

보조 선로리액터를 구비한 초전도 한류기의 한류 특성 해석

장기성*, 장재영*, 김영재*, 박동근*, 고태국*
연세대학교*

An Analysis on the Current Limiting Characteristic of Superconducting Fault Current limiter with Bypass Reactor

Ki Sung Chang*, Jae Young Jang*, Young Jae Kim*, Dong Keun Park*, Tae Kuk Ko*
Yonsei University*

Abstract - 본 연구는 과거에 개발되었던 보조 선로 리액터를 구비한 초전도 한류기에 대한 것이다. 과거의 연구에서는 BSCCO 선재와 YBCO coated conductor (YBCO CC) 선재를 사용하여 실험적으로 한류 특성에 대해서 연구 하였다 [1]. BSCCO 선재는 유도형으로 권선되어 정상 시에 저항은 작지만 인덕턴스 성분이 존재하는 보조 선로 리액터의 역할을 수행하였고 YBCO CC 선재는 무유도형으로 권선되어 스위치의 역할을 수행하였다. 두 개의 권선은 병렬로 연결되어 정상 시에는 전류가 YBCO CC 선재로 통전되다가 사고가 발생하면 YBCO CC 선재의 저항으로 인해서 BSCCO 선재로 통전되는 형태로 동작하였다. 본 연구에서는 BSCCO 선재의 보조 선로 리액터 부분을 초전도체가 아니라 일반 상전도체를 적용하여 스위치와 보조 선로 리액터의 조합에 변화를 주면서 한류 특성에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

상황 시뮬레이션이었다. 두 가지 상황에서 모두 초전도체는 simulink 프로그램에서 직접적으로 초전도체의 물성을 정확하게 표현할 수가 없었기 때문에 가변저항을 이용하여 초전도체를 표현하였다. 초전도체를 위한 가변 저항의 값을 다음과 같이 나타내었다.

$$\rho = 0, (I < I_c) \tag{1}$$

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{I}{I_c} \right)^n, (I > I_c \text{ and } R_{sc} < R_{stabilizer}) \tag{2}$$

$$\rho = \rho_{stabilizer}, (I > I_c \text{ and } R_{sc} > R_{stabilizer}) \tag{3}$$

1. 서 론

사회의 전반적인 발전과 더불어 각종 산업의 발전으로 국내외의 전력 수요는 크게 증가하였다. 이와 더불어 전력 계통에서 고장 발생 시에 흐르게 되는 고장 전류의 크기도 증가하여 기존의 차단기 외에 고장전류 대비 장치에 대한 필요성도 증가하고 있다. 이러한 상황에서 하나의 대안으로 떠오른 것이 초전도 한류기이다 [2]. 초전도 한류기의 경우 정상 시에는 저항이 존재하지 않다가 사고 발생 시에 저항을 발생시켜 사고 전류를 제한하게 된다. 초전도 한류기는 정상 시에 저항이 거의 없는 특성으로 인해서 손실이 거의 발생하지 않고 기존의 차단기보다 빠르게 사고 전류 제한 동작을 수행할 수 있다는 점에서 장점을 가지고 있다. 여러 가지 형태의 초전도 한류기 중 활발하게 개발되었던 것이 초전도체의 켄치 현상을 이용하여 초전도체의 저항으로 사고 전류를 제한하게 되는 저항형 한류기이다. 저항형 한류기는 여러 가지 장점을 가지고 있지만 사고 용량이 커질수록 켄치 이후에 다시 초전도체로 돌아오는 회복 시간이 오래 걸리게 되므로 사고 시에 재폐로를 수행하는 국내의 전력 계통에서 배전급 이상의 용량으로 개발되기가 어려웠다. 이러한 대용량 저항형 한류기의 개발을 어렵게 하는 켄치 이후의 회복시간을 감소시키는 방법으로는 크게 두 가지 방법이 있다. 한 가지는 대량의 초전도체를 사용하여 단위면적당 인가되는 전력용량을 감소시켜서 회복시키는 방법이다. 이 방법은 기기의 운전이 있어도 안정성을 높여주기 때문에 이상적이지만 초전도체의 대량 사용은 한류기 자체의 가격을 증가시키기 때문에 기기의 실제 적용은 힘들다. 다른 한 가지는 사고 전류의 제한을 초전도체가 아닌 병렬로 연결된 보조 선로 리액터를 사용하여 수행하는 것이다. 즉, 초전도체는 스위치로서의 역할만 수행하게 되고 실제 한류는 보조 선로 리액터에서 이뤄지게 된다. 이 방법은 초전도체의 사용량을 감소시킬 수 있고 사고 전류가 초전도체에 흐르지 않게 되기 때문에 회복시간의 단축도 달성할 수 있는 장점이 있다. 따라서 대용량의 초전도 한류기의 개발을 위한 기초연구로서 다양한 연구가 이뤄질 필요가 있다.

정상전류 통전 시 가변저항으로 표시한 초전도체의 저항은 0이지만, 통전전류가 임계전류보다 커지는 순간 비저항은 n-value를 따르면서 증가한다. 가변저항이 계속 증가하다 안정화제층의 저항보다 커지게 되는 순간 모든 전류는 안정화제층으로 흐른다고 가정하였다.

정확한 시뮬레이션을 위해서 전류 통전으로 인한 열 발생의 영향을 고려하여야 했으나 그것은 사고 전류의 크기나 시간에 따라서 영향이 달라지고 본 연구의 목적은 보조 선로 리액터의 존재 유무에 따른 한류 특성의 비교이므로 고려하지 않았다. 초전도 선재는 American Superconductor 社의 344 선재라고 가정했고, 안정화제의 재료는 구리로서 77 K에서의 비저항 값은 $1.72 \times 10^{-8} \Omega m$ 으로 본 시뮬레이션에서 사용된 초전도체의 고장 발생 시 발생 저항은 0.4 옴이었다. 본 연구에서 수행한 두 가지 시뮬레이션에서 초전도체의 역할은 다르다. 보조 선로 리액터를 구비한 경우에는 초전도체는 단순히 한류 동작을 시작하기 위한 스위치로서의 역할을 수행한다. 고장이 발생하여 고장 전류가 초전도체의 임계전류 (100 A로 가정) 보다 증가하면 초전도체의 켄치 발생으로 인한 저항 값이 보조 선로 리액터의 임피던스보다 커지게 되어 고장 전류는 보조 선로 리액터로 흐르기 시작하여 초전도체로의 전류는 감소하게 되면서 초전도 상태로의 회복이 일어나는 것이다. 초전도체만 있는 경우에는 고장 발생 처음부터 끝까지 고장 전류가 초전도체로만 흐르도록 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션을 위한 보조 선로 리액터의 설계는 다음과 같다. 일단 초전도체의 켄치로 인한 발생 저항 보다 작은 임피던스를 보조 선로 리액터의 전체 임피던스로 설정하고 리액터 권선에 사용된 상전도체의 특성에 따라 인덕턴스 성분과 저항 성분을 변화시켰다. 시뮬레이션에 사용된

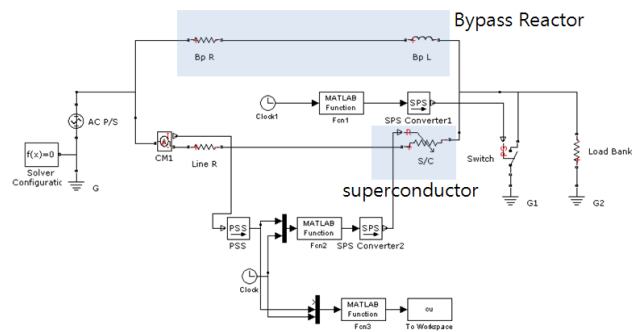
<표 1> 시뮬레이션에 사용된 보조 선로 리액터의 임피던스

상전도체 종류	저항 성분 [Ω]	인덕턴스 성분 [H]	전체 임피던스 [Ω]
구리	0.0001	1.5×10^{-5}	0.005655
스테인리스 스틸	0.0056	1×10^{-6}	0.005612

2. 본 론

2.1 시뮬레이션 설계

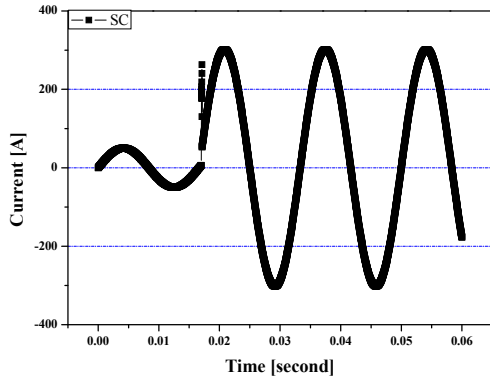
시뮬레이션은 두 종류를 수행하였다. 한 가지는 보조 선로 리액터를 구비한 초전도 한류기의 시뮬레이션으로 두 가지 리액터를 이용하였고 다른 한 가지는 대조군으로써 순수하게 초전도 한류기만을 이용한 한류



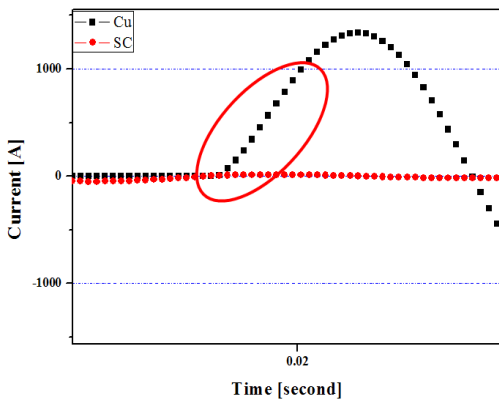
<그림 1> 시뮬레이션을 위한 회로도

리액터의 상세 임피던스는 아래 표와 같다. 구리의 경우 비저항이 상대적으로 작기 때문에 동일한 임피던스를 위해서 권선 길이를 증가할 수밖에 없고 따라서 인덕턴스 성분이 증가하게 된다. 스테인리스 스틸의 경우 구리와는 반대로 비저항이 크기 때문에 적게 권선하여도 원하는 임피던스 값을 만들 수 있기 때문에 저항 성분이 많은 부분을 차지하고 인덕턴스 성분은 상대적으로 감소하게 된다. 따라서 도체에 따른 임피던스 성분의 변화로 인한 한류 특성의 변화를 예상하였다.

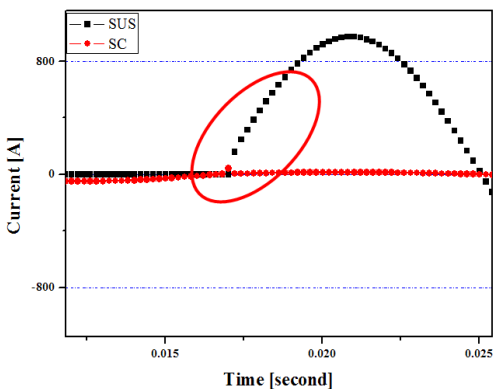
한류 시험 시뮬레이션을 위한 회로도도 그림 1과 같이 구성된다. 전원 장치, 고장이 발생하기 전에 전류가 통전되는 부하 저항은 0.3 Ω 이었고, 전체 회로의 선로 저항은 3×10^{-6} Ω 이었다. 통전되는 교류 전류의



<그림 2> 초전도체만 있는 경우의 한류 그래프



<그림 3> 구리 리액터가 있는 경우의 한류 그래프



<그림 4> 스테인리스 스틸 리액터가 있는 경우의 한류 그래프

주파수는 60 Hz이었고 고장 시간은 0.1초 (6 cycle) 이었다.

2.2 시뮬레이션 결과

본 연구의 기본적인 목적은 보조 선로 리액터가 병렬로 초전도체에 연결 되었을 때 초전도 한류기의 한류 특성이 어떻게 변화하는 가를 실제 실험에 앞서 시뮬레이션을 통해 알아보고자 하는 것이다. 이를 위해서 Simulink 프로그램을 통하여 시뮬레이션을 수행하였고 보조 선로 리액터의 유무와 보조 선로 리액터의 도체 종류에 따른 한류 특성의 변화가 그림 2-4에서 보이고 있다.

2.2.1 보조 선로 리액터의 유무에 따른 한류 특성 비교

보조 선로 리액터가 없는 경우와 있는 경우의 한류 특성을 비교 하자면 가장 확연히 들어나는 것이 임피던스의 감소로 인한 제한된 고장 전류의 크기와 초전도체에 통전되는 전류의 크기이다. 한류 성능의 저하는 고장 전류의 보조 선로를 위해서 고의적으로 리액터의 임피던스를 캔칭 상태의 초전도 부분의 임피던스보다 작게 했기 때문에 일어날 수밖에 없는 현상이다. 한류 성능이 보조 선로 리액터의 유무에 따라 감소하게 되면 좋은 한류기라 할 수 없기 때문에 한류 성능의 최적화를 위한 임피던스 크기 부분은 향후 추가 시뮬레이션과 이의 결과를 토대로 한 실제 리액터 제작 실험에서 추가적으로 연구될 것이다. 그리고 고장 전류 통전 시에 초전도체에 통전되는 전류의 크기가 리액터가 병렬로 연결됨으로써 매우 큰 폭으로 감소하였다는 것은 바이 패스 리액터의 효과를 입증해주는 것이라 할 수 있다. 본 연구에서는 다루지 못하지만 향후에 실제 실험에서는 통전 되는 전류의 크기에 따라서 변화되는 초전도체 부분의 회복시간에 대한 연구도 가능할 것으로 예상된다.

2.2.1 보조 선로 리액터의 도체에 따른 한류 특성 비교

리액터의 도체에 따른 한류 성능의 차이는 초기 임피던스의 발생 경향의 차이를 제외하고는 크지 않았다. 그림 3, 4에서 고장 발생 시에 첫 주기에서의 전류가 증가하는 기울기를 살펴보면 구리 리액터의 경우 인덕턴스 성분으로 인해서 스테인리스 스틸 리액터의 경우보다 임피던스의 발생 속도가 상대적으로 느리다는 것을 알 수 있다. 고장 전류의 크기나 기울기 발생의 차이를 고려했을 때 인덕턴스에 의한 전류 증가 속도의 차이에 의한 한류 특성의 변화는 크지 않은 것을 판단된다. 그러나 저항 성분의 차이에 의한 고장 전류의 크기에 있어서는 리액터의 종류에 따라서 차이가 발생하는데 이는 보조 선로 리액터의 단점인 임피던스의 크기 부분에서 비저항이 큰 도체를 사용하여 리액터를 제작하는 것이 한류 성능의 향상에 도움이 될 수 있다는 것을 보여준다.

3. 결 론

본 연구는 향후 보조 선로 리액터를 구비한 초전도 한류기의 연구 개발 및 제작에 앞서 기초연구로서 회로적으로 리액터의 유무와 리액터의 종류에 따른 한류 성능의 변화를 예상하기 위한 것이었다. 이를 위해서 초전도체의 저항을 가변저항을 이용하여 구현하였으며 초전도체와 병렬 연결된 리액터를 구비한 초전도 한류기를 회로적으로 구현하여 고장 발생 시의 한류 성능을 해석해보았다. 이를 통하여 초전도체만 있는 경우 보다 리액터를 구비한 경우에 한류 성능은 감소하지만 초전도체에 통전되는 전류가 '0' 에 가까워지므로써 초전도체의 회복 특성에 상당한 도움이 될 수 있음을 확인했다. 고장 발생 시 열의 축적으로 인한 정확한 임피던스의 발생 함수에 있어서 보완이 필요하지만 본 시뮬레이션을 통하여 리액터의 이용 가능성을 확인했다는 것에 본 연구의 의의가 있다. 향후 열적인 저항 발생 요인 등의 포함을 통하여 해석 프로그램의 보완 작업뿐만 아니라 실제 리액터의 제작, 실험을 통하여 실제 한류 특성 및 회복 특성에 대한 추가 연구를 통하여 보조 선로 리액터를 구비한 초전도 한류기에 대한 연구가 진행될 것이다.

감사의 글

본 결과물은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업을 통한 연세대학교 대학전력연구센터의 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Min Cheol Ahn et al., "Design and Manufacture of a Superconducting Fault Current Limiter With Bypass Reactor by Employing Two Different Types of HTS Wires", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 16, No.2, pp707-710, 2006
- [2] D. Ito et al., "6.6 kV/1.5 kA-class superconducting fault current limiter development", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 1, pp438-441, 1992