초전도케이블의 개요 및 개발 필요성 검토

장 종 근
한국전력공사기술연구원 전력연구실

1. 서 론

가. 개요

전기에너지의 수요는 지속적으로 증가하여 2010년경에는 현재의 약 3.3배 이상이 될 것으로 추산되며, 도심지역으로의 인구 밀집화에 따른 전력수요의 과밀화 진전 및 지역적 편재화, 대용량 및 고효율의 원자력발전소 확충으로 인한 발전단의 대형화와 환경문제에 기인된 전력설비 부지확보 등의 문제가 심각하게 대두되고 있다.

이와 같은 문제에 적극 대처하기 위한 시도로 극저온에서 전기저항이 소멸되어 손실을 발생시키지 않는 초전도체를 전력케이블에 적용하려는 것으로써 기술선진국인 미국, 일본, 프랑스, 러시아 등에서는 Pilot 시스템을 개발하고 일부는 실증시험 단계에 와 있다.

초전도 전력응용중 특히 초전도 송전 및 초전도 에너지 저장장치는 기존 송전방식의 송전용량 한계 극복과 장거리 대용량 송전수단 및 전력계통의 고안정화로 인한 양질의 전기에너지를 공급할 수 있다는 측면에서 본질적으로 우수한 기술특성을 가진 것으로, 특히 초전도케이블은 1회선당 송전용량이 크고 OF 케이블과 가스절연케이블에 비해 대용량으로 될수록 유리해지며 송전에너지밀도가 크고 손실이 작은 이점 등이 있다. 초전도케이블의 개발에 필요한 요소기술로서는 케이블용 초전도재료, 전기절연재료 및 기술, 열절연기술, 접속 및 단말기술, 그외에 케이블 설계기술 및 송전시스템 제어기술 등을 들 수 있다.

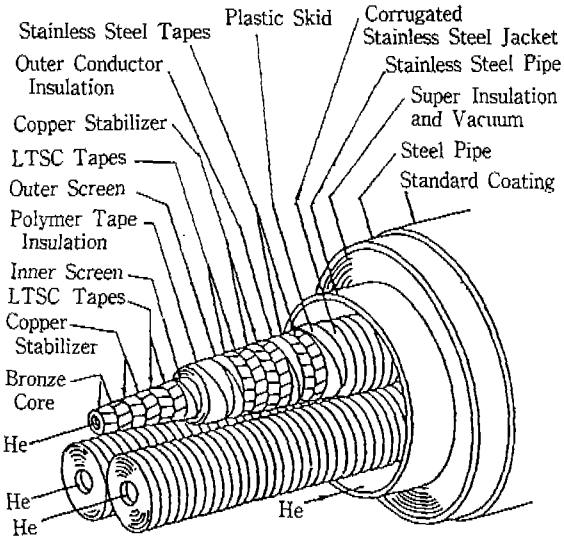
본고에서는 초전도케이블의 개요와 세계각국의 개발상황 및 도입효과, 계통적용 가능성 등에 대하여 소개하고자 한다.

나. 도입 필요성

2000년대 전력수송에 적용될 것으로 예상되는 대용량 지중송전 방식인 초전도케이블 및 송전시험시스템을 개발하여 송전수요의 급증에 따른 도심지 지중송전 용량의 대폭적인 증대와 허용송전 거리도 장거리화가 가능한 새로운 초전도 송전기술의 개발이 필요하다.

2. 초전도케이블의 구조

가. 초전도케이블의 구조



<그림 2-1> 초전도케이블의 구조

초전도케이블의 일반적인 구조는 그림 2-1과 같이 기존의 OF케이블과 유사하며, 구성요소는 도체, 전기절연, 냉각 및 단열, 구조재로 구분할 수 있고 재료에 따라 설계 패턴이 크게 바뀌며 시스템전체에 큰 영향을 준다.

예를 들면 도체재료의 경우 초전도체 내부의 자계변화에 의해 AC 손실이 발생하기 때문에 반드시 표면자계를 작게 설계해야 하며 실제로 도체에서 전류가 흐르는 것은 자계침입 정도에 따라 다르기 때문에 이러한 요소를 고려한 도체구조 설계가 행해져야 하며 열교란이나 이상전압, 전류에 의한 초전도케이블 개발시 매우 중요한 문제가 된다. 전기절연에 대해서도 마찬가지로 유전특성 및 절연 특성과 기계적특성, 열전달특성 등이 우수한 절연재료를 개발, 선정하고 최적의 절연구성기법을 개발함에 따라 절연두께를 얇게 할 수 있어 케이블시스템 전체적으로 볼 때 효율향상은 물론 Compact한 케이블을 설계할 수 있다. 냉각 및 단열부는 단열특성, 열전달특성, 극저온 전기적, 기계적 특성, 냉매의 Flow 특성에 따라 어떤 구조의 냉각방식과 재료를 선정하는가에 따라 케이블시스템의 경제성과 신뢰성에 큰 영향을 미치는 냉각시스템을 고효율, 고성능으로 설계 제작할 수 있다. 따라서 초전도케이블의 개발을 위해서는 이와 같은 각종 구성요소에 대한 전반적인 검토 및 기술개발이 필요하다.

나. 초전도 케이블의 요소기술

(1) 초전도 재료

㈎ 초전도도체

초전도케이블용으로 사용되는 초전도도체는 낮은 자속밀도에서 높은 임계전류밀도를 갖는 것이 중요하며 임계전류밀도가 높을수록 케이블의 단면적을 작게 할 수 있다. 또한 냉각설비의 효율면에서 가능한 한 높은 임계온도를 가져야 한다.

직류케이블용 초전도도체로는 Nb_3Sn, NbTi 등을 사용할 수 있으며, 4K, 1Tesla의 조건에서 케이블도체의 표면전류밀도는 NbTi가 $5\times10^5A/cm^2$, Nb_3Sn는 $10^5A/cm^2$의 값을 가진다. 또 임계온도 T_c는 Nb_3Sn이 약 18.4K이고 NbTi의 T_c는 약 10K로 Nb_3Sn이 높은 임계온도를 가지는 장점이 있다. 고순도 Nb의 장점은 낮은 교류손실과 비교적 낮은 가격, 제조의 단순함을 들 수가 있지만 Nb_3Sn은 더 높은 온도에서 이용할 수가 있으며 더욱 높은 임계전류밀도를 나타낸다.

㈏ 안정화 재료

여러가지 응용을 위해 초전도체는 초전도상의 부분적 또는 전체적인 상실로 인해 온도가 갑자기 상승하는 것에 대비해 안정화를 시켜주어야 한다. 안정화는 일시적인 현상에 의해 도체가 초전도상태로부터 상전도상태로 되려는 것을 억제하는 것을 의미한다. 이러한 일시적인 현상은 자속의 Flux Jump에 의해 도체내를 이동하거나 과

도전류에 의해 발생할 수 있으며 안정화는 일반적으로 초전도체의 직경을 줄이는 방법과 전기적, 열적전도도가 우수한 상전도금속과 초전도체와의 복합선재로 제작하는 방법이 있다. 안정화재료로서는 무산소동이나 고순도 알루미늄이 일반적으로 사용되며 초전도체와 안정화재료간의 완전한 금속결합이 이루어져야 한다.

(2) 초전도케이블의 전기절연

전기절연은 초전도케이블의 가장 중요한 구성요소의 하나로 송전용량 및 경제성과 운전신뢰성에 중요한 역할을 하며, 초전도케이블에 이용되는 절연재료는 실온에서 운전되는 케이블과 마찬가지로 고체, 액체, 진공 등이 있지만 극저온이라는 특수조건을 고려하여야 한다. 일반적으로 절연재료를 극저온에서 사용하면 캐리어의 여기 및 주입이 감소하여 캐리어의 밀도가 낮아지며 쌍극자의 운동이 동결되어 절연 및 유전특성이 양호해진다. 그러나 기계적 특성의 저하와 열수축 및 열응력이 크기 때문에 초전도케이블의 전기절연재료에 요구되는 성능은 매우 엄격하며 표 2-1은 교류초전도 케이블용 전기절연재료의 요구성능을 나타낸 것이다.

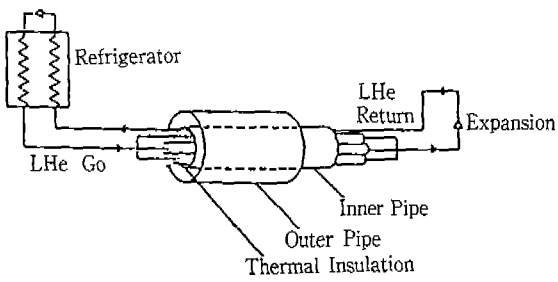
〈표 2-1〉 교류초전도 케이블용 전기절연재료의 요구성능

구 분	항 목	요 구 치
Electric	· Dielectric Strength -Operating Stress -Impulse Strength · Dielectric Constant · Dissipation Factor	10kV/mm(min.) 100kV/mm(min.) 2.5(max.) 2.0×10^{-5}(max.)
Mecha-nical (at 293K)	· Yield Strength · Tensile Strength · Tensile Modulus · Friction Coefficient	10MPa(min.) 140MPa(min.) 3.5~7.0GPa 0.250(max.)
Thermal	· Total Constraction (293~4.2K) · Conductivity (at 4.2K)	0.6~1.0% 5~30mW/mK

(3) 초전도케이블의 냉각 및 단열

(가) 냉각

초전도케이블에서는 초전도상태를 유지하기 위하여 케이블의 냉각과 단열이 필요하다. 초전도케이블의 냉각은 임계점(T=5.2K, P=2.3kg/cm^3) 이상의 초임계헬륨을 순환시켜 냉각하는데 운전온도영역은 기본적으로 사용되는 초전도재료에 의해 정해지며 교류케이블은 히스테리시스 손실에 의해, 직류케이블의 경우는 임계전류밀도에 의해 각각 결정된다. 도체가 Nb 또는 NbTi인 경우에는 6K 이하의 온도영역에서 운전하여야 하며 Nb_3Sn 일 때는 6~10K 온도영역에서 운전하여야 한다. 초임계헬륨은 액체헬륨에 비해 열용량이 크고 전기절연성능이 우수하지만 사용조건(압력, 온도)에 따라 현저히 재정수가 변화하므로 이것을 고려하여 케이블구조 및 냉각스테이션의 간격을 결정하여야 한다. 그림 2-2는 초임계헬륨의 순환에 의해 냉각방식을 나타낸 것으로 헬륨냉동기로부터 공급되는 헬륨을 케이블코어에 흘려보내고 케이블을 담고 있는 외관을 귀로로 하는 방식이다. 이 냉각시스템은 케이블길이에 따른 온도분포가 일정하고 헬륨귀로파이프의 단면적 증대 및 냉각스테이션의 길이를 길게 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 어떠한 방식의 냉각시스템을 적용하더라도 장기운전에 있어서 순환되는 헬륨이 불순물에 의해 오염되지 않게 하여야



〈그림 2-2〉 초전도케이블의 냉각시스템

한다.

(나) 단열

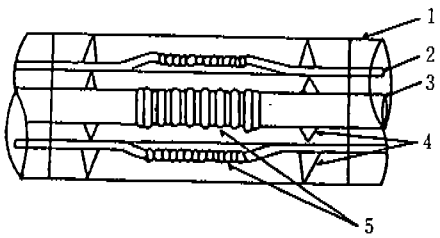
종래의 케이블에서는 도체손실에 의한 발열을 절연체를 통하여 외부로 방열시키는 것이 중요하지만 초전도케이블에서는 외부로부터의 열침입을 감소시키는 것이 중요하다.

초전도케이블의 단열설계에서 다음과 같은 중요 요소들이 있다. 제1요소는 케이블의 운전온도와 최대냉각구간 길이이다. 이것은 초전도케이블의 제조, 운전비용에 큰 영향을 미치는 요소이다. 제2요소는 외부로부터의 침입열과 케이블내부의 발열과의 균형이며, 제3요소는 단열관제조비용 및 유지관리와 관련된 신뢰성이다. 전력케이블의 신뢰성은 매우 중요한 문제로서 단열부의 손상 및 유지보수·점검에 따른 정전상태는 절대적으로 방지해야 한다. 초전도케이블의 단열설계에 있어서는 이러한 요소들을 고려하여 단열방식을 선택하여야 한다. 초전도케이블에 이용되는 단열방식은 진공을 이용하는 진공 열절연방식과 진공을 이용하지 않는 비진공 열절연방식으로 나눌 수 있다.

진공열절연방식은 저온용기의 내조와 외조 사이에 10^{-4}Torr 이하의 진공으로 만들어 이 공간에 존재하는 가스의 대류에 의한 열침입을 방지하는 방식으로 초열절연방식을 주로 사용하며, 진공을 이용하지 않는 단열에는 발포단열과 분말단열 등이 있다. 이 방법은 단열성능이 진공을 이용하는 방식보다 그 특성은 좋지 않지만 진공배기에 따른 비용 등의 문제가 적고 신뢰성이 높기 때문에 계속적인 연구가 필요하다.

(4) 초전도케이블의 접속 및 단말

초전도케이블의 접속부에는 케이블간을 접속하는 중간접속부와 단말부가 있다. 초전도케이블의 중간접속부는 케이블을 넣는 저온파이프의 저온강도, 고진공을 보증할 수 있는 신뢰성 높은 용접기술 및 열수축의 흡수 등이 중요한 문제이다. 저온파이프는 10~20m당 수cm의 열수축을 하므로 조인트마다 그림 2-3과 같은 벨로즈장치를 삽입하거나 파이프 전체를 굴곡화하여 제작하여야 한다. 또한 도체의 접속은 초전도체와 Cu나 Al과 같은 안정화재가 복합된 도체가 사용되므로 용접기술의 개발이 필요하다.



1 : 케이블 외장관
2 : 액체질소 덕트
3 : 액체헬륨 덕트
4 : 스페이서
5 : 벨로즈

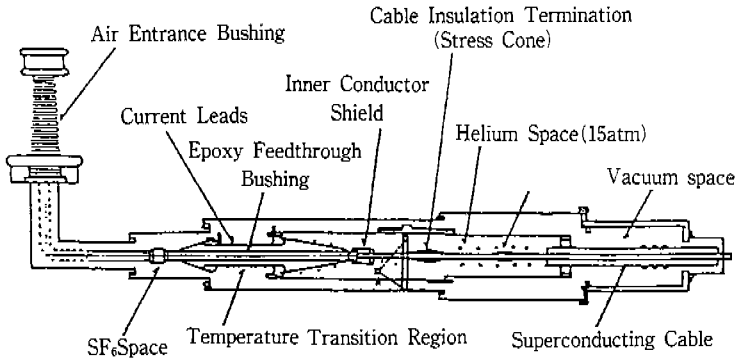
〈그림 2-3〉 벨로즈를 이용한 초전도케이블의 중간접속부

초전도케이블의 단말부는 극저온부와 상온부를 접속하는 장치이므로 전기적뿐만 아니라 열적으로도 충분한 주의가 필요하며 냉매공급기능을 만족시켜야 하기 때문에 초전도케이블의 가장 어려운 부분중의 하나이다. 초전도케이블의 단말부는 다음과 같은 기능을 갖추어야 한다.

1) 작은 손실로 저온부에서 상온부로 대전류를 공급할 수 있을 것.
2) 초전도체에 고전압을 인가할 수 있을 것.
3) 헬륨의 공급과 회수가 가능하고, 충분한 절연내력을 가질 것.
4) 상온에서 절연내력이 낮은 헬륨가스를 고전압측에서 접지전압측으로 이동시킬 수 있을 것.

그림 2-4는 1,000MVA 시험설비용으로 제작한 단말의 개략도이다.

이상의 구성요소 외에도 케이블의 관리, 제어 등 Total System으로서의 검토요소 등이 있다.



〈그림 2-4〉 초전도케이블의 단말

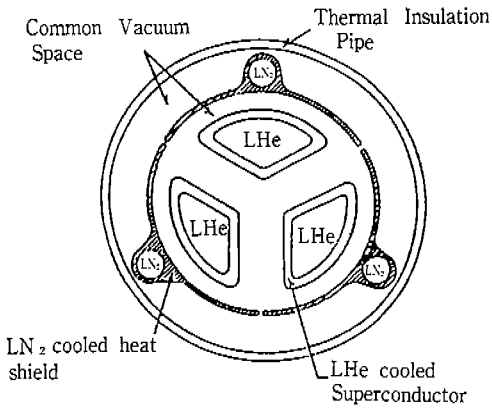
3. 초전도 케이블의 분류

가. 냉각 및 단열 측면에서의 분류

초전도케이블에서는 냉각용으로 액체헬륨 등의 극저온 액체가 사용되기 때문에 전기절연재료의 극저온에서 기계적특성이 매우 중요하다. 또한 종래의 전력케이블에서는 도체손실에 의한 발열을 절연체를 통하여 외부로 방출시키는 반면 초전도케이블은 외부로부터의 열침입을 차단하는 열절연이 매우 중요하다. 초전도케이블 시스템의 구성은 크게 나누어 열절연부와 그 내부에 들어있는 케이블코어로 구성되어 있으며 냉각 및 단열구조 측면에서 고려할 때는 케이블시스템의 유연성에 따라 Rigid형, Semi-Flexible형, Flexible형으로 분류할 수 있다.

(1) Rigid형 초전도 케이블 시스템

단열관(극저온 용기)과 케이블코어가 단단한 파이프로 되어 있으며 8~20m 정도의 단위길이로 생산되어 케이블포설시 현장에서 접속된다. 이 방식의 결점은 공장에서 현장으로의 운반문제 때문에 최대의 단위길이가 20m 이하로 제한되는 점이다. 따라서 케이블 포설시 다수의 접속이 필요하게 되며 냉각에 의한 각 부분의 열수축차이

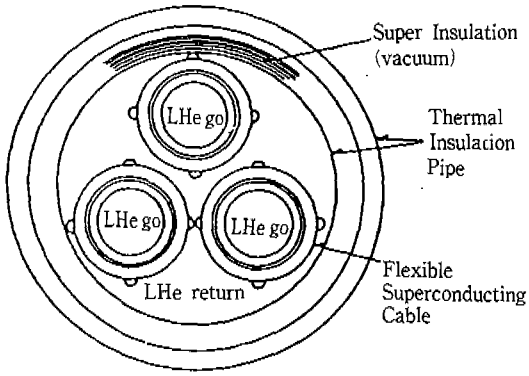


〈그림 3-1〉 Rigid형 초전도케이블 시스템

를 보상하기 위하여 벨로즈와 같은 장치가 필수적이다. 또한 전기절연방식으로는 스페이서를 사용한 진공절연이나 액체절연이 사용되며 그림 3-1은 진공절연방식을 채택한 Rigid형 초전도케이블 시스템의 단면도이다. 이러한 초전도케이블 시스템은 중공도체의 구조로서 비교적 용이하게 개발할 수 있으므로 주로 초기의 연구개발 대상이었으나 다층 동축관을 조립하는 작업과 신뢰성에 문제가 있다.

(2) Semi-Flexible형 초전도 케이블시스템

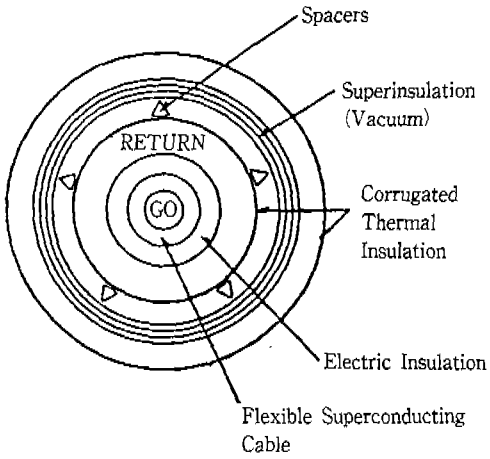
단열관은 열수축을 보상하기 위하여 벨로즈를



〈그림 3-2〉 Semi-Flexible형 초전도케이블 시스템

갖는 단단한 파이프로 되어 있고 이 단열관에 Flexible한 케이블 코어를 인입하는 구조이다. 포설 방법은 기존의 OF 케이블(또는 POF 케이블)을 철관내에 포설하는 경우와 비슷하다.

즉 Rigid한 단열관이 포설되고 Flexible한 케이블코어를 단열관내로 인입하는 방식으로 케이블코어가 Flexible하기 위해서 연선도체나 테이프적층도체의 구조가 일반적이다. 이구조는 단열관에서 Rigid형의 장점을 갖게 되지만 접속 등에



〈그림 3-3〉 Flexible형 초전도케이블 시스템

문제가 있다. 그림 3-2는 Semi-Flexible형 초전도케이블 시스템의 단면도이다.

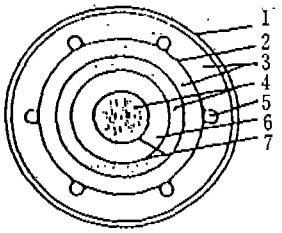
(3) Flexible형 초전도 케이블시스템

그림 3-3의 Flexible형 케이블은 단열관로와 케이블코어가 Corrugated Pipe로 되어 있기 때문에 Flexible한 구조의 케이블시스템으로서 공장에서 일체형으로 생산되므로 신뢰성이 높고 경제성 또한 높다. Rigid형과 Semi-Flexible형 초전도케이블 시스템에서는 하나의 공통 단열관내에 단상 또는 3상 등 여러 개의 케이블코어를 넣을 수 있으므로 열손실과 케이블이 차지하는 공간면에서 상당히 효율적이지만 Flexible형 초전도케이블시스템의 경우는 케이블시스템 직경이 제조와 운송상의 문제 때문에 300mm 이내로 제한되기 때문에 각 케이블코어를 각각의 단열관내에 설치하여 케이블시스템을 제작한다. 따라서 Flexible형 초전도케이블 시스템은 전체적인 열손실이 크고 설치공간이 크지만 신뢰성이 높고 수송과 포설작업이 간편하다.

나. 전원측면에서의 분류

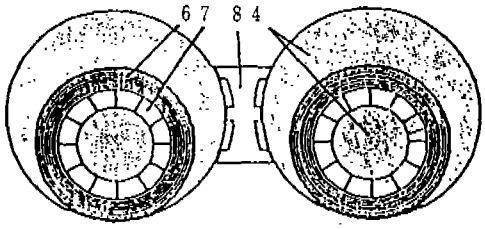
(1) 직류 초전도케이블

직류 초전도케이블에서는 냉각을 용이하게 하기 위하여 일반적으로 중공도체를 사용한다. 도체의 배치는 그림 3-4의 (a)와 같이 동축상으로 배열하거나 (b)와 같이 평행하게 배열한다. 평행하게 배열된 도체에서는 케이블의 전위분포가 대칭적으로 영이 되기 때문에 높은 송전전압에 대해서도 전기절연부는 송전전압의 절반크기에 견딜 수 있도록 설계하게 되며, 한쪽의 도체가 손상을 입어도 전력의 절반은 송전할 수 있다. 반면에 동축상으로 배열된 구조에서는 최대송전전압을 고려한 전기절연설계를 하여야 한다. 그림 3-4(b)의 평행도체배열 케이블의 헬륨파이프는 팽



1. Protection Pipe
2. Heat Shield
3. Vacuum spacers
4. Helium
5. Nitrogen
6. Electrical insulation
7. Superconductors
8. Spacer

(a) 동축상 도체 배열의 예



(b) 평행 도체 배열의 예

〈그림 3-4〉 직류 초전도케이블의 예

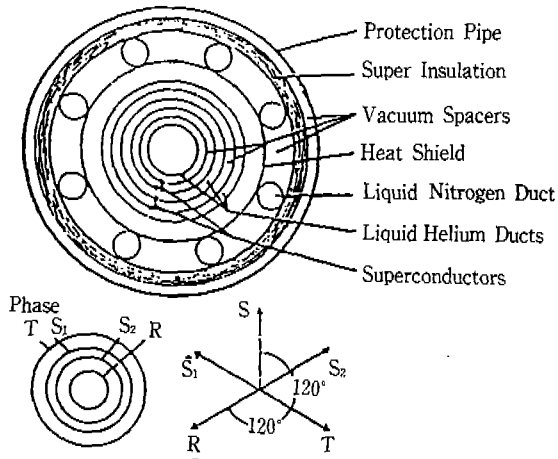
창계수가 작은 불변강(강철과 니켈합금 등)으로 만들기 때문에 열수축을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 투자율이 높은 불변강 파이프가 외부도체의 자계를 차폐하기 챙문에 두 도체간에는 힘이 작용하지 않는다. 경제적인 면에서 볼 때는 동축상으로 도체를 배열하는 쪽이 자속분포가 고르고 자속밀도의 크기가 작기 때문에 초전도재료의 비용이 적게 들고, 열절연측면에서도 유리하다. 또한 동축상 직류 케이블에서는 동축의 교류케이블과 달리 과도현상, 특히 전류의 잔류리플에 의한 와전류손실이 발생하지 않는다. 케이블의 인덕턴스는 도체배열에 따라 큰 차이가 나며 평행도체 배열보다 동축상의 도체배열의 경우가 훨씬 작다.

(2) 교류 초전도 케이블

교류 초전도케이블에서도 극저온 냉매의 흐름을 원활히 하고 냉각상태를 좋게 하기 위하여 중공도체가 일반적으로 사용되며 케이블의 도체배치는 다음의 두가지 조건을 만족시켜야 한다.

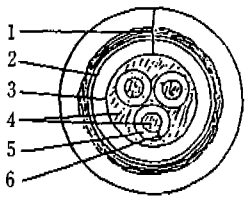
첫째, 전자계를 초전도체 사이의 영역내에 제한하여 케이블의 상전도체에 와전류의 발생을 방지하여야 한다.

둘째, 초전도체의 손실을 최소화하기 위하여 초전도체 표면의 자속밀도를 낮게 유지하여야 한다.

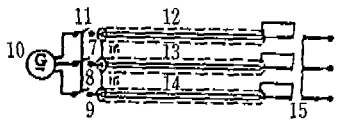


Phase Connections and Currents

(a) 동축상 도체배치



1. Thermal Insulation
2. Heat shield(80K)
3. Helium Pipe
4. Helium
5. Electrical Insulation
6. Superconductors
7.8.9 Inner conductors
10. Generator
11. Breaker
12.13.14 Outer conductors
15. Transtormer
16. Connection between phases



(b) 동심상 도체배치

〈그림 3-5〉 교류 초전도케이블의 예

그림 3-5(a)는 동심상의 도체배치로써 전자계보상을 위하여 S상이 두개의 보조상(S_1, S_2)으로 나누어져 있어서 2개의 동축도체쌍(R, S_1, S_2, T)에 흐르는 전류의 위상차가 180°를 갖도록 하고 있다. 그러나 실제는 각상 도체의 임피던스가 다르기 때문에 완전한 전자계보상을 얻을 수 없으며 각 상간의 부하불균형 때문에 전자계보상이 더욱 어려워진다.

다. 고온 초전도케이블

최근 액체질소 온도에서 초전도특성을 나타내는 세라믹계 고온초전도체가 발견되어 실용화를 위한 많은 연구개발이 진행되고 있다. 이러한 고온 초전도체가 현재의 금속계 초전도체와 동일한 성능을 갖는 재료로서 개발되면 그림 3-6과 같은 액체질소 온도에서 운전되는 초전도케이블의 개발이 가능하게 되어 액체헬륨 온도에서 운전되는 초전도케이블과 비교하여 다음과 같은 이점이 있기 때문에 경제적으로 실계통에 적용할 수 있을 것이다.

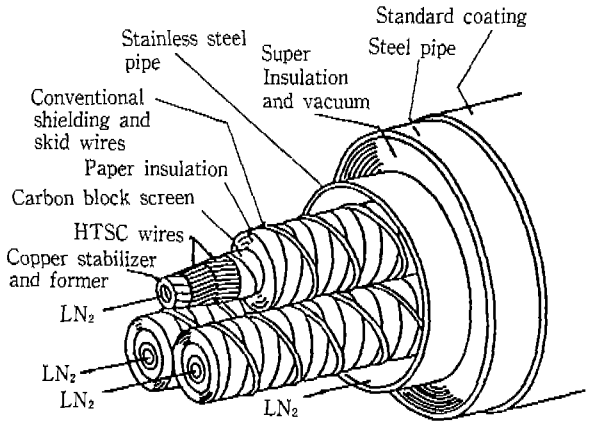
1) 그림 3-6과 같이 액체질소 온도에서 운전되는 초전도케이블이 개발되면 냉동기의 효율이 약 50배 정도 상승하기 때문에 냉각시의 손실이 경감되고 냉각시스템이 간략화되어 대폭적인 코스트의 저감이 가능하다.

2) 액체질소의 열용량이 액체헬륨의 약 3배이므로 높은 냉각구간의 길이를 대폭적으로 크게 할 수 있고 저전압, 대전류화에 의한 절연레벨의 저감 및 중간변전소의 생략이 가능하게 되어 전력계통 전체의 비용저감이 가능하다.

3) 액체질소의 절연파괴는 액체헬륨의 2배 정도로서 절연유와 유사한 절연강도를 갖고 있다. 따라서 절연설계가 용이하고 케이블의 콤팩트화가 가능하다.

4) 액체헬륨 냉각의 경우 단열관로내에 액체질소의 열차폐층이 필요하지만 액체질소냉각에서는 불필요하므로 단열구조가 간단하고 설계 및 제작이 용이하며 제작비용이 절감된다.

이와 같이 액체질소 냉각 고온 초전도케이블은 액체헬륨냉각 초전도케이블에 비해 성에너지, Compact, 고신뢰성, 저코스트화가 가능한 매우 기대가 되는 송전방식이다. 따라서 현재 일본, 미국, 프랑스 등 외국에서는 저온 초전도케이블 개발과 함께 고온 초전도케이블 연구를 진행하고 있으며 그 결과 1992년 일본의 동경전력과 스미토모전공, 동경전력과 후류카와전공이 공동으로 5m의 고온 초전도케이블을 개발하여 D. C. 2000A 통전에 성공하였으며, 미국의 중앙전력연구소와 이탈리아의 Pirelli Cable SpA가 공동연구하여 1m의 고온초전도 케이블을 개발하여 D. C. 2300A 통전에 성공하였다. 그러나 고온초전도체의 실용화에는 상당한 기간이 소요될 것으로 예상되므로 기존의 금속계 초전도체의 성능향상과 저온 초전도케이블의 개발이 지속적으로 추진될 것으로 예상되며 엄격한 조건에서도 충분한 기능을 발휘할 수 있는 신뢰성이 높은 초전도케이블 개발이 완성되면 이 기술은 바로 고온 초전도케이블의 기반기술로서 충분히 활용될 것이다.



〈그림 3-6〉 고온 초전도케이블(운전온도 : 77K)