

초전도체 켄치 모의 및 직류 한류거동 계산

김혜림¹ , 안봉만², 한병성²

¹ 전 한전 전력연구원 미래기술연구소

² 전북대학교 산학협력단

Quench Simulation and Calculation of Current Limitation at DC Faults for Superconductors

Hye-Rim Kim¹, Bong-Man Ahn², and Byoung-Sung Han²

¹ Future Technology Laboratory, KEPCO Research Institute (formerly), Daejeon 34056, Korea

² Industrial Cooperation Foundation, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

(Received January 13, 2025; Revised January 25, 2025; Accepted February 3, 2025)

Abstract: The quench behavior of coated conductors (CCs) was simulated with a focus on the initial stage of quenches, and the current limiting behavior of superconducting fault current limiters (SFCLs) at DC faults was calculated. Since the fault current reaches the peak in several ms in DC lines due to capacitor discharge, it is necessary to understand the initial quench behavior well. Considered in the simulation are characteristics of CCs in the flux-flow state, current sharing, non-uniform critical current distribution in CCs, and heat transfer to surroundings. The simulation fit data well. Using the CC model developed in the simulation, the current limiting behavior of SFCLs made of CCs at DC faults was calculated. Critical current distribution and heat transfer were found to affect the current limiting behavior of SFCLs less at DC faults. The calculation will contribute to the effective design of SFCLs for applications in DC lines.

Keywords: Quench simulation, Coated conductor, DC fault current, Current limitation, Superconducting fault current limiter (SFCL)

1. 서론

국내에서 장거리 송전, 데이터 센터, 전기차 충전, LED 조명 등으로 인해 직류 전력의 수요가 증가하고 있다. 대용량 고효율 전력 변환이 가능해졌고 분산 전원 및 신 재생 에너지원들이 대부분 직류를 생산하며, 에너지 저장장치를 사용할 수 있기 때문에 직류 계통이 주목을 받고 있다.

직류계통은 교류계통이나 직류 전원 및 직류 수용가에

변환기로 연결된다. 따라서 직류계통에 고장이 발생할 경우 고장전류는 변환기 동작의 영향을 받게 된다. 고장이 발생하면 변환기의 반도체 소자가 자기 보호를 위해 개방되어 직류계통은 변환기에서 분리되므로 커패시터(capacitor)와 직류 선로로 구성된 회로가 된다. 이에 따라 커패시터가 방전하게 되고 큰 고장전류가 고속으로(수 ms 내에) 발생한다 [1]. 다음 단계에는 반도체 소자의 역 병렬 다이오드가 도통하게 되고 직류 선로의 인덕턴스가 방전하여 역 병렬 다이오드에 흐르게 된다. 고장전류로부터 직류계통을 보호하려면 고장전류를 고속으로, 특히 역 병렬 다이오드가 도통하기 전에 저감 또는 차단하여야 한다.

초전도 한류기는 초전도 특성을 이용하여 고장 발생 시 선로에 임피던스를 고속으로 투입할 수 있으므로 직류계

✉ Hye-Rim Kim; hrcim1084@hanmail.net

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

통의 고장전류 문제를 해결하는데 적합하다 [2]. 이 장점을 인정받아 초전도 한류기의 직류 계통 적용을 위한 실용화 연구개발이 진행되고 있다 [3,4]. 초전도체는 임계 값 이하의 온도, 전류, 자기장 하에서 저항이 0(zero)이 되는 특징이 있어서 전류가 흘러도 주울 열이 발생하지 않는다. 그러나 일정한 값(임계전류) 이상의 전류가 흘렀을 때 저항이 발생하여(퀸치, quench) 전류를 저감한다. 초전도 한류기를 직류계통에 효과적으로 적용하기 위해서는 큰 고장전류가 발생하는 고장 초기의 한류 특성을 자세히 알 필요가 있다.

본 논문에서는 초전도 한류기를 제작하는 데 사용되는 초전도체의 퀸치 특성을 분석하여 모의 계산하고, 이를 이용하여 교류/직류 변환기를 통하여 교류 회로에 연결된 직류 회로에 초전도 한류기를 적용하는 경우 직류회로에 단락 발생 시 한류 거동을 계산한 결과를 제시 분석하였다.

2. 초전도체의 한류 거동 모의

2.1 초전도체 퀸치 이론

초전도 한류기는 초전도체의 초전도 성을 이용하여 고장 발생 시 고장전류를 제한한다. 위에서 언급한 바와 같이 초전도체가 초전도 상태에 있을 때에는 저항이 0이지만 초전도체에 흐르는 전류가 임계 전류를 넘으면 초전도체에 저항이 발생하여 전류를 제한한다. 초전도체의 종류에 따라 저항이 발생하는 방식이 다른데, 여기서는 액체 질소로 냉각할 수 있어 보다 경제적인 고온 초전도체를 다룬다.

초전도체에 흐르는 전류가 임계전류 근처가 되면 작은 저항이 발생하는데 초전도체 내의 전기장(E)은 아래와 같이 전류 밀도(J)의 함수로 나타내진다.

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c(T)} \right)^n \quad (1)$$

여기서, E_c 는 임계전류에서의 전기장 기준(보통, $1 \mu\text{V}/\text{cm}$)이고 J_c 는 임계전류 밀도이다. J_c 는 온도가 증가함에 따라 감소하여 임계온도(T_c)에서 0이 된다. T_c 에 가까운 온도 구간에서는 선형으로 감소한다. 즉,

$$J_c(T) = \frac{T_c - T}{T_c - T_0} J_c(T_0) \quad (2)$$

여기서 T_0 는 초전도체 주변의 온도이다.

초전도체에 전기장이 나타나면 주울 열이 발생하고 이에 따라 초전도체의 온도가 상승하고 식 (2)에 따라 임계전

류가 감소하며, 전류의 증가와 맞물려 식 (1)에 따라 전기장이 더욱 증가한다. 이 경우 초전도체를 통과하는 자속이 로렌츠 힘에 의해 흐르게 되는데(자속 흐름, flux flow) 전기장이 $10^2 \sim 10^3 \mu\text{V}/\text{cm}$ 일 때 자속 흐름 상태로 진입하는 것으로 알려져 있다 [5,6]. 전기장이 $10^4 \mu\text{V}/\text{cm}$ 보다 큰 경우의 E - J 관계에 대해서는 문헌 상에 자료가 적다. 이는 큰 전기장 영역에서는 주울 열로 인하여 초전도체 시편의 온도를 일정하게 유지하기 어렵기 때문으로 생각된다.

고온 초전도체는 균일하게 제조하기 어렵기 때문에 열적 안정을 위해서 보통 상전도체와 접합하여 사용한다. 본 연구에서 다룰 초전도 선재의 경우 초전도체가 안정화재, 은(Ag) 보호층 및 기판에 접합되어 있다. 초전도체와 상전도체가 접합되어 있으므로 전기장이 발생하면 상전도체에 전류가 흐르게 된다(전류 공유, current sharing). 전기장이 커짐에 따라 전류 공유도 커진다. 초전도 선재에 흐르는 전류는 초전도체와 상전도체에 흐르는 전류의 합이다. 즉,

$$J_{tot} = J_{hts} + \frac{E}{\rho_{nc}} \quad (3)$$

여기서 J_{hts} 는 초전도체의 전류밀도이고, ρ_{nc} 는 상전도체의 비저항이다.

초전도체에 발생하는 주울 열로 인하여 초전도체의 온도가 상승하여 임계온도를 넘게 되면 초전도-상전도 전이 발생하여 초전도체는 상전도 상태가 된다. 상전도 상태에서 초전도체는 비저항이 큰 금속과 같이 거동한다. 초전도체의 저항이 상전도체의 저항보다 크기 때문에 초전도 선재의 저항은 곧 상전도체 저항이다. 초전도 선재의 상전도체 저항(R_{nc})은 안정화재 저항($R_{stabilizer}$), 은 보호층 저항(R_{Ag}) 및 기판 저항($R_{substrate}$)의 병렬 연결이며, 각 층의 저항은 온도에 따라 선형으로 변한다. 즉,

$$\frac{1}{R_{nc}} = \sum \frac{1}{R_i} \quad (i=\text{stabilizer, Ag, substrate})$$

$$R_i(T) = a_i T + b_i \quad (a_i \text{ and } b_i \text{ are constants.}) \quad (4)$$

초전도 선재에 주울 열이 발생하면 초전도 선재의 온도가 올라간다. 초전도 선재에 발생한 열의 일부는 주변으로 전달되고 나머지 열이 초전도 선재의 온도를 상승시킨다. 이 현상은 정량적으로 설명할 수 있다. 아래의 열 균형 방정식이 이를 수학적으로 나타낸다.

$$c(T) \frac{dT'}{dt} + 2\alpha(T)\delta(z)T' + \nabla \cdot (-\kappa(T)\nabla T') = p$$

$$T' = T - T_0 \quad (5)$$

여기서 c , α , κ 및 p 는 각각 비열, 주변으로의 단위 면적 당 열 전달 계수, 열전도도 및 주울 열 밀도이다. 좌변의 첫째 항은 초전도 선재의 온도를 상승시키는 열을, 두 번째 항은 초전도 선재로부터 주변으로 전달되는 열을, 세 번째 항은 초전도 선재 내에 전도되는 열을 나타낸다. c , α 및 κ 는 온도에 따라 변한다 [7,8].

2.2 초전도체 한류 거동 모의 계산

초전도체의 한류 거동을 모의 계산하는 대상으로 초전도 선재(coated conductor)를 선택하였다. 초전도체는 벌크 형태로도 제조할 수 있으나 [9] 전력 계통 적용에 있어서는 경제성, 부피, 취급 용이성 등을 고려하여 주로 초전도 선재를 사용하기 때문이다. 모의 계산의 검증은 자료가 풍부한 교류 회로에서의 한류 거동 데이터를 잘 설명하는지 확인하는 방식으로 진행하였다. 직류 회로 단락 시 고장전류의 첫 피크는 교류 회로 고장전류와 유사하다.

검증에 사용한 한류 데이터는 SuperPower Inc.에서 제조된 안정화재가 없는 초전도 선재를 사용하여 측정되었다. 초전도 선재 시료는 보호층/초전도체/완충층/기판으로 구성되었는데(그림 1(a)), 1 μm 두께의 초전도체($\text{Yba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$) 층이 완충 층이 입혀진 두께 50 μm 의 하스텔로이 C 26 기판에 증착되었으며 두께 2 μm 의 은(Ag) 보호 층이 있다. 선재의 임계전류는 77 K, 자기 자기장 하에서 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 기준으로 275 A이고, 선재의 폭은 1.2 cm, 길이는 1.01 m이다. 모의 계산에 사용된 한류 거동 데이터는 단락 모의 회로(그림 1(b))를 사용하여 측정되었다. 전

원으로는 교류 전원장치가 사용되었으며 단락은 스위치 S를 닫음으로써 모의하였다. 단락 기간 동안 선재 시료의 전류 및 양단 전압을 동시에 측정하고 저항 값을 계산하였다. 측정은 대기압 하에서 선재가 액체질소에 수평으로 담겨진 상태에서 진행되었다 [10]. 모의 회로의 저항 R_0 및 인덕턴스 L_0 은 임계전류 이하의 전류 데이터로부터 추정하였다.

임계전류보다 큰 전류가 초전도체에 흐를 때 생기는 전기장을 계산하는 데 있어서, 임계전류 주변에서는 식 (1)을 전기장이 $10^4 \mu\text{V}/\text{cm}$ 보다 작은 영역에서는 문헌 상의 E - J 특성 자료 [5]를 사용하였다. 전기장이 $10^4 \mu\text{V}/\text{cm}$ 보다 크고 초전도체 온도가 임계온도보다 낮은 영역에서는 문헌 상의 자료가 미미하므로 데이터를 $\log E - \log J$ 눈금 상에서 2차 다항식에 맞추어 전기장을 계산하였다. 즉,

$$\log \left(\frac{J}{J_2} \right) = a \left\{ \log \left(\frac{E}{E_2} \right) \right\}^2 + b \log \left(\frac{E}{E_2} \right) \quad (6)$$

(a and b are constants.)

여기서 $E_2 = 10^4 \mu\text{V}/\text{cm}$ 이고 J_2 는 E_2 에 대응하는 전류밀도다. 전기장이 큰 영역에서는 식 (3)을 사용하여 전류 공유를 반영하였다. 초전도체 온도가 임계온도보다 높은 영역에서는 식 (4)를 사용하여 선재의 저항을 계산하였다. 식 (5)를 사용하여 온도 변화를 계산함에 있어서는 문헌 [7,8]에 있는 비열 c , 액체 질소로의 열 전달 계수 α 및 열전도도 κ 의 자료를 적용하였다.

구리 산화물 계 초전도체는 균일하게 제조하기 어려워 임계전류밀도가 균일하지 않다. 임계전류밀도가 낮은 지역부터 퀘치가 시작되어 저항이 발생함에 따라 전류가 감소하게 되고 이는 임계전류밀도가 높은 지역의 퀘치에 영향을 미친다. 실제로, 액체 질소에 담겨 있는 초전도 선재가 퀘치하였을 때 발생하는 기포의 분포가 균일하지 않음이 관찰되었는데 [11], 이는 선재의 온도 분포 즉 선재의 저항 분포가 균일하지 않음을 의미한다. 이에 따라 한류 거동 계산 시 임계전류밀도 분포가 미치는 영향도 고려하였다.

그림 2에 초전도 선재에 교류 전압 50 V_{rms} 를 인가하였을 때의 초전도체 전류와 저항 데이터 및 모의 계산 결과가 나타나 있다. 저항은 상온 저항(0.57 Ω)으로 나눈 값을 나타냈다. 계산 결과가 데이터에 잘 맞는 것을 알 수 있다.

고장 시 첫 피크에서의 한류 거동이 중요하므로 고장 직후 수 ms 동안의 한류 특성을 살펴보았다. 그림 3에 초전도체의 고장 직후 전류와 저항의 계산 결과를 데이터와 함께 나타내었다. 계산 결과가 데이터와 상당히 잘 맞는 것을

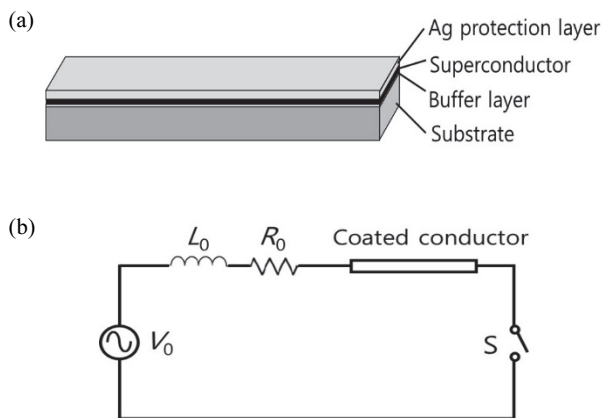


Fig. 1. A schematic of (a) the coated conductors and (b) the quench measurement circuit with which the data used in the simulation were taken. The schematic of coated conductors is not drawn in scale.

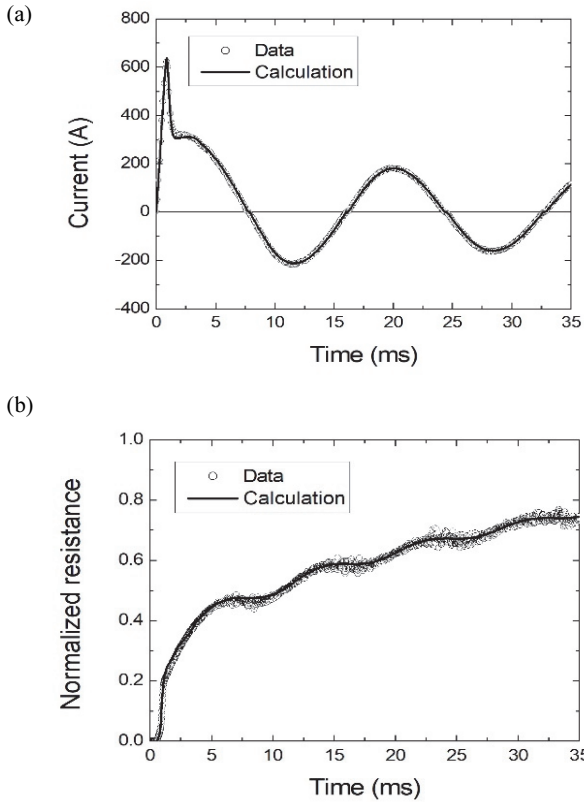


Fig. 2. Calculation results along with data for (a) the current and (b) the normalized resistance of the coated conductor.

볼 수 있다. 식 (6)에서 데이터에 잘 맞는 상수 a , b 의 값은 각각 0.1과 0.04였다.

초전도 선재의 한류 거동에는 여러 요소가 영향을 미친다. 초전도체의 임계전류 분포가 미치는 영향을 보기 위하여 임계전류가 균일한 경우와 균일하지 않은 경우의 한류 거동을 그림 4에 나타내었다. 임계전류가 균일한 경우 저항이 급격히 상승하고(그림 4(b)) 이에 따라 전류가 급격히 감소하는 것으로 나타났(그림 4(a)). 저항 발생 거동을 이해하기 위해 그림 4(c)와 (d)에 저항분포를 나타내었다. 초전도체를 40구역으로 나누어 각 구역의 저항을 계산하고 일부 구역의 저항을 그림에 나타내었다. 임계전류가 균일한 경우 전이가 초전도체 전역에서 동시에 일어났(그림 4(c)), 균일하지 않은 경우에는 전이가 분산되고 일부 구역에서는 전이가 일어나지 않아(그림 4(d)에서 R10) 저항이 비교적 완만하게 상승하고 초기 저항 값이 작았다.

앞에서 언급했듯이 초전도 선재에서 발생하는 주울 열의 일부가 액체질소로 전달된다. 열 전달의 영향을 살펴보기 위하여 열 전달이 없는 단열 상태에서의 거동을 계산하

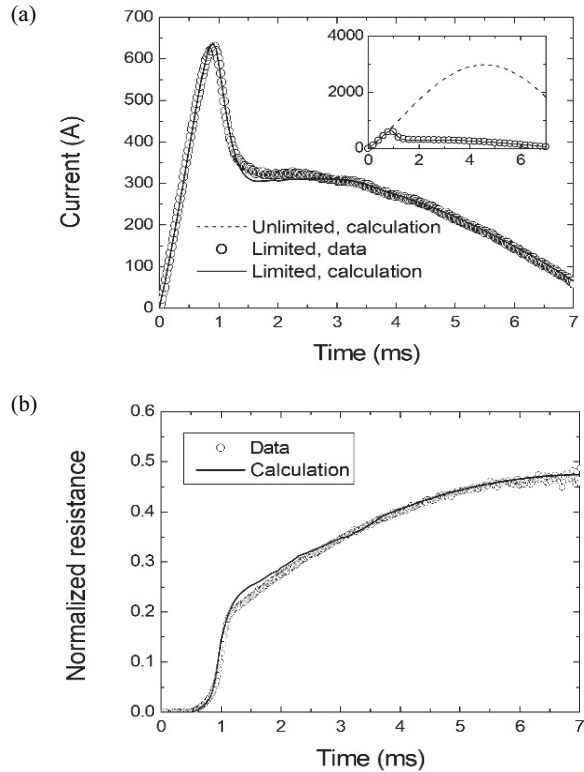


Fig. 3. Calculation results along with data for (a) the current, and (b) the normalized resistance of the coated conductor at the initial stage of quench. The unlimited fault current estimated from data is also shown in the inset of (a).

고 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 열 전달이 없는 경우에는 발생한 주울 열이 모두 온도를 올리는데 사용되므로 온도가 높아 퀴치 저항이 크고 이에 따라 전류가 더 감소하는 것으로 나타났다.

그림 3에서 단락 후 1.3~2.7 ms 구간에서 모의 계산 결과가 데이터와 차이가 남을 볼 수 있다. 이는 선재의 임계전류밀도 분포와 주변으로의 열 전달이 복합적으로 작용한 때문으로 생각된다. 이 구간에서 선재의 평균 온도와 주변 온도의 차이는 15~32 K로 계산되었는데, 이 온도 범위는 열 전달 계수가 큰 구역과 작은 구역 사이의 과도 구역이어서 문헌 상에 열 전달 계수 데이터가 적고 편차가 크다. 이 구간의 오차를 줄이기 위해서는 과도 구역의 열 전달 계수를 심도 있게 추정해야 할 것으로 생각된다.

한편, 임계전류 분포가 균일하지 않은 초전도 선재에서는 온도가 위치에 따라 다르므로 선재 내에서 열이 전도되는데, 본 연구에서 다루는 초전도 선재는 열전도도가 매우 낮아(유효 열전도도가 약 0.42 W/cm/K) 눈에 띄게 저항 발생 거동에 영향을 미치지 않았다.

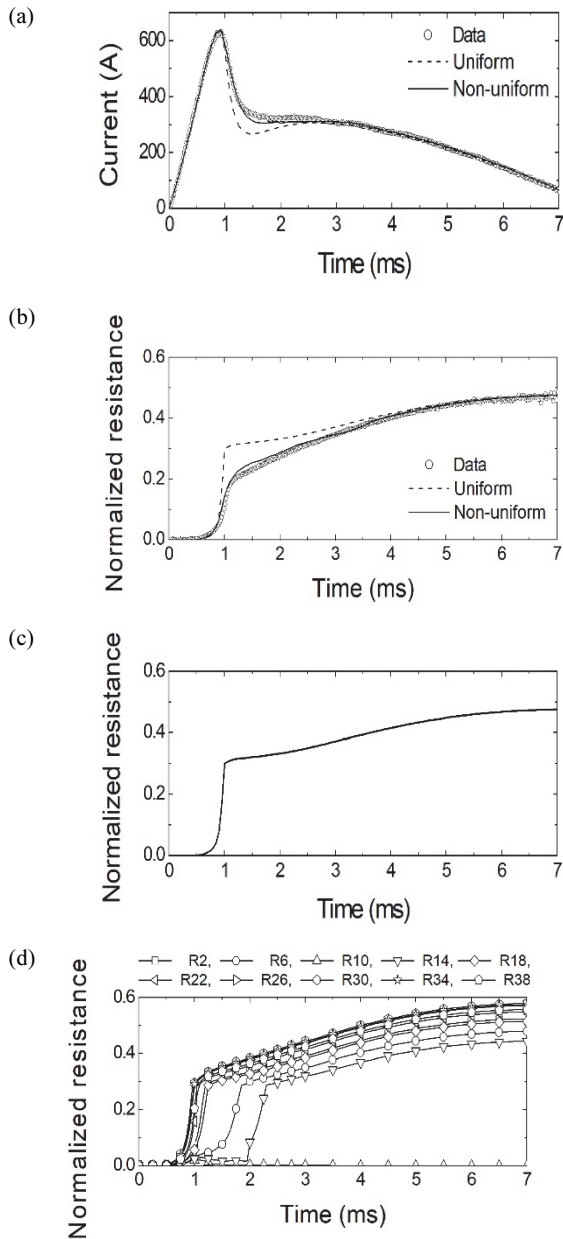


Fig. 4. Calculation results for (a) the current and (b) the normalized resistance of uniform and non-uniform coated conductors, and resistance distribution in (c) uniform and (d) non-uniform coated conductors at the initial stage of quench. Data are also shown in (a) and (b) for comparison.

3. 직류 한류 모의

3.1 모의 방법

2장에서 설명한 초전도체 모델을 사용하여, 직류 회로에

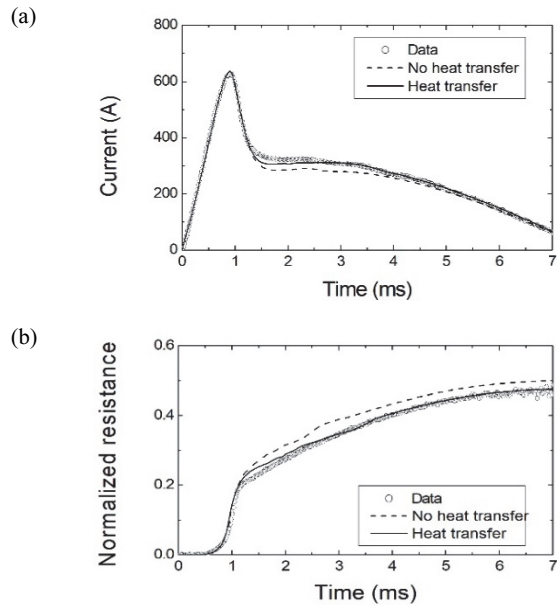


Fig. 5. Calculation results along with data for (a) the current and (b) the normalized resistance of coated conductors with and without heat transfer to liquid nitrogen.

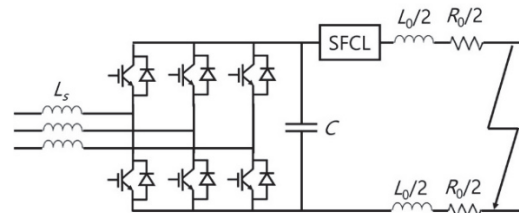


Fig. 6. A schematic of a DC circuit connected to an AC circuit via a three-phase AC/DC converter under short-circuit condition.

초전도 한류기를 연결했을 경우 직류 회로에 단락 발생 시 초전도 한류기의 한류 효과를 계산하였다.

직류계통은 교류/직류 변환기를 통하여 교류계통과 연결되며 직류/직류 변환기를 통해 다른 직류계통이나 직류 수용가에 연결된다. 교류/직류 변환기 후단 근처에서 고장 발생 시 고장전류가 크므로 큰 고장전류를 감당할 수 있는 초전도체의 강점을 고려하여 이 지점에서 단락 발생 시(그림 6) 초전도 한류기의 한류 거동을 계산하였다. 380 V 교류 회로와 연결된 ± 750 V 직류 회로에 극간(pole-to-pole) 단락 발생 시 고장전류를 계산하였다.

직류 회로에 고장이 발생하면 세 단계를 거친다. 첫 단계에서 서론에서 언급한 바와 같이 직류계통은 교류계통에서 분리되어 커패시터와 직류 회로로 구성된 LRC 회로가 된다. 이에 따라 커패시터가 아래 식에 따라 방전한다.

$$L_0 \frac{di}{dt} + iR(t) = V_C(t) = \frac{Q(t)}{c} \quad (7)$$

$$R(t) = R_0 + R_{sfcl}(t) \quad (8)$$

여기서 R_0 과 R_{sfcl} 는 각각 회로 저항과 초전도 한류기 저항이고, L_0 는 회로 인덕턴스다. 초전도 한류기는 무 유도로 제작한다고 가정하였다. $i = -dQ/dt$ 이므로,

$$\frac{d^2Q}{dt^2} + \frac{R(t)}{L_0} \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{L_0 c} = 0 \quad (9)$$

커패시터 양단 전압이 0으로 내려가면 아래 식에 따라 직류 회로의 인덕턴스가 방전하게 된다.

$$L_0 \frac{di}{dt} + iR(t) = 0 \quad (10)$$

다음 단계에서는 교류/직류 변환기가 정류기로 동작하여 정류된 전원이 직류회로에 공급된다.

$$L_0 \frac{di}{dt} + iR(t) = V_s(t) \quad (11)$$

여기서 V_s 는 정류된 전원 전압이다.

직류 회로에 연결되는 초전도 한류기는 2장에서 다룬 초전도 선재로 구성하였고 길이는 초전도체의 온도가 2장에서와 유사하도록 25 m로 선정하였다(단락 후 35 ms에 약 220 K에 도달). 초전도 한류기의 저항 R_{sfcl} 는 비선형이므로 수치 해석을 이용하여 위 미분방정식들을 풀어 회로 전류를 계산하였다.

3.2 모의 계산 결과 및 고찰

초전도 한류기를 그림 6에 나타난 바와 같이 교류/직류 변환기의 직류 측에 설치한 경우에 대해 직류 회로에 극간 단락 발생 시 고장전류를 계산하였다. 교류 회로 전압은 380 V, 직류 회로 전압은 ± 750 V로 설정하였다. 직류 회로 저항 R_0 및 인덕턴스 L_0 은 각각 0.35 Ω 및 0.56 mH로 설정하였다. 초전도 한류기를 무 유도로 제작한다고 가정하여 한류기의 인덕턴스는 0으로 설정하였다.

그림 7에 초전도 한류기가 있을 때와 없을 때의 한류 거동 계산 결과를 나타내었다. 한류기가 없을 때에는 커패시터 방전으로 인해 고장전류가 단락 후 약 2.6 ms에 2,795 A에 이르는 것으로 나타났다. 약 8.6 ms에 커패시터 전압이 0이 됨에 따라(그림 7(d)) 인덕턴스 방전이 시작되고 약 12 ms부터 전원 전류의 유입으로 인하여 주기적인 파형을 보인다. 주기적인 부분의 평균 전류는 약 110 A이다. 한류기가 있을 때에는 그림 7(b)에 보인 바와 같이 켄치 저항이 급

격히 0.5 ms 내에 발생하여 최대 고장전류가 747 A로 감소한다(한류율 73%). 전류가 최댓값에 이른 후에 가파르게 감소하다가 완만히 감소하여 35 ms에 약 88 A가 된다. 그림 7(c)에 나타난 저항 분포에서 2장에서 다룬 교류 회로에서의 단락 시 저항 분포에 비해 고르게 분포되어 있음을 볼 수 있는데, 이는 직류회로에서의 전류 증가율이 더

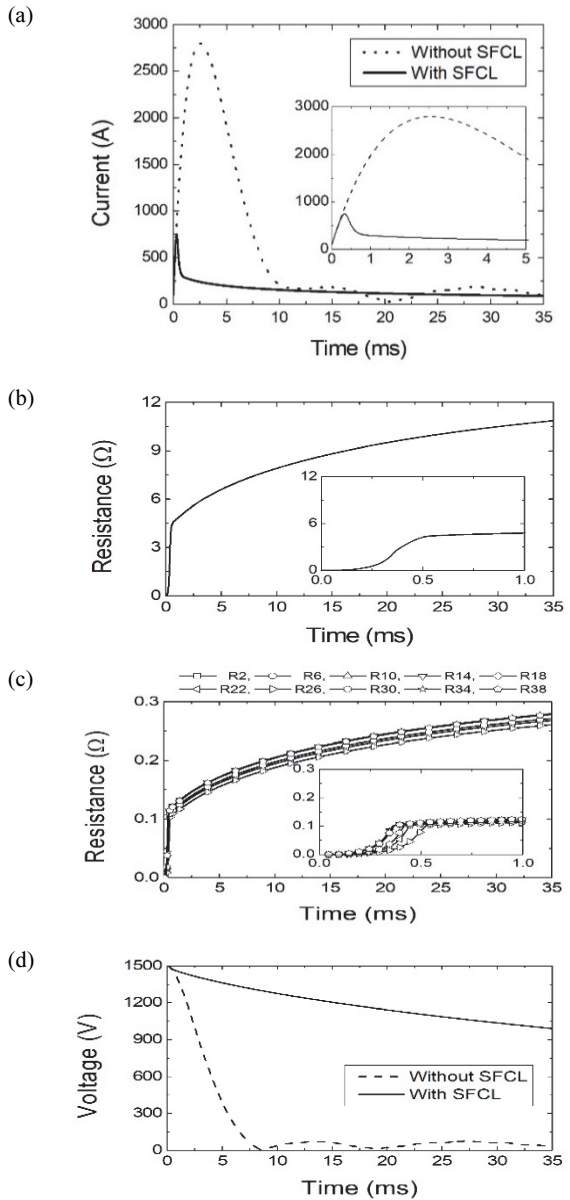


Fig. 7. Calculation results for (a) the current with and without the SFCL, (b) the resistance and (c) the resistance distribution of the SFCL, and (d) the capacitor voltage with and without the SFCL. In (a), (b), and (c), initial behaviors are shown in insets. Values of the DC circuit capacitance and the AC circuit inductance used in the simulation were 10 mF and 8 mH, respectively.

큰 때문으로 생각된다. 교류 회로에서는 단락 후 4.6 ms에 피크 값 2,976 A에 도달한 반면(그림 3(a)) 직류 회로에서는 2.6 ms에 2,795 A에 도달하였다.

한류기가 있을 때 커패시터 전압은 완만하게 감소해서 단락 후 35 ms에 992 A에 이른다. 이는 다음과 같이 이해할 수 있다. 한류기가 켜치하여 큰 저항이 발생하면 식 (7)의 좌변에서 첫째 항을 무시할 수 있으므로 식 (7)과 (9)는 다음과 같이 된다.

$$V_C(t) = \frac{Q(t)}{C} \approx iR(t)$$

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{R(t)C} \approx 0$$

$$V_C(t) = \frac{Q(t)}{C} \approx V_{C,0} \exp\left(-\int \frac{dt}{R(t)C}\right) \quad (12)$$

초전도 한류기의 저항이 회로 저항보다 훨씬 크므로 커패시터 전압이 초전도 한류기가 없을 때에 비해 서서히 감소하게 된다. 이에 따라 커패시터 방전이 계속되기 때문에 역 병렬 다이오드가 도통되지 않아 역 병렬 다이오드의 손상을 막을 수 있다.

초전도체의 임계전류 분포와 액체 질소로의 열 전달이

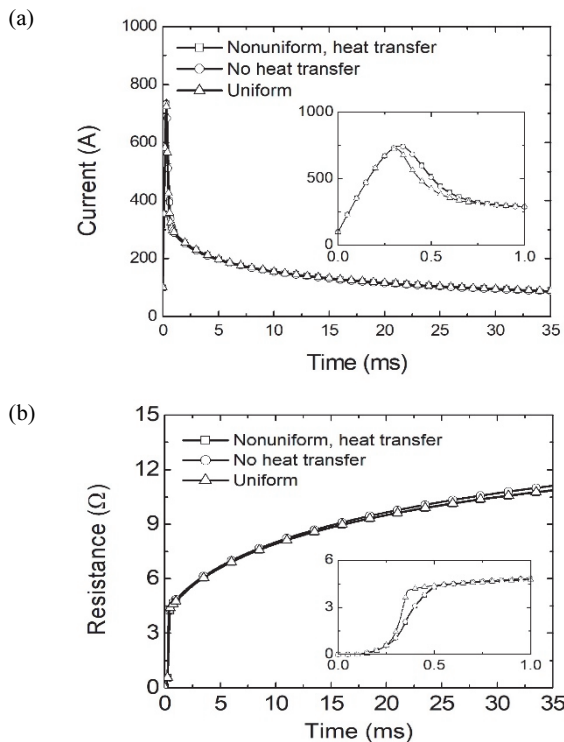


Fig. 8. Calculation results for (a) the current and (b) resistance of coated conductors under various conditions. Initial behaviors are shown in insets.

초전도 한류기의 한류 거동에 미치는 영향을 보기 위하여 임계전류가 균일한 경우와 열 전달이 없는 경우에 대하여 한류기의 전류와 저항을 계산하고 결과를 그림 8에 나타내었다. 임계전류가 균일한 경우에는 단락 직후에 다른 경우보다 저항이 빨리 증가하여 전류가 빨리 감소하는 것을 볼 수 있다. 이후에는 균일하지 않은 경우와 같아진다. 열 전달이 없는 경우에 단락 직후에는 열 전달이 있는 경우와 차이가 눈에 띄지 않다가 시간이 지남에 따라 저항이 커짐을 볼 수 있다. 임계전류 분포와 열 전달이 미치는 영향을 교류회로에서와 비교할 때, 교류 회로에서보다 직류 회로에서 영향을 덜 미치는데 이는 직류회로에서의 단락 시 전류 증가율이 더 커서 켜치 저항이 빨리 발생하기 때문으로 생각된다.

4. 결론

초전도체의 켜치 거동, 특히 켜치 초기의 거동을 모의 계산하고, 이를 이용하여 직류 회로 단락 시 직류 회로에 적용된 초전도 한류기의 한류 거동을 계산하였다. 초전도체를 모의 계산함에 있어 자속 흐름 상태의 특성, 전류 공유, 불균일한 임계전류 분포 및 주변으로의 열 전달 등을 반영하였다. 계산 결과가 측정 데이터와 잘 맞았으며 임계전류 분포는 고장 초기 거동에, 열 전달은 켜치 후 전체 기간의 거동에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이 초전도체 모델을 이용하여 교류 직류 변환기를 통하여 교류 회로에 연결된 직류 회로에 초전도 한류기를 적용한 경우의 단락 시 한류 거동을 계산하였다. 임계전류 분포와 열 전달은 교류 회로에서보다 한류 거동에 영향을 작게 미치는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 직류 계통에 적용할 초전도 한류기 설계에 활용될 예정이다.

ORCID

Hye-Rim Kim

<https://orcid.org/0009-0005-8553-8989>

REFERENCES

[1] J. Yang, J. E. Fletcher, and J. O'Reilly, *IEEE Trans. Power Delivery*, **25**, 2308 (2010). doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2044813>

[2] J. Zhu, Q. Wang, P. Chen, H. Ye, P. Huang, and Y. Yang, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **34**, 5601504 (2024). doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3420340>

- [3] M. Song, S. Dai, C. Sheng, L. Zhong, X. Duan, G. Yan, Y. Huang, L. Li, C. Chen, L. Cai, and T. Ma, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **31**, 5602307 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3079913>
- [4] N. Magnusson, A. Allais, G. Angeli, G. Bouvier, C. E. Bruzek, J. Candido, C. Creusot, M. Gammelsæter, E. Garofalo, F. Gömöry, E. Hodge, S. Holé, A. Marian, A. Morandi, W. Reiser, and B. West, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **34**, 5400205 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2023.3340646>
- [5] I. Falorio, E. A. Young, and Y. Yang, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **507**, 022004 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/507/2/022004>
- [6] S. Elschner, F. Breuer, A. Wolf, M. Noe, L. Cowey, and J. Bock, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **11**, 2507 (2001).
doi: <https://doi.org/10.1109/77.920375>
- [7] E. A. Young, C. M. Friend, and Y. Yang, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19**, 2500 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2018275>
- [8] R. F. Barron, *Cryogenic Heat Transfer*, (Taylor & Francis, Philadelphia, London, 1999), pp. 41-42, 64, 97-98.
- [9] S. H. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 407 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.4.7>
- [10] H. R. Kim, C. R. Park, S. W. Yim, S. D. Yoo, S. Y. Oh, and O. B. Hyun, *Prog. Supercond.*, **10**, 149 (2009).
- [11] B. M. Ahn, B. S. Han, H. R. Kim, and J. W. Hwang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 167 (2021).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.3.167>