

100hp급 고온초전도 모터의 자장분포특성

이정중, 조영식, 주진홍, 홍정표, 권영길*
창원대학교, 한국전기연구원*

Characteristic of Magnetic Field Distribution of 100hp Class High Temperature Superconducting motor

Jung-Jong Lee, Young-Sik Jo, Jin-Hong Joo, Jung-Pyo Hong, Young-Kil Kwon*
Changwon National University, Korea Electrotechnology Research Institute*

wave95@korea.com

Abstract - Magnetic circuit design of HTS (High Temperature Superconducting) motor is important to achieve the power at a given load condition, and it is essential to the thermal design for HTS motor rotors. To determine the result of thermal design, the magnetic field distribution has to be known exactly. On the basis of the 2 dimensional magnetic field analysis, the magnetic field distributions due to several cases are calculated by using Biot-Savart equation and magnetic image method. And the I_c of HTS field coil was calculated by using I_c - B_{\perp} curve and 3D FEA(Finite Element Analysis).

1. 서 론

초전도 회전기의 설계는 HTS나 LTS (Low Temperature Superconductor)를 사용하는 가에 따라 조금씩 차이가 있고, LTS를 이용한 발전기에 대한 연구가 진행되다가 최근에는 일본을 제외한 대부분의 국가에서 고온초전도체를 이용한 연구가 진행되고 있다 [1]. 특히 미국에서는 33,000 hp급의 초전도 모터를 군함의 추진시스템으로 개발하고 있으며 현재 기초시험을 수행 중에 있다 [2]. 현재 국내에서는 프론티어 사업의 일환으로 한국전기연구원에서 100hp급 고온초전도 모터를 개발 중에 있다.

HTS 모터는 소형, 경량화가 가능하며, 고온초전도체의 안정성이 우수해서 수년 이내로 상용화제품이 가능할 것으로 기대되고 있다. HTS 모터의 설계에서는 일반적인 모터와 달리 극저온 냉매를 사용하여 초전도체의 운전온도를 만들어야 하기 때문에 극저온 냉매의 선정이나 유입, 배출구조 및 단열구조를 포함한 열 설계가 매우 중요하다. 또한 최근 극저온 냉동기의 가격이 저렴해지고 성능이 향상되면서 열 설계에서 선택의 폭이 넓어지고 있다. 하지만 열 설계에서는 HTS 모터의 자장특성을 고려할 수 없고, 자기회로 설계에서는 열 설계에 따른 구조파악이 어려워서

최적의 설계가 매우 어렵다. 따라서 열 설계나 자기회로 설계에서 초기 설계치를 기준으로 각각의 특성을 파악하여 열 설계와 자기회로 설계에서의 부담을 적절히 조절할 수 있다면 최적의 HTS 모터 설계가 가능할 것이다.

또한 이러한 생각, 단열구조 때문에 자기적인 공극의 길이가 일반적인 모터에 비해서 매우 크게 되므로 HTS 모터의 자속밀도는 축방향으로 저감하는 3차원적인 분포특성을 나타낸다. 따라서 정확한 HTS 모터의 자장특성을 계산하기 위해서는 3차원 해석을 필요하지만, 2차원 자장해석 결과의 변화추이만으로도 계자코일의 위치 변화에 따른 특성을 예측할 수 있다 [3].

본 논문에서는 계자코일의 외 반경 변화에 따른 3가지 모델에 대해 2차원 자장 해석을 수행하여 HTS 모터의 열 설계시 제시할 수 있는 열 설계의 범위를 제안하였다. 또한 3차원 자장분포 해석을 통해서 HTS 계자코일의 임계전류를 계산하였다.

2. 해석모델 및 방법

2.1 HTS 모터

그림 1은 고온초전도 모터의 단면을 나타낸다. 4극으로 정격출력 100hp이며, 회전자는 TR(Thermal reserve)를 포함한 냉각 단열 부로 구성되어 있다. 표 1은 고온초전도 모터의 사양을 보여준다. 계자코일에 사용할 고온초전도체는 검토 중이며, 기초 실험은 보유하고 있는 NST(Nordic Superconductor Technologies)에서 구매한 것을 기준으로 진행하고 있으므로 계자코일의 임계전류는 NST 선재를 기준으로 검토하였다. 냉매는 네온(Neon)을 검토 중에 있으며, 극저온 냉동기를 사용한 페루프 냉각방식으로 열 설계를 진행 중이다. TR은 외부에서 침투하는 열과 시변자속을 차단하고 냉동기 사고 시에도 급격한 온도상승에 의한 사고대처 시간을 확보하기 위해서 고안되었으며, Al(Aluminum) 등의 비열이 크고 전기전도도가 좋은 재료를 사용하여 제작할 예정이다.

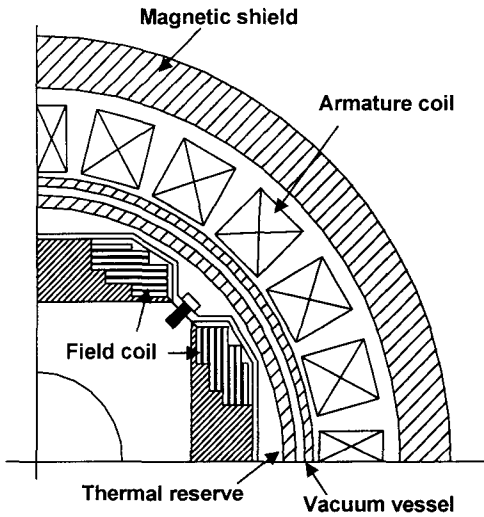


Fig. 1. Cross-section view of the 100hp class HTS motor

Table 1. Specifications of 100hp HTS motor

정격출력	100hp	정격속도	180rpm
극수	4	정격전류	45.45A
입계전류	40A(77K)	운전온도	30K

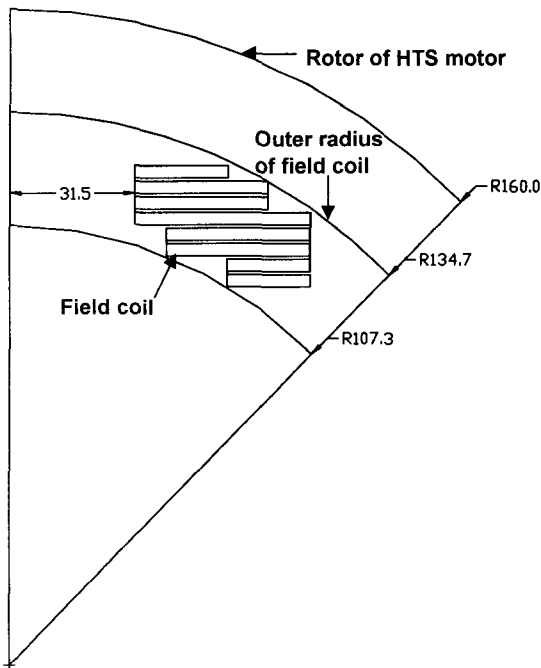


Fig. 2. Cross-section view of Simple structure of HTS rotor

2.2 해석모델

그림 2는 설계에서 결정된 HTS 모터의 계자 코일의 위치와 형상을 간단하게 나타낸다. 계자 코일의 외 반경을 107 mm, 내 반경을 134 mm로

선정하였으므로 운전온도를 만들기 위한 외부와 의 단열 및 냉각구조는 반경 134 mm에서 반경 160 mm 이내에서 설계되어야 한다. 만약, 열 설계에서 계자코일의 외 반경을 약간 줄이면 냉각 이나 단열에는 큰 효과가 있지만, 변화에 따른 자장분포 특성을 정확히 계산할 수 없다면 변경 하기 어려우며, 자기회로 설계에서는 외 반경을 약간 증가시켜 출력증가에 큰 효과가 있더라도 열 설계에서의 특성을 정확히 파악하지 못한다면 제약조건으로 설계되어야 하므로 최적의 HTS 모터 설계가 어려워진다. 따라서 본 논문에서는 열 설계에서 초기 설계모델을 기준으로 자장분포 특성을 예측할 수 있도록 계자코일의 외 반경이 122, 142 mm인 두 가지 모델에 대해서 자장분포 특성을 해석하였다. 동일한 입력전류와 턴수, 그리고 계자형상을 기준으로 각 모델의 자장 특성을 비교하기 위해서 HTS의 곡률반경이 되는 계자코일의 내 폭은 고정하였다.

2.3 해석방법

HTS 모터는 최외각의 자기철드를 제외한 모든 재료가 비자성체이므로 자기영상법을 이용한 해석 적 방법을 사용하여 2차원 자장분포를 계산하였다. 전기자에 쇄교하는 자속밀도는 Biot-Savart의 법칙을 이용한 수식 (1)과 영상전류의 위치를 결정하 는 수식 (2)를 사용하여 계산하였다.

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left(\frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{R}}{R^3} \right) \quad (1)$$

여기서 dB 는 미소 전류소에 의한 임의의 점에서의 자속밀도, μ_0 는 공기중의 투자율, $I d\mathbf{l}$ 는 미소 전류소, \mathbf{R} 은 미소 전류소에서 임의의 점으로 가는 벡터이다.

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

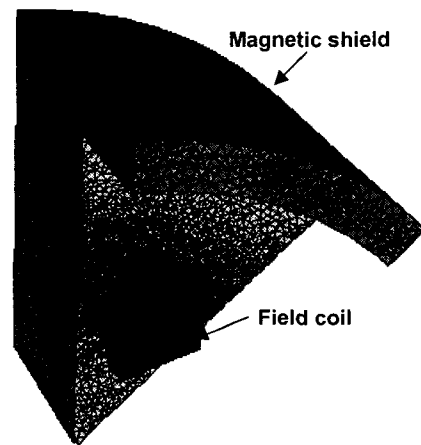


Fig. 3. Mesh generation of analysis model

여기서 R_I 는 영상전류의 반경, C 는 자기철

드의 내 반경, 그리고 A 는 실제전류의 반경이다.

3차원 자장해석은 상용프로그램인 Magnet V를 사용하였으며 그림 3은 요소분할을 수행한 해석모델을 나타낸다.

3. 해석결과 및 검토

3.1 계자코일 위치변화에 따른 자장특성

그림 4는 계자코일의 위치변화에 따른 자장특성을 나타낸다. 계자코일의 외 반경이 142 mm인 경우에 운전전류에 큰 영향을 미치는 B_{\perp} (HTS의 폭이 넓은 면에 수직인 자장)은 감소하고 고온초전도 모터의 출력특성에 큰 영향을 미치는 B_r (자속밀도의 반경방향성분)은 증가하였다. 만약, 냉각공간 감소에 따른 열적인 문제가 미진하다면 계자코일의 외 반경을 증가시키는 것이 유리할 것으로 사료된다.

3.2 임계전류 계산

그림 5는 NST에서 제공한 것으로 액체질소 온도에서의 임계전류를 기준으로 25 Kelvin 온도에서의 임계전류와 자장의 특성을 나타낸 것이다. 설계된 HTS 모터의 3차원 자장해석을 통해 HTS 계자코일에 채교하는 최대 B_{\perp} 은 직선부에서 0.52T, 곡면부에서는 0.43T로 계산되었다. 따라서 25K에서 계자코일의 임계전류는 HTS의 I_c - B_{\perp} 특성과 직선부에서의 최대자장을 기준으로 계산하면, 액체질소에서의 1.6배로 약 61A가 될 것으로 예상된다. 또한, 계자코일의 외 반경이 142 mm라면 임계전류는 약 65A가 될 것으로 계산되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 100hp급 고온초전도 모터의 계자코일 외 반경을 변화시켜서 자장특성을 검토하였다. 계자코일의 외 반경이 증가할수록 B_{\perp} 이 감소하고 B_r 이 증가하였다. 특히 계자코일의 외 반경 142 mm, 25K에서 임계전류는 설계된 모델에 비해 약 5A 증가하여 HTS 모터의 운전전류의 마진이 증가할 것으로 예상되었다. 따라서 향후 계자코일의 외 반경 변화에 따른 TR 및 진공 단열 특성을 정량적으로 계산하여 설계에 반영할 계획이다.

[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. Appl. Supercon., Vol. 7, No. 4, pp. 3858-3865, 1997

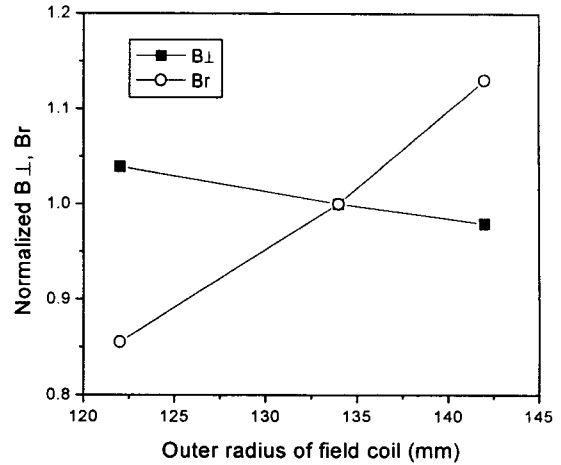


Fig. 4. Characteristics of B_{\perp} and B_r according to the variation of the outer radius of field coil

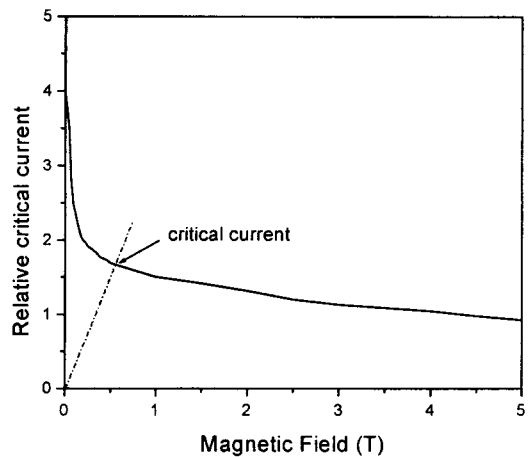


Fig. 5. Relative I_c vs. B_{\perp} at 25K

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

[2] Shipboard Superconductors, IEEE Spectrum, February, pp. 22-23, 2001

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