

### 5 MJ SMES용 고온초전도 마그넷 설계

이세연\*, 김영일\*, 박상호\*, 이지광\*\*\*, 배준한\*\*\*\*, 성기철\*\*\*\*, 최경달\*, 한승엽\*\*  
 한국산업기술대학교\*, 서울대학교\*\*, 우석대학교\*\*\*, 한국전기연구원\*\*\*\*

### Design of an High Temperature Superconducting Magnet for a 5 MJ SMES

Seyeon Lee\*, Yungil Kim\*, Sang Ho Park, Ji-Kwang Lee, Joon-Han Bae, Ki-Chul Seong, Kyeongdal Choi, Songyop Hahn  
 Korean Polytechnic University\*, Seoul National University\*\*, Woosuk University\*\*\*, Korea Electrotechnology Research Institute\*\*\*\*

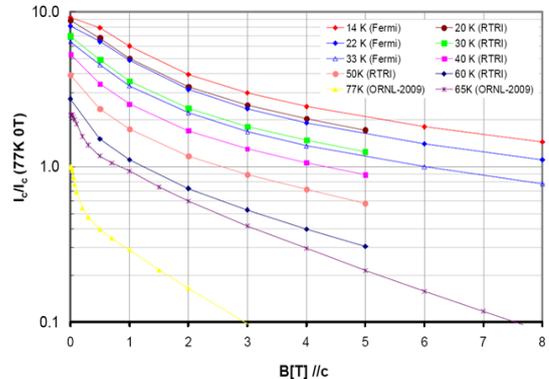
**Abstract** - 본 논문은 5 MJ의 저장용량을 가지는 초전도 에너지 저장장치용(Superconducting Magnetic Energy Storage System, SMES) 마그넷의 설계에 관한 연구 결과이다. 마그넷의 설계에 사용된 초전도 선재는 2세대 고온초전도 선재인 YBCO CC이고, 초전도 선재의 냉각방식은 냉동기를 이용한 전도냉각으로 마그넷의 운전온도는 14 K 이다. SMES용 마그넷은 테이프형태를 가지고 있는 초전도 선재의 형태를 고려하여 팬케이크 코일로 권선된 모듈코일을 이용하여 토로이드 형태의 마그넷 구조로 설계되었다. 설계를 통해 마그넷의 저장에너지와 초전도 선재의 사용량, 자속밀도 분포 등을 확인하였다.

〈표 1〉 설계에 사용된 HTS 선재 사양

Critical current (at 77 K, self field)	323 [A]
Thickness (t, Kapton insulated)	0.38 [mm]
Width (w, Kapton insulated)	12.2 [mm]
Insulation Thickness [mm]	0.025 [mm]

### 1. 서 론

전력기기에 대한 최근의 사회적 요구는 친환경, 고효율로 기기의 개발이다. 초전도 전력기기의 경우 현재 이러한 사회적인 환경과 더불어 고온 초전도 선재의 국내 자체 개발 성공과 맞물려 국내 여러 연구기관을 통해 폭넓은 연구가 진행되고 있다. 초전도 케이블과 초전도 환류기의 경우 현재 상용화를 목표로 실증시험을 진행하고 있고, 이외에도 고온 초전도 선재를 이용한 초전도 에너지 저장장치와 초전도 모터의 개발도 활발하게 진행되고 있다[1]-[3]. 이중 초전도 에너지 저장장치는 기존의 에너지 저장시스템들에 비해 높은 에너지 저장효율과 고속의 응답특성이라는 장점을 가지고 있다. 이러한 고속 응답특성은 공급 측에서는 계통의 안정과 및 대용량의 부하를 보상할 수 있고 부하 측에서는 순간정전 및 순간전압 강하와 같은 전력품질의 문제를 해결할 수 있으며 반복적인 충.방전에 의한 열화가 적기 때문에 사용빈도가 높은 변동부하를 보상하거나 최근 폭넓은 연구가 진행되고 있는 태양광, 풍력 등 변동이 심한 전원의 안정화에 이용될 수 있어 국내외에서 다양한 연구가 진행되고 있다. 국내에서는 과거 600 kJ의 저장 용량을 가지는 솔레노이드 타입 SMES의 개발을 완료하였고, 현재 2.5 MJ의 저장용량을 가지는 SMES 시스템의 개발을 진행하고 있다[4][5]. 본 논문에서는 차후 진행될 5 MJ SMES 시스템 개발의 선행연구로 5 MJ의 저장용량을 가지는 초전도 마그넷의 설계를 진행하였다. SMES 시스템은 크게 초전도 마그넷과 초전도 마그넷을 수용하는 극저온유지 장치 그리고 마그넷의 단자를 외부로 인출하는 전류도입부와 전력계통으로부터 전력을 변환하여 공급하는 전력변환기로 구성되어 있다. 본 논문에서는 이러한 SMES 시스템을 구성하는 주요 부분들 중 초전도 마그넷을 고온초전도 선재를 이용하여 설계하고 설계 결과에 대한 검토를 진행하였다.



〈그림 2〉 초전도 선재의 수직자장에 따른 임계전류의 감소특성

### 2. 본 론

#### 2.1 고온 초전도 선재

5 MJ SMES 용 마그넷의 설계에 사용된 선재는 SuperPower에서 제작된 YBCO CC로 선재의 제원은 표 1에 나타내었다. 초전도 선재의 턴간 절연은 폴리이미드 필름이 사용되었다. 초전도 선재의 단면의 모습을 그림 1에 나타내었다. 초전도 선재는 운전되는 상황에 따라 임계전류의 차이가 발생할 수 있는데, 이로 인해 주위의 온도와 자기장 환경에 따른 전류 통전 성능의 차이가 발생한다. 따라서 설계 시 운전온도와 외부 자속밀도에 따른 선재의 임계전류 특성 확인이 반드시 필요하다. 초전도 선재의 온도와 수직방향 자속밀도에 의한 임계전류의 감소특성을 그림 2에 나타내었다. 설계 시 마그넷의 운전온도는 초전도 선재의 효율을 높이기 위해 14 K 로 가정하였다.

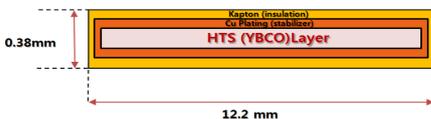
#### 2.2 고온 초전도 마그넷의 형상선정

마그넷의 설계는 초전도 코일의 형상을 선정하고 선정된 코일 형상에 대한 설계의 순서로 진행하였다. 아직까지 고온 초전도 선재는 높은 가격이기 때문에 전체 시스템의 제작에 선재구입 부분이 가장 많은 예산이 소요되는 상황이다. 따라서 마그넷의 설계는 고온 초전도 선재 사용량의 최소화를 목표로 진행되었다. 일반적으로 SMES용 마그넷의 형상으로는 싱글 솔레노이드와 멀티폴 솔레노이드 그리고 토로이드의 형태가 있다. 솔레노이드는 초전도 선재를 이용하여 제작할 때 세 가지 코일 중 제작이 가장 쉬운 형태이지만 누설자속이 가장 큰 형태이다. 따라서 추가적으로 누설자속의 차폐가 필요하고 설치된 자속 차폐물을 포함할 경우 시스템의 부피가 늘어나는 원인이 될 수 있다. 멀티폴 솔레노이드는 싱글 솔레노이드의 병렬배치를 통해 누설자속을 감소시킬 수 있는 구조적인 설계가 가능하지만 상대적으로 초전도선재의 사용량이 세 가지 코일 형태 중 가장 많고 에너지밀도가 낮은 구조라는 단점이 있다. 토로이드의 경우 다른 두 가지 코일의 형태에 비해 초전도 선재를 이용하여 제작하는 것이 어렵지만 구조적으로 누설자속이 매우 작고 마그넷의 부피가 작다는 장점을 가지고 있다[6]-[8].

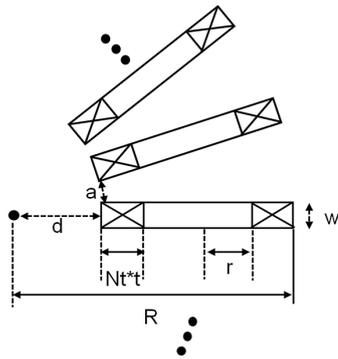
토로이드의 경우 코일에서 발생하는 자속밀도의 대부분이 코일의 내부 보어에만 존재하기 때문에 초전도 선재의 성능에 큰 영향을 미치는 권선부에 인가되는 수직방향 자속밀도의 크기가 솔레노이드 형태에 비해 작다. 이러한 자장환경에서는 초전도 선재에 높은 임계전류를 활용할 수 있게 하기 때문에 초전도 선재의 효율 측면에서 유리하므로 설계에 따라 상대적으로 적은 선재 사용량으로 마그넷을 설계할 수 있다[5].

〈표 2〉 마그넷의 설계 조건

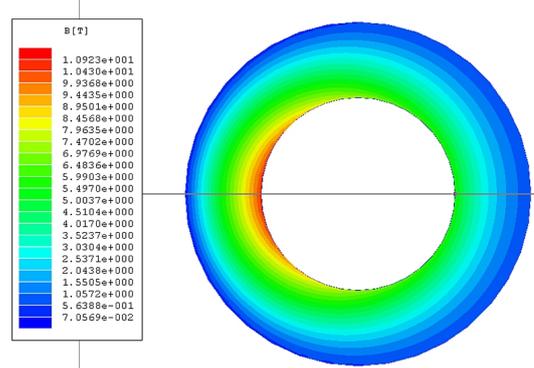
Material	YBCO CC
Stored Energy	> 5 [MJ]
Operating current / Critical current	< 0.7
Operating Current	> 600 [A]
Operating Temperature	< 14 [K]



〈그림 1〉 설계에 사용된 초전도 선재의 단면도



<그림 3> 5 MJ SMES용 토로이드 마그넷의 설계 변수



<그림 4> 5 MJ SMES 모듈코일의 자속밀도 분포

또한 수MJ급의 저장에너지를 가지는 SMES 시스템은 건물내부나 주거지역의 근거리 등 일반적으로 부하단의 근처에서 설치, 운영되기 때문에 주변 기기들에 미칠 수 있는 영향의 최소화를 위해 누설자속의 크기와 마그넷 부피의 최소화를 함께 고려하여 본 논문에서는 5 MJ의 저장용량을 가지는 SMES용 마그넷의 형태를 토로이드 형태로 정하고 설계를 진행하였다.

### 2.3 고온 초전도 마그넷의 설계조건

테이프 형태인 고온 초전도 선재를 이용해 토로이드 형태로 권선하여 마그넷을 제작하는 것은 기술적으로 매우 어렵기 때문에 본 논문에서는 여러 개의 모듈코일을 이용하여 이를 토로이드 형태로 배열한 모듈러 토로이드 마그넷의 형태로 설계를 진행하였다. 설계에 사용된 2세대 고온초전도 선재인 YBCO CC는 현재까지 최대 단일장선의 길이가 수백 미터수준이므로 팬케이크 모듈코일 당 선재 사용량은 1 Km 이가되도록 설계하였다. 운전 전류는 설계된 마그넷에 따라 초전도 권선에 인가되는 최대 수직방향 자속밀도의 크기를 계산하여 운전전류가 해당 자속밀도에서의 초전도 선재 임계전류의 70 % 이하가 되도록 설계를 진행하였다. 중심축에서 싱글팬케이크모듈까지의 거리  $d$ 는 100 mm 이상으로 하였고, 싱글팬케이크모듈의 내 반경  $r$ 은 100 mm 이상으로 팬케이크간의 간격  $a$ 는 5 mm 이상으로 각각 제한하였다. 이러한 설계 제한조건들은 초전도 권선의 전도냉각을 냉각 구조물의 설치공간과 실제 마그넷의 조립을 위한 공간을 각각 고려하여 선정하였다. 주요 설계조건과 설계변수들은 표 2와 그림 2에 각각 나타내었다.

### 2.4 고온초전도 마그넷의 설계결과

토로이드의 자장계산은 비오사바르 법칙을 이용하였고 설계의 최적화는 진화 알고리즘을 이용하였다[9]. 초기 운전전류를 가정한 후 제한조건 내의 설계 변수를 가변시키며 저장에너지를 만족하는 설계결과를 도출한 후 자장계산을 통해 설계된 마그넷의 권선에 인가되는 최대 수직방향 자속밀도의 크기를 확인하여 운전전류가 초전도 선재 임계전류의 70 % 이하인지 확인하는 순서로 설계를 진행하였다. 설계 결과들 중 최종적으로 설계 목표인 초전도 선재의 사용량이 가장 적은 설계안을 도출하였고, 설계 결과를 표 3에 나타내었다. 상용 수치해석 프로그램을 통한 설계안의 해석결과를 그림 4에 나타내었다. 설계 결과 초전도 선재의 사용량은 약 22 Km 이고 저장에너지는 5.06 MJ,, 최대 수직방향 자속밀도는 1.3 T, 수평방향 자속밀도는 약 10.8 T임을 확인하였다.

<표 3> 마그넷의 설계결과

Type of magnet	Toroid coil
Operating Temperature [K]	14
Operating current [A]	800
Inner diameter (r) [mm]	328
Outer diameter (2R) [mm]	1396
Height [mm]	534
No. of turns (Nt)	308
No. of module coil (Nd)	56
Max B in parallel [T]	10.75
Max B in perpendicular [T]	1.34
Operating current / Critical current	0.68
Stored energy [MJ]	5.06
Length of HTS wire [km]	21.93

## 3. 결 론

본 논문에서는 5 MJ의 저장용량을 가지는 SMES용 마그넷을 2세대 고온초전도 선재인 YBCO CC를 이용하여 설계하였다. 마그넷의 형상은 토로이드 형태로 선정하여 설계하였고 초전도 선재의 사용량과 마그넷의 자속밀도 분포를 확인하였다. 운전전류는 800 A 이고, 선재에 인가되는 수직방향 자속밀도 크기는 약 1.3 T로 운전 전류의 크기에 비해 낮은 수직방향 자속밀도를 발생시켜 초전도 선재의 높은 임계전류 이용해 선재사용량이 적은 마그넷의 설계가 가능하였다. 하지만 수평자장의 경우 약 11 T의 매우 높은 수준으로 이러한 자장으로 인해 매우 큰 전자기력이 발생할 것으로 예상된다. 2세대 선재의 경우 기계적인 특성을 높이기 위해 높은 인장강도를 가지는 재료를 사용하여 제조되고 있지만 마그넷의 크기가 상대적으로 작고 에너지밀도가 매우 높은 구조이므로 실제 제작을 위해서는 충분한 응력 해석과 더불어 지지구조에 대한 구조해석이 선행되어야 할 것이다. 본 논문의 설계는 추후 진행될 5 MJ SMES 코일에 대한 개념 설계로 코일 형태와 초전도 선재의 사용량 그리고 코일에서 발생하는 자속밀도의 수준을 확인하는 것을 그 목적으로 하였다. 설계결과를 5 MJ SMES의 제작을 위한 기초 자료로 활용될 것이고 추후에는 실제 제작을 위한 마그넷의 상세 설계 및 구조해석 등 SMES의 제작에 필요한 연구들을 진행할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

## [참 고 문 헌]

- [1] K.C Seong, "Superconducting Magnetic Energy Storage System" Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, vol.8, no.2, pp.5-9, July 2006.
- [2] Y.K, Kwon, M.H Sohn, S.K. Baik, E.Y. Lee, J.M Kim, T.S. Moon, H.J. Park, Y.C Kim, K.S Ryu, "Development of a 100 hp synchronous motor with HTS field coils" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.15, Issue.2, pp. 2194 - 2197, June 2005.
- [3] S. Choi, S.J Lee, K. Sim, J.W. Cho, S.I. Lee. S.G. Le, K.W. Lee, S.Y. Lee, D.H. Kim, T.K. Ko, "DC Critical Current Test Method for 22.9 kV/50 MVA Superconducting Power Cable Considering the Uncertainty" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 20, issue. 3, pp.1272-1275, June 2010.
- [4] W.S. Kim, S Kwak, J.K. Lee, K. Choi, H.K. Jung, K.C. SeongC and S. Hahn, "Design of HTS Magnets for a 600 kJ SMES", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.16, Issue.2, pp. 620-623, June 2006.
- [5] S. Kwak, S. Lee, S. Lee, W.S. Kim, Ji-Kwang Lee, P. Chan, J.H. Bae, J.B. Song, HG. Lee, K. Choi, K.C Seong, H.K Jung and S Hahn, "Design of HTS Magnets for a 2.5 MJ SMES," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 19, no.3, pp.1985-1988, June 2009.
- [6] C. A. Luongo, "Superconducting storage systems: an overview," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, no. 4, July 1996.
- [7] M. K. Abdelsalam, "Micro SMES magnet configuration for reduced stray field applications," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 5, pp.333 - 336, June 1995.
- [8] G. Schonwetter, "SMES solenoids with reduced stray field," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, pp. 2636 - 2639, July 1994.