Study on the Shape Design of Field Coil in HTS Generator Considering Stress Condition

Young-Sik Jo, Ju-Min Lee, Jung-Pyo Hong, Ju Lee[a],
Myung-Hwan Sohn[b], Young-Kil Kwon[b], Kang-Sik Ryu[b]
#9, Sarim-Dong, Changwon, Kyungnam, 641-773, Korea, Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University,
[a]*Division of Electric and Computer Engineering, Hanyang University,*
[b]*Korea Electrotechnology Research Institute*

Received 27 July 2000

Abstract

The value of I_c(critical current) in HTS (High Temperature Superconductor) tape has a great influence on B⊥(vertical field). Therefore, in shape design of field coil for the HTSG(High Temperature Superconducting Generator), a method to reduce the B⊥ should be considered in order to maintain the stability and substantial improvement on the performance. On the basis of the magnetic field analysis, this paper deals with various field coil shape according to the iron plate to obtain small B⊥ by using Biot-Savart's law, image method and 2D FEA(2 Dimensional Finite Element Analysis) considering the stress condition of HTS. Moreover, the analysis is verified by comparison with experimental results. And also this paper presents the advanced model by using 3D FEA, in which flux density at armature is calculated in 5kVA class HTSG.

Keywords : HTS(High Temperature Superconducting) Generator, Field coil shape, Advanced model

I. 서론

전기저항이 없는 초전도의 특성을 이용한 초전도 마그네트 응용은 MRI, SMES 등과 같이 일부 상용화된 것도 있으며 이후 상용화를 위한 초전도 응용 연구가 세계각국에서 진행 중에 있다. 특히 LTS (Low Temperature Superconductor)를 이용한 초전도발전기는 미국을 위시한 일본, 유럽에서 고효율·고출력 등의 장점을 상용화하기 위한 많은 연구가 되었고, 최근에는 HTS의 개발이 가속화됨에 따라 이를 이용한 연구가 미국을 비롯한 여러 국가에서 국가적 사업으로 진행 중에 있다 [1].

Fax : +82-55-262-5966
e-mail : gkstkso@cosmos.changwon.ac.kr

국내에서는 LTS를 사용한 20kVA 및 30kVA 급의 초전도 발전기가 각각 서울대와 한국전기연구소에서 연구되었으며 최근 한국전기연구소에서 HTS를 이용한 초전도발전기를 연구·개발 중에 있다.

금속계 화합물로 만들어진 LTS는 대부분 기계적인 강도가 높으나 HTS는 산화물 계이므로 매우 약한 기계적인 특성을 나타낸다. 또한 LTS의 경우, 일정온도에서의 I_c는 최대자장의 크기에 지배받지만 HTS tape는 액체질소의 온도(77K)에서 B⊥과 B//(parallel field)의 크기에 따라 다른 특성이 나타나며, 특히 B⊥의 크기에 매우 크게 감소하는 특성을 가지지만 액체헬륨의 온도인 4.2K에서는 이러한 감소는 거의 없다. 이러한 운전온도에 따른 Ic-B 특성을 고려하여야 하는데, HTSG의 운전온도 30 40K에서는 B⊥이 감소되면 I_c의 증대가 가능하므로

계자코일의 형상설계가 중요하다.

HTS tape의 I_c는 앞서 언급한 자장의 영향뿐만 아니라 권선 시 발생하는 굽힘 응력, 비틀림 응력, 그리고 인장 응력에 의해서 큰 값으로 감소하는데, 이를 고려한 제한 조건을 설정해서 계자 형상 설계에 포함시켰다 [2].

본 논문에서는 HTS의 자장특성을 고려하여 계자코일에 발생하는 최대 B⊥을 감소시키면서 유기기전력을 향상시킬 수 있는 계자코일의 형상을 제안하였는데, 다음과 같은 2가지 방법을 비교/검토하였다.

방법 1. 설계된 모델(Base Model)을 기준으로 HTS의 허용 응력 및 권선 방법을 고려한 몇가지 제한조건을 설정하였으며, 이 조건에서 B⊥은 감소하고 전기자에서 자속밀도의 반경방향 성분(Bn)이 증가하는 계자코일의 형상을 선정하였고,

방법 2. 계자형상을 개선시킨 모델에 비투자율이 높은 규소강판을 이용하여 B⊥은 감소하고 전기자에서 자속밀도의 반경방향 성분(Bn)이 증가하는 규소강판의 재질과 형상, 그리고 위치를 선정하였다.

설계된 모델을 기준으로 한국에 대한 실험결과를 이용하여 두가지 결과에 대한 해석결과의 타당성을 검증하였으며 개선된 계자코일의 형상은 이후 제작할 5kVA급 공심형 HTSG에 적용할 예정이다.

II. 본론

2-1. 응력조건

계자 권선 시 비틀림응력은 거의 없는 상황이므로 사용하는 HTS 테이프의 인장응력 및 굽힘응력에 대한 I_c 특성을 검토하여 계자형상 설계의 제한조건으로 선정하였다.

그림 1은 인장응력이 배제된 상황에서의 굽힘변형에 대한 I_c 곡선이며, 그림 2는 굽힘응력이 배제된 상황에서의 인장변형이 가해진 경우에서의 각 도체에 대한 인장응력 특성 곡선이다. 상기의 실험결과를 검토하여 굽힘반경은 최소 16 mm, 권선 시의 변형응력은 0.1%이하로 선정하였다.

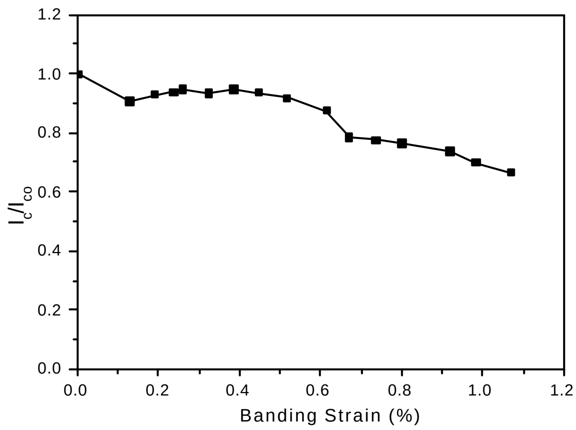

그림 1. 굽힘변형에 따른 I_c 특성

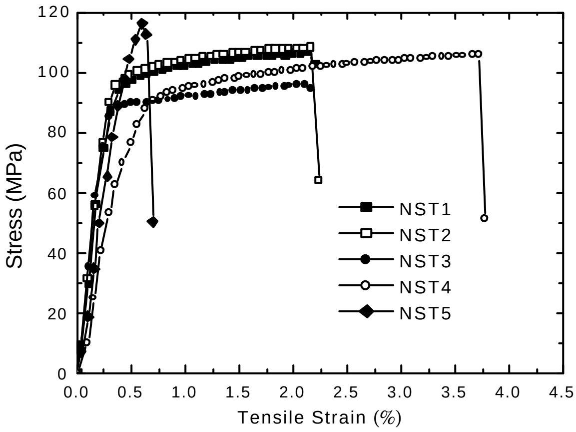

그림 2. 인장변형에 따른 인장응력 특성

2-2. 전자장해석이론

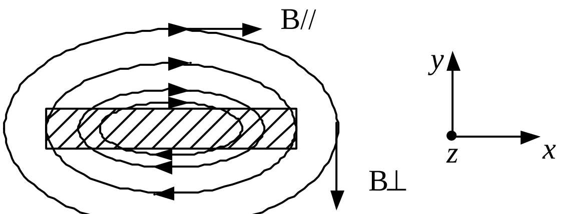

그림 3. HTS 단면에 균일하게 전류가 흐를 때 만들어지는 자속

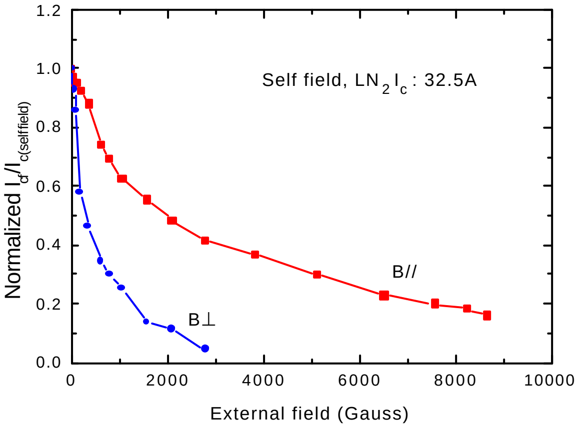

그림 4. I_c-B 특성곡선 (77K)

그림 3은 고온초전도 테이프에 전류가 흐를 때의 자속선을 단순하게 도식화하였다. B⊥은 y축 방향, B//은 x축 방향이며, 전류는 z축으로 흐르고 있다. B//은 윗면과 밑면에 집중되고, B⊥은 고온초전도 테이프의 가장자리에 집중되는데 특히 B⊥의 크기가 고온초전도 테이프의 I_c에 매우 큰 영향을 미치게 된다 [3].

그림 4는 37-filament Bi-2223/Ag-alloy tape의 I_c-B 특성곡선으로 같은 계열의 다른 HTS도 비슷한 양상을 나타낸다. 그림 4의 I_c-B 특성은 냉매로 LN2를 사용한 77K 온도에서의 양상이지만 온도가 낮아지면 자장에 따라 I_c가 급격히 감소하는 영역이 줄고 자장에 대한 영향이 현저하게 적어지는 특성을 나타낸다. 현재 설계된 HTSG는 30K 40K의 온도에서 운전할 것으로 설계되었는데 이 온도에서의 I_c-B 특성은 선재제작 업체인 NST(Nordic Superconductor Technologies)에서 제공한 것을 이용하였다

2.2.1. 전자장 해석방법

계자의 형상을 개선하여 자장특성을 개선하는 방법 1에서 한국에 대한 3D 자장해석은 계자보빈을 비자성체를 사용하고 코일의 형상을 수학적으로 모델링하기 쉽기 때문에 FEA와 같은 수치해석적인 방법보다는 해석적 방법이 해석정도나 해석시간의 단축 면에서 매우 유용하다. 따라서 Biot-Savart의 법칙인 수식 (1)을 사용하였다.

$$d\vec{B} = \frac{m_0 I}{4p}\left(\frac{d\vec{l'} \times \vec{R}}{R^3}\right) \quad (1)$$

여기서 $d\vec{B}$는 미소전류소에 의한 임의의 점에서의 자속밀도, m_0 는 공기중의 투자율, $Id\vec{l'}$ 는 미소 전류소, $\vec{R}$ 은 미소 전류소에서 임의의 점으로 향하는 벡터이다.

HTSG의 Bn은 축 방향으로 저감하는 특성을 나타내므로 2D 자장해석치와 많은 차이가 있어서 3D 자장해석이 필수적이다 [4]. 하지만 계자형상에 따른 중앙 단면에서의 3D 결과와 2D 결과는 큰 차이가 없고 해석시간을 줄이기 위해 2D 자장해석을 이용해서 Bn을 구하였다.

HTSG는 자기쉴드 외에는 자성체가 없을 뿐만 아니라 수학적 모델링이 가능한 간단한 구조이므로 자기쉴드의 투자율을 무한대로 가정하고 영상법을 적용하여 계산하는 것이 FEA에 비해 계산시간이나 계산 정도면에서 유리하다. 따라서 계자의 형상 변화에 따른 특성은 Biot-Savart의 법칙과 영상법을 이용하여 고찰하였다. 임의의 점에서의 자속밀도는 수식(1)을 2D 해석에 적용할 수 있는 간단한 수식으로 변화시켜 계산하였으며, 영상전류의 위치는 수식(2)를 사용하여 구하였다.

$$R_I = \frac{C^2}{A} \quad (2)$$

여기서 R_I 는 영상전류의 반경, C^2 는 자기쉴드의 내 반경, 그리고 A는 실제전류의 반경이다.

규소강판을 사용하여 자장특성을 개선하는 경우는 매질이 균일하지 않아 해석적인 방법으로 해를 구하기 어려워서 2D FEA를 사용하여 자장해석을 하였다. 이 결과를 검토하여 규소강판의 재질과 형상, 그리고 위치를 결정하였다.

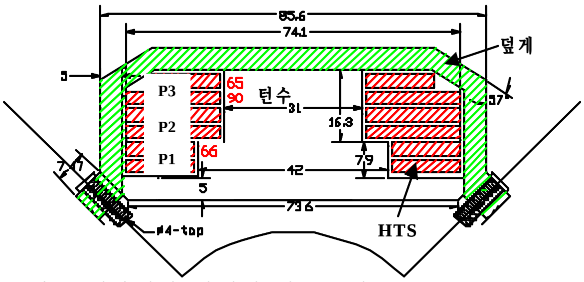

그림 5. 계자형상 설계의 기본모델

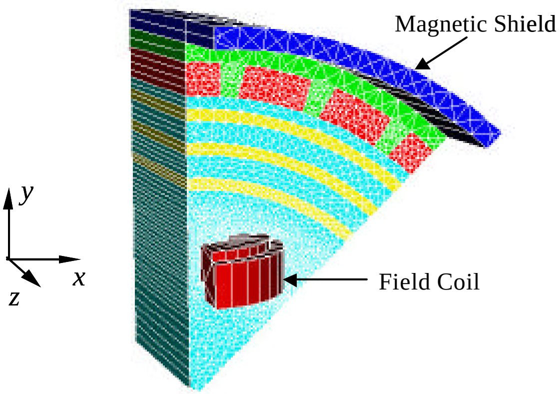

그림 6. 3D FEA 모델

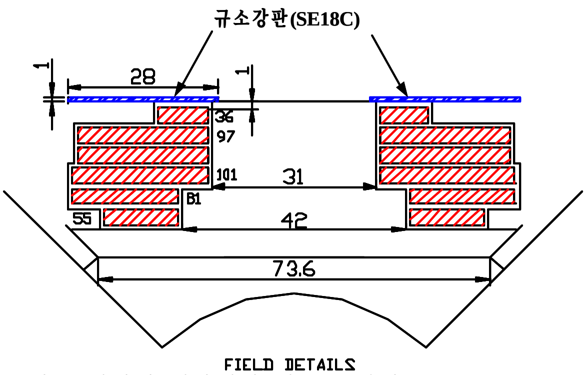

그림 7. 개선된 계자형상 및 규소강판

표 1. 각 모델의 3D FEA 해석결과 비교

	B⊥(T)	Bn(T)
기본모델	0.445	0.0844
개선된 모델(증가율%)	0.412(-7.4)	0.0891(5.6)
개선된 모델+ 규소강판(증가율%)	0.369(-17.1)	0.0882(4.2)

2-3. 전자장해석모델

그림 5는 계자 형상의 기본 모델로 5kVA급 HTSG의 설계에 채택된 것으로 그림과 같은 계자 단면을 가진다. 극당 턴수 467턴, 레이스트랙 형태로 권선하여 30 40K의 온도에서 정격전류 55A로 설계되었다.

그림 6은 3D FEA 해석모델로 자기쉴드를 제외한 모든 재질이 비자성체이므로 정자계 해석시 매우 간단하게 모델링 할 수 있다. HTSG의 대칭성을 고려해서 전체모델의 1/16을 해석모델로 선정해 3D FEA 정자계 해석을 하였다.

III. 해석결과 및 실험결과

해석결과를 검토한 결과 기본모델에서의 B⊥의 최대치는 그림 5에서 명시된 P3의 윗면과 P1의 아랫면에서 발생한다. 따라서 계자의 I_c는 P1과 P3에 지배받을 것이므로 P3와 P1에서 B⊥의 감소시키는 방향으로 계자의 형상이 결정되어야 한다. 앤드링에서 발생하는 B⊥의 최대치는 계자코일의 중앙단면에서 발생하는 값보다 작아서 무시하였다.

그림 7은 개선된 계자형상에 규소강판을 설치한 그림이다. 계자형상은 B⊥의 크기를 감소시키고 Bn을 증가시키는 방향으로 설계되었다. 규소강판은 적당한 자속밀도에 포화되어야 유효한 전기자 자속밀도의 감소가 없으므로 해석결과를 검토하여 SE18C (KS 규격)로 결정했으며 크기와 위치는 그림과 같다.

표 1은 기본모델, 개선된 모델 그리고 규소강판이 포함된 개선된 모델의 3D FEA 결과를 보여준다. 해석결과 개선된 모델에 규소강판을 설치한 계자코일이 가장 좋은 특성을 나타낸다.

그림 8은 온도변화에 따른 각 팬케이크와 전체의 I_c를 나타낸다. B⊥이 큰 P1과 P3의 I_c가 P2에 비해서 낮으며 한극 전체의 I_c는 B⊥의 영향으로 P1과 P3의 I_c에 지배받는다.

그림 9는 계자형상에 따른 P3에서의 I-V 특성곡선으로 B⊥을 최소화시킨 개선된 모델에 규소강판을 설치한 것이 가장 좋은 특성을 나타냄을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 HTSG의 계자형상 변화에 따른 B⊥과 Bn의 특성을 연구하였다. 계자의 형상을 개선시킨 모델에 규소강판을 설치한 것과 기본모델을 3D FEA을 이용한 해석결과를 비교하면 B⊥과 Bn은 각각 -17.1%, 4.5% 변화함을 예상 할 수 있었으며, 계자의 형상을 개선시킨 모델에 규소강판을 설치한 것이 가장 좋은 I_c특성을 나타냄을 실험을 통해 검증할 수 있었다. 따라서 개선된 계자는 기존의 계자에 비해 안정도가 증가하고 발전기의 성능향상에 기여할 것으로 기대된다.

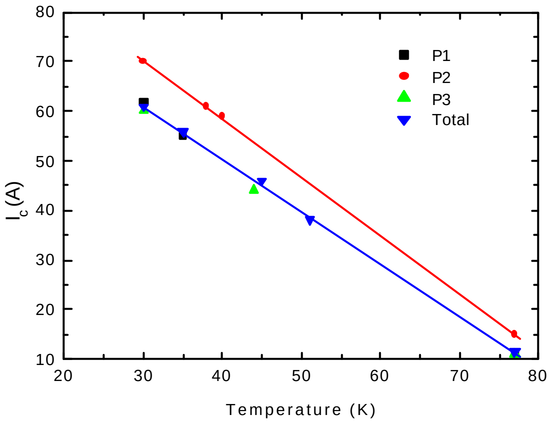

그림 8. 온도에 따른 I_c

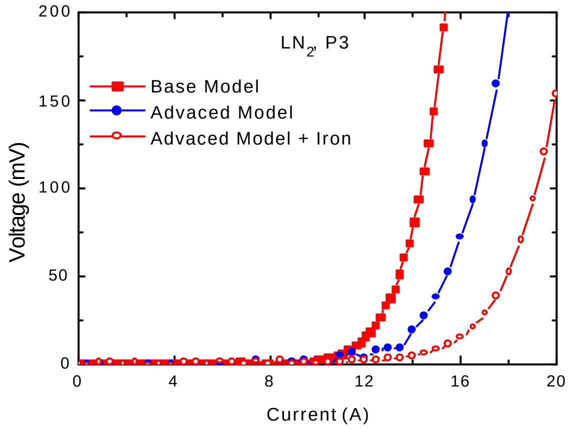

그림 9. 계자형상 변화에 따른 P3 에서의 I-V 특성곡선

References

[1] P. Tixador and H. Daffix, "Conceptual Design of an Electrical Machine with Both Low and High T_c Superconductors", IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 7, No. 4, pp. 3858-3865, 1997

[2] P. Skov-Hansen et al., "Stresses and Strains in Multi-Filament HTS Tapes", IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 9, No. 2, pp. 2617-2620, 1999

[3] C. Reimann et al., "Current Carrying Capability of Multifilamentary $(BiPb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ Tapes Determined from Transport and Magnetization Measurements", Appl. Phys. Lett., 71 (22), 3287- 3289, 1997

[4] Y.S. Jo et. al., "An Approach to the Shape Optimum Design of Superconducting Synchronous Generator", IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 10, No. 1, pp. 939-942, 2000