전력응용 초전도 기기의 전기절연 설계기술

최병주, 류경우
서라벌대학 전기전자전산계열, 전남대학교 공과대학 전기공학과

1. 서 론

전력계통의 확대와 전력수요의 증대를 고려하면, 기존의 전력시스템에 초전도기술의 도입은 필연적이며, 현재 송·변전설비 및 발전·저장장치의 초전도화[1]에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

한편, 실제적인 응용측면에서 에너지저장 초전도코일의 축적 에너지를 부하에 공급할 경우나 펄스 출력을 얻기 위해서, 또는 퀜치(Quench)시의 에너지를 단시간 내에 방출시킬 경우, 코일 양단에 고전압이 출현한다. 또한, 퀜치에 의한 국부적인 저항 발생으로 이상전압이 출현[2]하며, 대형코일일수록 높은 전압이 유기된다. 따라서, 초전도 기기의 절연설계 사전단계에서 이들 과전압에 대한 검토가 이루어져야 한다[3].

초전도코일의 전기절연은 신뢰성의 문제와 직결되고, 최적절연설계는 실용화에 있어서 도체의 대전류화·안정성문제와 함께 해결해야할 선결과제이다. 따라서, 시스템 내·외부의 각종 과전압에 대한 절연강도를 고려하여 상전도기기와는 다른 관점에서 절연설계가 이루어져야 한다[4].

본 고에서는 초전도 기기의 전기절연계를 분석하고, 각 요소에 대한 절연특성과 과전압 발생 및 절연설계에 대하여 기술하였다.

2. 초전도 기기의 전기절연계

2.1 초전도기기의 절연구성과 사용환경

초전도 기기의 절연구성 개념[5]과 사용환경을 각각 그림 1과 표 1에 나타낸다. 도체절연을 위한 테이프, 도체를 지지하고 냉각통로를 형성하기 위한 스페이서, 코일 주위의 극저온 냉매로 구성된다.

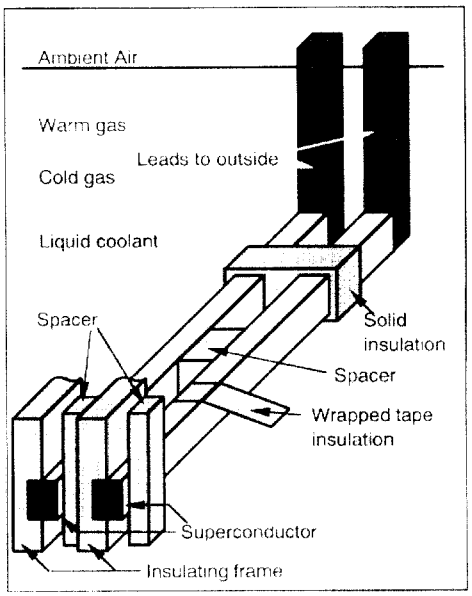


그림 1. 초전도 기기의 전기절연 구성요소

절연인자는 액체헬륨, 냉매중의 기포, 절연테이프, 스페이서, 고체/액체/가스의 복합절연체 등이며, 초전도기기의 실용화를 위해 이들에 대한 설계기준이 설정되어야 한다.

표 1. 전기절연 구성요소와 사용환경

Components of electrical insulation	Environmental conditions
Vacuum	· High magnetic fields
Gas : He or N_2	· Saturated temperature to room temperature
Liquid : LHe or LN_2	· High magnetic fields
Solid : FRP and others	· Supercritical, normal or superfluid state · High magnetic fields · Cryogenic temperatures
Composites	· High magnetic fields · High mechanical stresses · Cryogenic temperatures · High magnetic fields · High mechanical stresses

2.2 구성요소의 절연강도

2.2.1 극저온 기체

초전도코일의 절연설계에서는 그림 2에 나타낸 최소파괴전압을 나타내는 헬륨가스(GHe)와 질소가스(GN_2)의 파센곡선[6]이 유용하게 이용된다.

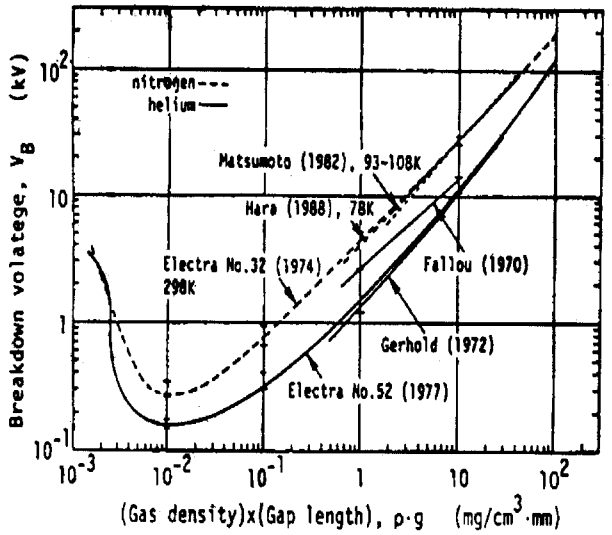


그림 2. GHe와 GN_2의 파센곡선

두 가스의 최소치의 $\rho \cdot g$는 거의 동일하며, GN_2가 GHe보다 절연내력이 높다. 이 결과는 미소 갭 절연설계 자료로 활용된다.

2.2.2 극저온 액체

초전도 기기의 냉매는 증발잠열이 낮기 때문에 기포가 발생하기 쉽고, 특히 퀜치시의 hot spot에 의해 기포가 생성되어 이것이 절연파괴에 직접적인 영향을 미친다.

대기압 포화비등온도에서의 액체헬륨(LHe)과 액체질소(LN_2)의 경우, 열 기포가 존재하지 않는 평등전계 중의 직류와 교류파괴전압 최저치(V_B)-갭 간격(d) 특성[7]은 각각 다음 식으로 주어진다.

$$V_B(LHe) = 21.5\, d^{0.8} \quad (1)$$

$$V_B(LN_2) = 29.0\, d^{0.8} \quad (2)$$

여기서, d는 갭간격[mm]이다.

한편, 냉매 중에서 기포 발생의 가능성은 대단히 높고, 냉매 중 또는 충전부 근방에 열 기포가 존재할 경우, 전계분포의 왜곡으로 불평등전계의 강화를 초래하여 절연내력의 급격한 저하를 가져온다. 더구나, 냉매 중에 높은 유전율을 가진 불순물(먼지)이 혼재할 경우, 불순물은 고전계영역으로 이동되어 국부 전계강화를 초래하여 절연파괴로 이끄는 부분방전을 개시하게 된다. 이러한 고체 불순물의 유전율은 냉매(LHe : 1.05, LN_2 : 1.44)의 약 2~5배 정도이다.

실제의 초전도 코일에서, 완전 평등전계의 구성은 불가능하다. 따라서, 실용의 초전도코일의 절연설계에서는 불평등전계 갭의 파괴특성이 유용한 설계자료로 활용되고 있다. 불평등 전계 갭의 파괴특성(V_B-d특성)은 $d \simeq 10$mm 전후를 기준으로 다음 근사식[7],[8]으로 주어진다.

$$V_B(LHe) = 7.0\, d^{0.4}\ [\mathrm{kV}],\quad d \le 10mm \quad (3)$$

$$V_B(LHe) = 4.2\, d^{0.63}\ [\mathrm{kV}],\quad d > 10mm \quad (4)$$

$$V_B(LN_2) = 18.0\, d^{0.26}\ [\mathrm{kV}],\quad d \le 10mm \quad (5)$$

$$V_B(LN_2) = 11.0\, d^{0.46}\ [\mathrm{kV}],\quad d > 10mm \quad (6)$$

액체절연파괴는 응력을 받는 시간을 고려하지 않고 단순히 갭 형상과 스트레스의 크기만으로 규정할 수 없으며, 이를 고려한 절연파괴강도(V_b)는 다음식으로 주어진다[8].

$$V_B(LHe) = 17.3\, t^{-1/15.4} \quad (7)$$

$$V_B(LN_2) = 24.0\, t^{-1/26.9} \quad (8)$$

이들 실험식은 LN_2의 경우가 LHe의 경우보다 특성의 저하가 적어 절연특성이 우수함을 나타내며, 따라서 고온 초전도선재를 이용하면 절연설계의 측면에서 유리하다.

2.2.3 극저온 고체

극저온 환경의 고체 절연재료는 (1)응력에 의한 도체의 이동이 없도록 도체를 지지(퀜치방지)하여야 하고, (2) 절연특성(저항률, 절연강도, 열화 등)을 만족하여야하며, (3)유전손실(교류기기 응용)이 적고 적절한 열전도율(손실 저감)을 가져야하며, (4)요구 열수축 특성(크랙 발생 및 부분방전 방지)을 만족하여야 한다.

각종 고분자절연재료의 진성파괴강도와

온도와의 관계[7]를 그림 3에 나타낸다.

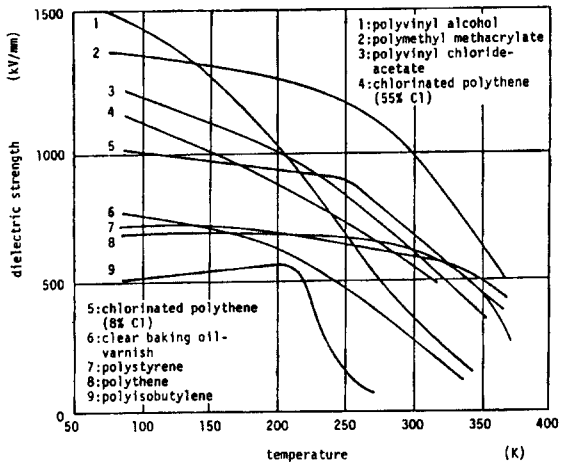


그림 3. 각종 고분자의 파괴강도-온도 특성

유전손실은 인가전압의 제곱에 비례하므로, 고전압환경에서는 절연체내부의 발열과 열전도특성에 좌우되어 두꺼운 절연체 내부에서 열적요인에 의해 파괴를 초래할 수 있다. 유전특성은 벌크재료 뿐만 아니라 테이프에서도 중요한 고려요소이다.

극저온환경의 고체절연재료는 열 수축으로 전기적·기계적 스트레스를 동시에 받으므로 절연의 약점으로 된다. 극저온 절연재료의 열 수축특성[8]은 그림 4와 같다.

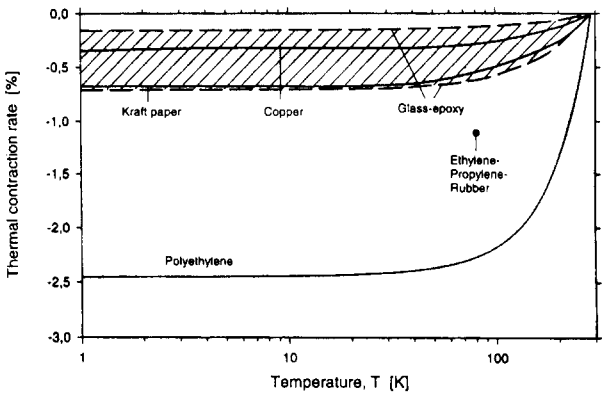


그림 4. 극저온 고체재료의 열 수축 특성

3. 초전도 기기의 과전압 현상

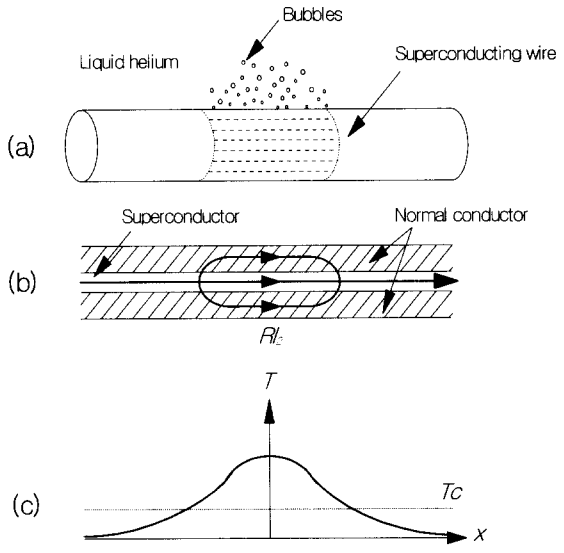
3.1 과전압 스트레스

직류코일에서의 정상운전전압은 겨우 수십 V이지만, 펄스코일에서는 LdI/dt로 코일 운전조건에 의존하여 높은 전압이 발생된다. 일반적으로, 전기에너지 분야에서 초전도코일을 사용하는 경우, 상전도코일로서 경제적으로 성립되지 않는 영역으로 제한되므로 L이 크며, 따라서 LdI/dt도 크게 된다.

또한, 절연물 중의 전계 E와 자계 H 또는 전압 V와 전류 I의 어느 것을 크게 하여도 대전력 수송은 가능하다. 그러나, 대전력 수송의 극한점에 이르러서는 이들 4 요소의 어느 경우도 기술상의 한계에 도달한다. 즉, 초전도선재를 사용하여도 상용의 절연물에 허용되는 E 또는 V가 걸리는 것으로 된다. 따라서, 초전도 케이블의 운전전압도 전기절연계에서 허용되는 한계에 근접하여 설계하는 것이 경제적이므로, 최적절연에 의한 고전압설계기술의 개발이 요구된다.

3.1.1 코일 퀜치시의 이상전압

그림 5는 초전도선 일부의 온도 T가 T_C 이상으로 상승한 상태를 나타낸다. 이 경우, 초전도선은 상전도상태로 전이하여, 저항 R이 성장하고, 전류 I가 흐르면 RI^2의 열이 발생한다. 이 발열이 주위 냉각효과보다 크면, 고온부(hot spot)는 초전도선 전체로 전파(quench)한다.



(a) hot spot와 냉매의 비등, (b) 초전도선 내의 전류분포, (c) hot spot 근방의 온도분포

그림 5. hot spot 근방의 현상

퀜치가 발생하면, 코일 내에 dI/dt가 발생하고, 이상전압이 출현한다. 그림 6은 퀜치발생시 코일 내의 전위분포를 나타낸다.

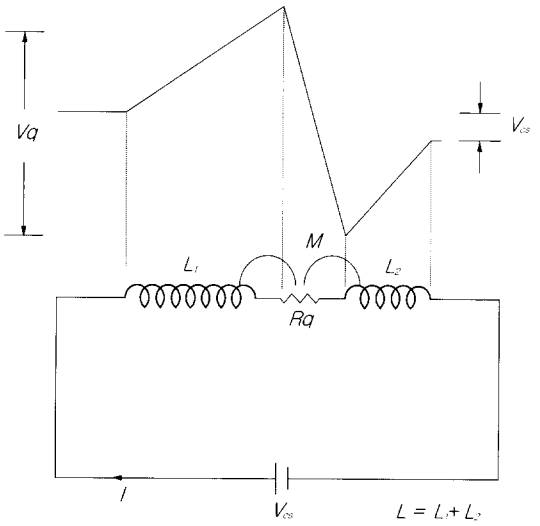


그림 6. 퀜치 발생시의 코일내의 전위분포

코일의 자기인덕턴스를 $L(=L_1+L_2)$, 상전도 전이부와의 상호인덕턴스를 M으로 하면, 코일저항 Rq에 의해 dI/dt가 발생한 경우의 상전도 전이부의 전압 Vq는

$$Vq = L\frac{dI}{dt}\left(1-\frac{M}{L}\right) \quad (9)$$

로 주어진다. 여기서, Vq는 건전한 초전도 코일 중에서 코일을 따라 분포하지만, 상전도부에서는 이 전압이 모두 걸리게 된다.

퀜치시의 발생전압을 추정하는데 있어서, 1)코일의 Hot spot는 도체의 길이방향으로 전파, 2)Hot spot에서의 발생 열은 도체의 가열에 소비, 3)저항의 증가는 도체의 온도 상승에 비례하는 것으로 가정하고 M을 무시할 경우 상전도 전이부에 걸리는 전압 Vq는

$$Vq = L\frac{dI}{dt} = \frac{LI_0}{Tq}3T^5\exp(-0.5T^6) \quad (10)$$

이다[9]. 단, I_0: 퀜치개시직전의 코일전류, Tq : 코일 축적에너지의 소비시간, 그리고 $T=t/Tq$이다.

3.2.2 에너지 긴급방출시의 과전압

초전도 코일에서 퀜치가 발생하면, 축적에너지를 방출시켜 코일을 보호해야 한다. 이 경우, 그림 7과 같은 회로를 구성하고, 스위치 S를 개방하여 에너지를 외부저항에서 소비시키는 방법이 가장 간단하다. 그러나, 코일의 양단에는 고전압이 유기되므로 이에 대비한 절연설계가 이루어져야 한다.

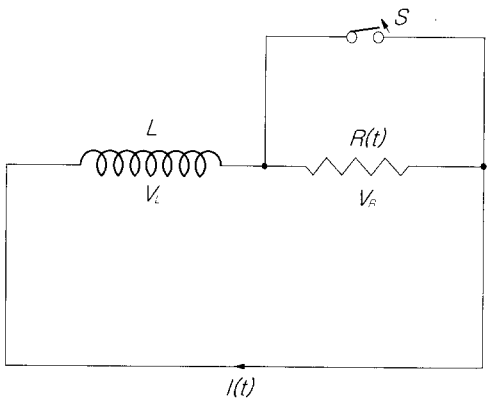


그림 7. 저항부하에의 에너지 방출 회로

코일전압 V_L의 관계식은

$$\frac{dV_L}{dt} + V_L\left(\frac{1}{R}\frac{dR}{dt} - \frac{R}{L}\right) = 0 \quad (11)$$

로 주어된다. 따라서, 저항 $R(t)$가 주어지면, V_L을 구할 수 있다.

코일의 저장에너지와 긴급방출전력이 주어진 경우 양단전압은 다음과 같다. 저장에너지를 E_0[J], 긴급방출전력 W[W](=일정), 방출시간을 t(s)라 하면, t(s)에서의 코일내의 에너지 E(J)는

$$E = E_0 - Wt = \frac{1}{2}LI^2 \quad (12)$$

또한, 코일 양단 전압 V는

$$V = W\left\{\frac{L}{2(E_0 - Wt)}\right\}^{1/2} \quad (13)$$

로 된다. 일반적으로, 코일양단에는 전류변화에 의해 수~수십 kV의 높은 전압이 발생하며, 대형화에 따라 점점 고전압화 된다.

3.2 코일의 전기적 사고 원인

초전도 마그네트의 고장은 1) 자속 도약, 기계적 마찰, 부적절한 열전도 및 국부적 발열 등의 열-전기적 불안정, 2) 층간 및 코일과 접지구조물간의 아크, 퀜치에 의한 이상전압 및 전류리드선의 절연불량에 의한 단락과 아크방전, 3) 베이퍼 록 현상과 표면장력에 의한 냉각불량, 가스 배출밸브의 빙결과 진공누설 등의 극저온/진공의 고장, 4) 선재와 도체 접속부의 파손과 도체이동에 의한 기계적고장의 4가지로 분류할 수 있다[10].

사고의 원인은 부적절한 설계에 의한 경우가 많고, 사고 종류로는 아크방전에 기인

하는 것이 전체사고의 약 30%를 점하며, 사고의 위치에 따른 분류에서는 코일권선이 약 45% 이상을 차지하는 경향을 보인다 [11]. 이와 같이, 초전도 마그네트의 사고는 코일권선의 아크방전에 의한 경우가 가장 큰 원인이며, 이에 대한 대책수립이 필요하다.

코일 내부단락의 구체적인 예로, 1) 오픈 인슐레이션 방식의 코일에서의 도전성입자의 혼입에 의한 턴간 또는 층간의 단락, 2) 계측용 도선과 코일 권선 간의 절연 약점에 의한 단락, 3) 권선과 금속제 보빈 또는 접지용기 사이의 절연불량에 의한 단락, 4) 파워리드와 접지구조물과의 단락, 5) 히트 사이클에 의한 도체의 열 수축과 팽창에 의한 권선간 단락, 6) 운전 중의 전자력에 의한 도체이동으로 발생하는 단락 등을 들 수 있다.

4. 초전도코일의 전기절연 설계

4.1 절연설계의 기초

절연계가 정상운전전압에 견딜 수 있고, 또한 파괴전압을 정확한 방법으로 결정할 수 있다면, 절연설계에 있어서 심각한 문제의 발생은 없다. 그러나, 실제의 절연계는 파형, 크기 및 지속시간이 다른 다양한 과전압을 견뎌야 한다. 한편, 절연계의 절연강도는 비선형적인 특성을 보이며, 통계치를 벗어나는 경우가 많다. 따라서, 극저온 절연계는 통계적인 자료를 기초로 누적전압스트레스와 내전압특성을 조합하여 설계하여야 한다.

4.1.1 기본 개념

상전도기기의 절연설계에 있어서, 1) 통계적설계법 2) 결정론적설계법의 두 가지 기본적인 방법이 사용된다. 통계적설계법은 규정에 의하여 정해진 파괴위험을 근거로 설계하는 방법으로, 자기절연회복특성을 가진 공간의 설계(예, 대기압 공기절연)에 적용하면 경제적이다. 결정론적설계법은 사고의 위험이 완전히 사라지도록 내전압을 최대 스트레스전압보다 상당히 높게 설정하여 설계한다. 이 설계법에서는 충분한 절연여유가 있으므로, 자기회복특성이 없고 또한 높은 신뢰성을 가져야하는 초전도기기의 설계에 적합하다[5].

4.1.2 내전압(Withstand voltage)

초전도기기의 내전압 평가는 예비적인 실물크기의 모형시험에 의한 파괴전압 데이터와 통계적 방법으로 무사고 한계를 얻기 위하여 경우에 따르는 외삽법에 의한 데이터로부터 단순하게 행하고 있다. 또한, 제조자의 과거 경험과 상전도기기의 경험을 토대로 유추한 스트레스 전압에 의존하고 있다. 그러나, 이러한 방법은 통계적설계를 위한 신뢰성이 높은 방법으로 볼 수 없다.

일반적으로, 누적 전압스트레스와 어떤 기기와 관련되는 파괴전압은 그림 8에 나타낸 것처럼 각각 통계적 확률분포 P_{ov}(과전압 V의 발생빈도밀도)와 P_{d1}(과전압 V에서의 파괴발생확률)을 따른다.

어떤 과전압 dV_i에서 사고확률 $f(dV_i)$는 $P_{ov}(V_i) \cdot P_{d1}(V_i) \cdot dV_i$로 주어진다. 모든 과

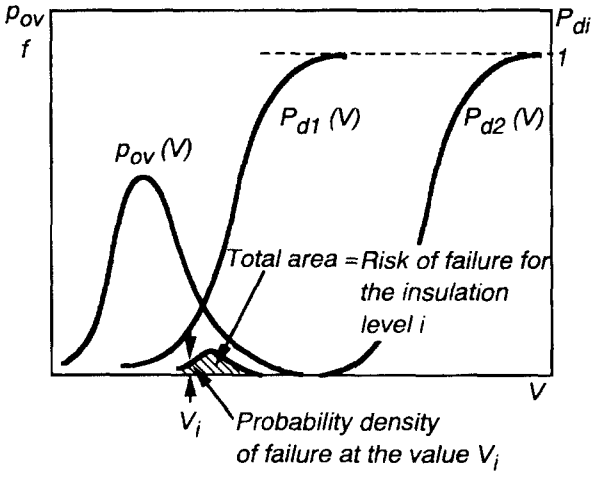


그림 8. 초전도 기기의 사고위험 평가

전압에 대한 전체사고확률은 V_i의 전 범위에 걸쳐 적분함으로서 구할 수 있다.

$$f = \int_0^\infty P_{ov} \cdot P_{di} \cdot dV \qquad (14)$$

만약, 결정론적설계법의 목적을 달성할 수 있도록 절연을 충분하게 강화시켰다면, 파괴전압확률분포는 P_{d2}(절연을 강화시킨 경우, 과전압 V에서의 파괴발생확률)로 이동하여 전체 사고위험은 사라질 것이다. 그러나, 과대한 절연강화는 우수한 절연재료와 넓은 절연공간을 필요로 하여 제조경비가 증가하게 되므로, 신뢰성과 경제성의 양면을 고려한 최적 설계기준의 설정이 요구된다.

4.2 설계기준

초전도 코일의 전기절연은 충전부간(턴간

또는 층간)의 전위차에 의한 절연과 충전부와 접지간의 절연으로 나누어진다. 권선의 전기절연은 정상 및 이상 운전상태에서 발생하는 고전압을 견디도록 설계되어야 한다.

중·소규모 초전도 에너지저장장치의 경우, 코일전압은 수 kV 이하에서 운전되며, 실제적인 설계기준의 상한은 10kV 정도로 고려되고 있다. 퀜치 보호회로의 전압은 보통 약 1kV까지를 기준으로 설계된다. 액체헬륨의 절연파괴강도는 대기압 공기보다 높은 4-5kV/mm로 추정된다[12],[13].

코일과 대지간 절연의 약점을 모의한 모델전극을 사용한 실험[12]에서, 극저온 절연파괴전압은 상온의 파괴전압보다 1.0~1.7배정도 높은 것으로 보고되어 있다. 또한, 턴간 절연의 약점을 모의하기 위해 절연체의 크랙, 인접 코일 절연체의 크랙, 양쪽 코일의 크랙 등 3가지 경우의 실험을 통하여 전기적 신뢰성을 보증하고 있다.

권선 사이의 전압은 수 kV 정도로 설계되며, 정격전압과 설계목표 전압과의 계수는 약 4로 주어진다. polyimid foil을 추가로 사용하여 절연을 보강할 수는 있으나, 도체의 냉각효과를 고려하여야 한다. 특히 접속부분과 도체 말단 부분의 절연설계에 유의할 필요가 있다.

대부분의 경우, 턴간 절연은 polyimide (Kapton, glass-polyimide-glass) 테이프(예를 들면, 두께 25μm, 폭 10mm)를 이용하여 50~75% 정도로 겹쳐 감아 도체를 절연하여 솔레노이드형으로 권선한 구조로서, 절연은 주로 2겹의 테이프에 의한다.

한편, 고온 초전도선재를 사용한 코일의 경우, LN_2의 우수한 절연내력을 이용하여 부분절연을 통하여 턴간 절연레벨을 경감시킴과 동시에 냉각효과를 향상시킬 수 있는 구조도 검토해 볼 필요가 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 초전도 기기의 절연구성에 대하여 분석하고, 각각의 절연 재료의 절연내력과 시스템이 받는 과전압에 대하여 요약하였다. 또한, 실제 사용환경에 가까운 준평등 및 불평등 전계 하에서의 파괴강도를 분석함과 동시에 초전도코일의 설계기준에 대한 검토를 행하였다.

앞으로, 초전도코일의 절연성능을 평가할 수 있는 시험법을 개발할 필요가 있으며, 종합적인 설계기준의 설정을 통하여 최적절연설계기술을 확립하여야 할 것이다.

참고문헌

1. M. Yamamoto, K. Kaiho, and T. Ishigohka, "Fully Superconducting Power System", Cryogenics 1994 Vol. 34 ICEC Supplement, pp. 761-764, 1994.

[2] 超傳導·極低溫電氣絶緣技術調査專門委員會, 超傳導應用機器の電氣絶緣技術, 電氣學會技術報告, 第528号, pp. 1-91, 1995.

[3] A.M. Miri, C. Sihler, H. Salbert, and K.U. Vollmer, "Investigation of the Transient Behaviour of a Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Generating High Power Pulses", European Transaction on Electric Power, Vol. 8, No. 1, pp. 13-19, 1998.

[4] J. Gerhold and M. Hara, "Procedure of Electrical Insulation Design for Superconducting Coils", Proceedings of the Eighth International Symposium on High Voltage Engineering, Vol. 3, No. 93.04, pp. 567-570, 1993.

[5] M. Hara and J. Gerhold, "Electrical Insulation Specification and Design Method for Superconducting Power Equipment", Cryogenics, Vol. 38, pp. 1053-1061, 1998.

[6] M. Hara, J. Suehiro, H. Matsumoto and Kaneko, "Breakdown Characteristics of Cryogenics Gaseous Nitrogen and Estimation of its Electrical Insulation Properties", IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol. 24, No. 4, pp. 609-617, 1989.

[7] 原 雅則, "超電導機器における電界現象", 靜電氣學會誌, vol. 15, No. 1,

pp. 1-18, 1991.
[8] J. Gerhold, "Properties of cryogenic insulants", Cryogenics, vol. 38, pp. 1063-1081, 1998.
[9] N.M. Wilson, Superconducting Magnets, Clarendon Press, New York, 1983.
[10] C.D. Henning, "Reliability of Large Superconducting Magnets Through Design", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-17, No. 1, pp. 618-625, 1981.
[11] R.J. Thome, J.B. Czirr, and J.H. Schultz, "Survey of Selected Magnet Failures and Accidents", Fusion Technology, Vol. 10, pp. 1216-1222, 1986.
[12] T. Hamajima, K. Kitamura, M.Sakai and T. Satow, "Specifications and performance experiences of internally cooled small-scale SMES", Cryogenics, vol. 38, pp. 1135-1143, 1998.
[13] I. Ishii, "Review of the Electrical Insulation of Superconducting Generators", Cryogenics, Vol. 38, pp. 1155-1158, 1998.
[14] S.W. Schwenterly, "High-Voltage Testing of Superconducting Power Apparatus", Cryogenics, Vol. 38, pp. 1115-1122, 1998.

저자이력

최병주
1958년 12월 12일생, 1981년 영남대 전기공학과 졸업, 1983년 영남대 대학원 전기공학과졸업(석사), 1996년 일본 Kyushu Univ. 전기공학과 졸업 (공박), 1997년~현재 서라벌대학 전기과 전임강사

류경우
1962년 2월 10일생, 1983년 인하대 전기공학과 졸업, 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년 일본 Yokohama National Univ. 전자정보공학과 졸업(공박), 1986년~1995년 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원, 1996년~현재 전남대학교 전기공학과 조교수