

초 전 도 스 위 치

차 귀 수

(순천향대학 전기공학과 조교수)

1. 머리말

전력계통이 대용량화 됨에 따라서 고장전류도 이에 비례해서 증가하고 있다. 고장전류가 차단기 차단용량의 한계치에 접근하게되어, 이를 제한해서 차단기의 부담을 경감시킬 수 있는 장치가 요구되고 있다. 또한 단락용량이 기존의 전력기기에 비해서 대단히 적은 초전도변압기, 초전도발전기 그리고 초전도케이בל등의 초전도전력기기의 실용화가 다가옴에 따라서 고속의 차단 혹은 전류제한이 필요하다.^{1,2)}

초전도스위치는 이와같은 요구를 충족시킬 수 있으므로 이미 1970년대부터 많은 연구가 행하여졌고 시작품도 제작되었다. 초전도스위치는 초전도체가 초전도상태에서 상전도상태로 바뀌면 저항이 발생하는 것을 응용한 것으로, 이 저항에 의해 고장전류를 상당한 수준까지 제한할 수 있어서 효과적인 차단을 가능하게 한다. 초전도스위치의 특성으로는 동작속도 및 회복속도가 대단히 빠르고 구조가 간단하며 수명이 길다는 것이다. 초전도스위치의 중요한 응용분야의 하나로 초전도정류기를 들 수 있다. 초전도코일에 에너지를 공급하는 정류기에 초전도스위치를 사용하면 정류효율이 높은 초전도정류기를 제작할 수 있다.^{3, 4)}

여기서는 초전도스위치의 재료 및 구조, 상전도상태로 만들기 위한 상전이방식, 전류제한기 및 초전도정류기등의 응용분야 그리고 앞으로의 추세에 대해서 기술한다.

2. 材料 및 構造

스위치용으로 사용되는 초전도체는 스위치용이라는 측면에서 본다면 常電導로 轉移시키기가 용이한 전류, 온도 및 자계의 임계치가 낮은 것이 유리하지만 이 값들이 너무 적게 되면 외부의 영향에 의해 임의적으로 트리거가 되는 등 安定性이 결여되어 적절한 값이 필요하다. 스위치용 초전도체의 성능을 결정짓는 가장 중요한 요인은 상전도가 발생하는 임계온도에서의 저항률 ρ_n 이다. 스위치가 열린 상태에서 초전도스위치의 정항은 ρ_n 에 의해서 크게 좌우된다. 따라서 ρ_n 및 저항 R을 크게하기 위한 여러가지 방법이 고안되고 있다.

초전도스위치에 사용되는 초전도체는 초전도선과 薄膜초전도체 및 스퍼터(Sputter)방식에 의한 초전도체가 있다.

초전도선은 수십 혹은 수백개의 필라멘트를 모재(matrix)에 넣어 하나의 線을 만들고 이것을 다시 여러개 묶어서 안정화재료의 주위에 배치한다. 그럼 1은 초전도선의 구조이다.

스위치용 초전도선의 필라멘트로서는 NbTi가 가장 널리 이용되고 Nb, Nb₃Sn, NbZr 및 PbSn이 이용되기도 한다. 모재의 재료로서는 CuNi 혹은 Cu가 사용된다. 필라멘트 및 모재로 쓰이는 물질의 Pn이 수십 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 정로 대단히 적기 때문에 초전도스위치가 개방된 상전도시의 저항을 높이기 위해서는 초전도선의 길이가 대단히 길어져야 하고 실제로 이 길이는 수 km에 달하기

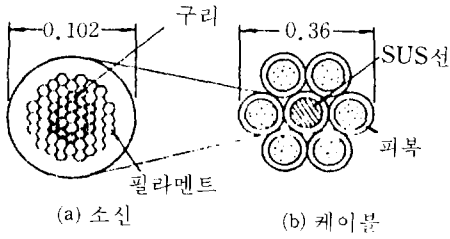


그림 1. 超電導線의 構造

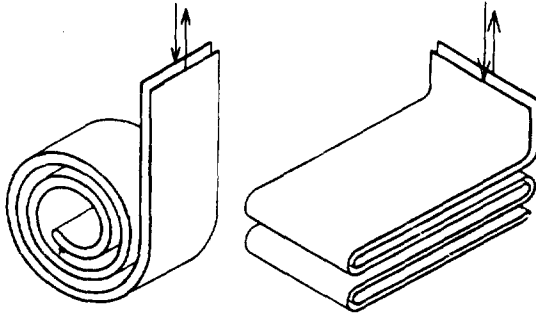


그림 2. 초전도스위치의 bifilar 권선

표 1. 스위치용 超電導體의 特性

필라멘트 모 재	NbZr CuNi	NbZr CuNi	NbTi CuNi	NbTi CuNi	NbTi
필라멘트직경 (μm)	0.3	48	7	21	단면적
필라멘트 수	574	18	366	61	5×0.01
초전도선직경(mm)	0.3	0.31	0.2	0.25	mm
모재 / 초전도재	1.2	1.1	1.2	1.35	
$\rho_n(\mu\Omega\text{cm})$	36	36	43.5	35	69
$J_c(10^6\text{A/cm}^2)$			9.2	8.5	9.0
제 작 사	MCA SUPER		SUPER		INI VAC
			-CON		-CON

도 한다.^{5), 6)}

薄膜초전도체 계통으로는 Nb, NbTi 및 NbN이 사용되고 있다. 표 1은 스위치용 초전도체의 재료 및 전기적인 특성이다.

초전도스위치의 構造도 초전도-상전도의 相轉移가 쉽게 발생될 수 있어야 하고 다음과 같은 조건을 충족해야 한다.

1) 부피가 最小가 되어야 한다. 초전도스위치 極低温 容器(Cryostat)내의 좁은 공간에 설치되므로 차지하는

부피를 最小로 해야 한다. 앞에서 설명한 바와 같이 초전도선을 스위치에 사용하는 경우에는 길이가 길어지기 때문에 捲線을 한다.

2) 자기 인덕턴스가 最小가 되어야 한다. 스위치의 자기인덕턴스는 스위치가 동작하기 시작하는 過渡時에 스위치에 흐르는 전류의 변화를 억제하게 되어 스위치의 동작시간을 길게하는 요인이다. 이 문제는 초전도선을 권선을 해서 스위치를 製作하는 경우에는 특히 중요하다. 따라서 이때에는 자기인덕턴스를 없애기 위해서 권선방법을 bifilar로 하고 있다. 이렇게 하면 스위치의 자기인덕턴스는 수 μH 이내로 줄일 수가 있다. 그림 2는 bifilar 로 권선한 초전도스위치이다.

3) 외부자계의 영향을 받지 않아야 한다. 外部磁界가 과다하면 이에 의해서 초전도스위치가 誤動作을 하는 경우가 있으므로 이와같은 위험이 예상되면 외부자계를 차단하는 차폐장치를 설치해야 한다. 외부자계의 영향은 다음에 설명하는 자계트리거방식에서는 특히 중요하다. 자계트리거방식에서는 스위치의 동작시간을 줄이기 위해서 臨界磁界에 가까운 直流磁界를 항상 인가해 놓기 때문에 외부자계가 가해지면 誤動作을 할 위험이 크다.

4) 스위치내의 電氣絶緣을 고려해야 한다. 과도시에는 스위치에 높은 전압이 인가되므로 이를 견딜 수 있도록 절연물을 사용해야 한다. 그러나 전기절연을 위한 전기절연물이 초전도스위치와 액체헬륨간의 열전달을 방해하지 말아야 한다. 이는 초전도스위치의 회복시간과 관련된다. 즉 초전도스위치가 상전도상태에서 초전도상태로 복귀하기 위해서는 액체헬륨 등의 냉매를 통해서 신속하게 放熱을 해야 하는데 전기절연물이 열전달을 방해하면 회복시간이 길어진다. 초전도스위치가 빈번하게 동작해야 하는 초전도정류기등의 교류전원에 사용되 초전도스위치에서는 커다란 제약조건이 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로는 스페이서(Spacer)를 사용하거나 냉각체의 설치, 절연플라스틱의 사용 및 알루미늄산화물들의 산화물을 이용할 수 있다.

5) 製作이 용이해야 한다. 현재 제작되고 있는 초전도체에는 加工性에 限界가 있으므로 이를 고려해서 쉽게 제작할 수 있어야 한다.

6) 견고해야 한다. 초전도스위치가 동작하는 과도상태 등에서는 큰 電磁力이 인가되는 경우가 있으므로 견고하게 지지해야 한다. 지지를 위해서는 에폭시의 일종인

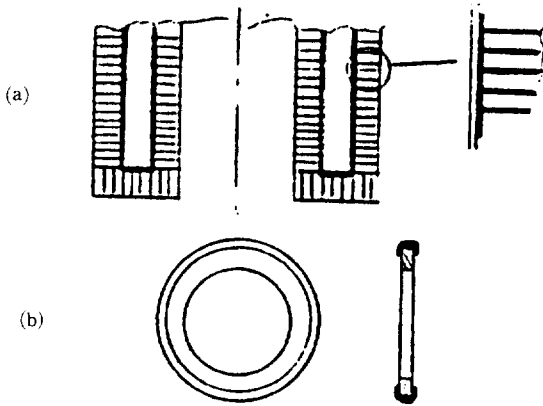


그림 3. 원통형 박막초전도스위치 (a) 및 알루미늄 알루미늄테이프 (b)

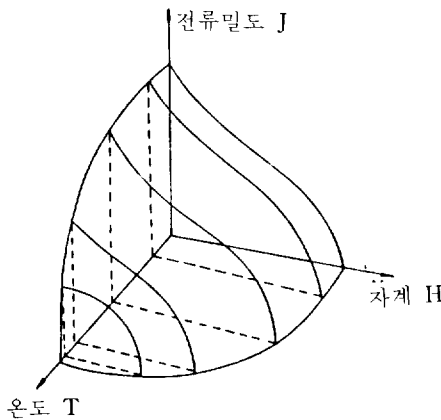


그림 4. 초전도 및 상전도의 경계면

Stycast 2850 FT 혹은 Aerojet #2가 이용되고 있다.

상전도시의 저항을 높이기 위한 방법으로는 박막초전도스위치를 이용할 수 있다. 박막초전도스위치는 석영, 사파이어 또는 유리등의 기판위에 Nb 혹은 NbN을 1미크론 이내의 두께로 입힌 것으로 ρ_n 은 수 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 가 일반적이고 NbN을 사용하면 이 값을 $100\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 이상으로 제작할 수 있다.^{7), 8)}

박막초전도스위치에서는 초전도선에서 母材로 쓰이고 있는 전기전도성이 우수한 Cu, Ni 등의 성분이 없으므로 단위 길이당의 저항이 높고 두께가 대단히 얇기 때문에 열전달특성이 우수하다. 그림 3은 원통형으로 제작된 박막초전도스위치로서 산화막을 이용해서 지지물과 절연을 했다. 이렇게 함으로서 스위치의 전기저항이 열전도성 및 전기전도성이 좋은 지지물의 영향을 받

지 않도록 했다.

3. 作動方式

초전도체에서 초전도-상전도의 相轉移를 발생시키는 요인으로서는 電流, 溫度 그리고 磁界를 들수 있고 이들은 서로 연관을 맺고 있다. 그림 4는 이들 전류, 온도 및 자계의 상호연관에 의한 초전도-상전도의 경계면이다.

위 세가지 변수를 따로 이용하거나 적절히 조합함으로써 초전도체의 상전이를 임의로 발생시킬 수 있다. 초전도상태와 상전도상태의 가장 큰 차이는 저항의 변화로서, 초전도상태에서는 저항이 없는 데에 반해서 상전도상태에서는 저항이 발생한다. 초전도스위치는 이 두가지 상태의 저항의 차이를 이용한 것으로 초전도상태에서는 스위치가 닫혀있고, 상전도상태에서는 스위치가 개방되어 있다고 생각할 수 있다.

초전도스위치의 동작시간은 상전이에 필요한 시간에 의해서 좌우되므로, 이를 신속하게 수행하기 위한 여러가지 방법이 발표되어 있다. 이 상전이는 電流, 溫度 및 磁界를 임계치 이상으로 증가시킴으로 발생하고 이를 트리거라고 한다. 각종 트리거 방식을 비교하면 다음과 같다.

3.1 溫度 트리거^{9), 10)}

이 방식에서는 히터를 사용해서 초전도스위치의 온도를 임계온도 이상으로 증가시킨다. 온도트리거용 히터는 板 모양으로해서 스위치의 둘레에 감거나 초전도체와 꼬아서 설치해서 스위치에서 동시에 상전이가 발생하도록 해야 국부과열에 의한 초전도체의 손상을 막고 동작속도를 빨리 할 수 있다.

초전도체의 性能을 표시하는 지수 중의 하나인 電力密度(= $\rho_n J_c^2 [w/m^2]$, J_c : 임계전류 밀도 [A/m^2], NbTi: $7 \times 10^9 w/m^2$, 10k NbN: $9 \times 10^6 w/m^2$, 16K)가 높은 초전도체를 선택하면 부피가 작은 스위치를 만들 수 있으나, 임계온도나 비열이 너무 높으면 열손실이 과다하게 발생한다. 이 방식의 장점은 구조가 간단하고 다음에 설명하는 자계트리거에 비해 초전도체의 임계자계에 영향을 받지 않는다는 점이다. 그러나 상전도를 만들기 위해서 초전도스위치를 가열하는 동안에는 열결열이 필요하고 초전도상태로 복귀하는 회복시기에는 열전도를

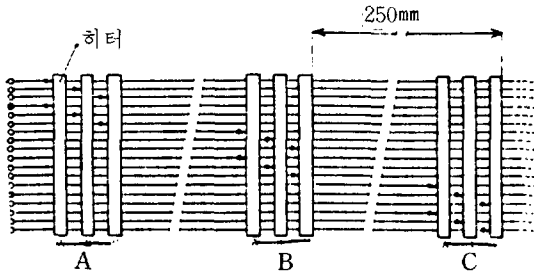


그림 5. 온도트리거 스위치

종게해야 하는 상반된 문제를 안고 있다.

그림 5에서는 피모양의 히터를 9개소에 나누어서 설치했다. 그림에서 橫으로 지나가는 선들은 스위치의 bifilar 권선으로서 히터가 모두 동작한다면 150개소 이상에서 동시에 열이 가해지도록 설계되어 있다.

3.2 磁界트리거^(10, 11)

변하는 자계내에 위치하고 있는 초전도스위치는 상전도상태와 초전도상태를 나타낼 수 있다. 이와같은 원리를 이용해서 초전도스위치에 인접해서 制御用코일을 설치해서 자계를 인가하면 스위치를 트리거시킬 수 있다. 실용상 스위칭동작을 위해서 제어용코일에 의해서 발생하는 자계는 1 Tesla 이하인데 이 값보다 커지면 제어용코일 내의 자기인덕턴스에 의해 동작속도가 늦어진다. 특히 박막초전도 스위치에서는 수백 가우스 정도의 작은 자장에서 시간당의 자계변화율(dB/dt)이 커지게 되어 교류손실에 의한 스위칭작용을 할 수 있다.

자계트리거스위치의 구조는 자기인덕턴스를 작게하기 위해서 그림 2와 같은 bifilar 구조를 갖는다. 트리거시에 발생하는 열은 스위치의 구조, 도체 및 절연물질과 관련이 있고, $0.4 \sim 0.8w/cm$ 이내가 적당하다. 전류가 많이 흐를 때에는 스위치의層간에 큰 힘이 작용하기 때문에 견고하게 지지해야 기계적인 손실과 손상을 막을 수 있다.

스위치에 가해지는 자계의 방향은 수평방향과 수직방향이 있을 수 있으나 수평방향이 효과적이다. 트리거용 자계를 발생시키는 제어코일의 구조는 솔레노이드 혹은 토로이드 구조가 적합하다. 토로이드코일은 스위치를 둘러서 설치할 수도 있고 토로이드코일의 공극에 스위치를 설치할 수도 있다. 솔레노이드코일에서는 중심에 설치하거나, 2개의 同心 솔레노이드의 가운데에 설치한다.

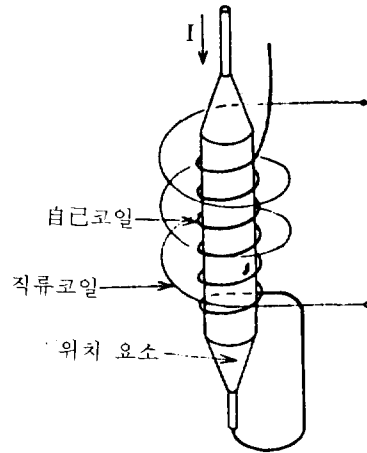


그림 6. 초전도 다이오드

이때 同心 솔레노이드의 한쪽 코일에는 임계자장에 가까운 자장을 발생시키는 직류전류를 흘리고 다른 쪽의 코일에는 교류전류를 흘려서 작은 교류전류에 의해서도 트리거를 시킬 수 있도록 하면 스위칭시간을 단축시킬 수 있다.(그림 16 참조)

그림 6은 다이오드와 유사한 기능을 갖는 자계트리거 초전도스위치(Cryodiode)로서 전류가 한 방향으로만 흐르도록 설계되어 있다. 이 스위치는 스위치, 직류코일 그리고 自己電流코일로 구성된다. 스위치에 흐르는 전류의 방향에 따라서 자계전류에 의해서 발생하는 자계의 방향이 바뀐다. 한쪽 방향의 전류에 의해 발생하는 자계는 직류코일에 의해 만들어지는 자계와 합해지게 되어 임계자계를 넘어 초전도스위치를 상전도로 만든다. 전류의 방향이 바뀌면 두 자계의 방향이 반대가 되어 합성자계는 임계자계 이하이다.

3.3 電流트리거⁽¹³⁾

인덕턴스성분이 없도록 만들어진 초전도스위치의 양단에 전류펄스를 흘리면 이 부분의 전류밀도가 임계치를 넘어서 상전도가 발생한다. 이것이 전류트리거이고 트리거용 전류펄스는 커패시터에 충전된 에너지를 이용해서 만든다.

그림 7은 초전도코일과 초전도스위치를 이용해서 플라즈마 압축용코일에 펄스전력을 공급하는 장치로서, 커패시터에 의한 전류트리거방식을 택하고 있다. 여기에 사용된 초전도스위치는 $NbTi(\rho_n=45 \times 10^{-6} \Omega cm)$ 와

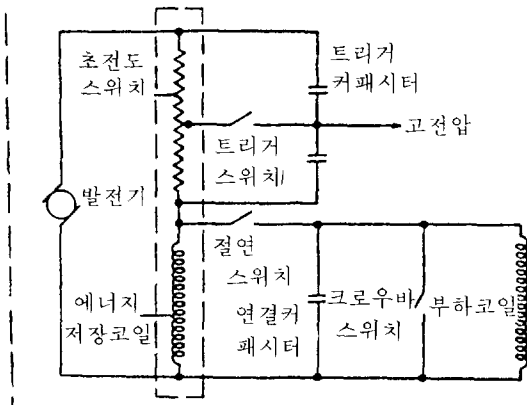


그림 7. 전류트리거스위치와 펄스전력 발생장치

CuNi($\rho_n=13 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$)모재를 사용했다. 그림 7에서 점선으로 표시한 부분이 극저온 용기에 들어가는 초전도스위치와 에너지저장용코일로써 코일의 에너지가 스위치의 동작에 의해서 부하코일로 전달된다.

이와같은 용도로 사용되는 스위치는 동작시간이 극히 빨라야 하고, 수 kV 이상의 유도전압이 스위치요소에 발생하므로 전기절연이 좋아야 할 뿐 아니라 기계적으로도 견고해야 한다. 이에따라 전류트리거스witch는 회복시간이 길고 부피가 커지게 된다. 그림 7의 회로에서 동작시간은 200nsec이고 회복시간은 600sec이므로 작동이 빈번한 곳에서는 사용할수 없다. 스위치의 움직임에 의한 기계적인 손실과 손상을 방지하기 위해 예폭시로 지지했고 지지되지 않은 길이가 1.5mm를 넘지 않도록 했다.

3.4 기타 트리거^{(14), (15), (16)}

여기서는 X-ray, 레이저 및 초고주파에 의한 트리거 스위치를 설명한다. 이들은 온도트리거의 일종으로 생각할 수 있지만 히터에 의해 직접 열을 가하는 것이 아니라 간접적인 방법으로 트리거를 한다는 차이점이 있다.

X-ray 등의 고에너지전자들을 초전도스위치에照射해서 트리거를 시킬 수있다. 그림 8은 X-ray에 의해서 작동하는 초전도스위치를 보인 것으로 스위치가 닫혀 있을 때에는 순환모드로서 영구순환전류가 스위치와 저장용코일을 통해서 흐른다. X-ray가 초전도스위치에 인가되면 X-ray의 에너지에 의해 스위치의 온도가 균일하게 증가하게 되어 상전도상태가 되고 영구순환전류의

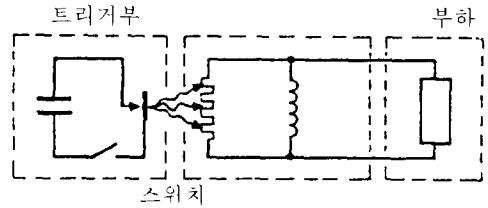


그림 8. X-ray를 이용한 트리거

일부가 부하로 흐르게 된다.

전류를 10^6 A 정도로 흘리기 위해서는, 고자계초전도선의 임계전류밀도가 대략 10^6 A/cm^2 이므로, 스위치가 단면적은 1cm^2 이고 실제 제작된 스위치에서 X-ray가 침투해야 할 깊이는 수 mm이내이다. 따라서 조사되는 X-ray의 에너지는 0.1~1MeV가 되어야 하고 전자빔을 사용할 때는 2~20MeV이다.

레이저와 마이크로웨이브에 의해 동작하는 초전도스위치도 발표되었다. 레이저트리거스witch는 NbN과 NbCN을 사파이어 기판위에 입혀서 만든 것으로 ρ_n 은 각각 $2000 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 에 달했다. 레이저트리거스witch의 동작속도는 수 nsec이고 레이저가 제거된 후 회복시간은 대략 100nsec이다. 초고주파트리거스witch도 Nb와 Nb₃Ge의 박막을 사파이어 기판위에 입힌 것으로 두께는 모두 $30 \times 10^{-9} \text{ m}$ 이다. 이렇게 제작된 시료의 저항은 1k Ω 에 달했고 동작시간은 5nsec이었으나 이는 100psec이내로 줄것으로 기대된다. 주요 용도는 SQUID 등의 초전도전자회로 제어용으로 연구되고 있다.

4. 應用分野

초전도스witch는 동작시간이 수백 sec 이내이기 때문에 속응성이 강조되는 분야에서 특히 필요하다. 초전도스switch를 이용하기 위해서는 스위치를 초전도상태로 만들기 위한 冷却裝置가 필요한 것이 그 경제성을 감소시키는 요인이지만, 초전도응용기기와 같이 사용하면 냉각장치도 공유할 수 있으므로 그 효용성이 더욱 증가된다. 이와같은 점을 고려해서 초전도스switch의 응용분야로 대전력기기의 보호장치와 초전도정류기를 예로든다.

4.1 大電力機器의 保護

전력수요의 절대치가 증가함에 따라 대용량의發電시

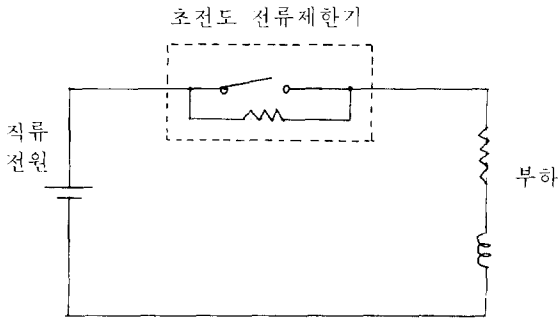


그림 9. 초전도전류제한기를 포함하고 있는 단순화된 전력계통

시스템이 설치되어 가기 때문에 단락사고 발생시에는 큰 短絡電流가 발생한다. 과거에는 전력기기의 과부하여유가 크도록 설계했기 때문에 단시간동안 지속되는 상당한 과부하까지는 자체적으로 감당할 수 있었다. 그러나 단락전류가 커짐에 따라 이와같은 과부하여유를 주는 것이 경제적·기술적으로 어렵게 되고 있다. 또한 현재 사용되고 있는 차단기의 단락용량이 한계치를 어느 수준 이하로 제한해서 차단기의 부담을 경감시킬 필요도 있다.

과부하내력이 종래의 기기에 비해 대단히 작은 초전도기기가 등장하면서부터 과부하에 의한 초전도기기의 퀵치를 막기 위해서 동작속도가 빠른 전류제한장치가 필요하게 되었다. 변압기의 경우를 예로들면 기존의 변압기가 정격전류의 15배의 단락전류까지 견딜 수 있었던 데 비해 알스톰사에서 제작한 220kVA 초전도변압기의 경우는 위의 1/10인 1.5배에 머무르고 있다.

이와같은 문제점의 해결책으로 초전도 전류제한기가 고려되고 있다. 지금까지는 직류송전선로에서 직류전력을 제한하는 용도는 연구되어 왔으며 EPRI의 연구결과에 의하면 550kV 이상에서 경제성을 갖는다고 알려졌다. 그러나 이 수치는 훨씬 낮아질 전망이다.

독일에서 고장전류제한용으로 47kV, 40MW에서 동작하는 초전도전류제한기를 제작했다. 그림 9는 단순화된 초전도전류제한기를 포함하는 직류전력계통이다. 스위치의 총연장은 1000m에 달했고 bifilar식으로 권선했다. 스위치요소로는 NbTi와 CuNi모재를 이용했고, 커패시터를 이용한 전류트리거방식으로서 스위칭시간을 25μsec정도이다.

薄膜초전도스위치는 제어회로등의 저전력용의 스위

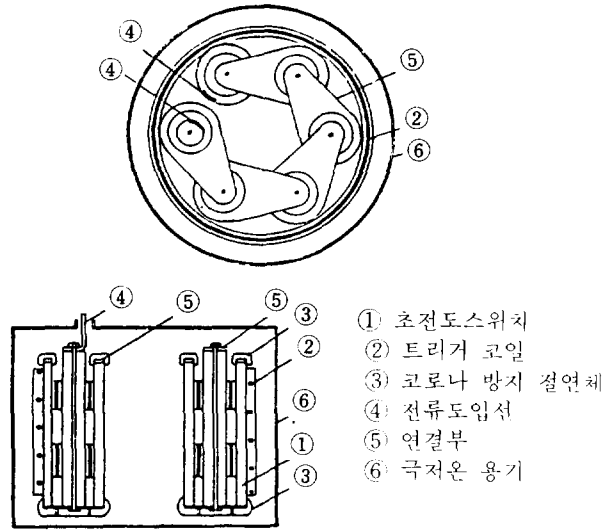


그림 10. 박막초전도체를 이용한 150kV, 2.5kA 초전도스위치

치로 인식되어 왔으나 미국에서는 이 박막초전도체를 이동해서 직류 150kV, 2.5kA를 제한할 수 있는 초전도스위치를 설계했다. 스위치는 그림 3과 같은 원통형박막초전도체를 6개 직렬로 그림 10과 같은 형태이다. 각 스위치요소의 내경은 3cm 외경은 4.5cm 길이는 0.8m이고 스위치전체의 상전도저항은 600Ω이다.

그림 10과 같은 초전도스위치를 이용한 직류전력차단 시스템이 그림 11이다. 선로임피던스 R^* , L^* 와 부하 R 및 직류전원 V 로 구성된 계통에서, 스위치 S_L 을 이용해서 R_L 을 단락시키면 점선으로 둘러싼 초전도스위치 S_0 가 동작해서 R_0 의 상전도저항이 선로에 삽입된다. 선로전류가 전부하전류 i_f 에서 설정전류 i_T 까지 증가하면 초전도스위치가 동작해서 선로전류는 $V / (R^* + R_0 // R_L)$ 을 향해 변하고 커패시터는 충전을 시작한다. 커패시터전압 v_C 가 V 에 접근하면 ($v_C = V$), 스위치 S_L 을 열어 선로를 완전히 차단한다. 그림 12는 이때의 커패시터전압, 선로전류 및 스위치 S_L 의 전압이다. $C = 25\mu F$, $R_0 = 600\Omega$ 및 $R_L = 120\Omega$ 로 잡으면 $t_1 - t_0$ 는 대략 10~15 msec이고 $t_2 - t_1$ 은 30nsec이고 고장지속전류는 1.5kA이다. 결국 초전도스위치의 동작시간은 수 nsec이지만 고장이 발생해서 전류가 완전히 차단될때까지는 60 msec 정도가 걸리는 셈이다.

Supertransductor는 그리드방식의 전류제한장치로서 엄밀한 의미에서 초전도스위치는 아니지만 초전도선을

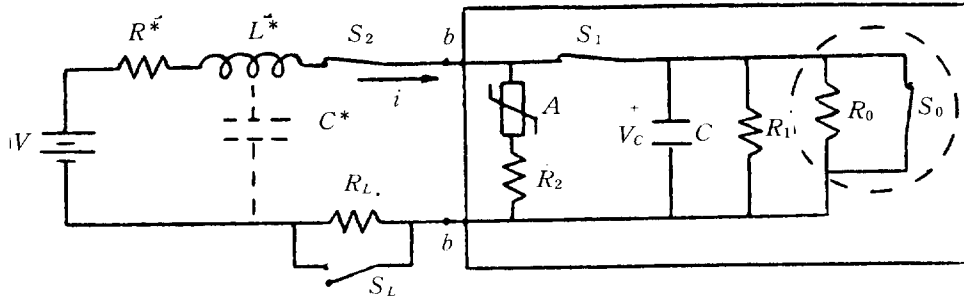


그림 11. 직류송전계통과 초전도스위치

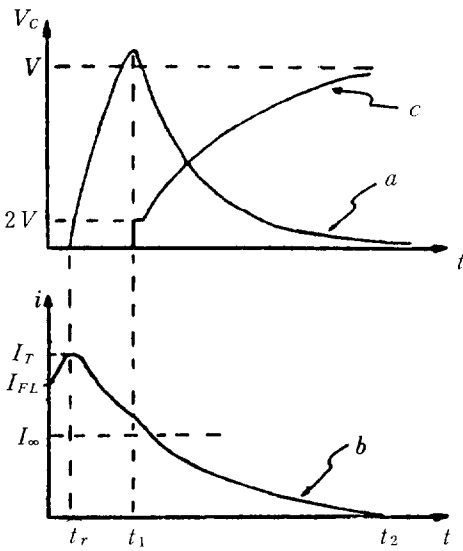


그림 12 고장발생시의 전류·전압파형 a: 커패시터 전압 b: 선로전류 c: S₁의 전압

이용한 전류제한장치이다. 이 방식에서는 선로의 전류가 일정치 이상으로 증가하면 선로의 인덕턴스가 급격히 증가하도록 되어 있다. 그림 13에서 알 수 있듯이 코아를 관통하는 직류전류에 의해 인덕터는 포화상태에서 동작하다가 전류가 설정치이상으로 증가하면 포화상태를 벗어나서 인덕터에 큰 전압강하가 발생해서 전류가 더 이상 증가하는 것을 방지한다. 3상의 경우에는 고장전류의 방향을 고려해서 6개의 인덕터가 필요하다.

영국에서 단상 5MW, 3kV용의 Supertransductor를 제작했는데 이때 직류바이어스용 초전도코일은 폭 1m 길이 4.6m이었다. 현재는 400kV, 3GW용을 제작하고 있는데 여기에 사용되는 인덕터는 직경이 35m이고 바이어스용 전류는 600kA이다.

4.2 超電導整流器

초전도체의 용도 중의 하나는 에너지 저장용코일이다. 초전도코일에 저장된 에너지는 손실이 없이 영구적으로 저장될 수 있고 필요할 때에는 사용할 수 있다. 이 때문에 양수발전소 규모의 대규모 에너지저장장치로 사용될 수도 있고 플라즈마에 이용되는 펄스를 만들기 위한 전원으로도 이용된다. 교류상용전원으로부터 초전도코일에 에너지를 저장하기 위해서는 整流器가 필요하다. 이 정류기에 초전도스위치를 사용해서 에너지저장용 전도코일과 같은 극저온용기에 넣은 것이 초전도정류기이다. 즉 초전도정류기에는 일반 정류기에서 사용하는 천력제어소자인 다이오드를 대신해서 초전도스위치를 쓴다.

1년에 10회 이내로 동작하는 전류제한기와는 달리, 초전도정류기는 교류전원에 의해서 동작하므로 연속적인 스위칭이 요구되고 이에따라 轉流가 극히 중요하다. 즉 轉流時에 발생하는 손실을 극소화 해야 하고 정확한 轉流시기를 택해야 하고, 轉流로부터 회복되는 시간을 짧게해야 동작주파수를 증가시킬 수 있다. 轉流方式으로는 저항을 이용한 방식과 인덕턴스를 이용한 방식이 있다.

페르미연구소에서는 100A, 1H의 초전도정류기를 제작했다. 그림14는 초전도정류시스템의 회로도이고 그림 15는 각부분의 전압, 전류의 파형이다.

스위치의 길이는 2.5cm이고 130개의 필라멘트로 만들어진 540A용 NbTi선을 사용했다. 열트리저용 히터를 초전도스위치와 꼬아서 설치했고, 상전도시의 저항은 0.15Ω이다. Hall검출기로 검출한 정류기의 전류에 의해서 스위치의 동작시점을 결정했다. 정류상의 특징은 변압기의 1차측에 전압이 가해지지 않았을 때, 즉 부하전류가 환류상태에 있을 때에 두스위치의 相轉移를 실시한 것으로, 이는 스위칭시변압기 2차측의 코일에 저장

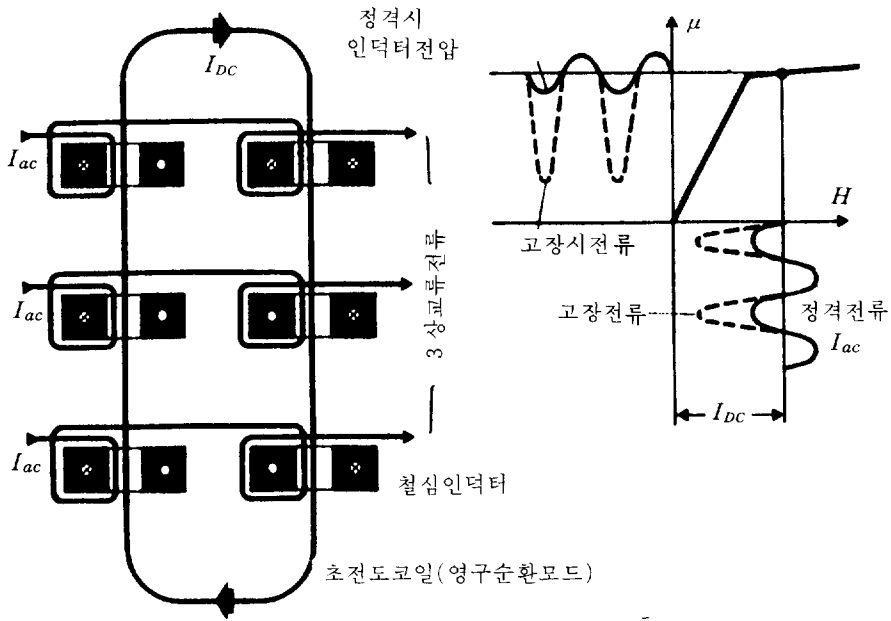


그림 13. Supertansductor를 이용한 전류제한

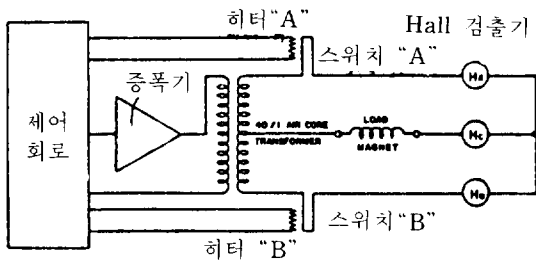


그림 14. 초전도 정류기 시스템의 회로

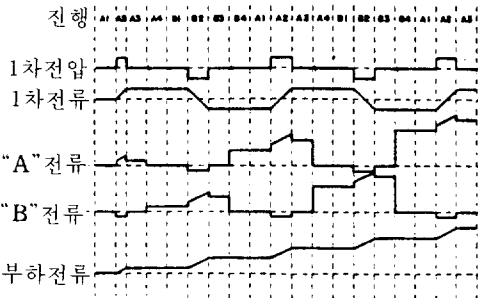


그림 15. 초전도 정류기시스템의 전류, 전압 파형

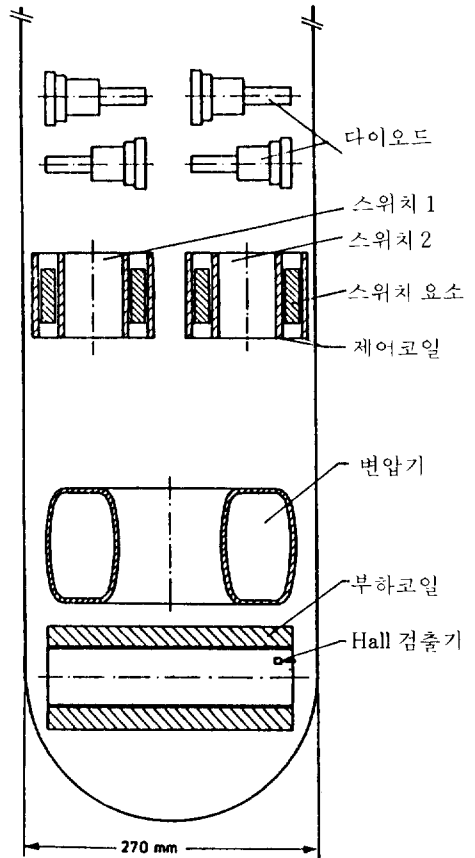


그림 16. 초전도정류기의 단면도

표 2. 스위치정수

	스위치1.	스위치2.
부피[liters]	0.23	0.29
상전도저항(Ω)	0.83	0.69
제어코일인적턴스(H)	0.16	0.21
제어코일전류(A)	40	40

된 에너지에 의한 손실을 줄인다. 이 정류기에서의 종합 효율은 87%이다.

네델란드에서는 이것은 대용량화 시켜서 전류가 1kA, 출력이 500Wd이고 동작주파수가 5Hz인 초전도정류기를 제작했다. 스위치요소는 575개의 NbZr필라멘트를 CuNi 모재에 넣어서 만들었고 트리거방식은 자계트리

표 3. 여러가지 초전도정류기

Type	Switch	$I_{\max, A}$ t_{im}	E_L, J	n, %	f, Hz	L_{load}, H	P_L, W	Input transformer
Full wave, Inductive transfer	NbTi wire Thermal	1200	6480	93	10	9m	<38	8 A/90V 1320:2 air core solenoid
Full wave, Inductive transfer	NbTi wire	650 16 min	1690		0.2	8m		600:3 air core solenoid
Full wave, Inductive transfer	Pb foil 240 $\mu\Omega$, magnetic ac + dc	275-425 300S	<16	75	3-10	180 μm 16m		1544:2 2A, air core solenoid
Full wave, Inductive transfer	Nb ₃ Sn ribbon Thermal 350-500 $\mu\Omega$	1000 350s	<90	<55	0.8-2	180 μm 0.5		1544:2 6.8 A air core solenoid
Full wave, Inductive transfer	NbTi wire Thermal 0.15 Ω	100 50 min	5000	87	0.04		1	40:1 25A/24V air core solenoid
Full wave, Resistive transfer	Pb alloy Magnetic ac + dc	700		71	60		3	250:4 air core solenoid
Full wave, Saturation reactors	Nb tape	500-1000	<225	± 94	5-10		3-18	
Full wave, Inductive transfer	Nb 1% Zr tape $10^{-4}\Omega$ magnetic	8000	2650	80-97	0.5	80 μm 50		10A/20V
Half wave, Resistive transfer	Pb 3.8% Sn 5.5m Ω magnetic	100 15 min	0.75		1.5	150 μm		800:1 air core solenoid
Full wave bridge Resistive transfer	cryodiode magnetic Pb 1% Bi	6.8 35 min	95	27	6	4.1		1000:10 iron core solenoid
Half wave automatic, Resistive transfer	Switching coil Pb or PbSn	34-184 15-20 min			0.2-0.02	0-300m		500:5
Half wave, Resistive transfer	Thermal Nb	1670	10			18 μm		iron core

거이다. 전과정류기의 2개의 스위치를 서로 달리 제작해서 각각의 특성을 비교했고 표 2는 각 스위치의 정수이다. 이 정류기의 종합효율은 전류에 따라 93.5~97.5%이다. 그림 16은 정류기의 단면도이고 그림에서 다이오드는 보호를 위해서 설치했다.

5. 앞으로의 방향

초전도스위치는 동작속도와 회복속도가 μsec 단위로 대단히 빠르고 구조가 간단하다. 이에 따라 초전도스위치는 기존의 차단기에 비해 경제적인 잇점이 있고, 냉각장치도 다른 초전도응용기와 공유할 수도 있다. 따라서 초전도스위치를 전력계통의 고장전류를 제한하는 한류기로 쓸 경우 및 초전도코일에 전력을 공급하는 초전도정류기로 쓸 경우에 매우 효과적이다.

특히 초전도스위치에서는 초전도체의 자계특성이 문제가 되지 않으므로 고온초전도체가 실용화되면 가장 빨리 응용될 수 있는 분야이다. 실제로 일본의 도시바社에서는 세라믹스계의 고온초전도체를 이용한 초전도스위치를 제작했다.

앞으로 이 분야의 연구과제로서는 상전도상태에서 높은 저항율을 갖는 스위치요소의 개발, 자체인 덕턴스를 극소화 시키면서 상전도저항을 높일 수 있는 스위치의 구조연구, 효율을 높일 수 있는 트리

MAG-19, No. 3, May, 1983, pp. 1059-1062

- 4) L. J. M. van de Klundert and H. H. J. ten Kate, "On Fully Superconducting Rectifiers and Fluxpumps. Part 2." *Cryogenics*, May, 1981, pp. 267-277
- 5) G. B. J. Mulder et. al., "Switching Multifilamentary Superconductors in Transverse and Longitudinal Fields," 9th Intl. Conf. on Magnet Technology, Zurich, Switzerland, Sep., 1985, pp. 509-512
- 6) A. Ulbricht, "Test Results of a Resistive SC-Power Switch of 40MW Switching Power at a Voltage of 47kV," *IEEE Trans. MAG*, Vol. MAG-15, No. 1, Jan., 1979, pp. 172-174
- 7) O. K. Mawardi, A. L. Gattozzi, A. M. Ferendeci, "High Voltage Superconducting Switch for Power Application," *IEEE Trans. MAG*, Vol. MAG-19, No. 3, May, 1983, pp. 1067-1070
- 8) K. E. Gray, T. Lenihan and J. Tarczon, "Thin Film Superconducting Switches," *IEEE Trans. MAG*, Vol. MAG-15, No. 1, Jan., 1979, pp. 175-177
- 9) H. H. J. ten Kate et. al., "High Current and High Power Superconducting Rectifiers," *Cryogenics*, May, 1981, pp. 291-296
- 10) T. F. Droege, J. R. Purcell and S. R. Wang, "A Slow Cycling Flux Pump Using Digital Control," *IEEE Trans. MAG*, Vol. MAG-11, No. 2, March, 1975, pp. 580-581
- 11) G. B. J. Mulder et. al., "A High Power Magnetically Switched Superconducting Rectifier Operating at 5 Hz," *IEEE Trans. MAG*, Vol. MAG-23, No. 2, 1987, pp. 595-598
- 12) J. Sikkenga, "Operation Modes of Superconducting Rectifiers," 9th Intl. Conf. on Magnet Technology, Zurich, Switzerland, Sep., 1985, pp. 852-855
- 13) J. D. G. Lindsay et. al., "Development of a Superconducting Swich for Magnetic Energy Storate Systems," *IEEE Trans. MAG*, Vol. MAG-11, No. 2, March, 1975, pp. 594-597
- 14) R. W. Schmieder. "Superconducting Swigches Using Radiation Induced Quenching," *IEEE Trans. MAG*, Vol. MAG-11 No. 2, March 1975, pp. 590-593
- 15) T. L. Francavilla et. al., "A Laser Quenched Superconducting Switch for Pulsed Power Applications," *IEEE Trans. MAG*, Vol. MAG-23, Np. 2, March, 1987, pp. 1397-1400
- 16) M. Muck and Heiden, "A Microwave Operated Fast Superconducting Switch," *IEEE Trans. MAG*, Vol. MAG-23, No. 2, March, 1987, pp. 1275-1278

참 고 문 헌

- 1) K. E. Gray, W. Y. K. Chen and R. P. Huebener, "Evaluation of Superconductors for Large Scale Switching of Electrical Power," *IEEE Trans. MAG*, Vol. MAG-13, No. 1, Jan., 1977, pp. 784-787
- 2) K. Grawatsch et. al., "Investigations of the Development of Superconducting Power Switches," *IEEE Trans. MAG*, Vol. MAG-11, No. 2, March, 1975, pp. 586-589
- 3) H. H. J. ten Kate et. al., "Status Report of the Three Phase 25 KA, 1.5KW Thermally Switched Superconducting Rectifier, Transformer and Switches," *IEEE Trans. MAG*, Vol