

YBCO 박막을 이용한 초전도 한류기의 안정적인 동작조건

論 文

49B-9-4

Stabilized Operating Conditions of Superconducting Fault Current Limiter using YBCO Thin Film

崔 孝 祥* · 金 蕙 林** · 玄 鉦 培***

(Hyo-Sang Choi · Hye-Rim Kim · Ok-Bae Hyun)

Abstract - We fabricated resistive superconducting fault current limiters (SFCL) based on YBCO thin films grown on a 2-inch diameter Al_2O_3 substrate. The current limiting element was 1 mm wide and 260 mm long meander line prepared by standard photolithography. The minimum quench current of the current limiting element was about $8 A_{peak}$. This SFCL successfully controlled the fault current below $14.3 A_{peak}$ at the voltage of $100 V_{rms}$, which is otherwise to increase up to $141 A_{peak}$. The quench completion time was less than 3 msec. The temperature of the current limiting element rose to about 200 K in 3 cycles after fault. The SFCL showed reproducible quench during hundreds times of repeated experiments.

Key Words : Superconducting fault current limiter, YBCO thin film, Quench completion time, Reproducible quench

1. 서 론

최근 전원설비와 송변전 계통의 지속적인 증설로 인하여 전력계통의 등가 임피던스가 작아지고 있기 때문에 전력계통 사고시 발생할 수 있는 고장전류의 크기는 점점 증대하고 있다. 특히 외국과는 달리 우리나라의 경우 송전선로가 상대적으로 짧고, 전력공급의 신뢰성 향상 및 계통운용의 유연성을 위해 계통 변전소간을 연결하는 연계 송전선로가 망상형태 (mesh network)로 되어 있어 계통 사고시 고장전류가 기존 차단기의 차단 내력을 상회하는 변전소가 많아지고 있다. 따라서 고장 발생시 사고전류를 안정적으로 통제할 수 없게 되어 차단기 그 자체는 물론 송전계통상의 전력설비까지 사고가 파급되어 피해가 막대할 것으로 예상되고 있다. 현재 국내 한국전력공사의 경우 주요 송전선로는 154 kV 및 345 kV 선로인 바 (765 kV 선로는 현재 건설중), 차단기의 정격차단 전류는 154 kV 선로의 경우 31.5 kA (Gas Insulated Switchgear, GIS) 및 50 kA, 그리고 345 kV 선로의 경우는 40 kA로 되어 있다. 이렇게 주어진 차단기에 대해 1998년 현재 154 kV 선로의 경우 411 변전소 중 146 개소 (35.5%)에서 차단내력을 초과하고 있고, 그 수는 더욱 증가하는 추세에 있다[1]. 이러한 사고전류를 억제하기 위한 1차적인 방법은 기존 차단기의 차단내력을 높이는 방법이겠으나 이는 기술적, 경제적으로 이미 한계에 도달하고 있다.

그 대안으로 여러 가지 방법이 강구되고 있는 바, 고임피던스 전력설비, 직렬 한류리액터 설치, 계통전압 격상, 계통간 직류연계, 연계선로 분리 및 모선분리가 제안되고 있다. 이중, 모선분리만이 현재 부분적으로 채용되고 있고, 나머지는 기술적, 경제적으로 어려움이 많다. 그러나, 모선분리 역시 인접설비 과부하 발생, 전압변동 심화, 전력공급 신뢰도 및 안정도 저하 등을 감수해야 할 뿐만 아니라 최적 분리를 위한 연구 또한 선행되어야 한다. 따라서 기존 계통을 그대로 유지하면서 고장전류를 효과적으로 억제할 수 있는 방법이 강구되었는데, 고온 초전도 한류기가 좋은 해결방안으로 떠오르면서 전세계 각국에서 활발한 연구가 진행되고 있다 [2-7].

전력계통에서 한류기의 역할은 사고가 발생하였을 때 고장전류의 증대를 억제하고 모선, 절연체 및 차단기가 감당하는 기계적, 열적 부하를 분담하는 것이다. 초전도 한류기는 이러한 역할을 충실히 수행할 뿐만 아니라 평상시 저항이 영이고 구조가 간단한 잇점을 지니는 등 많은 장점을 가지고 있다. 초전도 한류기에 대한 연구는 크게 저항형과 유도형으로 나눌 수 있는데, 박막형으로 대표되는 저항형은 배전급의 응용에 쓰여질 전망이고 자기차폐형등의 유도형은 송전급의 실계통에 적용될 것으로 예상되고 있다.

본 논문에서는 YBCO 박막을 이용한 소용량의 저항형 초전도 한류기를 제작하고 고장전류 발생장치를 통하여 위상각별 고장을 발생시킨 후 사고직후의 quench 및 전류제한 특성을 살펴보았다. 또한 초전도 한류기를 지속적으로 운전하고자 할 때 필수적으로 고려하여야 할 안정적인 동작조건을 찾기 위하여 특성저하 없이 단위소자가 감당할 수 있는 용량을 산출함으로써 향후 배전급 적용을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

* 正 會 員 : 韓 電 力 研 究 院 電 力 系 統 研 究 室 先 任 補 · 工 博

** 正 會 員 : 韓 電 力 研 究 院 電 力 系 統 研 究 室 先 任 · 理 博

*** 正 會 員 : 韓 電 力 研 究 院 電 力 系 統 研 究 室 責 任 · 理 博

接 受 日 字 : 2000 年 6 月 7 日

最 終 完 了 : 2000 年 8 月 21 日

2. 실험 구성

사고전류를 제한하기 위하여 사용된 한류소자는 독일의 THEVA사에서 제공한 직경 2 inch의 박막을 이용하였다. YBCO film은 Al₂O₃ 기판위에 증착되었으며 두께는 300 nm 이고 quench 시 발생하는 hot spot에 대처하기 위하여 200 nm의 금을 in situ로 입혔다. 시편은 quench특성 실험을 반복하기 위하여 그림 1과 같이 정확히 두 부분으로 나누어 제작하였으며 각각 독립된 한류소자로 구성하였다. 이때 각 한류소자의 길이는 26 cm, 폭 1 mm이고 그림처럼 meander 형태로 이루어져 있다. 상온에서 저항값은 43 Ω이고 임계 온도 근방에서는 17 Ω이었다. (그림 3 참조)

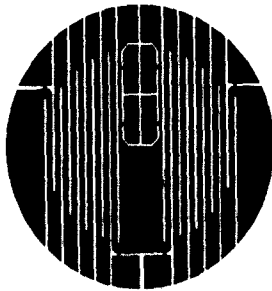


그림 1 초전도 한류소자의 패턴모양
Fig. 1 The pattern shape of superconducting current limiting elements

Quench 및 전류제한특성 측정을 위한 시험 장치를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 V₀는 전원전압이고, 직렬저항 R₀은 전류변화를 측정하기 위한 표준저항이며, 한시동작 접점(timer)은 과전류에 의한 박막의 소손을 방지하기 위한 개폐기이다. SFCL은 저항형 초전도 한류기를 나타내며 분로저항 R₁은 초전도체의 quench시 전류의 우회 및 열을 분산시키는 역할을 하는 gold층의 저항을 모의한 것이다. 한편 R_L은 선로에 취부되어 있는 부하를 나타내며, SW1~SW2는 1선 지락사고와 같은 계통 고장시험을 수행하기 위한 스위치이다. 시험 시스템에 대한 회로방정식은 다음과 같다. 식 (2-1)은 SFCL이 초전도 상태일 때를 나타내고, 식 (2-2)는 SW1이 닫힘으로써 SFCL이 quench 되었을 때를 표시하며, 식 (2-3)은 인가전압이다.

$$V_0 = (R_0 + R_L) i \quad (2-1)$$

$$V_0 = (R_0 + R_F + \frac{R_1 R_{SFCL}}{R_1 + R_{SFCL}}) i \quad (2-2)$$

$$V_0 = V_m \sin \omega t \quad (2-3)$$

회로소자 값은 박막의 임계전류 및 한류특성을 고려하고 최초 quench 조건 및 최종 한류 조건을 감안하여 적절한 값으로 결정하였다. 시스템의 정격전압 V₀는 10~100 V_{rms}/60 Hz까지 변화하면서 가해 주었다. 전류 측정을 위한 표준저항 R₀은 1 Ω, 부하저항 R_L은 정상상태 전류를 조절하기 위하여 5 ~ 27 Ω까지 변화해 가면서 실험하였다. 조정저항 R_F는 임의의 계통사고에 대한 사고전류값을 모의하기 위하여 높은값에서 낮은값으로 조정해가며 실험하였다.

실험 전 과정에서 SFCL 부분은 정상상태 운전시 초전도 상태를 유지해 주어야 하기 때문에 액체질소 속에 잠겨 있도록 하였다.

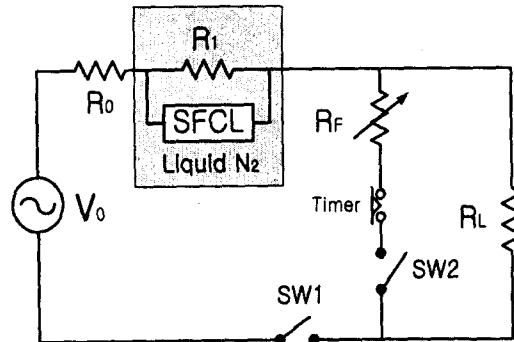


그림 2 초전도 한류기의 전류제한 실험을 위한 회로도
Fig. 2 A current limitation experiment circuit with an SFCL

3. 결과 및 고찰

앞에서도 언급한 바와 같이 박막형 고온 초전도 한류기는 한류소자가 갖는 특성으로 인하여 향후 배전급의 실계통에 적용될 것으로 생각되며, 이때 고려하여야 할 중요한 요소는 계통 고장시 한류소자에 필연적으로 수반되는 열발생에 대한 안정적인 운전조건 도출과 크기의 최소화를 고려한 용량 증대방안이다. 이 중에서 안정적인 운전조건은 초전도 한류기를 실제 운전할 때 계통의 신뢰성 측면에서 확보하여야 할 중요한 요소이다.

그림 3에 임계온도 특성을 나타내었다. 그림에서 초전도 한류소자의 임계온도는 약 87 K임을 알 수 있다. 금박막을 입힌 초전도 한류소자의 저항은 초전도체와 금박막이 병렬로 합성된 저항값인데 임계온도 이하에서는 초전도 상태이므로 초전도 한류소자의 저항은 초전도체의 저항인 영(zero)이다. 임계온도 이상의 온도에서는 초전도체가 quench되어 저항을 가지는데 금의 비저항이 초전도체의 비저항보다 훨씬 작으므로(약 1 %) 초전도 한류소자의 저항은 금박막의 저항과 거의 같다. 이러한 특성은 초전도 한류소자의 quench 시 발생한 저항을 온도로 환산하는데 활용할 수 있다.

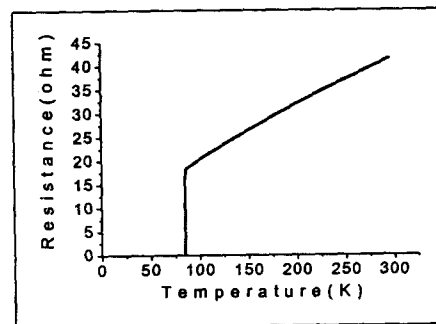


그림 3 초전도 한류기의 저항 대 온도특성 곡선 (시편의 길이 : 26 cm)

Fig. 3 The resistance versus temperature curve of the SFCL (The length of sample : 26 cm)

그림 4에 사고모의 위상각 0° 에서 초전도 한류소자가 quench되는 시점의 전압발생곡선 및 전체전류 변화값을 보여준다. 이때 인가전압 V_0 는 20 V_{rms} 이고 부하저항 $R_L=5\ \Omega$, 조정저항 $R_F=4.1\ \Omega$ 이었다. 고장전류 8 A_{peak} 에서 한류소자에 약간의 전압값이 발생하는 것으로 보아 최초로 quench가 발생하는 것을 알 수 있다.

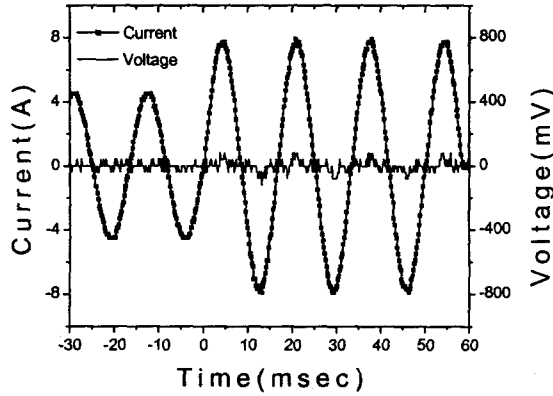


그림 4 최소 켄치 전류에서의 파형
Fig. 4 The waveforms at the minimum quench current

그림 5는 사고모의 위상각 0° 에서 인가전압 $V_0=30\text{ V}_{\text{rms}}$ 를 가지고 부하저항 $R_L=7.1\ \Omega$, 조정저항 $R_F=3.1\ \Omega$ 으로 하였을 때 전류 및 전압발생 특성을 보여준다. 초전도 한류소자가 최초로 quench되는 시점인 8 A_{peak} 부근(그림에서 \rightarrow 모양으로 표시한 부분)에서 전압이 발생하고 약 1주기에 걸쳐 일시적으로 회복되었으나 발생된 열에 의하여 점진적으로 quench가 확산되는 모습을 관찰할 수 있다. 즉, 한류소자 내에서 아직 완전한 quench가 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 이때 예상 사고전류는 약 $10.3\text{ A}_{\text{peak}}$ 이었다. Quench된 부분에서 발생한 열은 전류값이 영이 되었을 때 충분히 냉각되지 않고 있어 반복된 열발생이 전면 quench를 유도하고 있다.

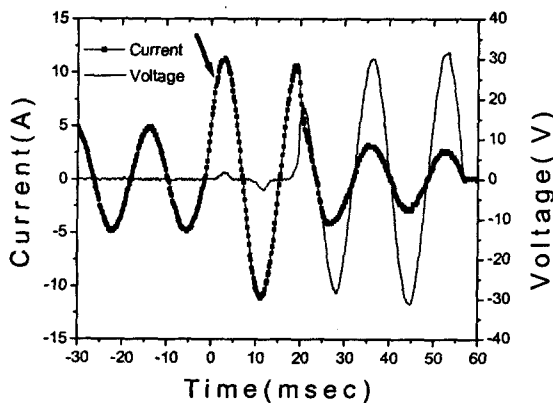


그림 5 인가전압 30 V_{rms} 에서 전류 및 전압 파형
Fig. 5 Current and voltage waveforms at 30 V_{rms}

그림 5의 그래프에 대한 저항발생 및 소비전력을 그림 6에 나타내었다. 사고직후 1주기 동안에는 저항이 발생하였다가 사라지고 소비전력도 상대적으로 적었으나 점차 저항발생이 두드러지는 모습을 관찰할 수 있다. 즉, 인가전압이 아직 시편 전 영역에서 동시에 quench를 발생시킬 만큼 충분히 크지 않았다. 또한 그림에서 3주기 이후의 저항값은 약 $12\ \Omega$ 정도이다. 한류소자의 저항값이 90 K 에서 약 $17\ \Omega$ 임을 감안하면 아직 완전한 quench가 이루어지지 않았음을 알 수 있다.

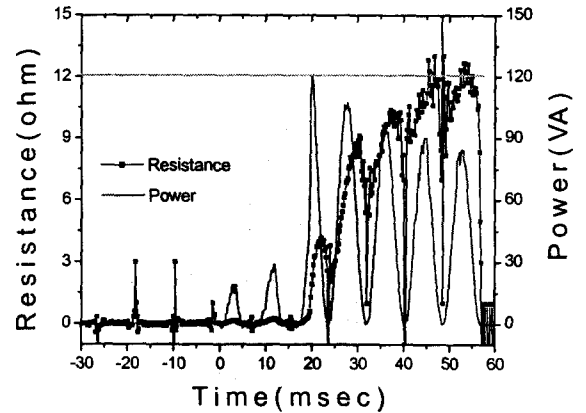


그림 6 인가전압 30 V_{rms} 에서 저항 및 소비전력 파형
Fig. 6 Resistance and power waveforms at 30 V_{rms}

그림 7은 사고모의 위상각 0° 에서 인가전압 $V_0=100\text{ V}_{\text{rms}}$, 부하저항 $R_L=27\ \Omega$, 조정저항 $R_F=0\ \Omega$ 으로 하였을 때 전체전류 및 한류소자의 전압발생 곡선이다.(예상 사고전류값 : $141\text{ A}_{\text{peak}}$) 사고발생 후 약 3 msec만에 quench가 완료되었으며, 전류가 최고 $14.5\text{ A}_{\text{peak}}$ 까지 상승하였다가 약 3주기 후에는 5 A_{peak} 까지 감소하는 것을 볼 수 있다.

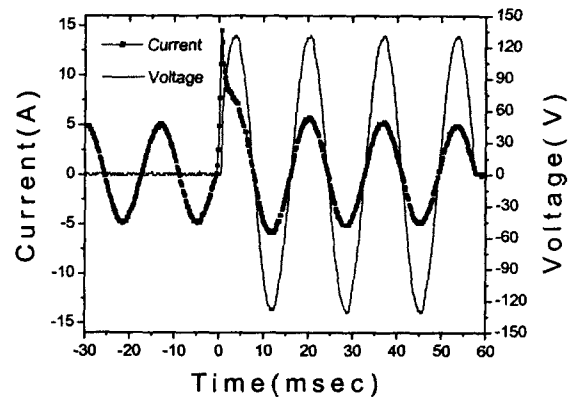


그림 7 인가전압 $100\text{ V}_{\text{rms}}$ 에서 전류 및 전압 파형 (사고모의 위상각 0°)
Fig. 7 Current and voltage waveforms at $100\text{ V}_{\text{rms}}$ (fault angle 0°)

그림 8은 그림 7의 시편에 대한 저항발생 및 소비전력 특성곡선이다. 계통사고가 발생하였을 때 저항형 초전도 한류기의 안정적인 운전을 위해서는 한류소자가 초전도-상전도 전이를 여러번 수행하더라도 특성의 변화가 발생하지 않아야 한다. 이를 실현하기 위한 핵심적인 요소는 초전도 한류소자의 상전이시 최고온도가 일정온도를 넘지 않는 범위에서 운전하면 된다. YBCO 초전도체는 약 100 °C(=373 K)이내에서 성질이 변하지 않는다고 알려져 있다. 그러나 quench에 의한 급격한 온도변화에 의해 기계적 스트레스가 가해지기 때문에 실용적인 적용을 위하여는 그보다 낮은 온도까지만 허용될 필요가 있다. 현재 가장 적절한 최고온도는 세계적으로 연구된 바는 없으나 위의 문제점을 고려하면 박막온도 상승이 평균 200 K까지는 안전함을 확인하였다.

한류소자의 저항값이 90 K에서 약 17 Ω, 300 K에서 43 Ω임을 감안하면 200 K은 약 31.5 Ω이 되며 그림 8에서 사고후 3 cycle되는 지점에서 200 K에 도달하는 것을 알 수 있다. 그림 1의 voltage 뿔 양단의 각 meander 선에 대한 국부적인 온도는 실험에 의하여 약 ±2.5 Ω의 차이가 발생함을 확인하였기 때문에 그림 8과 같이 29 Ω을 기준으로 bar 형태로 표시하였다[8]. 실제로 시편의 특성저하를 확인하기 위하여 같은 조건에서 사고발생을 약 100회 이상 실시하였으나, 결과는 그림 8과 정확히 동일하였고 따라서 한류소자의 특성변화는 없었다.

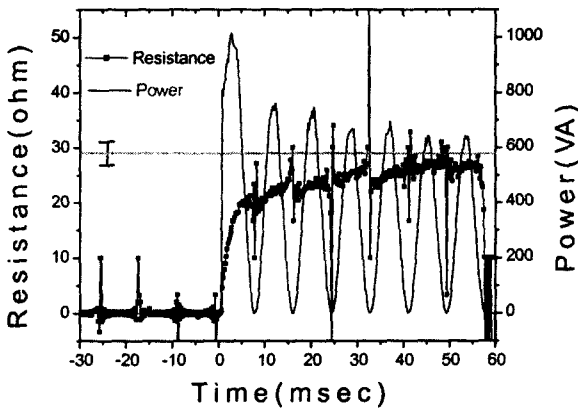


그림 8 인가전압 100 V_{rms}에서 저항 및 소비전력 파형 (사고모의 위상각 0°)
 Fig. 8 Resistance and power waveforms at 100 V_{rms} (fault angle 0°)

그림 9~12는 그림 7과 같은 조건에서 사고모의 위상각을 45°와 90°로 하였을 때 전기적 특성을 나타내고 있다. 회로에 흐르는 전체전류, 한류소자의 전압 그리고 발생저항은 위상각에 따른 시작점의 차이 이외에는 거의 비슷하다. 그러나 소비전력 곡선에서 특징할 만한 사항으로써 위상각이 증가할수록 초기값이 1,013 ~ 1,845 VA까지 분포한다. 사고모의 위상각 0°에서는 사고 직후 초전도 한류소자가 피크전류값에 도달하는 동안 quench가 진행되어 발생하는 저항값에 의하여 초기 피크전류값이 낮다. 그러나 사고모의 위상각이 45°, 90°로 증가하면 사고직후 quench에 따른

저항발생이 시간이 상대적으로 작아지기 때문에 피크전류값이 증가하게 된다. 특히 90°에서는 저항발생시간이 거의 없기 때문에 초기 피크전류값이 최고값에 도달하게 된다. 따라서 P=VI로 표현되는 소비전력의 초기값도 사고모의 위상각에 따라 증가하게 된다. 즉, 사고모의 위상각이 증가할수록 이는 국부적인 열발생에 의하여 한류소자에 미치는 순간충격이 사고모의 위상각 90°에서 가장 큼을 의미하며, 사고순간에 사전 quench 과정을 거치지 않은 상태에서 상대적으로 높은 전류가 순간적으로 한류소자에 인가되었기 때문에 해석된다.

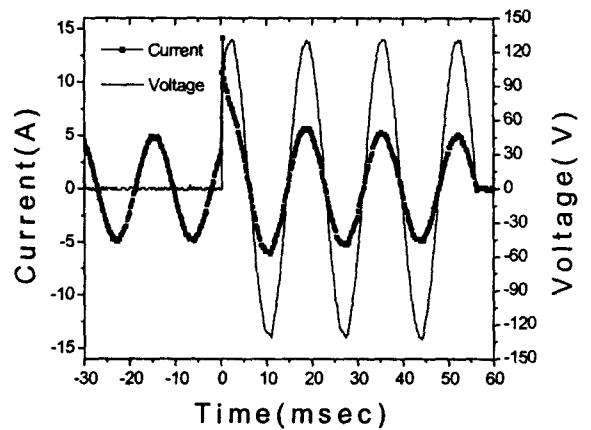


그림 9 인가전압 100 V_{rms}에서 전류 및 전압 파형 (사고모의 위상각 45°)
 Fig. 9 Current and voltage waveforms at 100 V_{rms} (fault angle 45°)

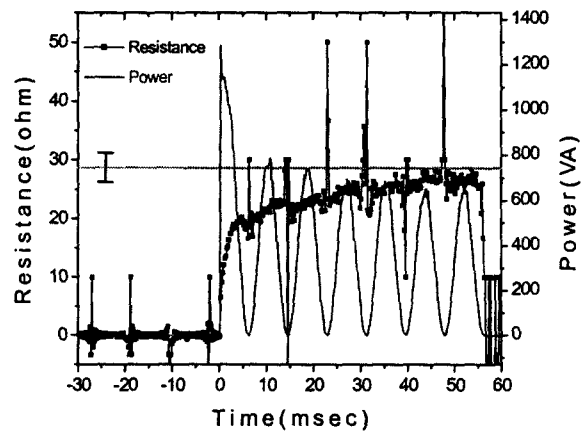


그림 10 인가전압 100 V_{rms}에서 저항 및 소비전력 파형 (사고모의 위상각 45°)
 Fig. 10 Resistance and power waveforms at 100 V_{rms} (fault angle 45°)

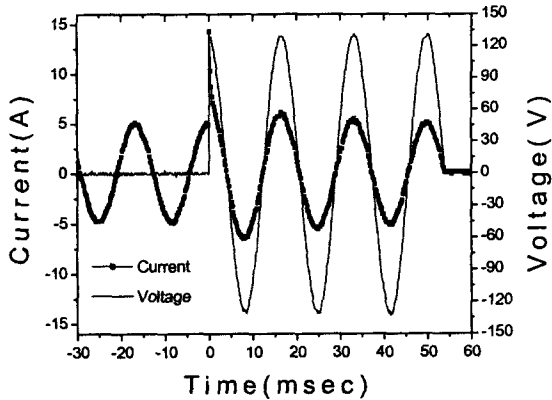


그림 11 인가전압 100 V_{rms}에서 전류 및 전압 파형 (사고모의 위상각 90°)

Fig. 11 Current and voltage waveforms at 100 V_{rms} (fault angle 90°)

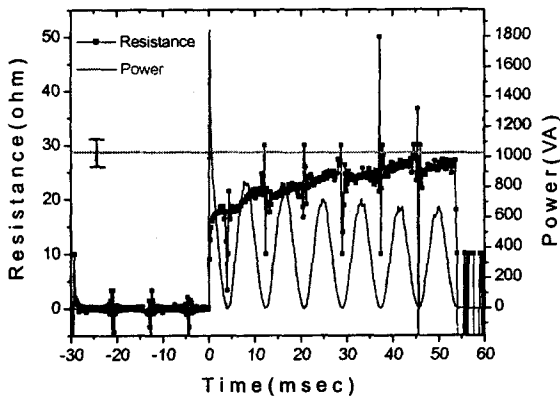


그림 12 인가전압 100 V_{rms}에서 저항 및 소비전력 파형 (사고모의 위상각 90°)

Fig. 12 Resistance and power waveforms at 100 V_{rms} (fault angle 90°)

이상에서, 2 inch 박막을 이용하여 두 부분으로 나누어 제작한 초전도 한류기는 한쪽 영역만으로도 약 100 V_{rms}까지는 안정적으로 전류제한을 감당할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 그림 1에서 가운데 전극 부분을 meander 선으로 구성하면 약 50 V_{rms}을 감당할 만큼 한류소자의 길이가 길어지기 때문에 박막 전 부분을 하나의 한류소자로 제작한다면, 2 inch 박막 한 장이 약 250 V_{rms}까지는 감당할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

YBCO film의 두께가 300 nm이고 금층의 두께가 200 nm 인 박막형 초전도 한류기를 제작하고 그 전류제한 특성 및 적정용량을 산출함으로써 안정적인 동작조건을 아래와 같이

제시하였다.

한류소자의 최초 quench는 약 8 A_{peak}의 전류값에서 발생하였으며, 예상사고전류 10.3 A_{peak}를 인가하였을 때에는 한류소자의 극부적인 quench가 발생하여 전류제한이 점진적으로 이루어졌다. 최종적으로 공급전압 100 V_{rms}를 가했을 때 예상 사고전류는 14.1 A_{peak}이었으며, 약 3 msec만에 전역에서 quench가 완료되었고 사고직후 약 14.5 A_{peak}까지 효과적으로 사고전류를 제한하였다.

이때 한류소자의 온도는 사고 후 3 cycle만에 약 200 K까지 상승하였으며, 이 조건에서 100회 이상 반복실험을 하였지만 특성저하가 전혀 이루어지지 않은 안정적인 특성을 보여주었다. 따라서, 2 inch 박막 한 장 전체를 한류소자로 제작한다면 약 250 V_{rms}까지는 안정적으로 전류제한을 수행할 수 있음을 알 수 있다.

향후에는 직·병렬을 통한 용량증대 방안과 한류소자의 온도발생을 저감하는 방법에 대한 연구를 지속적으로 수행하고자 한다.

감사의 글

본 연구의 일부는 과학기술부 중점국가연구개발 사업의 지원으로 수행되었으며, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김준환, 이강완, "전력계통 고장전류 증대와 대응방안", *전기저널*, pp. 19-31, 1998.
- [2] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Kramer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies and H. W. Neumueller, "Resistive Fault Current Limiters with YBCO Films - 100 kVA Functional Model", *IEEE Trans. on Appl. Supercon.*, vol. 9, no. 2, pp. 656-659, 1999.
- [3] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Kramer, P. Kummeth and H. W. Neumueller, "Resistive current limiters with YBCO films", *IEEE Trans. on Appl. Supercon.*, vol. 7, no. 2, pp. 828-831, 1997.
- [4] 최효상, 현옥배, 고태국, "초전도 한류기를 포함한 계통의 지락사고에 대한 EMTDC 해석", *전기학회논문지*, 48B권, 4호, pp. 161-166, 1999.
- [5] M. Lindmayer and H. Mosebach, "Current limiting properties of YBCO-films on sapphire substrates", *IEEE Trans. App. Supercon.*, vol. 9, no. 2, pp. 1369-1372, 1999.
- [6] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, 김상준, 한병성, "분로저항이 초전도 한류기의 전류제한 효과에 미치는 영향", *한국초전도·저온공학학회논문지*, 1권, 2호, pp. 49-53, 1999.
- [7] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, 김상준, 문승현, 한병성, "YBCO 박막의 저항형 초전도 한류기에 대한 동작 특성", *전기학회논문지*, 48B권, 10호, pp. 537-543, 1999.
- [8] 김혜림, 현옥배, 최효상, 황시돌, 김상준, "저항형 초전도 한류기에서의 켄치 전파", *한국전기전자재료학회논문지*, 제 13권, 4호, pp. 337-342, 2000.

저 자 소 개



최효상 (崔孝祥)

1966년 2월 21일생. 1989년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(공학) 1995년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 근무

Tel : 042-865-5977, Fax : 042-865-5804

E-mail : hschoi@kepri.re.kr



현옥배 (玄鈺培)

1953년 2월 11일생. 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 Iowa State Univ. 대학원 물리학과 졸업(이박) 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 근무

Tel : 042-865-5971, Fax : 042-865-5804

E-mail : hyun@kepri.re.kr



김혜림 (金蕙林)

1957년 3월 15일생. 1979년 서울대학교 물리학과 졸업. 1981년 미 아이오와 주립대학교 대학원 물리학과 졸업(석사). 1991년 미 코넬대학교 대학원 물리학과 졸업(이박) 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 근무

실 근무

Tel : 042-865-5973, Fax : 042-865-5804

E-mail : hrkim@kepri.re.kr