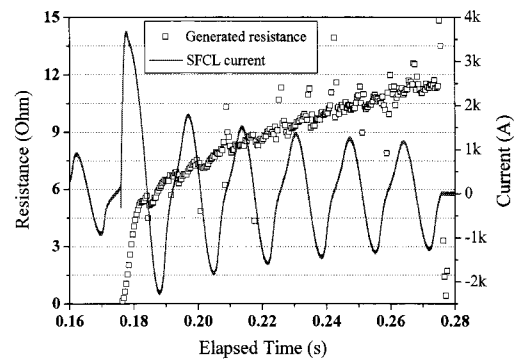


그림 6 단락 시 초전도한류기의 발생저항과 통전전류
Fig. 6 Resistance and current waveform in SFCL

콜을 적용하여 시험을 수행하였다. 다음의 표 3에는 정격 전압별 교류 차단기의 내전압시험 기준을 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 본 연구의 목표는 배전급 교류차단기의 시험 기준과 동일한 AC 50 kV의 전압을 1분간 견디는 것이었으나 시험결과, AC 143kV의 전압 시험을 통과하였다. 이 값은 기존의 72.5 kV급 교류차단기의 내전압 시험기준과 동일한 값이므로 초전도한류기의 내전압 시험결과로서는 세계 최고이다. 이러한 시험결과를 통하여 배전급 뿐만 아니라 상용적 의미가 크다고 알려져 있는 medium voltage급 이상의 초전도한류기용 절연 기술을 확보하였음을 확인할 수 있었다.

표 3 교류 차단기의 내전압시험 기준
Table 3 Standard of AC dielectric withstand voltage test for AC circuit breakers

정격전압 (kV _{rms})	AC dielectric withstand voltage (kV _{rms})	비고
24	50	목표
36	70	-
52	95	-
72.5	140	실험결과

4. 결 론

본 논문에서는 현재 국내 배전계통의 정격 전압인 22.9 kV의 단상인 13.2 kV급 초전도한류기의 개발에 관한 내용을 다루었으며, 초전도한류기의 안정적인 장시간 동작을 위해 반드시 필요한 실시간 모니터링 시스템을 제안하고 개발하였다.

초전도한류기는 기존의 전력기기의 개발에서 다루지 않는 극저온 기술이 포함되어 있으므로 실시간 모니터링과 원격 및 자동 제어와 정보 시스템의 개발이 반드시 필요하다. 본 연구를 통하여 개발한 초전도한류기용 모니터링 시스템은 점멸 제어를 비롯하여 SCADA 방식 채택 등의 IT 기술을 접목하여 초전도한류기와 연계함으로써 초전도한류기 시스템을 안정적이고 효율적으로 전력계통에 응용할 수 있도록 하였다. 따라서 이와 같은 연구를 통하여 향후 IT화된 전력계통에 초전도한류기를 투입하여 원활하게 운전할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구를 통하여 개발된 배전급 초전도한류기는 CC를 사용하여 개발된 세계 최초의 초전도한류기로서 큰 의미를 가지며, 국제적 공인 인증 시험기관인 전기연구원에서 단락 시험을 통하여 우수한 전류제한 특성을 확인하였다. 또한, AC 143 kV의 내전압시험 기준을 통과함으로써 세계적으로 현재까지 개발된 초전도한류기 중에서 가장 우수한 시험결과를 얻었다. 또한 이러한 시험결과를 통하여 향후 상업적으로 매우 큰 의미를 가지고 있는 medium voltage급 이상의 초전도한류기를 개발할 수 있는 요소기술을 확보하였다. 본 연구를 통하여 개발한 초전도한류기용 모니터링 시스템은 단락 및 내전압시험 과정에서 안전을 위하여 분리하였지만, 초전도한류기 시스템의 냉각 준비과정에서 기본적인 모니터링, 제어 및 정보 기능을 확인하였고, 추후 초전도한류기의 운전 안전성을 확인하기 위하여 모니터링 시스템을 이용한 장시간 계통적용 시험을 수행할 계획이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] Y. Y. Xie, V. Selvamanickam, et al, "Second Generation High-Temperature Superconducting Wires for Fault Current Limiter Applications," IEEE Trans. on Applied Supercond. vol. 17, No. 2, pp.1981-1985, 2007

[2] S. E. Yang, T. K. Ko, et al, "Manufacture and Test of the Bifilar Wound Coil Using Coated Conductor With Stainless Steel Stabilizer," IEEE Trans. on Applied Supercond. vol. 17, No. 2, pp.1867-1870, 2007

[3] C. Lee, T. K. Ko. et al, "Design of a high temperature superconducting for a 8.3 MVA FCL," IEEE Trans. on Applied Supercond. vol. 17, No. 2,

pp.1907-1910, 2007

[4] H. Kang, T. K. Ko, et al, "Electrical breakdown characteristics of superconducting magnet system in sub-cooled liquid nitrogen," IEEE Trans. on Applied Supercond. vol. 17, No. 2, pp.1509-1512, 2007

저 자 소 개



박 동 근 (朴 東 瑾)

1980년 11월 4일생. 2003년 연세대 기계전자공학부 졸업. 2005년 동 대학원 전기전자공학부 석사. 2005년~현재 동 대학원 박사과정.

Tel : 02-2123-2772

Fax : 02-393-2834

E-mail : dogma@yonsei.ac.kr



강 형 구 (姜 亨 求)

1973년 8월 4일생. 1997년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기전자공학과 석사. 2005년 연세대학교 전기전자공학과 박사. 2005년~현재 현대중공업 기계전기연구소 선임연구원

Tel : 031-289-5076

Fax : 031-289-5050

E-mail : maglev@nate.com



석 복 렬 (石 福 烈)

1971년 2월 16일생. 1994년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 석사. 2000년 큐슈대학교 시스템정보과학연구과 박사. 2001년~현재 현대중공업 기계전기연구소 책임연구원.

Tel : 031-289-5076

Fax : 031-289-5050

E-mail : bokyeol@yahoo.com



고 태 국 (朴 文 壽)

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

Tel : 02-2123-2772

Fax : 02-393-2834

E-mail : tkko@yonsei.ac.kr