

13.2kV/630A급 고온초전도 한류코일 개발

이찬주*, 강형구*, 남관우*, 고태국**, 석복렬*

* 현대중공업(주) 기계전기연구소, ** 연세대학교 전기전자공학과

Development of 13.2kV/630A High-Tc Superconducting Fault Current Limiting Coil

Chanjoo Lee*, Hyoungku Kang*, Kwanwoo Nam*, Tae Kuk Ko**, Bok-Yeol Seok*

* Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd.

** Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University

Abstract - In this paper, the development and the test of 13.2kV/630A high-Tc superconducting fault current limiting coil are described. The fault current limiting coil made of Coated Conductor (CC) was fabricated with bifilar winding method for non-inductive characteristics and tested in the distribution power system level in Dec. 2006. In order to determine the length of the superconducting coil, applied voltage per unit length(V/m) was studied analytically and it was verified through experiments. For the volume minimization, the coil was designed with concentric arrangement method. The short-circuit test was performed with the prospective fault current of asymmetrical 10kA whose maximum fault current was 30kA_{peak}. In the test, the voltage drop and the current of the coil were measured and the resistance of the coil was obtained. Also, the temperature rise of the coil was calculated with the relationship between the resistance and the temperature of CC. In this paper, the experimental results are analyzed and compared with the simulation.

1. 서 론

고온초전도 한류기는 계통용량 증가에 따른 사고전류 대책으로서 가장 적합한 것으로 인정받아 전 세계적으로 배전계통용의 제폭화 및 송전계통용을 위한 고전압화에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다.

이미 2004년에 독일의 FZK는 10kV급 배전계통용 고온초전도 한류기를 개발하여 계통연계 시험을 성공적으로 수행하였으며[1], 110kV급 송전계통용 고온초전도 한류기 개발을 진행하고 있다. 미국의 IGC-SP는 미국 송전계통인 138kV에 적용시키기 위한 고온초전도 한류기를 개발하고 있으며, 2009년까지 시제품 개발을 목표로 하고 있다. 그 외 독일의 Siemens나 일본의 Toshiba 등 선진 중전기업체에서도 고온초전도 한류기 개발을 진행하고 있다[2]. 국내에서는 차세대초전도응용기술개발사업의 2단계 사업(2004년 7월 ~ 2007년 3월)을 통해 현대중공업과 연세대학교, 한국전력연구원과 LS산전이 각각 다른 종류의 배전계통용 고온초전도 한류기를 개발하였다. 그 중 현대중공업의 고온초전도 한류기는 세계최초로 2세대 초전도 선재인 CC를 적용시킨 것으로 2006년 12월 특성 시험을 통해 단락특성 및 절연특성을 검증하였다.

현재까지 고온초전도 한류기 개발에 널리 사용되어온 초전도 벌크와 박막의 hot spot 등의 문제를 해결하기 위하여 2세대 초전도 선재 적용에 대한 타당성을 검토한 결과, 2세대 초전도 선재의 경제성 및 한류 성능이 검증되었으며, 이에 따라 벌크나 박막 한류소자를 2세대 선재로 대체하는 방안이 강구되고 있다.

본 논문에서는 세계최초로 2세대 선재를 적용한 배전계통용 고온초전도 한류기의 한류코일 설계 및 제작 그리고 단락특성시험에 대하여 기술하였다.

2. 초전도 한류코일 설계 및 제작

2.1 초전도 한류코일 설계

초전도 한류코일의 설계요인 중 가장 중요한 두 가지는 단위길이당 인가전압(V/m)과 병렬선재 수이다. V/m는 사고가 발생하여 초전도 한류코일에 정격전압이 인가된 경우, 설계 초기조건으로 미리 정해진 동작 시간 및 온도한계 조건을 만족할 수 있도록 하는 설계요인이다. 병렬선재 수는 사고 없이 계통이 정상 운전되는 경우, 초전도 코일에 정격전류가 흐를 수 있도록 하며, 자기자장에 의한 교류손실을 최소화시키도록 하는 설계요인이다. 총 선재소요량은 V/m와 병렬선재 수를 이용하여 결정되며, 초전도 코일의 형태는 계산된 선재소요량을 이용하여 다양한 배치검토를 통해 결정된다.

2.1.1 안정화재 두께에 따른 V/m 변화

2006년 당시 2세대 선재를 대상으로 생산할 수 있는 초전도 선재 제 조사는 AMSC 외에는 없었으므로 본 한류코일을 제작할 때에는 AMSC의 2세대 선재만을 고려대상으로 하였다. AMSC의 2세대 선재는 구리를 안정화재로 하는 344 선재와 stainless steel을 안정화재로 하는 344S 선재가 있다. 선행 기초연구를 통하여 344 선재의 V/m는 안정화재 두께가 동일한 344S 선재 대비 약 2배가량 작기 때문에 한류코일 제작용으로는 344 선재보다 344S 선재가 더 적합하다는 것이 밝혀졌다[3].

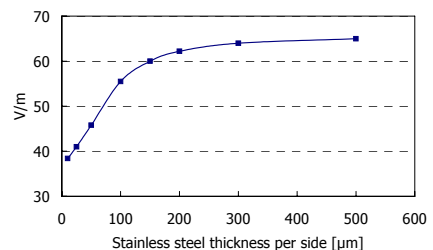
344S 선재에 사용된 stainless steel의 두께는 25 μ m/side로 매우 얇은 두께를 가지고 있다. 안정화재의 두께는 사고발생시 발생하는 열의 흡수와 관련되어 선재의 온도상승에 영향을 끼치므로 stainless steel의 두께에 따른 V/m 변화를 파악이 중요하다.

그림 1은 한계온도 300K과 동작시간 100msec의 조건 하에서 한 면의 안정화재의 두께에 따른 V/m의 변화를 보여주는 그림이다. 그림에서 보이는 것처럼 안정화재의 두께가 두꺼울수록 V/m가 증가하다가 100 μ m 이상에서는 포화되기 시작하는 것을 알 수 있다. 이는 선재의 V/m를 결정하는 요인 중 선재를 구성하는 여러 물질의 등가합인 등가비저항과 등가비열이 stainless steel의 두께가 증가함에 따라 각각 stainless steel의 비저항 및 비열에 가까워지기 때문으로 판단된다. 또한 stainless steel의 두께가 두꺼워지면 초전도 선재의 bending이 어려워지는 것을 감안하여 stainless steel의 두께를 결정하여야 한다. 따라서 stainless steel의 두께는 한 면당 150 μ m~200 μ m가 적당한 것으로 판단되나, AMSC의 344S 선재는 기본적으로 25 μ m 두께의 stainless steel을 안정화재로 하므로 본 초전도 한류코일 개발에서는 25 μ m의 stainless steel을 안정화재로 하는 344S 선재를 사용하기로 하였다. AMSC의 344S 선재의 V/m는 약 40로 계산되었으며, 이에 따라 선재 하나의 길이는 약 330m로 결정되었다.

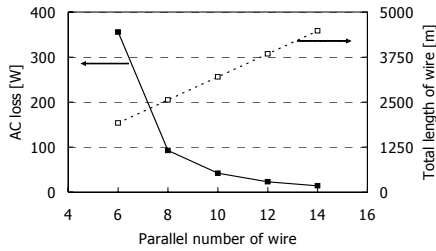
2.1.2 정상상태 전류통전 및 교류손실을 고려한 병렬선재 수

본 연구를 통해 개발된 고온초전도 한류기의 정격전류는 630A이며, 344S 선재의 65K에서의 임계전류는 약 150A이므로 최소한 6개의 선재가 병렬로 연결되어야 정상상태에서의 전류통전이 가능하다. 또한, 고온 초전도 전력기기의 운전 및 유지 측면에서 초전도체의 교류손실은 매우 중요하다. 초전도체의 교류손실은 외부자장에 의한 자화손실과 자기자장에 의한 통전손실로 나뉘는데, 본 연구를 통해 개발된 고온초전도 한류코일은 무유도성이므로 자기자장에 의한 손실만 존재한다고 할 수 있다 [4]. 따라서 Norris 방정식을 이용하여 교류손실을 계산할 수 있다.

Norris 방정식 중 tape 형태의 단면을 갖는 교류손실 계산식을 이용하여 병렬선재 수에 따른 교류손실을 계산하여 그림 2와 같은 결과를 얻었다. 병렬선재 수가 8이상에서부터 교류손실은 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 총 선재소요량은 앞 절에서 선재 하나의 길이를 330m로 정하였으므로, 병렬선재 수에 비례하여 증가하게 된다. 2006년 당시 선재수급과 교류손실을 고려하여 병렬선재 수를 8로 결정하였으며, 이에 따라



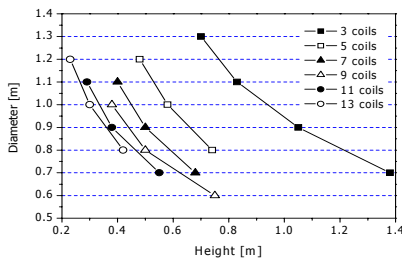
<그림 1> stainless steel 안정화재 두께에 따른 V/m



〈그림 2〉 병렬선재 수에 따른 교류손실 및 총 선재소요량

〈표 1〉 고온초전도 한류코일 설계 파라미터

symbol (constants)	내용 [값]	symbol (variables)	내용
P	병렬선재 수 [8]	k	코일 개수
w	선재 폭 [4.6mm]	D	최외각 코일 직경
t	선재사이 폭 [2mm]	n	선재 1개의 턴 수
d	코일 간격 [2.5cm]	R_0	최내각 코일 반경
L	직렬선재 길이 [330m]	h	코일 높이



〈그림 3〉 코일 수에 따른 코일 높이와 직경

총 선재소요량은 2640m, 초전도 코일의 교류손실은 약 100W가 되었다.

2.2 초전도 한류코일 크기 결정

초전도 한류코일 설계를 위하여 설계변수를 설정하고 이에 대한 지배방정식을 수립하였다. 표 1과 같이 설정된 설계변수와 수식 (1)과 같은 지배방정식을 이용하여 그림 3과 같은 코일 개수에 따른 초전도 한류코일의 높이와 직경을 구하였다.

$$k = \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{R_0}{d}\right)^2 + \frac{L}{\pi n d}} + \frac{1}{2} - \frac{R_0}{d}, \quad n = \frac{2(h-w)}{P(w+t)} \quad (1)$$

코일 크기의 계산 결과, 코일 수가 많아질수록 높이와 직경이 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있었다. 그러나 코일 수 증가는 상전도 연결부의 증가에 따른 정상상태에서의 손실 증가, 그리고 제작의 난해함, 제작비용 증가 등의 문제를 발생시킨다. 따라서 초전도 코일의 수를 7개로 하고, 그 경우 중 초전도 코일의 높이가 0.5m, 초전도 코일의 최외각 직경이 0.9m인 경우를 최종적으로 선택하였다.

2.3 초전도 한류코일 제작 및 기본특성 측정

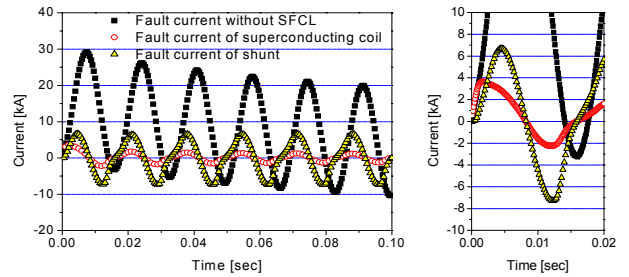
초전도 권선용 보빈은 Glass Fiber-Reinforced Plastics (GFRP) 재질로 되어 있으며, 양방향 권선이 가능하도록 특수한 형태로 제작되었다. 초전도 선재 권선용 권선기를 이용하여 보빈에 내측 초전도 선재를 권선한 후 전기적 절연을 위해 Kapton tape을 시공하였다. 그 후 외측 선재를 권선하여 초전도 코일을 제작하였다. 각 코일을 제작한 후 인듐 foil과 구리 블록을 사용하여 코일 단자들을 연결하여 직병렬 구조를 완성하였다. 초전도 코일이 완성된 후 상온에서 저항과 인덕턴스를 측정한 결과, 각각 13Ω, 0.5μH로 측정되어 우수한 무유도 특성을 확인하였다.

3. 초전도 한류코일의 단락특성 시험 및 해석결과 비교

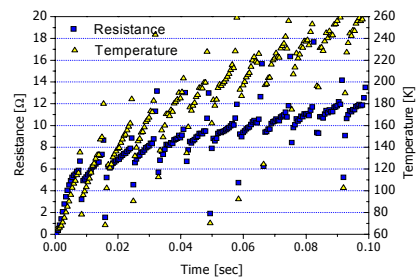
고온초전도 한류기는 제작된 초전도 한류코일을 냉각시스템과 결합시켜 완성되었고, 2006년 12월 한국전기연구원 대전력 시험동에서 고온초전도 한류기의 단락특성 시험을 수행하였다.

3.1 단락특성 시험결과

단락특성 시험결과, 사고 후 1/4 주기 내에 약 4Ω의 저항이 발생하였고, 사고발생 100msec 후에는 약 11.8Ω의 저항이 발생하였다. 이를 온도로 환산하면 사고발생 초기 1/4 주기 내에 CC의 초전도 소재인 YBCO의 임계온도 92K을 넘게 되고, 100msec 후에는 약 240K까지의 온도상



〈그림 4〉 단락특성 시험 전류파형



〈그림 5〉 단락특성 시험 저항 및 온도파형

승이 일어났다. 이에 따라 최대 30kA_{peak}의 사고전류는 고온초전도 한류기에 의해 3.6kA_{peak}로 제한됨을 알 수 있었다. 계통의 보호협조와 관련하여 사고시 1.5~2Ω의 저항발생이 적당하다는 연구결과[5]에 의하여 본 시험에서는 2Ω의 셉트저항을 한류기와 병렬로 설치하였는데, 그에 따라 셉트저항에는 약 4.5kA의 전류가 흐르는 것을 알 수 있었다.

3.2 단락특성 시험결과와 해석결과의 비교

한류코일 설계를 위한 해석결과에서는 사고발생 100msec 후의 저항 및 온도는 각각 약 13Ω과 약 300K로 계산되었다. 시험결과와 해석결과의 차이는 실제 제작시 소요된 선재길이와 설계와는 약간 다르기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 또한, 고온초전도 한류코일을 설계할 때, 사고 동안에는 모든 전압이 고온초전도 한류코일에 인가된다고 가정하였기 때문에 실제 시험에서 나타나는 시험용 변압기의 2차측의 전압강하가 고려되지 않았기 때문으로 판단된다. 다시 말하면, 고온초전도 한류코일은 온도에 대한 여유분을 고려하여 설계되었다고 말할 수 있다. 사고시 실제로 한류기에 인가된 전압과 실제 선재소요량을 이용하여 해석한 결과, 사고발생 100msec 후의 저항이 약 11Ω으로 시험결과와 해석결과는 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 고온초전도 한류기용 한류코일의 설계 및 제작과 그에 대한 단락시험결과를 해석결과와 비교하여 설명하였다. 설계와 시험의 비교 결과, 서로 일치하는 것으로 보아 한류코일의 설계 및 그에 대한 해석방법은 타당하다고 판단된다. 본 논문의 결과는 초전도한류기용 무유도 코일설계 외에도 CC를 이용한 다양한 코일 설계, 특히 코일 렌치에 의한 현상해석 등에도 응용이 가능하다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Kreutz, J. Bock, F. Breuer, K. -P. Juenst, M. Kleimaier, H. -U. Klein, D. Krischel, M. Noe, R. Steingass, and K. -H. Weck, "System Technology and Test of CURL 10, a 10kV, 10MVA Resistive High-Tc Fault Current Limiter," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, pp. 1961-1964, June 2005.
- [2] M. Noe and M. Steurer, "High-Temperature Superconductor Fault Current Limiter: Concepts, Applications and Development Status," Supercond. Sci. Technol., vol. 20, no. 4, pp. R15-R29, March 2007.
- [3] 이창주, 남관우, 강형구, 고태국, 석복렬, "YBCO Coated Conductor의 과전류 특성해석", 대한전기학회 하계학술대회 학술대회 논문집, B권, pp. 693-694, 2006년 7월.
- [4] K. S. Chang, S. E. Yang, D. H. Jang, D. K. Park, M. C. Ahn, K. Sim, H. Kang, B. Y. Seok, and T. K. Ko, "AC Loss Measurement of Bifilarly Wound Magnet using Coated Conductor," Applied Superconductivity Conference 2006, poster no. 4LL06, Sept. 2006.
- [5] 이승렬, 김종률, 윤계영, "초전도기기 주요 파라미터 선정에 관한 연구", 한국초전도·저온공학회논문지, 8권, 1호, pp. 34-38, 2006년 3월.