공심형 HTS 동기발전기의 계자 형상 변화에 따른 특성연구

조영식, 안호진, 홍정표, 이주*, 권영길**, 류강식**
창원대학교 전기공학과, *한양대학교 전자전기공학부, **한국전기연구소

Characteristic Study According to the Shape of Field in the Air-cored HTS Synchronous Generator

Young-Sik Jo, Ho-jin Ahn, Jung-Pyo Hong, Ju Lee*, Young-Kil Kwon**, Kang-Sik Ryu**
Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University
*Division. of Electrical and Computer Engineering, hanyang University
**Korea Electrotechnology Research Institute

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 to obtain small B⊥ by using Biot-Savart's law and image method. Moreover the analysis is verified by comparison with experimental results. And also this paper presents the advanced model by using 3D FEM(3 Dimensional Finite Element Method), in which flux density at armature is calculated in 5kVA class HTSG.

1. 서 론

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 초전도발전기의 연구가 미국을 비롯한 여러 국가에서 국가적 사업으로 진행 중에 있다 [1].

국내에서는 LTS를 사용한 20kVA 및 30kVA급의 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 특성을 나타나며, 특히 B⊥의 크기에 매우 크게 감소하는 특성을 가지지만 액체헬륨의 온도인 4.2K에서는 자장에 의한 I_c의 감소가 거의 없다. 이러한 운전온도에 따른 I_c-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 영향 뿐만 아니라 권선 시 발생하는 굽힘 응력, 비틀림 응력, 그리고 인장 응력에 의해서 큰 값으로 감소하는데, 이를 고려한 제한 조건을 설정해서 설계의 2번째 단계에 포함시켰으나 이에 대한 자세한 언급은 하지 않았다 [2].

본 논문에서는 HTS의 자장특성을 고려하여 계자코일에 발생하는 최대 B⊥을 감소시키면서 유기기전력을 향상시킬 수 있는 계자코일의 형상을 제안하였는데, 다음과 같은 3단계를 거쳐서 개선된 계자의 형상을 결정하였다.

1. 단순한 형태의 계자코일을 이용하여 계자코일에 발생하는 최대 B⊥의 크기와 전기자에서 자속밀도의 관계를 Biot-Savart의 법칙과 영상법을 이용한 자장해석을 통하여 고찰하였다.

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

3. 3D FEM을 이용하여 선정된 모델의 최대 B⊥과 최대 Bn을 검토를 하여 최종 개선 안을 결정하였다.

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

2. 본 론

2.1 해석이론

그림 1은 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 2는 19-filament Bi-2223/Ag-alloy tape의 I_c-B 특성곡선으로 같은 계열의 다른 HTS도 비슷한 양상을 나타낸다. 그림 2의 I_c-B 특성은 냉매로 LN_2를 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.

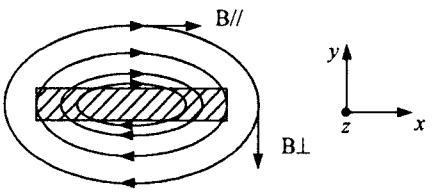

그림 1. HTS 단면에 균일하게 전류가 흐를 때 만들어지는 자속

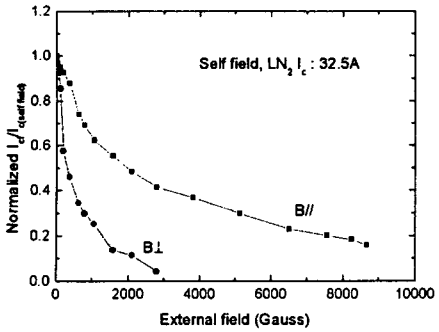

그림 2. I_c-B 특성곡선 (77K)

2.1.1 해석방법

운전온도에서 HTS tape의 I_c는 수십~수백 Gauss의 B⊥에도 큰 영향을 받기 때문에 해석결과의 정도가 매우 높아야 한다. 한극에 대한 3D 자장해석은 계자보빈을 비자성체를 사용하고 코일의 형상을 수학적으로 모델링하기가 비교적 간단하기 때문에 FEM과 같은 수치 해석적인 방법보다는 해석적 방법이 해석정도나 해석시간의 단축 면에서 매우 유용하다. 따라서 Biot-Savart의 법칙을 이용한 수식 (1)을 사용하여 계자코일에 발생하는 최대 B⊥의 크기를 계산하였다.

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\left(\frac{dl' \times R}{R^3}\right) \qquad (1)$$

여기서 dB는 미소 전류소에 의한 임의의 점에서의 자속밀도, μ_0는 공기중의 투자율, Idl'는 미소 전류소, R은 미소 전류소에서 임의의 점으로 가는 벡터이다.

HTSG의 Bn은 축 방향으로 저감하는 특성을 나타내므로 2D 자장해석치와 많은 차이가 있어서 3D 자장해석이 필수적이다 [4]. 하지만 중앙 단면에서의 3D 결과와 2D 결과는 거의 같으므로 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 FEM에 비해 계산시간이나 계산 정도면에서 유리하다. 따라서 계자의 내폭 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.

$$R_I = \frac{C^2}{A} \qquad (1)$$

여기서 R_I는 영상전류의 반경, C는 자기쉴드의 내반경, 그리고 A는 실제전류의 반경이다.

2.2 해석모델

그림 3은 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 4는 직사각형의 단면을 가지는 간단한 계자 형상을 이용하여 같은 턴수일 때 계자의 내폭인 W의 변화에 따른 B⊥과 Bn의 관계를 고찰하였는데, 여기서 P1, P2, 그리고 P3은 각각의 팬케이크 코일을 나타낸다.

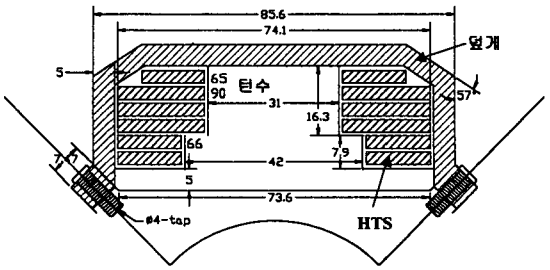

그림 3. 계자 형상설계의 기본모델

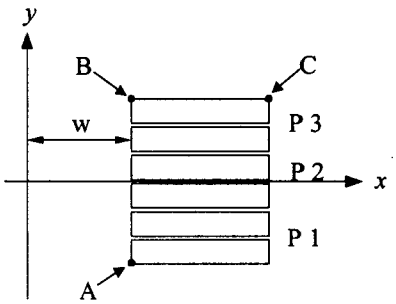

그림 4. 직사각형 단면을 가지는 레이스 트랙 형상의 해석모델

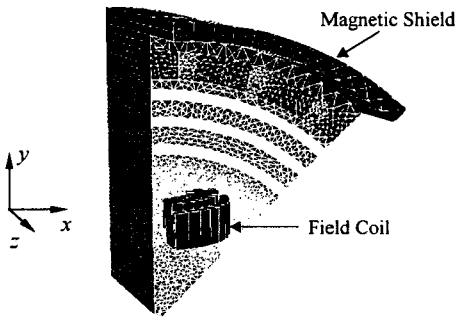

그림 5. 3D FEM 해석모델

그림 5는 3D FEM 해석모델로 자기쉴드를 제외한 모든 재질이 비자성체이므로 정자계 해석 시 매우 간단하게 모델링 할 수 있다. HTSG의 대칭성을 고려해서 전체모델의 1/16을 해석모델로 선정하여 3D FEM 정자계 해석을 수행하였다.

HTS는 두 층을 하나의 팬케이크 코일로 권선한 후, 각각의 팬케이크를 접합하여 계자의 형상을 만드는 권선방법을 사용하는데, 인장 응력에 의한 I_c의 감소를 최소화하고 팬케이크간의 전기적 접합을 용이하게 하기 위해서 두 층간의 내폭을 같게 하고 팬케이크간 접합이 되는 층의 외폭을 같게 하는데, 이것을 계자 형상 설계의 제한조건 중 하나로 고려하였다. 또한, 기본 모델에 사용된 HTS의 전체 장력 0.2%는 150MPa으로 주어지는데 이를 고려하여 굽힘 반경이 되는 계자의 내폭은 권선시 비틀림 응력은 없는 상황이므로 전체 장력은 굽힘 응력과 인장 응력의 합으로 표현된다. 인장 응력을 고려하여 최저 굽힘 반경인 코일 내폭은 16mm로 선정하였으며, 외폭은 그림 2에 명시된 덮게를 제거한 85mm로 선정하여 형상 설계에서 제한조건으로 고려되었다.

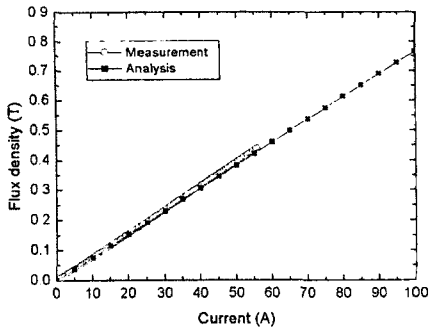

그림 6. 한극의 정 중앙에서의 자속밀도

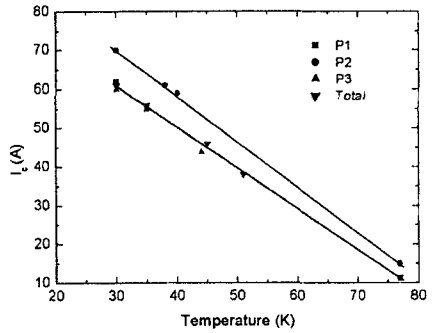

그림 7. 온도에 따른 I_c

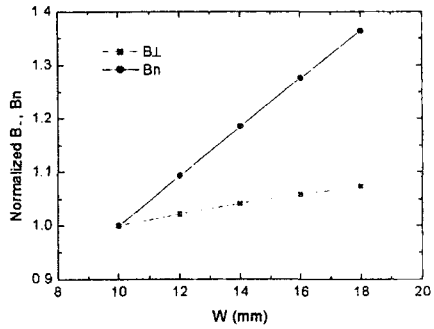

그림 8. W에 따른 B⊥과 Bn의 특성

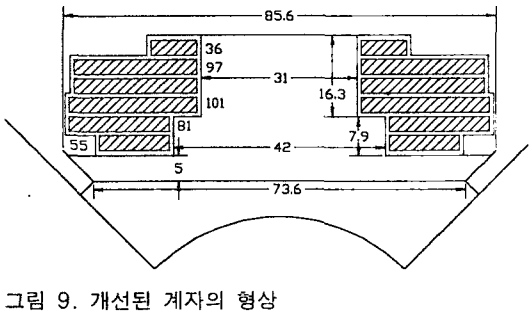

그림 9. 개선된 계자의 형상

2.3 해석결과 및 실험결과

제작과정에서는 기본적으로 한극에 대한 실험으로 계자의 특성을 평가하였다. 그림 4의 B-C 직선 상에서 최대 B⊥, A-B 직선 상에서 최대 B//이 각각 발생한다. 앤드링에서 발생하는 B⊥의 최대치는 계자코일의 중앙단면에서 발생하는 값보다 작아서 무시하였다. 실험에서는 제한조건이 많아서 최대 B⊥의 크기를 측정하기는 어려워 정 중앙에서의 자장을 측정하여 해석결과와 실험결과를 비교하였다. 그림 6은 해석결과와 실험결과를 비교한 것으로 정격전류 55A를 인가했을 경우에 약 3%정도의 차이로 매우 근사함을 알 수 있다.

그림 7은 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 지배받음을 알 수 있다.

2.3.1 B⊥과 Bn

W 변화에 따른 B⊥과 Bn의 특성은 제한조건 내에서 파악하기는 너무 적은 변화를 가지므로 그 특성을 극명하게 파악하기 어려워 제한조건을 배제하여 고찰하였다.

그림 8은 W를 변화시켰을 때 B⊥와 Bn의 최고치를 W=10인 것을 기준으로 정규화 한 결과이다. W가 증가할수록 Bn과 B⊥이 함께 증가하여, W=10을 기준으로 W=18의 B⊥과 Bn을 비교하면 각각 7%, 34%증가하는 특성을 나타낸다. B⊥의 증가율이 Bn의 증가율에 비해 상대적으로 적은 폭이지만 이것은 I_c의 감소에 큰 영향을 미친다.

2.3.2 개선된 계자형상

그림 9는 개선된 계자형상의 단면도이다. 이것은 앞서 언급한 제한조건을 만족하는 형상으로 선정하였다. 표 1은 기본모델과 개선한 모델의 B⊥의 최대크기와 Bn의 최대치를 나타낸다.

표 1. 기본모델과 개선한 모델의 3D FEM 결과

	기본모델(T)	개선된 모델(T)	증가율(%)
B⊥	0.445	0.412	-7.4
Bn	0.0844	0.0891	5.6

3. 결 론

본 논문에서는 HTSG의 계자형상 변화에 따른 B⊥과 Bn의 특성을 연구하여 자장특성이 개선된 계자형상을 제안하였다. 계자의 내폭이 증가하면 B⊥과 Bn은 비례적으로 증가하는데, W=18은 W=10을 기준으로 B⊥은 7%증가하고 Bn은 34% 증가하였다. 형상이 개선된 계자는 3D FEM 결과, B⊥은 7.4% 감소하고, Bn은 5.6% 증가하였다. 따라서 개선된 계자는 기존의 계자에 비해 안정도가 증가하고 발전기의 성능향상에 기여할 것으로 기대된다. 이후 제작할 5kVA급 공심형 HTSG에 개선된 계자를 채택하여 제작할 예정이다.

[참 고 문 헌]

[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 $(BiPb)_2Sr_2$ Ca_2Cu_3Ox 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