

고조파 성분을 고려한 유도형 고온초전도한류기의 동작 특성 해석

임도현, 주민석, 추용, 김한준, 고태국
연세대학교 전기공학과

The Analysis of Operational Characteristics of Inductive High-Tc Superconducting Fault Current Limiter Concerning Harmonic Component

Do-Hyon Yim, Min-Seok Joo, Yong Chu, Han-Jun Kim, Tae-Kuk Ko
Dept. of Electrical Engineering, Yonsei University

Abstract - Inductive high-Tc superconducting fault current limiter using YBCO superconducting ring in the secondary part has many advantages in power networks. It is based on the superconducting to normal transition and this paper describes its operational characteristics and experimental results, especially focused on the harmonic component analysis and recovery time. We fabricated and tested it under various conditions for the analysis of transient fault characteristics. And for the analysis of harmonics we used FFT methods. The superconducting ring was quenched in 240Arms and fault current was effectively limited to the lower current level. In addition, it was fast recovered when the fault condition was removed and after fault the system had odd harmonics.

으로 구성된 자기 결합형 고온 초전도 한류기를 직접 설계 제작 하여 전원 전압 10V의 모의 계통에 연결하고 부하측이 단락되었을 때 전류제한기의 동작 특성을 실험하였다. 출력 파형의 분석을 위해 FFT를 사용하여 고조파 성분을 분석하였고 제한기의 회복 특성 분석을 위한 실험도 병행하였다.

2. 유도형 고온초전도한류기의 동작 원리 및 재원

본 연구에서는 초전도체의 제작이 용이하고 동작특성이 좋은 자기결합형 고온초전도한류기를 모델로 설정하였다. 그 기본 모델은 다음과 같다.

1. 서 론

전기 시스템에서 사고 전류의 증가는 소자의 전기적 문제점과 열적 안정도에 큰 영향을 미치며 초전도 상태에서 상전도 상태로의 전환에 기인한 임피던스 변화를 기초로 한 소자가 초전도 한류기이다. 특히 일반 전력 계통에서의 유도형 고온초전도한류기는 사고 전류에 대한 빠른 응답 시간과 정상 상태시의 낮은 임피던스, 저렴한 냉각 비용과 빠른 회복시간등의 장점을 지닌다[1]. 이러한 전환은 전류, 자계, 온도 각각의 임계값을 초과하여 일어나며 특히 임계 온도가 90K가 넘는 고온 초전도체에 의해 제작된 전류제한기는 LN₂에서 동작하므로 종래의 LHe에서 동작하는 초전도 한류기와는 달리 경제성이 매우 높다고 할 수 있으며 일반 회로 차단기에 비해 반응 속도가 매우 빨라 회로 소자 보호에 유리하다[3]. 고온 초전도 한류기는 크게 저항형과 유도형으로 나눌 수 있고 유도형에는 자기 결합형, 자기 차폐형, 권선형이 있다[5].

본 논문은 이차측에 YBCO 초전도링을 사용하는 변압기 형태의 고온초전도한류기를 채택하였고 이것은 자기적 결합에 의해 사고시의 증가 전류가 초전도링에 상전도 전이를 발생시켜 사고 전류를 제한하는 방식이다. 제작을 위한 개념 설계 후 여러 설계 조건을 고려한 상세 설계로 적정한 설계 요소값을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻은 후 수치 해석을 통해 시스템의 동작 특성을 파악하였고 제한기의 사고시 과도 현상을 알아보기 위하여, 철심 리액터와 단락된 초전도 링

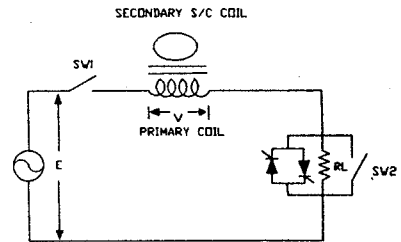


그림 1. 고온 초전도 한류기 기본 모델

1차측은 동선으로 구성하고 2차측은 단락된 고온 초전도 링으로 구성되며 이를 강자성체 코어에서 자기적으로 결합시킨다. 1차측은 회로를 직렬로 연결하여 사고전류로부터 회로 소자를 보호한다. 정상상태시는 초전도링의 저항은 없으므로 1차측 코일에서 생성된 자속은 2차측 차폐전류에 의해 한류기의 임피던스는 매우 낮아지며 이는 코일의 누설 자속과 권선 저항에 의해 결정된다. 따라서 정상 상태시의 손실은 단지 교류에서 발생하는 히스테리시스 손실과 와전류 손실이다. 사고시는 초전도 링에서 유기된 전류가 빠른 시간에 임계 전류값을 초과하여 높은 상전도 저항이 발생한다. 따라서 2차측 초전도링에서 발생한 상전도 저항은 한류기의 임피던스 증가 요인이 되고 결국 사고 전류를 제한한다. 따라서 자기 결합형 고온초전도 한류기는 가변하는 임피던스를 이용한 리미터이다. 특히 이것은 긴 고온초전도선재를 필요로 하지 않고 단지 단락된 형태의 소재가 필요하므로

전력계통에서 응용하는 문제의 접근이 용이하여지고 또한 사고전류가 흐르는 도선과 분리되어있기 때문에 직접적으로 도선과의 접촉이 문제가 되지 않는 장점이 있다.[1][2][3] 여러가지 설계조건을 고려하여 제작된 고온초전도한류기의 설계제원은 다음과 같다.

표1. 고온초전도한류기 설계치수 및 제원

parameter	Unit	
Superconducting Ring		
ϕ_e	external diameter	36mm
ϕ_i	intenal diameter	23mm
l_w	total length	92.67mm
A_w	cross section	19.6 mm ²
Core		
d_{core}	total length	356 mm
A_{core}	cross section	256 mm ²

3. 시뮬레이션을 통한 동작 특성 해석

컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻은 상세 설계값을 이용하여 제작된 고온초전도한류기의 동작특성을 파악하기 위해 FDM을 이용한 수치해석법을 사용하였으며 특성 해석을 위한 등가회로는 다음과 같다.

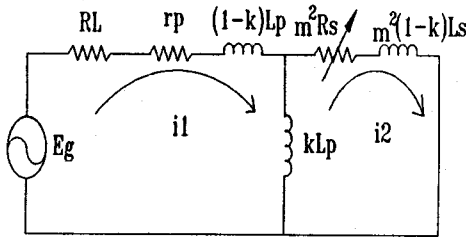


그림 2. 고온 초전도 한류기의 등가 회로도

앞의 등가회로에서 회로 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$E_g = r_p i_1 + \frac{di_1}{dt} (1-k)L_p + kL_p \frac{di_1}{dt} - kL_p \frac{di_2}{dt} + RL i_1$$

$$0 = kL_p \frac{di_2}{dt} - kL_p \frac{di_1}{dt} + m^2(1-k)L_s \frac{di_2}{dt} + m^2 R_s i_2$$

(위에서 $m = N_1 / N_2$)

입력 상수 입력 변수

- r_p : 1차측의 저항성분
- Δt : 미소계산시간
- ω : 입력전압의 주파수
- k : 결합계수
- RL : 부하저항
- R_s : 초전도 링의 저항
- N_1 : 1차측코일의 턴수
- N_2 : 2차측코일의 턴수
- L_p : 1차측의 self-inductance
- L_s : 2차측의 self-inductance
- E_g : 입력전압

시뮬레이션을 위해 $E_g=10V$, $n_1=80$, $n_2=1$, 부하 저항 2.2Ω , 사고 시간 $t_f=0.2$ 초를 대입 했을 때의 결과 그래프는 다음과 같다.

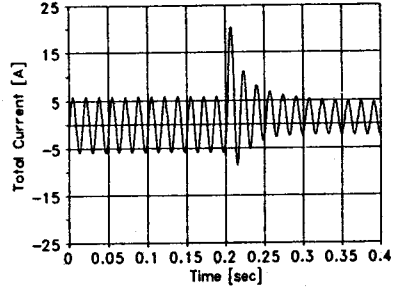


그림 3. 시뮬레이션에 의한 사고시의 전체 전류

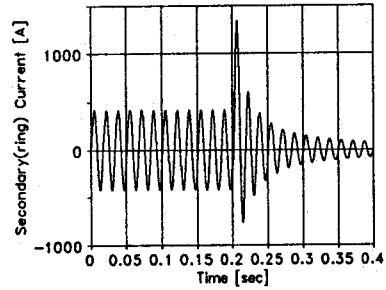


그림 4. 시뮬레이션에 의한 사고시의 초전도링 전류

4. 특성 실험 및 결과 분석

실험에 사용된 시스템에서 부하로는 2.2Ω , 5Ω , 10Ω , 18Ω 이 사용되었으며 전원 전압은 10V(실효치)를 사용하였고 측정된 값은 모두 실효값으로 처리하였다. 부하저항에 병렬로 트리거를 연결하여 사고각을 SCR의 트리거 전류로 조정하였다. 따라서 부하저항과 사고각을 조절하여 그것의 변화에 따른 특성의 변화가 어떠한지 확인할 수 있다.

4.1 고온초전도한류기의 과도 특성 해석

그림5, 그림6의 경우는 공급전압 10V, 부하저항 2.2Ω , 권선비가 80일 때 사고각에 따른 고온초전도 한류기의 1, 2차측 전류의 파형을 나타낸 그래프이다. CT에 의해 측정된 1차측 전류 즉 전체 시스템에 흐르는 전류는 사고가 발생했을 때 40A(순시값)이내로 제한됨을 볼 수 있다. 링의 전류는 자체 제작한 피업코일(Pick-up coil)에서 나오는 양단 전압으로 간접 측정한 결과인데 전류의 미분량으로 측정되는 값이므로

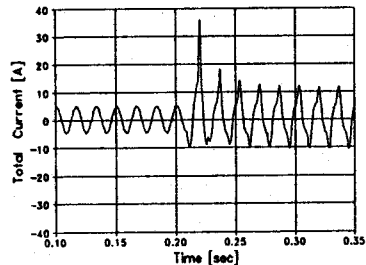


그림 5. 사고각 90도, 전체 전류(I1)

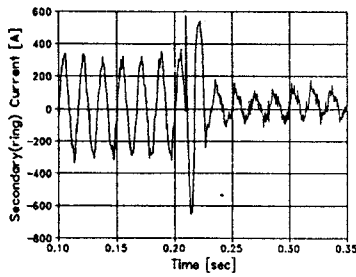


그림 6. 사고각 90도, 링의 전류(I₂)

전류가 갑자기 증가할때와 감소할 때 모두 피크치가 나타난다. 정상 상태에서의 사고전후의 전류값을 비교해보면 사고 후에 초전도 링에 흐르는 전류가 렌치에 의한 상전도 저항에 의해 감소하였음을 알 수 있다.

4.2 고온초전도한류기의 회복 특성

그림7에 고온초전도한류기의 회복 특성에 관한 결과 그래프를 나타내었다. 사고의 복구는 단락되었던 부하저항을 스위치유닛을 이용하여 순간적으로 재연결함으로써 가능하며 그때의 시스템 전체 전류를 측정함으로써 회복 특성을 파악할 수 있다. 사고후의 증가된 전류가 부하저항의 연결로 다시 줄어드는 것을 알 수 있으며 이때는 어떠한 피크치 전류도 발생치 않았다.

또한 회복되는 시간도 굉장히 빨라서 사고 복구후 바로 초전도링이 초전도 상태로 전이됨을 알 수 있다. 이것은 빠른 회복 특성을 요구하는 일반 전력 계통에 적합하다.

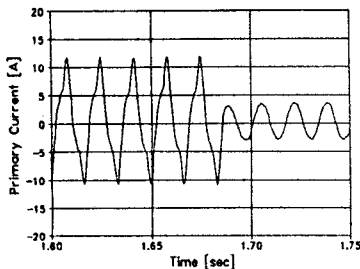


그림 7. 사고 복구시의 1차측 전류 변화

4.3 사고 전류의 고조파 성분 분석

교류발전기에서 나오는 전압은 정확히 말하면 정현파가 아니고, 공급전원이 가령 정현파라 하더라도 변압기를 통하면 철심의 포화 또는 히스테레시스에 의해서 파형은 비틀어진다. 이와 같은 파형을 왜곡파(distorted wave)라 한다. 정현파에서 일그러짐이 적을 때는 근사적으로 정현파로서 취급하나 일그러짐이 현저할때는 정현파로 취급할 수가 없다. 그림5를 보면 사고전과 사고후의 파형이 다름을 알 수 있으며 이것은 사고후의 파형이 변압기의 포화에 의해 왜곡되었기 때문이다. 따라서 FFT를 통해 출력 파형의 고조파 성분을 분석함으로써 변압기의 포화정도를 알 수 있으며 파형의 주파수 성분과 실제 데이터를 이용하여 같은 형태의 파형을

모의할 수 있다. 그림8에 FFT를 이용한 출력 파형의 주파수 성분 분석 그래프를 나타내었다. 60Hz, 180Hz, 300Hz에서 피크가 나타남을 알 수 있다.

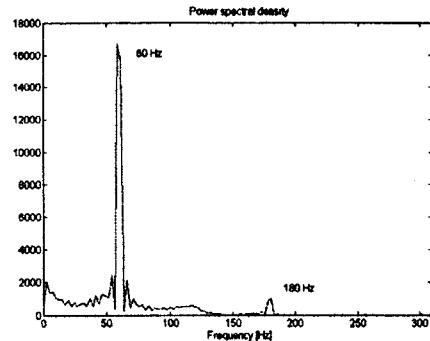


그림 8. 한류기 실제 파형의 FFT

5. 결론

고온초전도한류기를 전원에 직렬로 연결 설치할 경우 사고 발생후 1-2주기 이내로 사고전류를 제한할 수 있음을 자기 결합형 고온초전도한류기의 실제 제작 및 특성 실험을 통해 확인할 수 있었으며 사고 복구후에 빠른 회복 시간을 가짐을 알 수 있었다. 또한 사고 전류의 고조파 성분을 분석을 통해 변압기의 포화정도를 확인할 수 있었다. 이것은 기존의 차단기에 비해 반응속도가 빠를 뿐만 아니라 다른 형태의 저온초전도한류기보다 경제적 측면에서도 큰 장점을 가지고 있다. 전원전압 10V로 실험회로를 구성하였고 실험전에 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 시스템 동작 특성을 미리 파악한 후 단락사고 시험을 통해 시스템 전류와 초전도 링의 전류 파형을 확인하여 최대 200A 이상으로 추정되는 사고전류를 40-50% 이내로 제한할 수 있었다. 고온초전도한류기가 시스템 계통을 보호하는데 효과적임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] L. S. Fleishman, Yu. A. Bashkirov, "Design Considerations for An Inductive High Tc Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol.3, NO.1, pp. 570-573 March 1993
- [2] Yu. A. Bashkirov et al, "Current-Limiting Reactor Based on High Tc Superconductors", IEEE Trans on Magnetics, Vol.27, NO.2, pp. 1089-1092 March 1991
- [3] J. R. Cave, D. W. Willen, Y. Brissette, C. Richter and V. A. Arestenu, "Test Results for Laboratory Scale Inductive High Tc Superconducting Fault Current Limiter", MT-93, p 1448 Sept 1993
- [4] Gordon R. Slemon, Electric Machines and Drives, pp 51-71, Addison Wesley, 1992
- [5] R. F. Giese, M. Runde, "Assessment Study of Superconducting Fault Current Limiters Operating at 77K", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, pp. 1138-1147, July 1993