

초전도 응용기기의 전기절연

김 상 현
경상대학교 공과대학 전기공학과

1. 서 론

전기저항이 영(zero)이 되는 현상인 초전도의 발견으로 새로운 초전도 물질의 발견과 이를 전력 기기에 응용하려는 연구개발이 세계 각국에서 꾸준히 진행되어 오고 있다. 초창기의 초전도 응용 기기는 임계온도가 4.2K인 액체 헬륨에서 초전도 특성을 나타내는 저온 금속계 초전도도체를 이용한 응용이 대부분이었으며, 고비용 액체헬륨의 한계로 인해 상용화에 어려움이 있어 MRI, NMR등의 일부 응용 기기만이 실용화가 이루어 졌다.

이에 1986년 고온 초전도체의 재료가 발견되면서 세계적으로 수많은 전력 기기의 초전도화에 대한 기대가 가속화되고 있고 초전도 케이블, 마그네트, 변압기, 발전기, SMES등 실용화를 향해 개발되고 있으며, 일부 전력 기기는 시험 제작되어 시험 운전중에 있다.

그러나 이들의 초전도 응용 기기 cost 절감, 용량증대, 설계 및 제조의 합리화, 수명보증과 운전상의 절대적인 신뢰도의 확립을 위해서는 구조에서 가장 약점인 전기절연기술의 확립 및 그것을 지지하는 재료의 개발이 절실히 요구되고 있다. 하지만, 전기 기기의 심장인 절연(Electric Insulation)은 적극적인 기능이 아니기 때문에 공기와 마찬가지로 그 고마움을 느끼지 못하는 기술이기도 하다.

초전도 기기의 전기절연기술은 상전도에서 경험하지 못하는 quench(상전도전이)가 발생하고 quench시 일어나는 유기전압을 고려할 필요가 있다. 대전류를 흘리는 것을 목적으로 하는 초전도 코일에서는 상시 인가하는 전압은 약간이지만, 유기전압에서 대처가 절연설계의 핵심이다. 한편, 전기에너지의 수송을 목적으로 하는 전력케이

블에서는 대전류와 함께 고전압이 요구되어 정상적으로 수만V이상의 전압이 인가되기 때문에 그것의 상규전압에 대처하는 설계가 주체가 된다. 또한 섬락등에 의해 계통에 가해지는 과전압에 대처하는 대책도 필요하다. 따라서, 본 글에서는 초전도 응용 기기 실용화를 향한 전기절연에 관한 전반적인 이해와 일부 초전도 응용 기기 절연설계에 관해 기술하였다.

2. 절연설계 지침

초전도 응용 기기 절연재료를 결정하기 위해서는 전기적 특성, 열적 특성, 기계적 특성, 경제성 등이 고려되어야 하며, 특히 전기적 특성으로서 초전도 응용 기기 사용 환경 하에서 절연강도 특성, 부분방전 특성, 비유전율(ϵ_s) 및 유전정접($\tan\delta$)등이 기기의 성능을 결정하는 요소로서 매우 중요하다.

또한 초전도 응용 기기는 상전도 기기와는 전기절연 환경이 차이점을 갖고 있다. 예를 들면, 극저온 환경, 냉매의 증발잠열이 작기 때문에 기포 발생이 쉬움, 절연계에 강자계 작용, 고체 절연물에 큰 전자응력 작용, Power-Lead의 절연계는 넓은 온도 범위를 통과하는 등 특이한 절연환경 상태에 놓이게 되어 극저온에서의 절연설계에 대한 기준은 불가피 하다.

초전도 기기의 절연구성요소에 인가되는 특이한 절연환경을 고려할 때 초전도 기기의 절연방식은 표 1과 같이 정리할 수 있다. 그리고 초전도 기기는 앞서서도 서술했듯이 초전도 코일과 초전도 케이블로 크게 나눌 수 있다.

(1) 초전도 coil

먼저 초전도 coil과 관련된 초전도 응용 기기(변압기, 한류기, SMES, 마그네트 등)의 전기절연은 상전도 코일의 경우에 덧붙

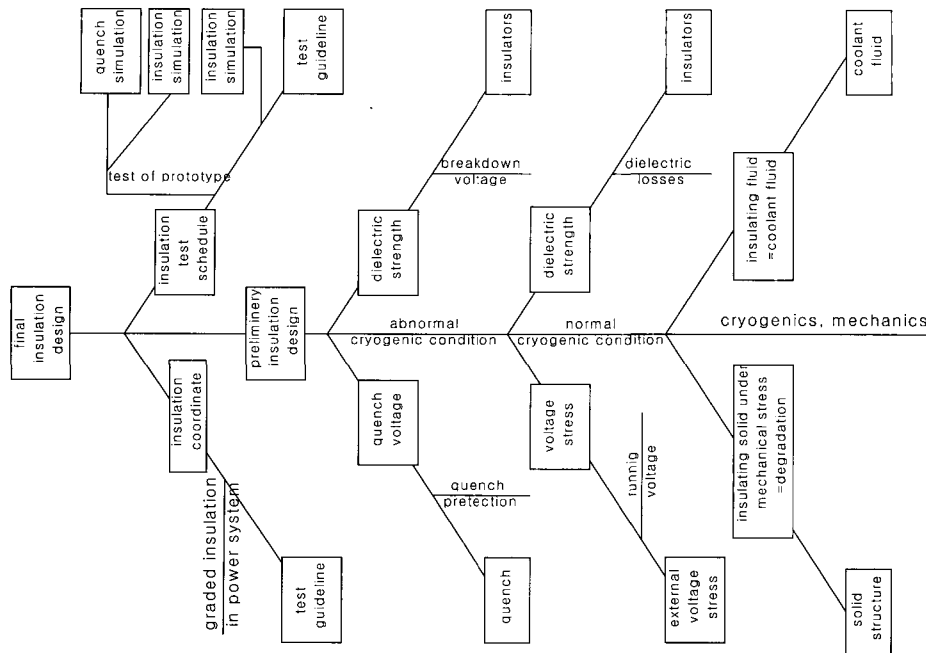


그림 1. 초전도 기기의 전기절연기술 확립을 위한 검토항목

여 이하와 같은 점을 고려해야 한다.

- ① 절연물의 분위기(냉매, 진공, 자계, 방사선 등)
- ② 불순물, 이물
- ③ 극저온에서의 코로나 방전, 부분방전, 아크 방전, 절연 열화 등
- ④ quench
- ⑤ quench 전압, 유기 전압 등

표 1. 초전도 응용 기기 전기절연 방식

항목	구성	특징	비고
진공 절연	진공+ Spacer	· 진공의 절연내력 이용	초전도 케이블
저온 기체 절연	기체+ Spacer	· 냉매기체만의 절연강도는 낮음 · Plastic film등으로 보강 필요 · 초전도선 자체를 절연 위해서는 사용안함	초전도 Power-Lead
액체 절연	액체+ Spacer	· 도체 주위를 냉매액체로 채운방식 · 변압기유 정도의 절연강도를 나타냄	초전도 coil 초전도 케이블
액체 함침 고체 절연	고체+냉매 함침	· 절연 tape+Glass fiber 직포 · 초전도 선재를 바니쉬로 절연	초전도 coil 초전도 케이블
고체 절연	고체+ 냉매	· Epoxy Resin 함침	Pan-cake 형 코일

⑥ 초전도 코일용의 새로운 내전압 시험

절연물의 분위기가 냉매에 있는 경우, 냉매의 열 기포는 절연과괴전압을 낮게 만들고 강자계를 발생하는 초전도 코일에 있어서는 자계는 전자운동궤적에 영향을 미치게 되어 절연과괴전압을 낮게 만든다. 또한 상온에서의 절연열화의 하나인 tree는 극저온에서도 발생하고 quench가 발생하게 되면 액체 헬륨 및 질소의 절연과괴전압은 낮게 된다.

초전도 코일의 실 규모 시험에서는 코일 단자전압 또는 각 부의 전압이 높기 때문에 전기절연의 신뢰성 향상이 요구된다. 이런 신뢰성 향상의 관점으로부터 다음과 같은 절연검토과제를 생각할 수 있다.

- ① 초전도·극저온에서 특이한 문제점을 해명
- ② quench 전압과 유기전압에 대한 과도시의 신뢰성
- ③ 절연열화에 대한 장기신뢰성
- ④ 초전도 코일용의 내전압 시험법의 확립

(2) 초전도 케이블

현재의 상전도 케이블의 전기절연은 상규전압만이 아닌 전력계통에 발생하는 과

전압에 대해서 절연파괴하지 않는 것, 사용기간 중의 열화 등에 의해 절연파괴가 일어나지 않는 것을 기본으로 하고 있다.

초전도 케이블의 전기절연은 상전도 케이블의 경우와 같은 과제에 덧붙여 냉매 분위기에 새로운 과제를 발생한다. 그 전기절연에 요구되는 기본사항은 다음과 같다.

- ① 30~40년의 전기적 수명(과전압의 침입도 고려)
- ② Drum권, 포설시의 기계적 강도
- ③ 정격전압의 설정
- ④ 냉각, 상온복귀시의 신축흡수
- ⑤ 유전손실의 저감

절연물의 수명설계는 부분방전 열화에 의한 수명특성으로부터 산정한다. 그러나 초전도·극저온 케이블 시스템은 상규전압 및 과전압에 대해서 부분방전이 발생하지 않는 절연설계로 할 필요가 있다. 이것은 단말, 중간 접속부등의 부속품을 포함한 케이블 시스템 전체의 요구항목이고 시스템 전체의 절연협조를 그리는 것도 중요하다.

또한 신뢰성이 높은 절연설계 지침을 얻기 위해서는 다음과 같은 검토과제를 생각할 수 있다.

- 1) 냉매함침 tape권 절연
 - * 장척케이블의 수명특성
 - * 두께 효과
 - * 부분방전의 발생기구 검토
- 2) 추출고분자 절연
 - * 케이블의 전기적·기계적 특성
 - * 절연파괴 전압의 Weibull 파라메타
- 3) 공통항목으로 내전압 시험법의 확립이 요구되어 진다.

한편, 초전도 응용 기기 전기절연을 그림 1에 포괄적으로 나타낸다. 구체적으로 살펴보면, 발생전압의 추정, 전기절연환경의 추정, 절연내력의 평가, 부분방전 특성 등의 절연재료의 수명 평가 등을 기초로 해서, 절연강도의 사항을 적용해서 절연 설

계를 수행하고 그 결과 등과 같이 절연신뢰성을 확인, 고전압 절연시험을 수행 등을 검토해야 한다.

그리고 제안되고 있는 침적냉각초전도 코일의 전기절연설계법의 한 예를 그림 2에 나타낸다. 먼저, 상규운전중의 절연환경과 유기전압으로부터 절연거리를 구하고 다음에 quench 시의 보호방식의 결정, 상승온도의 추정, 절연 환경의 추정, quench 전압의 추정의 순으로 진행하고 quench때의 필요절연거리를 구해서 상규 운전중의 필요절연거리와 quench시의 필요절연거리의 큰 값을 설계절연거리로 하는 것으로 한다. 이것은 초전도 코일의 전기절연기술을 체계화하는 것으로 하고 냉각방식의 초전도 코일에 대해서 이 같은 설계법이 제안되어 검토가 심도 있게 되기를 기대한다.

일반적으로 초전도 응용 기기 절연에서 하나의 의문점은 초전도체는 저항이 제로인 상태에서 대전류를 허용할 수 있기 때문에 전압은 낮아도 큰 전력을 발생, 수송이 가능하다는 개념이다. 하지만, 일반적인 저항이 제로인 경우는 직류전류에서는 완전히 적용되지만 교류전류에 대해서는 저항으로 등가적인 성분이 발생한다. 대전류가 되기 위해서는 전류밀도가 높아지는 것이 초전도 응용의 특징이다. 케이블에서 고려해 봐야 할 상전도 케이블에 비하여 전류밀도를 크게 취하기 때문에 전압계급을 현재의 60~275kV 상정해도 동일한 전력을 수송하는 경우에 콤팩트한 설계가 가능하다. 또한 동일 사이즈로 케이블을 설계하면 초전도 케이블의 경우에는 상전도 케이블의 5배의 전력수송도 가능하다. 따라서 초전도 상태에서는 전압이 생기지 않는 초전도 마그네트에도 있어서도 상전도 상태로 전이하는 quench가 발생하면 초전도 선에 저항성분이 나타나 큰 전압강하가 발생하게 되고 전압의 과도적 변동에 의하여 유도전압이 생성된다.

그러므로 초전도 응용 기기에 있어서도 전기절연은 초전도 도체 및 상전도 기기의 절연 못지않게 중요한 과제이며, 초전도 응용 기기를 예를 들어 구체적인 절연에 관해 살펴본다.

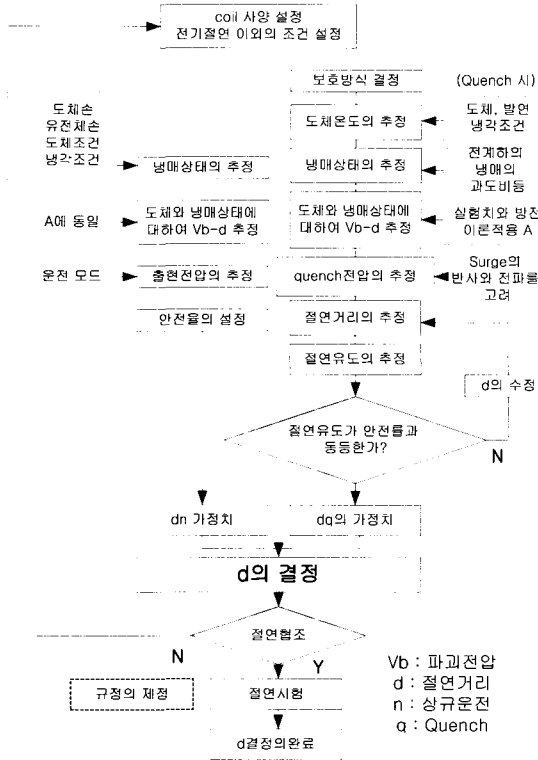


그림 2. 침적냉각초전도 코일의 절연설계법

3. 초전도 변압기의 전기절연

초전도 변압기에서는 전력 기기로 해서 권선에 계통전압이 인가된다. 초전도변압기에도 내전압설계는 특히 기존변압기의 그것과 다른 것은 거의 없다. 다만, 기존 변압기에서는 철심의 사용이 불가피하지만, 초전도 기기에는 철심을 사용하지 않는 설계도 가능하다. 철심을 사용하지 않는 공심으로 한 경우는 대지절연을 방지하는 개소가 적게되고, 절연은 비교적 용이하게 된다. 액체헬륨의 절연구성에서는 어딘가에 부분방전이 생기고 가스상태가 되어 온도가 상승하기 때문에 부분방전이 진전해서 전로파괴에 진전하는 것이 있어 절연설계시에 주의를 요한다.

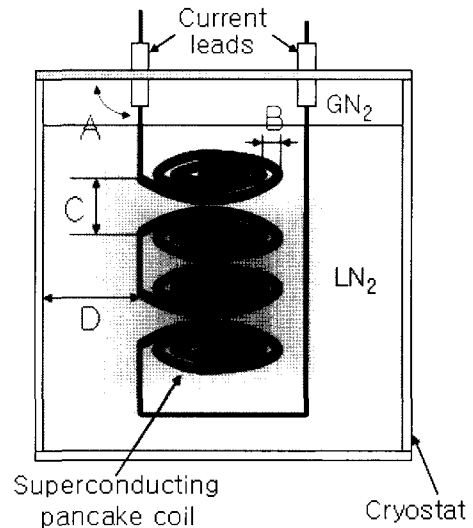
초전도 변압기의 절연설계는 철심, 냉각 방식, 권선 구조 및 배치 등에 의해 크게 좌우된다. 초전도 변압기에서는 일반적으로 공심보다는 철심을 상온에 두는 방법을 주로 채용하고 있다. 냉각방식은 표 2에 냉각 방식에 따른 절연설계의 요점을 나타낸다.

표 2. 냉각방식에 따른 절연설계의 요점

냉각방식	냉각방식의 주요특성	절연설계의 요점
액체헬륨 침적	* 간편하다 * 완전 안정화 설계가능	* Pulse 발생시 절연내력 저하
초임계 헬륨 자연대류	* 용기를 2.25기압 이상 가압 필요 * 열전달을 저하	* Pulse 발생없음 * 액체헬륨보다 절연내력 높음
초임계 헬륨 강제순환	* 높은 열전도율 * 도체의 완전안정화 곤란	* 액체를 절연체로 사용하지 않음 * 진공공간의 절연 필요
초유동 헬륨 침적	* 절연특성 우수 * 냉동기 부하증대	* 특성 불명

초전도 변압기의 권선 구조와 배치는 사고 시에 흐르는 과대전류에 대비한 보호를 충분히 고려하여 결정하여야 한다. 결정된 권선 배치에 대해 절연에 필요한 공간을 결정함에 따라 변압기의 크기도 따라서 결정된다. 초 임계압 헬륨은 밀도가 50kg/m³보다 크면 절연유와 비슷한 절연내력을 가지므로 종래의 변압기와 비슷한 절연거리가 필요하다.

구체적으로 현재 Frontier 사업으로 개발중인 Pan-cake형 초전도 변압기 권선의 절연구성에 대해 살펴보면, 그 3과 같이 크게 대지절연, 턴간 절연, 층간절연, bushing 및 기타 구성의 4가지로 나뉘어진다.



- A) From cryogenic to room temperature
- B) turn-to-turn
- C) layer-to-layer
- D) conductor-to-cryostat

절연 형상	요 소	주안점
	대지간	LN ₂ 기포, 과냉각
	턴 간	권선별 절연재료
	층 간	스페이서 형상 냉각채널
	권선간	베리어층과, 미소갭 전계분포개선

그림 3. 초전도 변압기의 절연 구조 및 절연 요소

a) 대지절연

FRP로 제작한 cryostat내에 권선을 놓고 권선 주위를 진공으로 제작한다. 이러한 구조에서는 용기 벽을 따라 진공연면 방전이 생길 가능성이 높고, 기포가 발생하기 쉽기 때문에 cryostat 내 벽을 도전성 재료로 도포한다. 그리고 액체 헬륨과 액체 질소 및 과 냉각 액체가 절연을 담당하여 기포와 연면방전을 억제한다.

b) 턴간 절연

일반적으로 턴간 절연은 kapton tape이나 에나멜을 초전도도체에 피복하여 사용한다. 초전도도체는 얇기 때문에 선단이 아주 거친 구조이므로 그림 4와 같이 단부를 보강하는 절연설계가 필요하다.



그림 4. 초전도 변압기용 초전도도체 단면

c) 층간절연

층간절연은 인접한 층간의 절연거리와 끝 부분의 연면 방전에 대해 주의하여야 한다. 층간의 절연거리에 대해서는 층간에 흐르는 헬륨에 부분방전이 생기지 않게 설계를 하여야 하며 FRP로 spacer를 구성하고 그 사이에 냉각채널을 만들어 설계한다.

d) Bushing 및 기타구성

개폐 서어지나 뇌 임펄스에 대해서 상전도 변압기와 마찬가지로 정전차폐를 이용하며, 권선간에 barrier를 설치한 절연구조로 한다. 또한 미소 gap에 의한 절연파괴의 저하를 검토할 필요가 있다.

4. 초전도 케이블의 전기절연

그림 5에 고온 초전도 케이블의 구조를 나타낸다. 이 케이블은 former 상에 초전도선을 수회 감은 도체 상에 PPLP(Poly Propylene Laminated Paper)에 의한 전기절연층을 설치하고 그 외측에 초전도선에 의한 shield층을 형성해서 단상의 core로 되어 있다. 이 core를 3상으로 조합해서 그 외측에 2종의 스테인레스 파이프에 의한 단열 관을 구성하고 단열관 내부에 다층단열재를 배치하여 진공을 뽑는 형태로 되어 있다.

일반적으로 극저온에서 초전도 케이블의 전기 절연방식은 보통의 전력 케이블과 크게 다른 것이 아니다. 다만 냉각제에 의해 도체가 잘 냉각되는 구조가 필요하고 특히 초전도 케이블에 있어서는 절연체를 통하여 열을 방출시킬 필요가 없다는 점만 다르다고 할 수 있다.

대표적인 절연방식인 냉매함침 tape권 절연방식(=복합절연방식)과 추출한 고분자절연방식에

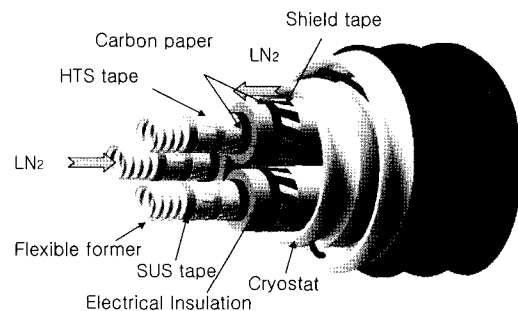
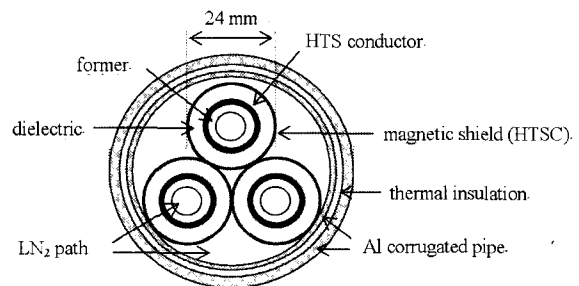


그림 5. 고온 초전도 케이블의 구조

대해 서술한다. 냉매함침 tape권 절연방식으로 그림 5에서 나타낸 바와 같이 반 합성지인 PPLP를 적층해서 액체 질소에 침적하는 복합 절연방식이 유력하게 사용되고 있다. 이 PPLP는 기존의 kraft지의 유전손을 보완한 시료로서 그림 6과 같이 두 장의 서로 다른 두께를 가진 cellulose paper와 polypropylene film으로 구성되어 있으며, Thermal calendering 공정을 통하여 제작된 합성지이다. 하지만, 초전도 케이블은 성형상 butt-gap 형상을 취하게 되며, 이때는 butt-gap 사이의 void에 의한 부분방전이 발생하기 쉬우므로 절연설계시 주의를 요한다.

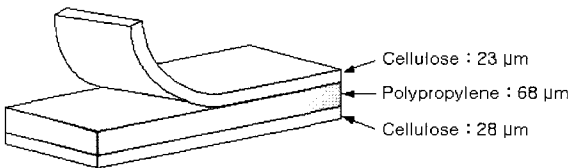


그림 6. PPLP의 구조

한편, 고체절연방식은 일본의 Toyohashi 대학에서 개발연구가 진행되어 왔다. 이 방식은 절연에 전기적 약점으로 되는 냉매가 존재하지 않기 위해 절연파괴강도의 향상과 장기안정성이 기대 된다. 당초, 가교폴리에틸렌(XLPE) 절연SC 케이블의 개발을 목적으로 하고 77K, 20kV에서 시험되었으나, 액체헬륨으로 냉각했을 때 40K에서 절연체가 파괴되었다. 현재 에틸렌프로필렌(EPR) 절연을 평가하여 케이블 시료에 있어서 좋은 기계적 특성을 가지고 있으며, 상온과 비교하면 절연파괴 강도의 향상, 유전손실의 저감, 내전기 treeing성의 현저한 향상, 수 tree 열화 무시, 열적·화학적 열화 무시 및 공간전하의 영향을 차단 등 많은 이점이 있다.

초전도 케이블 단부의 절연구조를 그림 7에 나타낸다. 이 경우 액체 질소부로부터 상온 부의 구간을 관통시킨 절연구조로 취할 필요가 있다. 그것을 위해 큰 온도차가 생기는 부위에서 열전도 및 단열, 절연구조물의 기계특성을 고려하고 냉매의 가압 환경이 가능한 구조를 취한다. 따라서, 케이블 단부는 액체질소의 분위기 하에서 사용가능한 전기절연재료가 필요하지만,

그것에 대해서는 현재 고체절연으로 해서 EPR, Epoxy가 주로 사용되고 있다.

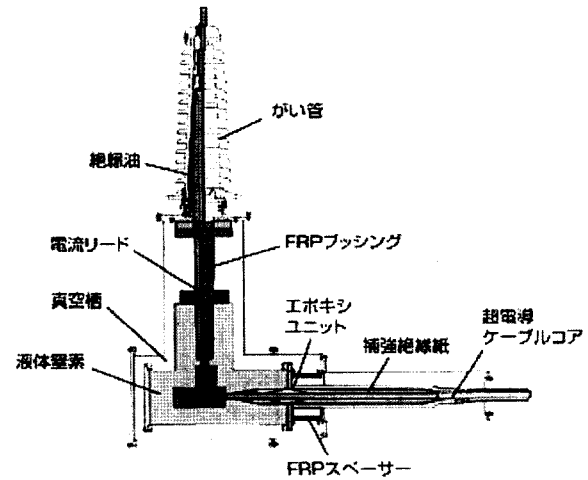


그림 7. 초전도 케이블 접속부의 절연

5. 기타 초전도 응용 기기 절연

초전도 마그네트는 영구전류가 흐르고 전기적 손실이 없게 해서 고자계를 얻는 것이 일반적이고 정상전류가 흐르고 있을 때는 전압강하는 없다. 그래서 전기절연도 권선간의 접촉을 방지하는 정도이다. 그러나 일단 초전도상태가 깨지는 quench가 발생하면, 상전도로 전이한 부분에 전압강하가 생기고 전류의 시간적 변화에 따라 inductance에 전압이 유도된다. 핵융합실험용 마그네트나 SMES와 같이 코일의 대형화가 되고 수 kV에서 수십 kV 급의 전압이 발생하기 때문에 전기절연을 고려할 필요가 있다.

초전도 마그네트의 냉각에는 도체를 냉매에 침적하는 침적냉각방식과 conduit라 불리는 금속 파이프 내에 도체를 배치하고 유로를 설치해서 냉매를 순환시키는 강제냉각방식이 있다. 먼저, 침적냉각형 방식은 NbTi를 초전도체로 하는 마그네트의 권선간, 층간의 절연은 Glass 강화수지(GFRP) spacer로 절연하고 있다. 또 다른 마그네트로 절연재료로서는 폴리이미드테이프 및 에나멜, 폴리비닐포말이나 몰딩의 우수한 저온특성을 가지는 것이 거론되고 있다.

한편, 강제냉각방식은 초전도체를 conduit 내에서 냉각시키기 때문에 conduit 외부에

Glass-cross에 수지를 함침시킨 GFRP를 감는 것이 가능하다. 여기서, 40GJ에 도달하는 축적에너지에 의한 극저온하의 전자응력에 가해서 중성자방사선조사에 견디지 못하면 안된다.

초전도 한류기는 계통 단락사고시에 단락 전류를 억제하는 소자로 해서 개발이 진행되고 있으며, 동작 시에는 단자간에 계통전압이 인가되어 절연설계가 요구된다. 한류기의 절연설계는 코일 자신에 유도성 전압이 발생하지 않고, 또 권선의 전압분담을 균일화하는 것이 좋고 비교적 절연설계가 용이하다. 다만, 상전도 전이속도가 큰 경우에는 차단기동작시와 거의 등가한 과도전압이 발생할 가능성이 있어 기포가 발생하기 쉽다. 따라서, 초전도 코일과 병렬로 접속된 한류동작개시의 전류위상에도 의존하기 때문에 충분한 검토가 필요하다.

6. 결 론

이상 극저온을 중심으로 한 초전도 응용기기의 절연에 대하여 간단히 소개하였지만, 초전도 기기의 전기절연 설계기술은 아직 확립되어 있지 않은 실정이다. 또한 초전도 응용 기기의 실현을 위해서는 절연열화의 장기 신뢰성, quench시의 전압의 규명, 초전도 기기의 내전압 시험법 확립 그리고 장시간 운전시 요구되는 장시간의 신뢰성을 확보 등을 높고 불 때 향후 해결되어야 할 과제는 산적해 있다고 하겠다.

이에 우리나라에서는 2001년부터 초전도 응용 기기 개발을 위해 Frontier 사업을 진행하고 있으며, 가까운 장래에 초전도 응용 기기 실현이 이루어지길 바란다.

Reference

- [1] J. Gerhold, "Cryogenic Liquids-A Prospective Insulation Basic for Future Power Equipment," IEEE trans. on Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 1, p. 68, 2002.
- [2] 김상현, "초전도 케이블의 기술동향", 전기공업, 5호, 1998.7

- [3] 김상현, "초전도 케이블용 절연재료의 절연파괴특성과 기구에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 5권 3호, p. 303, 1992
- [4] 日本電氣學會, "超傳導應用器機の電氣絶縁技術," 電氣學會技術報告 Vol. 528, p. 16, 1995.
- [5] H.Suzuki et al, "Dielectric Insulation Characteristics of Liquid Nitrogen Impregnated Laminated Paper-Insulated Cable", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.7, No.4, pp.1677-1680, 1992.
- [6] 原雅則ら, "液體窒素中の複合絶縁系部分放電開始特性に及ぼす熱氣泡と壓力の影響", 電氣論A, 119卷3号,平成 11年.
- [7] M. Hara, J. Gerhold, "Electrical insulation specification and design method for superconducting power equipment," Cryogenics, Vol. 38, p. 1053, 1998.
- [8] 최병주, 류 경우, "전력응용 초전도 기기의 전기절연 설계기술", 초전도와 저온공학 2 권 1화, 2000.
- [9] 石原ら, "液體窒素含浸絶縁紙の電壓壽命特性 試験法の検討", 電力中央研究所報告, 昭和58年.
- [10] 홍원표, "극저온에서의 초전도 전력기기의 전기절연설계", 전기공업, 5호, 1998.

저자이력



김상현

1950년 2월 7일생, 1974년 인하대학교 전기공학과 졸업, 1979년 동 대학 대학원 전기공학과 졸업(공학 석사), 1986년 오사카대학 전기공학과 졸업(공학박사), 1986년 한국전기연구원 초전도 연구실장, 1989~현재, 경상대학교 전기공학과 교수, 1999년 경상대학교 공과대학장, 2001년~현재 한국초전도·저온공학회장.