

고온 초전도 선재를 이용한 200 kJ SMES 코일의 설계

김지훈, 한승용, 임창환, 김재광, 정현교, 한송엽
서울대학교, 전기·컴퓨터 공학부

Design of 200 kJ SMES Coil with HTS Wires

Jl Hoon Kim, Seungyong Hahn, Chang Hwan Im, Jae Kwang Kim, Hyun Kyo Jung,
Song-yop Hahn

School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

dangoon@super-em.snu.ac.kr

Abstract - In this paper, a design scheme of SMES coil with HTS wire(BSCCO 2223) for least stray field and conductor consumption is presented. Three types of coils (solenoid, multiple solenoid, and modular toroid) have been considered. Shape and size of the coil was decided by line element method with evolution strategy and confirmed with Finite Element Method. Modular toroid displayed least stray field with given conductor length. The goal of the study is to establish designing technology of a HTS coil for SMES which works in relatively high magnetic field.

1. 서 론

전력에 대한 수요가 갈수록 커지고 있는 상황에서 전력 계통에 이용되는 순시 전력 보상 장치는 그 중요도를 더하고 있다. 순시 전력 보상 장치는 전력 계통에서 사고가 발생하거나 고르지 못한 전력 공급이 있을 때 전력 계통을 안정시키는 역할을 한다. 하지만 대부분의 연구들은 저온 초전도 선재(NbTi, Nb₃Sn 등)를 이용하여 냉각 비용이 비싸고 시스템의 구조가 복잡해진다는 단점을 가진다.[1]

본 연구에서는 발전하고 있는 고온 초전도 선재(BSCCO 2223) 기술에 맞추어 고온초전도 SMES용 코일에 대하여 stray field를 최소화하는 설계방법을 제시하였다. 고온 초전도 선재는 냉각 비용이 저렴하고 시스템의 구조가 간단해진다는 장점을 지니는 반면 외부 자장에 대해서는 저온 초전도 선재보다 취약하고 기계적 강도가 떨어지는 단점이 있다.[2] 본 연구에서는 현재 상용으로 출시되고 있는 초전도 선재를 이용하여 선재의 특성을 고려한 개념 설계를 수행하였다. 고온 초전도 선재를 이용하여 SMES용 코일을 만들 때 고려되어야 할 조건들은 아래와 같다.

- 1) 외부자장: 고온 초전도 선재가 견디는 최대 자장을 고려.
- 2) 위치: stray field가 미치는 부피를 고려함.
- 3) 형상: 초전도 선재의 최소 곡률 반경을 고려한 형상의 결정.

다음의 장들에서는 위의 세 가지 조건을 고려하여 수행된 SMES용 코일의 설계 과정 및 결과를 기술하였다.

2. 본 론

2.1 고온 초전도 선재

최근에 개발이 진행되고 있는 고온 초전도 선재는 초기 고온 초전도 선재들에 비해서 임계전류의 크기가 비약적으로 발전하였다. 현재 생산되고 있는 상용 고온 초전도 선재 중 미국 ASC사의 wide type 선재는 77 K에서 100 A를 상회하는 전류용량을 보이고 있다(self field). Table 1.은 코일의 설계에 쓰인 선재의 사양을 나타내었다.

Table.1. Wire spec used for the design

Type	Wide
Thickness	0.203 mm
Width	4.1 mm
Je	>12 kA/cm ²
Ic	>100 A
Max Stress (77 K)	85 MPa
Max Strain	0.15%
Min. Bend Dia.	100 mm

@ 77K, sf. 1μV/cm
With 95% Ic Retention
courtesy ASC

본 연구에서 행해진 SMES 코일의 설계는 미국 ASC사의 초전도 선재의 사양을 적용하였고 초전도 코일의 설계사양은 Table.2.와 같다.

Table 2. Coil specifications

Material	BSCCO 2223
Tot. Energy	> 200 kJ
Operating I/turn	150 A
Max B_{\perp}	< 1 T
Max B_{\parallel}	< 5.5 T
Max stray field	< 50 μ T @ 5 m

: expected value

고온 초전도 자체의 성질 때문에 생길 수 있는 설계상의 가장 큰 문제는 자장의 증가에 따른 임계전류의 감소이다. SMES는 전기 에너지를 자기 에너지의 형태로 저장시키기 때문에 코일 자체에 걸리는 외부 자장이 커지고 자장의 크기가 커질수록 임계전류는 가해지는 방향에 따라 다소 급격한 감소를 보인다. 고온 초전도 선재에서 흘릴 수 있는 최대 임계 전류량은 최대 자장이 걸리는 부분에서 결정이 되므로 수치 해석을 통해서 최적화를 수행할 때 코일에서 최대 자장이 걸리는 부분을 찾아 항상 그 부분이 설계 조건의 허용 범위 내에 들어오도록 한다.

설계된 초전도 코일이 쓰이는 SMES는 건물 내부에서의 사용을 목표로 한다. 건물 내부에서 SMES가 쓰일 때 자장의 영향(인체와 기기 등)을 최소화하기 위해서 기기의 반경 5 m 이상에서 자장이 50 μ T미만이 되도록 하였다(50 μ T는 지자기의 크기와 같다).[3]

본 논문에서는 초전도 코일의 냉각 방식을 GM cryocooler을 이용한 전도 냉각 방식으로 정하였다. 전도 냉각 방식은 코일을 질소 속에 함침시키지 않아도 된다는 장점과 더불어 열 부하에 따라 온도를 조절할 수 있다는 장점을 가진다.[4] 초전도선을 보다 효과적으로 이용하기 위해서는 20 K에서 동작점을 잡는 것이 바람직하다. 20 K에서 초전도 선재는 수직방향의 자장에 대하여 약 1 T까지 200 A의 임계 전류 값을 가지고 수평방향의 자장에 대해서는 약 5.5 T까지 200 A의 임계 전류 값을 가진다. 동작 전류는 최대 임계 전류의 75%로 잡아 안정적으로 동작하도록 하였다.

최적화를 수행할 때 주의할 점은 코일의 크기가 사양에서 허용한 최대 직경 100 mm 이하로 내려가지 않도록 하는 것인데 본 연구가 진행된 동안 최적화 과정에서 코일의 직경이 최소 직경 이하로 내려가는 경우는 발생하지 않았다.

코일의 설계는 세 가지 형상(solenoid, multiple solenoid, modular toroid)을 연구하여 그 중에서 가장 신뢰도가 높고 제작이 비교적 용이한 형상을 선택하였다. 다음절들에서는 각 형상의 최적화 기법과 결과에 대하여 언급하였다.

2.2 Solenoid 코일

세 가지 형상 중 가장 제작하기 쉬운 형태인

solenoid는 stray field가 가장 크다는 단점을 가진다. Solenoid의 설계에서는 주 코일의 외부에 보조 코일을 설치하고 철판을 이용하여 stray field의 크기를 줄이는데 설계의 중점을 두었다.

보조 코일은 주 코일의 저장 장치와 반대 방향의 전류를 흘리고 그때의 에너지 저장량은 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 - M I_1 I_2 \quad \text{Eq.1.}$$

Eq.1.에서 첨자 1은 주 코일을, 2는 보조 코일을 나타낸다. 주 코일과 보조 코일은 주 코일을 기준으로 보조 코일을 상하로 배치하거나 주 코일의 외측에 보조코일을 배치하는 방법이 있는데 본 연구에서는 주 코일의 상하에 배치하는 방법을 선택하였다.[5]

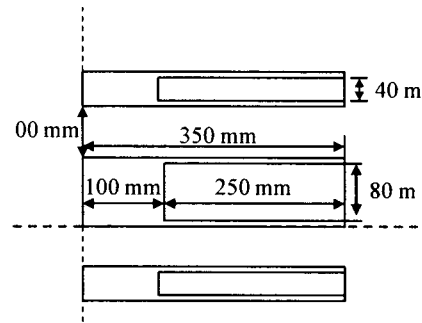


Fig.1. Initial design of the solenoid coil

Solenoid는 보조 코일만으로 stray field를 줄이는데 한계를 보인다. 주어진 조건인 2.5 m 반경에서 50 μ T를 만족하기 위해서 2.5 m 지점에 두께 5 mm의 강철판을 사용하여 보강한 후 최적화를 수행하였다.

최적화는 Niching Genetic Algorithm을 사용하였고 해석결과는 Table.3.에 나타내었다.

Table.3. Optimized result for solenoid coil

Parameters	Unit	Result
I.D. of coil	mm	92
O.D. of coil	mm	342
Height of coil	mm	79
Stray field area	m	2.5
Total conductor length	km	14.5

2.3 Multiple solenoid 코일

Multiple solenoid는 짝수의 solenoid 코일들을 한 축에 대칭으로 배치하여 인접한 코일에서 전류를 반대 방향으로 흘려 stray field를 감소시킨다.[6]

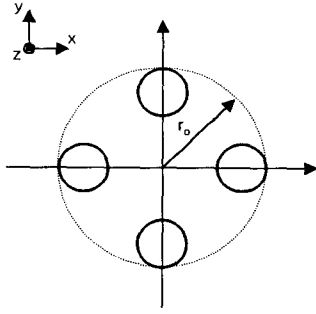


Fig.2. Multiple solenoid coil with 4 modules

각 코일은 개별적으로 권선 하여 모든 모듈을 조립한다. 조립된 모듈들은 하나의 냉동조에 삽입하고 cryocooler을 이용하여 전도 냉각한다. 각 코일의 구조는 Fig.2.에 나타내었다.

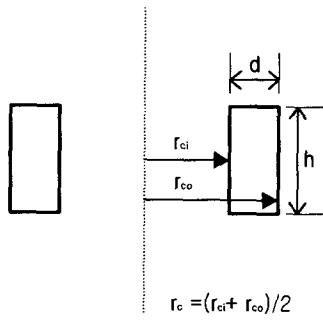


Fig.3. Cross section of a single coil module

설계에 쓰여진 변수들은 Table.4.와 같다.

Table.4. Parameters for design

Parameters	Symbol	Explanation
System radius	r_o	Radius from axis to inner wall of the chamber
Coil radius	r_c	Radius of a coil module from axis of the coil to the center of the windings
Shape ratio I	β	$h(\text{coil height})/r_c$
Shape ratio II	ν	$d(\text{coil width})/r_c$
Number of coils	n	coil modules used
Total length	l_{con}	Total length of HTS wire used
Stray field area	S_{sf}	every where $>50 \mu T$

코일에 저장되는 에너지는 코일 모듈 자체의 자기 인덕턴스에 의해서만 결정이 되고 상호 인덕턴스에는 영향을 받지 않는다. 따라서, 전체 에너지 저장량은 다음과 같이 나타난다.

$$E = n \cdot \frac{1}{2} \cdot LI^2 \quad \text{Eq.2.}$$

자기 인덕턴스를 구하기 위해서는 line element를 이용하였고 자장의 크기를 구하기 위해서 Biot- Savart 법칙을 이용하였다.

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_c \frac{d\vec{l} \times \vec{a}_R}{R^2} \quad \text{Eq.3.}$$

식.2.에서 C 은 코일에서 한 턴에 의해서 가두어지는 영역의 넓이를 나타내고 $d\vec{l}$ 은 단위 길이를 나타내며 \vec{a}_R 은 $d\vec{l}$ 에서 원하는 지점을 가리키는 단위 벡터이다.

최적화는 shape factor I과 shape factor II를 변수로, total length와 stray field area를 constraint로 하여 evolution strategy를 수행하였고 해석 결과를 Table.4.에 실었다.

Table.5. Result for multiple solenoid

Parameter	Symbol	Result
System radius		43.28 cm
Coil radius		13.18 cm
Number of coils		4
Conductor length	l_{con}	13980 m
Stray field area	S_{sf}	2.471 m

2.4 Modular toroid 코일

Solenoid는 지나치게 큰 stray field 영역을 가지고 multiple solenoid는 초전도체를 비효율적으로 사용한다는 단점을 가진다. 외부로 누설되는 stray field의 크기를 줄이기 위해서는 완벽한 toroid 코일을 만들어야 하는데 이를 고온 초전도체로 만들기에는 상당한 어려움이 따른다.

코일을 감아 한 축을 기준으로 대칭으로 배치하는 modular toroid는 위의 두 가지 형태의 단점을 보완한다.[7]

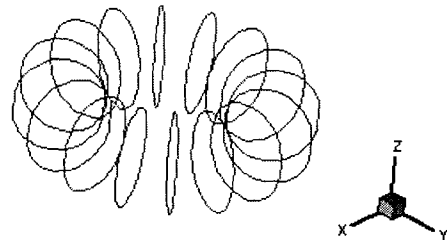


Fig.4. Model of modular toroid coil

코일의 설계 변수는 높이 h 와 폭의 절반 길이인 d , 그리고 턴수를 이용하였고 축에서 코일까지의 거리 r 은 고정하였다.

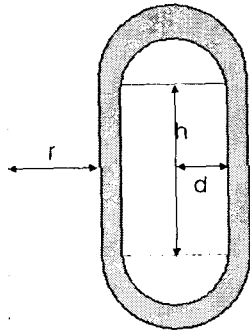


Fig.5. Modeling of single module

총 16개의 모듈로 구성된 modular toroid의 최적화는 stray field와 최대 외부자장을 constraint로 주고 1+1 evolution strategy를 사용하였고 자장의 크기는 line element에 의한 자계값을 Biot-Savrt 법칙을 이용하여 구하였다. 계산 결과는 Table.6.에 나타내었다.

Table.6. Result for modular toroid

Parameters	Result
h	1 mm
d	65 mm
Turns	110
Conductor length	12 km
Stored energy	213.21 kJ

최적화 결과는 FEM을 이용하여 검증하였고 검증 결과 모든 제약조건을 만족하며 요구된 에너지 저장량을 보였다.

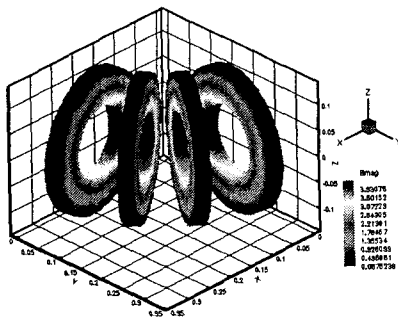


Fig.6. Result of FEM for final modular toroid

3. 결 론

본 연구에서는 세 가지 종류의 SMES 코일을 고온 초전도 선재를 사용하여 제작하고 전도 냉각을 이용한다고 가정하였을 경우를 생각해서 코일의 설계를 행한 결과들을 제시하였다. 코일 설계에서의 주된 주제는 외부로 유출되는 stray field의 최소화와 선재 상용량의 최소화를 목적으로 하였다. 계산결과 modular toroid 형태의 코일

이 stray field를 최대한 줄이고 선재의 사용량도 다른 두 타입에 비해 크지 않다는 결론을 얻었다.

(참 고 문 헌)

- [1] S. M. Schoenung, et. al., "Cost Savings and Prospects for Application of Micro Superconducting Magnetic Energy Storage(SMES) Using High Temperature Superconductors," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 3, No. 1, March 1993, 200-203.
- [2] P. Tixador, and H. Daffix, "Conceptual Design of an Electrical Machine with Both Low and High Tc Superconductors," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 4, December 1997, 3858-3865.
- [3] Gerald Schönwetter, "SMES Solenoids with Reduced Stray Field," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 30, No. 4, July 1994, 2636-2639.
- [4] S.S. Kalsi, et. al., "HTS SMES Magnet Design and Test Results," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, June 1997, 971-976.
- [5] Gerald Schönwetter, and Juergen Gerhold, "Design of SMES with Reduced Stray Field," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 5., No. 2., June 1995, 337-340.
- [6] Mostafa K. Abdelsalam, "Micro SMES Magnet Configurations For Reduced Stray Field Applications," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 5, No. 2, June 1995, 333-336.
- [7] Carlo A. Borghi, et. al., "Design Optimization of a Microsuperconducting Magnetic Energy Storage System," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, No. 5, September 1999, 4275-4284.