

초전도한류기에 적용하는 YBCO 박막형 선재의 반복적 과전류 특성

Repetitive Over-current Characteristics of YBCO Coated Conductor for Applying to SFCL

안민철^{1*}, 석복렬², 고태국³

Min Cheol Ahn^{1*}, Bok-Yeol Seok², Tae Kuk Ko³

Abstract: In recent years, YBCO coated conductor (CC) called as second generation HTS (high temperature superconducting) wire has been developed as a suitable material for resistive superconducting fault current limiter (SFCL). For designing the SFCL, the required length of superconducting wire is inverse proportional to the maximum temperature reached when a fault occurs. Since the required length strongly affects a manufacturing cost, it is the most important parameter to determine the maximum temperature reached. It is necessary to observe the repetitive over-current characteristics of HTS wire. This paper attempts to measure the variation of critical current of YBCO CC after repetitive over-current pulse. No degradation of the critical current of CC sample was observed by applying 100 times over-current pulse which makes temperature above 400 K after 100 ms. This study can be useful in designing optimally resistive SFCL employing YBCO CC. The maximum permissible temperature can be set to 400 K, so wire length could be reduced by 30 % compared in case of 300 K-criterion.

Key Words: repetitive over-current pulse, SFCL, YBCO coated conductor.

1. 서 론

초전도한류기는 전력계통의 고장전류를 효과적으로 제한하여 주는 초전도전력기기이다[1]. 그 중에서 저항형 초전도한류기는 고장전류가 초전도체의 임계전류 이상임을 이용하여, 초전도체의 상전이 (quench) 현상을 이용한다. 일반적으로 초전도체는 상전이가 발생하면 저항이 발생하기 때문에 이를 이용하여 고장전류를 자동적으로 제한하는 것이다. 이러한 초전도한류기는 현재 독일의 FZK에서 배전급 10MVA급의 실계통 적용시험을 성공적으로 마치고 110MVA 용량의 송전급 한류기를 개발 중에 있다[2]. 또한 미국, 일본 등은 물론 한국에서도 DAPAS 프로그램을 통하여 2007년 배전급 한류기, 2011년 송전급 용량을 목표로 개발이 진행 중에 있다[3].

일반적으로 저항형 초전도한류기는 사용된 초전도체의 종류에 따라 전류제한 특성, 교류손실, 반응속도 등의 성능이 다르다. 초전도한류기에 응용되기 적합한 초전도체의 조건은 상전이 속도가 빠르고 임계전류밀도가 높으며 교류손실이 작은 것 등이 있다. 최근 국내외에서 가장 활발하게 연구되고 있는 YBCO 박막형 선재 (coated conductor, CC)는 이러한 이상적인 조건에 가장 잘 부합되는 물질이다. 즉 YBCO 재료가 BSCCO 보다 N값이 크기 때문에 빠른 스위칭 특성을 가지고 있으며 선재의 형태이기 때문에 다양한 구조의 무유도 코일을 설계하고 제작하는 것이 가능하다[4].

저항형 초전도한류기는 사고 발생 시 임계전류 이상의 전류가 흐르도록 되어 있기 때문에, 이때에 초전도 선재의 온도가 상승한다. 온도 상승의 폭을 조절하는 것은 한류기의 성능을 좌우하는 하나의 중요한 설계 인자가 된다. 즉 온도 상승의 폭을 작게 설계하여 최종 도달 온도를 낮추도록 설계하면 필요한 선재의 양은 많아지게 되어 제작비용이 증가하고 시스템의 부피가 커지는 반면 안정성이 증가하고 사고 후 회복시간이 짧아진다. 따라서 사고 시 최종 도달 온도를 설정하는 것은 한류기 설계에 있어 매우 중요한 결정인자이다.

초전도선재에 임계전류 이상의 전류를 흘리면서 발생하는 전압을 측정하여 발생저항 및 온도를 계산하는 과전류 특성실험은 그동안 많은 연구자들에 의하여 진행되어 왔다 [5]. YBCO CC를 초전도한류기에 적용하기 위해서는 반복적인 과전류 통전실험을 수행하여 이러한 온도상승이 임계전류에 미치는 영향을 고찰할 필요가 있다. 왜냐하면 반복적인 과전류 특성에 의하여 한류기의 최종도달 온도를 결정할 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 먼저 저항형 초전도한류기의 설계 기법을 고찰하여 최종 도달 온도와 한류기 설계와의 관계를 확인하였다. 그리고 최종 도달 온도를 설정하기 위하여 YBCO CC에 임계전류 이상의 전류를 반복적으로 통전한 후 임계전류의 변화를 측정하였다.

2. 한류기 설계와 온도 상승

2.1. 한류기 기초 설계 방법

전력계통의 사고 발생 시, 고장전류가 초전도체의 임계전류 이상으로 올라가게 되어 초전도체에는 quench 현상이 발생한다. CC의 경우 단면이 Fig. 1과 같은 구조로 되어 있다. 임계전류 이하의 전류가 초전도선재를 흐르면 모든 전류는 초전도층인 YBCO층으로 흐른다. 그러나 quench가 발생하면 은(silver)층을 통하여 안정화재(stabilizer)층에 대부분의 전류가 흐르게 된다. 일반적으로 초전도선재는 안정화재를 가지고

¹정 회 원 : 기초전력연구원
²정 회 원 : 현대중공업 기계전기연구소
³정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학부
*교신저자 : mcahn@yonsei.ac.kr
원고접수 : 2007년 1월 4일
심사완료 : 2007년 2월 20일

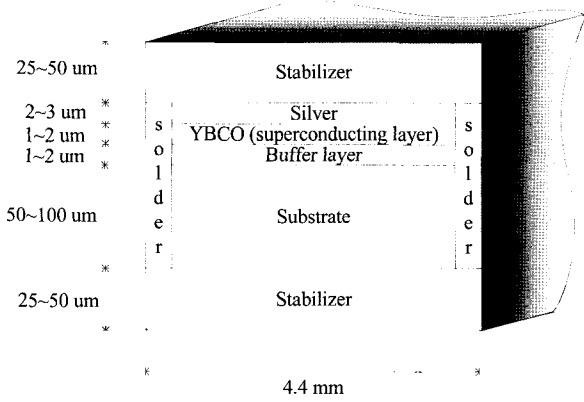


Fig. 1. Schematic drawing of cross-section of CC.

있는데, 그 역할은 quench시에 발생하는 전기적, 열적 에너지를 감당하기 위함이다. 한편 초전도한류기에서는 안정화재가 단지 보호의 역할만을 수행하는 것이 아니라 사고전류를 제한하여 주는 중요한 역할을 수행한다.

초전도한류기의 기초설계를 수행하기 위하여 기본적인 가정을 하였다. 그것은 "사고 발생 시, 모든 전류가 안정화재층으로 흐른다."는 것이다. 이러한 가정에 근거하면 식 (1)이 성립한다.

$$\frac{V^2}{R} \times t = C_V \cdot \Delta T \quad (1)$$

V는 한류기 양단 전압, R은 사고 시 한류기의 발생저항, t는 사고 시간, C_V는 안정화재의 열용량, ΔT는 온도변화이다. 모든 전류가 안정화재로 흐른다는 가정을 하에서는 발생저항 R은 안정화재의 저항이기 때문에 식 (1)은 식 (2)의 형태로 변형이 가능하다.

$$\Delta T = \frac{E^2 \cdot t}{C_V \cdot \rho} \quad (2)$$

E는 한류기의 단위길이 당 인가전압 [V/m]이며, ρ는 안정화재의 비저항이다. 일반적으로 사고시간은 최대 0.1초 정도로 고정할 수 있으며 C_V와 ρ는 안정화재에 사용되는 물질의 고유 성질에 해당한다. 따라서 식 (2)에서 온도상승분이 결정된다면 단위길이 당 인가전압이 결정될 수 있다. 온도상승분을 증가시키면 E 값이 증가하여 결국 선재의 소요량을 줄일 수 있게 된다.

2.2. 초전도한류기의 사고 시 온도 상승

초전도한류기의 사고 시 온도 상승 패턴을 살펴보기 위하여 CC로 제작된 소용량의 초전도한류기의 단락시험 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 그래프는 단락시험을 수행하였을 때의 전류 및 저항 곡선이다. 사용된 선재는 American Superconductor® (AMSC®)의 344 선재로서, Fig. 1의 구조에서 50 μm 두께의 Cu155 (Cu-Ag-P)라는 구리합금 안정화재가 양쪽에 부착된 형태이다. 사용된 선재는 27 m, 인가된 전압은 220 V_{rms}이며 사고시간은 0.1초이다. 그래프에서 경과시간 기준으로 6.48초 정도에서 사고가 발생하였으며 저항은 사고 발생 시 즉각적으로 크게 발생한 후, 사고 시간동안 계속 점차적으로 증가한다. 이것은 사고 발생 직후 YBCO 초전도층으로 흐르던 전류가 안정화재로 바이패스되고 이후에는 모든 전류가 안정화재로 흐르면서 안정화재의 저항이 상승하는 것이다. 대부분의

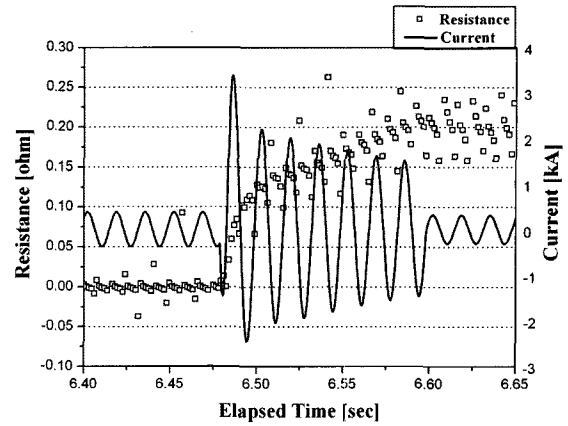


Fig. 2. Current and generated resistance waveform of SFCL when a fault occurs.

전류가 안정화재로 흐르게 되면 그래프에서 저항의 발생 경향은 온도의 발생 경향과 동일하다. 이 실험에서는 최종 도달 온도가 190 K이며 단위길이 당 인가전압 값은 8.2 V_{rms}/m이다. 본 실험을 자세하게 다룬 저자들의 또 다른 논문 [6]를 참고하면 선재의 길이를 달리하여도 E 값이 8.2 V_{rms}/m로 동일하면 도달 온도는 190 K으로 일정하였다. 따라서 최종도달 온도를 설정하고 이에 따른 E값을 결정하여 한류기를 설계하는 것은 타당하다.

3. 과전류 인가 실험

3.1. 샘플 준비

단락시험은 사고발생의 위상각 등에 따라 사고 시 발생하는 저항 및 온도 경향이 변하기 때문에 일정한 온도에 도달하는 quench 실험을 반복적으로 수행하기에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 단락시험을 수행하는 대신에 선재에 과전류를 강제로 인가하여 발생하는 전압으로 저항 및 온도를 환산하였다.

사용된 선재는 AMSC 344선재이고 사양은 Table 1과 같다. 선재 200 mm를 G10-FRP 판에 밀착하였으며 선재 중앙에 100 mm의 전압탭을 설치하였다. Fig. 3은 실험에 사용된 선재를 부착한 모습을 보여준다.

모든 실험은 포화 액체질소 하에서 수행되었으며 냉각온도는 77 K이다. 먼저 과전류를 인가하기 전의 임계전류를 측정하였으며 1 μV/cm criterion을 기준으로 측정된 임계전류 값은 69 A이다.

Table 1. Specifications of 344 wire.

HTS Material	YBa ₂ Cu ₃ O ₇	
Stabilizer	Copper alloy (Cu155)	
	Resistivity	6 nΩ · m @ 77 K 20 nΩ · m @ 300 K
	Thickness	50 μm + 50 μm (Both-sides)
Dimension	Width	4.3 mm
	Thickness	0.15 mm

3.2. 온도에 따른 저항 측정

과전류 인가 시 선재의 온도는 온도센서로 측정하는 것이 어렵기 때문에 발생한 저항 값으로부터 추정하여 얻었다. 따라서 샘플의 온도에 따른 저항을 사전에 측정하였다. 소형 냉동기에 선재 샘플을 부착하여 300 K에서 100 K까지 냉각하면서 저항을 측정하여 얻었다. Fig. 4는 실험에 사용된 344 선재의 온도에 따른 저항 그래프이다. 그래프에서 300 K부터 500 K까지의 값은 보외법(extrapolation)에 의하여 추정하였다.

3.3. 과전류 인가 방법

200 mm 길이의 샘플 양단으로 반복적인 과전류를 통전하는 실험을 수행하였다. 인가한 과전류의 순서는 다음과 같다. 먼저 임계전류의 약 60%인 41 A의 전류를 1초간 통전하고 이어서 과전류를 0.1초간 인가한 후 모든 전류를 차단한다.

과전류는 200 A부터 50 A 간격으로 인가하였으며 과전류를 10 회 인가한 후 임계전류를 측정하는 실험을 반복하였다. 각 과전류 사이에는 1분 이상의 시간 간격을 두어 선재가 회복된 후 다시 과전류를 인가하였다. 그리고 한 과전류를 100 회 인가하여도 임계전류의 변화가 없을 때에는 다음 단계의 과전류를 인가하였다. Fig. 5는 인가한 과전류의 패턴과 그 때 발생한 100 mm 텡에서의 전압의 관계를 보여준다. 또한 Fig. 4의 그래프를 이용하여 각 과전류별로 사고 시도달하는 최대 온도를 산출하면 300 A, 350 A, 400 A, 450 A 과전류에서 각각 170 K, 220 K, 290 K, 380 K이다.

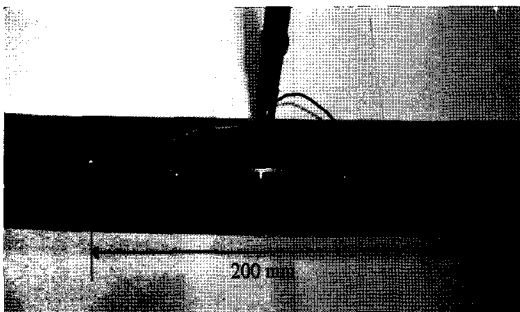


Fig. 3. Photograph of 344 wire sample using over-current test.

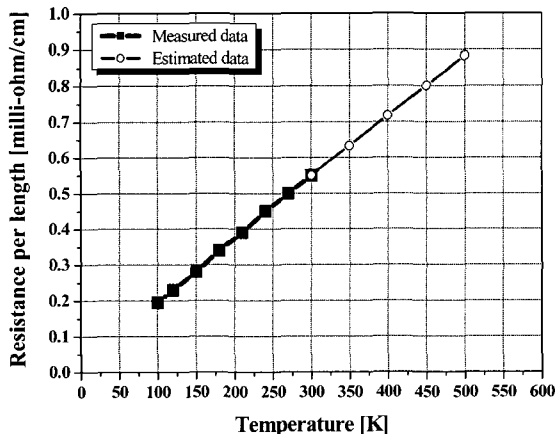


Fig. 4. Resistance according to temperature.

3.4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 6은 300 A부터 450 A까지의 과전류를 반복적으로 100 회씩 통전한 후 임계전류를 측정한 결과를 나타내는 그래프이다.

현재 많은 저항형 초전도한류기의 설계에서 고온초전도체의 열화를 염려하여 최대 도달 온도를 250-300 K으로 설정하고 있다(7). 본 실험에서 400 A의 과전류를 통전할 때 도달하는 온도가 290 K으로 거의 300 K에 근접하여 있으나 100 회의 과전류 반복실험에도 임계전류는 전혀 감소하지 않았다. 또한 450 A 과전류 실험에서는 도달 온도가 380 K에 달하지만 이 경우에도 100 회의 과전류 실험 이후에 임계전류는 감소하지 않고 미소한 값이지만 0.7 A 정도 오히려 상승하였다. 임계전류 측정 상의 약간의 오차를 고려한다 하더라도 도달온도가 380 K에서의 선재 열화에 의한 임계전류 감소 현상은 없는 것으로 판단된다. 그러나 500 A 과전류 인가 실험에서 선재의 안정화재가 분리되는 손상이 발견되었다.

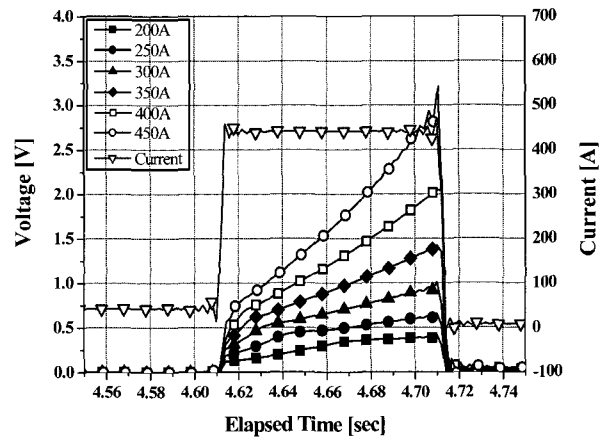


Fig. 5. Over-current applying pattern and generated voltage according to over-current value.

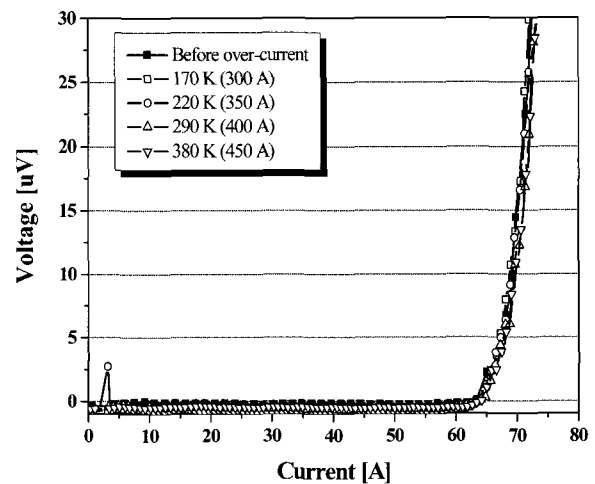


Fig. 6. I-V curve after applying repetitive over-current pulse (170-380 K).

Fig. 7은 500 A의 전류를 인가한 후 파손된 선재 사진이다. 선재는 파단이 되지 않는 않았으나 육안으로 확인할 수 있을 정도의 파손이 생기고 안정화재 층이 분리되었다. 선재의 파손은 물론 임계전류의 감소 현상이 발생하지 않는 범위에서의 최대 인가전류를 확인하고 그 때의 도달 온도를 파악하기 위하여 앞선 실험에 사용된 선재 샘플과 동일한 사양의 선재를 다시 G10-FRP 판에 부착하여 과전류 통전실험을 수행하였다. 새로 부착한 선재의 임계전류는 71.5 A로 측정되었다. 450 A 과전류부터 인가하기 시작하였으며 각 과전류를 100회씩 인가한 후 측정된 전류-전압 그래프를 Fig. 8에 표시하였다. 과전류를 인가하지 않은 상태에서 측정된 임계전류 71.5 A보다 과전류를 인가한 후의 임계전류가 모두 높게 측정되었으며 그 차이는 최대 3 A 이상이다.

관측된 과전류에 의한 임계전류의 향상 현상에 대하여 확인하기 위하여 새로운 선재 샘플을 이용하여 동일한 실험을 반복하였다. Fig. 9는 두 선재 샘플 모두에서 과전류 인가 후에 임계전류가 증가되는 현상을 보여준다. 인가한 과전류는 450 A이고 최종 도달 온도는 약 380 K이다. 샘플 A는 본래 임계전류가 67.3 A 였으나 20 회의 과전류 통전 후에 69.4 A로 2.1 A의 임계전류 향상을 확인하였다. 샘플 B 역시 당초 71.6 A에서 73.7 A로 20회의 과전류 통전으로 인하여 2.1 A의 임계전류 향상이 확인되었다. 임계전류 이상의 전류에 의한 임계전류의 향상 현상은 흔히 "training" 효과로 명명되어지며 초전도 마그넷에서 흔하게 나타나는 현상이다. YBCO 박막에서도 이와 같은 현상이 실험적으로 보고되어 있으며 [8], CC 선재의 다양한 응용을 위하여 CC 선재에 대한 training에 대해서는 추후 보완적인 연구가 필요하다.

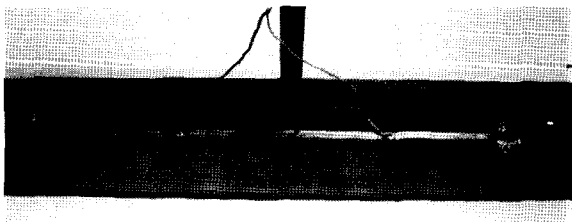


Fig. 7. Damage of the CC when 500 A is applied.

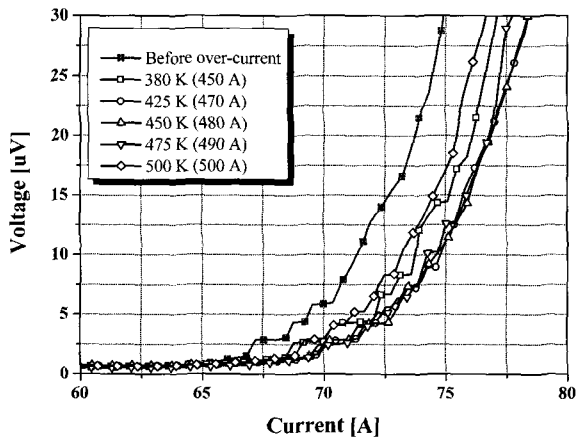


Fig. 8. I-V curve after applying repetitive over-current pulse (380-500 K).

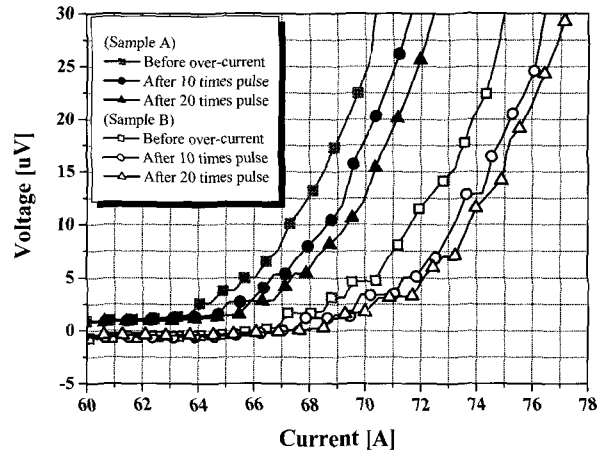


Fig. 9. Improvement of critical current after applying 450 A over-current in two samples (380 K reached).

한편 Fig. 8에서 500 A의 과전류에 의하여 최종 도달 온도가 약 500 K에 달하는 경우에도 100 회의 과전류 통전실험 이후에 임계전류의 감소는 거의 없었다. 이후 510 A의 과전류를 인가하면서 10 회 인가할 때마다 임계전류를 측정하였다. Fig. 10은 510 A의 과전류에 의하여 임계전류가 감소하는 것을 보여주는 그래프이다. 과전류를 처음 10 회 인가할 때에는 임계전류가 증가하였으나 20 회부터는 급격하게 임계전류가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 510 A의 과전류가 인가되면 선재의 온도는 최대 약 540 K까지 증가한다.

본 실험 결과에 따르면 500 A의 과전류에 의하여 0.1 초 후 최대 500 K까지 온도가 상승하는 실험을 100 회 반복하여도 임계전류의 감소는 거의 없었다. 그러나 실험에 사용된 AMSC 344 선재는 위, 아래면의 안정화재를 부착함에 있어 약 450 K의 녹는점을 갖는 솔더를 사용하여 납땜하여 제조된 선재이다. 따라서 510 A 과전류 반복 실험에서의 임계전류 감소가 고온초전도체의 열화 현상에 의한 것인지, 솔더가 녹으면서 생긴 현상인지에 대해서는 정확하게 알 수 없다. 그러나 AMSC 344 선재는 초전도 마그넷 시스템이나 초전도전력기기 등에서 가장 널리 사용되는 2세대 선재이다. 따라서 이러한 선재를 사용함에 있어 과전류의 통전이 예상된다면 본 실험 결과를 토대로 보다 안정적인 설계를 할 수 있을 것이다.

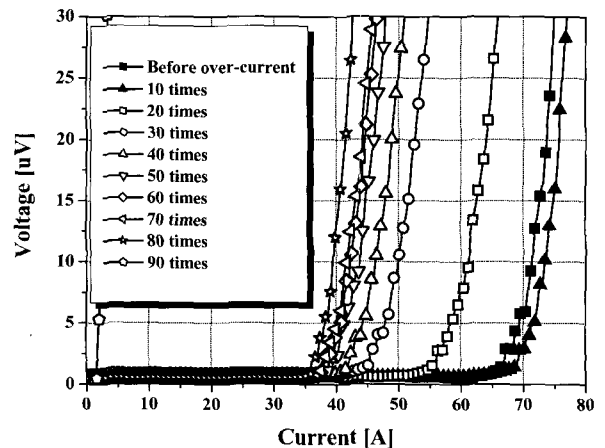


Fig. 10. Degradation of critical current after applying over-current of 510 A.

4. 초전도한류기 설계에의 실험 결과 적용 예

CC를 이용하여 저항형 초전도한류기를 개발하는 분야에서 현재까지는 300 K을 최대도달 온도로 설정하여 선재 사용량 등을 설계했었다[9]. 그러나 본 논문의 연구결과에 따르면 솔더의 녹는점인 450 K 이하의 온도는 선재의 임계전류를 감소시키지 못한다. 안정성을 고려하여 400 K으로 도달 온도를 설정한다고 가정해 보면 기존의 300 K 기준의 설계에 비하여 ΔT 가 100 K 만큼 증가하여 E 값이 증가하고 따라서 선재의 소요량은 감소하게 된다.

예를 들어 한류기 응용에 적합한 것으로 알려져 있는 AMSC 344S 선재를 사용하여 13.2 kV/630 A 용량의 배전급 한류기를 제작한다면 300 K 기준으로는 단위길이당 인가전압(E) 값이 40 V/m이며, 400 K 기준으로는 57 V/m 이다 [9-10]. 따라서 300 K에서 330 m의 선재가 필요한 반면, 400 K 기준으로는 230 m의 선재로도 제작이 가능하다. 이러한 필요 선재 길이의 감소는 선재 병렬 수까지 고려하면 더 확연해지는데, 630 A급 한류기는 150-200 A의 임계전류를 갖는 선재를 8개 병렬로 연결해야 하기 때문에 결국 800 m의 선재를 절약할 수 있다는 결론이 나온다. 이와 같은 선재소요량의 감소는 제작비용 절감은 물론 교류손실을 줄이며 냉각 부하까지 줄이는 등 한류기 설계에 긍정적으로 작용된다.

5. 결 론

YBCO 박막형 선재 (CC)에 반복적인 과전류를 인가한 후 임계전류의 변화를 살펴보는 연구를 수행하였다. AMSC 344 선재를 사용하여 실험한 결과 0.1 초간 과전류가 흐르면 선재가 quench 되면서 안정화재의 온도가 증가한다. 최종도달 온도를 기준으로 400 K 이상까지 도달하는 크기의 과전류를 100회 이상 인가하여도 임계전류 값은 감소하지 않는 것으로 확인되었다. 다만 온도가 500 K에 달하게 되는 실험에서는 안정화재를 부착했던 솔더의 녹는점을 초과하게 되어 안정화재 층이 선재로부터 분리되는 등의 파손을 받게 된다.

CC선재를 적용한 초전도한류기를 설계할 때는 사고시 선재의 최종 도달 온도를 기준으로 선재의 사용량 등을 결정하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 선재의 반복적 과전류 통전 실험을 통하여 도달 온도가 400 K이어도 임계전류의 감소가 없음을 밝혔으며 이러한 결과를 초전도한류기의 설계에 적용하면 동일한 선재로 동일한 한류기를 설계함에 있어 선재 사용량을 30 % 절감할 수 있다.

한편 과전류를 반복해서 인가한 후 임계전류를 측정할 때, 임계전류가 증가하는 현상을 확인하였으며 과전류의 시간이나 크기에 따라 이러한 현상이 어떠한 영향을 주는지 향후 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] E. Leung, "Superconducting fault current limiters," IEEE Power Engineering Review, vol. 20, no. 8, pp. 15-18, 2000.
- [2] R. Kreutz, J. Bock, F. Breuer, K.-P. Juengst, M. Kleimaier, H.-U. Klein, D. Krischel, M. Noe, R. Steingass, K.-H. Weck, "System technology and test of CURL 10, a 10 kV, 10 MVA resistive high-Tc superconducting fault current limiter," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, pp. 1961-1964, 2005.
- [3] Y.-S. Jo, K.-S. Ryu, M. Park, "1st Phase Results and Future Plan of DAPAS Program," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 16, no. 2, pp. 678-682, 2006.
- [4] 안민철, "전력계통 안정화를 위한 사고전류제한기용 초전도마그네트에 관한 연구," 연세대학교 박사학위 논문, 2006.
- [5] M. C. Ahn, S. E. Yang, D. K. Park, H. Kang, B.-Y. Seok, T. K. Ko, "Current limiting characteristics of coated conductors with various stabilizers," ACASC 2005 conference, 2005.
- [6] D. K. Park, M. C. Ahn, S. Park, H. Kang, D. K. Bae, S. E. Yang, B.-Y. Seok, T. K. Ko, "Development of 220 V/300 A Class Non-inductive Winding Type Fault Current Limiter Using 2G HTS Wire," ASC2006 conference, 2006.
- [7] O.-B. Hyun, S.-D. Cha, H.-R. Kim, H.-S. Choi, S.-D. Hwang, "Shunt-assisted simultaneous quenches in series-connected resistive SFCL components," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, pp. 2060-2063, 2003.
- [8] H.-S. Choi, H.-R. Kim, O.-B. Hyun, S.-J. Kim, "Quench properties of Y-Ba-Cu-O films after overpowering quenches," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 11, no. 1, pp. 2418-2421, 2001.
- [9] C. Lee, K. Nam, H. Kang, M. C. Ahn, T. K. Ko, B.-Y. Seok, "Design of High Temperature Superconducting Coil for 8.3 MVA Fault Current Limiter," ASC2006 conference, 2006.
- [10] 이찬주, 남판우, 강형구, 고태국, 석복렬, "YBCO Coated Conductor의 과전류 특성해석," 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp. 693-694, 2006.

저 자 소 개



안민철(安敏哲)

1976년 9월 20일생, 1999년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 2006년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사). 현재 기초전력연구원 연구원.



석복렬(石福烈)

1971년 2월 16일생. 1994년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1994년 10월~1995년 8월 국제단기교환유학생(일본 큐슈대학). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 3월 일본 큐슈대학 시스템 정보과학연구과 졸업(공학박사). 2000년 4월~2001년 3월 일본 통상산업성 공업 기술원 특별연구원(AIST fellow). 현재 현대중공업(주) 기계전기연구소 책임연구원.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생. 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(M.Sc), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(Ph. D), 1986~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국초전도·저온공학회 부회장.