

권선형태에 따른 초전도 마그네트 시스템 특성 및 고자장 적용 기술에 관한 연구

양성은*, 고태국**

한국전력공사 전력연구원*, 연세대**

A Study on the Characteristics of HTS Magnet System with Respect to Winding Method and the Applicable Technology for High Field Magnet

Seong Eun Yang*, Tae Kuk Ko**

KEPCO Research Institute*, Yonsei University**

Abstract - 세계가 점차적으로 “전화(電化)”됨에 따라 전기 에너지의 효과적인 분배와 사용이 급격히 중요하게 되었다. 일반 도체를 통한 전류의 흐름은 도체의 저항에 의해 줄열을 발생시켜 전기 에너지의 손실을 일으키고 결국은 에너지와 경제적 자원의 낭비를 초래하게 된다. 초전도체의 저항은 직류 전류에서는 0, 교류 전류에서는 거의 0이기 때문에 초전도체를 이용하면 전력 소자 및 기기의 부피와 무게를 현저히 줄일 수 있는 반면에 모든 전기 시스템의 효율을 향상시킬 수 있고, 에너지 사용의 절감에 따라 환경 문제에 도움을 줄 수 있다.

사고 전류 제한기의 설계에 있어서, 권선형태에 따른 솔레노이드 마그네트와 팬케이크 마그네트를 설계, 제작하여 자장 특성 및 한류 특성을 비교 하였다. 2세대 고온 초전도 선재로 불리는 YBCO 박막형 초전도 선재를 이용하여 동작 전류 증대를 위한 다병렬 솔레노이드 마그네트와 다병렬 팬케이크 마그네트를 제작하였다. 이를 이용하여 440 V/ 630 A 급 초전도 사고 전류 제한기와 2 kA 급 대전류 통전 사고 전류 제한 모듈을 설계, 제작하여 단락 특성 시험을 수행하였다.

한편, 자장 응용 기기에 적용 가능한 더블 팬케이크 마그네트를 제 2세대 초전도선재를 이용하여 설계, 시작하였다. 2세대 선재는 1세대 선재에 비하여 20 T 이상의 외부 자장에 대한 특성이 우수하여 고자장 마그네트 시스템에 더욱 적합하다. 이에 초전도 마그네트 보호를 위한 상전도 영역 전파 실험을 수행하여 CC 선재의 안정도를 측정하였다. 또한 연구전류모드 운전과 플렉스 펄스를 통한 전류 충전에 대한 연구도 병행하였다.

1. 서 론

1990년대 BSCCO 선재가 PIT(Powder In Tube) 공법으로 제작되어 처음으로 고온초전도체의 상용화에 성공하고, YBCO Coated Conductor(CC)가 개발되어 고온 초전도체의 성능을 급격히 향상시킴에 따라 고온초전도 마그네트의 연구가 다양한 분야에서 집중적으로 이루어졌다. 초전도 선재의 전류 밀도가 높아 대전류를 흘릴 수 있어서 소형의 초전도 마그네트가 고밀도 고균등 자장을 생성할 수 있다. 그래서 초전도 마그네트는 SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), MRI (Magnetic Resonance Imaging), 초전도 핵융합 장치, NMR (Nuclear Magnetic resonance), MAGLEV(superconducting magnetically levitated Vehicles), 초전도 사고전류 제한기 (superconducting fault current limiter)[1], 초전도 발전기 및 모터, 초전도 변압기 등에 적용하려는 연구가 진행되고 있다.

일반적으로 안정적인 운전을 위하여 초전도 마그네트 시스템의 임계 전류는 동작 전류보다 크게 제작되며, 대용량의 전류를 안정적으로 통전시키기 위해서는 초전도 마그네트를 제작할 때 권선, 전기 절연, 열적 안정성, 인덕턴스 등을 고려하여 제작되어야 한다[2]. 전력기에 적용 가능한 초전도 마그네트 시스템의 성공적인 개발을 위해서는, 초전도 마그네트를 설계, 제작 할 때 적용 분야에 따라 권선법 및 냉각 방식에 대한 고려가 필요하다. 더블 팬케이크 (Double-pancake) 마그네트는 솔레노이드(Solenoid) 마그네트에 비해 동일한 선재를 사용할 때 작은 부피로 큰 인덕턴스를 가질 수 있게 제작할 수 있다. 하지만 고전압 전력 기기에 사용되기에는 전기 절연 측면에서 고온 초전도 선재가 테이프 형상이기 때문에 모서리에서 집중되는 전계로 인하여 불리한 측면이 있다. 이에 비해 솔레노이드 마그네트는 보빈의 홈에 권선되기 때문에 절연적 측면과 냉각 측면에서 장점을 갖는다. 이렇듯 초전도 마그네트 시스템은 적용 분야에 따라 솔레노이드 마그네트와 더블 팬케이크 마그네트를 선택하여 제작하게 된다. 본 논문에서는 현재까지 상용화된 고온초전도 선재인 BSCCO선재와 YBCO CC를 이용하여 솔레노이드 및 팬케이크 마그네트를 설계, 제작하고 실험을 통하여 전력기기의 적용가능성에 대해서 연구하였다.

2. 고온 초전도 마그네트 시스템의 요소 특성

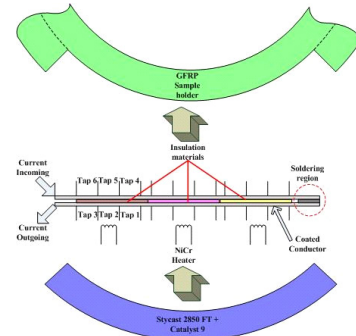
2.1 고온 초전도 선재의 접합 연구

현재 높은 임계전류밀도를 갖고 선재의 균일성이 좋은 2세대 초전도 선재의 개발이 진행되고 있다. 하지만 장선의 초전도 선재 개발은 아직 많은 어려움이 있는 상태이다. 따라서 2세대 초전도 선재를 이용하여 다양한 형태의 마그네트의 제작이나 전력 응용기기를 만들기 위해서는 초전도 선재 간의 접합이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 안정화층을 제거하여 초전도층간의 접합 저항을 최소화할 수 있는 방안을 사용하여 선재의 접합을 연구하였으며, 실험의 결과 접합 저항은 10~20nΩ 이었다.

2.2 초전도 선재의 NZP

고온 초전도체는 저온 초전도체에 비해 임계온도가 높아서 실제 사용되는 동작 온도도 높을 뿐 아니라 초전도 재료 자체의 비열 역시 크다. 그래서 퀘치가 발생되기 위한 최소 퀘치 에너지가 커서 안정성 측면에서 유리하다. 그러나 열에 의한 상전도 영역 전파속도는 느리기 때문에 국부 영역에서 발열에 의해 퀘치가 발생되면 그 발열 지점의 열을 빠르게 제거시켜 주지 못하므로 집중적인 온도 상승이 일어나서 선재에 손상을 입힐 수 있어서 초전도 선재를 사용하는 고온 초전도 시스템의 안정성을 감소시킬 수 있다. 따라서 2세대 초전도 선재의 상전도 영역 전파(Normal Zone Propagation) 특성을 연구하는 것은 고온 초전도 마그네트의 안정적인 동작을 위한 기초 해석으로 중요한 역할을 한다.

그림 1은 초전도 선재의 NZP를 측정하기 위한 실험 구성도이며, 표 1은 통전전류가 Ic의 50%일 때 NZP 속도이다. 표에서 알수 있듯이 NZP 속도가 저온초전도체에 비해 매우 느려서 국부적 열발생에 의한 초전도 선재의 퀘치를 검출하는 기법이 요구된다.



〈그림 1〉 샘플과 샘플 홀더의 구성도

〈표 1〉 통전전류가 50% 일 때 NZP 속도

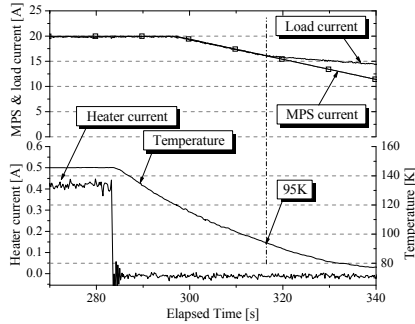
Insulation Material	Velocity of First NZP (cm/s)	
	Tap 2 → Tap 3	Tap 5 → Tap 6
PPLP	0.54	0.65
Kapton	0.44	0.5
Kraft	0.64	0.9

3. 초전도 마그네트의 고자장 적용 기술

3.1 연구전류모드 운전 및 플렉스 펄싱

고온 초전도 PCS 시스템은 다음과 같이 제작하였다. PCS와 마그네트 부하는 폭과 두께가 각각 4.4 mm와 0.2 mm인 344 선재를 이용하여 제작되었다. PCS의 제작 방법은 다음과 같다. MC 나일론으로 이루어진 보빈의 가장 안쪽에 비저항이 33 μΩ/m이고 길이가 약 3.24 m인 니켈-크롬 합금의 히터를 1층으로 감은 뒤, 그 위에 길이가 약 1.36 m인 344 선재를 2층으로 총 4회 감았으며, 히터에 의하여 발생된 열이 액체

질소로 대류가 되는 것을 최소화함으로써 초전도 선재에 상전도 영역을 발생시키기 용이하도록 테프론 테이프를 감고 폴리우레탄 폼을 차례로 도포하였다. 자속 밀도를 측정하기 위하여 고온 초전도 마그네트 부하의 중앙에 홀 센서를 설치하였고, 열적으로 제어되는 PCS의 온도를 측정하기 위하여 열전대를 초전도 선재와 테프론 테이프 사이에 설치하였다.

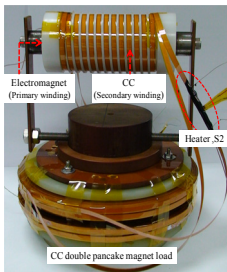


〈그림 2〉 PCS 시스템의 운전 실험 결과

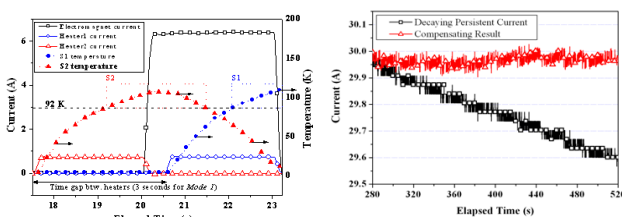
그림 2는 히터에 공급되는 전류를 차단한 후에 MPS로부터 공급되는 전류를 감소시켰을 때, PCS의 온도변화와 그에 따른 부하전류의 변화를 나타내는 실험결과이다. 히터에 공급되는 전류를 차단하였음에도 불구하고 PCS의 온도가 초전도 선재의 임계전류인 95K 이하로 충분히 낮아져서 초전도 상태로 회복되기 이전에 MPS 전류를 감소시키는 운전방식이 부하전류의 급격한 감쇠의 원인으로 작용하였음을 그림 2는 잘 보여주고 있다.

3.2 플렉스 펌핑을 통한 전류 보상

CC는 BSCCO 선재에 비하여 높은 n-value와 외부자기장에 대해 임계 전류 감소가 작기 때문에 고자장 마그네트에 적용하기에 훨씬 유리한 측면이 있다. Superpower 사의 SCS4050 선재를 이용하여 플렉스 펌핑을 위한 시스템을 구성하였다. 그림 3은 제작한 파워 서플라이이다. 이 시스템은 CC를 이용하여 제작한 더블 팬케이크 마그네트와 히트트리거 스위치 S1으로 이루어진 폐회로 1과 1차측은 구리, 2차측은 CC로 제작된 변압기와 히트트리거 스위치 S2의 두 부분으로 이루어져있다. 그림 4의 시퀀스 제어기를 통하여 선재의 접합 저항으로 인하여 감소하는 전류를 플렉스 펌핑을 통하여 보상하였다.



〈그림 3〉 플렉스 펌핑 시스템

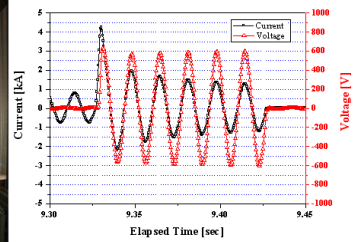


〈그림 4〉 플렉스 펌핑 제어 방식과 전류 보상

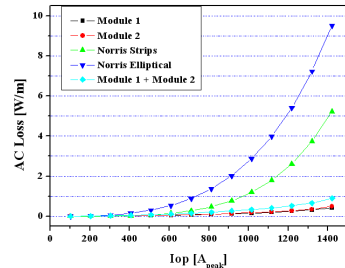
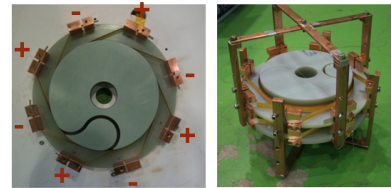
4. 권선형태에 따른 마그네트 특성

일반적으로 고온 초전도선재를 이용하여 마그네트를 제작하는 방식은 팬케이크 방식과 솔레노이드 방식이 있다. 두 형태 모두 고온 초전도선재의 단면이 사각형태인 것을 이용하여 권선하는데, 팬케이크 형태의 권선은 권선의 가장 안쪽 면만 보빈에 권선된 후 그 위로 겹쳐서 권선하는 방식이다. 반면에 솔레노이드 형태는 모든 선재 면이 보빈을 따라서

권선되는 형태로서 일반적인 마그네트의 권선에 많이 이용되는 권선형태이다. 그림 5는 344S 선재를 이용하여 제작한 440 V /630A 급 초전도 한류코일이다. 총 사용한 선재는 88 m이며, 3개의 솔레노이드 모듈로 구성되었다. 그림 5의 그래프는 단락실험 결과이다. 인가전압이 440V일 때 사고전류를 제한하는 것을 볼 수 있다.



〈그림 5〉 440V/630A급 초전도 마그네트



〈그림 6〉 220V/2kA급 초전도 마그네트

그림 6은 4병렬 팬케이크 마그네트이다. 모듈 하나의 임계전류는 1 kA이며, 모듈 두 개를 병렬 연결하여 동작시키기 때문에 완성된 한류코일은 2 kA의 임계전류를 갖는다. 그림에서 표시된 +와 - 표시는 전류의 흐름을 나타낸다. 선재를 권선할 때는 초전도층이 서로 마주볼 수 있도록 권선하는 것이 중요하다. 이렇게 권선하는 방법을 “Anti-parallel” 권선 방법이라고 하며, 이렇게 선재를 권선하면, 교류 손실이 훨씬 줄어든다. 그림6의 그래프는 2kA 급 초전도 마그네트의 교류손실 결과이다. 일반적인 권선방법에 의해 발생하는 손실보다 훨씬 줄어드는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 전기기기의 효율성 증대를 기대할 수 있는 고온 초전도 마그네트 시스템에 관한 것이다. 고온 초전도 마그네트 개발에 핵심 요소인 초전도 마그네트의 설계, 제작과 특성 실험을 수행하였다. 무유도 다병렬 솔레노이드 마그네트와 무유도 다병렬 팬케이크 마그네트를 개발하여 초전도 사고 전류 제한기에 적용 가능성을 연구하였고, 고온 초전도 더블 팬케이크 마그네트를 이용한 영구 전류 모드 시스템의 동작 특성을 연구하였다. 2세대 고온 초전도 선재인 YBCO coated conductor를 이용한 다병렬 솔레노이드 마그네트와 다병렬 팬케이크 마그네트의 특성을 연구하고, 제작하였다. 이를 이용하여 440 V/630A 급 초전도 사고 전류 제한기를 제작하고 단락 특성 실험을 통하여 사고 전류 제한을 확인하였다. 다병렬 팬케이크 마그네트 권선을 이용하여 임계 전류가 2 kA 인 대전류 통전이 가능한 사고 전류 제한기 용 마그네트를 개발하였으며, 교류 손실을 측정하여, 신배전 계통에 적용 가능성을 검토하였다.

[참 고 문 헌]

[1] E. Leung, “Superconducting fault current limiters”, IEEE Power Engineering Review, vol. 20, no. 8, pp. 15-18, 2000.
 [2] Duck Kweon Bae, “Characteristic analysis of solid materials for electrical insulation of HTS magnets,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 14, no. 2, pp. 1189-1193, 2004.