

전력계통 고장전류 저감을 위한 한류기술 및 초전도 저항형 한류기 개발 동향 분석

이방욱, 강종성, 박권배, 오일성
LG산전 전력연구소

Abstract: For limitation and interruption of short circuit currents from low voltage to extra high voltage applications, the electrical equipment including fuses and circuit breakers, are widely used today. But in order to anticipate increasing needs for effective and competitive device for limiting the growing fault current in electrical power systems, fault current limitation technologies and fault current limitation devices are widely introduced and investigated in these days.

Furthermore, the applications of high temperature superconducting materials (HTSC) into the current limiting devices are new approach for developing of novel and effective current limitation electrical equipment.

In this research, the necessities of current limitation technology and the developed and developing current limitation devices for power systems are introduced.

Finally, the investigation of resistive type fault current limiters which is under development by LG and KEPCO were introduced

Key Words: high temperature superconductor, Fault current limiters, YBCO, quench characteristics

1. 서 론

최근 전력수요의 폭발적인 증가에 따라 전원설비와 송변전계통의 지속적인 증설이 이루어져 전력계통의 등가임피던스는 점점 작아지고 있다. 이로 인하여 전력계통 사고 발생시 고장전류의 크기는 계속 커지고 있는 실정이다.

특히 우리나라의 경우 외국에 비하여 송전선로가 상대적으로 짧고, 변전소간을 연결하는 연계 송전선로가 망상형태(Mesh Network)로 되어 있어 송전계통의 고장전류가 기존 차단기의 차단내력을 상회하는 변전소가 많이 나타나고 있다. 고장전류가 차단기의 차단내력을 상회하게 되면 고장발생시 고장전류를 안정적으로 차단할 수 없게 되어 차단기는 물론 인접 전력설비까지 사고가 파급될 수 있다.

전력계통에서의 한류기(Fault Current Limiters)의 역할은 계통사고로 인한 고장전류 발생시 부스바(busbar), 애자, 차단기 등에 가해지는 기계적, 열적, 전기적 스트레스를 제한시키는 것이다. 하지만 실제적으로 계통에 적용 가능한 한류기술의 개발은 기술적 어려움과 상업화의 난점으로 인해 지연되어 왔다

그러나 고온 초전도체가 발견되면서, 이 새로운 소자의 비선형적인 전압-전류 특성을 적용한 한류기의 개발가능성이 대두되었으며, 1986년부터 액체질소를 냉매로 사용하는 고온초전도 한류기 개발이 본격적으로 시작되었다.

세계 유수 전력기기 메이커에서도 경쟁적으로 초전도 한류기 개발에 뛰어들고 있으며, 향후 10년 내에 전력계통에 실적용 가능한 한류기 개발이 이루어지리라 예상하고 있다[1,2,3]. 이에 부응하여 국내에서도 초전도 한류기 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[4,5,6].

비단 초전도 기술뿐만 아니라 새로운 한류 소자 및 한류 기술을 적용한 전력기기에 대한 연구도 활발히 진행되고 있는 것으로 보아 향후 고장전류 억제 기술에 대한 요구가 급증하리라 예상된다.

본 논문에서는 우선 고장 전류 제어를 위한 한류기의 필요성에 대해 언급하고, 이어서 고장전류 제어를 위해 개발된 한류기

술에 대한 소개 및 새롭게 대두되고 있는 고온 초전도체를 이용한 초전도 한류기 개발에 관해 다루고자 한다.

또한 현재 LG산전과 한전연구원에서 공동 개발하고 있는 초전도 저항형 한류기 개발에 관하여 LG산전에서 수행하고 있는 연구 활동을 중심으로 간략히 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 계통 고장전류 제한의 필요성

전력계통에서 사고가 발생하면 평상시 통전 전류의 수십 배 이상의 단락전류가 계통에 유기되어 관련 설비 및 전력기기에 심각한 손상을 야기하게 된다.

단락 전류 발생에 의해 전력설비가 받게 되는 심각한 스트레스는 다음과 같다.

- 전자기적 영향 : 전류가 흐르는 도체에서 인접한 곳에는 유도 자계가 항상 존재하는데, 대규모의 고장전류 발생시에는 그 영향이 심각하여, 주변 전력기기 및 전자기기의 작동에 교란을 줄 수 있다.

- 기계적 영향 : 전류가 흐르는 도체에서 인접한 거리에 다른 도체 또는 통전로가 존재하면 상호간에 힘을 받게 되며, 통전 방향이 서로 같은 경우에는 인력 및 반대 방향일 경우에는 척력이 발생하는데 고장전류 발생시는 그 영향이 심대하여 전력기기 구조물의 손상 및 파괴를 가져올 수 있다.

- 열적 영향 : 단락전류가 발생하면 통전 도체에 급격한 단열 온도 상승이 초래되어 기기 손상이나 절연물 파괴가 유발된다.

위와 같은 영향으로 인하여, 가능한 한 빠른 시간에 효과적으로 고장전류를 억제하고 차단할 수 있는 기술 개발이 반드시 필요하다.

2.2 단락전류 제한법

그림 1은 단상 교류회로에서 단락전류 발생시 계통에 미치는 영향을 등가 회로로 나타낸 것이다. 이 회로에서 보면 단락전류의 크기는 회로변수인 U_0 , 임피던스 Z_s ($Z_s = R_s + jX_s$), 사고각에 의해 결정된다.

그림 2는 그림 1의 회로에서 발생하는 단락전류 형태를 보여주고 있다. 단락전류를 제한하는 가장 확실하고 전통적인 방법은

고임피던스 Z_s 를 삽입하는 것이다. 이를 응용한 기술이 저압과 고압 차단기에 범용적으로 사용되고 있다. 하지만 아크 차단을 위주로 하는 상기 방법은 사고전류의 다른 한류 대책이 마련되지 않으면 그림 2의 t_3 지점까지 고장전류에 의한 영향이 지속되게 되어 사고 파급효과가 상대적으로 크며 차단도 어렵게 된다.

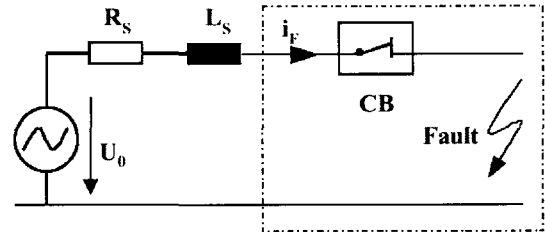


그림 1. 전력계통 단락모의 등가회로

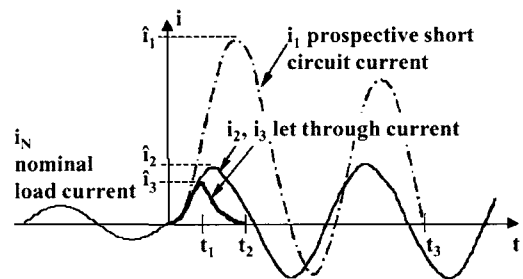


그림 2. 단락전류 파형

전류 제한을 한다는 것은 사고 시 통과하는 단락전류의 크기 및 통과시간을 예상 단락전류치에 비해 최소로 한다는 것을 의미한다. 그림 2에서 보면, 첫 번째 전류 피크치인 i_1 을 제한하기 위해, 한류기는 t_1 시간 이내에 동작하여 전류 상승률 $\frac{di}{dt}$ 를 0 또는 그 이하로 낮추어야 하는 것이다.

이를 가능케 하기 위해서는 회로의 유도 리액턴스 L_s 를 영으로 만들어 주어야 하는데, 이를 위해서는 전원 전압에 상응하거나 더 큰 적절한 전압강하 유발장치가 삽입되어야 한다.

그러한 작용은 비선형적 특성을 갖고 있는 소자의 계통 삽입 또는 적절한 한류기술의 적용에 의해서만 가능하다. 한류 작용후 전류가 제한만 되느냐(i_2) 아니면, 완전히 소멸시키느냐(i_3)에 따라 한류방식 및 차단

기 및 보호계전기와의 조합에 의해 선택된다.

저압차단기에 적용되는 방식은 접점간의 전자반발 및 arc splitter를 이용하여 아크 방전에서 전압강하를 일으키는 방식을 주로 사용하지만, 고압이나 초고압 차단기에서는 한류를 위해 필요한 전압강하치가 저압에 비해 너무 크므로 그림 3과 같이 전류를 적절한 한류 임피던스를 갖는 소자로 분류하는 방식이 쓰인다.

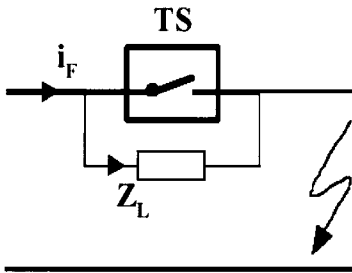


그림 3. 임피던스 병렬 삽입에 의한 한류법

이때 한류 소자로서는, 저항, 인덕터, 커패시터 등이 사용될 수 있다. 하지만 소자 자체가 비선형적 특성을 가져야 하며, 차단기가 완전 회복할 때까지 충분한 시간지연이 필요하다는 점, 차단기에서 한류소자로의 빠른 전류 전이 등, 실용화하기에는 많은 기술적 난관이 따른다.

근래에 들어 PTC (Positive Temperature Coefficient) 특성을 갖는 세라믹이나 폴리머를 응용하여 한류소자로 저, 고압 차단기에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있으므로[7,8], 머지않아 PTC를 차단기와 병렬 연결하여 고장전류 한류 및 차단이 가능한 제품이 출시되리라 사료된다.

그림 3과는 달리 한류소자를 직렬로 차단기와 연결하여 사용하기 위해서는 한류소자의 높은 비선형 특성이 요구된다. 1986년 액체 질소를 냉매로 사용하는 고온 초전도체가 개발되어 이를 응용한 한류기술 연구가 본격적으로 시작되었다.

고온초전도 한류기는 계통상에서 사고를 감지하면 빠른 시간 내에 퓨즈 역할을 수행하여 사고전류를 제한하는 역할을 한다. 또한 고장전류 저감 후에는 다시 초전도상태로 전이하는 특성을 가지고 있다. 상기 특성을 갖는 초전도 한류기에 대하여, 대표적으로는

저항형, 유도형, 하이브리드형 등의 여러 가지 다양한 형태의 한류기가 제안되어 연구개발 중에 있다.

다음 장에서는 한류 기술로 새롭게 대두되고 있는 초전도 응용 한류기술에 대해 저항형 한류기를 중심으로 소개하고자 한다.

3. 초전도 응용 한류기

3.1. 초전도 기술 한류기 적용

초전도 물질은 높은 비선형적인 저항 특성을 가지므로 한류소자로서의 응용 가능성을 갖고 있다. 하지만 액체 헬륨(4K)을 냉매로 사용하는 초전도 응용 한류기는 엄청난 냉각비용 및 제작의 난이함으로 말미암아 연구가 지지부진하였으나, 액체질소(77K)를 냉매로 사용가능한 초전도 물질이 개발됨에 따라 초전도 성질을 응용한 다양한 초전도 응용 한류기가 소개되고 있다. 현재 전 세계적으로 20여개의 초전도 한류기 개발 프로젝트가 국가 및 산업체 주도하에 진행되고 있는 중이다. 초전도 한류기에 적용되고 있는 고온 초전도 물질은 크게 두 가지이다.

- 필라멘트, 벌크형태: Biscco 2212, Biscco 2223

- 박막 형태 : YBCO123

초전도 상태에서 상전도 상태로의 켄치 특성을 이용하여 높은 저항을 발생시켜 계통에 삽입하여 원하는 고장전류 제어를 가능케 하는 방식으로서는 현재까지 저항형 한류기, 유도형 한류기, 복합형 한류기 등이 제안되고 있다.

3.2. 저항형 한류기

초전도 한류기 개념을 가장 적절하게 응용한 형태가 저항형 한류기로서, 저항형 한류기는 사고감지- 스위치 - 한류소자가 모두 초전도체내에서 이루어진다.

초전도 한류기를 회로 내에 삽입. 최대 부하전류를 I 이라 하면, 한류기는 2I 또는 3I의 임계전류를 갖게끔 설계되어, 단락사고시 고장전류가 초전도체를 흐르게 되면 초전도상태에서 저항성 상태로 상태변이가 일어나고 회로저항 R이 나타나게 되어 고장전류를 원하는 만큼 한류하게 된다. 저항상태의 초전도체는 크리거 코일로서도 사용가능하

여, 고장 전류를 저항이나 인덕터를 통해 흐르게 할 수 있다.

초전도 저항형 한류기의 가장 큰 특징은 구조가 간단하며, 유도형에 비해 무게 및 비용 면에서 유리하다는 것이다. 다만 한류작용 시 열점(hot spot) 발생 문제, 초전도체 제작 기술이 뒷받침돼야 하는 문제가 있으나, 이는 향후 기술적으로 해결 가능하리라 생각된다. 향후 실용성 및 산업응용 면에서 유럽 등지에서는 초전도 한류기 개발 프로그램은 주로 저항형 한류기 개발을 위주로 진행되고 있다(표 1).

표 1. 초전도 저항형 한류기 개발 현황

개발자	국가	실적	재료
Siemens	Germany	100 kVA('97) 1 MVA('00)	YBCO film
ACCEL	Germany	13.6 MVA('02)	BSCCO2212 bulk YBCO bulk
Schneider	France	400 kVA('00) 17 MVA('02)	YBCO bulk
Alcatel	France	400 kVA('01)	BSCCO2212 bulk YBCO film
EA Technology	UK	800 kVA('99)	YBCO bulk
ABB	Switzerland	1.6 MVA('00) 6.4 MVA('01)	BSCCO2212 bulk
LGIS KEPCO	Korea	1.3 MVA('03) 15 MVA('06) 300 MVA('10)	YBCO film

3.3 유도형 한류기

유도형은 역시 초전도체를 이용하기는 하나 사고감지 - 스위치는 초전도체가 담당하고, 리액터는 코일(초전도 혹은 상전도)을 사용하는 점이 저항형과 다르다. 정상 시는 전류가 초전도체를 통해 흐르던가, 혹은 초전도체의 완전 반자성 성질을 이용하던가 하여 코일에 임피던스가 없으나, 사고 시는 초전도체가 퀠치 되어 상기 작용을 못하게 됨으로 인하여 코일에 임피던스(리액턴스)를 발생시켜 전류를 제한한다. 이러한 형태는 다양한 디자인이 가능하고, 저항 성분이 없어 열 발생이 적으며, 한류 초기에 열 충격이 적고, 초전도체 제작이 저항형에 비해 용이하다는 장점이 있다. 반면, 리액터로 인해 부피가 커지고, 추가 리액턴스 때문에 과형변형이 있을 수 있다는 점이 단점으로 꼽힌다.

3.4 복합형 한류기

전자식/유도형을 복합한 한류기도 개발되고 있는데, 이는 반도체 다이오드(혹은 SCR) 브리지 내부에 초전도 리액터와 직류전원을 두어 전류를 제한하는 방식이다. 정상 시는 다이오드를 통해 외부전류가 흐르지만, 사고 시 외부전류가 내부 직류전류를 초과하면 코일을 통과하게 되어 그 리액턴스로 전류를 제한한다. 이 방식에서는 초전도 퀠치가 없고, 사고전류가 초기부터 제한되며, 변형모델에서는 한류기의 전류-전압을 선로와 분리하여 운전할 수 있다는 이점이 있는 반면, 전력전자에 의한 손실과 저저항 내부전원 제작 문제가 있다. 이 방식의 변종으로서 내부 직류전원이 없는 방식, 혹은 1개의 리액터로 3상을 감당하는 방식 등이 일본에서 많이 연구되고 있다.

또한 고속 스위치와 임피던스 소자, PTC 소자를 초전도 저항형 한류기와 복합적으로 구성하여 사용하는 Hybrid형 초전도 한류기도 연구되고 있다[9](그림 4).

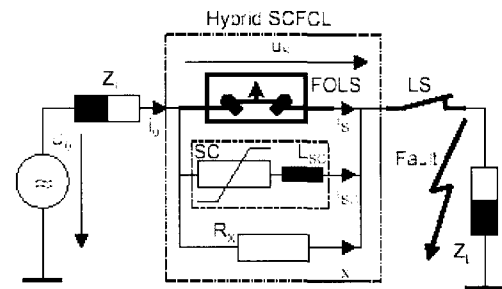


그림 4. ETH Zurich 대학 개발 하이브리드 FCL

4. 저항형 초전도 한류기 국내 개발 현황

4.1 YBCO 박막형 저항형 한류기 개발

현재 LG산전과 한전전력연구원에서는 YBCO 박막 소자를 한류소자로 이용하는 저항형 한류기 개발 연구를 수행하고 있다. 2003년 1단계 개발목표 6.6kV/200A급 초전도 한류기이며 2010년 과제 완료시에는 154kV/2000A급 한류기 개발을 목표로 하고 과제를 진행하고 있다.

저항형 한류기는 고장 전류 발생으로 인하여 초전도 소자가 감당할 수 있는 임계전류를 넘게 되면 초전도에서 상전도로 급격하게 전이하는

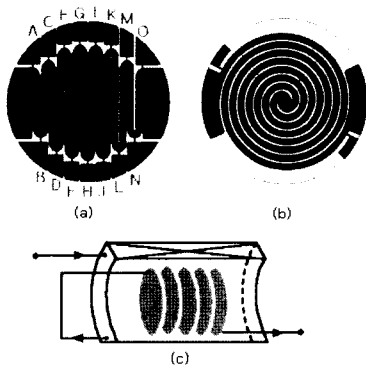
퀵특성을 이용하는 기기로서, 사고전류가 흐르는 경우 주열 발열로 인하여 초전도 소자가 퀵되어, 선로에 수 ms 이내에 수십 옴의 저항을 발생하여 신속하고 효과적으로 사고전류를 제한하는 역할을 수행한다. 또한 정상상태에 임피던스는 0이므로 손실이 없으며, 사고종료 후 초전도 상태로 전환하는 우수한 특징을 가지고 있다.

하지만 한류소자에 열 발생시 적절한 열 분산 방안, 용량 증대를 위한 직병렬 방안, 필요 저항 발생방안, 단위 한류소자의 최적 설계, 한류소자간의 연결 방안 등이 실제품 제작 시 문제점으로 지적되고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 우선적으로는 저항형 한류기에서 초전도 소자의 통전로로 사용되며 퀵 시 저항역할을 수행하는 전류 통전 path design 연구, 직병렬 연결 및 자기장 인가를 통한 동시퀵 방안 연구 등이 활발히 수행되고 있다.

현재 LG산전에서는 YBCO 박막형 한류기의 전압등급 향상을 위해 직렬 연결하는 경우에 발생하는 문제인, 특정 한류소자에 열이 집중으로 인한 소손되는 것을 해결하기 위한 연구, 3차원 전자계 해석 연구, 초전도 한류기 모델링 및 설계에 관한 연구 등을 수행하고 있다. 전압등급 향상을 위한 동시퀵 방안으로서는 박막에 수직방향의 솔레노이드 자기장을 이용하여 한류소자의 퀵특성을 실험적으로 연구하고 있다.

그림 5는 현재 연구 개발중인 YBCO 박막형 한류소자의 전류 통전 패턴과 솔레노이드 코일을 이용한 자기장 인가법을 보여주고 있다.



(a) Meander (b) Bi-spiral (c) 자기장 인가도
그림 5. YBCO 박막형전류 통전 패턴



(a) Meander



(b) Bi-spiral

그림 6. YBCO 박막 패턴별 전위 및 자속밀도 분포

그림 6은 YBCO 박막 패턴별 전위분포 및 자속밀도 분포를 보여주고 있다. 이외에도 2,3차원 전자계해석을 통하여 최적 박막 패턴을 결정하기위한 연구를 진행하고 있다.

그림 7은 YBCO 박막 시편을 액체질소 냉매를 사용하는 cryostat에 넣고 외부 자기장을 인가하여 1.2kV/20A급 한류특성 시험을 수행한 결과를 보여준다.

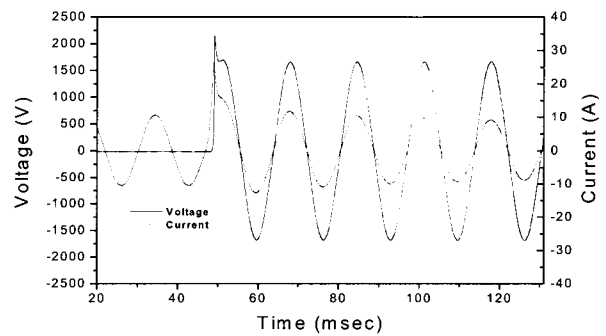


그림 7. 1.2kV/20A 초전도 한류기 특성 파형

자기장을 초전도체에 수직으로 인가하여 초전도 퀵특성 및 한류특성 시험을 통하여, 그림 7에서 보는 것처럼 단락전류가 수 ms 내에 한류되어 고장전류가 상당히 저감됨을 확인할 수 있었다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 계통 영향을 최소화하며, 동시 퀵을 효과적으로 구현하기 위한 자기장 인가 방식을 다각도로 연구 중에 있다.

4.2 버블 촬영을 통한 동시퀵 연구

YBCO 박막소자에 임계전류 이상의 전류가 흐르면 박막소자는 초전도상태에서 상전도 상태로 전이되는 퀵현상이 발생하여 퀵된

박막소자 내 저항값이 급격히 증가하게 되므로 전류는 제한되고 박막소자내부에 줄열에 의해 기포가 발생하게 된다. 켄치 현상은 일반적으로 단일소자내의 한 영역에서 시작되어 열이 전달되는 방향으로 전파되게 되는데, 본 연구에서는 고속카메라를 이용해 켄치 시 YBCO 박막의 버블 발생 현황을 촬영, 분석함으로써 초전도 박막 패턴에 따른 저항발생 현황, 동시켄치 유무, 자기장 인가 시 효과 등을 검증할 수 있었다.

그림 8은 실제 초전도 한류기용 박막소자 내에서 기포발생을 촬영하는 모습이다. 고속카메라를 이용해 meander 및 bi-spiral 패턴의 박막소자가 초전도상태에 있을 때 기포발생의 유무 및 그 위치를 촬영하고 분석하였다. 또한 자기장 인가시 동시켄치 유무를 확인하기 위하여 자기장 인가시와 비인가시의 버블 발생 패턴 분석을 실시하였다.

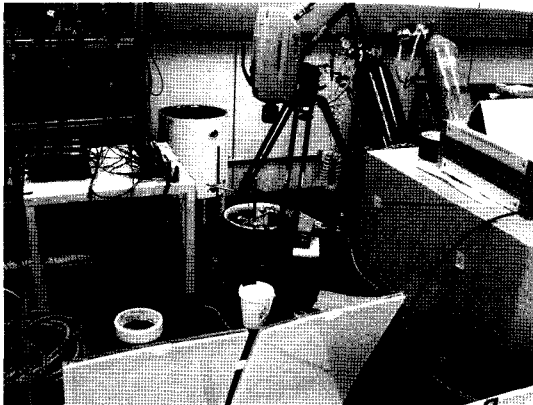


그림 8. 고속카메라를 이용한 기포발생 촬영

그림 9는 meander 패턴으로 제작된 두 개의 서로 다른 박막소자에서 최초 켄치 시 현상을 고속카메라로 촬영한 그림이다.

그림 10은 외부 자기장을 인가하지 않았을 때 (a) meander 패턴, (b) bi-spiral 패턴, (c) 취약점 존재 시 meander 패턴의 기포 발생현황을 촬영한 그림이다. 그림에서 확인할 수 있는 것은 meander 패턴 및 bi-spiral 패턴에서 기포 발생은 YBCO 금 박막뿐만 아니라, 사파이어 기판을 통한 열전파도 상당한 기여를 한다는 것이다. 그리고 자기장 비인가시 YBCO 전영역에서 순시 켄치는 이루어지기가 난이하다는 사실이다.

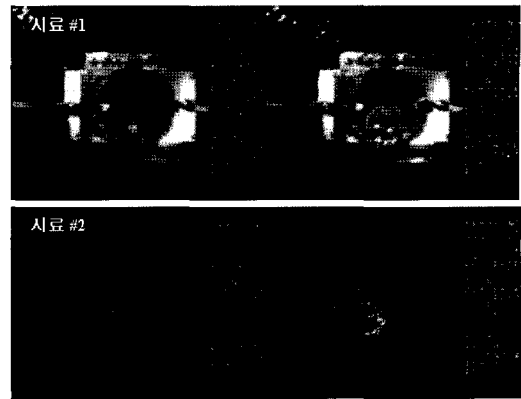
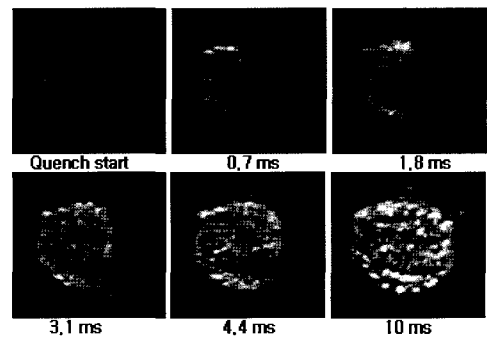
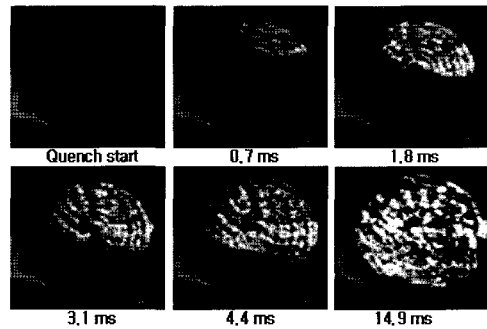


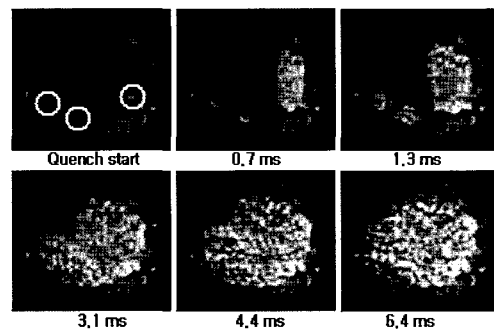
그림 9. meander 패턴에서 최초켄치 촬영



(a)



(b)



(c)

그림 10. 자기장 비인가시 버블 발생 및 진행 관측

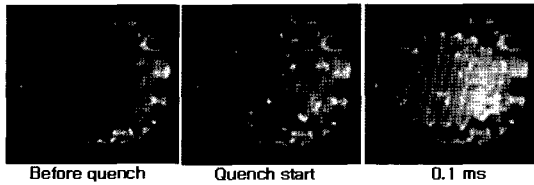


그림 11. 자기장 인가시 버블 발생 및 진행 관측

그림 11은 솔레노이드를 초전도 소자와 직렬 연결하여 고장전류에 의한 외부 자기장 인가시 버블 발생 및 진행사항을 관측한 것이다. 그림 10과 비교하여 보면, 자기장이 없는 경우에는 상대적으로 임계전류밀도 가장 낮은 영역에서 먼저 퀘치가 시작되어 박막 전체 영역으로 전파되었으며 박막의 전 영역으로 전파되는데 걸린 시간은 약 7ms 정도였다. 반면에 동일한 시료에 자기장을 인가한 경우에는 박막의 여러 영역에서 거의 동시에 퀘치가 발생하여 전체 영역으로 퀘치가 전파되는데 걸린 시간은 거의 0.1ms 정도임을 알 수 있다. 이 실험을 통해 자기장을 인가하면 단일 박막소자내의 임계전류밀도의 불균일에 관계없이 거의 박막 전체 영역에서 동시에 퀘치가 진행되는 것을 알 수 있었으며, 이는 국부적인 퀘치로 인한 발열로 인한 동시퀘치 문제를 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 전력계통에서 단락 전류 제어 방안으로 새롭게 제시되고 있는 한류기술 방안에 대하여 다루었다. 저압 및 고압 한류기술로서는 새로운 임피던스 소자를 이용하는 방식, 초고압에 적용가능한 방식으로서는 초전도체를 응용한 한류기술 등을 소개하고, 현재 자사에서 연구 개발중인 초전도 저항형 한류기 연구개발 현황에 대해 간략히 소개하였다.

머지않아 저압에서 초고압에 이르기까지 새로운 한류기술을 적용한 저압에서 초고압 분야까지 차단기가 상용화 될 것으로 예상됨에 따라 국내에서도 전력기기에 적용 가능한 한류기술에 대한 연구, 한류 소자에 대한 연구, 초전도 한류기용 소자 연구 등이 배가되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Makan Chen et al., "6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi-2212 superconductor", EUCAS 2001, Copenhagen
- [2] B. Gromoll et al., "Resistive current limiters with YBCO films", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.7, No. 2, 1997
- [3] H. Kubota et al., "A new model of fault current limiter using YBCO thin film", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No. 2, 1999
- [4] 임대준, 고태국 et al., "DC 리액터형 고온 초전도한류기의 전력계통 연계를 위한 자기철심 리액터의 설계", 한국초전도 저온공학회 2002년도 학술대회 논문집, pp.322~325
- [5] 최효상 et al., "1.2kV/70A급 초전도 한류기의 전류제한 특성", 한국초전도 저온공학회 2002년도 학술대회 논문집, pp.368~370
- [6] 박권배, 이방욱 et al., "자기장이 인가된 YBCO 박막형 한류기의 퀘치 특성", 한국초전도 저온공학회 2002년도 학술대회 논문집, pp.365~367
- [7] Willian Chen, "Current commutation in arcless interruptions with PTC", IEEE pp. 141~147
- [8] R. Strumpler et al., "Novel medium voltage fault current limiter based on polymer PTC resistors", IEEE Trans. on PD, Vol.14, No. 2, 1999 pp.425~430
- [9] Walter Halaus et al., "Ultra fast switches", IEEE 2002, pp. 299~304

저자이력



이방욱(李昉昱)
1968년 6월 20일생, 1991년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 박사과정 졸업, 1998년 LG산전(주) 입사, 현재 LG산전 전력연구소 선임 연구원



박권배(朴權培)
1972년 11월 09일생, 1998년 전남대학교 유전공학과 졸업, 2000년 전남대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 현재 LG산전 전력연구소 연구원



강중성(姜鍾成)
1972년 5월 15일생, 1996년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 LG산전(주) 입사, 현재 LG산전 전력연구소 주임 연구원



오일성(吳一成)
1960년 12월 22일생, 1986년 연세대학교 금속공학과 졸업, 1990년 미시간주립대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 LG산전 전력연구소 책임연구원