액체질소를 사용하는 초전도 고전압 전력기기의 절연 특성 연구

Analytical and Experimental studies on Dielectric Characteristics of High Voltage Superconducting Machines in Liquid Nitrogen

나진배[1], 고태국[2], 강형구[3,*], 석복렬[4], 김태중[5]

J. B. Na[1], T. K. Ko[2], H Kang[3,*], B. Y. Seok[4], and T. J. Kim[5]

Abstract: The electrical insulation design of high voltage superconducting fault current limiters (SFCLs) should be confirmed to be applied for the stabilization of the power grid. This paper describes numerical analysis and AC dielectric experiments for developing high voltage SFCLs. The electric field distributions between applied high voltage part and ground were calculated by finite element method (FEM) simulation tool and AC criterion of liquid nitrogen at 200 kPa was calculated from correlation between the field utilization factor and FEM simulation results. This paper deals with ceonceptual insulation design of a 154 kV class single-phase no-inductively wound solenoid type SFCL which was focused on gap distance between the cryostat and superconducting coils. Furthermore, the shield ring effect was confirmed to reduce maximum electric field at applied high voltage part.

Key Words: AC dielectric experiments, AC electric field criterion, electrical insulation design, high voltage SFCL, shield ring effect.

1. 서 론

2세대 고온 초전도 선재를 이용한 초전도 전력기기를 제작하기 위하여 전 세계 많은 연구 기관에서 활발히 연구개발을 진행하고 있다[1]. 개발된 초전도 전력기기를 실제 전력 계통에 적용하기 위해서는 고전압 절연 연구는 필수적이다[2].

2세대 고온초전도 선재의 경우는 액체질소를 냉매로 사용하므로, 해당 물질의 절연 내력을 측정하여 절연 설계 시 적용해야 한다. 또한 초전도 선재의 전류 통전 용량을 증가시키기 위해서는 과냉의 냉각조건으로 만들어야 한다. 과냉의 냉각 조건을 만들기 위해서는 액체질소의 온도가 64 K을 유지하며 극저온 용기의 내부 압력은 0.12기압 이상으로 유지해야 함으로, 압력에 따른 액체질소의 절연 내력을 측정해야 한다.

본 절연 실험에서 AC 전압에 따른 액체질소의 절연 내력을 측정하기 위해서 구대평판 전극을 사용하였다. 고전압을 인가하는 구 전극의 크기를 변화시키면서 평판 전극간의 거리를 조정함으로써, 초전도 고전압 전력기기의 다양한 형상을 묘사할 수 있기 때문에 본 절연 실험에서는 구대평판 전극을 이용하였다. 본 논문에서는 총 5개의 다양한 직경을 가진 구 전극을 이용하여 AC 전압의 절연 특성 실험을 진행하였다. 다양한 압력조건에서 AC 절연파괴 실험을 통해서 산출된 결과는 통계 프로그램의 와이블 확률 플롯을 이용하여 50 % ($V_{BD,50\%}$) 확률을 가지는 AC 절연 파괴 전압을 계산하였다. 해당 실험 결과를 통해서, 극저온 용기의 내부 압력이 200 kPa의 경우에 AC 절연 파괴 전압이 포화되는 현상을 발견하였다[3]. 따라서 절연 내력을 증가시키기 위해서는 극저온 용기의 내부 압력을 최소 200 kPa 이상으로 유지해야 한다.

본 논문의 사용된 구대평판 전극의 다양한 형상에 따른 구 전극과 평판전극간의 전계 분표 특성을 파악하기위하여 유한요소법 프로그램인 Infolytica사의 ElecNet을 사용하였다. 각 구 전극에 1 kV를 인가하여 산출된 수치해석 결과를 통해서 계산된 최대전계(E_{MAX})와 평균전계(E_{MEAN})를 이용하여 식 (1)과 같이 계산하여 전계 이용율을 산출하였다[4].

$$\text{전계 이용률}(\zeta) = \frac{\text{최대전계}(E_{MAX})}{\text{평균전계}(E_{MEAN})} \quad (1)$$

전계 이용률은 구대평판 전극간의 전계의 균등도를 표현하며, 계산된 결과가 1의 가까워질수록 균등도가 좋음을 나타낸다.

각 구대평판 전극간의 형상에 따라 산출된 전계 이용률과 다양한 압력 조건에서 산출된 $V_{BD,50\%}$간의 관계를 비교함으로써, 각 압력 조건과 전극의 형상에 따른 평균 전계를 식 (2)를 이용하여 계산하였다[5].

$$E_{MEAN,50\%} = E_{MEAN,1kV} \times V_{BD,50\%} \quad (2)$$

식 (2)를 통해서 계산된 결과와 구대평판 전극 간의 전계 이용률을 상관관계를 비교함으로써 액체질소의 기준전계를 산출 하였다. 최종적으로는 설계하고자 하는 초전도 고전압 전력기기의 형상을 수치 해석하여 해당 형상의 전계 이용률을 산출하여 역으로 AC 절연 파괴 전압을 유추하고 식 (3)을 이용하여 안전율을 계산 하였다[6].

절연 설계에서 안전율이 절연 설계의 여유분을 얼마로 설정할지 여부를 표현하며 해당 조건은 사용자의

[1]학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학부 박사과정
[2]정 회 원 : 연세대 전기전자공학부 교수
[3]정 회 원 : 국립 충주대 전기전자공학부 전임강사
[4]정 회 원 : 현대중공업 기계전기연구소
[5]정 회 원 : 한국폴리텍1대학 전기과 교수
*교신저자 : kang@cjnu.ac.kr
원고접수 : 2011년 01월 31일
심사완료 : 2011년 03월 18일
게재확정 : 2011년 03월 18일

Table 1. Specifications of sphere-plane electrode system.

	Specifications
전극 물질	스테인리스 스틸 (SUS 316L)
전극 형태	구대평판 구조
갭 간격 (mm)	2, 5, 8
구 전극 직경 (mm)	2, 4, 6, 8, 10
평판 전극 (mm)	직경 : 20, 두께 : 10

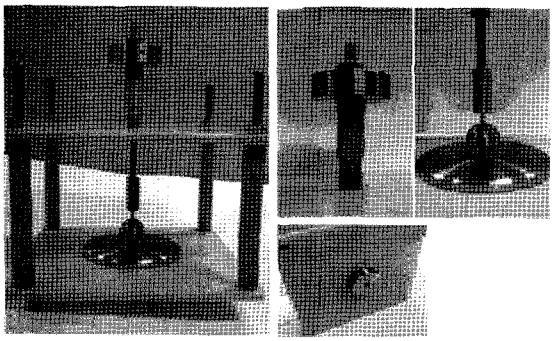

Fig. 1. Photograph of sphere-plane electrode system for AC dielectric tests.

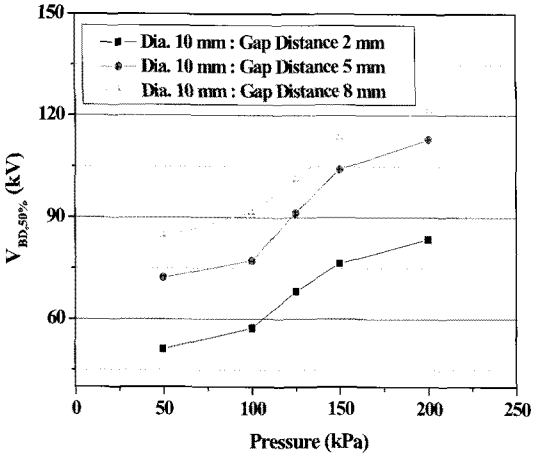

Fig. 2. 50% probability AC breakdown voltage of liquid nitrogen with wiebull plot according to various pressure in cryostat (Diameter of sphere = 10 mm).

$$\text{안전율}(safety\ factor) = \frac{\text{기준전계}}{\text{평균전계}} \quad (3)$$

요구 조건 또는 경제비용을 고려해서 결정할 수 있다. 안전율이 1.0인 경우는 절연 파괴 확률의 여유가 없는 조건임으로 본 논문에서는 절연 파괴 확률이 10 % 여부를 가질 수 있는 1.1을 기준으로 절연 설계를 진행하였다.

2. AC 절연 실험 방법

2.1. 구대평판 전극 시스템

AC 절연 파괴 실험은 구 전극에 1 kV/s로 절연 파괴가 발생할 때까지 AC 전압을 인가하였다. 본 실험에 사용한 AC 실험 장비는 AC 240 kV, 60 kVA와 60 Hz의 사양을 가지고 있다. 표 1은 AC 절연 파괴 실험에 사용한 구대평판 전극의 사양을 보여주고 있다. 액체질소의 AC 절연 파괴 전압을 측정하기 위해서 구대평판 전극 구조를 사용하였고, 해당 전극의 재질은 스테인리스 스틸로 내구성이 강한 물질로 제작하였다.

총 5개의 구 전극을 사용하였으며, 해당 전극의 직경은 2 mm에서 10 mm까지 변화 시켰다. 또한 구와 평판 전극간의 갭 간격은 2, 5와 8 mm 이다. 상위에 나열된 전극의 직경과 갭간격을 변화시킴으로써 다양한 형상을 묘사할 수 있다.

Table 2. The calculated field utilization factor according to various geometric configuration between sphere-plen electrode system.

구 전극 직경 (mm)	갭간격 (mm)		
	2	5	8
2	0.3800	0.1688	0.1172
4	0.5700	0.3100	0.2216
6	0.6749	0.4146	0.3030
8	0.7227	0.4948	0.3802
10	0.7477	0.5394	0.4371

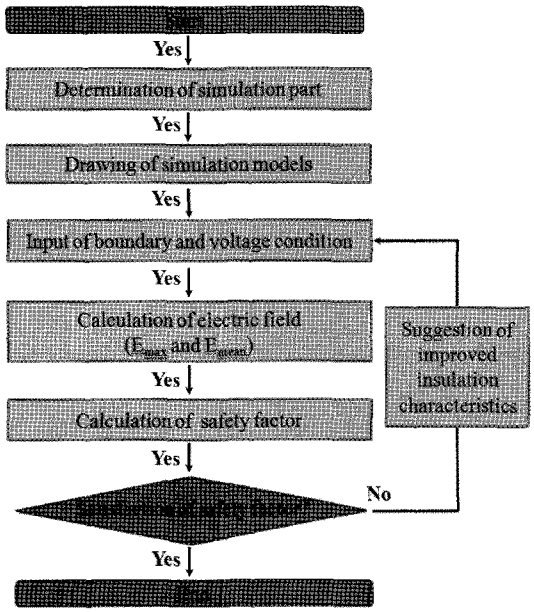

Fig. 3. The flow chart for insulation design of high voltage superconducting application.

2.2. 다양한 압력조건에서 AC 절연 파괴 실험

액체질소의 AC 절연 내력을 측정하기 위하여 극저온 용기의 내부 압력 조건을 변화하고, 각 압력 조건마다 구대평판 전극의 형상을 변화 시켜가면서 AC 절연 파괴 실험을 진행하였다. 극저온 용기 내부의 압력 조건은 과냉의 냉각 조건을 만들기 위해서도 필요하지만 고전압 절연 설계를 위해서도 중요한 요소가 될 수 있다. 따라서 과냉의 냉각 조건에서 액체질소의 절연 내력 내력을 증가 시킬 수 있는 압력 조건을 찾아야 한다. 그림 1은 구 전극의 직경이 10 mm인 경우, 다양한 압력 조건에 AC 절연 파괴 실험 결과를 보여주고 있다. 각 조건마다 총 10회의 AC 절연 파괴 전압을 측정하여 와이블 확률 플롯을 통해서 50% 확률을 가

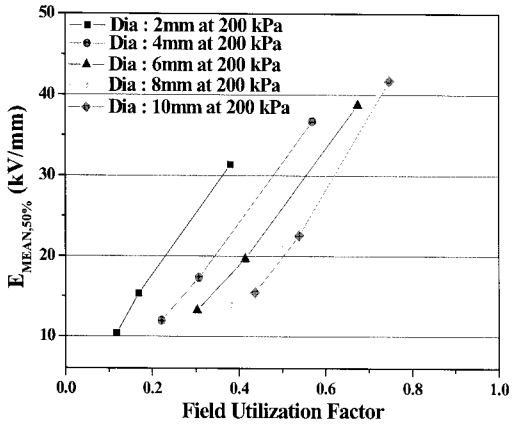

Fig. 4. 50% probailtiy electric field criterion of liquid nitrogen in cryostat pressure at 200 kPa.

지는 AC 절연 파괴 전압으로 계산하였다. 그림 2를 통해서 극저온용기의 내부 압력이 200 kPa이 되면 50 % 확률의 AC 절연 파괴 전압이 포화되는 현상을 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 실험에 사용한 모든 전극에서도 동일하게 발견되었다.

2.3. 다양한 압력조건에서 AC 절연 파괴 실험

AC 절연 파괴 실험에는 구대평판 전극을 사용하였다. 구대평판 전극을 사용한 이유는 구 전극의 직경의 크기와 구와 평판 전극간의 간극을 조절함으로써 고전압 전력기기의 다양한 형상을 묘사할 수 있기 때문이다. 각 전극간의 형상에 따른 전계 분포를 계산하기 위하여 구전극에 1 kV를 인가하였다. 전계 해석은 Inforlytica사의 ElecNet을 이용하였다. 구대평판 전극의 형상의 변화에 따라 구전극 하단에서 발생하는 최대전계와 구와 평판 전극 사이의 평균 전계가 다르게 계산되었다. 상위 결과를 식 1과 같이 계산하면, 각 전극의 형상에 따른 전계 이용률을 계산하였다. 표 2는 계산된 전계 이용률 결과를 보여주고 있다. 이런 전계 이용률은 구대평판 전극간의 전계의 균등도를 보여주는 요소이다.

2.4. 고전압 전력기기를 설계하기 위한 흐름도

본 논문에서는 고전압 초전도 전력기기의 효율적인 절연 설계하기 위해하여 그림 2와 같은 절연 설계 흐름도를 작성하였다. 먼저 고전압 초전도 전력기기에서 절연 설계가 필요한 부분을 결정하고 유한요소 수치해석을 위하여 해석 모델을 그린다. 수치해석을 위하여 해석 모델의 인가전압 크기와 모델링 경계 조건을 결정한다. 최종적으로 해석 결과를 바탕으로 해당 모델의 전계 분포, 전계 이용률과 안전율을 계산한다. 상위에서 도출된 결과를 통해서 해상 절연 설계 모델의 절연 파괴 전압을 역으로 유추하고 설계자가 원하는 수준의 안전율인지 여부를 비교하여 확률적으로 안정한 고전압 초전도 전력기기의 절연 설계를 한다.

3. 실험결과 및 분석

3.1. AC 전압에서 액체질소의 기준 전계 도출

그림 3의 y축은 AC 절연 실험을 통해서 산출된 결과를 와이블 확률 플롯을 통해서 50 % 확률의 절연 파괴 전압을 산출한 결과와 해당 구대평판 전극간의 형상에 따라 계산된 평균전계을 식(2)를 이용하여 계

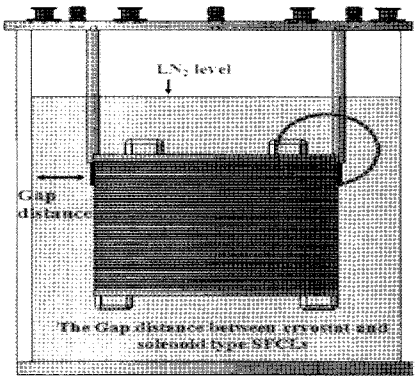

Fig. 5. Single-phase 154kV class resistive solenod SFCL.

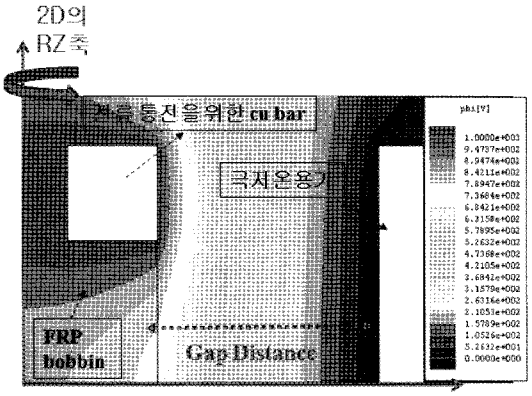

Fig. 6. 2D electric field simulation results according to gap distance between solenoid coils and cryostat.

산값을 나타낸다. 상위 결과에서 계산된 결과와 구대평판 전극간의 형상에 따라 변화는 전계 이용률을 상호 비교한 결과이다.

그림 3은 총 5개의 서로 직경을 가지는 구 전극의 200 kPa의 압력 조건에서의 결과이다. 그림 3을 통해서 구 전극의 직경이 커질수록, 각 구 전극의 평균전계 값의 차이가 점점 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 또한 x축의 전계 이용율은 최대값이 1임으로 구 전극의 직경이 커질수록 직경 10 mm의 전계 그래프에서 큰 차이를 보이지 않을 것이다. 따라서 극저온용기 내부 압력이 200 kPa인 경우, 구 전극 직경 10 mm의 그래프의 기울기를 통계 프로그램을 이용해서 식 (4)와 같이 도출하였다. 도출된 식 (4)는 극저온 용기의 압력인 200kPa이며 AC 절연 파괴 확률이 50 %인 고전압 절연 설계 조건에서 액체질소의 기준전계로 활용 할 수 있었다.

$$E_{MEAN,50\%,10\varnothing,200kPa} = f(\xi) = 71.307 \times \xi^{1.8516} \quad (4)$$

식 (4)는 극저온용기 내부 압력이 200 kPa인 경우, 액체질소의 기준전계이다. 따라서 절연 설계가 필요한 고전압 초전도 전력기기의 형상을 유한요소 수치해석하면 형상별 전계 이용률을 계산할 수 있으며 계산된 계산된 전계 이용률을 식 (4)에 대입하면 액체질소를 절연물로 사용하는 고전압 초전도 전력기기의 형상에 따른 기준전계를 계산 할 수 있다.

3.2. 확률적 AC 절연 파괴 전압 도출

Table 3. The calculated electric field distribution and field utilization factor according to gap distacne between solenoid coils and cryostat.

갭 간격 (mm)	최대전계 (kV/mm)	평균전계 (kV/mm)	전계 이용율
30	0.1453	0.0325	0.2237
40	0.1160	0.2246	0.2121
50	0.0932	0.0197	0.2117

Table 4. The calculated probability AC breakdown voltage and safety factor according to gap distacne between solenoid coils and cryostat.

갭 간격 (mm)	기준전계 (kV/mm)	AC $V_{BD,50\%}$ (kV)	안전율
30	4.4554	137.1	0.8622
40	4.0368	164.1	1.0321
50	4.0239	204.0	1.2833

고전압 초전도 전력기기의 절연 설계를 위해서는 최종적으로 식 (4)를 통해서 계산된 기준전계를 이용하여 확률적 AC 절연 파괴 전압을 도출할 필요가 있다. 확률적 AC 절연 파괴 전압을 유추하기 위해서는 유한요소 수치해석을 통해서 절연 설계가 필요한 고전압 초전도 전력기기의 평균전계를 산출하고 식 (4)를 통해서 산출한 기준전계와 비를 식 (5)와 같이 계산한다 [3]. 식 (5)를 통해서 최종적으로 확률적 AC 절연 파괴 전압을 유추할 수 있다. 이와 같은 방법은 반복적인 AC 절연 파괴 실험을 획기적으로 줄일 수 있다.

$$V_{BD,50\%} = \frac{E_{MEAN,50\%,10\varnothing,200kPa}}{E_{MEAN,1kV}} \quad (5)$$

3.3. 고전압 초전도 전력기기의 절연 설계

상위 과정을 통해서 극저온 용기의 내부 압력이 200 kPa인 경우의 액체질소의 기준전계를 도출하였고, 해당 결과와 전계해석을 통하여 역으로 확률적 AC 절연 파괴 전압을 유추하는 방법을 설명하였다. 본 논문은 이번 장을 통해서 상위 과정을 통해서 설명한 고전압 초전도 전력기기의 실질적인 절연 설계 사례를 보여주고자 한다.

본 논문은 절연 설계에 앞서서 몇 가지 상황에 대해서 가정을 하고자 한다. 첫번째는 본 절연 설계는 그림 4와 같이 154 kV 단상의 솔레노이드 타입의 저항형 한류기이다. 두 번째는 해당 저항형 한류기는 단상의 89 kV의 정격 전압 용량을 가지기 위해서 3개의 솔레노이드 코일로 권선된 형태이며 해당 정격 용량을 가지기 위해서 코일의 외곽 보빈에 부착된 구리 블록에 폭 4 mm와 두께 0.1 mm의 초전도 선재가 솔더링하여 권선한 형태로 해석 모델링을 하였다. 따라서 최대전계는 구리블럭에 솔더링한 초전도 선재에서 발생하게 된다. 상위 같이 가정하는 경우 솔레노이드 코일과 극저온용기간의 갭 간격이 본 절연 설계의 중요한 요소가 될 수 있음을 알 수 있다.

그림 5는 앞선 가정을 통해서 유한요소 수치해석을 위한 모델링을 보여주고 있으며, 해당 모델링을 통해서 구리블럭에 초전도 선재부터 극저온용기까지의 전위경도를 볼 수 있다. 솔레노이드 코일과 극저온용기간의 갭 간격별 수치해석을 진행하고, 각 형상별 최대전계와 평균전계를 계산하였고 계산된 결과를 바탕으로 전계 이용률을 산출하였다. 표 3을 통해서 갭 간격별 계산된 전계값을 보여주고 있다. 갭 간격이 증가할수록 최대전계가 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. 또한 식 (4)를 통해서 도출된 액체질소의 기준전계를 이용하여 갭 간격별 기준전계를 계산하였다. 최종적으로 식 (5)를 통해서 50 % 확률적 AC 절연 파괴 전압을 계산하고, 각 갭 간격별 안전율을 계산하였다. 표 4는 각 갭 간격별 도출된 결과를 보여주고 있다. 본 절연 설계를 통해서 솔레노이드 코일과 극저온용기간 갭 간격이 40 mm와 50 mm인 경우가 모두 159 kV를 넘었으나 안전율의 관점과 연동해서 볼 경우 갭 간격 40 mm는 본 논문에서 결정한 안전율 1.1을 넘지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 갭 간격 50 mm인 경우가 50 % 확률적 AC 절연 파괴 전압도 159 kV를 넘기었고 안전율도 1.1을 넘는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 극저온용기의 내부 압력이 200 kPa이며 154 kV 단상의 솔레노이드 타입의 저항형 한류기의 경우는 솔레노이드 코일과 극저온용기간의 갭 간격은 최소 50 mm를 유지해야 50 % 확률적으로 안전한 절연 설계를 할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

고전압 초전도 전력기기의 절연 설계를 위해서는 냉매로 사용하는 액체질소의 기준전계를 도출하기 위하여 구대평판 전극을 이용하여 다양한 압력에서 AC 절연 파괴 전압을 측정하였다. 상위 실험을 통해서 극저온용기의 내부 압력이 200 kPa인 경우 AC 절연 파괴 전압이 포화되는 현상을 도출하였다. 측정된 AC 절연 파괴 전압을 와이블 확률 플롯을 이용하여 확률적 AC 절연 파괴 전압을 계산하였고, 유한요소 수치해석을 이용하여 각 형상별 최대전계와 평균전계를 계산하였다.

고전압 초전도 전력기기의 경우 고전압 인가부와 저전압 또는 접지부간의 형상에 따라 전계의 분포가 달라지므로 전계 이용률을 계산하여 형상별 확률적 AC 절연 파괴 전압과 상호 비교를 통해서 액체질소의 기준전계를 도출하였다.

극저온용기의 내부 압력이 200 kPa인 경우 계산된 액체질소의 기준전계를 통해서 역으로 절연 설계를 하고자 하는 고전압 초전도 전력기기의 확률적 AC 절연 파괴 전압을 도출하였다. 또한 안전율의 개념도 적용하여 각 전려계통별 정해진 확률적 AC 절연 파괴 전압을 넘어서도 안전율이 넘지 않으면 보다 정확한 절연 설계가 될 수 없음을 알 수 있었다.

본 논문에서 사용한 구 전극의 직경이 10 mm보다 더 큰 직경의 구전극을 이용하여 AC 절연 실험을 진행하고 상위에서 나열된 방식과 동일하게 적용하여 다양한 압력조건에서 구대평판 전극을 이용하여 lightning impulse 절연 실험을 진행할 예정이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] S. S. Kalsi, D. Aized, B. Connor, G. Snitchler, J. Campbell, R. E. Schwall, T. Stephanblome, A. Tromm, and J. Kellers, "HTS SMES magnet design and test results," IEEE Transactions Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp. 971-976, 1997.

[2] J. A. Waynert, H. J. Boenig, C. H. Mielke, J. O. Willis, and B. L. Burley, "Restoration and testing of an HTS fault current controller," IEEE Transactions Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 1984-1987, 2003.

[3] J. B. Na, H. Kang, Y. J. Hwang, S. E. Yang, D. K. Park, D. K. Bae, T. K. Ko, "Experimental Study on the Electrical Breakdown Characteristics of Sub-Cooled Liquid Nitrogen for Designing a High Voltage Superconducting Machine," IEEE Transactions Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 3, pp. 1662-1666, 2010.

[4] Ö. Kalenderly, E. Ö.nal, Ö. Altay, "Computing the cornoa onset and the utilization factor of rod-plane electrode by using charge simulation method," Proceeding of the Electrical/Electronic Insulation Conference, pp. 254-456, 2001.

[5] J. B. Na, H. Kang, K. S. Chang, Y. J. Kim, K. J. Kim, H. G. Lee, T. K. Ko, "Experimental study on the dielectric characteristics of liquid nitrogen with respect to various pressures," Physica C, Vol. 470, No. 20, pp. 1899-1903, 2010.

[6] Mladen Banovi, Antun Mikulecky., "Concept for Research of Combined Electric Field at Lightning Impulse Test for HV windings," Proceedings of the International Colloquium Transformer Research and Asset Management, November 2009.

저 자 소 개

나진배(羅鎭培)
1976년 9월 19일생, 2008년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2008년 동 대학원 전기전자공학과 입학(공학박사과정).

강형구(姜亨求)
1973년 8월 4일생, 1997년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2005년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업 (공학박사), 2005~2009년 현대중공업 선임 연구원, 현재 충주대 전기공학과 전임강사.

석복렬(石福烈)
1971년 2월 16일생, 1994년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1994년 10월~1995년 8월 국제단기교환유학생(일본 큐슈대학), 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 3월 일본 큐슈대학 시스템 정보과학연구과 졸업(공학박사), 2000년 4월~2001년 3월 일본 통상산업성 공업 기술원 특별연구원(AIST fellow), 현재 현대중공업(주) 기계전기연구소 책임연구원.

김태중(金泰重)
1960년 3월 28일생, 1996년 성남기능대학 교수, 2008년 연세대 공대 전기공학과 졸업 (공학박사), 현재 한국폴리텍 1대학 전기계측과 교수.

고태국(高太國)
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP졸업 (M.SC). 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP졸업 (Ph.D).1986년~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 2008년~2010년 한국 초전도 저온 공학회 회장, 현재 연세대 학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국 초전도 저온공학회 명예회장.